

УДК 629.4.053:621.383.51

А. М. МУХА^{1*}, С. В. ПЛАКСІН^{2*}, Л. М. ПОГОРІЛА^{3*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{4*},
Ю. В. ШКІЛЬ^{5*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, 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 plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, 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 yvs@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана

Мета. Основною метою цієї роботи є формування концептуальних підходів до побудови ефективної інтегрованої системи синхронізованого керування рухом та підвісом магнітолевітаційного транспортного засобу – магнітоплана. **Методика.** У ході дослідження використано метод одночасного керування рухом і підвісом магнітолевітаційного транспортного засобу, взаємоузгоджене застосування обох способів левітації – електромагнітного та електродинамічного – через індивідуальне керування енергопостачанням кожної шляхової котушки. **Результати.** Обґрунтовано концептуальні принципи керування тягово-левітаційною системою в гібридному режимі її роботи. Розкрито взаємодію шляхової структури та транспортного засобу на електродинамічному підвісі з лінійним приводом, висвітлено особливості реалізації силової частини. **Наукова новизна.** Показано, що значного поліпшення магнітолевітаційної технології можна досягнути завдяки взаємоузгодженій комбінації електромагнітного й електродинамічного способів левітації та використання принципово іншої побудови маглев-траси – не із довгих секцій з трифазними силовими обмотками, а з дискретних коротких котушок, які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і складовим елементом (навантаженням) сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ), розміщеної уздовж шляхопроводу. До складу СШЕУ входять фотоелектричний модуль (сонячна батарея), що перетворює сонячну енергію в електроенергію, накопичувач та інвертор. Така будова робить можливим незалежне, автономне живлення кожної шляхової котушки та автономне керування нею з перемиканням або в тяговий режим, або в режим левітації. Концепція керування полягає в тому, щоб кожна шляхова котушка могла брати участь як у створенні статичного підвісу за рахунок взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітного поля шляхових котушок під час подачі на них постійного струму певної величини, так і динамічного підвісу в процесі руху поїзда в результаті взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітних полів, створюваних у шляхових котушках струмами, що надходять до них під час перетину магнітних полів бортового надпровідного магніту. **Практична значимість.** Використання такої комбінованої системи керування рухом та підвісом магнітоплана призведе до якісного поліпшення маглев-технології, збільшення ефективності та надійності високошвидкісного наземного транспорту на основі електродинамічної левітації з використанням надпровідних магнітів.

Ключові слова: магнітолевітаційний транспортний засіб; електромагнітна левітація; електродинамічна левітація; тягово-левітаційна система; комбінована система керування рухом та підвісом

Вступ

Серед різних видів високошвидкісного наземного транспорту саме магнітолевітаційний визнано найбільш перспективним. Це обумов-

лено поєднанням важливих переваг – високою енергоефективністю системи переміщення, низьким рівнем шуму в міських умовах, низькою експлуатаційною вартістю обслуговування

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

шляхопроводу (через відсутність механічного контакту типу «колесо – рейка»), доброю електромагнітною сумісністю тощо.

Інтерес до магнітолевітаційного транспорту у світі все зростає [7, 9–10]. На сьогодні цей вид транспорту вже реалізований у цілому ряді технологічно розвинених країн: у Південній Кореї (лінія до аеропорту Інчхон), Японії (у префектурі Яманаші встановлено світовий рекорд швидкості для наземного транспорту – 603 км/год), у Китаї (лінія від Шанхаю до аеропорту Пудонг) та ін. Проекти маглев-ліній на різних етапах дослідження/реалізації є і в ряді інших країн: Австралії, Індії, Ірані, Венесуелі, Бразилії, США, Канаді, Великобританії, Німеччині. Актуальність розвитку такого виду транспорту продиктована сучасними потребами суспільства в пришвидшенні доставки вантажів і людей, інтенсифікації виробничих процесів.

Аналіз сучасного стану магнітолевітаційного транспорту показує, що у світі продовжують активно розвиватися два основні способи магнітного підвісу – електромагнітний (німецька система «Трансрапід», упроваджена в Китаї) та електродинамічний (надпровідна система японської фірми «JR-MAGLEV») [1, 8]. Особливості кожного підвісу визначають і особливості відповідної системи керування рухом транспортного засобу.

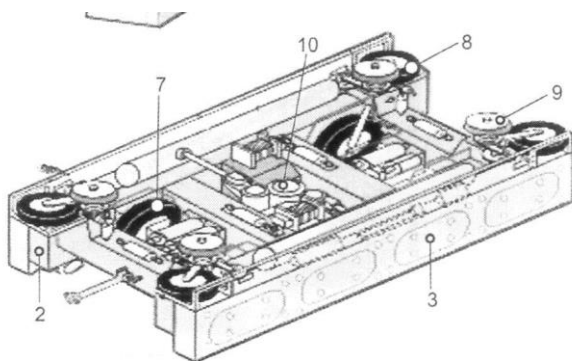


Рис. 1. Колісне шасі [1]:

- 2 – рама, до якої кріпляться надпровідні магніти;
- 3, 7 – колеса підвісу; 8 – колеса бічного напрямку;
- 9 – пневморесори, які використовує вторинна система підвісу; 10 – компресори та інше допоміжне обладнання

Fig. 1. Wheel undercarriage [1]:

- 2 – the frame to which the superconducting magnets are attached; 3, 7 – suspension wheels; 8 – lateral direction wheels;
- 9 – pneumatic springs used by the secondary suspension system; 10 – compressors and other auxiliary equipment

Насправді електромагнітний підвіс реалізується без використання коліс на ділянках розгону або гальмування поїзда, а також у статичному режимі на зупинках. Однак у разі використання цієї технології значно зростають вимоги до якості поверхні шляхового полотна, його рівності, оскільки левітаційний зазор у цьому випадку не перевищує 10 мм. Високі вимоги ставлять і до точності та швидкодії системи керування, що забезпечує необхідний зазор між днищем магнітоплана та шляховою структурою.

Електродинамічна система маглев-підвісу передбачає наявність досить важкого колісного шасі (рис. 1) на ділянках розгону та гальмування, але при цьому через значно більший левітаційний зазор (100–150 мм) відпадає необхідність у побудові прецизійної шляхової структури.

Подальше нарощування технологічного/комерційного успіху високошвидкісних транспортних маглев-засобів (магнітопланів) передбачає вдосконалення і систем магнітного підвісу, і лінійного електроприводу, і системи бортового енергозабезпечення, а також підвищення комфорту для пасажирів, насамперед – розробки ефективної системи керування рухом та підвісом магнітоплана [5, 6].

Мета

Відповідно до викладеного основною метою цієї роботи є формування концептуальних підходів до побудови комплексної системи синхронізованого керування рухом та підвісом магнітоплана.

Методика

Суттєвого вдосконалення маглев-технології можна досягти за рахунок взаємоузгодженого поєднання обох способів левітації та створення нової системи керування рухом магнітоплана та його підвісом одночасно

Для цього можна використати шляхові колушки як для динамічного, так і статичного підвісу шляхом керованої подачі в них певної енергії. Така можливість відкривається в разі застосування принципово іншої побудови маглев-траси (шляхопроводу) – не з довгих секцій (довжиною аж до 1 км, як це роблять зараз) із

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

трифазними силовими обмотками, а з дискретних коротких котушок (довжиною до 2 м), які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і навантаженням розміщених уздовж шляхопроводу енергоустановок, що живляться від сонячних батарей [2]. Ця будова є втіленням інтеграції магнітолевітаційної магістралі та розподіленої сонячної електростанції (рис. 2).

У наявному проєкті надпровідного електродинамічного підвісу (Японія) тягові секції лінійного двигуна монтують у бічних стінках шляхопроводу (рис. 3, а), при цьому застосовують удосконалений спосіб формування трифазних тягових котушок із кабелів (рис. 3, б).



Рис. 2. Інтеграція магнітолевітаційної магістралі та розподіленої сонячної електростанції

Fig. 2. Integration of the magnetolevitation highway and the distributed solar power plant

Результати

Під час побудови маглев-траси за запропонованим нами способом кожна шляхова котушка є складовим елементом (навантаженням) сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ), до складу якої входять фотоелектричний модуль (сонячна батарея), накопичувач та інвертор (рис. 4). Така будова робить можливим незалежне, автономне живлення кожної шляхової котушки та автономне керування нею.

Уздовж шляхової структури для транспортного засобу на електродинамічному підвісі з лінійним приводом розміщують секції статорної обмотки лінійного синхронного тягового електродвигуна. Кожна така секція складається зі шляхових котушок, кожен шляхову котушку живить електроенергією автономне джерело, причому рух транспортного засобу регулює

система керування, що забезпечує своєчасне вмикання й вимикання кожної наступної шляхової котушки (а якщо рух назад, то попередньої). Автономне джерело енергії (рис. 4) складається з фотоелектричної установки Φ для перетворення сонячної енергії в енергію електричного струму, інвертора для перетворення енергії електричного струму I та накопичувача енергії H .

а – а



б – б

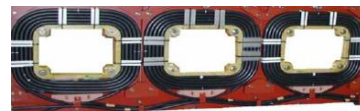


Рис. 3. Надпровідний електродинамічний підвіс:
а – бічні стінки шляхопроводу;
б – котушка кабельного типу

Fig. 3. Superconducting electrodynamic suspension:
а – side walls of the overpass; б – cable-type coil

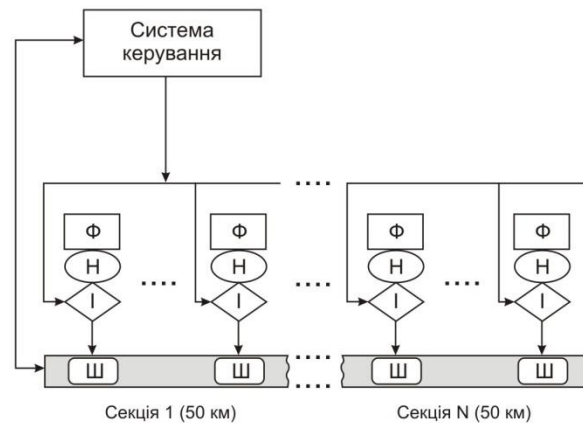


Рис. 4. Структурна схема електропостачання лінійного двигуна маглев-транспортру

Fig. 4. Structure diagram of linear motor power supply of maglev vehicles

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Система керування здійснює інформаційний взаємозв'язок між шляховими котушками III шляхової структури та навігаційною підсистемою (на рис. 4 не показано), яка контролює місце перебування екіпажа в будь-який момент часу. У результаті досягається своєчасне вмикання й вимкнення шляхових котушок. Інвертор I забезпечує шляхову котушку III електричною енергією заданої форми й частоти. Пласка панель фотоелектричної установки розташована горизонтально або під оптимальним кутом для заданих координат розташування. Як накопичувач енергії використано акумуляторну батарею. Надлишок електроенергії надходить до зовнішньої енергосистеми, що функціонує за принципом інтелектуальної мережі «Smart Grid» [2].

Потужності сонячного випромінювання, що досягає землі в умовах України, достатньо для енергозабезпечення кожного метра шляхової структури від фотоелектричної установки з площею панелі 3 м². Кожна фотоелектрична установка забезпечує електричною енергією одну шляхову котушку, розмір якої Δ вздовж шляхової структури може бути від 0,5 до 2 м. Це означає, що для однієї шляхової котушки розміром Δ м досить однієї фотоелектричної установки з площею панелі $S=3\Delta$ м², або набагато більше залежно від ККД перетворення сонячного випромінювання [2]. Тоді маглев-транспорт буде забезпечено електроенергією в такому обсязі: для однієї тонни вантажу пропускна здатність шляху дорівнює 1,5–2,6 хв за умови, що вказані фотоелектричні установки мають ККД $\approx 10\%$. Розрахунки проведено для високошвидкісного поїзда масою 400 т (10 вагонів), здатного розвивати швидкість 500 км/год. При цьому кожна шляхова котушка характеризується питомою енергією споживання до $0,08 \times 1,5 \Delta$ Вт·год/т·м [3]. Якщо обрати накопичувачем свинцево-кислотну акумуляторну батарею напругою 12 В, ємністю 200 А·год, то її вистачить для роботи автономного джерела енергії протягом цілого року, а накопиченої за один сонячний день енергії вистачить на 12 хмарних днів, якщо такі раптом настануть [4]. Розрахунки виконано для площини панелей фотоелектричних установок, розташованих горизонтально, без узяття до уваги широти місцевості й особливостей сонячного

випромінювання, яке досягає перетворювачів енергії. Енергетичну ефективність розподіленої фотомережі можна підвищити за рахунок раціонального розташування панелей фотоелектричних установок уздовж шляхової структури.

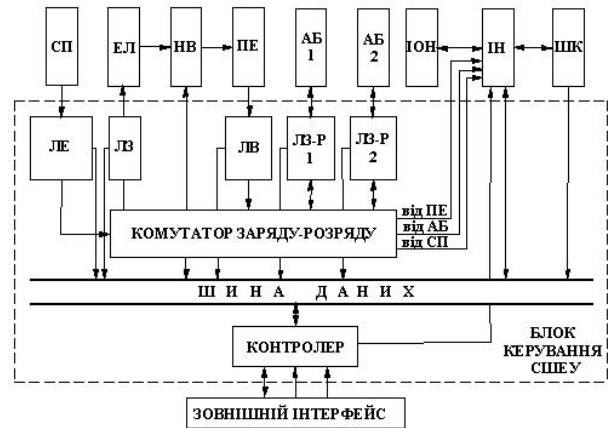


Рис. 5. Структурна схема сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ):

СП – сонячна панель; ЕЛ – електролізер; НВ – накопичувач водню; ПЕ – паливний елемент; АБ – акумуляторна батарея; ІОН – іоністор; ІН – інвертор; ШК – шляхова котушка; ЛЕ – лічильник електроенергії що надходить; ЛЗ – лічильник заряду; ЛВ – лічильник витрати; ЛЗ-Р – лічильник заряду-розряду

Fig. 5. Structural diagram of the solar track power plant:

СП – solar panel; ЕЛ – electrolyzer; НВ – hydrogen accumulator; ПЕ – fuel element; АБ – rechargeable battery; ІОН – ionistor; ІН – inverter; ШК – track coil; ЛЕ – incoming electricity meter; ЛЗ – charge counter; ЛВ – flow meter; ЛЗ-Р – charge-discharge counter

В узагальненому вигляді, з урахуванням енергонакопичувачів різних типів, призначених для різних часових інтервалів, структура сонячної шляхової енергоустановки наведена на рис. 5.

Подання на шляхові короткозамкнуті котушки на стоянці і на початку руху напруги постійного струму забезпечує режим статичної левітації екіпажа над шляховою структурою. Цей режим підвісу реалізується за принципом відштовхування полюсів одного знака шляхових та бортових електромагнітних котушок. Такий підвіс виникає за умови рівності ваги потяга та підйомної сили і має добру перевагу з точки зору стабільності.

Далі йде поступовий перехід від статичного режиму роботи шляхових котушок до динамічного – режиму біжного електромагнітного по-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ля, що забезпечує потягу поступовий характер руху. Цього можна досягти збільшенням у шляхових котушках змінної компоненти магнітного поля. Слід зазначити, що в маглев-технології перехід від колісного (механічного) підвісу до магнітного відбувається автоматично під час руху завдяки змінним струмам, що надходять до шляхових котушок та створюють змінні магнітні поля, за взаємодії яких із магнітними полями бортових електромагнітів формуються левітаційні сили, які в разі досягнення певних швидкостей (близько 80–100 км/год) достатні для левітаційного підйому поїзда. Під час створення змінного магнітного поля в шляхових котушках остаточний баланс повинен бути таким, щоб підйомна сила залишалась незмінною, а отже, і зазор між поверхнею шляхопроводу та нижньою частиною транспортного засобу, а це можливо в разі збільшення струму в котушках, що забезпечують левітацію.

Таким чином, створення за рахунок частини шляхових котушок біжного магнітного поля забезпечить початкове просування потяга, і водночас призведе до появи динамічної компоненти в результуючій підйомній силі, що дозволить додатково ще частину шляхових котушок перевести в режим просування за постійного автоматичного регулювання сили струму в левітаційних котушках. Швидкість при цьому збільшується, відповідно, зростає й динамічна складова сили левітації. Це відбуватиметься до тих пір, поки не буде досягнуто швидкості, яка повністю забезпечить динамічну левітацію потяга, після чого всі шляхові котушки працюватимуть як котушки лінійного двигуна, реалізуючи при цьому його динамічний підвіс завдяки взаємодії магнітних полів бортових надпровідних електромагнітів та магнітних полів, що надходять до короткозамкнутих котушок під час руху потяга. Поступовий перехід від статичного режиму підвісу до динамічного через перерозподіл енергетичних потоків, спрямованих на відповідні котушки, проілюстровано на рис. 6.

Використання сонячної шляхової енергетичної установки дозволяє створити систему індивідуального, незалежного, автономного керування кожною котушкою шляхової структури, уводячи її то в режим статичного функціонування з безперервним відстеженням і регулюванням сили струму в ній, то в режим змін-

ного біжного магнітного поля. Таке керування, крім забезпечення статичного підвісу на стоянках поїзда, дає можливість регулювати як збільшення, так і зменшення швидкості (розгін/гальмування) аж до зупинки. Індивідуальне керування кожною дискретною котушкою істотно відрізняється від керування лінійним синхронним тяговим електродвигуном і є новацією порівняно з традиційними методами.

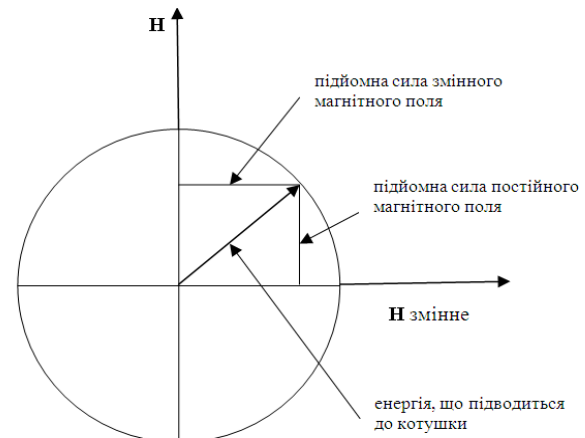


Рис. 6. Ілюстрація поступового переходу від статичного до динамічного режиму підвісу

Fig. 6. Illustration of gradual transition from static to dynamic suspension mode

Уявімо шляховий перегін у вигляді набору котушок, якими можна керувати індивідуально. Нехай довжина перегону дорівнює 50 км (рис. 7).

Кількість шляхових котушок на такому перегоні K_n дорівнює приблизно 20–30 тис. шт. Проте активно задіяними в русі будуть лише ті котушки, над якими в цей момент перебуває поїзд (насправді їх трохи більше з урахуванням невеликого запасу попереду та позаду поїзда для забезпечення безпеки руху). Якщо взяти довжину поїзда 40 м, то з урахуванням відстаней до і після поїзда це відповідає приблизно 40 активним котушкам.

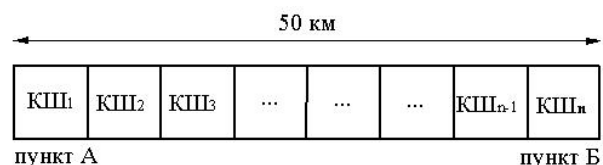


Рис. 7. Перегін у вигляді набору шляхових котушок

Fig. 7. Block in the form of a set of track coils

На початку руху вся енергія шляхових котушок спрямована на створення статичної підйомної сили, тобто всі 40 котушок працюють як постійні електромагніти. Енергія, що надходить до котушок, повинна забезпечити на розгінній ділянці попередній магнітолевітаційний підвіс із зазором між екіпажем та шляховою структурою близько 5–10 мм. Далі, наприклад, кожна 10-а із 40 котушок переходить у режим змінного біжного магнітного поля, і потяг починає рухатися. В інших 36 котушках зберігаються умови для статичного підвішування рухомого складу шляхом безперервного регулювання рівня струму. 4 котушки в режимі лінійного двигуна зсувають поїзд і тим самим забезпечують умови для виникнення в усіх котушках динамічної складової магнітолевітаційного підвісу, що враховано під час регулювання струму в котушках статичного підвісу. При цьому зменшується сумарне магнітне поле постійних магнітів (залишається 36 котушок, що працюють у режимі постійних магнітів). Переведення в режим проштовхування (propulsion) кожної восьмої (і так далі) котушки призводить до зростання швидкості, а отже, і зростання динамічної складової підвісу. У разі досягнення швидкості близько 80–100 км/год, коли динамічна складова магнітолевітаційної сили дорівнює вазі поїзда, усі котушки переходять у режим лінійного двигуна за одночасного забезпечення динамічного лінійного підвісу з його характерним зазором близько 100–150 мм.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано концепцію побудови комплексної системи керування рухом і підвісом магнітоплана. Основою значного поліпшення магнітолевітаційної технології є взаємоузгоджена комбінація двох способів магнітної левітації – електромагнітної та електродинамічної. Це можливо завдяки використанню принципово нової побудови маглев-траси. Замість довгих секцій із трифазними силовими обмотками слід використати дискретні короткі котушки, які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і навантаженням розміщених уздовж шляхопроводу енергоустановок, що живляться від сонячних батарей.

Практична цінність роботи в тому, що в разі використання такої комплексної системи керу-

вання рухом та підвісом магнітоплана досягається значне поліпшення, збільшення ефективності та надійності високошвидкісного наземного транспорту на основі електродинамічної левітації із застосуванням надпровідних магнітів.

Висновки

Таким чином, у роботі обґрунтовано концепцію нової тягово-левітаційної системи (ТЛС) гібридного типу на основі сумісного синхронізованого використання електродинамічного й електромагнітного способів левітації. Суть цієї системи полягає в тому, що магнітолевітаційну підйомну силу як у режимі статички, так і в режимі динаміки створюють одні й ті ж дискретні шляхові котушки, які входять до складу статора лінійного синхронного електродвигуна, але працюють у різних режимах завдяки відповідному керуванню з використанням широтно-імпульсної модуляції. При цьому керування здійснюється шляхом швидкодійного перемикачання між двома різними конфігураціями котушок. Таке різнопланове використання котушок можливе лише в результаті незалежного, індивідуального, автономного керування з єдиного центру кожною шляховою котушкою, що входить як навантаження до складу сонячної шляхової енергетичної установки, відповідно до поточних параметрів магнітолевітаційного підвісу та заданих режимів руху транспортного засобу (таких, як рух на підйом, розгін, гальмування).

Концепція керування полягає в тому, щоб кожна шляхова котушка могла брати участь як у створенні статичного підвісу за рахунок взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітного поля шляхових котушок під час подачі на них постійного струму певної величини, так і динамічного підвісу в процесі руху поїзда в результаті взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітних полів, створюваних у шляхових котушках струмами, що знаходяться у них під час перетину магнітних полів бортового надпровідного магніту. При цьому розгін поїзда здійснюється переведенням частини колійних котушок у тяговий режим роботи у складі лінійного синхронного двигуна. В алгоритмі керування передбачено як типові, так і позаштатні (аварійні) режими функціонування високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту під час руху по перегоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гришко В. Г., Фащевський А. В. *Високошвидкісний наземний транспорт* : курс лекцій для студентів вищих навчальних закладів залізничного транспорту. Київ : ДЕТУТ, 2014. 43 с.
2. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Толдаев В. Г., Шкиль Ю. В. *Системы управления и энергообеспечения магнитолевитирующего транспорта*. Київ : Наукова думка, 2014. 276 с.
3. Дзензерский, В. А., Плаксин С. В., Шкиль Ю. В. Фотоэлектрическая система энергообеспечения линейного двигателя магнитолевитирующего высокоскоростного наземного транспорта. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2005. № 44. С. 121–136.
4. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкиль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
5. Davydov A. Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2019. Vol. 5 (4). P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst2019545-15>
6. De Oliveira, R. A. H., Stephan R. M., Ferreira A. C., Murta-Pina J. Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56. Iss. 6. P. 6949–6956. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066>
7. Fritz E., Klühspies J., Kircher R., Witt M., Blow L. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems : Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel Rail. *Transportation Systems and Technology*. Vol. 3. P. 134–155. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>
8. Himanshu H. J. Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. P. 614–620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678>
9. 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. *The International Maglev Board, Research Series*. 2018. Vol. 2. P. 1–19.
10. 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*. Germany : The International Maglev Board, 2018. 44 p.

A. M. MUKHA^{1*}, S. V. PLAKSIN^{2*}, L. M. POHORILA^{3*}, D. V. USTYMENKO^{4*},
Y. V. SHKIL^{5*}

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

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

^{3*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

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

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

Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension

Purpose. The purpose of this work is the formation of conceptual approaches to the construction of an effective integrated system of simultaneous synchronized control of the movement and suspension of a maglev vehicle – a magnetoplane. **Methodology.** The paper uses a technique for simultaneous control of the movement and suspension of a maglev vehicle with the mutually coordinated application of both levitation methods, electromagnetic and electrodynamic, through individual control of the energy supply of each track coil. **Findings.** The conceptual control principles of a traction-levitation system in a hybrid mode of its operation are substantiated. The interaction of a track structure with a vehicle on an electrodynamic suspension with a linear drive is disclosed and the features of the implementation of the power unit are highlighted. **Originality.** It is shown that a significant improvement in maglev technology can be achieved due to the mutually coordinated combination of electromagnetic and electrodynamic methods of magnetic levitation and the use of a fundamentally different architecture for constructing a MAGLEV track. It is constructed not from long sections with three-phase power windings, but from discrete ones, they are also linear engine traction coils, and a component (load) of a solar track power plant located along the overpass. The power plant includes a photovoltaic module (solar battery) that converts solar energy into electricity, a storage device and an inverter. This construction makes possible independent supply of each travel coil and its autonomous control with the ability to switch to traction or levitation mode. The control concept is that each track coil can participate both in the creation of a static suspension due to the interaction of the magnetic field of the onboard superconducting magnet and the magnetic field of the track coils when a certain amount of direct current is applied to them, as well as the dynamic suspension provided during the train movement as a result of the interaction of the magnetic field of the onboard superconducting magnet and the magnetic fields created in the track coils by currents induced in them when the magnetic fields of the onboard superconducting magnet intersect. **Practical value.** The results are of practical value, as the use of such complex control system of the suspension and the magnetic plane movement will significantly improve the quality of MAGLEV technology, increase the efficiency and reliability of high-speed land transport based on electrodynamic levitation using superconducting magnets.

Keywords: magnetic levitation vehicle; electromagnetic levitation; electrodynamic levitation; traction-levitation system; complex movement and suspension control system

REFERENCES

1. Ghryshko, V. Gh., & Fashchevskiy, A. V. (2014). *Vysokoshvydkisnyi nazemnyi transport: kurs lektsii dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv zaliznychnoho transportu*. Kyiv: DETUT. (in Ukrainian)
2. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2014). *Sistemy upravleniya i energoobespecheniya magnitolevitiruyushchego transporta*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
3. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., & Shkil, Yu. V. (2005). *Vestnik NTU «KhPI», 44*, 121-136. (in Russian)
4. Dzenzerskiy, V. A., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Yu. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress, 1(73)*, 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
5. Davydov, A. (2019). Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology, 5(4)*, 5-15. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst2019545-15> (in English)
6. De Oliveira, R. A. H., Stephan, R. M., Ferreira, A. C., & Murta-Pina, J. (2020) Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications, 56(6)*, 6949-6956. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066> (in English)
7. Fritz, E., Kluhsbies, J., Kircher, R., Witt, M., & Blow, L. (2019). Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *Transportation Systems and Technology, 3*, 134-155. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155> (in English)
8. Himanshu, H. J. (2020). Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP), 10(10)*, 614-620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678> (in English)
9. 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. *The International Maglev Board. Research Series, 2*, 1-19. (in English)

10. 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*. Germany: The International Maglev Board. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.11.2021

Прийнята до друку: 21.03.2022