

С.В. Плаксін, А.М. Муха, Д.В. Устименко,
В.І. Доскоч, Т.А. Сандул, С.М. Куліков

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ МЕРЕЖІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Анотація. Сучасний високошвидкісний транспорт є основою сталого економічного та соціального розвитку держави, суспільства з дотримання вимог екологічності. Обґрунтована концепція енергозабезпечення лінійного двигуна магнітолевітаційного транспорту від розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів. Запропонований базовий силовий елемент шляхової енергетичної установки у вигляді завершеного вузла до складу якого входять сонячна панель, накопичувач та інвертор, що працює на навантаження у вигляді «короткої» шляхової котушки. Застосування «короткої» шляхової котушки дозволяє зменшити втрати електричної енергії, оскільки тягове зусилля формується лише в зоні взаємодії із рухомою одиницею, до незадіяних ділянок шляхової структури енергія не передається. За рахунок зменшення довжини робочої ділянки суттєво підвищуються інші енергетичні показники системи у цілому, зокрема коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії. Зменшення довжини робочих ділянок в умовах високих швидкостей рухомого складу призведе до підвищення вимог надійності та швидкодії шляхових вимикачів. Шляхові вимикачі створюються на базі силових напівпровідникових ключів, які керуються сучасними мікроконтролерами. Ефективність запропонованої структури залежить від сонячної активності в регіоні розташування транспортної артерії. Оціночні показники сонячної активності дозволяють стверджувати, що вагові показники рухомого складу, що має рухатися по колії з «короткою» секції, відповідають наявним ресурсам.

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

Постановка проблеми

Транспортна система будь-якої країни є надважливим елементом її економіки. Серед вимог, що пред'являють до транспорту особливо значимими є швидкість доставки пасажирів та вантажів, а також його енергоефективність. Високошвидкісний наземний транспорт на раціональних енергосистемах є пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки, що визначено 6-ю Рамочною Програмою Євросоюзу [1].

До сучасних високошвидкісних наземних транспортних систем, в першу чергу, відносяться рейкові опорні системи типу TGV (Alstom, Франція); монорельсовий поїзд

з використанням магнітної левітації Transrapid (Siemens та Thyssenkrupp Transrapid GmbH, Німеччина); JR-Maglev система швидкісних поїздів на магнітній підвісці (Japan Railway Technical Research Institute та Japan Railways, Японія). Враховуючи значимість транспортних систем для людства та зважаючи на останні досягнення науки і техніки інтерес до магнітолевітаційного транспорту буде тільки зростати [2, 3].

Класичні магнітолевітаційні системи дозволяють розвивати швидкості руху, які наближаються до швидкості повітряних перевезень але при цьому мають не найкращі енергетичні показники. Використання альтернативних джерел енергії, наприклад сонячної, здатне суттєво покращити енергетичні показники транспорту на магнітній левітації але потребує перегляду підходів до побудови його шляхової структури та способів керування лінійним двигуном.

Основний фокус при створенні нової шляхової структури повинен бути на: беззатратній доставці електричної енергії споживачу; співрозмірність питомих характеристик генерації та питомих характеристик навантаження; гарантованість надходження енергії та її екологічну чистоту.

Мета дослідження

Основною задачею представленого матеріалу є обґрунтування на концептуальному рівні застосування системи енергетичного забезпечення лінійного тягового електродвигуна шляхової структури магнітолевітаційного транспорту від розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В основі обґрунтування можливості застосування розподіленої мережі фотоелектричних перетворювачів для живлення лінійного двигуна магнітолевітаційного транспорту є оцінка енергозатрат самого транспорту та енергетичних можливостей пропонуваної енергетичної системи.

Одним з показників, що характеризує ефективність лінійного тягового електропривода високошвидкісного наземного транспорту [4] є показник питомих енергозатрат $W_{\text{пит}}$ (Вт·год/т·км), що залежить від прийнятого закону руху, відстані між зупинками рухомого складу, величини опору руху та енергетичних показників тягового привода.

Дослідження енергетики руху поїзда виконано для поїзда з електродинамічним підвісом, що нараховує 10 вагонів та має загальну масу 400 тон. Довжина перегонів коливається від 100 до 300 км, а швидкість руху становить 500 км/год.

В результаті встановлено, 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 МВт, потужність, що споживається з мережі –18,9 МВт.

Класична система енергопостачання тягового привода високошвидкісного наземного магнітолевітаційного транспорту має велику лінійну протяжність секцій статорної обмотки синхронного тягового електродвигуна, і їх, потрібно розглядати як частину системи енергопостачання. Довжина секцій обмотки статора, її параметри визначають основні параметричні та вартісні показники системи енергопостачання в цілому.

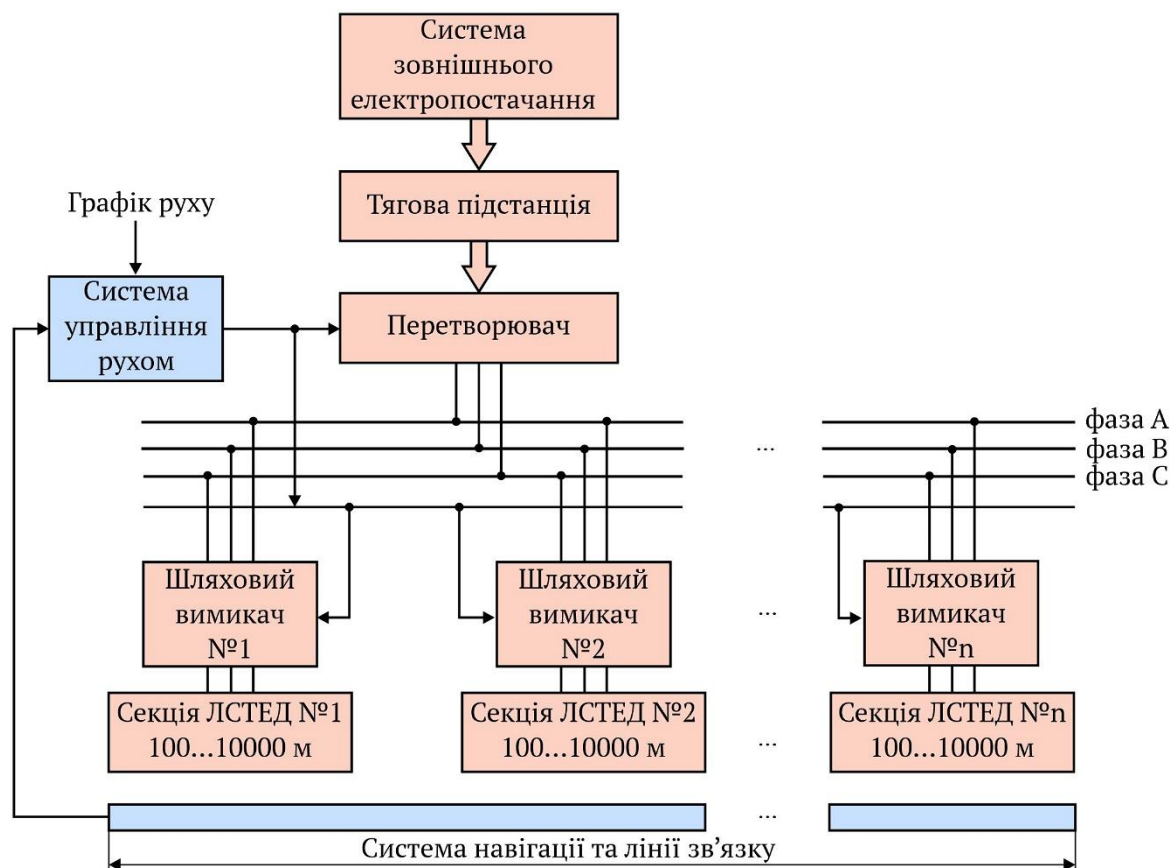


Рисунок 1 – Структура енергозабезпечення лінійного синхронного тягового електродвигуна (ЛСТЕД) високошвидкісного наземного магнітолевітаційного транспорту від системи зовнішнього джерела енергії

Узагальнена структурна схема енергозабезпечення лінійного синхронного тягового електродвигуна високошвидкісного наземного магнітолевітаційного транспорту від системи зовнішнього джерела енергії наведена на рис. 1 (силові елементи виділені червоним кольором). Якірна обмотка лінійного синхронного тягового електродвигуна (шляхові котушки секцій 1, 2...n) отримують живлення через відповідні шляхові вимикачі від системи трифазних фідерів (фази А, В та С), що з'єднані з перетворювачем. Напруга і частота на кожному фідері регулюються у відповідності з тяговим режимом. Вмикання на живлення як і вимикання кожної секції ЛСТЕД відбувається по мірі просування поїзда шляхом системою навігації та зв'язку, яка контролюється системою управління рухом. В структурі зображеній на рис. 1 довжина фідерної зони коливається в діапазоні 10...40 км. Величина струму в секції ЛСТЕД та його корегування, оптимальне значення кута навантаження, що дає високі значення ККД та коефіцієнта потужності, а також установка необхідної частоти напруги живлення в процесі розгону чи гальмування досягається керуванням перетворювачами. Поточна об'єктивна інформація про кут навантаження в систему керування перетворювачами надходить з системи навігації чи по каналам зв'язку з поїздом. Аналогічним чином влаштоване енерго-

постачання магнітолевітаційних транспортних систем Японії, Китаю, Німеччини, що випробовуються на їх полігонах.

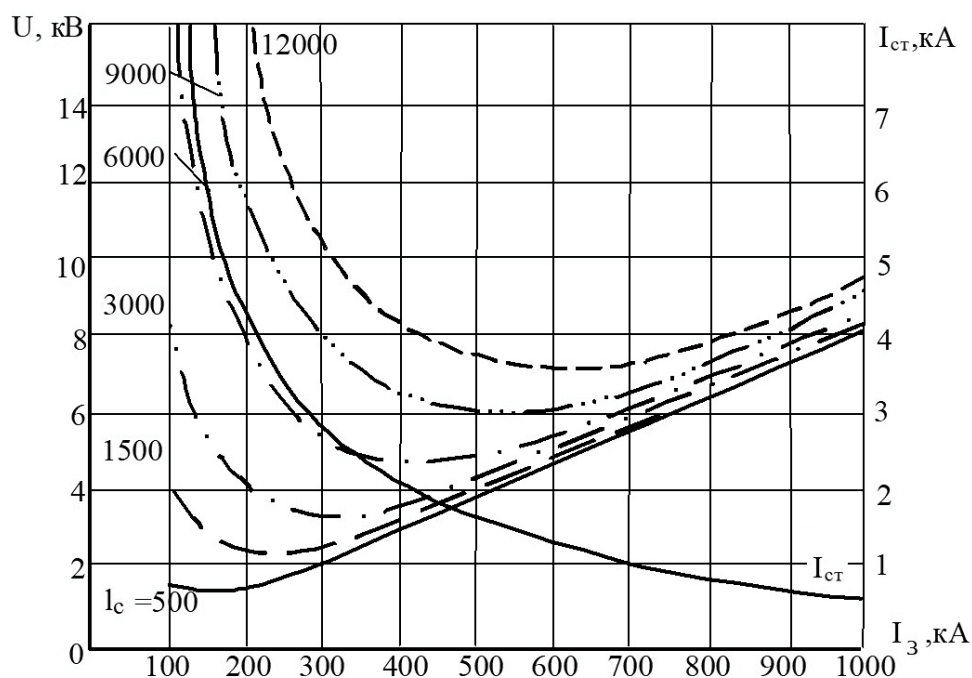


Рисунок 2 – Залежність напруги U і струму статора $I_{ст}$ ЛСТЕД від струму збудження I_3 в надпровідниковому контурі за різних довжин секцій статорної обмотки l_c

На рис. 2 наведені залежності напруги U і струму статора $I_{ст}$ ЛСТЕД від струму збудження I_3 в надпровідниковому контурі за різних довжин секцій статорної обмотки l_c для випадку усталеного руху з швидкістю 139 м/с та за частоти струму живлення 50 Гц (кількість надпровідникових контурів збудження 90, повітряний зазор ЛСТЕД 0,2 м, кут між векторами магнітних полів збудження та статорної обмотки 110° , сила тяги двигуна 105,5 кН). Для усіх довжин секцій залежність струму статорної обмотки від струму збудження має однаковий характер. Значення напруги живлення статора зростає із ростом довжини секції статорної обмотки від 500 м до 12000 м, тобто з ростом її індуктивного опору.

Умови за яких отримані залежності енергетичних показників ($\cos\phi$ та ККД) від струму збудження (рис. 3) аналогічні умовам, що й на рис. 2. Таким чином, для кожної довжини секції статорної обмотки лінійного двигуна можна знайти значення струму збудження за якого забезпечується компенсація реактивної складової енергії, що споживається.

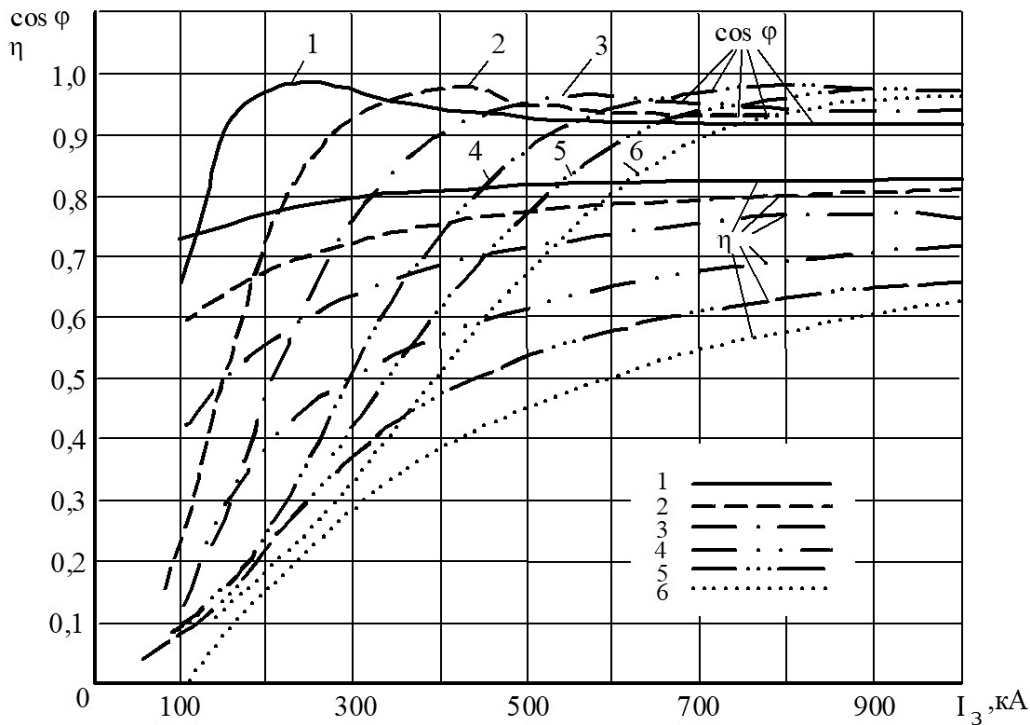


Рисунок 3 – Енергетичні показники ЛСТЕД в залежності від струму збудження двигуна (довжина секції $l_c=500$ м – крива 1, 1500 м – 2, 3000 м – 3, 6000 м – 4, 9000 м – 5 і 12000 м – 6)

Довжина ділянки, що отримує живлення, суттєво впливає на величини сумарної активної та повної потужностей споживані двигуном, середнє значення ККД і коефіцієнта потужності. Із зменшення довжини секції статорної обмотки тягового лінійного двигуна підвищуються його енергетичні показники (коефіцієнт потужності та ККД) але це потребує підвищення вимог до надійності та швидкодії шляхових вимикачів. На рис. 4 наведені залежності коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) і ККД (η) від часу попереднього увімкнення наступної ділянки t_b за умови $t_b=t_0$ (t_0 – час вимикання ділянки, що виходить з роботи) та довжини ділянки 2000 м. Зона А (рис. 4) якій відповідає $t_b=t_0 < 1$ с., не може бути прийнятою в якості робочої не дивлячись на високі енергетичні показники, оскільки швидкодія шляхових перемикачів, що залежить від виду вимикачів які застосовуються і системи керування ними, не дозволяє досягнути таких значень часу вмикання і вимикання.

Зона С (рис. 4) якій відповідає $t_b=t_0 > 9$ с., також не може бути прийнятою в якості робочої, оскільки в цьому випадку одночасно будуть отримувати живлення три ділянки, а також ця зона характеризується найнижчими енергетичними показниками. Таким чином, для забезпечення надійної роботи вимикачів і досягнення найкращих енергетичних показників двигуна час вмикання і вимикання ділянок живлення повинно бути в зоні В (діапазон часу 1...9 с.). Для зони В середній енергетичний фактор (добуток коефіцієнта потужності і ККД) зменшується від 0,69 ($t_b=t_0=2$ с.) до 0,49 ($t_b=t_0=8$ с.)

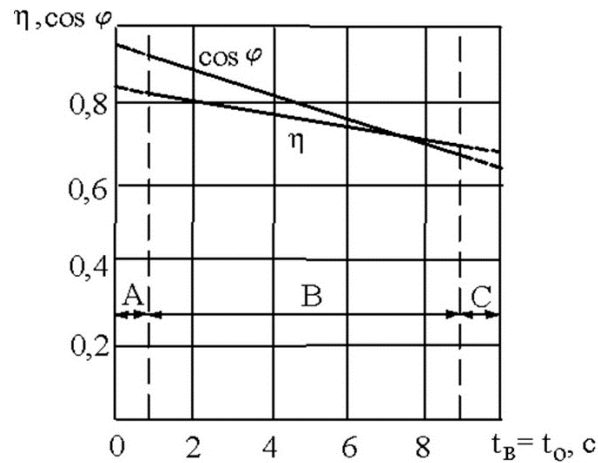


Рисунок 4 – Залежність енергетичних показників ЛСТЕД від часу увімкнення/вимкнення ділянок живлення ($l_c=2000$ м)

Для покращення техніко-економічних показників лінійного тягового електродвигуна час попереднього вмикання наступної і вимкання попередньої ділянки потрібно приймати мінімально можливим за умови збереження надійної роботи шляхових вимикачів.

Аналіз графічних залежностей представлених на рис. 2, 3 та 4 однозначно вказує на те, що ефективність енергопостачання зростає із зменшення довжини секції обмотки статора лінійного тягового електродвигуна і обмежується можливостями фізично відтворити розміри шляхової котушки $2\tau/3$, де τ – величина полюсного ділення.

Крім того, оптимізація розміру шляхових котушок з урахуванням динамічної стійкості і енергоефективності призводить до зменшення фізичних розмірів шляхових котушок до 0,5...2,0 м [5].

Але саме по собі використання коротких секцій ЛСТЕД за традиційного способу енергопостачання не вирішує задачі зниження втрат, так як фідери залишаються багатокілометровими, а потужність, що по ним пропускається, значною. Тільки подача живлення на окрему шляхову котушку від автономного джерела енергії з відповідною структурою системи керування дозволить вирішити проблему запасів реактивної потужності та знизити втрати, що обумовленні «холостою» роботою сусідніх секцій при проходженні поїздом стиків секцій. Розв'язати подібну задачу можна, якщо використати в якості джерела енергії розподілену фотоелектричну енергосистему.

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

Аналіз статистичних даних надходження сонячної енергії в Україні показав, що середньорічна кількість сумарної сонячної радіації на квадратний метр площі поверхні коливається від $1070 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ на півночі країни до $1400 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ на її півдні [6].

Для різних регіонів характерна різна інтенсивність сонячної радіації на протязі року, так в пустелі взимку сумарний час надходження сонячної радіації майже в 2 рази менший у порівнянні з літнім періодом. Для території України це співвідношення знаходиться в межах 4...7 [6]. Для практичних розрахунків з урахуванням орієнтації і ККД сонячних фотоелектричних панелей можна користуватись цифрою 50 кВт·год/м² на рік.

Оціночні розрахунки дозволяють говорити, що 1 м² фотоелектричної панелі на протязі року може забезпечити енергією шляхове полотно для переміщення вантажу в 1 тону на відстань, що рівна довжині шляхової котушки $2\tau/3$ м, близько $625000 \cdot 1/\tau$ раз. Якщо $\tau=2,5$ м, то число переміщень складе приблизно 240000 разів, що для вантажу 1 тонна відповідає пропускній здатності шляху 1,5...2,6 хв. Оскільки шляхова котушка є основним елементом лінійного тягового двигуна, то структура системи енергопостачання ЛСТЕД буде модифікована до виду наведеному на рис. 5.

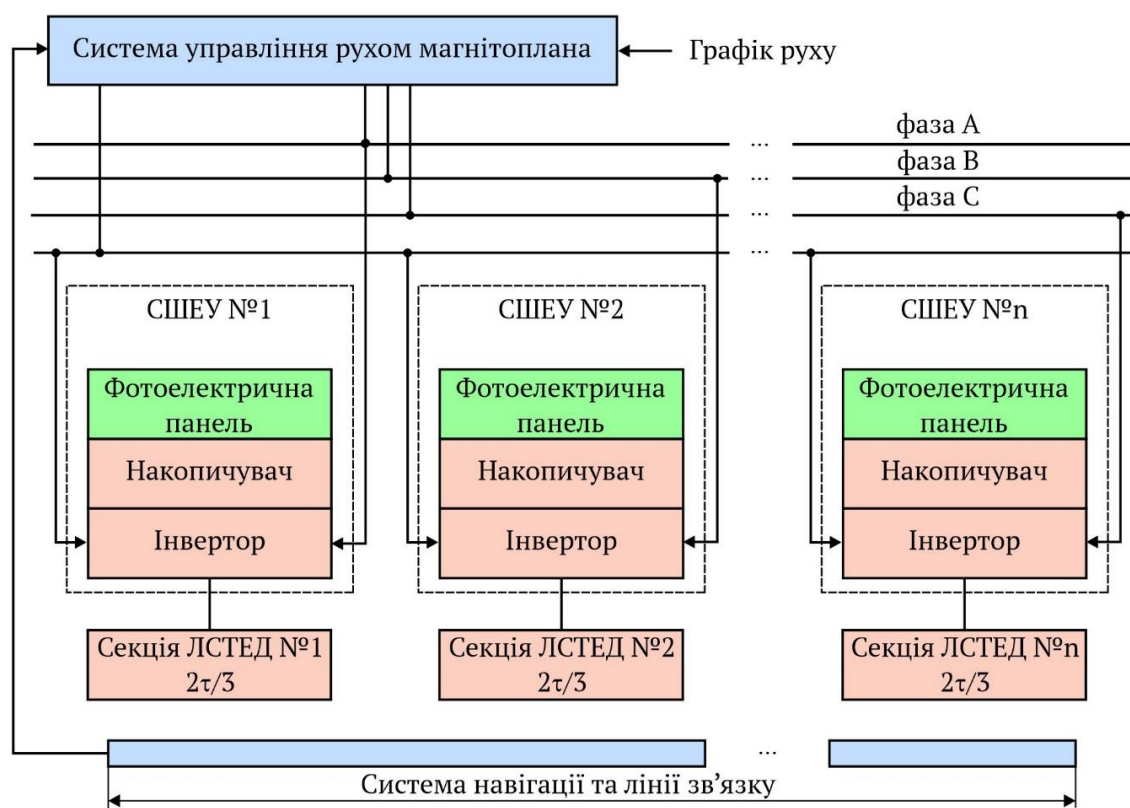


Рисунок 5 – Структурна схема енергопостачання ЛСТЕД від сонячних панелей (силові елементи виділені червоним кольором)

В структурі запропонованій на рис. 5 відпадає необхідність в передачі значних об'ємів енергії на великі відстані, що призводить до зменшення загальносистемних втрат. Основним силовим елементом такої системи є сонячна шляхова енергетична установка (СШЕУ) яка складається з фотоелектричної панелі, накопичувача та інвертора. Однотипні, малоенергоємні СШЕУ розміщуються вздовж магістралі забезпечуючи тим самим більш високий рівень надійності функціонування системи, кращу електромагнітну сумісність її елементів та безпеку експлуатації.

Враховуючи нерівномірність генерації електричної енергії фотоелектричними установками на протязі доби і року, для забезпечення незалежності системи енергопостачання до СШЕУ пред'являються наступні вимоги:

- накопичувач та інвертор повинні працювати в циклі розряду-заряду так аби до чергового розряду накопичена питома енергія була за величиною не меншою аніж це необхідно для транспортування одиниці ваги поїзда на одиницю довжини шляху;
- накопичувач повинен забезпечувати накопичення достатнього об'єму енергії в світлу пору доби аби нормально функціонувати вночі;
- накопичувач повинен мати певний запас енергії аби забезпечити безперебійну роботу транспортної системи протягом декількох діб за несприятливих погодних умов;
- накопичувач повинен мати здатність в літній період акумулювати стільки енергії аби взимку віддавати її поступово на навантаження гарантуючи цим незалежне енергопостачання транспортній системі на протязі року.

Вище викладеним вимогам може задовольняти накопичувач, що складається з акумулятора, іоністора, електролізера, ємності для зберігання водню та паливного елемента. Акумулятор в змозі забезпечити енергію для роботи СШЕУ годинами чи навіть декілька діб, іоністор маючи високі показники заряду/розряду оберігає акумулятор від значних струмів заряду/розряду. Інші три елементи покликані забезпечити роботу енергосистеми під навантаженням на протязі року.

Головною вимогою ж до сонячних панелей є вимога високого ККД.

Висновки

Виконаний аналіз балансу енергетичних потреб магнітолевітаційного поїзда і можливостей фотоелектричної системи енергозабезпечення показує, що цілком реально 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 м² фотоелектричних панелей достатньо щоб приблизно 1 тис. разів транспортувати магнітолевітаційний поїзд вагою 400 тонн 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.

ЛІТЕРАТУРА

1. 6 FPE Instruments, (Implementing the Prior by Thematic Areas of the Sixth Frame Program // European Commission. Community Research. – 2002. – № 2. – P. 4
2. Fritz E., Kluhspies J., Kircher R., Witt M., Blow L. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel Rail. *Transportation Systems and Technology*. Vol. 4(3). P. 134-155. <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>
3. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. Germany: The International Maglev Board, 2018. 44 p.

4. Системи управління і енергозабезпечення магнітолевітаційного транспорту / Дзензерський В. О., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Толдаєв В. Г., Шкіль Ю. В. Київ: Наукова думка, 2014. 276 с.
5. Муха А.М., Плаксін С.В., Погоріла Л.М., Устименко Д.В. і Шкіль Ю.В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана // Наука та прогрес транспорту. 1(97) (Жов 2022), 23–31. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
6. Мхітарян Н.М. Геліоенергетика. Системи, технології, використання. – Київ: Наукова думка, 2002. – 320 с.

REFERENCES

1. 6 FPE Instruments, (Implementing the Prior by Thematic Areas of the Sixth Frame Program // European Commission. Community Research. – 2002. – № 2. – P. 4
2. Fritz E., Kluhspies J., Kircher R., Witt M., Blow L. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel Rail. Transportation Systems and Technology. Vol. 4(3). P. 134-155. <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>
3. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. Germany: The International Maglev Board, 2018. 44 p.
4. Systemy upravlinnia i enerhozabezpechennia mahnitolevitatsiinoho transportu / Dzenzerskyi V. O., Plaksin S. V., Pohorila L. M., Toldaiev V. H., Shkil Yu. V. Kyiv: Naukova dumka, 2014. 276 s.
5. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. Science and Transport Progress, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
6. Mkhitarian N.M. Helioenerhetyka. Systemy, tekhnolohii, vykorystannia. – Kyiv: Naukova dumka, 2002. – 320 s

Received 23.08.2024.
Accepted 28.08.2024.

Justification of the application of a distributed network of photoelectric converters to power a linear motor of magnetolevitation transport

Abstract. Modern high-speed transport is the basis of sustainable economic and social development of the state, society in compliance with environmental requirements. The concept of power supply of a linear motor of magneto-levitation transport from a distributed network of photovoltaic converters is substantiated. The basic power element of a track power plant is proposed in the form of a completed unit consisting of a solar panel, a storage device and an inverter, which operates on a load in the form of a "short" track coil. The use of a "short" track coil allows reducing electrical energy losses, since the traction force is formed only in the zone of interaction with the rolling stock, energy is not transmitted to unused sections of the track structure. By reducing the length of the working section, other energy indicators of the system as a whole are significantly suspended, in particular the power factor and efficien-

cy. Reducing the length of the working sections in conditions of high speeds of rolling stock will lead to increased requirements for reliability and speed of operation of track switches. The track switches are created on the basis of power semiconductor switches, which are controlled by modern microcontrollers. The effectiveness of the proposed structure depends on the solar activity in the region of the transport artery. The estimated solar activity indicators allow us to state that the weight indicators of the rolling stock that must move on the track with a "short" section correspond to the available resources.

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

Плаксін Сергій Вікторович – професор, д.ф.-м.н., завідувачий відділом «Системи керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Дніпро, Україна.

Муха Андрій Миколайович – професор, д.т.н., завідувачий кафедрою «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Устименко Дмитро Володимирович – доцент, к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Доскоч Володимир Ігорович – аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Сандул Тарас Анатолійович – аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Куліков Сергій Миколайович – аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Plaksin Serge Viktorovych – professor, doctor of physical and mathematical sciences, head of the department of vehicle control systems, institute of transport systems and technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Mukha Andrew Mykolayovych – Professor, doctor of technical sciences, head of the department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Ustymenko Dmytro Volodymyrovych – associate professor, candidate of technical sciences, associate professor of the department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Doskoch Volodymyr Igorovich – postgraduate student of the department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Sandul Taras Anatolievich – postgraduate student of the department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Kulikov Serhii Mykolayovych – postgraduate student of the department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.