

В.О. Дзензерський, С.В. Плаксін, Л.М.Погоріла

**ВИСОКОШВИДКІСНИЙ НАЗЕМНИЙ ТРАНСПОРТ
НА ОСНОВІ МАГНІТНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ З ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ
ВІД РОЗПОДІЛЕНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ
З ПЕРСПЕКТИВНИМИ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧАМИ**

Анотація. 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, тому й дослідження пов'язані з удосконаленням цього виду транспорту є актуальними. Робота присвячена інтеграції трьох перспективних наукових напрямків/технологій: магнітолевітаційного транспорту, фотоелектричного перетворення енергії та фазометричної радіонавігації. Саме ця інтеграція, тобто сутнісне взаємопроникнення трьох вказаних підсистем, дає в результаті несумарний синергетичний ефект. Досягнення цілей сталого розвитку народногосподарського комплексу 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. Тому метою даної роботи є обґрунтування перспективного шляху вирішення цієї проблеми 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 для удосконалення магнітолевітаційного транспорту. Висновок: за рахунок об'єднання в єдиній системі технологій поновлюваної енергетики та магнітолевітаційного транспорту можливо 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, енергозабезпечення, розподілена фотоелектрична енергосистема, енергонакопичувачи, фазометрична радіонавігація, швидкодіюча система керування.

Постановка проблеми. Поступальне зростання економіки будь-якої країни передбачає розвиток високошвидкісного транспорту для задоволення потреби соціуму в скороченні часу, потрібного на переміщення покупців та безліч товарів. У межах традиційних транспортних і енергетичних технологій досягнення цілей сталого розвитку народногосподарського комплексу є проблематичним, оскільки енерговитрати транспортних систем перевищують третину споживаної енергії, а найшвидший вид транспорту – повітряний – є одним із провідних забруднювачів атмосфери. Тому **метою** даної роботи є обґрунтування перспективного шляху вирішення даної проблеми за рахунок об'єднання в єдиній системі технологій відновлюваної енергетики та магнітолевітаційного транспорту, адже саме магнітоплани визнані найперспективнішим видом високошвидкісного наземного транспорту.

Аналіз останніх результатів досліджень і публікацій. В даний час у світі існує більше двох десятків проектів магнітолевітаційних транспортних систем, декілька функціонуючих низькошвидкісних доріг та двох високошвидкісних ліній у Китаї та Японії. У 2004 році в Шанхаї була відкрита перша комерційна лінія МАГЛЕВ, виготовлена з використанням німецької технології Transrapid: Шанхай – аеропорт Пудонг (30 км) [1]. У лютому 2016 року в Південній Кореї з'явився свій магнітолевітаційний транспорт на трасі довжиною 6 км, який об'єднав аеропорт Інчхон зі станцією метро Йонгйю. Ця лінія МАГЛЕВ була розроблена Корейським інститутом машинобудування та компанією Hyundai Rotem. У грудні 2015 року Китай запустив МАГЛЕВ власного виробництва на трасі довжиною 18,55 км між Південним залізничним вокзалом міста Чанша і аеропортом. Японська лінія JR-Maglev знаходиться в стані експериментів та дослідно-експериментальної експлуатації (рис. 1).



а) носовий обтічник та секції лінійного двигуна в бокових стінках шляхопроводу



б) відсік для встановлення кріомодуля з надпровідним магнітом (4 шт. на вагон)

Рисунок 1 - Японський магнітоплан MLX01, виготовлений фірмою JR-Maglev, на тестовому полігоні в префектурі Яманаші

Викладення основного матеріалу досліджень. Інтерес до магнітолевітаційного (МАГЛЕВ) транспорту у світі все зростає [2 – 4]. Подальше нарощування технологічного/комерційного успіху високошвидкісних транспортних МАГЛЕВ-засобів (магнітопланів) науковці різних країн світу вбачають на шляхах удосконалення і систем магнітного підвісу, і лінійного електроприводу, і системи бортового енергозабезпечення, але, насамперед – розробки ефективної системи управління рухом та підвісом магнітоплану [5, 6].

Магнітоплани рухаються за допомогою спеціалізованого електроприводу – лінійного двигуна, вмонтованого в шляхову структуру магнітолевітаційної траси (рис. 2).



Рисунок 2 - Трифазні обмотки лінійного двигуна, вмонтовані в бокові стінки шляхової структури

Це досягається шляхом включення по черзі певних тягових секцій у відповідні моменти часу (рис. 3).

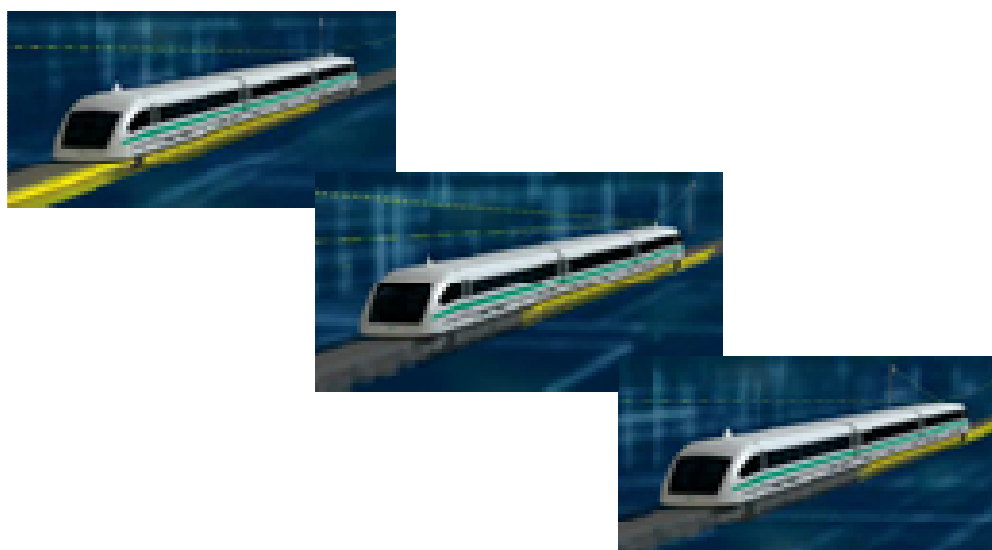


Рисунок 3 - Перемикання тягової секції за сигналами радіонавігаційної системи

Підвіс вагонів (левітація) здійснюється за допомогою магнітної взаємодії між бортовими магнітами (у нашому варіанті вони є надпровідними) та магнітами, які вмонтовані в шляхопровід, через або притягнення (як у німецько-китайській варіанті), або відштовхування (як в українському та японському варіантах).

Хоча в ряді країн, наприклад, в Японії, Китаї, Південній Кореї, вже діють різні магнітолевітаційні проекти, ціла низка наукових проблем, пов'язаних із забезпеченням надійності таких високошвидкісних «польотів» наземного транспорту (зрештою, 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. Актуальність цієї тематики знайшла своє відображення також і в пріоритетах Рамочних програм Євросоюзу по розвитку науки, яка включають, наприклад, такий напрямок, як «Високошвидкісний наземний транспорт, заснований на екологічно чистих раціональних енергосистемах» [7].

Що стосується цього специфічного типу електричного транспорту, в наших роботах показано, що сонячний потенціал України дозволяє повністю забезпечити його «чистою» енергією (рис. 4).



Рисунок 4 - Сонячний потенціал України повністю задовольняє потреби магнітолевітаційного транспорту [8]

Цей перехід до джерела електроживлення МАГЛЕВ-транспорту від фотоелектричної енергетичної системи, розподіленої уздовж траси, дозволяє кардинально перестроїти систему управління рухом МАГЛЕВ-поїздів. Принципово інша архітектура побудови МАГЛЕВ-траси – не з довгих секцій з трифазними силовими обмотками, що використовуються зараз, а з дискретних коротких котушок, які одночасно є і тяговими катушками лінійного двигуна, і складовим елементом (навантаженням) сонячної шляхової енергоустановки, розміщеної уздовж шляхопроводу, дозволяє досягнути сутнісної інтеграції та взаємоузгодженої комбінації двох способів магнітної левітації – електромагнітного та електродинамічного. Така побудова робить можливим незалежне автономне живлення кожної шляхової катушки та автономне управління нею з можливістю перемикання або в тяговий режим, або в режим левітації [9]. У той же час, досягається значне збільшення точності позиціонування поїздів, що рухаються зі швидкістю більш 500 км/год. Авторами розроблена система управління рухом магнітоплану на базі прецизійної фазометричної радіонавігаційної системи, інтегрованої з фотоелектричною системою його енергозабезпечення (рис. 5), 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.

Для підвищення ефективності сонячної енергосистеми були проведені дослідження, спрямовані на покращення як характеристик її компонентів, так і балансу системи в цілому. Зокрема, проведено комп'ютерне моделювання сонячних модулів перспективних конструкцій. Справа в тому, що сонячні елементи кремнію, що традиційно використовуються в фотоенергетиці, практично вичерпали свій потенціал. Найважливішим кроком у розвитку фотоенергетики була поява сонячних елементів на основі гетероструктур. Нами був проведений комп'ютерний експеримент, в якому з використанням програми Silvaco TCAD [10] були змодельовані механічно зістиковані сонячні елементи на основі гетероструктур та сонячні елементи з двостороннім покриттям наночастинками алюмінію (рис. 6, 7).

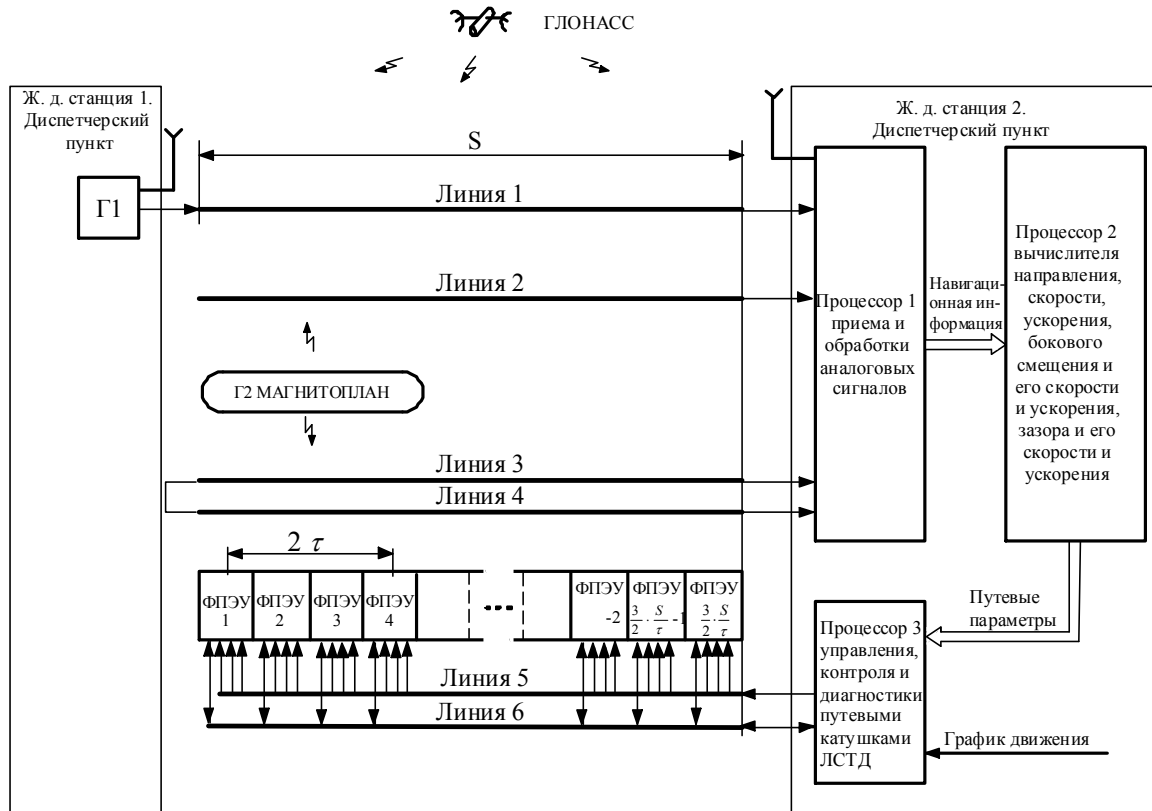


Рисунок 5 - Схематичне зображення системи точного управління МАГЛЕВом з живленням від сонячної енергії [8]

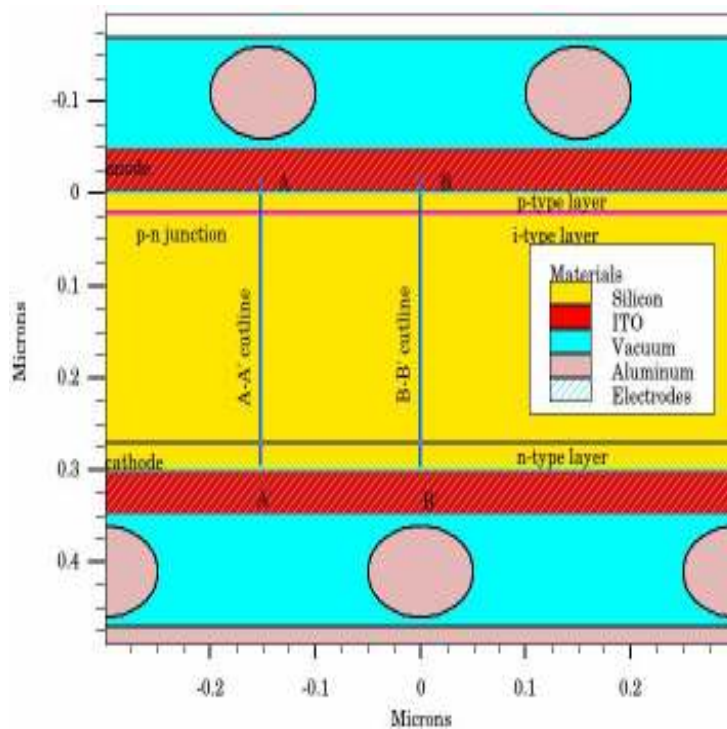


Рисунок 6 - Двовимірна модель сонячного елемента в Silvaco TCAD

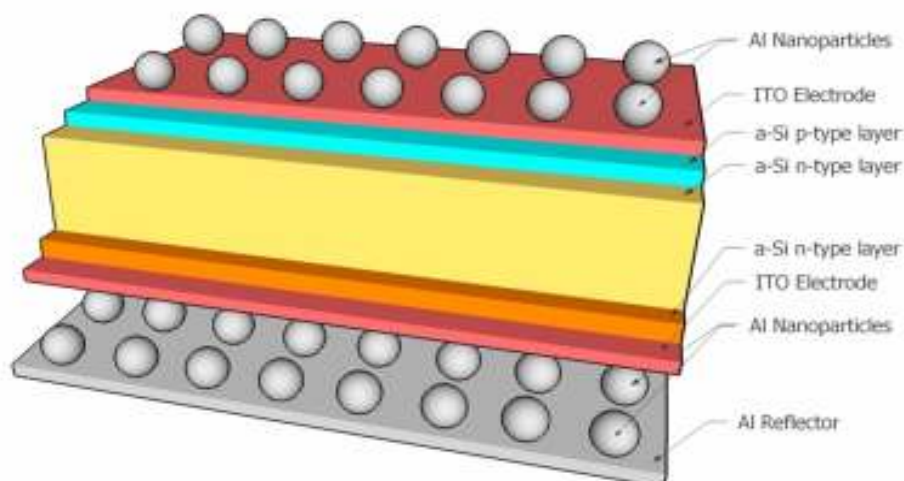


Рисунок 7 - Сонячний елемент з двобічним покриттям наночастинками

Моделюється поширення під прямим кутом електромагнітного випромінювання, інтенсивність якого в діапазоні довжин хвиль від 300 нм до 750 нм відповідає умовам освітлення АМ 1,5.

Інтенсивність випромінювання в структурі сонячного елемента розраховано методом FDTD. Електричні характеристики сонячного елемента розраховано в рамках дифузійно-дрейфової моделі переносу зарядів. На основі розрахунку вольт-амперних характеристик визначені залежності від радіусу наночастинок та відстані між наночастинками базових параметрів сонячного елемента: струму короткого замикання, напруги холостого ходу, коефіцієнта заповнення та коефіцієнта корисної дії. Основний результат цієї серії експериментів полягає в тому, що при радіусі наночастинок 25 нм та відстані між ними 200 нм вдається досягти максимального значення коефіцієнта корисної дії, що дорівнює 13,8 %. (рис. 8). Досягнення такого значного підвищення значення коефіцієнта корисної дії відбувається завдяки дифракції світла в активному шарі фотоелемента і формуванню зони підвищеної його інтенсивності.

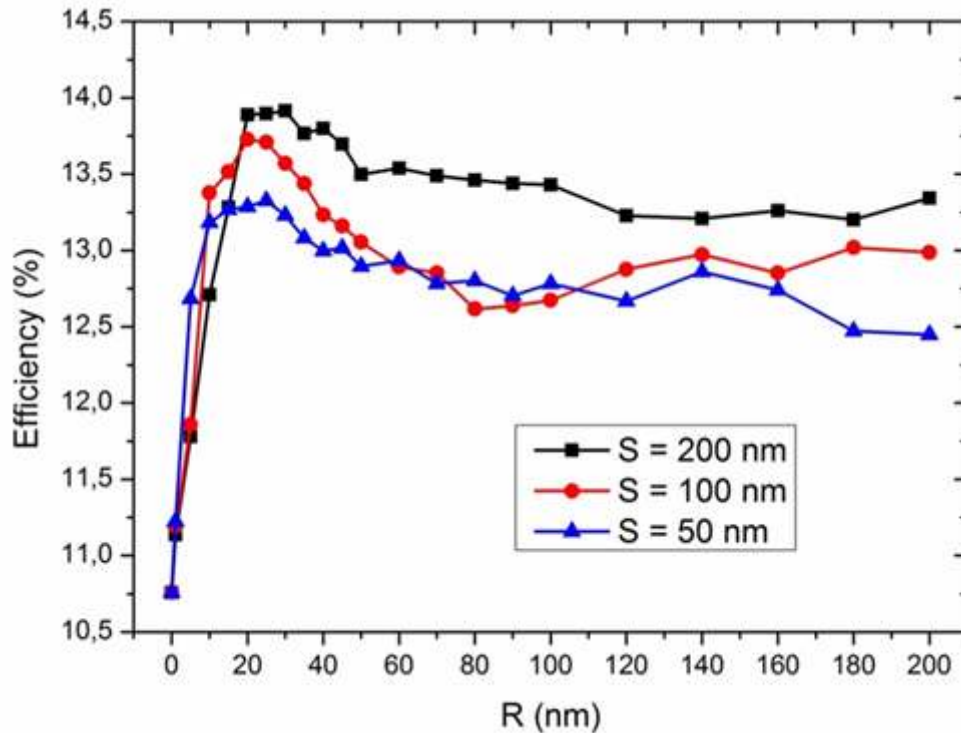


Рисунок 8 - Залежність коефіцієнту корисної дії від радіусу наночастинок

Гарантованість енергопостачання магнітолевітаційного транспорту зростає в разі використання сонячних космічних електростанцій, оскільки вони виведені за межі атмосфери Землі (рис. 9) і енергія, що поставляється на землю, не залежить ні від яких погодних умов.

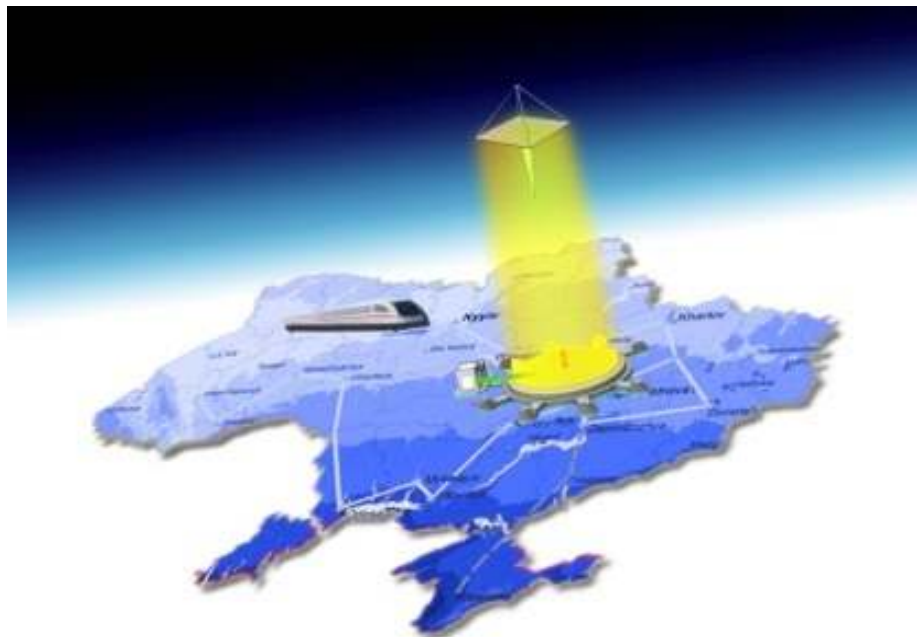


Рисунок 9 - Орбітальний фрагмент енергетичної системи Маглева

При існуючому рівні розвитку космічних технологій будівництво сонячної космічної електростанції потребуватиме великих витрат. Подолати ці труднощі можливо на основі сучасних досягнень у фізиці напівпровідників та радіофізики. В радіoeлектронному обладнанні в якості малогабаритних генераторів надвисокочастотних коливань широко використовується діоди Ганна. Невеликі розміри та вага цих напівпровідникових пристроїв роблять привабливим їх використання як одного з основних компонентів сонячної космічної електростанції для перетворення постійного струму у високочастотні коливання з метою передачі енергії на землю через мікрохвильовий промінь. В результаті цієї серії комп'ютерних експериментів встановлено, що для інжектора, який складається з 10 шарів $\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{As}$ товщиною 0,001 мкм кожний (рис. 10) при напрузі на аноді 4 В діод Ганна виходить до стабільного режиму роботи з частотою коливань 106 ГГц.



Рисунок 10 - Моделювання діода Ганна зі ступінчастим інжектором гарячих електронів на основі шарів InAlGaAs

Передача енергії з космосу доцільна саме на таких частотах, виходячи з наявності так званого вікна прозорості в атмосфері, в області якого згасання енергії помітно слабшає, як це видно з графіка на рис. 11.

Завершується цей цикл досліджень роботами по моделюванню електродинамічних систем для випромінювання та фокусування мікрохвильового

променю. На рис. 11 показано базовий елемент мікросмугової антенної решітки та діаграма направленості всієї антенної решітки.

Функціонування систем, які використовують джерела відновлюваної енергії, відбувається в умовах принципової неможливості усунення невизначеності доступної енергії, що призводить до необхідності використання «енергодемпферів» – акумуляторів. Але слід зазначити, що роль цієї невизначеності дещо перебільшена. Хоча енергія вітру та сонця дійсно змінюється, але ці зміни передбачувані, оскільки хоча би протягом наступних двох днів можливо передбачити, наскільки вітряна та сонячна буде погода.

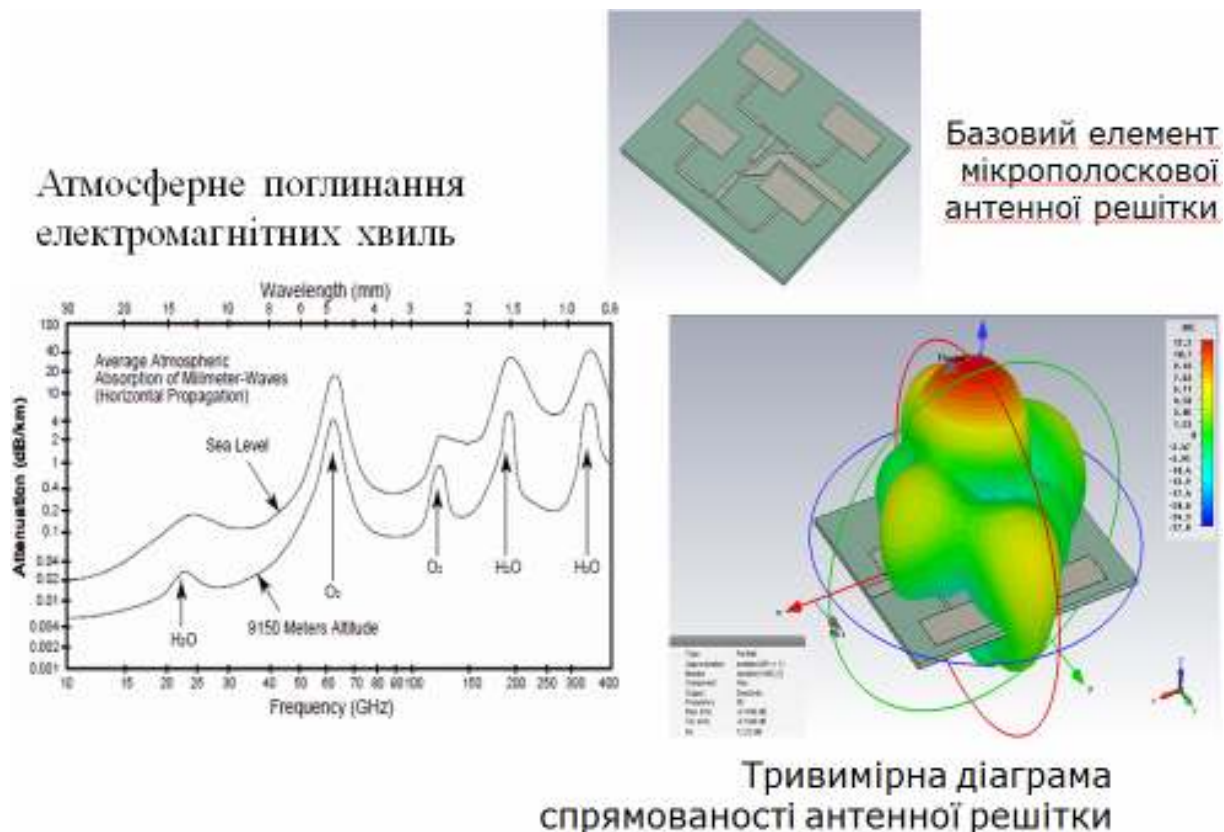


Рисунок 11 - Комп'ютерне моделювання антенної решітки

Особлива роль у таких енергетичних системах належить акумуляторам-накопичувачам. Накопичувачі електроенергії не лише дозволяють забезпечити автономність енергопостачання, але є ключовою ланкою в енергетичних системах на основі відновлюваних джерел енергії. Використання накопичувачів, організованих певним чином, дає можливість забезпечити повноцінне функціонування всього електротехнічного комплексу магнітолевітаційного транспорту на території України (див. рис. 4) повністю за рахунок сонячній енергії.

Не тільки для МАГЛЕВ-транспорт, а й взагалі в енергетиці застосовуються накопичувачі великої енергоємності для вирівнювання коливань у регіональних електромережах. Навіть запроваджено термін – «віртуальна електростанція». Для керування такими великими масивами накопичувачів в 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 на транспортних засобах, що дає змогу здійснювати поточний контроль та прогнозування стану накопичувачів без порушення штатного режиму роботи системи електроживлення.

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

Здійснення такого проекту могло б стати локомотивом зростання всієї економіки України, оскільки призвело б до розвитку суміжних галузей, а також розширення виробництва електротехнічних та мікроелектронних компонентів, а отже, до створення нових робочих місць.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Шанхайский маглев. URL: <http://www.shanghai.ru/shanghai-maglev.html> (дата звернення 17.05.2022).
2. Fritz, E.. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. / E. Fritz, J. Kluhspies, R. Kircher, M. Witt, L. Blow // Transportation Systems and Technology. 2019. 4(3). С. 134-155. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>.
3. Kircher, R. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail / R. Kircher, R. Palka, E. Fritz, K. Eiler, M. Witt, L. Blow, J. Klühspies // The International Maglev Board. 2018. Research Series 2. ISBN: 978-3-947957-01-9.

Отримано з <https://www.researchgate.net/publication/327972538>.

4. Wenk, 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 / M. Wenk, J. Klühspies, L. Blow, R. Kircher, E. Fritz, M. Witt, M. Hekler ISBN: 978-3-947957-00-2. Germany. DC: The International Maglev Board. 2018. 44 p.
5. Davydov, A. Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems / A. Davydov // *Transportation Systems and Technology*. 2019. 5(4). P. 5-15. DOI:10.17816/transsyst2019545-15.
6. De Oliveira, R.A.H. Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev Vehicles / R.A.H. De Oliveira, R.M. Stephan, A.C. Ferreira, J. Murta-Pina / *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. 56, No 6. P. 6949-6956. DOI: 10.1109/TIA2020.3023066.
7. Horizon 2020. Work Programme 2016 – 2017. 11. Smart, green and integrated transport // *European Commission Decision* 2015. P. 6776.
8. Дзензерский, В. А. Интеграция магнитолевитационной магистрали и распределенной солнечной электростанции / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, В. Г. Толдаев, Ю. В. Шкіль. Киев: Наукова думка, 2019. 244 с.
9. Муха А.М. Комбінована система розгону для тягового приводу високошвидкісного транспорту / А. М. Муха, С. В. Плаксін, Ю. В. Шкіль // *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 81 Міжнародної науково-практичної конференції. м. Дніпро, 2021. Д.: ДНУЗТ, 2021. С. 78– 79.*
10. Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD [Text] // *Simulation Standard*. 2008. Vol. 18, No 2. P. 1–3.

REFERENCES

1. Shanghai maglev. URL: <http://www.shanghai.ru/shanghai-maglev.html> (дата звернення 17.05.2022) [in Russian].
2. Fritz E., Kluhspies 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*. 4(3). DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155> [in English].
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. The International Maglev Board. Research Series 2*. ISBN: 978-3-947957-01-9. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/327972538> [in English].

4. 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. ISBN: 978-3-947957-00-2. Germany, DC: The International Maglev Board [in English].
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: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. 6. 6949-6956. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA2020.3023066> [in English].
7. Horizon 2020 (2015). Work Programme 2016 – 2017. 11. Smart, green and integrated transport. European Commission Decision C 6776 of 13 October 2015 [in English].
8. Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Toldaev V. G. & Shkil Yu. V. (2019). Integration of Maglev Highway and Distributed Solar Power Plant. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
9. Mukha A. M., Plaksin S. V. & Shkil Yu. V. Combined acceleration system for traction drive of high-speed transport. Problems and prospects of railway transport development: Abstracts of the 81-st International scientific-practical conference. Dni-pro, 2021. D .: DNUZT, 2021. - P. 78 – 79 (in Ukrain).
10. Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD (2008). Simulation Standard. 2. 1–3 [in English].

Received 21.04.2022.

Accepted 26.04.2022.

High-speed magnetolevitative land transport with power supply by distributed photoelectric energy system with perspective energy storage

Among the various types of high-speed land transport a magnetic levitation transport (magnetoplanes) is recognized as the most promising, so research related to the improvement of this type of transport is 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 essential interpenetration of these three subsystems, results in an overall synergistic effect. Achieving the goals of sustainable development of the national economic complex within the framework of traditional transport and energy technologies is problematic, as energy consumption of transport systems exceeds one third of energy consumption, and the fast-

est mode of transport – an air transport is one of the leading air pollutants. 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 physical and technical bases for the improvement of magnetolevitative transport. Conclusion: by combining in a single system of renewable energy technologies and magnetic levitation transport it is possible to create a system of all-weather guaranteed power supply based on solar energy and a reliable precision high-speed control system in real time.

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

Дзензерський Віктор Олександрович - директор Інституту транспортних систем та технологій НАН України, доктор технічних наук, професор, ORCID: 0000-0002-5504-4524

Плаксін Сергій Вікторович - завідуючий відділом Інституту транспортних систем та технологій НАН України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Погоріла Любов Михайлівна - молодший науковий співробітник Інституту транспортних систем та технологій НАН України, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3718-0733>

Dzenzersky Viktor Aleksandrovich - Director of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-5504-4524

Plaksin Sergey Viktorovich - Head of Department, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Pogorila Lyubov Mikhailivna - Junior Researcher, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3718-0733>