

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.016.12:[004.94:621.316-047.37]

Є. М. ЧУПРИНА^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, О. І. БОНДАР^{3*}, С. В. ПЛАКСІН^{4*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 360 37 88, ел. пошта nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{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 mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 333 88 96, ел. пошта etemdiit@gmail.com, ORCID 0000-0003-3884-5589

^{4*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем і 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

Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля

Мета. Основна ідея роботи полягає у тому, що електрична енергія, яку генерують фотоелектричні установки, малими частинами надходить до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, а далі ці «порції» енергії надходять в один спільний, так званий тяговий накопичувач. Дослідження спрямоване на отримання часових діаграм зміни струму та напруги в запропонованій системі. **Методика.** Проведено огляд світової літератури щодо теми роботи. За основу цього дослідження взято аналіз перехідних процесів в електричних колах системи, під час передачі енергії від фотоенергетичного модуля до тягового конденсатора під дією різних сигналів керування: послідовного, паралельного, суміщеного. Основним методом досліджень є імітаційне комп'ютерне моделювання. Для моделювання роботи системи накопичення електричної енергії використано програмне середовище Scilab. **Результати.** Доведено актуальність дослідження та розробки системи первинного накопичення електричної енергії з використанням тягового фотоенергетичного модуля. Установлено ключові математичні залежності між параметрами складових елементів електричних кіл. Запропоновано структуру ділянки з накопичувачами електричної енергії з тяговими фотоенергетичними модулями, а також блоком «перетворювач – імпульсний сигнал». Отримано графічні характеристики перехідних процесів, які відбувалися під час передачі енергії від ємнісних елементів малої потужності до ємнісного елемента великої потужності (тягового конденсатора). **Наукова новизна.** Уперше отримано графічні залежності передачі енергії між елементами системи, що дозволяє провести обґрунтований вибір параметрів цих елементів. Також вперше отримано часові залежності, які описують закон керування процесом передачі енергії між ланками системи, що дозволить визначити раціональні режими її роботи. **Практична значимість.** За результатами досліджень відкриваються нові можливості в дослідницькій сфері при розробці масштабних експериментальних моделей шляхової структури маглева в разі впровадження системи розподільного первинного накопичення електроенергії в тяговому фотоенергетичному модулі.

Ключові слова: фотоенергетичний модуль; тяговий конденсатор; магнітолевітаційний транспорт; шляхова структура; перехідні процеси; комп'ютерне моделювання

Вступ

На сучасному етапі розвитку техніки магнітолевітаційний транспорт є найбільш перспективним видом наземного транспорту [2],

упровадження якого дає змогу знівелювати певну низку недоліків, пов'язаних із використанням традиційних транспортних систем. Підвищення швидкості руху та сили тяги в традиційних залізничних системах

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

обмежено силами зчеплення з поверхнею, по якій прямує екіпаж. Не менш важливим є використання енергетичних ресурсів та екологічна безпека, яка безпосередньо від цього залежить, наприклад, транспортні системи, які працюють на двигунах внутрішнього згорання, мають негативний вплив через викид шкідливих газів у навколишнє середовище.

Одним із перших етапів упровадження новітніх систем є цикл науково-дослідних робіт, які вимагають створення відповідних полігонів. Як показує світовий досвід, побудова великих полігонів для дослідження складних систем є нерациональною [6]. Для створення та подальшого дослідження моделі магнітолевітаційного транспорту, побудованого за новим принципом шляхової структури, запропоновано застосувати метод масштабування моделювання. Це значно полегшить розробку масштабної моделі, а також дозволить провести глибокий аналіз роботи системи в різних режимах. Стає можливим проаналізувати динаміку протікання перехідних процесів, оцінити ефективність моделі та виявити основні можливості системи.

Використання масштабного моделювання відкриє можливість перевірити працездатність системи на практиці, визначити можливі помилки експериментальної установки, що дозволить нівелювати та скорегувати її роботу. Розвиток цього методу можна спостерігати в [8], де за його допомогою реалізовано розробку деяких спеціальних електричних машин (двигун приводу помпи) в штучному серці. Принцип роботи масштабованого дослідного стенда для діагностики стану електромеханічних систем наявний у [5].

Аналог дослідницької установки для магнітолевітаційного транспорту подано в [12], автори запропонували концепцію, у якій безпосередньо було використано масштабування моделі у співвідношенні 1 до 10. У ході експериментальних досліджень характеристики та результати розробленого стенда в цілому задовольнили очікування.

Перспективним напрямом підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у транспортних засобах та системах є впровадження нових технологій, зокрема у сфері відновлювальної енергетики, а також накопичення

енергії для подальшого її використання в необхідний момент часу.

Одним із напрямів підвищення енергетичної ефективності транспортних засобів є використання фотоенергетичних установок та накопичувачів енергії, які спроможні в найкоротший термін передавати енергію транспортному засобу, коли це буде необхідно. Автори [9] досліджують використання сонячної енергії, проводять аналіз, які ж країни наразі роблять найбільший внесок у розвиток цієї галузі.

Альтернативу запропоновано у [10], де керування транспортною системою відбувалося з допомогою мікроконтролера. За результатами цього дослідження автори відзначили, що порівняно з маглевом традиційної конструкції їх варіація вигідніша у 8 разів.

Автор [1] також підтримує впровадження фотоенергетичних систем у структуру маглева, але дещо відмінну. У цій розробці весь шлях, по якому прямує потяг був закритий дахом, у верхній частині якого розташовані сонячні панелі, що поглинають світло та виступають як екологічно чисте джерело енергії.

Автори [3] розробили метод раціонального управління динамічними режимами роботи накопичувачів енергії для підвищення ефективності їх експлуатації у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів. Цей спосіб дозволяє в режимі реального часу стежити за станом накопичувачів та вчасно розв'язувати проблемні питання.

Мета

Завдання впровадження магнітолевітаційного транспорту безпосередньо передбачає з розв'язання низки механічних проблем, які стосуються зокрема роботи та вдосконалення системи тягового електропостачання, особливо в контексті загальних тенденцій щодо збільшення використання відновлювальних енергетичних ресурсів та вирішення екологічних проблем.

Суть цієї статті полягає в тому, що електрична енергія, яка генерується розподіленими вздовж шляхової структури маглева фотоелектричними установками малої потужності, малими частинами передається до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, далі ці «порції» енергії передаються в один спільний

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

так званий тяговий накопичувач. Наше дослідження спрямоване на отримання часових діаграм зміни струму та напруги в запропонованій системі.

Методика

Це дослідження базується на аналізі перехідних процесів в електричних колах системи, під час передачі енергії від фотоенергетичного модуля до тягового конденсатора під дією різних сигналів керування: послідовного, паралельного, суміщеного.

Основним методом досліджень є імітаційне комп'ютерне моделювання. Для моделювання роботи системи накопичення електричної енергії було використано програмне середовище Scilab.

На накопичувачі малої потужності була подана напруга 12 В, після чого вони почали накопичувати електричну енергію. Після повного заряду накопичувачі передають її на тяговий конденсатор. Під час моделювання перехідних процесів було обрано тривалість діапазону моделювання 0,1 с. У результаті дослідження з використання установки отримуємо числові значення та графічні характеристики, що поліпшать розуміння роботи створюваної системи розподільчого накопичення електроенергії тягового фотоенергетичного модуля.

Фотоенергетичні установки вбудовані у шляхову структуру, по якій прямує екіпаж, передають свою енергію накопичувачам малої потужності. У потрібний час ці накопичувачі через імпульс передають накопичену енергію в один великий накопичувач (тяговий конденсатор). Імпульс енергії дозволяє швидко та без будь-яких перешкод від сусідніх елементів передати енергію від малих накопичувачів до тягового.

Схема для дослідження має структуру, яка складається з певних компонентів, а саме: джерело живлення (фотоенергетична установка), резистори та конденсатори, які створюють певну систему RC-контурів, частина якої проілюстрована (рис. 1).

Дослідження полягає у визначенні перехідних процесів та отриманні характеристик у період перетікання заряду конденсаторів малої потужності у конденсатор великої потужності (тяговий). Сам процес розрядження конденсатора через інший конденсатор є явищем, під час

якого накопичена енергія переходить від одного конденсатора до іншого. На початку роботи системи візьмемо, що напруга на тяговому конденсаторі u_{C1} буде різною після розрядження в нього кожного з конденсаторів.

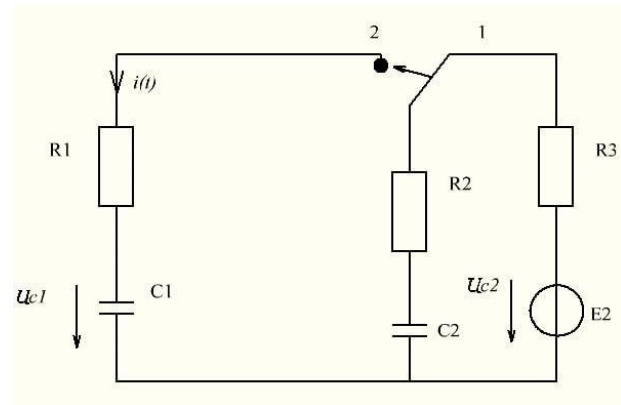


Рис. 1. Принципова схема підключення первинного накопичувача RC

Fig. 1. Schematic diagram of the primary RC drive connection

Процес розрядження конденсатора через інший конденсатор можна описати за допомогою певних рівнянь, які відображають зміну заряду та напруги з часом.

Рівняння електромагнітного стану кола в післякомутаційному режимі матимуть вигляд (1–3):

$$R_2 \cdot i(t) + R_1 \cdot i(t) + u_{C1}(t) - u_{C2}(t) = 0; \quad (1)$$

$$i(t) = C_1 \frac{du_{C1}(t)}{dt}; \quad (2)$$

$$i(t) = C_2 \frac{du_{C2}(t)}{dt}. \quad (3)$$

Тоді розв'язок для перехідної напруги згідно з класичним методом аналізу перехідних процесів можна представити у вигляді двох складових:

$$u_{C1}(t) = U_{C1y} + u_{C16}(t), \quad (4)$$

де U_{C1y} — усталена складова напруга на конденсаторі C_1 ; u_{C16} — вільна складова напруги на конденсаторі C_2 .

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Після закінчення перехідного процесу в установленому режимі перехідний струм у колі відсутній, і відповідно до схеми (рис. 1) напруги на обох конденсаторах однакові:

$$U_{C1y} = U_{C2y} = U_{Cy} = \text{const.} \quad (5)$$

Сумарний заряд у системі після комутації за умови повністю розрядженого конденсатора C_1 можна описати виразом:

$$Q = u_{C2}(0) \cdot C_2, \quad (6)$$

де $u_{C2}(0)$ — перехідна напруга на конденсаторі C_2 в момент комутації, яка другим класичним законом комутації становитиме:

$$u_{C2}(0) = u_{C2}(-0) = E_2. \quad (7)$$

Після закінчення перехідного процесу сумарний заряд системи перерозподілиться на обидва конденсатори згідно з виразом:

$$Q = C_1 \cdot U_{Cy} + C_2 \cdot U_{Cy}. \quad (8)$$

Тоді згідно з виразами (7) – (8) U_{Cy} визначимо так:

$$U_{Cy} = \frac{u_{C2}(0) \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (9)$$

Далі переходимо до визначення вільної складової шуканої перехідної величини. Для цього перш за все складаємо характеристичне рівняння кола (рис. 1). Зазначене рівняння має вигляд:

$$Z(p) = \frac{1}{p \cdot C_1} + R_1 + R_2 + \frac{1}{p \cdot C_2} = 0. \quad (10)$$

Звідси корінь характеристичного рівняння дорівнює:

$$p = -\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)}. \quad (11)$$

Відповідно вільну складову шуканої напруги запишемо у вигляді:

$$u_{iB}(t) = A \cdot e^{pt}, \quad (12)$$

де A – постійна інтегрування; p – корінь характеристичного рівняння.

Постійне інтегрування визначаємо за допомогою початкових умов:

$$A = u_{C1}(0) - U_{Cy}. \quad (13)$$

У виразі (13) за умови повністю розрядженого початкового стану конденсатора C_1 за другим класичним законом комутації маємо $u_{C1}(0) = u_{C1}(-0) = 0$, тоді постійна інтегрування дорівнює:

$$A = -U_{Cy}. \quad (14)$$

Таким чином, прикінцевий вираз шуканої перехідної напруги на тяговому конденсаторі записуємо так:

$$u_{C1}(t) = \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} - \frac{E_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2} e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)} t}. \quad (15)$$

При цьому закон зміни перехідного струму у колі можна отримати зі співвідношення (2) з урахуванням виразу (15).

Далі розглянемо перехідні процеси в разі наявності попереднього заряду на конденсаторі C_1 . У такому випадку вираз (6) набуває вигляду:

$$Q = u_{C2}(0) \cdot C_2 + u_{C1}(0) \cdot C_1; \quad (16)$$

$$u_{C1}(0) = U_{Cy}. \quad (17)$$

Тоді шукану перехідну величину напруги на конденсаторі C_1 запишемо так:

$$u_{C1(i+1)} = U_{C1y(i+1)} + C_2 \cdot U_{C1B(i+1)}. \quad (18)$$

Співвідношення (8) при цьому набуває вигляду:

$$Q = C_1 \cdot U_{Cy(i+1)} + C_2 \cdot U_{Cy(i+1)}. \quad (19)$$

Отже, прирівнюючи вирази (16) та (19) з урахуванням співвідношення (17), визначаємо установлене значення напруги на ємності C_1 :

$$U_{Cy(i+1)} = \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{Cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}. \quad (20)$$

Вільна складова шуканої напруги буде мати вигляд виразу (12), у якому корінь характеристичного рівняння визначаємо за співвідношенням (11), а постійну інтегрування A знаходимо за виразом (13), тобто:

$$A = U_{cy} = -\frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}. \quad (21)$$

Тоді шукана величина перехідної напруги набуває такого остаточного вигляду:

$$u_{C1(i+1)}(t) = \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2} + (U_{cy} - \frac{E_2 \cdot C_2 + U_{cy} \cdot C_1}{C_1 + C_2}) e^{-\frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 (R_1 + R_2)} t}. \quad (22)$$

При цьому величину перехідного струму також можна визначити за виразом (2) з урахуванням отриманого співвідношення (22).

Представлені вище аналітичні залежності дозволяють провести обґрунтований вибір параметрів експериментальної системи, для забезпечення максимальної енергоефективності передачі та зберігання енергії. Як вказано вище, світовий досвід ґрунтується на використанні масштабних моделей. Розглянемо таку модель запропонованої фотоенергетичної установки.

Результати

Експериментально-дослідницька установка матиме кругову форму, фотоенергетичні елементи знаходитимуться із зовнішньої сторони шляхової структури.

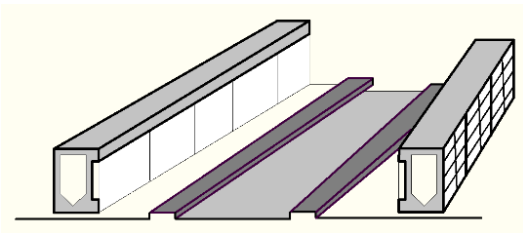


Рис. 2. Частина шляхової структури з фотоелектричними установками

Fig. 2. Part of the track structure with photovoltaic installations

Фотоенергетичні елементи використовують для подання електричної енергії в накопичувачі малої потужності, які передадуть «порції» енергії в один тяговий накопичувач максимально швидко.

Досліджувана система складається з фотоенергетичних модулів, конденсаторів малої ем-

ності, перемикачів, блока перетворювача напруги в імпульсний сигнал та тягового конденсатора (рис. 3).

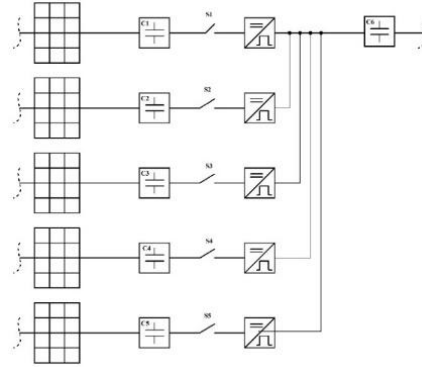


Рис. 3. Блок первинного накопичення енергії

Fig. 3. Primary energy storage unit

Формування вихідного імпульсу буде залежати від певних факторів та задач, поставлених у дослідженні, керування процесами рухомого складу. Приклади варіантів вихідних імпульсів наведено на рис. 4–5.

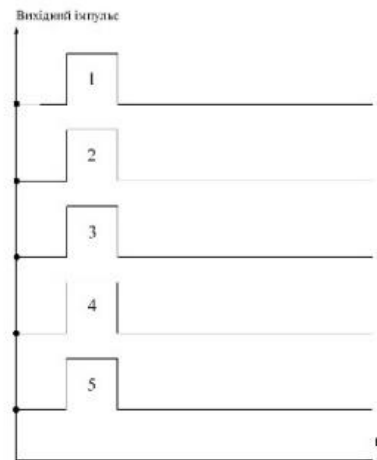


Рис. 4. Одночасне вмикання накопичувачів

Fig. 4. Turning on the drives simultaneously

У випадку, коли накопичувачі малої потужності починають передавати накопичену енергію тяговому конденсатору, перехідні процеси відбуваються одночасно, що може негативно вплинути на роботу системи, зокрема через те, що опір на виході буде вищим, ніж у наступному випадку.

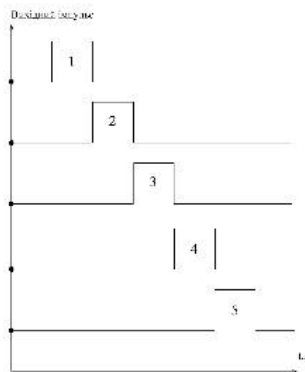


Рис. 5. Послідовне вмикання накопичувачів

Fig. 5. Powering up drives in sequence

У разі послідовного вмикання накопичувачів спостерігається плавне перетікання перехідних процесів. За рахунок того, що опори під'єднані паралельно, результуючий опір буде малим, це має позитивний вплив на роботу системи.

Для реалізації системи було обрано програмне середовище Scilab, яке дозволяє використовувати його у вільному доступі. Завдяки йому можна моделювати систему та встановлювати необхідні значення, такі як: вхідна напруга, частота, опори елементів, тривалість та затримка подачі імпульсу на конденсатор. У процесі моделювання системи отримуємо графіки, які дають можливість проаналізувати результати, оцінити працездатність та доцільність роботи системи.

На накопичувачі малої потужності подаємо напругу 12 В, а вони передають накопичену енергію до тягового накопичувача. Схему системи та її елементів подано на рис. 6.

У результаті моделювання системи тягового фотоенергетичного модуля отримано графіки характеристик поведінки напруги та струму на тяговому конденсаторі, із яких видно, як саме протікали перехідні процеси під час повного циклу роботи (рис. 7).

На рис. 7 можна побачити плавне зростання напруги, плавне та рівномірне протікання перехідного процесу. Графік характеристики поведінки струму під час перехідного процесу свідчить про те, що в ньому відбуваються зміни заряду чи розряду. Це можливо в тому випадку, коли конденсатор швидко заряджається або розряджається до певного усталеного рівня, після чого цей процес може повторюватися декілька разів.

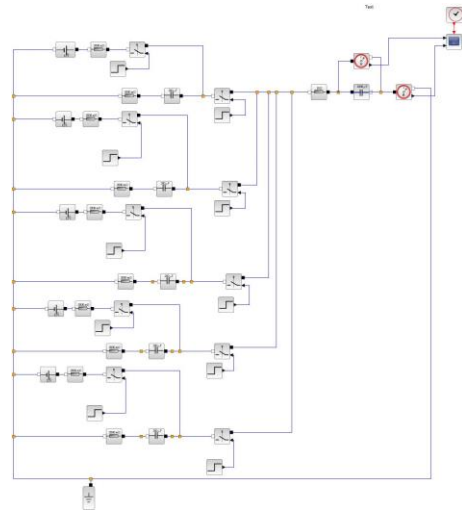


Рис. 6. Функціональна схема тягового фотоенергетичного модуля

Fig. 6. Functional diagram of the traction photovoltaic module

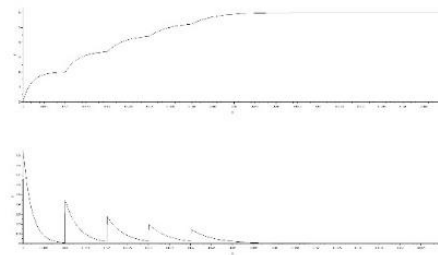


Рис. 7. Графік напруги та струму під час перехідного процесу

Fig. 7. Voltage and current graph during the transient process

Також за допомогою цієї моделі можна перевірити очікувані графіки формування вихідних імпульсів та порівняти їх із реальними (рис. 8–9).

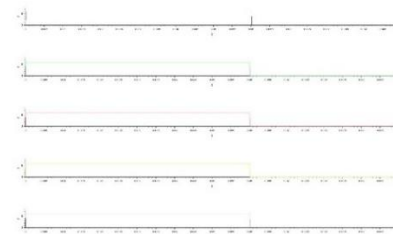


Рис. 8. Вихідні імпульси під час одночасного вмикання накопичувачів

Fig. 8. Output pulses during simultaneous washing of the drives

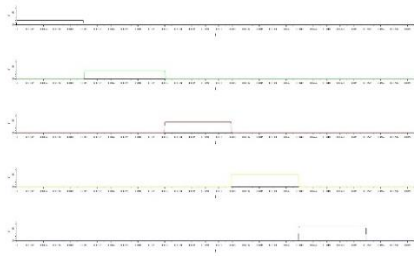


Рис. 9. Послідовне вмикання накопичувачів

Fig. 9. Powering up the drives in sequence

Із порівняння графіків очікуваних та отриманих під час дослідження роботи установки можна зробити висновок, що результати роботи системи тягового фотоенергетичного модуля задовольняють початковим вимогам.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше отримано графічні залежності передачі енергії між елементами системи, що дозволяє провести обґрунтований вибір параметрів системи. Також уперше отримано часові залежності, які описують закон керування процесом передачі енергії між ланками системи, що дозволить визначити раціональні режими роботи цієї системи.

Завдяки отриманим результатам досліджень відкриваються нові можливості в дослідницькій сфері для розробки масштабних експериментальних моделей шляхової структури маглева в разі впровадження системи розподільного первинного накопичення електроенергії в тяговому фотоенергетичному модулі.

Висновки

Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля дозволило виявити значний потенціал у подальшому розвитку магнітолевітаційних транспортних систем. Електрична енергія, яку генерують розподілені вздовж шляхової структури фотоелектричні установки, малими частинами надходить до ємнісних накопичувачів енергії малої потужності, а далі ці «порції» енергії надходять в один спільний накопичувач – тяговий.

Така варіація реалізації системи відкриває нові можливості до створення екологічно чистих та енергоефективних транспортних систем, що позитивно впливає на зовнішнє середовище, а також підвищує ефективність роботи системи в цілому.

У результаті комп'ютерного моделювання отримано графіки часових характеристик перехідних процесів, що протікають у накопичувачах. На них представлено, як змінюються струм та напруга, а також динаміка самого перехідного процесу, його тривалість. Із графіків видно, що напруга із закінченням перехідного процесу на тяговому конденсаторі досягла усталеного значення, а струм упав до 0. Час протікання перехідного процесу напруги та струму збігається, тобто становить 0,06 с.

Представлені результати проведених досліджень підкреслюють важливість подальших досліджень, розробок та оптимізації магнітолевітаційних транспортних систем, розвитку нових технологій, що значно поліпшать ефективність експлуатації транспортних систем і підвищать їх надійність за різних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкіль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
2. Муха А. М., Плаксин С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
3. Плаксин С. В., Муха А. М., Устименко Д. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Чуприна Є. М., Голота О. О. Метод оперативного контролю та управління електрохімічним накопичувачем енергії у складі систем електрозабезпечення транспортних засобів. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6 (96). С. 39–52. DOI: <https://doi.org/doi:10.15802/stp2021/258172>

4. Covaci M.-A., Gălătuș R. V., Petreuş D. M., Szolga L. A. Renewability and Robustness Analysis and Review for Sustainable-Technology Propulsion Systems in Modern Transportation Infrastructure Administration. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 24. P. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132413026>
5. Esteban E., Salgado O., Iturrospe A., Isasa I. Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*. 2017. Vol. 47. 2017. P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
6. Harvey, J. T. Complex Systems Theory and Development Practice. *Journal of Economic Issues*. 2006. Vol. 38. Iss. 3. P. 861–862. DOI: <https://doi.org/10.1080/00213624.2004.11506738>
7. Jafaryar M., Sheikholeslami M. Efficacy of magnetic field on performance of photovoltaic solar system utilizing ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 562. P. 169798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169798>
8. Moschoudis A. P., Tsekouras G. J., Kanellos F. D., Kladas A. G. Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 856. P. 269–275. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.856.269>
9. Novas N., Garcia R. M., Camacho J. M., Alcayde A. Advances in Solar Energy towards Efficient and Sustainable Energy. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 11. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116295>
10. Qadir Z., Munir, A., Ashfaq T., Munawar H. S., Khan M. A., Le K. A prototype of an energy efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 4. P. 100217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217>
11. Ramireddy V. Innovative Approach to Maglev Trains (Solar Energy). *Electrical Engineering Portal*. 2012. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/innovative-approach-to-maglev-trains-solar-energy>
12. Wiesman R., Fontana R., Cope D., Gamble B. Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*. 1995. Vol. 104. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919>

Y. M. CHUPRYNA^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, O. I. BONDAR^{3*}, S. V. PLAKSIN^{4*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 360 37 88, e-mail nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 333 88 96, e-mail etemdiit@gmail.com, ORCID 0000-0003-3884-5589

^{4*}Dep. of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevsky St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

Research of the Primary Electric Energy Storage System of a Traction Photovoltaic Module

Purpose. The main idea of the work is that the electric energy generated by photovoltaic installations is supplied in small parts to capacitive energy storage devices of low power, and then these «portions» of energy are supplied to one common, so-called traction storage device. The research is aimed at obtaining time diagrams of current and voltage changes in the proposed system. **Methodology.** A review of the world literature on the topic of work was conducted. The basis of this research is the analysis of transient processes in the electrical circuits of the system during the transfer of energy from the photovoltaic module to the traction capacitor under the influence of various control signals: series, parallel, combined. The main research method is computer simulation. The Scilab software environment was used to simulate the operation of the electric energy storage system. **Findings.** The relevance of the research and development of a primary electric energy storage system using a traction photovoltaic module has been proved. The key mathematical dependencies between the parameters of the constituent elements of electrical circuits are established. The structure of a site with electric energy storage with traction photovoltaic modules and a converter-pulse signal unit is proposed. The graphical characteristics of transient processes that occurred during the transfer of energy from low-power capacitive elements to a high-power capacitive element (traction capacitor) were obtained. **Originality.** For the first time, graphical dependences of energy transfer between system elements were obtained, which allows for a reasonable choice of the parameters of these elements. Also, for the first time, time dependencies describing the law of control of the process of energy transfer between system links were obtained, which will allow

determining the rational modes of its operation. **Practical value.** The results of the research open up new opportunities in the research field in the development of large-scale experimental models of the maglev path structure in the case of the introduction of a system of distributed primary energy storage in a traction photovoltaic module.

Keywords: photovoltaic module; traction capacitor; magnetolevitation transport; path structure; transients; computer modeling

REFERENCES

1. Dzenzerskiy, V. O., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Y. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
2. 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> (in Ukrainian)
3. Plaksin, S. V., Mukha, A. M., Ustymenko, D. V., Zhytnyk, M. Y., Levchenko, R. Y., Chupryna, Y. M., & Holota, O. O. (2021). Method of Operational Control and Management of Electrochemical Energy Storage Device in the Systems of Electricity Supply of Vehicles. *Science and Transport Progress*, 6(96), 39-52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258172> (in Ukrainian)
4. Moschoudis, A. P., Tsekouras, G. J., Kanellos, F. D., & Kladas, A. G. (2016). Particular SRM Design Methodology Based on Similarity Theory, Scale Factors and FEM. *Materials Science Forum*, 856, 269-275. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.856.269> (in English)
5. Esteban, E., Salgado, O., Iturrospe, A., & Isasa, I. (2017). Design methodology of a reduced-scale test bench for fault detection and diagnosis. *Mechatronics*, 47, 14-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005> (in English)
6. Harvey, J. T. (2004). Complex Systems Theory and Development Practice. *Journal of Economic Issues*, 38(3), 861-862. DOI: <https://doi.org/10.1080/00213624.2004.11506738> (in English)
7. Jafaryar, M., & Sheikholeslami, M. (2022). Efficacy of magnetic field on performance of photovoltaic solar system utilizing ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 562, 169798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169798> (in English)
8. Covaci, M.-A., Gălătuș, R. V., Petreș, D. M., & Szolga, L. A. (2023). Renewability and Robustness Analysis and Review for Sustainable-Technology Propulsion Systems in Modern Transportation Infrastructure Administration. *Applied Sciences*, 13(24), 1-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132413026> (in English)
9. Novas, N., Garcia, R. M., Camacho, J. M., & Alcayde, A. (2021). Advances in Solar Energy towards Efficient and Sustainable Energy. *Sustainability*, 13(11), 1-31. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116295> (in English)
10. Ramireddy, V. (2012). Innovative Approach to Maglev Trains (Solar Energy). *Electrical Engineering Portal*. Retrieved from <https://electrical-engineering-portal.com/innovative-approach-to-maglev-trains-solar-energy> (in English)
11. Wiesman, R., Fontana, R., Cope, D., & Gamble, B. (1995). Design and Demonstration of a Locally Commutated Linear Synchronous Motor. *SAE Transactions*, 104, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.4271/951919> (in English)
12. Qadir, Z., Munir, A., Ashfaq, T., Munawar, H. S., Khan, M. A., & Le, K. (2021). A prototype of an energy-efficient MAGLEV train: A step towards cleaner train transport. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100217> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.05.2024

Прийнята до друку: 23.09.2024