

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.05.081>

УДК 629.4.053:621.383.51

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

М.Я. Житник, <https://orcid.org/0000-0002-1761-678X>

С.В. Плаксін, <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Ю.В. Шкіль, <https://orcid.org/0000-0002-8684-5906>

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

E-mail: svp@westa-inter.com

Фізичні основи створення прецизійної системи управління магнітолевітаційним транспортом, інтегрованої з його фотоелектричною енергосистемою

Представлена академіком НАН України А.Ф. Булатом

Поступальне зростання економіки будь-якої країни передбачає розвиток високошвидкісного транспорту для задоволення потреби соціуму в скороченні часу, потрібного на переміщення людей і вантажів. Серед різних видів високошвидкісного наземного транспорту саме магнітолевітаційний транспорт (магнітоплани) визнаний найбільш перспективним. Робота присвячена інтеграції трьох перспективних наукових напрямів/технологій: магнітолевітаційного транспорту, фотоелектричного перетворення енергії та фазометричної радіонавігації. Саме ця інтеграція дає в результаті несумарний синергетичний ефект. Досягнення цілей сталого розвитку економіки Держави у межах традиційних транспортних і енергетичних технологій є проблематичним, оскільки енерговитрати транспортних систем перевищують третину споживаної енергії, а найшвидший вид транспорту — повітряний є одним із провідних забруднювачів атмосфери. У даній роботі обґрунтовується перспективний шлях розвитку МАГЛЕВ-транспорту за рахунок об'єднання в єдиній системі технологій поновлюваної енергетики та магнітолевітаційного транспорту. У роботі задіяні методи системного аналізу і декомпозиції, статистичного аналізу сонячної інсоляції, радіофізичного експерименту, комп'ютерного моделювання фотоелектричних перетворювачів енергії, алгоритмізації процесів поточного контролю і прогнозування стану енергонакопичувачів. Результатом проведених досліджень є розробка фізико-технічних основ створення новітньої прецизійної системи управління для удосконалення магнітолевітаційного транспорту. За рахунок об'єднання в єдиній системі технологій поновлюваної енергетики та магнітолевітаційного транспорту пропонується створення системи всепогодного гарантованого електроживлення на основі сонячної енергії та надійної прецизійної швидкодіючої системи керування в режимі реального часу.

Ключові слова: високошвидкісний наземний транспорт, магнітна левітація, прецизійна система управління, фазометрична радіонавігація, розподілена фотоелектрична енергосистема, енергонакопичувачі.

Ц и т у в а н н я: Дзензерський В.О., Житник М.Я., Плаксін С.В., Шкіль Ю.В. Фізичні основи створення прецизійної системи управління магнітолевітаційним транспортом, інтегрованої з його фотоелектричною енергосистемою. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2025. № 5. С. 81—91. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.05.081>

© 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/>)

Вступ. Розвиток високошвидкісного наземного транспорту (ВШНТ) обумовлений потребами соціуму у скороченні часу, що витрачається на переміщення людей та товарів. Найперспективнішим видом такого транспорту вважається магнітолевітаційний транспорт [1—3].

Інтерес до магнітолевітаційного (МАГЛЕВ) транспорту у світі постійно зростає [4]. Подальше нарощування технологічного / комерційного успіху високошвидкісних транспортних МАГЛЕВ-засобів (магнітопланів) науковці різних країн світу вбачають на шляхах удосконалення їх тягово-левітаційних систем, але головним чином — ефективної системи управління рухом та підвісом магнітоплану [5].

Незважаючи на те, що в ряді країн, наприклад, в Японії, Китаї та Південній Кореї, наразі діють різні магнітолевітаційні проекти, ціла низка наукових проблем, пов'язаних із забезпеченням надійності таких високошвидкісних «польотів» наземного транспорту (оскільки швидкості руху — близько 500 км/год!), залишається актуальною. Серед них: точність позиціонування таких високошвидкісних об'єктів, гарантованість електроживлення тягових секцій і бортової апаратури, енергоефективність електроприводу та вплив на навколишнє середовище.

Управління рухом МАГЛЕВ-поїзда зводиться до своєчасної подачі на відповідні секції тягового лінійного двигуна електричної енергії потрібної частоти у відповідності до відомого з електротехніки методу частотного регулювання моменту та швидкості електричної машини. Таке управління добре відпрацьовано і визнано досить надійним для здійснення пасажирських перевезень. Однак потрібно зазначити, що поточна реалізація діючих систем управління являє собою поетапно модернізовані класичні підходи, які фактично були доступні ще в 70-х роках минулого століття. Тому їм притаманні деякі “історичні” особливості: необхідність подачі на тягові секції значних струмів (сотні ампер), що пов'язано з втратами в довгих кабельних лініях; точність управління тяговими секціями обмежена швидкодією силових тиристорних ключів у циклоконвертерах тощо.

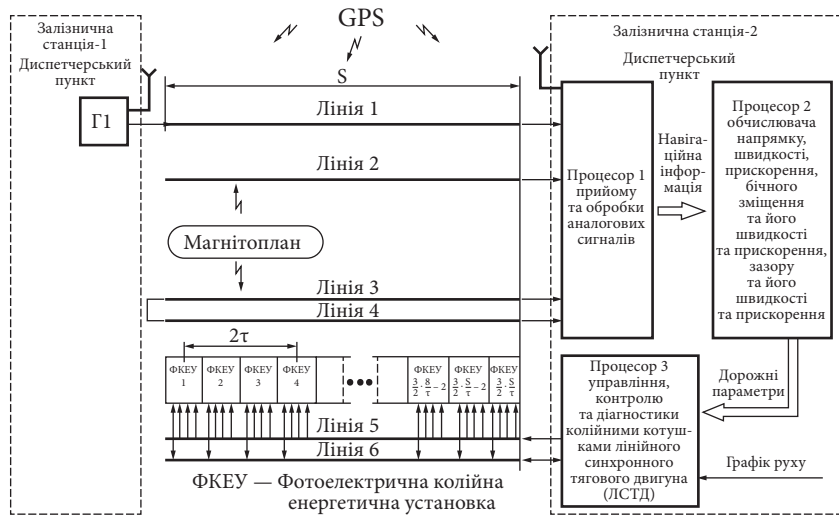
Усі ці особливості накладають ряд обмежень по надійності на таку складну багаторівневу кіберфізичну систему, якою є система управління рухом магнітоплану. При цьому прогрес у мікроелектроніці, радіонавігації і відновлювальній енергетиці за останні десятиріччя створив підґрунтя для розробки другого покоління такої системи управління. Разом з тим на новий рівень вийшов інтерес до організації руху на гіперзвукових швидкостях у вакуумних шляхопроводах [6]. Актуальним завданням є розроблення нової прецизійної безінерційної системи управління тягово-левітаційною системою магнітоплану.

Мета статті — обґрунтування перспективного шляху розвитку МАГЛЕВ-транспорту за рахунок об'єднання в єдиній системі технологій поновлюваної енергетики та магнітолевітаційного транспорту.

Результати. Побудова систем управління високошвидкісним рухом (в галузях авіоники, управління космічними і наземними транспортними засобами) спирається на радіохвильові методи. Серед них найбільш точним є фазометричний метод. Тому саме його покладено в основу розробленої авторами новітньої прецизійної системи керування рухом магнітоплану, схематичне зображення якої наведено на рис. 1.

Принцип дії цієї системи полягає у вимірі фазового зсуву високочастотного сигналу, отриманого від джерела, що знаходиться на рухомому об'єкті, по відношенню до фази еталонного сигналу системи координат. При цьому досягається значне збільшення точності позиціонування поїздів, що рухаються зі швидкістю понад 500 км/год. Авторами

Рис. 1. Схематичне зображення системи високоточного управління МАГЛЕВом з живленням від сонячної енергії



розроблена система управління рухом магнітоплану на базі прецизійної фазометричної радіонавігаційної системи, інтегрованої з фотоелектричною системою (ФЕС) його енергозабезпечення (див. рис. 1), яка дозволяє визначати місце розташування екіпажу на магнітному підвісі з точністю 10—20 см при швидкостях руху близько 500 км/год і здійснювати управління тяговими секціями лінійного двигуна синхронно з проходженням над ними магнітоплану [7].

Особливістю цієї системи є її сутнісна інтеграція з ФЕС, що відповідає пріоритетам Рамкових наукових програм Євросоюзу щодо побудови високошвидкісного наземного транспорту на основі екологічно раціональних енергосистем [8].

Важливою характеристикою системи є те, що, як доведено авторами, сонячний потенціал України дозволяє повністю забезпечити цей специфічний вид електричного транспорту “чистою” енергією [7]. З цієї метою авторами було проведено оцінку статистичних характеристик енергії потоку падаючого сонячного випромінювання на перегонах українського МАГЛЕВа (рис. 2).

Інформація про вид (тип) розподілу енергії необхідна для вирішення завдань оцінки ризиків забезпеченості сонячною енергією розподіленої енергосистеми лінійного двигуна швидкісного наземного транспорту на магнітному підвісі, оцінки реальної продуктивності фотоелектричних модулів, оптимізації характеристик гібридних вітросонячних установок, розрахунку накопичувачів автономних енергосистем тощо.

Для визначення виду розподілу щільності енергії падаючого сонячного випромінювання на території України були використані значення щоденної сонячної енергії, що надходить на горизонтальний майданчик, за період спостережень 27 років з бази даних NASA (Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0). <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>). Ця база даних містить значення щоденної інсоляції для довільної широти і довготи з кроком один градус впродовж періоду понад два десятиліття. Помилка в оцінках не перевищує 6—12 %.

Вид розподілу значень радіації визначався з використанням програмного пакета EasyFit (Version 5.3), призначеного для автоматичної селекції видів статистичних розпо-

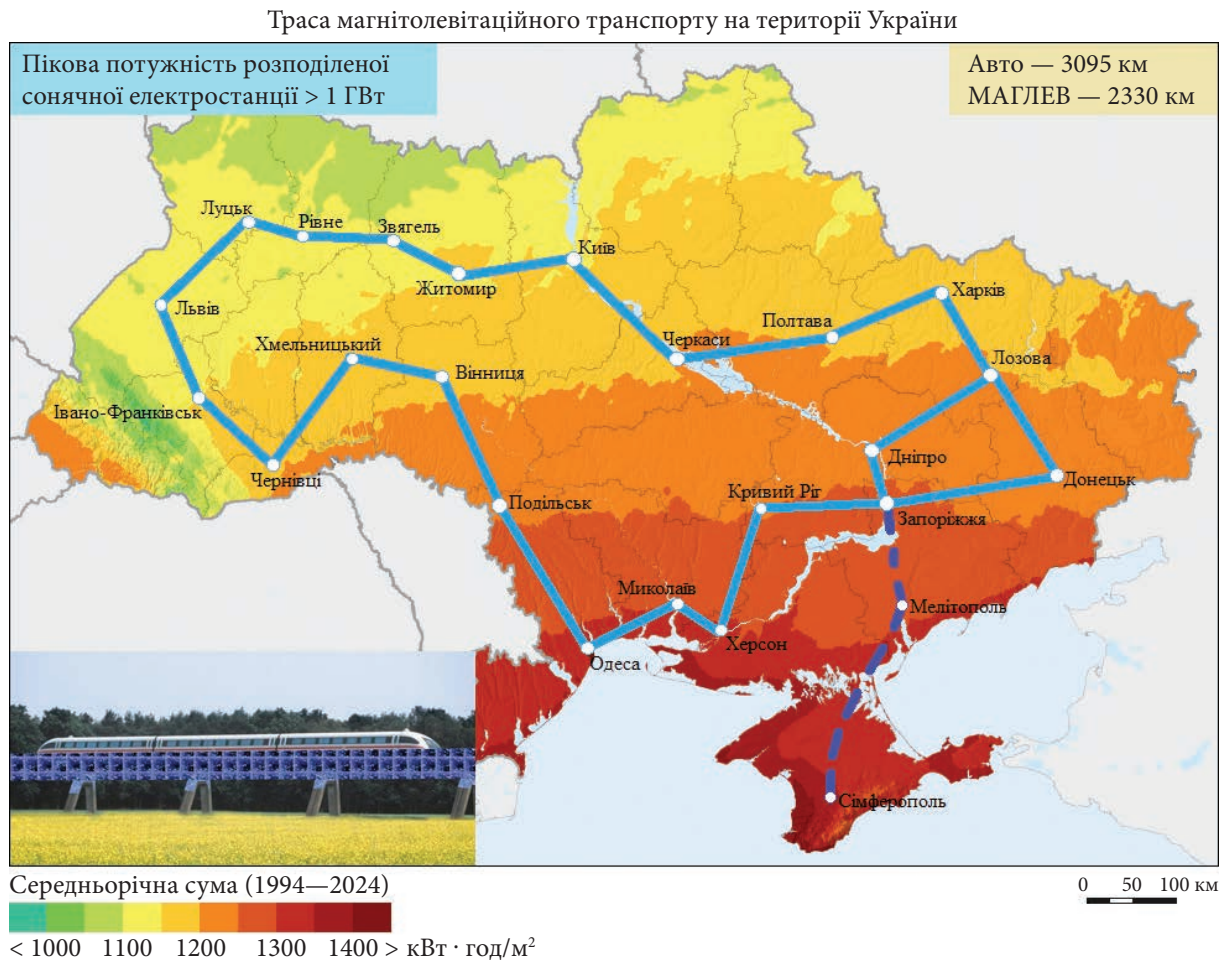


Рис. 2. Сонячний потенціал України повністю задовольняє потреби магнітолевітаційного транспорту

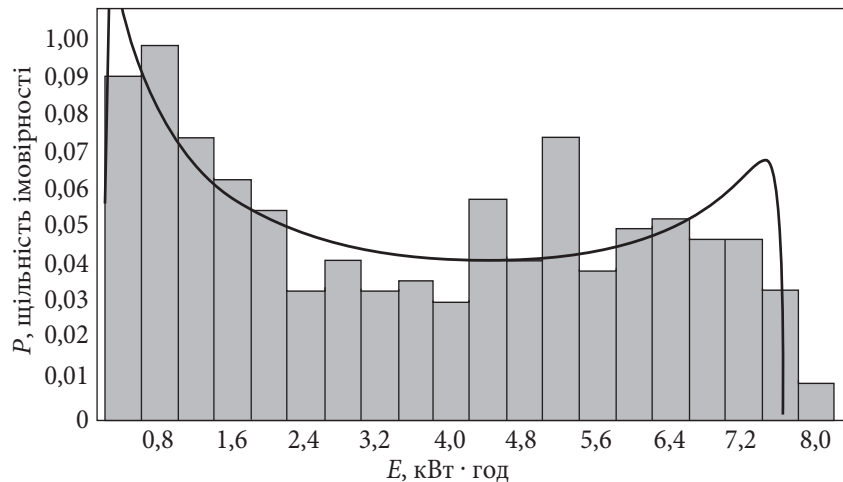
ділів. Програми пакета поєднують методи класичного статистичного аналізу та передові технології аналізу даних. Цей пакет включає 55 класів розподілів. Апроксимація розподілів здійснюється методом максимальної правдоподібності MLE (Maximum Likelihood Estimates). Тести на найкраще припасування (Goodness of fit (GOF)) здійснюються за допомогою трьох статистичних критеріїв Kolmogorov—Smirnov, Anderson—Darling та Chi—Squared. Ми обрали перший критерій, оскільки він не залежить від виду емпіричного розподілу і не накладає на нього обмежень за обсягом вибірки.

У результаті встановлено, що з найкращим наближенням густина розподілу описується параметричними розподілами Джонсона S_B . Приклад такого наближення показано на рис. 3. Розподіл Джонсона S_B описується таким виразом:

$$f(x) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x - \varepsilon)(\lambda - x + \varepsilon)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma + \delta \ln \left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda - x + \varepsilon} \right) \right]^2 \right\},$$

де δ і λ — параметри форми; γ — параметр розсіювання; ε — центр розсіювання.

Рис. 3. Гістограма енергії падаючого сонячного випромінювання та апроксимуюча її функція щільності розподілу Джонсона S_B у Дніпропетровській області: γ — 0,132165; δ — 0,48868; λ — 7,4054; ξ — 0,23221



Дво модальність розподілу Джонсона S_B на рис. 3 пояснюється наявністю двох процесів — надходженням енергії падаючого сонячного випромінювання за умов безхмарного неба та надходження енергії падаючого сонячного випромінювання хмарного неба.

Наявність стійкої геометризаци розподілу щільностей енергії потоку падаючого сонячного випромінювання по території України підвищує достовірність прогнозування ефективності роботи фотоелектричних установок. Результати проведених досліджень дозволяють обчислювати графічним методом параметри функції густини розподілу Джонсона S_B за визначеним потенціалом сонячної енергії у відомій точці стояння. Встановлення функції густини розподілу падаючої енергії сприяло виконанню дослідження з оцінки ефективності роботи фотоелектричних модулів у регіонах України.

Визначено, що річне виробництво електроенергії фотоелектричною станцією, що використовує панелі, виготовлені за технологією аморфного кремнію (a-Si) на тонких плівках, вище на 13—20 % порівняно з технологіями полі- та монокристалічного кремнію (c-Si) за інших рівних умов.

Для підвищення ефективності сонячної енергосистеми були проведені дослідження, спрямовані на покращення як характеристик її компонентів, так і балансу системи в цілому. Зокрема, виконано комп'ютерне моделювання сонячних модулів перспективних конструкцій. Справа в тому, що сонячні елементи (СЕ) з кремнію, які традиційно використовуються в фотоенергетиці, практично вичерпали свій потенціал. Найважливішим кроком у розвитку фотоенергетики стала поява СЕ на основі гетероструктур. В останні роки нові конструктивні рішення активно впроваджуються в галузі нанорозмірних технологій, наприклад, текстурування поверхонь СЕ, застосування в структурах СЕ металевих наночастинок або формування СЕ у вигляді нанодротів.

Нами проведено комп'ютерний експеримент, в якому з використанням програми Silvaco TCAD [9] були змодельовані тонкоплівкові СЕ з вертикально орієнтованими нанодротоми. Конструкція розглянутого в цьому дослідженні фотоелектричного перетворювача — це звичайний тонкоплівковий СЕ з аморфного кремнію, на освітлюваній поверхні якого сформовані вертикально орієнтовані нанодроти, структурно інтегровані з базовим СЕ [10]. Нанодроти утворюють на поверхні СЕ регулярну решітку, яка ефективно утримує

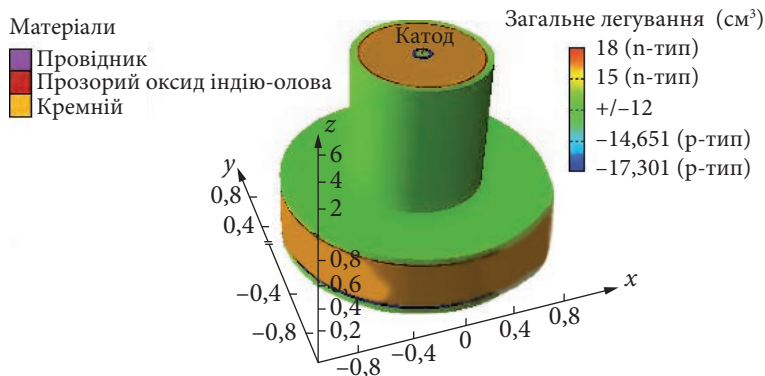


Рис. 4. Тривимірний вигляд моделі СЕ

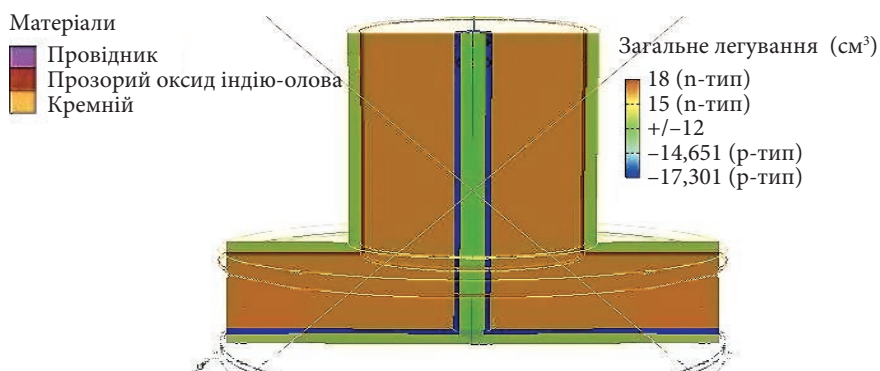


Рис. 5. Структура СЕ в поперечному перерізі

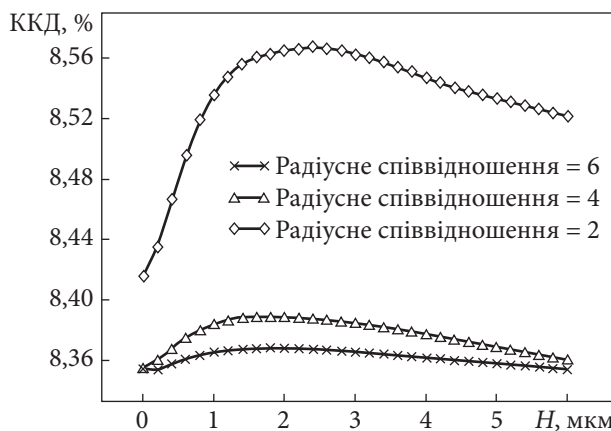


Рис. 6. Залежність ККД від висоти нанодоту

сонячне випромінювання та значно збільшує фотоактивну поверхню, особливо при похилому падинні сонячних променів.

Тривимірна модель досліджуваного СЕ зображена на рис. 4, а на рис. 5 показана структура СЕ в поперечному перерізі.

Тривимірна модель досліджуваного СЕ складається з базової р-і-п структури з традиційним розташуванням р-п переходів у горизонтальній площині та з нанодоту, який утворений коаксіальною р-і-п структурою з вертикальною орієнтацією р-п переходів. Базова

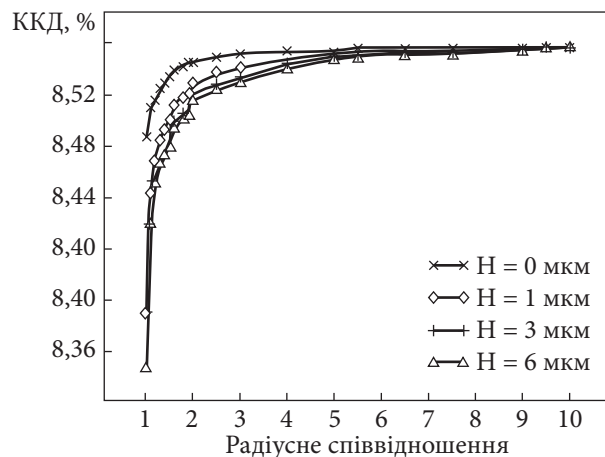


Рис. 7. Залежність ККД від співвідношення радіусів

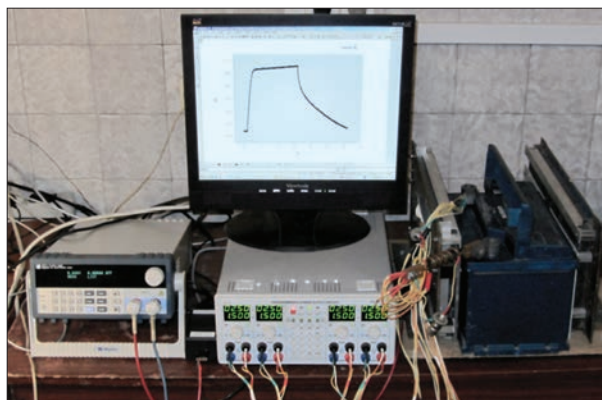


Рис. 8. Експериментальний стенд для автоматизованого контролю стану електрохімічних накопичувачів енергії імпульсним методом (укомплектований магнітною установкою)

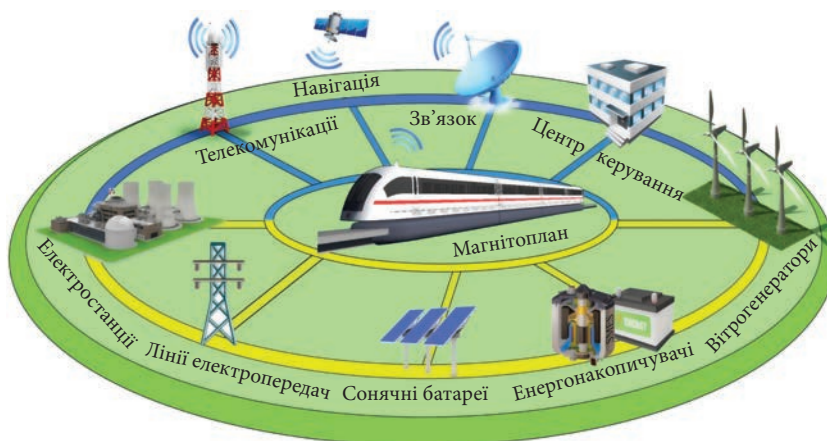


Рис. 9. Побудова транспортно-енергетичних кластерів, згрупованих навколо високошвидкісних наземних магістралей

структура та нанодріт мають об'єднані поглинаючий шар з низьколегованого аморфного кремнію, високолеговані дифузійні шари та прозорі електроди з оксиду індію олова.

Моделювання було виконано для нормально орієнтованого сонячного освітлення з інтенсивністю 1 сонце за умов освітленості АМ 1,5. У дослідженні проаналізовано поведінку вольтамперних характеристик та основних фотовольтаїчних параметрів СЕ залежно від висоти нанодроту та від співвідношення радіусів базової структури та нанодроту, що є мірою щільності розташування нанодротів у решітці (рис. 6, 7).

Функціонування систем, які використовують джерела відновлюваної енергії, відбувається за умов принципової неможливості усунення невизначеності доступної енергії, що потребує використання “енергодемпферів” — акумуляторів. Але слід зазначити, що роль цієї невизначеності дещо перебільшена. Хоча енергія вітру та сонця дійсно змінюється, але ці зміни передбачувані, оскільки принаймні протягом наступних двох днів ми можемо визначити, наскільки вітряною та сонячною буде погода.

Особлива роль у таких енергетичних системах належить акумуляторам-накопичувачам. Накопичувачі електроенергії не лише дозволяють забезпечити автономність енергопостачання, але є ключовою та невід'ємною ланкою в енергетичних системах на основі відновлюваних джерел енергії. Використання накопичувачів, організованих певним чином, сприяє забезпеченню повноцінного функціонування всього електротехнічного комплексу магнітолевітаційного транспорту на території України (див. рис. 2) повністю за рахунок сонячної енергії.

Не тільки для МАГЛЕВ-транспорту, а й взагалі в енергетиці застосовуються накопичувачі великої енергоемності для вирівнювання коливань у регіональних електромережах. Навіть запроваджено термін — “віртуальна електростанція”. Для керування такими великими масивами накопичувачів у рамках наших досліджень створено алгоритм моніторингу (на базі запропонованого раніше імпульсного гальваностатичного методу) електрохімічних накопичувачів енергії на основі свинцево-кислотних джерел струму при їх експлуатації у складі транспортних систем, що дає змогу здійснювати поточний контроль та прогнозування стану накопичувачів без порушення штатного режиму роботи системи електроживлення. Цей алгоритм запатентовано, його блок-схему і послідовність виконання основних операцій наведено в роботі [11].

Вказаний вище хронопотенціометричний метод імплементовано в експериментальному стенді для автоматизованого контролю стану електрохімічних накопичувачів енергії. Стенд укомплектовано магнітною установкою (рис. 8).

Сукупність отриманих наукових результатів відкриває нове узагальнююче бачення: сформовано новий науковий напрям щодо фізичних основ побудови швидкодіючої багаторівневої системи управління рухом магнітоплану на основі мікрохвильових багатofункціональних напівпровідникових приладів з гарячими електронами, а також з використанням сонячних батарей в комплексі з енергонакопичувачами для гарантованого електроживлення тягово-левітаційної системи магнітоплану. Це сприяло обґрунтуванню концепції інтеграції магнітолевітаційної магістралі і розподіленої сонячної електростанції, яка підключена (рис. 9) до регіональних електромереж прилеглих до транспортної магістралі територій за технологією S. M. A. R. T. Grid.

Висновки. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено проблему синтезу надійних швидкодіючих інформаційно-керуючих систем (ІКС) на

новій методологічній основі, що здатна враховувати специфіку багаторівневих високошвидкісних транспортних систем та перспективних енергогенеруючих комплексів, заснованих на відновлюваних джерелах енергії.

Вперше обґрунтовано спосіб безперервного прецизійного позиціонування високошвидкісного магнітолевітаційного транспортного засобу на основі методу фазової далекометрії для довільної конфігурації в тривимірному просторі фіксованої шляхової структури, а також спосіб забезпечення цілісності навігаційної системи МАГЛЕВ-поїзда; запропоновано новий підхід до вирішення завдання місцезнаходження, що не згадується в доступних публікаціях, і який дозволяє використовувати канал зв'язку поїзда з пунктом управління рухом в якості розподіленого датчика місцезнаходження, який є невід'ємним елементом ІКС. Цей підхід дає змогу отримати найбільшу потенційну точність і дозволяє визначати положення поїзда, що рухається зі швидкістю понад 500 км/год вздовж шляхової структури з похибкою, яка не перевищує кількох сантиметрів.

Методом математичного моделювання визначено потенціал сонячної енергії кільцевої траси магнітолевітаційного поїзда та на підставі цього оцінено пропускну спроможність магістралі. Показано, що альтернативного джерела — сонячної енергії — достатньо для забезпечення енергією кільцевої траси активної шляхової структури МАГЛЕВ-поїзда. Розроблено модель надходження сонячної радіації на земну поверхню з урахуванням хмарності, яка дозволяє аналізувати щільність ймовірностей похмурих днів протягом року, що дає можливість знаходити під час проектування фотоелектричних установок оптимальні співвідношення між сумарною потужністю фотопанелей та ємністю акумулятора-накопичувача.

Результати обробки річної функції розподілу сонячної радіації дозволяють прогнозувати ефективність роботи фотоустановки за конкретних кліматичних умов і проводити порівняльний аналіз енергопродуктивності установок, які використовують фотомодулі, виготовлені за різними технологіями.

Таким чином, результатом проведених досліджень є розробка фізико-технічних основ створення надійної прецизійної швидкодіючої системи керування МАГЛЕВ-транспортом, що функціонує в режимі реального часу і має всепогодну систему гарантованого електроживлення на основі сонячної енергії.

Здійснення такого інтеграційного транспортно-енергетичного проекту могло б стати локомотивом зростання всієї економіки України, оскільки зумовило б розвиток суміжних галузей, а також розширення виробництва електротехнічних та мікроелектронних компонентів, а отже, створення нових робочих місць.

Можна з упевненістю стверджувати, що ці результати в період післявоєнного розвитку економіки Держави дозволять розпочати здійснення в Україні міжгалузевого інноваційного проекту загальнонаціонального масштабу зі створення високошвидкісних наземних транспортних коридорів типу “шовковий шлях” на екологічно раціональних енергосистемах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. Research Series, V. 1. Deggendorf: The International Maglev Board, 2018. 44 p.
2. Jaisal H.H. Super Maglev trains. *IJSRP*. 2020. **10**, № 10. P. 614—620. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.10.2020.p10678>
3. 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. Research Series, V. 2. Deggendorf: The International Maglev Board, 2018. 20 p.
4. 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. Research Series, V. 3. Deggendorf: The International Maglev Board, 2018. 28 p.
5. 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 Trans. Ind. Appl.* 2020. **56**, № 6. P. 6949—6956. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066>
6. Ranger S. What is Hyperloop? Everything you need to know about the race for super-fast travel. ZDNET. 2019. URL: <https://www.zdnet.com/article/what-is-hyperloop-everything-you-need-to-know-about-the-future-of-transport/>. (Дата звернення: 02.12.2024).
7. Дзензерський В.А., Плаксін С.В., Толдаєв В.Г., Шкіль Ю.В. Інтеграція магнітолевітаційної магістриали і розподіленої сонячної електростанції. Київ: Наук. думка, 2019. 244 с.
8. Horizon 2020. Work Programme 2016—2017. 11. Smart, green and integrated transport (European Commission Decision C (2015)6776 of 13 October 2015).
9. Simulating solar cell devices using silvaco TCAD tools. *Simulation Standard*. 2008. **18**, № 2. P. 1—3.
10. Gnilenko A.B., Plaksin S.V. Computer simulation of an amorphous silicon thin-film solar cell with embedded coaxial junction nanowires. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2025. **28**, № 1. P. 070—076. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.01.070>
11. Дзензерський В.А., Житник Н.Е., Плаксін С.В., Лисунова В.В. Розробка алгоритма автоматизованого контролю електрохімічних накопичувачів енергії. *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. № 1. С. 39—47. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-6>

Надійшла до редакції 15.04.2025

REFERENCES

1. 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. Research Series, V. 1. Deggendorf: The International Maglev Board.
2. Jaisal, H. H. (2020). Super Maglev trains. *IJSRP*, 10, No. 10, pp. 614-620. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.10.2020.p10678>
3. 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. Research Series, V. 2. Deggendorf: The International Maglev Board.
4. Fritz, E., Klühspies, J., Kircher, R., Witt, M. & Blow, L. (2018). Energy consumption of track-based high-speed transportation systems: maglev technologies in comparison with steel-wheel-rail. Research Series, V. 3. Deggendorf: The International Maglev Board.
5. 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 Trans. Ind. Appl.*, 56, No. 6, pp. 6949-6956. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066>
6. Ranger, S. (2019). What is Hyperloop? Everything you need to know about the race for super-fast travel. ZDNET. Retrieved from <https://www.zdnet.com/article/what-is-hyperloop-everything-you-need-to-know-about-the-future-of-transport/>

7. Dzenzersky, V. A., Plaksin, S. V., Toldayev, V. G. & Shkil, Yu. V. (2019). Integration of a magnetic levitation highway and a distributed solar power plant. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
8. Horizon 2020. Work Programme 2016—2017. 11. Smart, green and integrated transport (European Commission Decision C (2015)6776 of 13 October 2015).
9. Simulating solar cell devices using silvaco TCAD tools (2008). Simulation Standard, 18, No. 2, pp. 1-3.
10. Gnilenko, A. B. & Plaksin, S. V. (2025). Computer simulation of an amorphous silicon thin-film solar cell with embedded coaxial junction nanowires. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 28, No. 1, pp. 070-076. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.01.070>
11. Dzenzersky, V. A., Zhitnik, N. E., Plaksin, S. V. & Lisunova, V. V. (2017). Development of the algorithm of automated control of electrochemical energy storage devices. Electrical Engineering and Power Engineering, No. 1, pp. 39-47 (in Russian). <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-6>

Received 15.04.2025

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

M.Ya. Zhitnik, <https://orcid.org/0000-0002-1761-678X>

S.V. Plaksin, <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Yu.V. Shkil, <https://orcid.org/0000-0002-8684-5906>

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

E-mail: svp@westa-inter.com

PHYSICAL FOUNDATIONS OF CREATING PRECISION CONTROL SYSTEM FOR MAGNETO-LEVITATION VEHICLE INTEGRATED WITH ITS PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM

Among various types of high-speed ground transportation, magnetic levitation transport (magnetoplanes) is considered the most promising, which is why research related to improving this type of transportation is highly relevant. The work is devoted to the integration of three promising research technologies: magnetolevitative transport, photoelectric energy conversion and phase-metric radionavigation. It is this integration, i.e., the substantial interpenetration of these three subsystems, that leads to an overall synergistic effect. Achieving the sustainable development goals of the national economy within the framework of traditional transport and energy technologies is problematic, since energy consumption by transport systems exceeds one third of total energy consumption, and the fastest mode of transport – an air transport – is one of the leading sources of atmospheric pollution. Therefore, the purpose of this work is to substantiate a promising way to solve this problem by combining in a single system of renewable energy technologies and magnetolevitative transport. The methods of system analysis and decomposition, statistical analysis of solar insolation, radiophysical experiment, computer modeling of photovoltaic energy converters, algorithmization of current control processes and forecasting the energy storage devices state are involved. The result of the research is the development of the physical and technical foundations for improving magnetic levitation transport. Conclusion: combining renewable energy technologies and magnetic levitation transport into a single system makes it possible to create an all-weather guaranteed power supply system based on solar energy and a reliable high-precision real-time control system.

Keywords: *high-speed land transport, magnetic levitation, power supply, distributed photovoltaic power system, energy storage devices, phase-metric radio navigation, high-accuracy control system.*