

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.053:621.318

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

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

^{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 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Відділ систем керування транспортними 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

Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту

Мета. Високошвидкісний магнітолевітаційний транспорт (маглев), побудований за принципом електродинамічного підвішування, має особливості у вигляді великих секцій обмоток шляхових котушок. Через це виникає потреба в дослідженні електричних процесів у колах цих котушок для підвищення ефективності енергетичних показників такого виду транспорту. Дослідження електричних процесів у колах шляхової енергоустановки дозволяє обґрунтувати передумови для створення розподіленої системи накопичення та передачі енергії. Енергоустановка складається з окремих підсистем, серед яких є блок первинного накопичення енергії, блок розподілення енергії, а також тяговий модуль. Основна мета цього дослідження полягає у визначенні характеру перехідних процесів у блоці розподілення енергії та отриманні характеристик процесу розрядження тягового конденсатора. **Методика.** Проведено моделювання електричного кола, яке б відповідало потребам відповідного блока розподілення енергії шляхової структури для необхідних умов роботи системи руху маглева – керівних імпульсів із різною комбінаторикою. У процесі дослідження використано комп'ютерне моделювання фізичних систем у програмному середовищі Scilab. **Результати.** Проведено огляд наявних досліджень обґрунтовано актуальність дослідження шляхової енергоустановки високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. Наведено основні математичні залежності електричних кіл з ємнісними та індуктивними елементами. Створено структурне зображення індуктивної ділянки системи руху маглева з тяговим модулем: тягові котушки та конденсатор, а також блок «перетворювач – імпульсний сигнал». Створено дієвий інструмент аналізу перехідних процесів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано структурну та елементну реалізацію блока розподілення енергії для шляхової енергоустановки високошвидкісного наземного транспорту. Отримано часові залежності, які описують процеси в запропонованій системі під час виконання принципів імпульсного керування тяговими котушками. На підставі аналізу характеру перехідних процесів у колі тягового конденсатора запропоновано напрями подальшого розвитку цієї енергоустановки. **Практична значимість.** Результати роботи створюють підґрунтя для подальших досліджень та розробки експериментально-дослідних моделей (випробувального стенда) маглева, щоб отримати нові співвідношення та характеристики, які дозволять підтвердити ефективність і працездатність нового принципу керування запропонованою системою.

Ключові слова: енергоустановка; тяговий модуль; тяговий конденсатор; магнітолевітаційний транспорт; електродинамічне підвішування; перехідні процеси

Вступ

Транспортні системи сучасного світу повинні відповідати таким логістичним потребам глобалізації суспільства: регулярність ланцюгів постачання та перевезень, зниження часу на перевезення, підвищення пропускної спроможності транспорту, технологічна модернізація транспортних засобів та інфраструктури, раціональне використання енергоресурсів та екологічна безпека.

Оскільки магнітолевітаційний транспорт (маглев) є найбільш перспективним видом транспорту, що може задовольнити зазначені потреби, необхідно вдосконалювати наявні технологічні рішення та розробляти принципово нові системи, які дозволять поліпшити транспортні засоби, що використовують магнітну левітацію [1, 2].

Будь-яка транспортна система – це складна мережа різних пристроїв та засобів, що вимагають значних ресурсів на утримання. Кінцевим результатом створення транспортних систем є перевезення пасажирів та вантажів на максимально можливу відстань за мінімально можливий час. Для реалізації цих завдань необхідно проводити значну кількість наукових досліджень, щоб визначити нові структури або типи транспортних систем. Із метою оптимізації витрат часу ці дослідження можна проводити в декілька етапів: аналітичні, експериментальні, лабораторні, експлуатаційні, у реальних умовах та інші.

Серед наявних транспортних систем маглев є складним із погляду створення, а значить, найбільш наближеними до реальних умов є лабораторні випробування масштабних моделей.

Масштабне моделювання дозволяє виконати експериментальну валідацію теоретичних гіпотез та розрахунків, здійснити перевірку очікуваних закономірностей роботи системи на практиці і виявити можливі похибки або неточності. Використання розподілу на підсистеми дозволяє отримати експериментальні дані для кількісної оцінки подальшої розробки та проектування системи. Стаття [8] теоретично обґрунтовує метод аналізу електромагнітного поля та моделей електричних кіл машин на основі теорії подібності та масштабних коефіцієнтів. Розвиток цього методу представлено в [9] у вигляді розробки проекту спеціальних електричних машин. Дослідження подібності динамічних характеристик

для масштабних моделей крана [10] показало, що шляхом використання визначених співвідношень теорії подібності можна виконати аналіз роботи динамічних параметрів системи. Масштабні моделі для дослідження електромагнітних сил також застосовують у геомеханічних моделях, щоб імітувати сили гравітації, із застосуванням електромагнітного поля [11]. У таких дослідженнях визначають відповідні масштабні коефіцієнти для кожної окремої задачі. Закони та принципи теорії подібності також раніше застосовували для створення масштабної моделі прототипу високошвидкісної роторної системи [15]. Принципи розробки масштабного дослідного стенда, що дозволяє діагностувати стан електромеханічних систем, наведені у [8].

Для наземного високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту в [14] була запропонована концепція, яка також побудована на дослідженні масштабної моделі. За результатами вимірювання електричні характеристики експериментального стенда відповідали очікуваним результатам.

Умовно дослідження моделей транспортних систем можна поділити на декілька етапів: комп'ютерне [12] та масштабне моделювання.

На першому етапі роботи автори розглядають можливість імітаційного моделювання процесів шляхової енергоустановки високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

Основна ідея такої шляхової енергоустановки запропонована в [5]. На основі цієї структури можна досягти розв'язання необхідних задач, пов'язаних із поліпшенням енергетичних показників магнітолевітаційного транспорту, а також забезпечити розвиток відновлюваних джерел енергії, оскільки концепція цієї енергоустановки побудована на отриманні та використанні сонячної енергії.

Схема роботи цієї енергоустановки являє собою розподілену фотоелектричну систему, основою якої є відновлюване джерело енергії, яке потрапляє до первинного ємнісного накопичувача. Ці складові можна визначити як «блок первинного накопичування енергії».

На подальшому етапі енергія з первинного ємнісного накопичувача потрапляє до тягового конденсатора, який передає енергію до дворезимного тягового модуля. Ці складові можна визначити як «блок розподілення енергії».

У результаті цього необхідно визначити структуру та енергетичні процеси, що відбуваються в блоці розподілення енергії.

Мета

Особливістю високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з електродинамічним способом підвищення є наявність великих секцій обмоток шляхових котушок (longstator). Це створює певні обмеження в значеннях ефективності енергетичних показників [6]. Для пошуку більш сприятливих технологічних рішень необхідно провести дослідження електричних процесів у колах шляхової енергоустановки, що дозволить обґрунтувати передумови створення розподіленої системи накопичення та передачі енергії [1]. Будову такої енергоустановки можна поділити на окремі підсистеми: блок первинного накопичення енергії, блок розподілення енергії, який передає електроенергію до тягового модуля шляхової структури.

Оскільки ключовим елементом системи тяги є тяговий модуль, то постає мета визначити характер перехідних процесів у блоці розподілення енергії та отримати характеристики процесу розрядження тягового конденсатора через тягову котушку, представлену в моделі як індуктивний елемент.

Початковою умовою для розв'язання цієї задачі є те, що ми беремо значення початкової напруги на конденсаторі постійним для цієї системи, а струм у котушці індуктивності дорівнює нулю.

Методика

Наше дослідження ґрунтується на створенні та використанні комп'ютерної моделі, що дозволить аналізувати перехідні процеси в тяговому конденсаторі блока розподілення енергії магнітолевітаційного транспорту.

Для проведення дослідження використано методику, яка містить моделювання відповідного електричного кола. Це коло повинно задовольняти вимоги блока розподілення енергоустановки шляхової структури та створювати необхідні умови для роботи системи руху маглева. Особливий акцент зроблено на формуванні вхідних імпульсів із різними параметрами сигналу, такими як послідовний, паралельний та комбінований із затримкою.

Для аналізу та моделювання фізичної системи використано комп'ютерну симуляцію в програмному середовищі Scilab. Робоче середовище для дослідження мало відповідні типові електричні елементи, з яких і формувалась потрібна схема.

Ємнісний накопичувач (тяговий конденсатор) передає енергію до тягового модуля шляхової структури за певний час. Цей проміжок часу повинен відповідати динамічним вимогам руху високошвидкісного транспорту [3]. Процес перемикання тягових котушок шляхової структури повинен відповідати визначеним режимам роботи такої системи.

Схема, яка представлена в дослідженні, складається з трьох найпоширеніших електричних компонентів: резистор, конденсатор, котушка індуктивності, – що створюють у разі послідовного з'єднання схему RLC контуру (рис. 1).

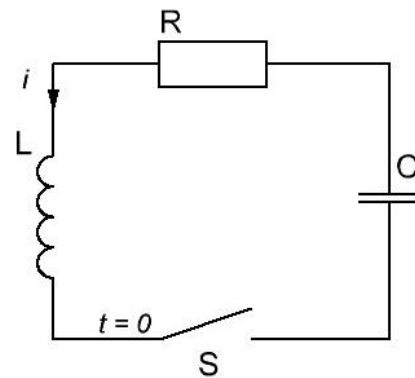


Рис. 1. Послідовна схема RLC

Fig. 1. RLC series circuit

Залежно від значень параметрів є різні варіації роботи та реакції системи. Згідно з теорією електричних кіл розряд конденсатора може мати аперіодичні, періодичні (коливальні) або граничні характеристики.

Процес розрядження конденсатора через котушку індуктивності має декілька етапів. У початковий момент ($t = 0$) конденсатор має початковий заряд, який дорівнює початковим умовам необхідної системи, у цей час струм на індуктивних елементах дорівнюватиме нулю.

У досліджуваному колі відсутні постійні джерела енергії, а конденсатор заряджений на певну величину, яка залежить від його характеристик. Рівняння, яке описує цю схему, має вигляд:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0. \quad (1)$$

Загальний розв'язок цього рівняння щодо $u_C(t)$ за різних коренів буде мати вигляд:

$$u_C(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (2)$$

де A_1, A_2 – сталі інтегрування; p_1, p_2 – корені характеристичного рівняння;

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (3)$$

Вираз (3) відповідає (1), розв'язок якого матиме два корені:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (4)$$

Перехідна напруга u_C , яку потрібно визначити згідно з виразом (2), буде залежати від характеру коренів, що, відповідно до (4), визначають значеннями параметрів RLC -кола, а отже, і характер інших перехідних величин кола матиме залежність від цих параметрів.

Сталі інтегрування A_1, A_2 у виразі (2) можна визначити через похідну за часом:

$$\frac{du_C}{dt} = A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}. \quad (5)$$

У момент комутації $t = 0$ вирази (2) та (5) будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} u_C(0) = A_1 + A_2; \\ \frac{du_C}{dt} = A_1 p_1 + A_2 p_2. \end{cases} \quad (6)$$

Відповідно до другого закону комутації й умови, що конденсатор до $t = 0$ був заряджений на певне значення напруги, матимемо:

$$u_C(0) = u_C(-0) = U_0. \quad (7)$$

Сталі інтегрування визначають за таким виразом:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1} \\ A_2 &= -U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Підставивши (8) у (2), отримуємо закон зміни $u_C(t)$ в перехідному режимі:

$$u_C(t) = U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} - U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t}. \quad (9)$$

Перехідний струм можна знайти як похідну від (9):

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (10)$$

Напругу на індуктивності визначають за формулою:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}). \quad (11)$$

Дослідження типової ланки тягової котушки індуктивності проведено за подачі імпульсів постійної напруги амплітудою 5 В. Тривалість діапазону моделювання перехідного процесу становить 1 с. Результат дослідження визначено числовими та графічними характеристиками створюваного тягового модуля.

Результати

За заданого значення індуктивності концепція структури тягового модуля для експериментально-дослідної установки буде мати кругову форму, що показано на рис. 2.

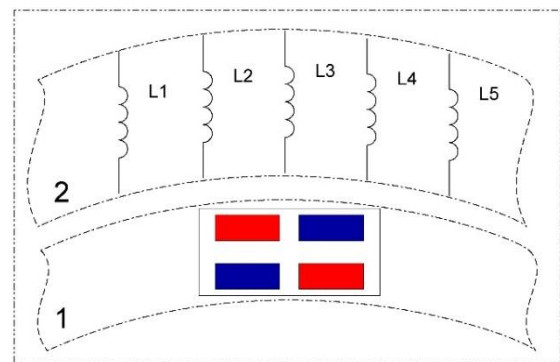


Рис. 2. Структурне зображення рухомого складу (1) та ділянки з індуктивними елементами (2)

Fig. 2. Structural image of the section with inductive elements (1) and rolling stock (2)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Під час дослідження увагу приділено саме цій ділянці блока розподілення енергії для визначення взаємозв'язку між тяговим конденсатором та тяговим модулем, щоб у подальших дослідженнях використовувати результати, які має блок розподілення енергії.

Блок-перетворювач постійної напруги в імпульсний сигнал є керівним елементом, що дозволяє подавати напругу на потрібну тягову котушку у відповідний момент часу для реалізації різних режимів роботи маглева. Під час різних режимів роботи (розгін, сталий рух, гальмування) можливі різні варіації схем ввімкнення тягового модуля, що представлений у вигляді котушок індуктивності. Ці варіації увімкнення повинні бути створені залежно від виду вихідних імпульсів.

Елементи формування імпульсного сигналу складаються з тягового конденсатора, блока перетворювача постійної напруги в імпульсний сигнал та котушок індуктивності, що в загальному вигляді являють собою блок розподілення енергії енергоустановки шляхової структури маглева (рис. 3).

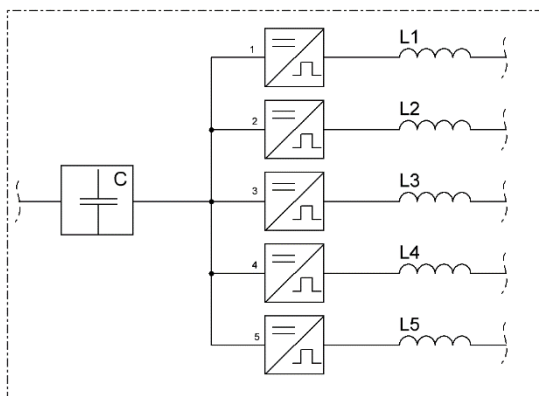


Рис. 3. Блок розподілення енергії

Fig. 3. Energy distribution unit

Для побудови функціональної схеми в програмному середовищі було використано типові елементи електричних схем, де кожний відповідний блок обмотки збудження вмикається у визначений час перехідного процесу і відбувається етап зміни робочої котушки, яка приймає енергію з конденсатора. Цей процес є циклічним і відбувається шляхом зарядження та розрядження тягового конденсатора.

Схема «тяговий конденсатор – імпульсний сигнал» побудована у вигляді ланки з імпульсним

сигналом (step), який подається на ключ (switch), що замикає електричне коло, унаслідок чого відбувається живлення відповідної ділянки у визначений момент часу. Графічні зображення результатів моделювання є процесами зміни в часі струму та напруги.

Функціональна схема блока розподілення енергії зображена на рис. 4.

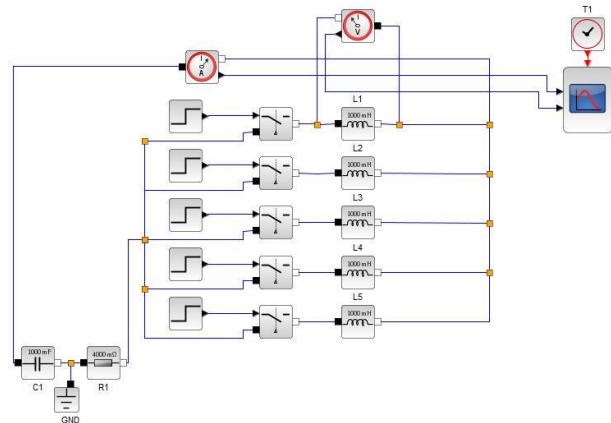


Рис. 4. Функціональна схема блока розподілення енергії

Fig. 4. Functional diagram of the energy distribution unit

Формування вихідних імпульсів буде залежати від задач процесів керування рухомих складом. Послідовне вмикання керівних сигналів (рис. 5) дозволяє встановити вмикання тягових модулів по черзі.

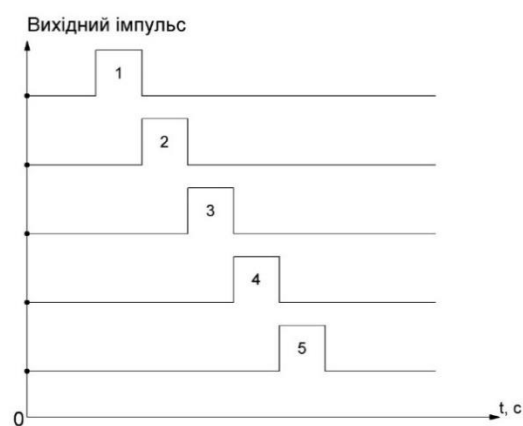


Рис. 5. Принцип послідовного вмикання індуктивних елементів

Fig. 5. Sequential switching on of inductive elements

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Подача послідовного сигналу полягає в тому, щоб у системі руху формувати серію імпульсів, коли після завершення одного в той самий час вмикався б наступний і таким чином створювалась безперервність сигналу та живлення котушок [1].

Послідовний режим роботи можливий для реалізації процесу керування за умови, що маглев уже завершив етап розгону та перейшов на сталий рух із постійною швидкістю на певній ділянці шляхової структури.

Формування серії вхідних імпульсів, які подають на тягові котушки індуктивності в середовищі Scilab для дослідження принципу послідовної роботи тягового елемента, показано на рис. 6.

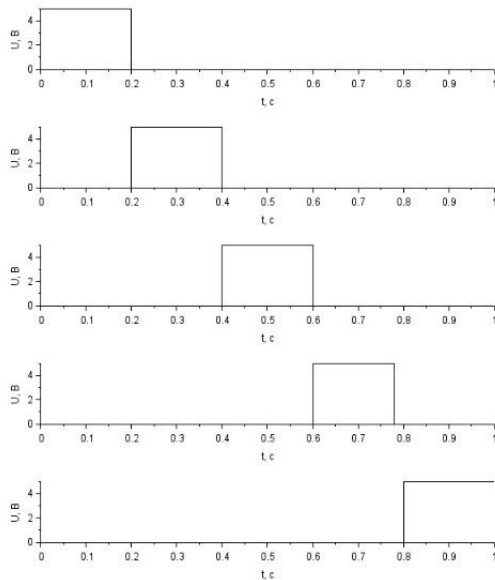


Рис. 6. Характер послідовних імпульсів у середовищі Scilab

Fig. 6. The nature of successive pulses in the Scilab environment

Загальний час подачі серії керівних імпульсів становитиме 1 с. Кожна серія цих імпульсів може мати різні значення частоти живлення системи та тривалості сигналу.

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання індуктивних елементів зображено на рис. 7.

Отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи системи наведено в табл. 1.

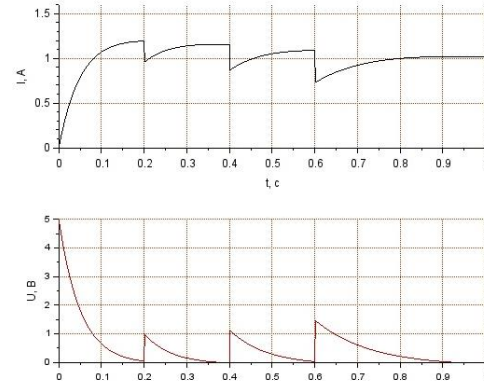


Рис. 7. Графік моделювання перехідного процесу послідовного вмикання індуктивних елементів

Fig. 7. The graph of the simulation of the transition process of sequential switching on of inductive elements

Таблиця 1

Початкові та кінцеві значення напруг, струму та часу для послідовного вмикання індуктивних елементів

Table 1

Initial and final values of voltages, currents and times for sequential switching on of inductive elements

№	$U_{\text{поч'}}$ В	$U_{\text{кінц'}}$ В	$I_{\text{поч'}}$ А	$I_{\text{кінц'}}$ А	$t_{\text{поч'}}$ с	$t_{\text{кінц'}}$ с
1	4,7	0,047	0	1,2	0	0,2
2	0,88	0,025	0,9	1,15	0,2	0,4
3	0,96	0,06	0,88	1,09	0,4	0,6
4	1,43	0,21	0,73	0,93	0,6	0,8
5	0,2	0,053	0,995	1	0,8	1

Згідно з рис. 7 та табл. 1, живлення індуктивних елементів має типовий характер, що повторюється з кожним наступним циклом роботи системи та вмикання наступної (послідовної) тягової котушки. Відбуваються паралельні процеси розрядження конденсатора (зниження рівня напруги) та насичення котушок (збільшення рівня струму). Під час перемикавання на черговий індуктивний елемент відбувається стрибкоподібне зменшення значення струму та підвищення рівня напруги. Через визначений час рівень струму та напруги досягає усталеного значення, та згідно

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

з технологічними вимогами, усталеними для конкретної системи, відбувається вмикання наступного тягового елемента.

Паралельне вмикання (рис. 8) дозволяє більш злагоджено розподіляти електричну енергію для точнішої реалізації процесу розгону маглева. Суть паралельного вмикання полягає в роботі одночасно двох тягових модулів, коли умовно одна котушка індуктивності досягає половини свого часу перехідного процесу. Реалізація такого принципу керування маглевом може мати місце на етапі розгону, коли потрібно досконало та плавно здійснювати перехід від однієї робочої тягової котушки до іншої.

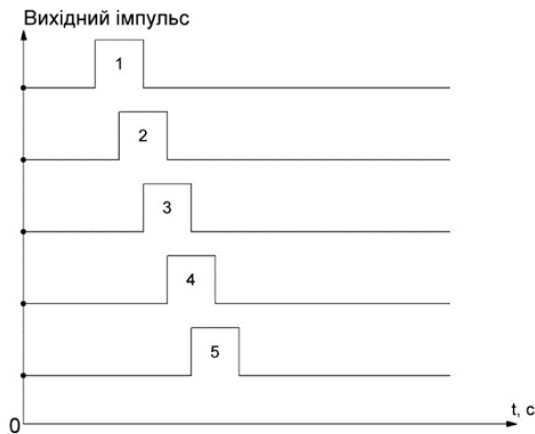


Рис. 8. Принцип паралельного вмикання індуктивних елементів

Fig. 8. Sequential switching on of inductive elements

Структура формування паралельного сигналу полягає в послідовності подачі одиничних імпульсів, коли процес увімкнення ще не завершився, а вмикається наступний послідовний сигнал, який «підхоплює» маглев та створює тягову силу, що дозволяє набирати швидкість рухомому складу.

Система формування паралельного сигналу передбачає послідовне увімкнення імпульсів, що дозволяє почати наступний цикл у момент, коли попередній ще не завершено, створюючи неперервну тягову силу для набору швидкості маглева.

Цей підхід до керування маглевом забезпечує плавність руху та злагожене використання електричної енергії, що робить цей спосіб ефективним за досягнення високої продуктивності роботи.

Формування вхідних імпульсів, які подають на котушки індуктивності в середовищі Scilab для дослідження принципу паралельного вмикання тягового елемента, показано на рис. 9.

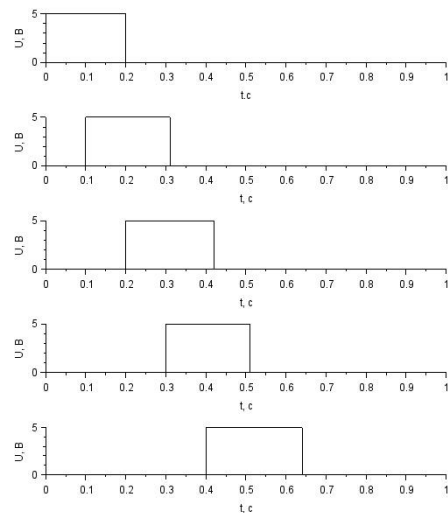


Рис. 9. Характер паралельних імпульсів у середовищі Scilab

Fig. 9. The nature of parallel pulses in the Scilab environment

Результати моделювання перехідного процесу за паралельного вмикання індуктивних елементів зображено на рис. 10, отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи системи наведено в табл. 2.

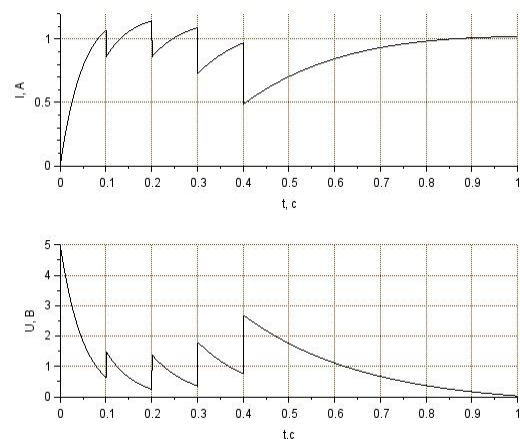


Рис. 10. Графік моделювання перехідного процесу паралельного вмикання індуктивних елементів

Fig. 10. The simulation graph of the transition process of parallel switching on inductive elements

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Із рис. 10 визначено, що принцип роботи системи за паралельного вмикання індуктивних елементів має той самий характер, що і за послідовного. Однак суттєвою відмінністю є те, що відбувається зменшення часу роботи системи на кожному з п'яти етапів. Це пов'язано з тим, що в процесі вимкнення кожного імпульсу в програмному середовищі Scilab під час перемикавання на іншу котушку починається графічна реєстрація наступного тягового елемента, а процес роботи попередньої котушки вважається завершеним.

Таблиця 2

Початкові і кінцеві значення напруг, струму та часу для паралельного вмикання індуктивних елементів

Table 2

Initial and final values of voltages, currents and times for parallel switching of inductive elements

№	$U_{\text{поч}},$ В	$U_{\text{кінц}},$ В	$I_{\text{поч}},$ А	$I_{\text{кінц}},$ А	$t_{\text{поч}},$ с	$t_{\text{кінц}},$ с
1	5	0,64	0	1,06	0	0,1
2	1,47	0,248	0,85	1,44	0,1	0,2
3	1,37	0,36	0,86	1,091	0,2	0,3
4	1,8	0,75	0,73	0,97	0,3	0,4
5	2,7	0,028	0,49	1	0,4	1

Послідовний та паралельний принцип керування можуть мати різну варіативність та комбінації залежно від умов роботи (зупинка або гальмування) маглева або інших систем, де можливо використовувати тягові котушки. Одним із варіантів таких комбінувань є послідовне живлення тягових котушок із затримкою сигналу на одному елементі (рис. 11). Потреба в такому способі керування маглевом може виникати, наприклад, коли відбуваються деякі помилки в системі та перемикавання затримується чи відбувається зупинка транспортного засобу й потрібно його зафіксувати на одній ділянці шляхової структури.

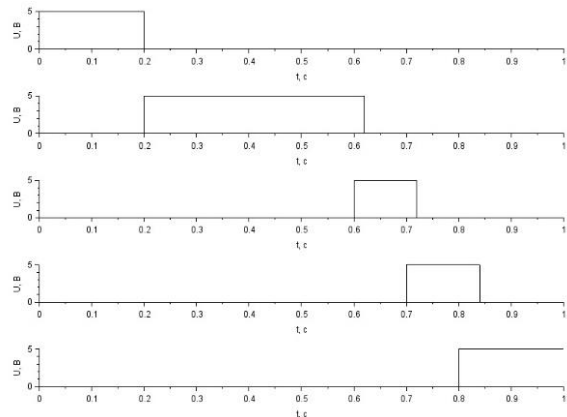


Рис. 11. Характер послідовних імпульсів із затримкою в середовищі Scilab

Fig. 11. The character of successive pulses with a delay in the Scilab environment

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою зображено на рис. 12, отримані дані початкових і кінцевих значень напруг, струму та часу роботи системи наведено в табл. 3.

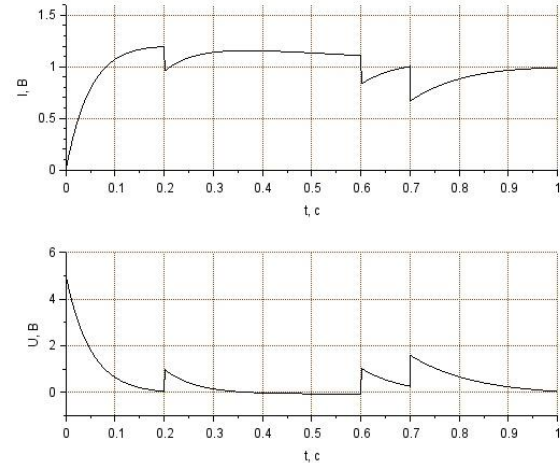


Рис. 12. Графік моделювання перехідного процесу послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою

Fig. 12. The graph of the simulation of the transition process of the sequential switching on of inductive elements with a delay

Реалізація подібного процесу керування дозволить зменшити похибку або відхилення від необхідного часу роботи окремого тягового елемента та забезпечить більшу стабільність зворотного зв'язку.

Таблиця 3
Початкові і кінцеві значення напруг, струму та часу для послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою

Table 3

Initial and final values of voltages, currents and times for sequential switching on of inductive elements with a delay

№	$U_{\text{поч}},$ В	$U_{\text{кінц}},$ В	$I_{\text{поч}},$ А	$I_{\text{кінц}},$ А	$t_{\text{поч}},$ с	$t_{\text{кінц}},$ с
1	5	0,043	0	1,12	0	0,2
2	0,9	0,07	0,96	1,1	0,2	0,6
3	0,99	0,37	0,84	1	0,6	0,7
4	1,6	0,63	0,7	0,88	0,7	0,8
5	0,63	0,04	0,8	1	0,8	1

Результати, отримані згідно з рис. 12 та зведені в табл. 3, показують, що, якщо в одному з індуктивних тягових елементів відбувається затримка в часі, яка є більшою, ніж період роботи інших складових, то цей процес є більш лінійним та не характеризується різкою зміною струму або напруги, досягаючи при цьому усталеного значення.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вперше отримано нові співвідношення та залежності, що являють собою характеристики перехідного процесу тягового модуля, який складається з типових електротехнічних елементів (конденсатор, котушки).

Запропоновано та визначено принципи можливих алгоритмів керування маглевом, що дозволить удосконалити наявну будову шляхової стру-

ктури цього виду транспорту й надалі може поліпшити енергоефективність та уніфікацію складових елементів системи живлення та керування рухом.

На основі отриманих результатів можливі подальші дослідження принципів керування, моделювання великих ділянок шляхової структури, комбінації електричних схем із різною компонентною базою, а також створення експериментально-дослідних моделей маглева для фізичного дослідження системи керування з використанням шляхової енергоустановки.

Висновки

У результаті виконаного дослідження можна стверджувати, що цей напрям є актуальним для подальшого розв'язання проблем комбінованої системи керування рухом маглева.

У процесі роботи було визначено основні математичні залежності електричних кіл з ємнісними та індуктивними елементами. Створено структурне зображення блока розподілення енергії з ємнісним і тяговим модулем, а також показано процес формування імпульсного сигналу.

За допомогою програмного забезпечення Scilab проведено моделювання роботи дослідної схеми блока розподілення енергії та отримано графічні зображення перехідних процесів для різного типу керування тяговим модулем: послідовне, паралельне, послідовне із затримкою. Визначено та зведено в таблиці рівні розряду конденсатора та рівень струму, який надходить на тяговий модуль.

Розроблено інструмент для комп'ютерного моделювання блока розподілення енергії, який надалі можна застосовувати для розв'язання інших задач, пов'язаних із розробкою енергоустановки шляхової структури високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голота О. О., Плаксін С. В., Шкіль Ю. В. Визначення координат просторової орієнтації магнітоплану відносно колійної структури. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 159–169. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14>
2. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксін 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>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

3. Муха А. М., Плаксін 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>
4. Плаксін С. В., Муха А. М., Устименко Д. В., Шкіль Ю. В., Голота О. О., Чуприна Є. М. 2-х режимний тягово-левітаційний модуль перспективної магнітно-левітаційної транспортної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 2 (58). С. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>
5. Плаксін С. В., Шкіль Ю. В. Сонячна шляхова енергоустановка для електроживлення лінійного двигуна магнітолевітаційного транспорту. *Енергозбереження та енергоефективність*. 2016. С. 106–111.
6. Скосар В. Ю., Бурилов С. В., Дзензерський В. О. Деякі проблеми надшвидкісних транспортних технологій. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 2 (102). С. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>
7. Dong F., Hao L., Park D., Iwasa Y., & Huang Z. On the future sustainable ultra-high-speed maglev: An energy-economical superconducting linear thrusting system. *Energy Conversion and Management*. 2023. № 291. P. 117247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117247>
8. 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. P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
9. Luo X.-Q., Cheng S.-G., Cheng S.-G., Zhang Z.-H., Tang K. Study of similarity theory of geomechanical model test in electromagnetic field. *Rock and Soil Mechanics*. 2011 Vol. 32. Iss. 4. P. 1035–1039.
10. 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/10.1109/ICELMACH.2014.6960536>
11. Moschoudis A. P., Tsekouras G. J., Kanellos, F. D., Design of particular electrical machines by using similarity theory and scale factors. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (Berlin, 02-05 Sept. 2014). Berlin, 2014. P. 2486–2491. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960536>
12. Shile L., Ying Zh., Jianhua Y. Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field. *Coal Geology & Exploration*. 2020. Vol. 48. Iss. 2. P. 209–215.
13. Wang H. M., Yang B. F., Song B. M., Zhao Y. N. Transient Simulation of Electromagnetic Field during EMCC Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 66–68. P. 189–193. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.189>
14. 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>
15. Zhou B., Liang H., Miao H., Zang C. Reduced-Scale Model Design for a High-Speed Rotor System Based on Similitude Theory. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics* (Phoenix, 17–21 June). Phoenix, 2019. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2019-91112>

O. O. HOLOTA^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, D. V. USTYMENKO^{3,4*}, S. V. PLAKSIN^{5*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana 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, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

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

Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport

Purpose. High-speed magnetolevitation transport (maglev), based on the principle of electrodynamic suspension, has features in the form of large sections of the windings of the track coils. Therefore, there is a need to study electrical processes in the circuits of these coils to improve the efficiency of the energy performance of this type of transport. The study of electrical processes in the circuits of a track power plant makes it possible to substantiate the prerequisites for the creation of a distributed energy storage and transmission system. The power plant consists of separate subsystems, including a primary energy storage unit, an energy distribution unit, and a traction module. The main purpose of this study is to determine the nature of transients in the energy distribution unit and to obtain the characteristics of the traction capacitor discharge process. **Methodology.** We modeled an electrical circuit that would meet the needs of the corresponding energy distribution unit of the track structure for the required operating conditions of the maglev motion system – control pulses with different combinatorics. In the course of the study, computer modeling of physical systems in the Scilab software environment was used. **Findings.** A review of existing studies has been carried out and the relevance of the study of the track power plant for high-speed magnetolevitation transport has been substantiated. The basic mathematical dependences of electrical circuits with capacitive and inductive elements are given. A structural representation of the inductive section of the maglev motion system with a traction module is created: traction coils and a capacitor, as well as a converter-pulse signal unit. An effective tool for analyzing transient processes has been created. **Originality.** For the first time, the structural and elemental realization of the power distribution unit for the road power plant of high-speed land transport is proposed. The time dependencies describing the processes in the proposed system during the implementation of the principles of pulse control of traction coils are obtained. Based on the analysis of the nature of transients in the traction capacitor circuit, the directions of further development of this power plant are proposed. **Practical value.** The results of the work create the basis for further research and development of experimental research models (test bench) of the maglev in order to obtain new ratios and characteristics that will confirm the effectiveness and efficiency of the new control principle of the proposed system.

Keywords: power plant; traction module; traction capacitor; magnetolevitation transport; electrodynamic suspension; transient processes

REFERENCES

- Holota, O., Plaksin, S., & Shkil, Y. (2022). Determination of the coordinates of the spatial orientation of the magnetoplan regarding the rail structure. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 1(40), 159-169. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14> (in Ukrainian)
- 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)
- Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustylenko, 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)
- Skosar, V. Yu., Burylov, S. V., & Dzenzerskiy, V. O. (2023). Some Problems of Ultra-High-Speed Transportation Technologies. *Science and Transport Progress*, 2(102), 5-16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073> (in Ukrainian)
- Plaksin, S., Mukha, A., Ustylenko, D., Shkil, Y., Holota, O., & Chupryna, Y. (2022). 2-mode traction-levitation module of a promising magnetic-levitation transport system. *Electromechanical and Energy Saving Systems*, 58(2), 56-65. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53> (in Ukrainian)
- Plaksin, S., Shkil, Y. V. (2016). Solar guideway energy station for power supply of the linear motor of maglev transport. *Enerhozberezhennya ta enerhoefektyvnist*, 106-111. (in Russian)
- 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)
- Dong, F., Hao, L., Park, D., Iwasa, Y., & Huang, Z. (2023). On the future sustainable ultra-high-speed maglev: An energy-economical superconducting linear thrusting system. *Energy Conversion and Management*, 291, 117247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117247> (in English)

9. Shile, L., Ying, Zh., & Jianhua, Y. (2020). Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field. *Coal Geology and Exploration*, 48(2), 209-215. (in English)
10. Luo X.-Q., Cheng S.-G., Cheng S.-G., Zhang Z.-H., Tang K. (2011). Study of similarity theory of geomechanical model test in electromagnetic field. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4), 1035-1039. (in English)
11. Moschoudis, A. P., Tsekouras, G. J., & Kanellos, F. D. (2014). Design of particular electrical machines by using similarity theory and scale factors. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 269-275). DOI: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2014.6960536> (in English)
12. 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)
13. Wang, H. M., Yang, B. F., Song, B. M., & Zhao, Y. N. (2011). Transient Simulation of Electromagnetic Field during EMCC Process. *Applied Mechanics and Materials*, 66-68, 189-193. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.189> (in English)
14. 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)
15. Zhou, B., Liang, H., Miao, H., & Zang, C. (2019). Reduced-Scale Model Design for a High-Speed Rotor System Based on Similitude Theory *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics* (pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2019-91112> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.11.2023

Прийнята до друку: 21.03.2024