

УДК 621.311:629.4.014.27

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

^{1*} Від. систем кер. транс. 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

^{2*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта a.m.mukha@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 37-31-537, ел. пошта d.v.ustymenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*} Від. систем кер. транс. 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

^{5*} Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта doctus@ukr.net, ORCID 0009-0000-6421-8269

СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ 2-Х РЕЖИМНОГО ТЯГОВО-ЛЕВІТАЦІЙНОГО МОДУЛЯ ШЛЯХОВОЇ СТРУКТУРИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО МАГЛЕВ-ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою роботи є вибір та обґрунтування структури системи живлення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля (ТЛМ) шляхової структури покращеної високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи з урахуванням особливостей генерації, накопичення, зберігання та розподілу енергії з застосуванням в ній фотовольтаїчних перетворювачів. **Методика.** В процесі роботи над матеріалом використовувались методи аналізу і синтезу для вивчення наукових робіт щодо енергозабезпечення транспортних систем на магнітній левітації, електротехніку та електроніку для модифікації структури та параметрів системи електропостачання 2-х режимного тягово-левітаційного модуля. Особливу увагу приділено питанню застосування технології водневих паливних елементів. **Результати.** Короткий 2-х режимний тягово-левітаційний модуль є основним і універсальним модулем для побудови шляхової структури покращеної високошвидкісної магнітолевітаційної транспортної системи. Система живлення такого модуля повинна відповідати найвищим вимогам як до енергетичної ефективності так і до надійності та безвідмовності його роботи. В роботі запропоновано автономне джерело живлення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля де в якості первинної енергії використовується енергія сонця. Для вирішення проблеми коливачів сонячної інсоляції на протязі доби, року до структури вводиться гібридний накопичувач енергії, що має дві незалежні системи – основну на літій-іонних акумуляторах в поєднанні з суперконденсатором і резервну з використанням технології водневих паливних елементів. Такий підхід здатен забезпечити: безперебійне живлення ТЛМ не залежно від погодних умов; подачу короткого високоенергетичного імпульсу в котушки ТЛМ в момент, що визначається положенням магнітоплану відносно траси; реконфігурацію котушок ТЛМ у відповідності до режиму роботи (тяга чи левітація); енергоефективність за рахунок живлення тільки тієї ділянки траси над якою в даний момент знаходиться магнітоплан; високу надійність функціонування та відмовостійкість енергосистеми через наявність резервної системи на базі регенеративного паливного елемента. **Наукова новизна.** В роботі обґрунтовано концепцію побудови системи енергозабезпечення траси високошвидкісного маглев-транспорт. Основою покращення енергетичних показників транспортної системи є інтеграція автономного гібридного джерела живлення на фотовольтаїчних перетворювачах в 2-х режимний тягово-левітаційний модуль. **Практична значимість.** Практичним аспектом роботи є розширення області застосування технології водневих паливних елементів системою зберігання енергії автономного джерела живлення траси високошвидкісного маглев-транспорт.

Ключові слова: тягово-левітаційний модуль, фотовольтаїчний перетворювач, енергопостачання, магнітоплан, паливний елемент, електролізер, накопичувач

Вступ

Енергоспоживання високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту є одним з ключових аспектів його економічної ефективності. В роботі [1] показано, що на швидкостях понад

300 км/год Maglev-транспорт стає більш ефективним за традиційні швидкісні поїзди. При цьому встановлено, що на високих швидкостях більша частина енергії (до 80% від спожитої магнітопланом) витрачається на подолання аеродинамічного опору середовища, а не на саму левітацію.

Співробітниками Інституту транспортних систем і технологій НАН України (м. Дніпро) проведено дослідження загальної інсоляції на території України і встановлено, що функціонування Maglev-транспортів, що використовують принцип електродинамічного підвісу, цілком можуть забезпечити фотовольтаїчні енергетичні установки [2].

Розбудова шляхової структури наземного магнітолевітаційного транспорту з живленням від розподіленої системи фотовольтаїчних перетворювачів дозволить уникнути додаткових затрат на доставку електричної енергії до споживача, мати співрозмірні питомі характеристики генерації електричної енергії з питомими характеристиками навантаження, переглянути структуру траси та реалізувати більш ефективні стратегії управління рухом і підвісом транспортного засобу [3].

Постановка задач досліджень

Високошвидкісні транспортні системи на магнітному підвісі, наприклад Transrapid чи JR-Maglev, мають в своїй конструкції дві окремі системи – підвіску, яка забезпечує магнітну левітацію потяга над трасою та привод у вигляді лінійного синхронного двигуна з довгим статором (LSM).

Transrapid (Німеччина) використовує електромагнітну підвіску (EMS). EMS характеризується доступністю левітації у всьому діапазоні швидкостей проте потребує постійного і високоточного контролю за величиною повітряного зазору (близько 10 мм). Система EMS вважається найбільш економічною в енергетичному плані для процесу підвішування. На підтримання магнітоплану в повітрі витрачається лише близько 1...2 кВт потужності на кожен тону його ваги.

В JR-Maglev (Японія) реалізовано електродинамічну підвіску (EDS). EDS на відміну від EMS використовує силу Ленца і взаємодіє з пасивною наземною частиною у вигляді короткозамкнених котушок. Системи EDS характеризуються високою магнітною стабільністю, не потребують контролю за повітряним зазором (в середньому 100 мм) проте мають суттєвий недолік – недостатня величина підйомної сили на низьких швидкостях (приблизно до 150 км/год).

Синхронний двигун з довгим статором в енергетичному плані на сьогодні виглядає не найкращим рішенням. Як ірраціональна обмотка трифазного LSM має значну протяжність (до 40 км) і при русі транспортного засобу вона усея отримуватиме живлення, що негативно впливає на величину споживаної потужності. Зрозуміло, що саме по собі

зменшення довжини секцій LSM не вирішує задачі енергетичних втрат [4]. Для вирішення проблеми запасів реактивної потужності та підвищення енергоефективності LSM потрібно жити окремі короткі тягові модулі від автономного джерела енергії, що знаходиться поряд.

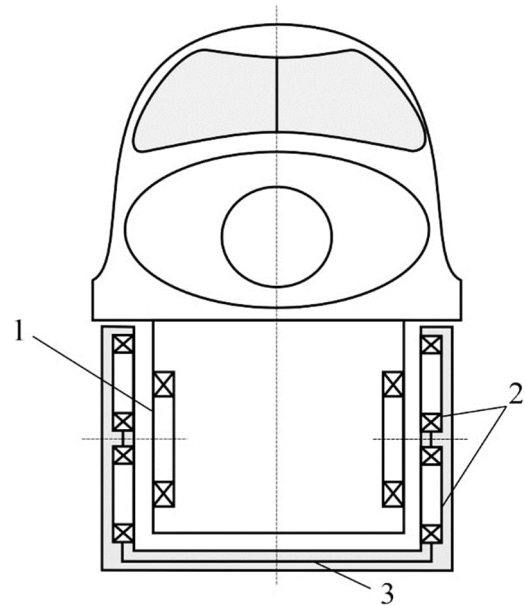


Рис. 1. Магнітолевітаційна транспортна система з 2-х режимним тягово-левітаційним модулем (ТЛМ): 1° – котушки бортового надпровідникового магніту (SC); 2° – подвійні котушки шляхового тягово-левітаційного модуля (NF); 3° – нуль-поточковий контур

Авторами в роботах [4, 5] запропоновано 2-х режимний тягово-левітаційний модуль (ТЛМ), що здатен працювати в режимах тяги і левітації. Силова частина транспортної системи на базі 2-х режимного тягово-левітаційного модуля має наступні основні елементи:

- бортовий надпровідниковий магніт (позиція 1, рис. 1), який створює потужне магнітне поле;
- подвійні котушки (позиція 2, рис. 1), що монтуються на обох стінках шляхопроводу (одна пара навпроти іншої). Кожна пара може перемикається для утворення відповідної конфігурації магнітного поля з метою формування заданого режиму роботи (тяга, електромагнітна левітація (в зоні малих швидкостей), електродинамічна левітація (на швидкостях понад 150 км/год));
- нуль-поточковий контур (позиція 3, рис. 1), який представляє собою електричну лінію з власним електронним регулятором, що поєднує пари котушок на протилежних стінках в єдиний модуль.

При формуванні траси з таких коротких 2-х режимних тягово-левітаційних модулів з'являється декілька можливостей, що здатні суттєво

покращити характеристики транспортної системи:

- запровадити більш ефективні способи управління магнітопланом;
- реалізувати живлення тільки тієї частини траси де в даний момент знаходиться транспортний засіб;
- відмовитись від централізованого живлення на користь розподіленої системи фотовольтаїчних перетворювачів.

Основна частина

Інтеграція в магнітолевітаційну магістраль розподіленої сонячної електростанції вирішує проблему втрат енергії при транспортуванні її від централізованого джерела до якірних обмоток лінійного двигуна у випадку класичних систем живлення, а використання в якості основного джерела енергії енергію сонця робить транспортну систему енергоефективною та екологічною. Підхід до розбудови наземного високошвидкісного транспорту на основі екологічно раціональних енергетичних систем узгоджується з рекомендаціями Рамковими науковими програмами Євросоюзу [6].

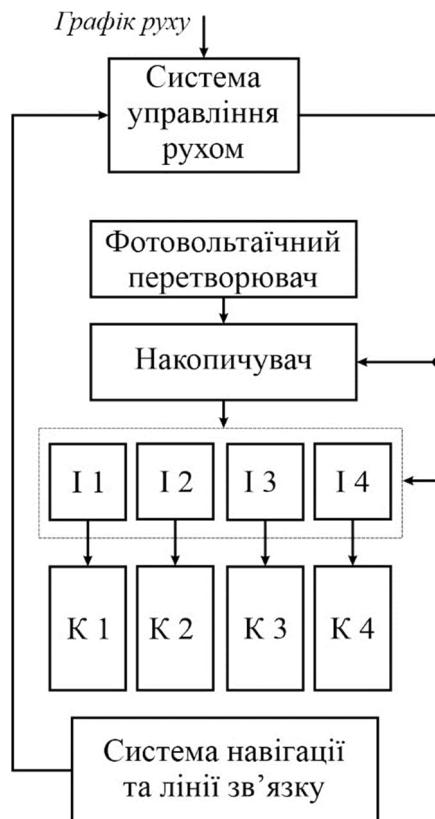


Рис. 2. Енергозабезпечення 2-х режимного ТЛМ на базі фотовольтаїчного перетворювача: І1...І4 – інвертори; К1...К4 – котушки ТЛМ

Вибір саме сонячної енергії пояснюється її доступністю та можливістю виробництва на місці споживання. Тим не менш локальні особливості положення точки прийняття сонячної енергії та реальні погодні умови це ті фактори, які можуть суттєво знижувати показники надходження електричної енергії, що повинно враховуватись при проектуванні систем живлення магнітолевітаційного транспорту.

В результаті вищезазначеного підходу структура енергозабезпечення 2-х режимного тягово-левітаційного модуля може бути представлена наступною структурою (рис. 2).

2-х режимний ТЛМ має в своєму складі чотири котушки (К1...К4), які попарно розміщені на протилежних стінках магістралі, та отримують живлення від індивідуальних інверторів (І1...І4). Інвертор є універсальним вузлом і побудований за мостовою схемою з використанням чотирьох IGBT-транзисторів (рис. 3).

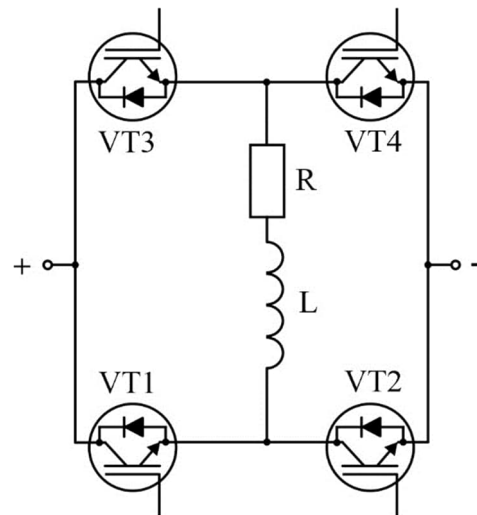


Рис. 3. Схема інвертора: VT1...VT4 – IGBT транзистори; R, L – активний опір і індуктивність котушки 2-х режимного ТЛМ

Чотири інвертори електрично поєднані і за сигналом системи управління рухом дозволяють реконфігурувати ТЛМ для отримання необхідно режиму його роботи. Процес реконфігурації та формування відповідних режимів роботи детально описаний в роботах [5, 7].

Нерівномірність сонячної інсоляції впродовж доби, року (сезонні коливання), а також високі вимоги до безпеки руху вимагають введення до структури енергозабезпечення траси накопичувача енергії. Основні вимоги до накопичувача:

- накопичення такого об'єму енергії, що гарантує роботу 2-х режимного ТЛМ у відповідності з графіком руху;

- наявність резервної системи для забезпечення працездатності ТЛМ у разі відмови основного накопичувача, а також створення запасу енергії для роботи на протязі декількох діб у разі несприятливих погодних умов;
- висока швидкість віддачі електричної енергії на 2-х режимний ТЛМ, що зумовлено високою швидкістю магнітоплану, а значить коротким часом його перебування в зоні конкретного ТЛМ;
- відношення енергії заряду до номінальної ємності накопичувача повинно бути мінімально можливим аби гарантувати прийнятний термін його експлуатації.

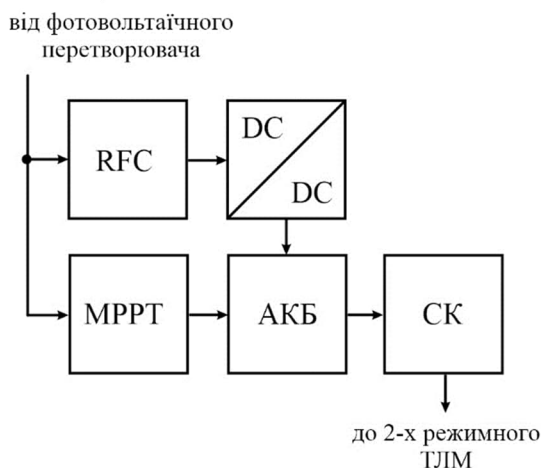


Рис. 4 – Структура гібридного накопичувача: MPPT – контролер заряду; АКБ – акумуляторна батарея; СК – суперконденсатор; RFC – регенеративний паливний елемент; DC-DC – перетворювач

Вказаним вимогам може задовольняти гібридний накопичувач, що має структуру наведену на рис. 4 до складу якої входить дві системи:

- основна система, що складається з MPPT-контролеру заряду, акумуляторної батареї (АКБ) та суперконденсатора (СК);

- резервна система, що має в своєму складі регенеративний паливний елемент (RFC) та електронний перетворювач DC-DC. Резервна система вступає в роботу і заряджає АКБ коли енергії сонця недостатньо.

Оскільки акумуляторні батареї мають електрохімічну природу, то системам накопичення на їх основі притаманні інерційність процесів та більший внутрішній опір. Це б обмежувало можливості джерела живлення формувати високоенергетичний імпульс в котушки 2-х режимного ТЛМ при високих швидкостях руху магнітоплану. Введення в структуру накопичувача суперконденсатора (СК) та поєднання його з АКБ здатне повністю задовольнити вимогам по видачі потужності для функціонування 2-х режимного ТЛМ у всьому діапазоні швидкостей транспортної системи. Крім того в такій схемі суттєво підвищується енергоефективність функціонування гібридного накопичувача та подовжується термін експлуатації його АКБ. Ефективність літій-іонних акумуляторних батарей не перевищує 70% при розряджанні номінальним струмом, в свою чергу, суперконденсатори за пікових навантажень забезпечують ККД на рівні 95% [8].

Основою резервної системи є регенеративний паливний елемент (RFC) схема якого наведена на рис. 5. RFC представляє собою інтегровану систему з електролізера і паливного елемента, яка фактично є системою зберігання енергії на основі водню. Електролізер використовує надлишкову енергію, що надходить від фотовольтаїчного перетворювача, для розщеплення води (H_2O) на водень (H_2) та кисень (O_2) через процес електролізу (зарядка). Отримані водень та кисень зберігаються в спеціальних газонакопичувальних резервуарах. У разі необхідності отримати електричну енергію збережені водень

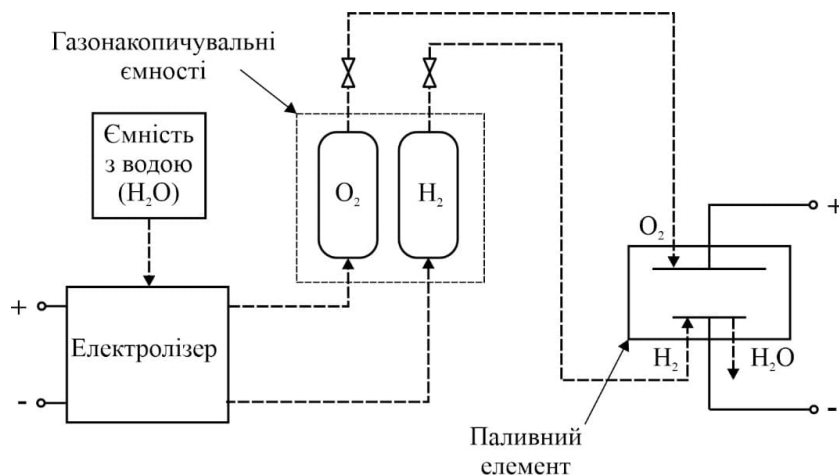


Рис. 5. Схема регенеративного паливного елемента (RFC)

та кисень подаються в паливний елемент. Паливний елемент поєднує водень з киснем, виробляючи електроенергію (розрядка або генерація), тепло та воду як єдиний побічний продукт. Електрична енергія з паливного елемента через DC-DC перетворювач використовується для зарядки АКБ.

Технологія водневих паливних елементів швидко розвивається і на сьогодні перебуває на етапі переходу від демонстраційних прототипів до промислового масштабування. Ідея не є новою, але саме зараз вона отримує колосальні інвестиції через глобальні цілі щодо декарбонізації транспорту та промисловості.

Найбільш перспективним напрямком для впровадження технології водневих паливних елементів вважаються стаціонарні системи резервного живлення та зберігання енергії. Є думка, що ми зараз знаходимося у тій самій точці з воднем, де сонячна енергетика була 15 років тому – на порозі різкого падіння вартості завдяки масовому виробництву.

Висновки

Формування транспортної магістралі з коротких 2-х режимних тягово-левітаційних модулів дозволяє побудувати надійну та енергоефективну систему живлення. Використання фотовольтаїчних перетворювачів, як первинного джерела енергії кардинально змінює логіку і архітектуру системи енергозабезпечення високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, робить його енергетично автономним, децентралізованим, екологічно чистим та ефективним.

В роботі обґрунтовано концепцію побудови системи енергозабезпечення траси високошвидкісного маглев-транспорту. Основою покращення енергетичних показників транспортної системи є інтеграція автономного гібридного джерела живлення на фотовольтаїчних перетворювачах в 2-х режимний тягово-левітаційний модуль.

Запропонована структура енергозабезпечення 2-х режимного ТЛМ з гібридним накопичувачем здатна забезпечити:

- безперебійне живлення ТЛМ не залежно від погодних умов, оскільки гібридний накопичувач має дві незалежні системи накопичення енергії – акумуляторну батарею та систему на основі водню;
- подачу короткого високоенергетичного імпульсу в котушки ТЛМ, основну роль в цьому грає суперконденсатор та швидка електроніка;

- реконфігурацію котушок ТЛМ у відповідності до режиму роботи (тяга чи левітація);
- енергоефективність за рахунок живлення тільки тієї ділянки траси над якою в даний момент знаходиться магнітоплан;
- високу надійність функціонування та відмовостійкість енергосистеми через наявність резервної системи на базі регенеративного паливного елемента.

Практичним аспектом роботи є розширення області застосування технології водневих паливних елементів системою зберігання енергії автономного джерела живлення траси високошвидкісного маглев-транспорту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Energy consumption of track-based high-speed trains: maglev systems in comparison with wheel-rail systems / E. Fritz et al. *Transportation Systems and Technology*. 2018. Vol. 4, no. 3 suppl. 1. P. 134–155. URL: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>.
2. Системи управління і енергозабезпечення магнітолевітаційного транспорту / В. О. Дзензерський та ін. Київ: Наук. думка, 2014. 276 с.
3. Ustymenko D. Prospects of application of photoelectric systems for energy supply of magnetolevitation high-speed transport. *Transport systems and transportation technologies*. 2025. No. 29. P. 66–71. URL: <https://doi.org/10.15802/tst2025/325476>.
4. Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module / A. M. Mukha et al. *Science and Transport Progress*. 2025. No. 2(110). P. 65–75. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332149>.
5. 2-mode traction-levitation module of a promising magnetic-levitation transport system / S. Plaksin et al. *Electromechanical and energy saving systems*. 2022. Vol. 58, no. 2. P. 56–65. URL: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>.
6. FP6 Instruments: Implementing the priority thematic areas of the Sixth Framework Programme of European Community Research. 2002. p. 16.
7. Analysis of Prerequisites for the Creation of a Second-Generation Dual-Mode Traction-Levitation Module / A. M. Mukha et al. *Science and Transport Progress*. 2025. No. 2(110). P. 65–75. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2025/332149>.
8. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>

Надійшла в редколегію 03.11.2025

Прийнята до друку 28.01.2026

POWER SUPPLY SYSTEM OF A 2-MODE TRACTION-LEVITATION MODULE OF A HIGH-SPEED MAGLEV TRANSPORT ROAD STRUCTURE

Purpose. The purpose of the work is to select and justify the structure of the power supply system of a 2-mode traction-levitation module (TLM) of a road structure of an improved high-speed magnetolevitation transport system, taking into account the features of energy generation, accumulation, storage and distribution with the use of photovoltaic converters in it. **Methodology.** In the process of working on the material, methods of analysis and synthesis were used to study scientific works on the energy supply of magnetic levitation transport systems, electrical engineering and electronics to modify the structure and parameters of the power supply system of a 2-mode traction-levitation module. Particular attention is paid to the issue of using hydrogen fuel cell technology. **Results.** A short 2-mode traction-levitation module is the main and universal module for building the track structure of an improved high-speed maglev transport system. The power supply system of such a module must meet the highest requirements for both energy efficiency and reliability and fault-free operation. The work proposes an autonomous power source for a 2-mode traction-levitation module where solar energy is used as the primary energy. To solve the problem of fluctuations in solar insolation throughout the day and year, a hybrid energy storage system is introduced into the structure, which has two independent systems - the main one on lithium-ion batteries in combination with a Supercapacitor and a backup one using hydrogen fuel cell technology. This approach is able to provide: uninterrupted power supply to the TLM regardless of weather conditions; supply of a short high-energy pulse to the TLM coils at a time determined by the position of the magnetic plane relative to the track; reconfiguration of TLM coils in accordance with the operating mode (traction or levitation); energy efficiency due to powering only the section of the route over which the maglev is currently located; high reliability of operation and fault tolerance of the power system due to the presence of a backup system based on a regenerative fuel cell. **Originality.** The work substantiates the concept of building a power supply system for a high-speed maglev transport route. The basis for improving the energy performance of the transport system is the integration of an autonomous hybrid power source based on photovoltaic converters into a 2-mode traction-levitation module. **Practical value.** The practical aspect of the work is to expand the scope of application of hydrogen fuel cell technology as an energy storage system for an autonomous power source for a high-speed maglev transport route.

Keywords: traction-levitation module, photovoltaic converter, power supply, magneto-plane, fuel cell, electrolyzer, storage device