

УДК 629.4.072.17:621.318-047.44

А. М. МУХА^{1*}, С. В. ПЛАКСІН^{2*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{3,4*}, Ю. В. ШКІЛЬ^{5*},
О. В. КІТАЄВ^{6*}, А. П. АНТОНЮК^{7*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{3*}Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Відділ систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта siv@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

^{6*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

^{7*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта radioprovodnik@gmail.com, ORCID 0009-0004-9101-1537

Аналіз передумов до створення дворежимного тягово-левітаційного модуля другого покоління

Мета. Робота спрямована на формування концепції дворежимного тягово-левітаційного модуля як базового елемента ефективної системи синхронізованого управління рухом і підвісом магнітоплану та аналіз передумов до його створення. **Методика.** Вивчено особливості функціонування та управління основними підсистемами наявного магнітолевітаційного транспорту, їх інженерні рішення в частині лінійного тягового електроприводу та магнітного підвішування. Використано теорії та методики електричної тяги, електричних машин, електротехніки, електроніки для модифікації структури та параметрів тягового лінійного приводу, системи магнітного підвішування та способів управління тягово-левітаційною системою магнітоплану. **Результати.** Поточна реалізація магнітолевітаційних транспортних систем являє собою поетапно модернізовані класичні підходи, які були доступні ще в кінці минулого сторіччя. Водночас прогрес у відновлювальній енергетиці, мікроелектроніці, низькотемпературній техніці, радіонавігації створив підґрунтя для розробки наступного покоління магнітолевітаційного транспорту, основою якого є базовий дворежимний тягово-левітаційний модуль з енергозабезпеченням від фотоелектричних перетворювачів. Показано, що поліпшення магнітолевітаційної технології можливо досягнути шляхом сутнісної інтеграції та взаємоузгодженої комбінації двох способів створення магнітної левітації – електромагнітної (EMS) та електродинамічної (EDS) – завдяки використанню принципово іншої архітектури побудови Maglev-траси – не з довгих секцій із трифазними силовими обмотками, а з дискретних модулів, які здатні виконувати задачі створення рушійної сили (режим тяги) та магнітної підвіски, причому у всьому діапазоні доступних швидкостей. Аналіз доступних сьогодні технологій дає впевненість, що створення дворежимного тягово-левітаційного модуля, як і відповідної системи управління рухом потяга, є цілком розв'язуваною задачею. **Наукова новизна.** Отримані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя для розвитку та вдосконалення процесу створення ефективного та конкурентоспроможного магнітолевітаційного наземного транспорту наступного покоління. **Практична значимість.** Побудова Maglev-транспортної системи з використанням типових дворежимних тягово-левітаційних модулів гібридного типу дозволить, по-перше, суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту за рахунок локального розміщення фотоелектричних перетворювачів і модулів, що дасть скорочення втрат на передачу енергії, а також використання відновних джерел енергії (фотоелектрична

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

розподілена енергосистема), по-друге, спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі, а по-третє, зменшити капітальні та експлуатаційні витрати шляхом використання уніфікованого базового модуля.

Ключові слова: магнітоплан; лінійний двигун; маглев; надпровідний магніт; левітація; тягово-левітаційний модуль; нуль-потоківий контур

Вступ

Останнім часом у розвинених країнах світу значне поширення отримали високошвидкісні залізниці для переміщення спеціалізованого рухомого складу з високими швидкостями до 400 км/год із заданим рівнем безпеки і комфорту. У провідних країнах світу, зокрема Китаї, Німеччині, США, Японії та Південній Кореї, проводять інтенсивні розробки зі створення транспорту наступного покоління на основі магнітної левітації, що спроможний рухатися над поверхнею землі зі швидкостями 350...800 км/год [1, 8, 16].

Магістральний магнітолевітаційний транспорт не є ані залізничним транспортом, ані авіаційним, хоча за своєю суттю це апарат, що низько літає, і використовує, на відміну від літака, позитивну аеродинамічну інтерференцію (ефект екраноплана) та електродинамічну інтерференцію (ефект магнітної левітації на основі застосування надпровідних пристроїв) транспортного засобу й опорної поверхні напрямного шляху. На сьогодні існує низка експериментальних установок і масштабних систем, наприклад, дослідницька лінія Transrapid (Німеччина), експериментальний полігон JR-maglev у префектурі Яманаші (Японія), корейський UTM, японський HSST, проект надшвидкісної пасажирської лінії Hyperloop у США. У рамках цих проєктів вивчають та вдосконалюють магнітолевітаційну (Maglev) технологію, яка має потенціал стати більш безпечним, економічним та екологічним видом транспорту порівняно з нині наявними.

Для того щоб зробити конкурентоспроможною магнітолевітаційну технологію, перш за все потрібно подолати проблему її енергоефективності, яку можливо вирішити шляхом глибокої інтеграції в Maglev-транспорт інтелектуальних енергосистем на основі сонячної та вітрової енергії [2].

Мета

Основна мета цієї роботи – закласти наукове підґрунтя для створення базового шляхового модуля наступного покоління, який може забезпечити комбінований режим роботи – режим

тяги та режим левітації на всіх етапах руху магнітоплана, та мати поліпшену енергоефективність.

Методика

Maglev-транспорт у своїй структурі має чотири основні підсистеми:

- підвіску, яка забезпечує магнітну левітацію транспортного засобу над трасою;
- привід у вигляді лінійного електродвигуна, який забезпечує переміщення потяга з одного місця в інше;
- підсистему управління рухом магнітоплана;
- підсистему, що забезпечує живлення як бортових систем транспортного засобу, так і шляхової інфраструктури.

У технічному плані магнітну левітацію класифікують на електромагнітну підвіску (EMS) [13, 17] та електродинамічну підвіску (EDS) [6, 9].

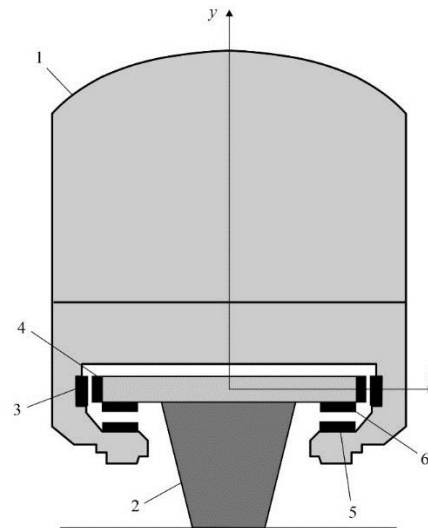


Рис. 1. Електромагнітна підвіска з розділеною левітацією та управлінням:

1 – транспортний засіб; 2 – опора траси; 3 – електромагніти бічної стабілізації (по осі x); 4 – реакційна рейка; 5 – опорний електромагніт; 6 – пакет «довгого» статора

Fig. 1. Electromagnetic suspension with separate levitation and control:

1 – vehicle; 2 – track support; 3 – lateral stabilization electromagnets (along the x-axis); 4 – reaction rail; 5 – support electromagnet; 6 – «long» stator package

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

У системах з електромагнітною підвіскою левітація реалізується на основі сили магнітного притягання між прямою та електромагнітами, як показано на рис. 1. Такий спосіб підвищення транспортного засобу за своєю суттю є нестабільним через характеристики магнітного кола [11] і потребує постійного і точного контролю за рівномірністю повітряного зазору. У системах з EMS величина повітряного зазору складає близько 10 мм, а тому на високих швидкостях реалізація такого контролю стає досить складною задачею. Водночас технічна реалізація транспортних систем на EMS простіша ніж на EDS, до того ж в електромагнітних підвісках левітація доступна у всьому діапазоні швидкостей магнітоплану (EDS у цьому плані має обмеження).

Своєю чергою системи з EMS можна розділити на два типи за реалізацією технології левітації:

- підвіска з інтегрованими левітацією та управлінням (рис. 2), реалізована в корейській UTM та японській HSST транспортних системах;
- підвіска з розділеною левітацією та управлінням (рис. 1), реалізована в німецькому Transrapid.

Варіант електромагнітної підвіски, де розділені функції створення левітації та управління положенням магнітоплану відносно шляху, добре працює на відносно високих швидкостях, але потребує більш складної системи управління з більшою кількістю контролерів. Варіант з інтегрованими левітацією та управлінням є більш простим і дешевим у реалізації, але не здатен працювати на високих швидкостях, оскільки зі збільшенням швидкості взаємний вплив підсистем левітації та управління зростає, і система перестає справлятися зі своїми задачами.

У класичному виконанні електромагнітні підвіски використовують звичайні електромагніти, але на сьогодні є всі передумови до впровадження в такий тип підвіски надпровідних електромагнітів. Високотемпературний надпровідниковий електромагніт здатен створювати значно сильніше магнітне поле порівняно зі звичайними електромагнітами, причому з відносно невеликими енергозатратами. Одним із недоліків, який ще доведеться подолати в надпровід-

них електромагнітах для успішного масового використання їх у транспортних магнітолевітаційних системах, є проблема їх охолодження.

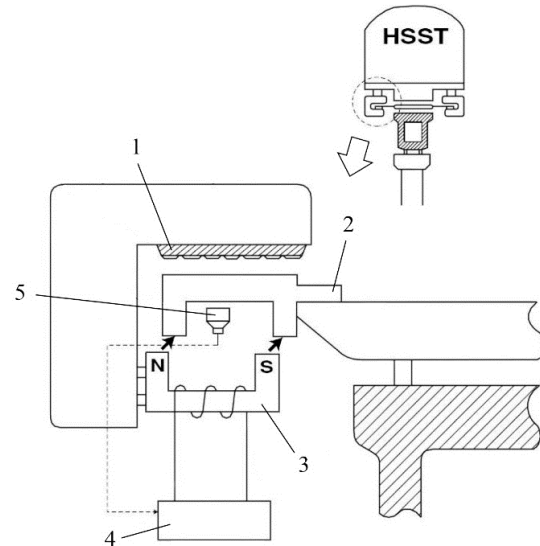


Рис. 2. Електромагнітна підвіска з інтегрованими левітацією та управлінням:

- 1 – котушка лінійного тягового двигуна; 2 – рейка;
- 3 – левітаційний магніт; 4 – підсилювач;
- 5 – датчик повітряного зазору

Fig. 2. Electromagnetic suspension with integrated levitation and control:

- 1 – linear traction motor coil; 2 – rail; 3 – levitation magnet;
- 4 – amplifier; 5 – air gap sensor

На відміну від EMS, електродинамічна підвіска EDS використовує силу відштовхування (силу Ленца) [5, 12] і зазвичай взаємодіє з пасивною наземною частиною (котушками чи навіть простою металевією пластинією) для забезпечення сили левітації і не підніметься, доки магнітоплан не досягне певної швидкості. Бортові магніти, рухаючись над шляхом, на якому знаходяться індукційні котушки чи звичайні пластини з провідникового матеріалу, наводять в останніх магнітне поле (рис. 3). Сила відштовхування, що є результатом взаємодії цих магнітних полів, піднімає магнітоплан і забезпечує йому стійку левітацію. Системи з EDS характеризуються високою магнітною стабільністю і не потребують контролю за повітряним зазором, величина якого складає в середньому 100 мм. Значна величина повітряного зазору і низька чутливість до зміни навантаження робить цей тип підвіски ефективним для високошвидкісних систем та вантажних перевезень.

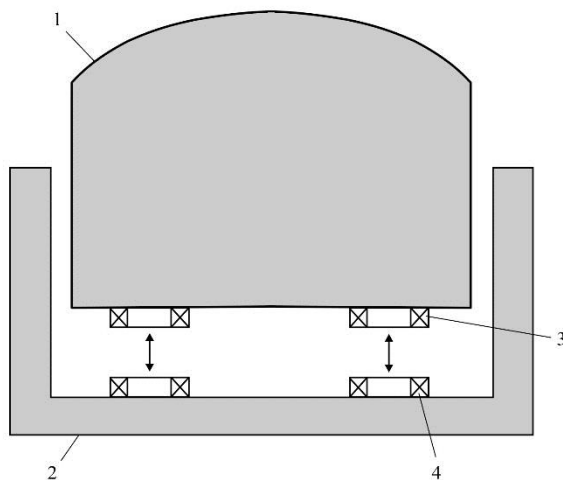


Рис. 3. Електродинамічна підвіска (EDS) з використанням надпровідникових магнітів (SC):

1 – транспортний засіб; 2 – шлях; 3 – бортові котушки намагнічування; 4 – індукційні котушки

Fig. 3. Electrodynamics suspension (EDS) using superconducting magnets (SC):

1 – vehicle; 2 – track; 3 – side magnetization coils; 4 – induction coils

Однак системи з EDS мають суттєвий недолік: щоб отримати достатній струм в індукційній котушці 4 (рис. 3), магнітоплан повинен мати швидкість не нижче 100 км/год, тільки за цієї умови сили відштовхування достатньо для надійної левітації.

За конструкцією бортового магніту електродинамічна підвіска може бути двох типів: із постійними магнітами (PM) та з надпровідниковими магнітами (SC). Системи EDS з PM прості за конструкцією і не потребують живлення, однак їх використовують для малих систем через низьку потужність. Друга група конструкцій EDS з надпровідниковими бортовими електромагнітами стала можливою з розробкою надпровідних магнітних матеріалів та створення електромагніту з достатньою напруженістю магнітного поля. Відкриття і безперервний прогрес у виготовленні куператних високотемпературних надпровідних (BTC) матеріалів створили широкі можливості для розвитку систем EDS із SC [7, 15], а саме такі матеріали можна використовувати в умовах сильнішого магнітного поля та більшої робочої температури, що дає більшу силу левітації та зменшення вартості криогенного компонента системи. Водночас системи EDS із SC більш складні та потребують гелієвих

холодильників, що є необхідним компонентом для забезпечення роботи надпровідникового бортового електромагніту.

Найбільш перспективною вважають електродинамічну підвіску (EDS) із надпровідниковими бортовими електромагнітами (SC), саме з таким типом підвіски японський маглев установив і досі утримує світовий рекорд зі швидкості.

У нивних транспортних системах на базі маглев-технології підсистема, що створює левітацію, відокремлена від підсистеми, що забезпечує лінійний рух магнітоплану, вони працюють паралельно та синхронізуються підсистемою управління рухом.

У магнітолевітаційних транспортних системах для створення сили, що рухає транспортний засіб, застосовують лінійні тягові двигуни двох типів: лінійний асинхронний двигун (LIM) та лінійний синхронний двигун (LSM).

Принцип роботи LIM аналогічний класичному асинхронному двигуну з обертовим ротором: магнітне поле первинної частини, що змінюється в часі і просторі через повітряний зазор, індуктує електрорушійну силу у вторинній частині (котушки або звичайний лист із провідного матеріалу). Під дією цієї електрорушійної сили у вторинній частині протікає струм, який взаємодіє з магнітним потоком у повітряному зазорі і створює в такий спосіб силу (сила Лоренца), що рухає транспортний засіб. Є два типи лінійних асинхронних тягових двигунів, у яких:

- коротка первинна частина знаходиться на борту магнітоплану, а вторинна частина розміщена на напрямній шляху (SP);

- довга первинна частина знаходиться на напрямній шляху, а вторинна частина закріплена в нижній частині потяга (LP).

Перший тип двигуна (LIM SP) потребує ковзного силового контакту для передачі енергії на борт транспортного засобу, а також характеризується низькою енергоефективністю через кінцевий ефект. Серед плюсів такої конструкції – простота та відносна дешевизна вторинної частини, яка може являти собою алюмінієвий лист, укладений на напрямній шляху.

Другий тип двигуна (LIM LP) потребує значно більших капітальних затрат, оскільки на всій довжині напрямної шляху укладають котушки довгої первинної частини з відповідною ор-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ганізацією живлення. Така конструкція не потребує ковзного контакту для передачі енергії на борт магнітоплану, її можна використовувати на великих швидкостях.

Лінійний синхронний двигун (LSM) має активний індуктор, конструкція якого і визначає тип LSM, в одному випадку використовують електромагніти із залізним осердям (прикладом є німецький Transrapid), а в іншому – надпровідні магніти (японський JR-maglev типу MLX). Взаємодія між магнітним полем індуктора і струмами якоря створює рушійну силу. Залежно від розташування індуктора LSM класифікують за аналогією з LIM (SP, LP): із розміщенням індуктора на борту магнітоплану або на напрямній шляху.

Лінійні асинхронні і синхронні двигуни не потребують спеціальних сенсорних технологій для їх роботи, також вони схожі за надійністю та керованістю. У високошвидкісних маглев-системах віддають перевагу синхронним лінійним двигунам із розміщенням індуктора на борту транспортного засобу через більш високі коефіцієнти корисної дії та коефіцієнт потужності ніж в асинхронних лінійних двигунів.

Високошвидкісні транспортні маглев-системи Transrapid та JR-maglev використовують лінійні синхронні двигуни з довгим статором. Особливістю таких LSM є те, що якірна трифазна обмотка (котушки секцій) отримує живлення через шляхові вимикачі від системи трифазних фідерів із довжиною фідерної зони в діапазоні 10...40 км. Загальновідомо, що довжина ділянки, яка отримує живлення, впливає на величину споживаної двигуном потужності – зі зменшенням довжини секції обмотки якоря суттєво підвищуються енергетичні показники лінійного двигуна. Коротка секція якірної обмотки лінійного двигуна в сучасних транспортних системах реалізована не була, тому що потребувала значного підвищення вимог до надійності та швидкодії шляхових вимикачів, які на момент введення в експлуатацію отримати було неможливо.

Оскільки магнітоплан фактично летить над напрямною шляхопроводу, то така система потребує певного зусилля в поперечному напрямку відносно напрямку руху для запобігання його бічного зсуву. Як і у випадку з підвіскою, стабілі-

зацію потяга можна здійснювати електромагнітним шляхом силами магнітного відштовхування або притягання [14].

Система шляхових котушок із нульовим потоком (NF), яка має дві котушки з компенсацією потоку, була запропонована Паулеом і Денбі [10].

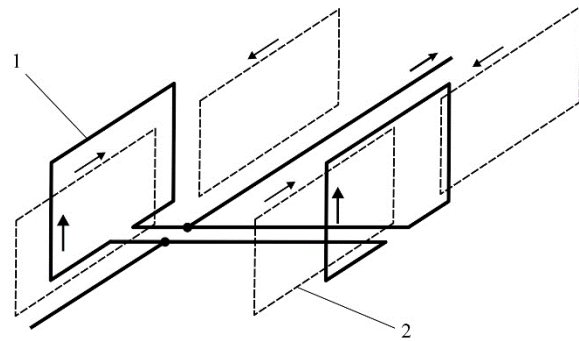


Рис. 4. Котушки тягового приводу японського JR-maglev типу MLU-002:

- 1 – котушка лінійного тягового двигуна;
- 2 – котушка надпровідникового магніту

Fig. 4. Traction drive coils of the Japanese JR-maglev type MLU-002:

- 1 – linear traction motor coil;
- 2 – superconducting magnet coil

Застосування магнітної сили відштовхування для поперечної стабілізації магнітоплану показано на рис. 4. Дві котушки лінійного тягового двигуна 1 установлені з лівого та правого боків напрямної та з'єднані між собою електрично. Котушки надпровідникового магніту 2, рухаючись повз котушки 1, наводять у кожній із них електрорушійну силу, коли транспортний засіб знаходиться по центру напрямної, повітряні зазори між ним і боковими стінками однакові, а значить, електрорушійні сили лівої і правої котушки однакові і компенсують одна одну. Якщо магнітоплан зміщується відносно напрямної у будь-який бік, електрорушійні сили стають нерівними, і під дією їх різниці виникає струм, який у котушці, до якої потяг став ближче, створює додаткову магніторушійну силу, під дією якої потяг повертається в центральне положення.

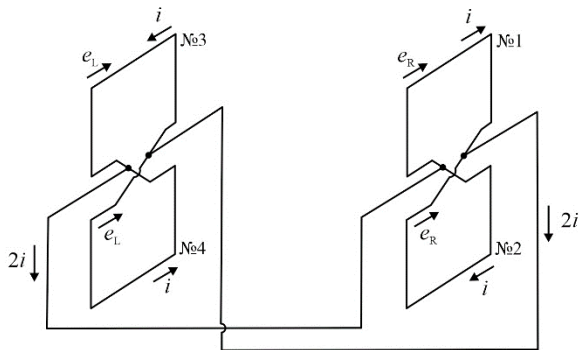


Рис. 5. Котушки левітації в японському JR-maglev типу MLX

Fig. 5. Levitation coils in the Japanese JR-maglev MLX type

Подальшим розвитком ідеї шляхових котушок із нульовим потоком є з'єднання левітаційних котушок, що вмонтовані в протилежні бокові стінки напрямної, як показано на рис. 5. У кожній із бічних стінок розміщено по дві котушки, наприклад, на лівій стінці дві вертикально розміщені котушки № 3 і 4, коли магнітна вісь надпровідникового бортового магніту знаходиться чітко між цими котушками, їх електро-рушійні сили однакові. У випадку зміни вертикального положення магнітоплану рівність електро-рушійних сил між котушками №3 і 4 порушується, різниця цих електро-рушійних сил створює циркулювальні струми, що і становлять додаткову магніторушійну силу. Величина цієї додаткової магніторушійної сили пропорційна струму, а напрямком компенсує відхилення від заданого вертикального положення магнітоплану. Така схема увімкнення магнітолевітаційних котушок (рис. 5) забезпечує стабілізацію транспортного засобу як у поперечному напрямку, так і по висоті, тобто фактично діє як повноцінна спрямовувальна система.

На лінії Yamanashi в Японії на потягах JR-maglev типу MLX застосовують електро-динамічну підвіску з надпровідниковими електро-магнітами, де шляхові подвійні левітаційні котушки NF-типу розміщено в бічних стінках шляхопроводу.

Ескіз основних її частин показано на рис. 6. Пара вертикальних левітаційних котушок із нульовим потоком замкнута сама на себе, і струм утворюється лише індукцією, коли транспортний засіб проїжджає повз.

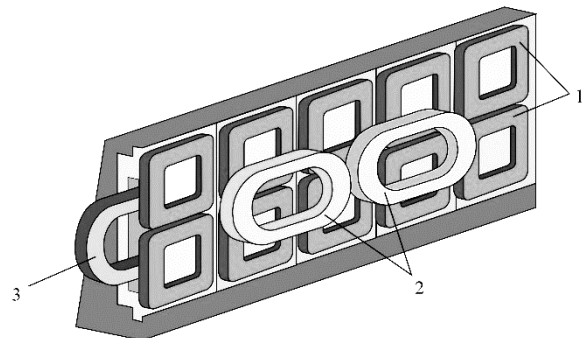


Рис. 6. Ескіз основних частин системи EDS з SC-NF (одна сторона напрямної):

- 1 – подвійна левітаційна котушка (NF);
- 2 – котушки надпровідного бортового електромагніту (SC);
- 3 – тягова котушка лінійного двигуна (LSM)

Fig. 6. Sketch of the main parts of the EDS system with SC-NF (one side of the guide):

- 1 – double levitation coil (NF);
- 2 – superconducting side electromagnet coils (SC);
- 3 – linear motor traction coil (LSM)

У поїздах Transrapid електромагніти бічної стабілізації 3 (рис. 1) закріплені з обох боків транспортного засобу, а реактивні рейки 4 (рис. 1) – на бічних стінках напрямної. Взаємодія поля електромагніту з вихровими струмами реактивної рейки дозволяє утримувати магнітоплан у центрі траси.

Використання сил магнітного притягання для стабілізації транспортного засобу суттєво ускладнене на високих швидкостях, оскільки процеси управління положенням магнітоплану в поперечному напрямку відносно напрямку руху і левітацією є взаємопов'язаними. Прикладом застосування такого підходу є транспортні системи HSST та UTM, які працюють на низьких та середніх швидкостях.

На сьогодні існує ціла низка експериментальних установок і масштабних систем на основі маглев-технології. У провідних країнах світу роботи зі створення комерційних проєктів Maglev-ліній тільки інтенсифікуються, оскільки Maglev-технологія стала потужним засобом розвитку транспортної галузі та економіки в цілому [8].

Результати

Фактично, якщо йдеться про перспективний наземний магнітолевітаційний транспорт, то для високошвидкісних систем найкращим рішенням

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

є використання електродинамічної підвіски шляхом позбавленої її суттєвого недоліку – недостатньої підйомної сили на малих швидкостях (до 100...150 км/год). Указаний недолік у проєкті JR-maglev типу MLX (Японія) подолано додаванням до конструкції магнітоплану колісних опорних систем, а на напрямній – рейок, по яких і рухається транспортний засіб на етапах розгону та гальмування. Таке рішення хоча й виконує свою функцію, є громіздким та неефективним. Значно більший інтерес представляє можливість поєднання сильних сторін обох типів підвісок EMS і EDS в одному рішенні, що можливо лише за умови принципово іншої архітектури Maglev-траси.

Базовий дворежимний тягово-левітаційний модуль повинен виконувати такі функції:

- створювати рушійне зусилля;
- забезпечувати левітацію у всьому діапазоні швидкостей магнітоплану;
- стабілізувати транспортний засіб відносно напрямної шляху.

Для реалізації вищевказаних функцій можна застосувати пару шляхових подвійних котушок NF-типу, які встановлюють навпроти в бічних стінках шляхопроводу з модифікацією їх конструкції таким чином:

- вертикально розміщені котушки кожної сторони модуля вмикаються між собою через власний швидкодійний напівпровідниковий комутаційний вузол, який забезпечує дві електричні схеми їх з'єднання. Конфігурації «0» відповідає тяговий режим, а конфігурації «8» – режим левітації [13];

- вертикальні пари котушок, що розміщені на протилежних стінках шляхопроводу, з'єднують через напівпровідниковий комутаційний вузол та утворюють нуль-потоківий контур для компенсації бокового зміщення магнітоплану;

- котушки модуля залежно від режиму роботи можуть бути активними, тобто отримувати живлення, або пасивними із замиканням на себе.

Режим левітації, коли котушки модуля утворюють конфігурацію «8» (рис. 7), має дві фази:

- за першої швидкості магнітоплану не достатньо, щоб наведені струми створили необхідну для польоту силу левітації. У цьому випадку на котушки модулів, у межах довжини магнітоплану, подають від зовнішнього джерела постійний струм, аби підняти транспортний засіб

на висоту 5...щоб мм над напрямною шляху. У міру розгону частина модулів переходить у тяговий режим, бо зростає складова сили левітації від наведеного струму⁴

– за другої в разі досягнення певної швидкості в тих модулях, які відповідають за створення левітації, котушки замикаються на себе, і їх живлення припиняється, тобто вони стають пасивними, а струм утворюється лише індукцією, коли транспортний засіб проїжджає повз.

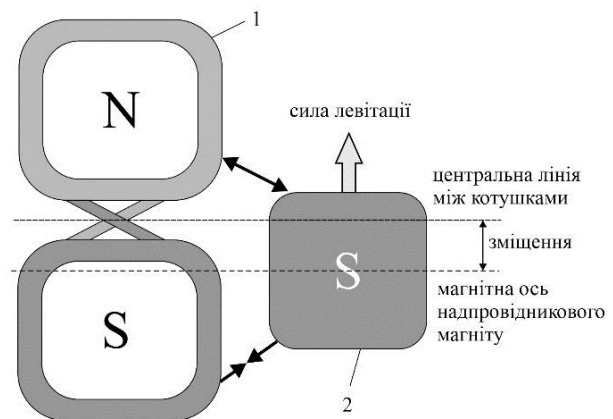


Рис. 7. Робота дворежимного тягово-левітаційного модуля в режимі левітації:

1 – подвійна котушка шляхового модуля з конфігурацією «8»; 2 – котушка надпровідного бортового електромагніту (SC)

Fig. 7. Operation of the dual-mode traction-levitation module in levitation mode:

1 – double coil of the track module with an «8» configuration; 2 – coil of the superconducting side electromagnet (SC)

Таким чином, маємо гібридний режим роботи підвіски: у діапазоні низьких швидкостей модуль реалізує електростатичний спосіб левітації, а в разі переходу до зони високих швидкостей – електродинамічний спосіб підвищення магнітоплану.

У режимі тяги котушки модуля мають конфігурацію «0» (рис. 8) та стримують змінну трифазну напругу, регульовану за амплітудою та частотою. Ця напруга формується методом широтно-імпульсної модуляції напівпровідниковим перетворювачем у складі модуля.

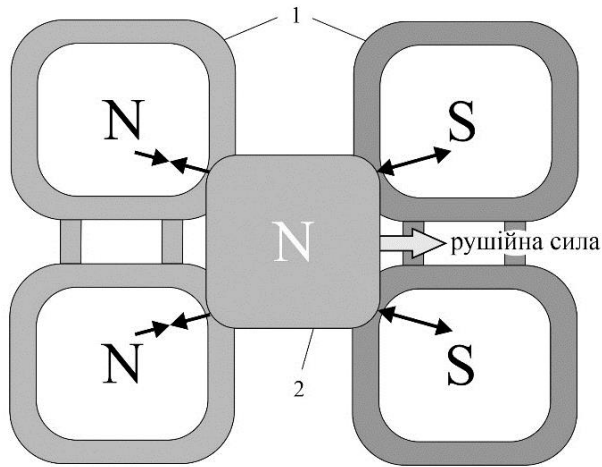


Рис. 8. Робота дворежимного тягово-левитаційного модуля в режимі тяги:

1 – подвійні котушки шляхового модуля з конфігурацією «0»;

2 – котушка надпровідного бортового електромагніту (SC)

Fig. 8. Operation of the dual-mode traction-levitation module in traction mode:

1 – double coils of the track module with configuration «0»;

2 – coil of the superconducting side electromagnet (SC)

Суттєвою відмінністю пропонованого дворежимного тягово-левитаційного модуля від наявних концепцій є те, що в активному стані перебувають тільки ті тягові модулі, у зоні дії яких знаходиться магнітоплан. Така пляма активності довжиною трохи більшою за рухомий склад рухається відносно шляхової структури зі швидкістю екіпажа.

Однак саме по собі зменшення довжини секцій лінійного синхронного тягового електродвигуна в разі традиційного способу їх живлення не вирішує задачі зменшення енергетичних втрат, оскільки фідери залишаються значної довжини та зберігають значну потужність, що проходить через них. Тільки живлення окремого модуля від власного автономного джерела енергії та з відповідною системою управління дозволить вирішити проблему енергоефективності. Таким джерелом енергії може слугувати розподілена фотоелектрична система. Перспективи застосування сонячної енергетики для живлення високошвидкісного магнітолевитаційного транспорту детально проаналізовано в роботі [4].

Наукова новизна та практична значимість

Отримані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя для розвитку та вдосконалення процесу створення ефективного та конкурентоспроможного магнітолевитаційного наземного транспорту наступного покоління. Побудова Maglev-транспортної системи з використанням типових дворежимних тягово-левитаційних модулів гібридного типу дозволить, по-перше, уніфікувати шляхову структуру; суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту, по-друге, спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі, а по-третє, зменшити капітальні та експлуатаційні затрати.

Висновки

Поточна реалізація магнітолевитаційних транспортних систем являє собою поетапно модернізовані класичні підходи, які були доступні ще в кінці минулого сторіччя. Водночас прогрес у відновлювальній енергетиці, мікроелектроніці, низькотемпературній техніці, радіонавігації створив підґрунтя для розробки наступного покоління магнітолевитаційного транспорту основою якого є базовий дворежимний тягово-левитаційний модуль з енергозабезпеченням від фотоелектричних перетворювачів.

Дворежимний тягово-левитаційний модуль здатний, залежно від сигналу системи управління рухом потяга, виконувати задачі створення рушійної сили (режим тяги) і підвіски, причому у всьому діапазоні швидкостей.

Побудова Maglev-транспортної системи з використанням таких типових дворежимних тягово-левитаційних модулів гібридного типу дозволить:

- суттєво поліпшити енергетичні показники такого виду транспорту за рахунок локального розміщення фотоелектричних перетворювачів і модулів зі скороченням втрат на передачу енергії, а також використання відновних джерел енергії;

- спростити конструкцію шляхової структури за рахунок інтеграції функцій створення левітації та тяги в одному вузлі;

– зменшити капітальні та експлуатаційні витрати за рахунок використання уніфікованого базового модуля.

Аналіз доступних технологій дає впевненість, що створення дворежимного тягово-левітаційного модуля, як і відповідної системи управління рухом потяга, є цілком розв’язуваною задачею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Геєць В. М., Волошин О. І., Дзензерський В. О., Никифорок О. І. *Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління*. Київ, 2020. 254 с.
2. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Толдаев В. Г., Шкіль Ю. В. *Интеграция магнитолевитационной магистрали и распределенной солнечной электростанции: монография*. Киев : Наукова думка, 2019. 244 с.
3. Муха А. М., Плаксин 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. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
4. Устименко Д. В. Перспективи застосування фотоелектричних систем для енергозабезпечення магніто-левітаційного високошвидкісного транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. Вип. 29. С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.15802/tst2025/325476>
5. Davey K. R. Electrodynamic Maglev coil design and analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, No. 5. P. 4227–4229. DOI: <http://doi.org/10.1109/20.619718>
6. Fujiwara S. Characteristics of EDS magnetic levitation having ground coils for levitation arranged on the side wall. *Electrical Engineering in Japan*. 1988. Vol. 108, No. 3. P.–110. DOI: <http://doi.org/10.1002/eej.4391080312>
7. Gong T., Ma G., Cai Y., Qian H., Li J., Deng Y., Zhao Z. Calculation and optimization of propulsion force of a real-scale REBCO magnet for EDS train. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, No. 5. P. 1–6. DOI: <http://doi.org/10.1109/TASC.2019.2901564>
8. Kircher R., Palka R., Fritz E., Eiler K., Witt M., Blow L., Klühspies J. *Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. Germany, DC : The International Maglev Board Research Series, 2018. Vol. 2. 19 p.
9. Powell J. R., Danby G. T. Maglev vehicles-raising transportation advances of the ground. *IEEE Potentials*. 1996. Vol. 15. Iss. 4. P. 7–12. DOI: <http://doi.org/10.1109/45.539957>
10. Powell J. R., Danby G. T. Magnetic suspension for levitated tracked vehicles. *Cryogenics*. 1971. Vol. 11. Iss. 3. P. 192–204. DOI: [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(71\)90311-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(71)90311-0)
11. Riches E. Will maglev lift off? *IEE Review*. 1988. Vol. 34. Iss. 11. P. 427–430. DOI: <https://doi.org/10.1049/ir:19880177>
12. Rote D. M., Yigang Cai. Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002. Vol. 38, No. 2. P. 1383–1390. DOI: <http://doi.org/10.1109/20.996030>
13. Sinha P. Design of a magnetically levitated vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1984. Vol. 20. Iss. 5. P. 1672–1674. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063552>
14. Wang S., Li H., Wang L., Huang H., Deng Z., Zhang W. Suspension parameters optimization of HTS maglev under random vibration. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 31. Iss. 8. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3094427>
15. Weijers H.W. *High-Temperature Superconductors in High-Field Magnets*: PhD thesis. University of Twente, 2009. 195 p. DOI: <https://doi.org/10.3990/1.9789036528498>
16. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. The International Maglev Board, 2018. 44 p.
17. Yamamura S. Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1976. Vol. 12. Iss. 6. P. 874–878. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059125>

A. M. MUKHA^{1*}, S. V. PLAKSIN^{2*}, D. V. USTYMENKO^{3,4*}, YU. V. SHKIL^{5*},
O. V. KITAYEV^{6*}, A. P. ANTONIUK^{7*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186.

^{3*}Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Dep. of control systems in vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail yvs@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

^{6*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

^{7*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail radioprovodnik@gmail.com, ORCID 0009-0004-9101-1537

Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module

Purpose. This work aims to develop a concept for a dual-mode traction-levitation module as a basic element of an effective system for synchronized control of the motion and suspension of a maglev train and to analyse the prerequisites for its creation. **Methodology.** The features of the functioning and control of the main subsystems of the existing maglev transport, their engineering solutions in terms of linear traction electric drive and magnetic suspension were studied. Theories and methods of electric traction, electric machines, electrical engineering, and electronics were used to modify the structure and parameters of the traction linear drive, the magnetic suspension system, and the methods of controlling the traction-levitation system of the maglev. **Finding.** The current implementation of magnetic levitation transport systems represents a step-by-step modernization of classic approaches that were available at the end of the last century. At the same time, progress in renewable energy, microelectronics, low-temperature technology, and radio navigation has laid the foundation for the development of the next generation of magnetic levitation transport, based on a basic dual-mode traction-levitation module powered by photovoltaic converters. It is shown that improvements in maglev technology can be achieved through the essential integration and coordinated combination of two methods of creating magnetic levitation—electromagnetic (EMS) and electrodynamic (EDS)—thanks to the use of a fundamentally different architecture for the construction of the Maglev track—not from long sections with three-phase power coils, but with discrete modules capable of performing the tasks of creating propulsive force (traction mode) and magnetic suspension, across the entire range of available speeds. An analysis of currently available technologies gives confidence that the creation of a dual-mode traction-levitation module, as well as a corresponding train motion control system, is a completely solvable problem. **Originality.** The results obtained provide a scientific basis for the development and improvement of the process of creating an effective and competitive next-generation magnetically levitated ground transportation system. **Practical value.** Building a Maglev transport system using standard dual-mode hybrid traction-levitation modules will, first, significantly improve the energy performance of this type of transport by locally placing photovoltaic converters and modules, which will reduce energy transmission losses, as well as the use of renewable energy sources (photoelectric distributed energy system), secondly, simplify the design of the track structure by integrating the functions of levitation and traction in a single node, and thirdly, reduce capital and operating costs through the use of a unified base module.

Keywords: magnetoplane; linear motor; maglev; superconducting magnet; levitation; traction-levitation module; zero-flow circuit

REFERENCES

1. Heyets, V. M., Voloshyn, O. I., Dzenzerskyi, V. O., & Nykyforuk, O. I. (2020). *Development of the economic and scientific and technological foundations of fifth generation transport*. Kyiv. (in Ukrainian)
2. Dzenzerskyi, V. O., Plaksin, S. V., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2019). *Ergaticheskie modeli sortirovochnykh Integratsiya magnitolevitatsionnoy magistrali i raspredelennoy solnechnoy elektrostantsii: monografiya*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
3. 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*, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
4. Ustymenko, D. (2025). Prospects of application of photoelectric systems for energy supply of magnetolevitation high-speed transport. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 29, 66-71. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325476> (in Ukrainian)
5. Davey, K. R. (1997). Electrodynamic Maglev coil design and analysis. *IEEE Transactions on Magnetism*, 33(5), 4227-4229. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.619718> (in English)
6. Fujiwara, S. (1988). Characteristics of EDS magnetic levitation with ground coils for levitation arranged on the side wall. *Electrical Engineering in Japan*, 108(3), 101-110. DOI: <https://doi.org/10.1002/eef.4391080312> (in English)
7. Gong, T., Ma, G., Cai, Y., Qian, H., Li, J., Deng, Y., & Zhao, Z. (2019). Calculation and Optimization of Propulsion Force of a Real-Scale REBCO Magnet for EDS Train. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2019.2901564> (in English)
8. Kircher, R., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., Witt, M., Blow, L. & Klühspies, J. (2018). *Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail* (Vol. 2) Germany, DC: The International Maglev Board. Research Series. (in English)
9. Powell, J. R., & Danby, G. T. (1996). Maglev vehicles-raising transportation advances of the ground. *IEEE Potentials*, 15(4), 7-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/45.539957> (in English)
10. Powell, J. R., & Danby, G. T. (1971). Magnetic suspension for levitated tracked vehicles. *Cryogenics*, 11(3), 192-204. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(71\)90311-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(71)90311-0) (in English)
11. Riches, E. (1988). Will maglev lift off? *IEE Review*, 34(11), 427-430. DOI: <https://doi.org/10.1049/ir:19880177> (in English)
12. Rote, D. M., & Yigang Cai. (2002). Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems. *IEEE Transactions on Magnetism*, 38(2), 1383-1390. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.996030> (in English)
13. Sinha, P. (1984). Design of a magnetically levitated vehicle. *IEEE Transactions on Magnetism*, 20(5), 1672-1674. <https://doi.org/10.1109/tmag.1984.1063552> (in English)
14. Wang, S., Li, H., Wang, L., Huang, H., Deng, Z., & Zhang, W. (2021). Suspension Parameters Optimization of HTS Maglev Under Random Vibration. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/tasc.2021.3094427> (in English)
15. Weijers, H. W. (2009). High-Temperature Superconductors in High-Field Magnets (PhD thesis). University of Twente. (in English)
16. Wenk, M., Klühspies, J., Blow, L., Kircher, R., Fritz, E., Witt, M., & Hekler, M. (2018). *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. The International Maglev Board. (in English)
17. Yamamura, S. (1976). Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects. *IEEE Transactions on Magnetism*, 12(6), 874-878. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.1976.1059125> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2025

Прийнята до друку: 20.06.2025