

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.4.016.5:[004.94:621.318-047.37]

Є. М. ЧУПРИНА^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, О. І. БОНДАР^{3*}, С. В. ПЛАКСІН^{4*},
Д. В. УСТИМЕНКО^{5,6*}, О. О. ГОЛОТА^{7*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, 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, ННІ ДІТ, 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, ННІ ДІТ, 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

^{5*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{6*}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

^{7*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту

Мета. Основна ідея роботи полягає в експериментальному дослідженні динамічних показників шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з подальшим порівнянням їх характеристик для обґрунтованого вибору раціональної котушки за такими критеріями як: час наростання струму та сили тяги. **Методика.** Досліджування були виконані експериментальним шляхом. Спеціально для цих потреб було розроблено стенд для визначення динамічних показників шляхових котушок. До основних динамічних показників відносимо: час наростання струму у котушці, до допоміжних: силу тяги та температурні режими. Вимірювання часових характеристик, зокрема наростання струму, здійснювались за допомогою осцилографа, сила тяги визначалася методом поступового навантаження платформи, встановленої на левітуючому магніті, немагнітним вантажем. Температурні режими були зафіксовані за допомогою тепловізора. Під час роботи було досліджено чотири типи котушок, які відрізняються між собою такими показниками як: діаметр дроту, кількістю витків, електричним опором та індуктивністю. Для кожної з котушок проводились серії вимірювань з урахуванням зміни шпаруватості електричного сигналу. Такий підхід дозволив оцінити вплив шпаруватості електричного сигналу на режими роботи та динамічні показники досліджуваних котушок. **Результати.** В результаті проведення експериментального дослідження отримано часові характеристики чотирьох зразків шляхових котушок для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, зокрема, час наростання струму, величини сили тяги, а також температурні режими під навантаженням. Встановлено, що котушка з маркуванням «А» характеризується відносно високими

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

динамічними показниками, а саме: найменшим часом виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, найбільшою силою тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі. **Наукова новизна.** Створені передумови для подальшого формування характеристик натурної моделі двохранового магнітолевітаційного модулю. Вперше отримані динамічні показники шляхової котушки для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту під час лабораторного дослідження її експериментальних зразків. **Практична значимість.** За результатами досліджень розроблена методика, яка полягає у становленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками, що дає змогу встановити раціональні параметри шляхової котушки. Визначено параметри електродинамічного процесу, зокрема, час наростання струму, величину сили тяги, а також проаналізовано температурні режими роботи котушки в умовах експериментального навантаження.

Ключові слова: натурна модель; шляхова котушка; магнітолевітаційний транспорт; шляхова структура; динамічні показники

Вступ

В умовах сьогодення такий вид транспорту як магнітолевітаційний грає не останню роль у розвитку транспортних систем [1]. Підвищення швидкості руху та сили тяги в традиційних залізничних системах обмежено силами зчеплення з поверхнею, по якій прямує екіпаж. Не менш важливим є використання енергетичних ресурсів та екологічна безпека, яка безпосередньо від цього залежить. Транспортні системи, які працюють на двигунах внутрішнього згорання, мають негативний вплив через викид шкідливих газів у навколишнє середовище [3].

Одними з переваг магнітолевітаційного транспорту є безумовно висока швидкість, яку він розвиває, а також можливість із застосуванням електромагнітних сил левітувати, переміщуватися вздовж шляху та стабілізувати рухомий склад без фізичного контакту з поверхнею шляху. Проте, щоб досягти цього з'являється потреба в ідеальній синергії між рухомим складом та шляховою структурою задля цілісної роботи всієї системи.

Вздовж шляхової структури в бортах встановлені котушки, які дозволяють рухомому складу підтримувати ефект левітації, тяги та стабілізації шляхом взаємодії їх з бортовими магнітами.

Водночас, актуальним є питання розвитку шляхових структур для поєднання функцій тяги та левітації. В роботі [2] автори запропонували концепцію двохранового тягово-левітаційного модулю, де одна котушка може змінювати режим роботи і забезпечувати як тягу, так і левітацію шляхом зміни електричної схеми з'єднання. Такий підхід вимагає більш глибоке розуміння динамічних показників

шляхових котушок, що підкреслює актуальність дослідження.

Слід зазначити, що не менш важливу роль грають динамічні показники шляхової котушки. Під динамічними показниками котушок маються на увазі часові характеристики, тобто час, за який кожна з котушок вийде на свою робочу частоту, при якому її електромагнітні сили будуть максимальними. Також максимальною має бути сила тяги, яка діє на магніт. Температурні показники котушок під час роботи системи мають бути прийнятними задля забезпечення коректної роботи та відсутності перегріву елементів.

Результати досліджень [5] допоможуть зрозуміти більш детально про динамічний відгук високошвидкісної системи магнітолевітаційного транспорту.

Автори [7] використовують самостійно розроблений пристрій для вимірювання динамічного магнетизму для проведення довготривалого динамічного експерименту за допомогою методу напруженості магнітного поля H і основної електромагнітної формули надпровідників. На основі своїх досліджень вони дослідили спад висоти левітації потягу маглев при тривалому віброзбудженні рухомого складу.

В роботі [4] автори висвітлюють дослідження, спрямоване на зв'язок між тепловим ефектом і стійкістю системи левітації, збудженої зовнішнім джерелом. Отримані результати показують, що тепловий ефект і стабільність системи левітації залежать головним чином від деяких параметрів, пов'язаних із зовнішнім джерелом, таких як частота та амплітуда прикладеного зовнішнього джерела.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На відміну від інших, автори [12] досліджують поведінку струмопровідних котушок, збудованих імпульсним струмом. З цього дослідження зроблений висновок про те, що динамічна стабільність залежить від величин сталого робочого струму, піку та тривалості імпульсного струму.

Автори [10] зосереджують увагу на аналізі динамічної взаємної індуктивності між котушками через неузгодженість, оскільки вона має значний вплив на процес заряджання електромобіля, зокрема на вихідну потужність і загальну ефективність, а також показують, що вихідна потужність зменшується зі збільшенням поперечного зсуву між котушками передавача та приймача. Крім того, на вихідні характеристики системи суттєво впливає ступінь зв'язку між передавальною та приймальною котушками.

У статті [11] представлено метод вимірювання для оцінки коефіцієнта температуропровідності, об'ємної теплоємності та питомого опору шихтового матеріалу як функції температури на одній вимірювальній установці з використанням генератора індукційного нагріву як джерела сигналів. Метод заснований на дослідженні температурних відгуків циліндричних зразків досліджуваних матеріалів і напруги, індукованої в розробленій вимірювальній котушці після короткочасних або тривалих ступінчастих імпульсів збудження.

Дослідники [9] пропонують науковий метод, що використовує поєднання комп'ютерного моделювання, щоб заздалегідь виявити перегрівання та оптимізувати охолодження, тим самим збільшуючи термін служби котушок.

Проведений аналіз сучасних джерел інформації доводить актуальність досліджень, представлених у даній статті.

Мета

Одними з переваг магнітолевітаційного транспорту є безумовно висока швидкість, яку він розвиває, а також можливість із застосуванням електромагнітних сил левітувати, переміщуватися вздовж шляху та стабілізувати рухомий склад без фізичного контакту з поверхню шляху. Проте, щоб досягти цього з'являється потреба в ідеальній синергії між рухомих складом та шляховою структурою задля цілісної роботи всієї системи.

Одне з завдань впровадження магнітолевітаційного транспорту є розв'язання низки проблем, які безпосередньо стосуються визначення параметрів шляхової котушки.

Ідея роботи полягає в експериментальному дослідженні динамічних показників шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту з подальшим порівнянням їх характеристик для обґрунтованого вибору раціональної котушки за такими критеріями як: час наростання струму та сила тяги.

Методика

Досліджування були виконані експериментальним шляхом. Спеціально для цих потреб було розроблено стенд для визначення динамічних показників шляхових котушок. До основних динамічних показників відносимо: час наростання струму у котушці, до допоміжних: силу тяги та температурні режими.

Принцип роботи стенда базується на незалежному живленні керуючого елемента, що подає сигнал на котушку, яка в свою чергу також має своє джерело з напругою живлення 12 В. Керуючим елементом даного стенду слугує мікроконтролер Arduino, який генерує поодинокі імпульси для котушки шляхом відкриття транзистора, після чого вона генерує магнітне поле та починає взаємодію з магнітом.

Довжина імпульсу та паузи обумовлена роботою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Схема експериментального дослідження динамічних показників шляхових котушок представлена на рис. 1.

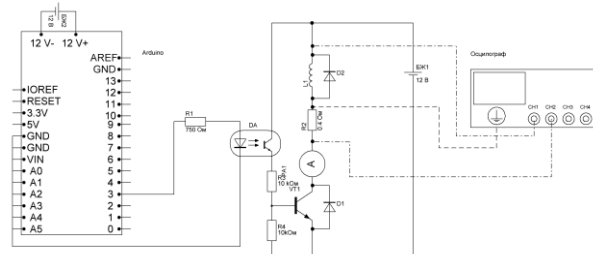


Рис. 1. Схема експериментального стенду з дослідження динамічних показників котушок

Fig. 1. Diagram of the experimental stand for studying the dynamic performance of coils

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Використання в цьому випадку оптопари обумовлено тим, щоб створити гальванічну розв'язку між Arduino та силовою частиною схеми з транзистором та котушкою. Резистори у вихідному колі оптопари забезпечують заданий режим роботи транзистора VT1. Резистор R3 обмежує базове значення струму, який поступає на базу транзистора, тим самим запобігаючи його перенавантаженню. Натомість резистор R4 запобігає хибним включенням транзистора. Резистор R2 виконує функцію шунта для виміру струму котушки L1.

Часові характеристики були отримані за допомогою осцилографа (RIGOL DS1104B).

Фото експериментального стенду представлено на рис. 2.



Рис. 2. Експериментальна установка для визначення динамічних показників котушок натурної моделі

Fig. 2. Experimental system for determining the dynamic performance of coils of a full-scale model

Для вимірювання сили тяги шляхових котушок використовувався вантаж у вигляді стакану, який припадає до магніту та в середині містить певну кількість немагнітних кульок, щоб не завадити роботі магніту. Граничне значення сили тяги визначалося моментом відриву чаші з вантажем від опори. Максимальний вантаж, який може підіймати котушка при заданому струмі та часі роботи (імпульсний режим), і є сила тяги, яку представлено надалі в статті.

Під час дослідження були враховані як вага самого стакану, так і вантаж що знаходився в ньому. Стакан та вантаж зображено на рис. 3.



Рис. 3. Стакан та вантаж

Fig. 3. Cup and weight

Температурні показники шляхових котушок знімалися за допомогою тепловізора UNI-T-UTi320E.

В експериментальному дослідженні динамічних показників використовувалися чотири зразки котушок, які розрізняються між собою за параметрами, але мають спільну конструкцію, яка обумовлена конструкцією натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Параметри котушок наведені в табл. 1.

Таблица 1

Параметри досліджувальних котушок

Table 1

Parameters of the test coils

Котушка	Діаметр дроту, мм	Кількість витків, п	Опір котушки, Ом
A	0,45	112	1,4
B	0,36	272	4,5
C	0,27	550	18,1
D	0,24	720	26,3

Результати

Першим дослідженням є експериментальне визначення часу, за який кожна з котушок вийде на свою робочу частоту. В якості робочої частоти прийнято частоту сигналу типу «меандр», при якій струм котушки сягає сталого значення. Аналізуючи форму струму, отримували основний динамічний показник котушки, а саме час наростання струму. Результат представлений на рис. 4.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

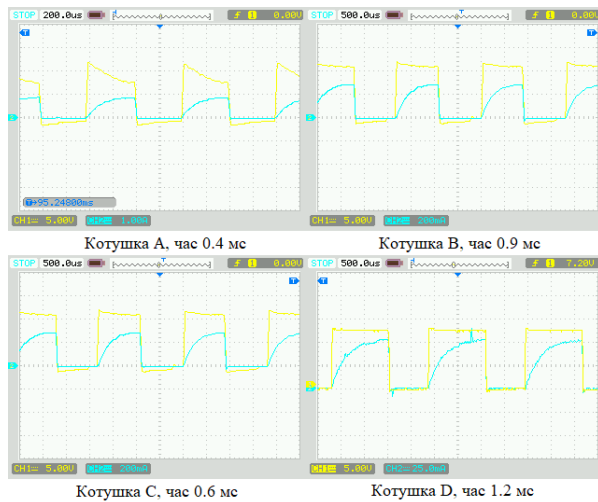


Рис. 4. Робочий час кожної котушки

Fig. 4. Working time of each coil

Результати визначення робочої частоти котушок представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Визначення робочих частот котушок

Table 2

Determination of coil operating frequencies

Котушка	t imp, мс	t pause, мс	T, мс	f, Гц
A	0,4	0,4	0,8	1250
B	0,9	0,9	1,8	555,6
C	0,6	0,6	1,2	833,4
D	1,2	1,2	2,4	416,7

Процес експериментальних досліджень має стохастичний характер, що потребувало відповідної статистичної обробки результатів. Для кожної з котушок було проведено по 10 вимірювань, довжини імпульсу та паузи при цьому залишалися незмінними. Результати вимірювань представлені в табл. 3 та на рис. 5.

Також побудовано статистичні графіки цих вимірювань, що зображено на рис. 5.

Наступним експериментом була зміна шпаруватості сигналу. Це дозволило оцінити динаміку перехідних процесів, які протікають в котушках під час їх роботи, тобто при зміні довжини імпульсу та паузи можливо побачити, яку поведінку мають шляхові котушки в різних режимах роботи та чи виходять вони на робочу частоту.

Таблиця 3

Отримані результати вимірювань котушок

Table 3

Results of coil measurements obtained

Вимірювання	Кот. А	Кот. В	Кот. С	Кот. D
	Час до досягнення робочого стану, us			
1	280	682	560	1 040
2	300	680	520	1 080
3	320	640	563	1 070
4	304	720	542	1 045
5	260	684	480	1 040
6	272	680	522	1 130
7	288	684	590	1 038
8	236	648	505	1 120
9	280	676	522	1 010
10	336	664	563	1 035

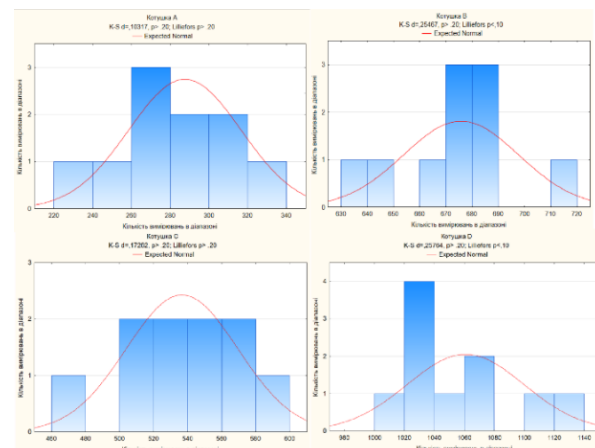


Рис. 5. Статистичний розподіл отриманих значень часу котушок

Fig. 5. Statistical distribution of the obtained coil time values

Також завдяки зміні шпаруватості можливо визначити втрати котушок через нагрів. Якщо для будь-якої з котушок буде надвисока шпаруватість, струм, який протікає через неї, може викликати втрати, пов'язані з нагрівом, що суттєво впливає на тепловий режим роботи котушки та може призвести до руйнування пластикового каркаса. Необхідно забезпечити виключення пластичної деформації елементів стенда під впливом температури. Так само зміна шпаруватості впливає на температурний режим

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

транзистора, який підсилює сигнали керування з мікроконтролера Arduino.

Параметри зміни шпаруватості для кожної з котушок представлені у табл. 4, а також в графічному вигляді на рис. 7–10.

Таблиця 4

Визначення характеристик котушок з різною шпаруватістю сигналу

Table 4

Determining the characteristics of coils with different signal strengths

Котушка	T	t imp, мс	t pauza, мс	T, мс	f, кГц
A	1/2	0,2	0,6	0,8	1 250
	1/4	0,1	0,7	0,8	1 250
	1/8	0,05	0,75	0,8	1 250
B	1/2	0,45	1,35	1,8	555
	1/4	0,225	1,58	1,8	555
	1/8	0,113	1,68	1,8	555
C	1/2	0,3	0,9	1,2	833
	1/4	0,15	1,05	1,2	833
	1/8	0,075	1,13	1,2	833
D	1/2	0,6	1,8	2,4	416
	1/4	0,3	2,1	2,4	416
	1/8	0,15	2,25	2,4	416

Результати досліджень котушок зі зміною шпаруватості представлені на рис. 7–10.

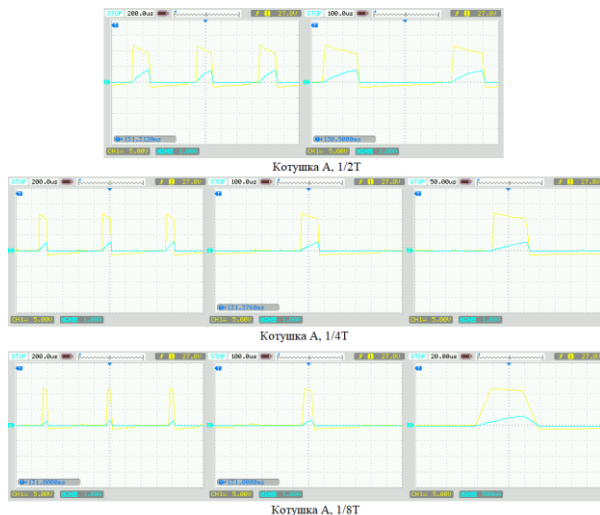


Рис. 7. Зміна шпаруватості котушки A

Fig. 7. Changing the coil A's permittivity

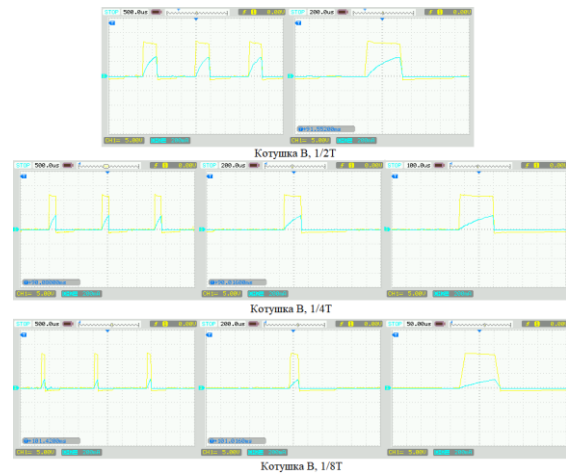


Рис. 8. Зміна шпаруватості котушки B

Fig. 8. Changing the coil B permittivity

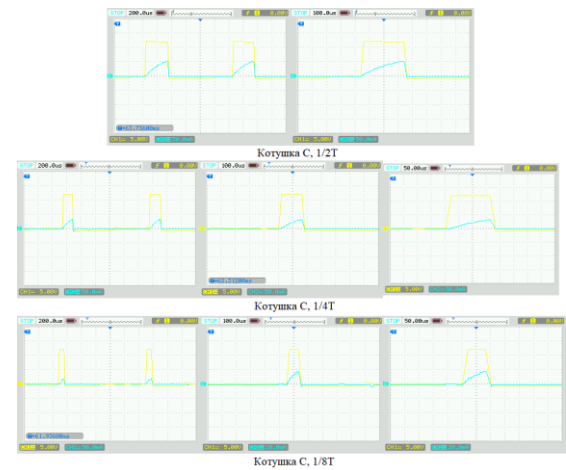


Рисунок 9. Зміна шпаруватості котушки C

Fig. 9. Changing the coil C permittivity

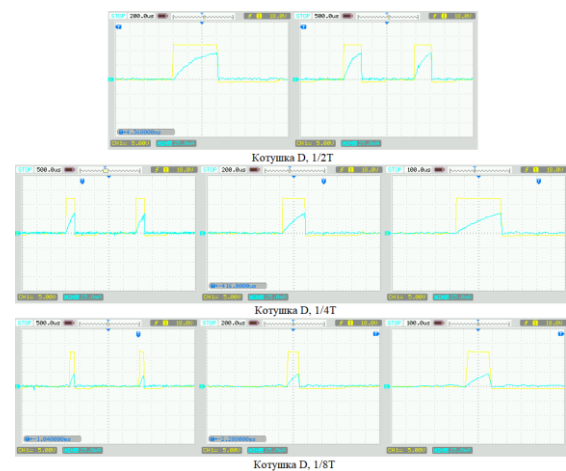


Рис. 10. Зміна шпаруватості котушки D

Fig. 10. Changing the coil D permittivity

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Дослідження температурних показників шляхових котушок дозволить зрозуміти, наскільки безпечно і стабільно буде працювати катушка в реальних умовах експлуатації стенда.

Кожна з котушок працювала приблизно одну хвилину, кожні 5 секунд проводився замір температури як катушки, так і транзистора. Експеримент був проведений під час максимального навантаження катушки. Для зручності на ілюстраціях зображено перші секунди виміру, коли катушка тільки починає працювати, та останні. Результати експериментальних вимірювань температури представлені на рис. 11–14.

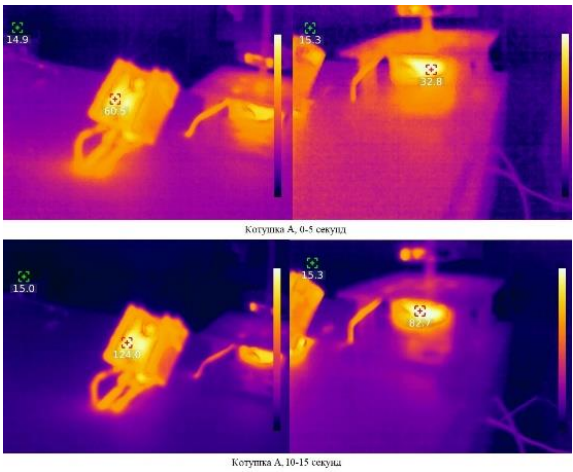


Рис. 11. Температурні показники катушки А:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 11. Temperature characteristics of coil A:
1 – transistor; 2 – coil

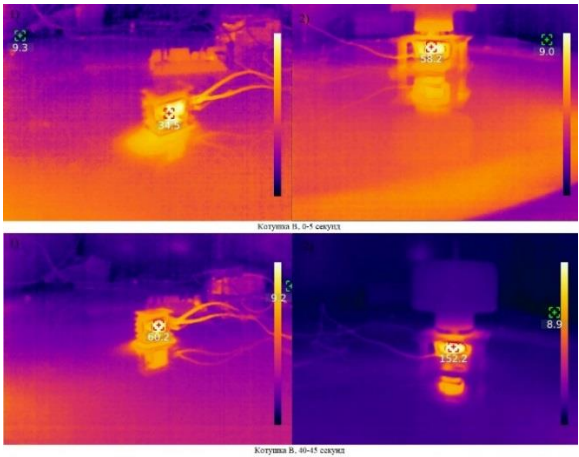


Рис. 12. Температурні показники катушки В:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 12. Temperature characteristics of coil B:
1 – transistor; 2 – coil

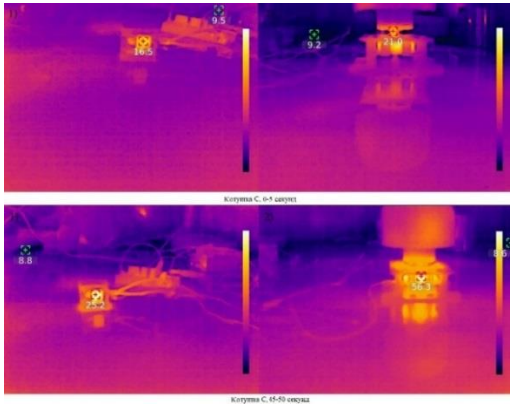


Рис. 13. Температурні показники катушки С:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 13. Temperature characteristics of coil C:
1 – transistor; 2 – coil

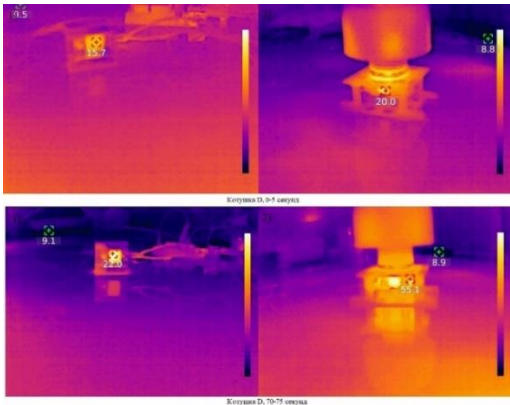


Рис. 14. Температурні показники катушки D:
1 – транзистор; 2 – катушка

Fig. 14. Temperature characteristics of coil D:
1 – transistor; 2 – coil

Отримані результати також представлені у табличному вигляді, табл. 5–8.

Таблиця 5

Температурні показники шляхової катушки А під час навантаження

Table 5

Temperature characteristics of track coil A under load

Час, с	Температура, °C	
	Транзистор	Катушка
0–5	60,5	32,8
5–10	91,2	59,8
10–15	124	82,7

Таблиця 6

Температурні показники шляхової котушки В під час навантаження

Table 6

Temperature characteristics of track coil B under load		
Час, с	Температура, °C	
	Транзистор	Котушка
0–5	34,5	58,2
5–10	42,5	79,5
10–15	47,6	95,5
15–20	50,3	109
20–25	52,5	120
25–30	54,7	132
30–35	56,9	134
35–40	58,5	145
40–45	60,2	152

Таблиця 7

Температурні показники шляхової котушки С під час навантаження

Table 7

Temperature characteristics of track coil C under load		
Час, с	Температура, °C	
	Транзистор	Котушка
0–5	16,5	21
5–10	18,9	30,2
10–15	20,1	34,9
15–20	21,4	39,5
20–25	22,1	42,4
25–30	22,9	44,8
30–35	23,5	48,3
35–40	24,2	50,9
40–45	24,7	53,4
45–50	25,2	56,3

Таблиця 8

Температурні показники шляхової котушки D під час навантаження

Table 8

Temperature characteristics of track coil D under load		
Час, с	Температура, °C	
	Транзистор	Котушка
0–5	15,7	20
5–10	16,7	22,4
10–15	16,9	23,8
15–20	17,1	25,7
20–25	17,2	28,9
25–30	17,8	31,9
30–35	18,4	36,3
35–40	18,8	36,9
40–45	19,2	38,3
45–50	19,5	42,9
50–55	20,3	46,4
55–60	20,5	47,5
60–65	20,9	50,1
65–70	21,6	53,1
70–75	22	55,1

За отриманими результатами температур спостерігається залежність, чим менше витків і більший діаметр проводу котушки, тим стрімкіше зростає температура під час її навантаження.

Для визначення максимальної сили тяги котушок, під час роботи стенду поступово навантажували магніт, який взаємодівав з котушкою до тих пір, поки котушка не припиняла утримувати магніт у повітрі (рис. 3). Результати визначення максимальної сили тяги представлені на рис. 15, а також у табл. 9.

Враховуючи всі попередні експерименти стосовно дослідження динамічних показників шляхових котушок, можна зробити висновок, що для подальшої роботи з натурною моделлю високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту серед усіх підходить котушка з маркуванням «А», оскільки вона має відносно високі

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

динамічні показники, а саме: найменший час виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, та найбільшу силу тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі.



Рис. 15. Результати з визначення максимальної тяги

Fig. 15. Results for determining maximum traction

Таблиця 9

Показники тяги шляхових котушок

Table 9

Traction characteristics of track coils

Котушка	Маса лівітуючої платформи, г
A	139
B	126
C	60,1
D	55,8

Наукова новизна та практична значимість

Створені передумови для подальшого формування характеристик натурної моделі дво-режимного магнітолевітаційного модулю. Вперше отримані динамічні показники шляхової котушки для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

За результатами досліджень розроблена методика, яка полягає у становленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками, що дає змогу встановити раціональні параметри шляхової котушки. Визначено такі параметри електродинамічного процесу як час наростання струму та сила тяги, а також проаналізовано температурні режими роботи котушок в умовах експериментального навантаження.

Висновки

Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту відкриває можливість у встановленні зв'язку між конструкційними параметрами котушки та її динамічними показниками.

В результаті проведення експериментального дослідження отримано часові характеристики чотирьох зразків шляхових котушок для натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, а саме: час наростання струму та сили тяги, а також характеристики температурних режимів котушок під навантаженням.

Встановлено, що котушка з маркуванням «А» характеризується відносно високими динамічними показниками, а саме: найменшим часом виходу на свій робочий режим, який становить 0,4 с, та найбільшою силою тяги, яка становить 1,39 Н. В цілому ці показники дозволяють визначити котушку з маркуванням «А» як найбільш раціональний варіант для використання у натурній моделі.

Отримані результати становлять важливу науково-технічну базу для розробки й впровадження перспективних транспортних систем на основі магнітної левітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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>
2. Плаксін С., Муха А., Устименко Д., Шпиль Ю., Голота О., Чуприна Є. 2-х режимний тягово-левітаційний модуль перспективної магнітно-левітаційної транспортної системи. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. № 2 (58). С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>
3. Чуприна Є. М., Муха А. М., Бондар О. І., Плаксін С. В. Дослідження системи первинного накопичення електричної енергії тягового фотоенергетичного модуля. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 3 (107). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313862>
4. Alloui L., Ben Alia K., Bouillault F., Mimoun S. M., Bernard L., Lévêque J. Numerical study of the relation between the thermal effect and the stability of the levitation system excited by an external source. *Physica C: Superconductivity*. 2013. Vol. 487. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.01.010>
5. Dai J., Lim J. G. Y., Ang K. K. Dynamic response analysis of high-speed maglev-guideway system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2023. Vol. 11(6). P. 2647–2658. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00995-5>
6. Fu S., Deng Z., Han W., Gao X., Zhou Y. Modeling and analysis of a novel levitation magnet with damping coils for high-speed maglev train. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, Iss. 12. P. 5247. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16125247>
7. Lei W., Zheng J., Huang Z., Zhang W., Deng Z. Study of long-time levitation performance of high temperature superconducting maglev under vertical vibration. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2022. Vol. 600. 1354099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354099>
8. Lim J., Lee C.-Y., Oh Y. J., Jo J.-M., Lee J.-H., Lee K.-S., Choi S. Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop. *Scientific Reports*. 2021. 11(1). 23499. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02907-7>
9. Nemkov V., Goldstein R. Increasing inductor life by predicting coil copper temperatures. 2007. P. 44–49. URL: https://www.researchgate.net/publication/294641749_Increasing_inductor_life_by_predicting_coil_copper_temperatures
10. Rakhimbay A., Khamitov A., Bagheri M., Alimkhanuly B., Lu M., Phung T. Precise Analysis on Mutual Inductance Variation in Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle. *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 3. 624. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030624>
11. Zgraja J. Method of Determining the Temperature Characteristics of the Thermal and Electrical Properties of Conductive Materials on a Stand for Induction Heating. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 14. 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145309>
12. Zheng X. J., Zhou Y. H., Yang X. P., Miya K. Analysis on dynamic stability of superconducting coils in a three-coil partial torus. *Fusion Engineering and Design*. 2001. Vol. 54, Iss. 1. P. 31–39. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0920-3796\(00\)00100-9](https://doi.org/10.1016/s0920-3796(00)00100-9)

Y M. CHUPRYNA^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, O. I. BONDAR^{3*}, S. V. PLAKSIN^{4*},
D. V. USTYMENKO^{5,6*}, O. O. HOLOTA^{7*}

^{1*}Dep. «Electrical engineering and electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technology, SEI DIIT, 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 Technology, SEI DIIT, 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 Technology, SEI DIIT, 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

^{5*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{6*}Dep. 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

^{7*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Research of the Dynamic Indicators of the Track Coil of a Full-Scale Model of High-Speed Magnetic Levitation Transport

Purpose. The main idea of the work is to experimentally study the dynamic performance of the track coils of a physical model of high-speed magnetolevitation transport with further comparison of their characteristics for a reasonable choice of a rational coil according to such criteria as current rise time and thrust force.

Methodology. The research was carried out experimentally. A test bench for determining the dynamic characteristics of track coils was developed specifically for these purposes. The main dynamic indicators include: the time of current rise in the coil, and the auxiliary indicators include: traction force and temperature conditions. Measurements of the time characteristics, in particular, the current rise, were carried out using an oscilloscope, and the traction force was determined by gradually loading a platform mounted on a levitating magnet with a non-magnetic load. Temperature conditions were recorded using a thermal imager. During the work, four types of coils were studied, which differ from each other in such indicators as wire diameter, number of turns, electrical resistance, and inductance. For each of the coils, a series of measurements were made taking into account changes in the duty cycle of the electrical signal. This approach made it possible to assess the effect of the electrical signal duty cycle on the operating modes and dynamic performance of the coils under study. **Findings.** As a result of the experimental study, the time characteristics of four samples of track coils for a physical model of high-speed magnetolevitation transport were obtained, in particular, the time of current rise, the magnitude of the traction force, and the temperature conditions under load. It has been established that the coil labeled «A» is characterized by relatively high dynamic indicators, namely: the shortest time to reach its operating mode, which is 0.4 s, and the highest thrust, which is 139 g of cargo. In general, these indicators make it possible to determine the coil with the «A» marking as the most rational option for use in a full-scale model. **Originality.** The prerequisites for further characterization of the physical model of a two-mode magneto-levitation module are created. For the first time, the dynamic parameters of the track coil for a physical model of high-speed magneto-levitation transport were obtained during a laboratory study of its experimental samples. **Practical value.** Based on the results of the research, a methodology has been developed that establishes a link between the coil's structural parameters and its dynamic performance, which makes it possible to establish rational parameters of the track coil. The parameters of the electrodynamic process, in particular, the time of current rise, the magnitude of the traction force, and the temperature conditions of the coil operation under experimental load were determined.

Keywords: physical model; track coil; magnetic levitation transport; track structure; dynamic parameters

REFERENCES

1. 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)
2. Plaksin, S., Mukha, A., Ustymenko, D., Shpyl, Y., Holota, O., & Chupryna, Y. (2022). Two-mode traction-levitation module of a prospective magnetic levitation transport system. *Electromechanical and Energy Saving Systems*. 2(58), 49-53. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53> (in Ukrainian)
3. Chupryna, Y. M., Mukha, A. M., Bondar, O. I., & Plaksin, S. V. (2024). Investigation of the primary energy storage system of a traction photovoltaic module. *Science and Progress of Transport*. 3(107), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313862> (in Ukrainian)
4. Alloui, L., Ben Alia, K., Bouillault, F., Mimoune, S. M., Bernard, L., & Lévêque, J. (2013). Numerical study of the relation between the thermal effect and the stability of the levitation system excited by an external source. *Physica C: Superconductivity*. 487, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2013.01.010> (in English)
5. Dai, J., Lim, J. G. Y., & Ang, K. K. (2023). Dynamic response analysis of high-speed maglev-guideway system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 11(6), 2647-2658. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00995-5> (in English)
6. Fu, S., Deng, Z., Han, W., Gao, X., & Zhou, Y. (2024). Modeling and analysis of a novel levitation magnet with damping coils for high-speed maglev train. *Sustainability*. 16(12), 5247. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16125247> (in English)
7. Lei, W., Zheng, J., Huang, Z., Zhang, W., & Deng, Z. (2022). Study of long-time levitation performance of high temperature superconducting maglev under vertical vibration. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 600, 1354099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2022.1354099> (in English)
8. Lim, J., Lee, C.-Y., Oh, Y. J., Jo, J.-M., Lee, J.-H., Lee, K.-S., & Choi, S. (2021). Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop. *Scientific Reports*. 11(1), 23499. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02907-7> (in English)
9. Nemkov, V., & Goldstein, R. (2007). Increasing inductor life by predicting coil copper temperatures. 44-49. URL: https://www.researchgate.net/publication/294641749_Increasing_inductor_life_by_predicting_coil_copper_temperatures (in English)
10. Rakhymbay, A., Khamitov, A., Bagheri, M., Alimkhanuly, B., Lu, M., & Phung, T. (2018). Precise Analysis on Mutual Inductance Variation in Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle. *Energies*. 11(3), 624. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11030624> (in English)
11. Zgraja, J. (2023). Method of Determining the Temperature Characteristics of the Thermal and Electrical Properties of Conductive Materials on a Stand for Induction Heating. *Energies*. 16(14), 5309. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145309> (in English)
12. Zheng, X. J., Zhou, Y. H., Yang, X. P., & Miya, K. (2001). Analysis on dynamic stability of superconducting coils in a three-coil partial torus. *Fusion Engineering and Design*. 54(1), 31-39. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0920-3796\(00\)00100-9](https://doi.org/10.1016/s0920-3796(00)00100-9) (in English)

Надійшла до редколегії: 09.05.2025

Прийнята до друку: 12.09.2025