

УДК 621.313.132

Д. В. УСТИМЕНКО*

*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

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою дослідження є обґрунтування можливості енергозабезпечення магнітолевітаційного високошвидкісного наземного транспорту від розподіленої фотоелектричної системи. Модернізація структури системи енергозабезпечення лінійного тягового електродвигуна з урахуванням особливостей генерації, зберігання та розподілу енергії з застосуванням в ній фотоелектричних перетворювачів. **Методика.** В процесі досліджень використані методи аналізу і синтезу для вивчення матеріалу наукових публікацій щодо оцінки енергетичних можливостей розподіленої фотоелектричної енергосистеми, теорія електричної тяги для оцінки енергозатрат на магнітолевітаційний транспорт, методи теорії електричних машин, електротехніку та електроніку для модифікації структури та параметрів системи електропостачання лінійного тягового двигуна так і параметрів самого двигуна. **Результати.** Аналіз загальної інсоляції в різних регіонах України показав, що на протязі календарного року з урахуванням орієнтації в просторі і ККД сонячних фотоелектричних панелей можна орієнтуватись на середню цифру генерації у 50 кВт-год/м²-рік. Разом з тим встановлено, що для руху з усталеною швидкістю 500 км/год поїзд з електродинамічним підвісом, що складається з 10 вагонів загальною масою 400 т., витрачає не більше 123 Вт-год/т-км. Тобто, вказаних умовах забезпеченості сонячною енергією, електричної енергії, що генерується 1 м² фотоелектричних панелей достатньо щоб приблизно 1 тис. разів транспортувати магнітолевітаційний поїзд вагою 400 т на відстань 1 м. В роботі окреслені структура та вимоги до системи електропостачання лінійного тягового електродвигуна з використанням сонячних фотоелектричних панелей. В рамках запропонованої структури енергопостачання лінійного тягового двигуна виключається необхідність в подачі значних об'ємів електричної енергії на значні відстані, що сприяє суттєвому зменшенню загальносистемних втрат, а сам тяговий лінійний електродвигун повинен мати коротку секцію статорної обмотки, довжина якої з урахуванням динамічної стійкості і енергоефективності коливається в межах 0,5...2 м. **Наукова новизна.** Отримані результати дозволяють підвести наукове підґрунтя для розвитку та удосконалення процесу енергозабезпечення магнітолевітаційного наземного транспорту. **Практична значимість.** Запропонована структура електропостачання лінійного тягового двигуна магнітолевітаційного транспорту від розподіленої фотоелектричної системи набуває нових властивостей серед яких її глибока інтегрованість в систему управління магнітолевітаційним транспортом, підвищена надійність та покращена електромагнітна сумісність її елементів, екологічність.

Ключові слова: лінійний синхронний двигун, фотоелектрична система, енергопостачання, магнітолевітаційний поїзд, транспорт, накопичувач

Вступ

Стабільна робота транспортної системи це запорука стрімкого та якісного зростання економіки будь якої країни. Серед різних видів високошвидкісного наземного транспорту саме магнітолевітаційний визнаний найбільш перспективним, оскільки поєднує в собі ряд важливих переваг – високу енергоефективність, низький рівень шуму, низьку експлуатаційну вартість утримання/обслуговування шляхової структури, гарну електромагнітну сумісність тощо.

Одним з напрямків розвитку транспортних систем є високошвидкісний транспорт на раціональних енергосистемах [1]. Використання аль-

тернативних джерел енергії, насамперед сонячної, відкриває нові можливості в підходах до побудови шляхової структури наземного високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. До таких відносяться доставка електричної енергії до споживача без додаткових затрат, співрозмірність питомих характеристик генерації електричної енергії та питомих характеристик навантаження, гарантованість подачі «палива» і його екологічність.

Постановка задач досліджень

Для того аби робити висновки про можливість енергозабезпечення магнітолевітаційного високошвидкісного транспорту від розподіленої

фотоелектричної системи, перш за все необхідно оцінити енергозатрати такого виду транспорту та енергетичні можливості запропонованої енергосистеми з урахуванням основних аспектів її експлуатації.

Одним з показників, що характеризує ефективність лінійного тягового електропривода високошвидкісного наземного транспорту [2, 3] є показник питомих енергозатрат $W_{\text{пт}}$ (Вт·год/т·км), що залежить від прийнятого закону руху, відстані між зупинками рухомого складу, величини опору руху та енергетичних показників тягового привода.

Для оцінки інтенсивності сонячної радіації введено поняття сонячної постійної – енергія випромінювана Сонцем, що падає за одиницю часу на одиницю площі поверхні яка перпендикулярна потоку випромінювання, в космічному просторі на середній відстані Землі від Сонця. Стандартне значення сонячної постійної дорівнює 1353 Вт/м^2 . Враховуючи особливості орбітального руху Землі густина потоку біля земної поверхні залежить від пори року і часу доби.

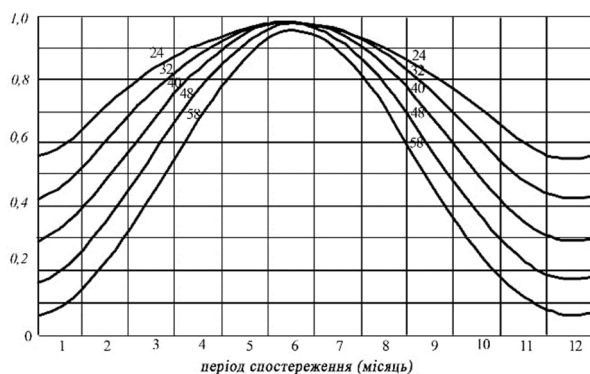


Рис. 1. Залежність надходження сонячної енергії на протязі року від широти вибраної місцевості за умови ясних днів [4]:

24° – Гавана, Калькутта; 32° – Лос Анджелес, Даллас; 40° – Нью Йорк, Мадрид; 48° – Сієтл, Париж, Дніпро; 56° – Белфаст, Копенгаген

На рис. 1 наведено реально виміряне відносне надходження сонячної енергії на земну поверхню для різних широт на протязі року за гарної погоди.

Локальні особливості положення точки прийому сонячної енергії і реальні погодні умови тільки знижують показники наведені на рис. 1.

Максимальне значення густини потоку радіації, що досягає Землі складає приблизно $1,0 \text{ кВт}$ на квадратний метр її поверхні, яка перпендикулярна сонячним променям, причому частка прямої радіації в умовах ясного неба складає близько $0,8 \text{ кВт/м}^2$. Величина $1,0 \text{ кВт/м}^2$

прийнята в якості стандартної при оцінці технічних характеристик промислових сонячних фотоелектричних модулів.

В матеріалі статті на концептуальному рівні розглядається можливість енергозабезпечення лінійного тягового двигуна шляхової структури магнітолевітаційного високошвидкісного наземного транспорту від розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів (сонячні панелі).

Основна частина

На основі запропонованого підходу в [3] до розрахунку енергетичної ефективності привода високошвидкісного наземного транспорту (ВШНТ) співробітниками Інституту транспортних систем і технологій НАН України (м. Дніпро) була розроблена методика, що дозволяє оцінити споживання енергії ВШНТ з різними системами тягового привода. За даною методикою було досліджено енергетику руху поїзда з електродинамічним підвісом, що складається з 10 вагонів загальною масою 400 т. Довжина перегонів від 100 до 300 км, а швидкість руху – 500 км/год.

В результаті визначено, що затрати питомої енергії на рух поїзда не перевищують 123 Вт·год/т·км і в середньому мають значення 110 Вт·год/т·км для перегону довжиною 100 км та 93 Вт·год/т·км для перегону довжиною 300 км. Потужність, що розвивається двигунами за умови руху поїзда з постійною швидкістю 500 км/год складає $14,66 \text{ МВт}$, потужність, що споживається з мережі – $18,9 \text{ МВт}$.

Особливістю класичної системи електропостачання тягового привода ВШНТ є те, що секції статорної обмотки лінійного синхронного тягового електродвигуна (ЛСТЕД) мають значну лінійну протяжність, і їх потрібно розглядати як частину системи електропостачання. Структура енергозабезпечення лінійного синхронного тягового електродвигуна високошвидкісного наземного транспорту від системи зовнішнього джерела енергії (зовнішня мережа) наведено на рис. 2.

Секції статорних обмоток ЛСТЕД отримують живлення через шляхові вимикачі від системи трифазних фідерів (фази А, В та С), що з'єднанні з перетворювачем [5]. Напруга і частота на кожному фідері можуть регулюватись у відповідності з необхідним тяговим режимом. Своєчасне увімкнення кожної наступної ділянки живлення і вимикання попередньої в процесі руху поїзда реалізується системою навігації та

зв'язку, яка контролюється системою управління рухом. Довжина фідерної зони, як правило коливається в межах 10...40 км.

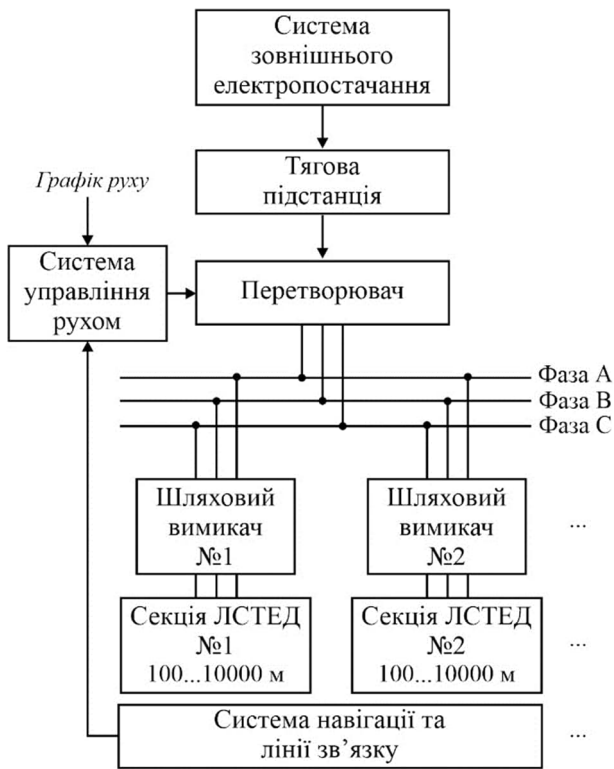


Рис. 2. Структура енергозабезпечення ЛСТЕД ВШНТ від системи зовнішнього джерела енергії

Встановлення і коригування величини струму якоря ЛСТЕД необхідно для забезпечення заданого тягового режиму, кута навантаження, що буде оптимальним виходячи з задачі максимізації значень ККД та коефіцієнта потужності, а також встановлення частоти напруги живлення при розгоні і гальмуванні поїзда реалізуються шляхом керування перетворювачами.

Зворотній зв'язок за значенням кута навантаження реалізується або з системи навігації, або по каналах зв'язку з поїздом. Подібним чином побудовані системи енергозабезпечення ВШНТ, що розробляються та випробовуються в Японії, Китаї, Германії [6, 7].

Довжина ділянки шляху, що отримує живлення суттєво впливає на величину споживаної сумарної потужності P_{Σ} , величину повної потужності S_{Σ} , на середні значення ККД η та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ (рис. 3).

З рис. 3 випливає, що для номінального режиму руху поїзда із зменшенням довжини ділянки, яка отримує живлення, енергетичні показники η і $\cos\varphi$ покращуються. Для покращення техніко-енергетичних показників двигуна час попереднього увімкнення наступної і вимкнення попередньої ділянки шляху потрібно

приймати мінімально можливими з урахуванням показників надійної роботи вимикачів. Також потрібно враховувати різке збільшення потужності, що споживається від перетворювачів при переході поїздом стиків ділянок живлення, як при розгоні, так і при русі з усталеною швидкістю. Таким чином ефективність енергопостачання ЛСТЕД зростає із зменшенням довжини секції, що отримує живлення і обмежується можливістю фізичної реалізації габаритів шляхової котушки $2\tau/3$, де τ – полюсне ділення. Енергія, що необхідна для живлення такої котушки визначається як питома енергія споживання і дорівнює $0,2916\tau$ Вт·с/кг·м або $0,08\tau$ Вт·год/т·м.

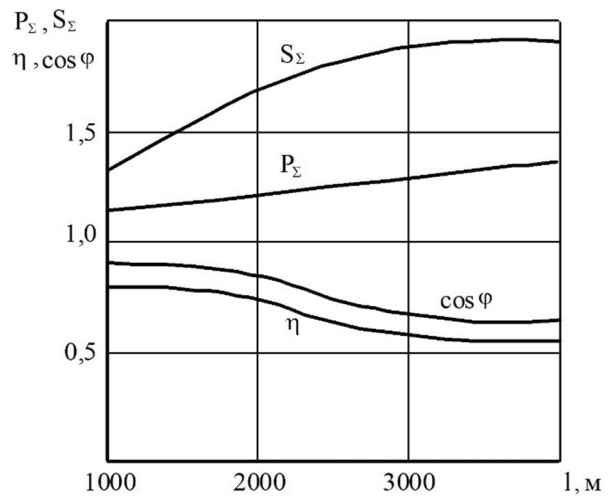


Рис. 3. Залежність сумарної споживаної активної потужності P_{Σ} , повної S_{Σ} потужності, середніх значень ККД η та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ від довжини ділянки шляху, що отримує живлення [3]

Крім того, оптимізація розмірів шляхових котушок лінійного двигуна з урахуванням динамічної стійкості і енергоефективності дає фізичні розміри шляхової котушки в межах $0,5...2$ м [5].

Однак саме по собі зменшення довжини секцій ЛСТЕД за традиційного способу їх енергопостачання не вирішує задачі енергетичних втрат, оскільки фідери залишаються багатокілометровими, а потужність, що пропускається через них значною. Тільки живлення окремої шляхової котушки від автономного джерела енергії при відповідній побудові системи управління дозволяє зняти проблему запасів реактивної потужності і знизити втрати енергії, що обумовлені «холостою» роботою сусідніх секцій при проходженні поїздом стиків секцій. Вирішити подібну задачу можна, якщо в якості джерела електричної енергії використовувати розподілену фотоелектричну систему.

Безумовним плюсом сонячної енергії є її доступність в будь-якому регіоні планети та те, що її виробництво може відбуватись безпосередньо на місці її споживання. Ця особливість дозволяє вести мову про проектування розподілених енергетичних систем. В різних регіонах України різна інтенсивність сонячної радіації на протязі року з урахуванням орієнтації і ККД сонячних фотоелектричних панелей можна орієнтуватись на середню цифру у $50 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2\cdot\text{рік}$ [8].

Якщо розглядати транспортну систему, то використання сонячної енергії приводить до розподіленої енергетичної мережі, що орієнтована вздовж шляху і яка управляється з єдиного диспетчерського центру. Так 1 м^2 фотоелектричної панелі на протязі календарного року може забезпечити енергією шлях для переміщення вантажу в 1 тону на відстань, що дорівнює довжині однієї шляхової котушки $2\tau/3 \text{ м}$, $625000 \cdot 1/\tau$ раз. Якщо величину τ прийняти в діапазоні від 1,5 до 2,6 м [5], то число переміщень складе відповідно 417000 та 240000 раз, що для вантажу 1 т відповідає пропускній здатності шляху 1,5...2,6 хв. Оскільки шляхова котушка є основним елементом лінійного двигуна, а її оптимальні розміри не перевищують 2,6 м, то структура системи електропостачання ЛСТЕД може бути модифікована і представлена в вигляді, як на рис. 4.

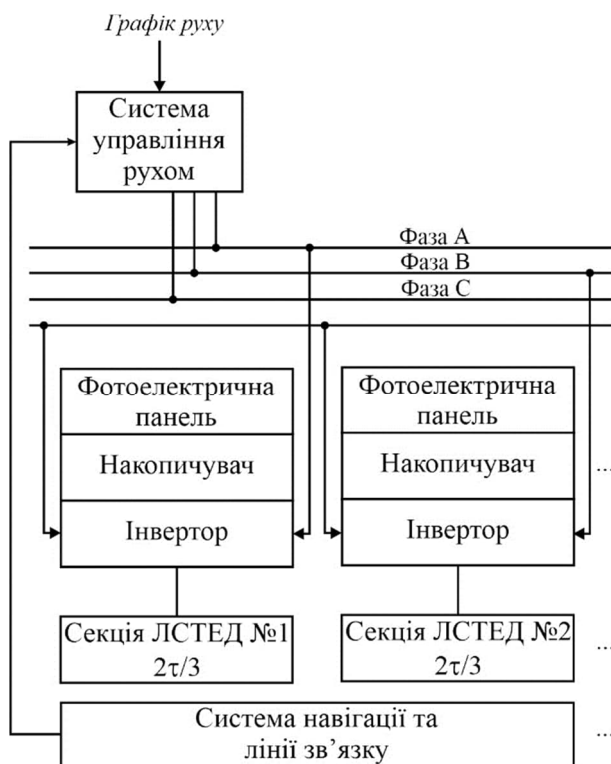


Рис. 4. Структурна схема електропостачання ЛСТЕД від сонячних фотоелектричних панелей

В такому вигляді система електропостачання транспортного шляху набуває нових властивостей:

- можливість використання більш чистих джерел енергії;
- більш висока економічна ефективність таких джерел у порівнянні з традиційними через використання новітніх технологій;
- більша ефективність розподілених джерел генерації у порівнянні з крупними станціями внаслідок врахування екологічних факторів, а також факторів ризику;
- реалізація диспетчеризації енергосистем з великою кількістю розподілених джерел генерації завдяки використанню новітніх технологій.

За такої структури енергопостачання (рис. 4) виключається необхідність в подачі значних об'ємів електричної енергії на значні відстані, що сприяє суттєвому зменшенню загальносистемних втрат. Єдиним силовим елементом є інвертор, що з'єднаний з накопичувачем і шляховою котушкою [9]. Нерівномірність отримання сонячної електрики впродовж доби вимагає введення в склад структури накопичувача електричної енергії. Таким чином, надлишок генерації (день) накопичується в накопичувачі, а в період зниженої генерації (ніч) звідти забирається. Перетворення енергії постійного струму в енергію змінного струму відбувається в інверторі. За сигналом від системи управління рухом енергія з інвертора поступає в потрібну шляхову котушку. Тобто, система, що складається з сонячної панелі, накопичувача та інвертора є таким собі ідеальним джерелом енергії, в якому процес генерації енергії та її споживання розділені в часі.

Враховуючи високі швидкості руху поїзда, час на проходження 1 метру шляху може коливатись від одиниць до десятків мілісекунд, що накладає досить жорсткі вимоги до умов роботи даного джерела енергії. По-перше, таке джерело енергії повинно працювати в циклічному режимі розряду-заряду так, щоб до наступного розряду накопичена питома енергія за величиною була не меншою від необхідного значення. По-друге, на протязі світлої частини доби джерело енергії повинно накопичувати достатньо енергії для роботи в нічний час, а також повинно мати запас енергії для роботи на протязі декількох діб за несприятливих погодних умов. По-третє, однією з основних його властивостей повинна бути висока швидкість заряду/розряду, а також для збільшення терміну його експлуатації відношення енергії заряду до номінальної ємності повинно бути мінімально можливим.

Вказаним вимогам може задовольняти, наприклад, накопичувач, що складається з акумулятора, іоністора, електролізера, ємності для зберігання водню і паливного елемента [10]. Акумулятор здатен забезпечити роботу джерела енергії на протязі декількох діб, іоністор – забезпечує швидкий власний заряд та розряд (його питома енергія надзвичайно велика), тим самим оберігаючи акумулятор від значних розрядних і зарядних струмів. Інші три елементи накопичувача забезпечують роботу енергосистеми під навантаженням в рамках річного циклу.

Головною вимогою до сонячних панелей є їх високий ККД, оскільки здатність фотоперетворювача найбільш повно перетворити променісту енергію сонця в електричну з одиниці площі, що опромінюється визначає ефективність усієї системи.

Висновки

Аналіз балансу енергетичних потреб магнітолевітаційного поїзда і можливостей фотоелектричної системи енергозабезпечення показує, що цілком можливо використовувати розподілену фотоелектричну систему в якості системи енергопостачання високошвидкісного наземного транспорту. Так, в умовах реальної забезпеченості сонячною енергією в Україні, електричної енергії, що генерується 1 м^2 фотоелектричних панелей достатньо щоб приблизно 1 тис. разів транспортувати магнітолевітаційний поїзд вагою 400 т на відстань 1 м.

Особливістю такого підходу до побудови системи енергозабезпечення є її глибока інтегрованість в систему управління магнітолевітаційним транспортом, підвищена надійність та покращена електромагнітна сумісність її елементів, екологічність.

D. USTYMENKO

PROSPECTS OF APPLICATION OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS FOR ENERGY SUPPLY OF MAGNETOLEVITATION HIGH-SPEED TRANSPORT

Purpose. The purpose of the study is to substantiate the possibility of power supply of magnetolevitation high-speed ground transport from a distributed photovoltaic system. Modernization of the structure of the linear traction electric motor power supply system taking into account the features of energy generation, storage and distribution with the use of photovoltaic converters in it. **Methodology.** In the process of research, methods of analysis and synthesis were used to study the material of scientific publications on the assessment of the energy capabilities of a distributed photovoltaic power system, the theory of electric traction to assess energy costs for magnetolevitation

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. 6th Framework Programme (2002-2006) | EUR-Lex. *EUR-Lex – Access to European Union law – choose your language*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legisum:i23012> (date of access: 21.01.2025).
2. Системи управління і енергозабезпечення магнітолевітаційного транспорту / В. О. Дзензерський та ін. Київ : Наук. думка, 2014. 276 с.
3. Бочаров В. И., Салли И. В., Дзензерский В. А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах. Ростов-на-Дону : Ростовск. университет, 1988. 152 с.
4. A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems. Elsevier, 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/c2016-0-01527-9> (date of access: 21.01.2025).
5. Високошвидкісний магнітний транспорт з електродинамічною левітацією. / В. О. Дзензерський та ін.; ред. В. О. Дзензерський. Київ : Наук. думка, 2001. 479 с.
6. 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 et al. Germany: The International Maglev Board, 2018. 44 p.
7. Гришко В. Г., Фащевський А. В. Високошвидкісний наземний транспорт: Курс лекцій для студентів вищих навчальних закладів залізничного транспорту. Київ : ДЕГУТ, 2014. 43 с.
8. Мхитарян Н.М. Геліоенергетика. Системи, технології, використання. Київ : Наук. думка, 2002. 320 с.
9. 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>.
10. Combined system of synchronized simultaneous control of magnetic plane movement and suspension / A. M. Mukha et al. *Science and transport progress*. 2022. No. 1(97). P. 23–31. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>.

Надійшла до редколегії 23.12.2024.
Прийнята до друку 04.03.2025.

transport, methods of the theory of electric machines, electrical engineering and electronics to modify the structure and parameters of the linear traction motor power supply system and the parameters of the motor itself. **Results.** Analysis of total insolation in different regions of Ukraine showed that during the calendar year, taking into account the orientation in space and the efficiency of solar photovoltaic panels, one can focus on the average generation figure of 50 kWh/m²·year. At the same time, it was established that for movement at a steady speed of 500 km/h, a train with electrodynamic suspension, consisting of 10 cars with a total mass of 400 tons, consumes no more than 123 W·h/t·km. That is, under the specified conditions of solar energy supply, the electrical energy generated by 1 m² of photovoltaic panels is enough to transport a maglev train weighing 400 tons for a distance of 1 m approximately 1 thousand times. The work outlines the structure and requirements for the power supply system of a linear traction electric motor using solar photovoltaic panels. Within the framework of the proposed structure of the linear traction motor power supply, the need to supply significant volumes of electrical energy over significant distances is eliminated, which contributes to a significant reduction in overall system losses, and the linear traction motor itself must have a short section of the stator winding, the length of which, taking into account dynamic stability and energy efficiency, varies within 0.5...2 m. **Scientific novelty.** The results obtained allow us to summarize the scientific basis for the development and improvement of the process of power supply of magnetic levitation ground transport. **Practical significance.** The proposed structure of the linear traction motor power supply of magnetic levitation transport from a distributed photovoltaic system acquires new properties, including its deep integration into the magnetic levitation transport control system, increased reliability and improved electromagnetic compatibility of its elements, and environmental friendliness.

Keywords: linear synchronous motor, photovoltaic system, power supply, magnetic levitation train, transport, storage