

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І ТРАНСПОРТУ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ННІ «ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І ТРАНСПОРТУ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОЛОТА ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.4.053:621.318

ДИСЕРТАЦІЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ШЛЯХОВОЮ СТРУКТУРОЮ НАТУРНОЇ МОДЕЛІ
МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Галузь знань 027 – Транспорт

Спеціальність 275 – Транспортні технології (за видами)

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Голота Олександр Олександрович

Наукові керівники

Муха Андрій Миколайович, доктор технічних наук, професор

Плаксін Сергій Вікторович, доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник ІТСТ НАН України

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Голота Олександр Олександрович. Дослідження режимів роботи системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології (за видами). – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена питанням дослідження режимів роботи системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. В даній роботі під визначенням «шляхова структура» мається на увазі саме тягові електромагніти, які забезпечують реалізацію на стенді такі режими роботи – левітацію та тягу екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Робота охоплює як теоретичний, так і практичний аспект дослідження систем керування високошвидкісних наземних транспортних систем.

Магнітолевітаційний транспорт є однією з найперспективніших технологій високошвидкісного руху. Будучи різновидом високошвидкісного транспорту, магнітолевітаційний транспорт, має потенціал суттєво змінити перевезення пасажирів і вантажів порівняно з традиційними високошвидкісними залізницями за рахунок відсутності контакту колеса з рейкою. Цей фактор дає можливість забезпечити вищі експлуатаційні швидкості, менший знос елементів інфраструктури, нижчий рівень шуму та вібрацій, а також підвищену плавність руху. Для пасажирських перевезень це означає скорочення часу в дорозі на середніх дистанціях і конкурентоспроможність з авіаційним транспортом, а для вантажних – можливість швидкої доставки вантажів із високою енергоефективністю. На сьогодні в світі введено в експлуатацію декілька ділянок цього виду транспорту. Shanghai Maglev (Китай) протяжністю приблизно 30 км, що з'єднує аеропорт Пудун із містом, та Linimo (Японія) – міська лінія довжиною близько 9 км. Крім

того, реалізовані дослідні або випробувальні ділянки, включно з проектами SCMaglev у Японії, що демонструють можливості досягнення швидкостей понад 500 км/год. Проте будівництво повномасштабних дослідних ділянок є дороговартісним та складним процесом, що обмежує широке впровадження технології на національних мережах транспортних систем.

Існуючі магнітолевітаційні технології базуються переважно на довгих секціях живлення та централізованих системах керування, що ускладнює експериментальні дослідження, адаптацію режимів роботи та впровадження нових алгоритмів керування.

Важливим етапом досліджень у цій галузі є натурне моделювання та створення експериментальних стендів, що дає змогу відтворювати основні процеси взаємодії між екіпажем і шляховими котушками, досліджувати їх електромагнітні параметри, перевіряти алгоритми керування та оцінювати динаміку перехідних процесів. Застосування такого підходу забезпечує можливість ефективного випробування сучасної елементної бази та формує передумови для подальшого вдосконалення магнітолевітаційних транспортних технологій і їх впровадження у повномасштабних системах нового покоління.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих режимів керування натурною моделлю магнітолевітаційного транспортного засобу та відповідних систем керування, здатних забезпечити стабільний рух і високу швидкість при магнітній левітації.

Результатом роботи досліджуваної системи керування є визначення діапазонів просторових кутів для подачі керуючих імпульсів на шляхові котушки натурального стенду магнітолевітаційного транспорту.

Робота в тематиці досліджень магнітолевітаційного транспорту та систем керування електротранспортом проводилась як українськими вченими, так і закордонними. Серед вітчизняних науковців визначаються праці Васильєва С. В., Дзензерського В. О., Омеляненка В. І., Плаксіна С. В., Погорілої Л. М., Матіна В. І., Устименка Д. В., Хвороста М. В., Циценкова Д. В., Шкіля Ю. В., Серед закордонних вчених вагомий внесок

зробили Antunez S., Carabelli S., Carcasi G., Danby G. T., Delprete C., Eric R. Laithwaite, Felez J., Fontana R., Fukase S., Genta G., Gopi R. S., Liang H., Lichtenberg A., Muzzarelli M., Nocita A., Panneerselvam K., Parrotta L. A., Portillo D., Powell J. R., Schultz-Wildelau M., Srinivasan S., Vaquero-Serrano M. A., Wang Y., Weihua Zhang, Wiesman R., Yang H., Zhou B., Zigang Deng та інші.

На першому етапі роботи було здійснено аналіз сучасного стану розвитку магнітолевітаційного транспорту у світі. Показано, що Японія, Китай і Німеччина досягли значних успіхів у створенні маглев-систем, які вже функціонують на пасажирських маршрутах. Водночас окреслено основні проблеми: висока вартість інфраструктури, складність енергопостачання та потреба в надійних системах керування. Розглянуто основні типи систем підвіски – електромагнітну (EMS) та електродинамічну (EDS), їхні переваги й обмеження.

В другому розділі роботи було визначено та запропоновано принципи можливих алгоритмів керування натурною моделлю, а саме послідовний, паралельний, комбінований. Було виконане імітаційне моделювання та отримано нові залежності, що дозволили визначити часові характеристики перехідного процесу натурної моделі тягового модуля. За допомогою програмного забезпечення Scilab проведено моделювання роботи дослідної схеми блоку розподілення енергії та отримано графіки перехідних процесів для різного типу керування шляховим модулем: послідовне, паралельне, комбіноване. 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.

Третій розділ присвячено створенню експериментального натурального стенду та дослідженню параметрів шляхових котушок. Створений стенд характеризується наявними габаритами, що і визначило його структуру, яка складається з 40 модулів, що поділені на 8 секцій. Кожен шляхових модуль має

по 2 шляхові котушки з зовнішньої та внутрішньої сторони. Оскільки, ключовим елементом натурального стенду є шляхова котушка, то постає завдання в виборі необхідних параметрів та досліджень її властивостей. Визначено, що для перевірки закономірностей розподілу значень реактивного опору шляхових котушок при різних конструктивних параметрах доцільно застосовувати експериментальні дослідження. У цьому розділі запропоновано принцип секційної модульної системи керування рухом екіпажу натурної моделі. Вона базується на використанні шляхових модулів, що можуть працювати у різних режимах, які можуть бути задані програмно, наприклад, з використанням мікроконтролерів Arduino. Дослідження значень реактивного опору шляхових котушок дозволило встановити їх залежності від різних параметрів (діаметр проводу, кількість витків) та провести обґрунтований вибір раціональних параметрів шляхової котушки для натурального стенду.

Четвертий розділ присвячено експериментальному дослідженню шляхових модулів в режимі неробочого ходу. Оскільки, натурний стенд подібний за принципом дії лінійному синхронному двигуну має та є оберненим, тобто досліджуючи його в режимі «генератор», можливо визначити і показники режим «двигун», а саме моменти найбільшої реалізації електрорушійної сили. Отримані результати є вихідними для обґрунтування позиціонування екіпажу натурального стенду. Показано, що для відтворення динамічних режимів руху необхідно забезпечити точну комутацію шляхових модулів. Для цього було використано енкодер та датчик Холла, які дозволяють визначати положення й координати екіпажу в реальному часі. Аналіз отриманих осцилограм неробочого ходу дозволив прогнозувати раціональні моменти часу для комутації шляхових модулів в режимі тяги.

Метою дисертації є визначення діапазонів просторових кутів положення екіпажу для подачі сигналів керування на шляхову котушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, які б дозволили реалізувати режим тяги та левітації.

Наукова новизна дослідження полягає:

1) Вперше проведено експериментальне визначення реактивного опору наявних прототипів шляхових котушок для натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, що створило передумови для проведення подальшого моделювання режимів роботи системи керування натурної моделі.

2) Експериментальні дослідження натурального стенду в режимі неробочого ходу дозволили вперше визначити діапазони просторових кутів положення екіпажу для подачі сигналів керування на шляхову котушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, які б дозволили реалізувати режим тяги та левітації.

3) Отримано часові залежності споживання струму від джерела живлення для різних режимів роботи системи керування шляховою структурою при різних сигналах керування: послідовний, паралельний, комбінований, що створює передумови для оцінки енергетичної ефективності системи.

Практичними результатами є:

1) Створення натурної моделі магнітолевітаційного транспорту з модульною структурою, яка дозволяє досліджувати електромагнітну взаємодію шляхових модулів з екіпажем в умовах, наближених до реальних.

2) Розробка системи позиціонування натурального стенду магнітолевітаційного транспорту, яка дозволяє виконувати подачу сигналів керування на шляхову котушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

3) 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.

Результати роботи створюють підґрунтя для подальших досліджень та розробки експериментально-дослідних натурних моделей, щоб отримати нові співвідношення та характеристики, які дозволять підтвердити ефективність і працездатність нового принципу керування рухом магнітоплану.

Отримані результати мають прикладне значення для розвитку магнітолевітаційного транспорту. Вони дозволяють уточнити параметри котушок шляхових модулів, вдосконалити системи керування та позиціонування натурних стендів й забезпечити основу для масштабування отриманих технічних рішень.

Ключові слова: магнітолевітаційний транспорт, лінійний двигун, шляховий модуль, натурний стенд, постійні магніти, шляхові котушки, система керування, керування рухом, керування процесом, позиціонування екіпажу, електромеханічні характеристики, магнітна індукція, алгоритм керування, режими роботи, неробочий хід.

ABSTRACT

Holota Oleksandr Oleksandrovych. Research on the operating modes of the track structure control system of physical model of magneto-levitation transport. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 275 - Transport technologies (on kinds). - Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to the issues of studying the operating modes of the track structure control system of a physical model of maglev transport. In this work, the definition of “track structure” refers to traction electromagnets that ensure the implementation of the following operating modes on the stand - levitation and crew traction of a physical model of maglev transport.

The work covers both the theoretical and practical aspects of studying control systems for high-speed ground transport systems.

Maglev transport is one of the most promising technologies for high-speed movement. Being a type of high-speed transport, maglev transport has the potential to significantly change the transportation of passengers and cargo compared to traditional high-speed railways due to the absence of wheel-rail contact. This factor makes it possible to provide higher operating speeds, less wear and tear on infrastructure elements, lower noise and vibration levels, and increased smoothness of movement. For passenger transport, this means reducing travel times over medium distances and competitiveness with air transport, and for freight – the possibility of fast delivery of goods with high energy efficiency. Today, several sections of this type of transport have been put into operation in the world. Shanghai Maglev (China) with a length of about 30 km, connecting Pudong Airport with the city, and Linimo (Japan) – an urban line about 9 km long. In addition, experimental or test sections have been implemented, including SCMaglev projects in Japan, demonstrating the possibility of achieving speeds of over 500 km/h. However, the construction of full-scale

experimental sections is an expensive and complex process, which limits the widespread implementation of the technology on national transport system networks.

Existing magnetolevitation technologies are based mainly on long power sections and centralized control systems, which complicates experimental research, adaptation of operating modes and implementation of new control algorithms.

An important stage of research in this area is physical modeling and creation of experimental stands, which allows reproducing the main processes of interaction between the crew and track coils, studying their electromagnetic parameters, checking control algorithms and evaluating the dynamics of transient processes. The use of such an approach provides the possibility of effective testing of modern element base and forms the prerequisites for further improvement of magnetolevitation transport technologies and their implementation in full-scale systems of the new generation.

The relevance of the work is due to the need to develop scientifically substantiated control modes for a physical model of a magnetolevitation vehicle and corresponding control systems capable of ensuring stable movement and high speed during magnetic levitation.

The result of the operation of the studied control system is the determination of the ranges of spatial angles for supplying control pulses to the track coils of the physical test stand of magnetic levitation transport.

Work on the topic of research into magneto-levitation transport and electric transport control systems was carried out by both Ukrainian and foreign scientists. Among domestic scientists, the works of Vasiliev S. V., Dzenzers'kyi V. O., Omelyanenko V. I., Plaksin S. V., Pogorila L. M., Matin V. I., Ustymenko D. V., Khvorost M. V., Tsyplenkov D. V., Shkil Y. V. Among foreign scientists, a significant contribution was made by Antunes S., Carabelli S., Carcass G., Danby G. T., Delprete K., Eric R. Leithwaite, Felez J., Fontana R., Fukase S., Genta G., Gopi R. S., Liang H., Lichtenberg A., Muzzarelli M., Nosita A., Pannerselvam K., Parrotta L. A., Portillo D., Powell J. R., Schultz-Wildelau M., Srinivasan S., Vaquero-Serrano MA, Wang Y., Weihua Zhang, Wiesman R., Yang H., Zhou B., Zigang Deng, et al.

At the first stage of the work, an analysis of the current state of development of magnetic levitation transport in the world was carried out. It was shown that Japan, China and Germany have achieved significant success in creating maglev systems that are already operating on passenger routes. At the same time, the main problems were outlined: the high cost of infrastructure, the complexity of power supply and the need for reliable control systems. The main types of suspension systems - electromagnetic (EMS) and electrodynamic (EDS), their advantages and limitations were considered.

In the second section of the work, the principles of possible algorithms for controlling the physical model were defined and proposed, namely, serial, parallel, combined. Simulation modeling was performed and new dependencies were obtained, which allowed determining the time characteristics of the transient process of the physical model of the traction module. Using the Scilab software, the operation of the experimental circuit of the energy distribution unit was simulated and transient graphs were obtained for different types of track module control: serial, parallel, combined. A tool for computer modeling of the energy distribution unit has been developed, which can be used in the future to solve other problems related to the development of the power plant of the track structure of high-speed maglev transport.

The third section is devoted to the creation of an experimental physical stand and the study of the parameters of the track coils. The created stand is characterized by the available dimensions, which determined its structure, which consists of 40 modules divided into 8 sections. Each track module has 2 track coils on the outer and inner sides. Since the key element of the full-scale stand is the track coil, the task arises of selecting the necessary parameters and studying its properties. It was determined that it is advisable to use experimental research to verify the patterns of distribution of the values of the reactance of the track coils at different design parameters. This section proposes the principle of a sectional modular system for controlling the movement of the crew of a physical model. It is based on the use of track modules that can operate in different modes that can be set programmatically, for example, using Arduino microcontrollers. The study of the values of the reactance

of the track coils allowed us to establish their dependence on various parameters (wire diameter, number of turns) and to make a reasonable choice of rational parameters of the track coil for the physical test stand.

The fourth section is devoted to the experimental study of track modules in the non-working mode. Since the physical test stand is similar in principle to a linear synchronous motor and is inverted, that is, by studying it in the “generator” mode, it is possible to determine the indicators of the “engine” mode, namely the moments of the greatest realization of the electromotive force. The results obtained are the starting points for substantiating the positioning of the maglev vehicle of the physical test stand. It is shown that to reproduce dynamic modes of movement, it is necessary to ensure accurate switching of the track modules. For this purpose, an encoder and a Hall sensor were used, which allow us to determine the position and coordinates of the crew in real time. Analysis of the obtained non-working oscillograms allowed us to predict rational moments of time for switching the track modules in the traction mode.

The purpose of the dissertation is to determine the ranges of spatial angles of the maglev vehicle position for supplying control signals to the track coil of a physical model of maglev transport, which would allow to implement the traction and levitation mode.

The scientific novelty of the research is:

- 1) For the first time, an experimental determination of the reactance of existing prototypes of track coils for a physical model of maglev transport was carried out, which created the prerequisites for further modeling of the operating modes of the control system of the physical model.

- 2) Experimental studies of a physical stand in the non-working mode allowed to determine the ranges of spatial angles of the crew position for supplying control signals to the track coil of a physical model of maglev transport, which would allow to implement the traction and levitation mode.

- 3) The time dependences of current consumption from the power source for different operating modes of the track structure control system with different control

signals: serial, parallel, combined, which creates the prerequisites for assessing the energy efficiency of the system.

The practical results are:

1) Creation of a physical model of a maglev transport with a modular structure, which allows studying the electromagnetic interaction of track modules with the crew in conditions close to real ones.

2) Development of a positioning system for a physical stand of a maglev transport, which allows supplying control signals to the track coil of a full-scale model of a maglev transport.

3) A tool for computer modeling of the energy distribution unit has been developed, which can be used in the future to solve other problems related to the development of the power plant of the track structure of a high-speed maglev transport.

The results of the work create a basis for further research and development of experimental and research physical models in order to obtain new ratios and characteristics that will allow to confirm the efficiency and operability of the new principle of magnetic levitation movement control.

The obtained results have an applied value for the development of magnetic levitation transport. They allow to specify the parameters of the coils of the track modules, to improve the control systems and positioning of physical stands and to provide a basis for scaling the obtained technical solutions.

Key words: magnetic levitation transport, linear motor, track module, physical stand, permanent magnets, track coils, control system, motion control, process control, maglev vehicle positioning, electromechanical characteristics, magnetic induction, control algorithm, operating modes, idle stroke.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані наукові результати:

1. **Holota, O.**, Ustymenko, D., Mukha, A., Plaksin, S., & Chupryna, Y. (2025). Determination of the inductiveness of a physical model of track coils for high-speed transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(83)), 52–57. (**Scopus**). (<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331995>)
2. Plaksin, S., Mukha, A., Ustymenko, D., Podchasov, A., & **Holota, O.** (2025). Development of a diagnostic procedure for assessing the performance of a magnitoplane navigation system. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2(84)), 65–70. (**Scopus**). (<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334444>)
3. 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. Вип. 2 (58). С. 56–65. (**фахове видання**) (DOI: 10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53)
4. **Голота О. О.**, Плаксін С. В., Шкіль Ю. В., (2022). Визначення координат просторової орієнтації магнітоплану відносно колійної структури. *Транспортні системи і технології*, (40), 159–169. (**фахове видання**) (<https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14>)
5. **Голота, О. О.**, Муха, А. М., Устименко, Д. В., Плаксін, С. В. (2024). Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*, (1(105)), 30–41. (**фахове видання**) (<https://doi.org/10.15802/stp2024/301521>)
6. **Голота, О. О.** (2025). Дослідження режимів керування шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту (**фахове видання**). *Транспортні системи та технології перевезень*, (30), 29–36. (<https://doi.org/10.15802/tsst2025/340121>)
7. Чуприна Є. М., Муха А. М., Бондар О. І., Плаксін С. В., Устименко Д. В., **Голота О. О.** (2025) Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

Наука та прогрес транспорту, (3(111), 79–90. **(фахове видання)**
(<https://doi.org/10.15802/stp2025/341709>)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Голота, О. О. Методи контролю динамічних показників магнітно-левітаційного транспорту / О. О. Голота // Стан та перспективи розвитку електричного транспорту: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 23-25 листоп. 2022 р. / Харків. нац.ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [та ін.; редкол.: Н. І. Кульбашна, А. В. Коваленко]. – Харків, 2022. – С. 164–165 **(тези конференції)**

9. Holota O. Prospects of the development of the maglev transport in Ukraine / O. Holota // Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future: International Scientific Multidisciplinary Conference of Students and Beginner Scientists, Dnipro, November 23 / Дніпро: Український державний університет науки і технологій. – Dnipro, 2022. – P. 20–21. **(тези конференції)**

10. Голота О. Пристрій контролю струму в програмно-апаратному комплексі визначення параметрів шляхової структури високошвидкісного наземного транспорту / О. О. Голота // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту [Текст]: матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 квітня 2023 р. / за заг. ред. Ю.С. Пройдака, Р.В. Маркуля. УДУНТ. – Дніпро, 2023. – С. 186–188 **(тези конференції)**

11. Голота О. Ефективність роботи автономної фотоелектричної установки / О. О. Голота, С. В. Плаксін, І. В. Тимченко // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 18–19 травня 2023р., Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, 2023.– С. 193-194 **(тези конференції)**

12. Голота О. Застосування елементів теорії подібності при розробці експериментальних масштабних моделей магнітно-левітаційного транспорту / О. О. Голота // Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих вчених «Наука і сталий розвиток транспорту», Дніпро, 27 жовтня 2023

р., Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2023. – С. 131-132 **(тези конференції)**

13. Голота О. Проблеми високошвидкісних вантажних перевезень магнітно-левітаційним транспортом/ О. О. Голота // Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств: Тези 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції, Дніпро, 23-24 листопада 2023 р. – Дніпро.: УДУНТ, 2023. – С. 31-32 **(тези конференції)**

14. Голота О. Експериментальна установка блоку розподілення електроенергії високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту на платформі Arduino / О. О. Голота // «Наукова весна» 2024: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 27–29 березня 2024 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. С. 126-127. **(тези конференції)**

15. Голота О. Одноплатний комп'ютер Arduino Mega – базовий керуючий блок для стенду високошвидкісного транспорту / О. О. Голота // Молода академія - 24. Т.ІІІ: зб. тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 23-24 травня. 2024 р.-Дніпро: УДУНТ, 2024, С. 45-46 **(тези конференції)**

16. Голота О. Розподілена модульна система керування рухом магнітолевітаційного транспорту / О. О. Голота, А. М. Муха, Д. В. Устименко, С. В. Плаксін // Proceedings Of III International Scientific and Practical Conference for Applicants for Higher Education, of Education Workers and Scientists «MODERN RESEARCH: TRANSPORT INFRASTRUCTURE AND INNOVATION TECHNOLOGIES» 28-29 November 2024, Kyiv / Kyiv Institute of Railway Transport of the State University of Infrastructure and Technologies, С. 59-63 **(тези конференції)**

17. Голота О. Адаптивні контролери для систем керування рухом магнітолевітаційного транспорту / О. О. Голота // Наука і сталий розвиток транспорту 2024. Т.ІІІ: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і

молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2024р.-Дніпро: УДУНТ, 2024. - С.83 (**тези конференції**)

18. Голота О. Дослідження індуктивних параметрів шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного транспорту / О. О. Голота // Towards a Holistic Understanding: Interdisciplinary Approaches to Tackle Global Challenges and Promotion of Innovative Solutions: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, March 13-14, 2025. Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, P. 90-91. (**тези конференції**)

19. Голота О. Реалізація алгоритмів керування системою позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту / О. О. Голота // Перспективи електричного транспорту : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 22–24 жовт. 2025 р. / Харків. нац.ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова [та ін.; редкол.: В. Х. Далека, Н. І. Кульбашна, А. В. Коваленко]. – Харків, 2025. – С. 106–107 (**тези конференції**)

20. Голота О. Система позиціонування екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту з використанням мікроконтролерів Arduino та STM32 / О. О. Голота // Наука і сталий розвиток транспорту 2025. Т.3: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2025 р.-Дніпро: УДУНТ, 2025 – С.75-76 (**тези конференції**)

Внесок автора у наукові публікації, що написані у співавторстві: в публікаціях [1], що індексується у наукометричній базі Scopus, автор приймав участь у експериментальній частині випробувань та у обробці результатів вимірювань, аналізу публікацій по темі статті, а також формування висновків; В статті [2], що індексується у наукометричній базі Scopus, автор приймав участь в аналізі наявних джерел з даної теми, розробці діаграм та формуванні висновків; у фахових статтях [3,4] аналізував можливості розробки систем керування магнітолевітаційним транспортом, виконував 3D моделювання режимів роботи, обробляв дані, формував висновки; у [5] виконував імітаційне моделювання режимів роботи шляхового модуля, виконував аналіз отриманих

даних, формував висновки роботи; в одноосібній публікації [6] автор описував основні складові дисертаційного дослідження, розробляв складові натурального стенду, досліджував параметри шляхових катушок, розробляв та виконував верифікацію працездатності системи керування рухом натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, проводив дослідження режиму неробочого ходу екіпажу натурної моделі, формував висновки; в [7] виконував обробку експериментальних даних та проектування дослідної установки, формував висновки; в матеріалах тез конференцій [8-20] автор висвітлював основні положення розділів дисертації, що є апробацією виконаної роботи.

ЗМІСТ

Вступ.....	20
1. Сучасний стан і проблематика магнітолевітаційного транспорту ..	25
1.1 Огляд сучасного стану магнітолевітаційного транспорту.....	26
1.2 Перспективи розвитку та досліджень магнітолевітаційного транспорту в Україні.....	31
1.3 Системи підвісу магнітолевітаційного транспорту.....	34
1.4 Методи та способи досліджень режимів роботи магнітолевітаційного транспорту.....	39
1.5 Енергетичні процеси та методи контролю динамічних показників магнітолевітаційного транспорту.....	41
1.6 Системи керування рухом магнітолевітаційного транспорту.....	43
1.7 Принципи формування тяги в магнітолевітаційному транспорті..	47
1.8 Застосування натурального моделювання при дослідженні магнітолевітаційного транспорту	48
1.9 Дослідження прототипів натурних моделей шляхових котушок ..	50
1.10 Висновки до першого розділу	52
2. Реалізація принципів керування натурною моделлю магнітолевітаційного транспорту	53
2.1 Передумови для імітаційного моделювання процесів шляхової структури натурної магнітолевітаційного транспорту.....	54
2.2 Розподілена енергосистема шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	56
2.3 Математичне моделювання секції шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	57
2.4 Дослідження перехідних процесів в секції натурної моделі шляхової структури магнітолевітаційного транспорту.....	60
2.5 Дослідження перехідних процесів у колах шляхового модуля натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	71

2.6 Висновки до другого розділу.....	72
3. Розробка експериментального натурального стенду та дослідження параметрів шляхових катушок	74
3.1 Розробка експериментального натурального стенду магнітолевітаційного транспорту.....	75
3.2 Дослідження параметрів натурної моделі шляхових катушок для шляхової структури магнітолевітаційного транспорту.....	84
3.3 Динамічні показники шляхової катушки натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	99
3.4 Висновки до третього розділу	102
4. Розробка системи позиціонування натурального стенду та дослідження шляхового модуля в режимі неробочого ходу	104
4.1 Система позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.....	106
4.2 Експериментальна перевірка системи позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	112
4.3 Принцип подачі керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту	116
4.4 Перспективи застосування мікроконтролерів різних типів для керування режимами роботи шляховою структурою	118
4.5 Дослідження шляхових катушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту в режимі неробочого ходу	121
4.6 Принципи формування режимів роботи шляхової структури натурального стенду магнітолевітаційного транспорту.....	134
4.7 Висновки до четвертого розділу	135
Загальні висновки.....	137
Список використаних джерел.....	139
Додаток А.....	150
Додаток Б	153

ВСТУП

Розвиток високошвидкісного транспорту вимагає пошуку нових технічних рішень. Одним із перспективних напрямів у цій галузі є магнітолевітаційні транспортні системи, які використовують електромагнітні сили для створення тяги та підтримання рухомого складу без механічного контакту зі шляховою структурою. Наявні дослідження в цій тематиці демонструють значний потенціал для розвитку таких систем з використання сучасної елементної бази, проте, залишаються актуальними питання узгодження електромагнітних процесів у шляхових котушках із точним позиціонуванням екіпажу. Саме це обумовлює необхідність розробки натурних моделей, що дозволяють експериментально дослідити режими роботи, параметри елементів шляхової структури та можливі принципи керування. У даній роботі вперше представлено шляхову структуру та систему позиціонування натурального стенду магнітолевітаційного транспорту. Результати дослідження цього натурального стенду дозволяють наблизитися до побудови новітніх систем керування магнітолевітаційним транспортом нового покоління.

Науковою ідеєю дисертаційної роботи є створення нового підходу до процесу керування шляховою котушкою натурального стенду магнітолевітаційного транспорту. Оскільки даний натурний стенд створюється вперше, то необхідно виконати обґрунтування режимів керування його шляховою структурою, виконати експериментальні дослідження параметрів шляхових котушок та вирішити завдання, що пов'язані з координацією рухомої частини (екіпажу). Розв'язання цих завдань дозволить створити передумови для подальших досліджень роботи даного натурального стенду в режимі тяги.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до тематики науково-дослідних робіт Українського державного університету науки і технологій, а саме ініціативних науково-дослідних робіт (НДР) «Дослідження перехідних процесів в розрядному колі тягового модуля масштабного полігону високошвидкісної магістралі» (номер державної реєстрації 0124U001372) та

«Розрахунково-експериментальні дослідження макету тягово-левітаційного модуля шляхової структури магнітолевітаційного транспорту» (номер державної реєстрації 0125U000839). Автор був виконавцем робіт за вказаними НДР, результати дисертаційної роботи враховані у визначених принципах алгоритмів керування шляховою структурою та в проведенні розрахунково-експериментальних досліджень натурної моделі шляхової структури.

Мета роботи – визначення діапазонів просторових кутів положення екіпажу для подачі сигналів керування на шляхову котушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, які б дозволили реалізувати режим тяги та левітації.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані та вирішені такі **завдання дослідження:**

1. Аналіз сучасного стану розвитку магнітолевітаційного транспорту та його систем керування.
2. Комп'ютерне моделювання часових залежностей перехідного процесу у колах натурної моделі шляхової котушки.
3. Обґрунтування алгоритмів керування шляховою котушкою натурної моделі.
4. Розробка експериментального натурального стенду магнітолевітаційного транспорту.
5. Експериментальне визначення параметрів шляхових котушок і встановлення закономірностей їх зміни залежно від конструктивних параметрів.
6. Розробка та перевірка системи позиціонування екіпажу із застосуванням енкодера та датчика Холла.
7. Експериментальні дослідження режиму неробочого ходу руху екіпажу в межах шляхової структури для обґрунтування діапазонів просторових кутів положення екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Об'єкт досліджень – процеси керування роботою шляхових катушок та електромагнітна взаємодія між ними та екіпажем натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

Предмет досліджень – діапазони просторових кутів положення екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

В якості основного **методу досліджень** використано комплексний підхід, що включає аналітичний огляд сучасних систем магнітолевітаційного транспорту, експериментальне визначення параметрів шляхових катушок; застосування мікропроцесорних засобів для побудови системи позиціонування; аналіз осцилограм режиму неробочого ходу, моделювання перехідних процесів та розробка алгоритмів керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше проведено експериментальне визначення реактивного опору наявних прототипів шляхових катушок для натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, що створило передумови для проведення подальшого моделювання режимів роботи системи керування натурної моделі.

2. Експериментальні дослідження натурального стенду в режимі неробочого ходу дозволили вперше визначити діапазони просторових кутів положення екіпажу для подачі сигналів керування на шляхову катушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту, які б дозволили реалізувати режим тяги та левітації.

3. Отримано часові залежності споживання струму від джерела живлення для різних режимів роботи системи керування шляховою структурою при різних сигналах керування: послідовний, паралельний, комбінований, що створює передумови для оцінки енергетичної ефективності системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Створення натурної моделі магнітолевітаційного транспорту з модульною структурою, яка дозволяє досліджувати електромагнітну взаємодію шляхових модулів з екіпажем в умовах, наближених до реальних.

2. Розробка системи позиціонування натурального стенду магнітолевітаційного транспорту, яка дозволяє виконувати подачу сигналів керування на шляхову котушку натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

3. 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.

Особистий внесок здобувача. Ряд наукових робіт був опублікований у співавторстві. У зв'язку з цим необхідно відмітити, що в цих роботах автором визначені мета і постановка наукових завдань, автор приймав участь у розробці складових елементів натурального стенду, приймав участь у експериментальній частині випробувань та у обробці результатів виміряних значень електричних параметрів, брав участь у формуванні висновків.

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи викладалися на таких наукових заходах: Стан та перспективи розвитку електричного транспорту: Всеукраїнська науково-практична конференція, Харків, 2022 р.; Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future: International Scientific Multidisciplinary Conference of Students and Beginner Scientists, Dnipro, 2022; Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 82 Міжнародна науково-практична конференція, Дніпро, 2023 р.; Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XXIV міжнародна науково-практична конференція, Київ, 2023 р.; Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих вчених «Наука і сталий розвиток транспорту», Дніпро, 2023 р.; Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств: 12-та Міжнародно науково-практична конференція, Дніпро, 2023 р.; «Наукова весна» 2024: XIV Міжнародно науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 2024 р.; Молода академія – 24: Міжнародна науково-технічна конференція студентів і молодих учених, Дніпро, 2024 р.; III International Scientific and Practical Conference for

Applicants for Higher Education, of Education Workers and Scientists «Modern research: transport infrastructure and innovation technologies» Kyiv, 2024; «Наука і сталий розвиток транспорту 2024»: Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених, Дніпро, 2024 р.; «Towards a Holistic Understanding: Interdisciplinary Approaches to Tackle Global Challenges and Promotion of Innovative Solutions» Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, 2025, Dnipro;

Публікації. За темою дисертації «Дослідження режимів роботи системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту» опубліковано 20 наукових праць, що повністю розкривають основний зміст дисертаційної роботи та є апробацією результатів, отриманих при підготовці дисертаційної роботи, з яких 2 статті у виданні, що індексується у наукометричній базі Scopus, 5 статей у фахових журналах категорії «Б», а також 13 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг – 158 сторінок, з них 113 сторінок основного тексту, 66 рисунків на 62 сторінках, 11 таблиць на 11 сторінках, список використаних джерел з 84 назв на 11 сторінках, два додатки на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМАТИКА МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Розвиток нових транспортних систем є одним із ключових показників економічного та технологічного прогресу сучасних держав. Традиційні залізничні технології («колесо-рейка»), попри постійне вдосконалення виходять на рівень, де досягаються максимальні фізичні та технічні обмеження у швидкості та ефективності [1]. Такий стан цієї галузі створює можливість для пошуку потенційно нових транспортних технологій, серед яких вже окрему частку провідних досліджень займає магнітолевітаційний транспорт (маглев), що здатен забезпечувати вищий рівень мобільності та технологічності. [2].

Традиційні високошвидкісні залізничні системи типу «колесо–рейка» мають фундаментальні технічні обмеження, зумовлені наявністю механічного контакту між колесом і рейкою. У комерційній експлуатації максимальна швидкість таких систем, як правило, обмежується рівнем 300-350 км/год, що підтверджується практикою експлуатації високошвидкісних поїздів у Європі та Японії. Подальше підвищення швидкості призводить до різкого зростання динамічних навантажень, інтенсивного зносу контактних поверхонь та зменшення ресурсу елементів колісно-рейкового вузла.

Магнітолевітаційний транспорт відрізняється від традиційних залізничних технологій іншим підходом до побудови інфраструктури шляхової структури та рухомого складу, що дозволяє досягнути високих швидкостей завдяки іншій концепції цієї транспортної системи. До особливостей магнітолевітаційного транспорту можна віднести відсутній механічний контакт між рухомих складом та шляховою структурою («колією»), знижений рівень шуму, а також інший тип експлуатаційних умов для шляхової інфраструктури. Технічна концепція маглева базується на використанні сил магнітного поля для підйому (левітації) рухомого складу, досягнення стабільного положення в межах шляхової структури та руху. Ці особливості визначають маглев як один

з найбільш перспективних альтернатив традиційному високошвидкісному залізничному транспорту.

Останні десятиліття в галузі магнітолевітаційного транспорту можна охарактеризувати значний, як «технологічний стрибок», який продовжує досягати нових рівнів, оскільки за цей час маглев-системи пройшли шлях від лабораторних теоретичних симуляцій та натурних експериментальних моделей до промислового застосування. Ці проекти виконувались в різних країнах, таких як Японія, Німеччина, Китай та Південна Корея, та з різними способами побудови цієї транспортної системи, але в свою чергу ці розробки підтвердили технічну спроможність до подальшого поширення та розвитку цього виду транспорту. Окремим питанням залишається економічна та інфраструктурна складова для масового розповсюдження маглев технології у світі. Це пов'язано з необхідністю будувати всю інфраструктуру з «нуля», оскільки традиційну залізничну інфраструктуру складно адаптувати чи переобладнати під цю транспортну технологію. Однак, дослідження в цьому напрямку ведуться [3].

На теперішній час розвиток маглев технологій набуває нових імпульсів завдяки прогресу у сфері електроніки, систем управління та матеріалознавства. Актуальні дослідження розглядають питання зниження вартості будівництва, підвищення енергоефективності та створення умов інтеграції маглева в сучасні транспортні мережі пасажирських перевезень. Також окремим напрямком досліджень є аналіз екологічної безпечності магнітолевітаційного транспорту. Ці факти дають можливість вважати магнітолевітаційні технології одним з ключових напрямків транспортної інженерії XXI століття.

1.1 Огляд сучасного стану магнітолевітаційного транспорту

Перші повномасштабні реалізації маглева з'явилися в Німеччині та Японії наприкінці XX століття.

В Німеччині було розроблено та створено технологію магнітолевітаційного транспорту, яка отримала назву «Transrapid», яка пізніше стала основою для будівництва лінії у Шанхаї, де маглев починаючи з 2004 року

здійснює перевезення пасажирів на маршруті довжиною 30 км з максимальною швидкістю 431 км/год [4]. Цей проект став доказом можливості перспективи розвитку та актуальності цього виду транспорту.

У Японії було створено за своїм принципом, відмінну від німецької, маглев технологію на основі надпровідної левітації, яка отримала назву SCMaglev (Superconducting Maglev). У 2015 році японські розробники встановили рекорд швидкості маглев поїзда – 603 км/год. На теперішній час триває побудова масштабного проекту маглев сполучення між Токіо, Нагоя та Осака. Її введення в експлуатацію планується в 2030-х роках та очікується, що ця лінія стане першою магістраллю для маглева, побудованого за технологією SCMaglev. [5].

Використовуючи німецькі та японські розробки, Китай розвиває власні технології маглев-транспорту. У 2021 році був презентований прототип високошвидкісного маглева з максимальною швидкістю 600 км/год. Китай активно працює над створенням ліній, які будуть доповнювати існуючу мережу швидкісних залізниць, зокрема у напрямках Шанхай-Ханчжоу та Пекін-Шеньчжень. [6].

Південна Корея в 2016 році ввела в експлуатацію міську лінію маглева на короткому маршруті між метро та аеропортом. Цей приклад показав застосування магнітолевітаційного транспорту на середніх швидкостях (до 110 км/год), де одними з основних переваг є низький рівень шуму та відсутність викидів в міському середовищі [7].

Європейські інститути та дослідники також є одними з зацікавлених сторін в цій галузі, хоча наразі відсутня інформація про будівництво повномасштабних ліній маглев транспорту в Європейських країнах. Однак, існують проекти, де побудовано дослідно-експериментальні прототипи [8]. В більшості європейські дослідження зосереджені на інтеграції магнітолевітаційних технологій у міські транспортні мережі, а також поєднання маглева з концепціями «розумної мобільності» та сталого розвитку [9]. Одним

з перспективних напрямків в Європі є розробка транспортних систем для регіональних перевезень.

В США деякий час був наявний інтерес до маглеву завдяки проектам в штатах Меріленд та Невада [10]. Один з нереалізованих амбітних проектів в США полягав створенні маглев траси між Вашингтоном та Балтимором на основі японської технології SCMaglev [11]. Також значна частина американських досліджень розглядає побудову транспортної системи за технологією Hyperloop, що є конкурентною та суміжною концепцією до маглев систем [12].

У статті [13] здійснюється аналіз технологій надшвидкісного транспорту, що ґрунтуються на електродинамічному принципі руху – охоплюючи системи Maglev, Hyperloop, Railgun, Space Tram і проєкт Breakthrough Starshot. Автори визначили, що Maglev-поїзди зможуть широко застосовуватися у розвинених країнах і досягати швидкостей 600–700 км/год, особливо завдяки досягненням у сфері високотемпературної надпровідності, наноелектроніки та захисту пасажирів від магнітного поля. У свою чергу, Hyperloop розглядається переважно як вантажний транспорт із перспективою розвитку пасажирських ліній за оптимізації безпеки у вакуумованому середовищі, зі швидкістю до 1200 км/год. Досліджується також підвищення ефективності Railgun за рахунок нових матеріалів для зменшення абляції, можливість створення Space Tram, а також виклики проєкту Breakthrough Starshot, який має наявність значних невирішених технічних обмежень, що ставлять під сумнів його експериментальну реалізацію найближчим часом

Незважаючи на високий рівень наявних на цей час технологій в галузі магнітолевітаційного транспорту, глобальне впровадження маглева сповільнюється через високу вартість інфраструктури та рухомого складу, необхідності побудови високоточної мережі комунікацій та системи керування нового покоління.

Важливим питанням залишається й енергоспоживання, особливо для надпровідникових систем. В статті [14] автори розглядають спосіб оптимізації

параметрів надпровідних пристроїв у умовах певних температурних діапазонів. Ця стаття показує необхідність врахування температурної залежності у фазі проєктування та конструювання високотемпературних магнітних систем, зокрема в прикладних рішеннях для маглев-транспорту, де мінімізація втрат є ключовою для енергетичної ефективності.

Загалом, сучасні дослідження зосереджені на кількох основних напрямках: зниження вартості технологій та будівництва інфраструктури, розробка стратегій енергоефективного застосування магнітолевітаційних технологій, а також інтеграція маглева у концепцію «зеленого транспорту». [15].

Однією з ключових тенденцій у магнітолевітаційному транспорті на даний момент є вдосконалення систем левітації та стабілізації [16]. Важливим питанням також є підвищення надійності цієї транспортної системи та зниження енергоспоживання.

Велика увага також приділяється розвитку систем з лінійними синхронними двигунами (Linear Synchronous Motor, LSM), які забезпечують підвищене значення коефіцієнту корисної дії (ККД) та дозволяють реалізовувати рух понад 600 км/год. При цьому також постає питання в розробці та інтеграції систем рекуперації енергії під час гальмування, що є важливим показником для зниження загальних експлуатаційних витрат [17].

В напрямку систем керування та безпеки руху актуальною темою є використання алгоритмів штучного інтелекту, адаптивних контролерів [73], що дозволять реалізувати повноцінне автономне та автоматизоване управління робочими процесами маглева. В перспективі це дозволить забезпечити не лише високу точність процесів керування, але й суттєво підвищити рівень безпеки транспортної системи.

Магнітолевітаційний транспорт перебуває на етапі активного технічного розвитку й поступового переходу від експериментальних та демонстраційних ліній до масштабних комерційних проєктів. Найбільш успішні приклади належать Японії, Китаю та Південній Кореї, тоді як Європа та США

зосереджуються на дослідженнях і локальних ініціативах. У перспективі маглев може стати основою нового покоління глобальних високошвидкісних транспортних систем, що поєднують екологічність, безпеку та комфорт.

Сучасні дослідження магнітолевітаційного транспорту дедалі більше фокусуються на вдосконаленні робочих режимів та процесів керування, що забезпечують безпеку системи в умовах високих швидкостей і змін навантаження.

В сучасних дослідженнях окрема увага приділяється розробці адаптивних систем керування з використанням методів машинного навчання. Наприклад, в [18] запропоновано алгоритм самоналаштування параметрів системи керування маглев-поїзда на основі Q-навчання, що дозволяє адаптуватися до змінних динамічних умов руху в реальному часі. Такий підхід забезпечує підвищену стійкість системи до зовнішніх збурень та зменшення енергоспоживання під час руху.

Проблема стійкості системи підвіски та зменшення коливань при русі маглев-поїзда досліджується в [19] та пропонується методика моніторингу параметрів руху та регулювання параметрів підвіски з метою зниження динамічних навантажень. Такий підхід дозволяє підвищити комфортність перевезень та зменшити зношення елементів інфраструктури.

Окреме місце посідають розробки комбінованих систем тяги й левітації, які дозволяють зменшити масу системи та уніфікувати її електромагнітні компоненти. У дослідженні [20] запропоновано підхід до інтегрованого керування на основі асиметричних двосторонніх лінійних індукційних двигунів, що демонструє результати у зменшенні коливань при одночасному забезпеченні тяги та стабілізації.

Нелінійні підходи до адаптивного керування розробляються також з урахуванням ідентифікації змінних параметрів системи. У роботі [21] представлено метод нелінійного адаптивного керування з активною ідентифікацією змін характеристик руху, що забезпечує стабільну роботу навіть у випадках непередбачуваної зміни навантаження.

Ще одним з перспективних напрямків є використання нейронних мереж у задачах керування. У дослідженні [22] описано метод обмеження зміщення маглев-поїзда за допомогою радіальної базисної нейронної мережі. Запропонований алгоритм забезпечує високу точність регулювання при наявності складної багатоточкової динаміки.

Окрім технічних аспектів, активно досліджується економічна ефективність систем маглев. Зокрема, автори [23] розробили цифрову модель для оптимізації економічної доцільності впровадження високошвидкісних маглев-систем, враховуючи витрати на інфраструктуру, енергозабезпечення та обслуговування.

В статті [24] автори довели ефективність високотемпературних надпровідників для левітаційної частини системи, підкреслюючи потенціал таких рішень у довгостроковій експлуатації.

Огляд перспектив розвитку маглев-технологій показує, що в найближчі роки зростатиме зацікавлення надпровідними рішеннями, а також що цей вид транспорту є актуальним та потребує подальших досліджень для вирішення наявних проблем.

1.2 Перспективи розвитку та досліджень магнітолевітаційного транспорту в Україні

Сучасні виклики показують, що потреба у швидкісному, безпечному й екологічному транспорті в Україні зростає на тлі розвитку великих мегаполісів і необхідності скорочення часу перевезень між ними.

Традиційні залізничні системи, навіть із впровадженням швидкісних поїздів типу Hyundai HRCSS2, Skoda, ЕКр1 «Тарпан», обмежені фізичними характеристиками колій і динамікою колісно-рейкової взаємодії. Ці фактори дають місце для досліджень альтернативних рішень.

Оскільки, Україна володіє певним науковим та технічним потенціалом [25], то важливим елементом є розвиток сфери досліджень транспортних систем, зокрема в області електротехніки, енергетики та систем

автоматизованого керування, а однією з актуальних наукових тем останніх років є розробка концепцій високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту, що може стати важливим елементом інтеграції України у сучасні транспортні коридори Європи, а також створити можливості співпраці з Європейськими науковими закладами, що працюють в галузі транспортних технологій.

Ключовою науковою установою, яка може забезпечити дослідження і розробку таких технологій, є Інститут транспортних систем і технологій НАН України (ІТСТ). В цьому інституті ведуться фундаментальні дослідження в галузі систем автоматизації, керування та енергетичного забезпечення транспортних засобів. У період до початку 1990-х років ключовим результатом роботи науковців було створення макетних зразків транспортних засобів на електродинамічній підвісці [26]. Ці макети дали можливість підтвердити принципову працездатність систем левітації, оцінити умови стійкості руху та перевірити адекватність математичних моделей.

У межах інфраструктурних досліджень науковцями інституту було створено дослідну естакаду з лінійним синхронним двигуном. Вона слугувала важливим етапом у перевірці сумісності рушійної сили та системи підвіски, а також стала полігоном для випробувань алгоритмів керування.

Значним досягненням стало виготовлення й випробування восьми типів кріомодулів із надпровідними магнітами. Серед них особливе місце займав універсальний кріомодуль КТ-10М, який застосовувався для широкого спектра експериментів і досліджень. Методами математичного моделювання інститутом було розроблено методики розрахунку силових взаємодій в електродинамічних системах. На їхній основі створено цілісні математичні моделі руху транспортного засобу, що враховували як електромагнітні, так і динамічні процеси.

Науковці інституту заклали основи для подальших робіт у сфері енергозабезпечення транспортних систем. Зокрема, розглядалися можливості

застосування автономних джерел живлення та їх інтеграція з системами керування [27].

Результати роботи ІТСТ стали фундаментом для створення експериментальних транспортних комплексів на базі магнітної левітації та дозволяють проводити моделювання, експериментальні випробування та розробку нових концепцій рухомого складу і шляхових структур маглева.

У сфері енергетики в Україні проводяться дослідження із застосування розподілених енергосистем, що особливо актуально для маглева. Такий транспорт вимагає потужного і безперебійного енергопостачання, і саме використання сучасних систем Smart Grid може дати змогу інтегрувати маглев у національну енергетичну мережу [28,74].

Важливою тенденцією є можливість поєднання маглеву з концепціями розумних міст (Smart City). Українські міста активно впроваджують цифрові рішення у транспортному менеджменті (єДніпро, Київ Цифровий, Леокарт), і маглев може органічно увійти в цю екосистему, забезпечуючи безшовну інтеграцію з іншими видами транспорту через єдині диспетчерські центри та цифрові сервіси.

Розвиток магнітолевітаційного транспорту в Україні може мати значний потенціал у великих містах, де не розвинена інфраструктура метрополітену, у вигляді створення високошвидкісних підземних комунікацій.

Важливим завданням є створення національної програми розвитку магнітолевітаційного транспорту, яка об'єднає державні та приватні ініціативи. Такі програми вже функціонують у Китаї, Японії, Південній Кореї і Україна може використати їхній досвід для адаптації у власних умовах. Також формування наукових шкіл та залучення студентів, аспірантів та молодих вчених до досліджень у сфері маглева сприятиме появі нових інженерних рішень.

Серед наукових завдань, які на даний час можливо реалізувати, можна виділити створення натурних стендів для випробування магнітолевітаційних

систем. Це дозволяє досліджувати нові покоління систем керування, динаміку руху екіпажу, режими роботи та перехідні процеси у системах живлення.

У подальшій перспективі кроками з розвитку магнітолевітаційного транспорту може стати будівництво експериментальних полігонів та демонстраційних ділянок маглева. Це дозволить перевірити ефективність технологій у реальних умовах і визначити економічну доцільність подальшого масштабування.

Інтеграція України в європейську транспортну мережу TEN-T створює додаткові можливості для залучення інвестицій у проекти маглева [29]. Високошвидкісний транспорт може стати одним із пріоритетних напрямів співпраці у сфері екологічних перевезень. Не менш важливим є залучення міжнародних партнерств у дослідженнях. Спільні проекти з університетами Японії чи Південної Кореї дозволять отримати доступ до сучасних технологій та підвищити конкурентоспроможність українських розробок.

Довгостроковим завданням є впровадження в Україні систем надпровідних матеріалів (HTS) для створення більш ефективних систем левітації. Використання матеріалів типу «YBCO» може дозволити значно знизити витрати енергії [30].

Загалом, розвиток магнітолевітаційного транспорту в Україні має комплексний характер і вимагає поєднання наукових досліджень, інноваційних розробок та державної підтримки.

1.3 Системи підвісу магнітолевітаційного транспорту

Магнітна левітація є основою функціонування магнітолевітаційного транспорту. Її сутність полягає у створенні сили відштовхування або притягування між електромагнітними полями, що компенсує силу тяжіння і забезпечує підйом та утримання транспортного засобу над шляховою структурою. Завдяки цьому рух відбувається безконтактно, що виключає тертя між рухомим складом і колією.

Основним фізичним явищем, на якому ґрунтується левітація, є закон Ампера, який описує взаємодію між провідниками зі струмом. Коли в провіднику виникає електричний струм, навколо нього утворюється магнітне поле. Взаємодія струмів у провідниках або взаємодія поля з магнітним матеріалом може створювати сили притягання або відштовхування. Саме ці сили лежать в основі стабілізації положення рухомого складу (екіпажу) над шляховою структурою.

Залежно від принципу дії розрізняють основні типи систем магнітної левітації: електромагнітна підвіска (EMS) та електродинамічна підвіска (EDS). Кожна з них використовує різні фізичні принципи для забезпечення сталого положення левітації та має свої переваги й обмеження [31].

У системах електромагнітної підвіски (EMS) транспортний засіб обладнаний електромагнітами, розташованими знизу та боків (рис. 1.1). Вони притягуються до феромагнітної рейки, утримуючи вагон на певній відстані. Регулювання струму в електромагнітах дозволяє підтримувати стабільний повітряний зазор (зазвичай 8–10 мм). Основним недоліком такого підходу те, що у випадку зміни зазору магнітні сили змінюються непропорційно, що вимагає високоточних систем автоматичного керування.

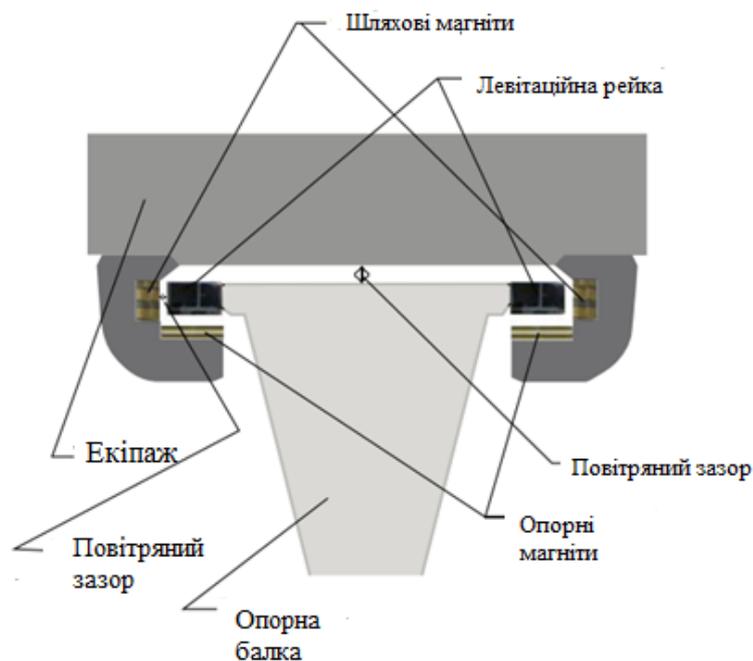


Рисунок 1.1 – Будова електромагнітної підвіски (EMS)

Електродинамічна підвіска (EDS) базується на іншому принципі – індукції вихрових струмів. Якщо рухомий магнітний елемент переміщується над провідником (зазвичай алюмінієвою або мідною котушкою), у ньому наводяться вихрові струми, які створюють зустрічне магнітне поле. Взаємодія цих полів забезпечує силу відштовхування, що піднімає транспортний засіб над шляховою структурою (рис. 1.2).

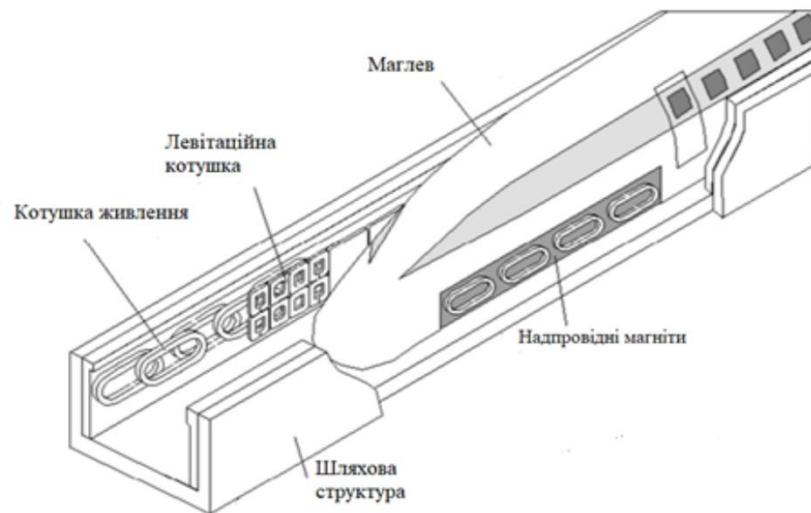


Рисунок 1.2 – Будова електродинамічної підвіски (EDS)

Перевагою EDS є стійкість системи: зазори можуть бути більшими (до 100 мм), що спрощує конструкцію. Недоліком є необхідність високої початкової швидкості для виникнення достатніх індукційних сил. Важливим елементом електродинамічної підвіски є системи надпровідникової левітації, які використовують матеріали з нульовим електричним опором при низьких температурах. Надпровідникові магніти створюють потужне стабільне поле, яке взаємодіє з котушками або магнітними елементами колії. Ефект «захоплення» магнітних силових ліній надпровідником забезпечує надзвичайну стійкість транспортного засобу навіть без активного керування. Основним обмеженням тут є потреба у складних криогенних системах для охолодження магнітів.

Необхідним фізичним аспектом роботи магнітної левітації є баланс сил магнітної взаємодії екіпажу та шляхових котушок. Для утримання транспортного засобу над шляховою структурою необхідно, щоб вертикальна складова магнітної сили була достатньою для підйому екіпажу. Одночасно система повинна забезпечувати горизонтальну стабільність, компенсуючи будь-які відхилення в бокових напрямках. Це досягається за рахунок симетричного розташування магнітів та використання систем датчиків, які в режимі реального часу вимірюють значення струму у котушках. Принцип взаємодії магнітних сил наведено на рис. 1.3.

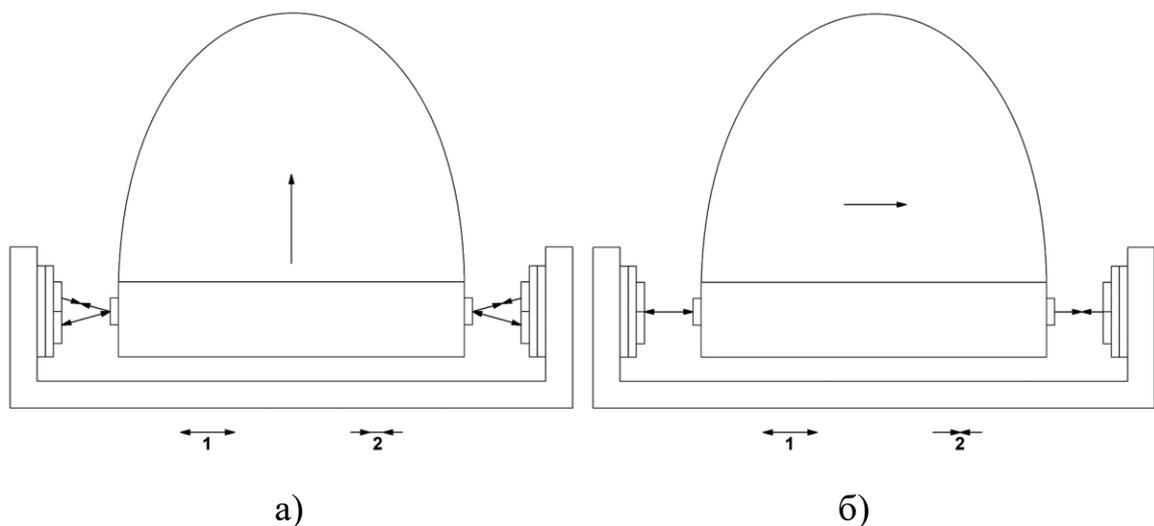


Рисунок 1.3 – Взаємодія магнітних сил електродинамічної підвіски

а – стан левітації, б – стабілізація при повороті,

1 – відштовхування, 2 – притягування

Використання феромагнітних матеріалів дозволяє створювати інтенсивні магнітні поля за відносно низьких енерговитрат. Однак, у випадку систем EDS ключову роль відіграє електропровідність матеріалів, оскільки від цього залежить інтенсивність вихрових струмів та сила відштовхування.

У динамічних режимах роботи маглеву проявляються особливості, пов'язані з коливаннями транспортного засобу. Система керування має “придушувати” вертикальні та горизонтальні коливання, щоб запобігти втраті

стабільності. Це вимагає поєднання точних моделей електромагнітної взаємодії та високошвидкісних алгоритмів регулювання.

Важливим є також питання енергоефективності. У системах EMS електроенергія постійно витрачається на підтримку магнітного поля. У системах EDS і надпровідникових магнітів витрати нижчі, проте виникає потреба у додатковому обладнанні для охолодження або розгону. Таким чином, вибір реалізації способу підвіски магнітолевітаційного транспорту визначає баланс між енергоспоживанням, стабільністю та складністю інфраструктури.

Слід окремо зазначити й про вплив магнітних полів на навколишнє середовище. У більшості сучасних систем величина магнітної індукції на відстані від колії не перевищує допустимих для людини значень. Проте, вимагається ретельне проектування екранування і трасування лінії, щоб уникнути небажаного впливу на можливе знаходження поряд з шляховою структурою чутливого електронного обладнання.

У сучасних дослідженнях триває пошук нових матеріалів і технологій, здатних удосконалити фізичні принципи левітації [32]. Перспективним напрямом є застосування високотемпературних надпровідників, які працюють при охолодженні рідким азотом (77 K), що значно знижує вартість і складність експлуатації порівняно з класичними кріогенними системами.

Окремим напрямком розробок систем підвісу магнітолевітаційного транспорту є гібридні системи (H-EMS), що поєднують властивості як EMS так і EDS підвісок [33]. Принцип роботи такої підвіски полягає в використанні двох складових: на низьких швидкостях використовують електромагніти, що забезпечують початкове значення левітації, а після досягнення необхідного рівня вмикається друга складова – постійні магніти (вихрові струми), що дозволяє підтримувати та підвищувати швидкість, а також брати основне навантаження системи.

Таким чином, фізичні принципи магнітної левітації поєднують у собі класичні закони електромагнетизму та новітні досягнення матеріалознавства. Вибір конкретної технології (EMS, EDS, H-EMS) визначається вимогами до

системи транспорту. Будівництво міських ліній потребує простих та надійних систем, тоді як високошвидкісні магістралі орієнтовані на використання надпровідників.

Завдяки цим фізичним основам магнітолевітаційний транспорт демонструє унікальне поєднання високих швидкостей, безпеки та екологічності. В такому разі, для подальшого дослідження, необхідно визначити основні моменти, які будуть визначати методи та способи режимів роботи магнітолевітаційного транспорту.

1.4 Методи та способи досліджень режимів роботи магнітолевітаційного транспорту

Враховуючи багатокомпонентну систему функціонування магнітолевітаційного транспорту, необхідно розмежувати поняття "робочі режими" та "процеси керування". Перші характеризують фізичні стани системи під час її динамічних змін, а другі – методи та засоби для досягнення необхідного функціонування цих станів. Робочими режимами можна визначити: левітацію, тяговий режим (рух, підтримання швидкості, гальмування), режим стабілізації, перехідні режими, енергетичні режими.

Поняття «процеси керування магнітолевітаційним транспортом» охоплює весь спектр заданих алгоритмів, технічних рішень і функціональних підсистем, спрямованих на забезпечення безпечного та ефективного функціонування системи маглев у різних режимах, наприклад, від запуску до зупинки. Процеси керування повинні виконувати завдання з регулювання та координації роботи левітаційних, тягових, стабілізаційних і навігаційних систем у реальному часі.

До характеристик процесів керування можна віднести динамічність (системи працюють в реальному часі), адаптивність (здатність змінювати параметри у відповідь на зовнішні умови), синхронізація окремих підсистем (взаємодія між тяговими, стабілізаційними та комунікаційними модулями),

цифровізація (використання цифрових сигнальних процесорів, програмованих логічних комп'ютерів, систем зворотного зв'язку).

Таке розділення дозволяє не лише структурувати результати експериментальних досліджень, але й провести порівняльний аналіз рішень, виконаних у сучасних реалізаціях та прототипах маглев-систем, зокрема в рамках технології електродинамічної системи підвісу.

Дослідження режимів роботи маглев транспорту є комплексним завданням, що охоплює декілька різних напрямків, а саме інженерні, фізичні, математичні, експериментальні. Основною метою досліджень режимів роботи є визначення здатності системи левітації виконувати задані режими (підйом, тяга), а також стійкість роботи системи та повторюваність заданих циклів роботи. Окремим питанням розробки систем магнітолевітаційного транспорту є визначення динамічних характеристик руху робочого ходу.

Методи досліджень маглев транспорту можливо поділити на основні групи:

- математичні;
- комп'ютерне моделювання та симуляції;
- експеримент;
- натурні випробування;
- гібридні підходи;

Оскільки кожен метод дослідження являє собою системний підхід, що являє собою науково обґрунтовану сукупність підходів до вивчення явищ, що стосуються магнітолевітаційного транспорту, то конкретну реалізацію методів можна описати як спосіб дослідження.

Способи дослідження маглев транспорту:

- аналітичне моделювання, моделі системи керування;
- моделювання динаміку руху, метод скінченних елементів, аеродинамічні дослідження;
- імітаційно-експериментальні;
- лабораторні стенди, натурні моделі, фізичні вимірювання;

- натурні випробування на тестових треках;

Методи досліджень режимів роботи дозволяють оцінювати ефективність системи, визначати конструктивні рішення елементів тяги та системи керування при різних експлуатаційних умовах, розробляти адаптивні принципи керування.

1.5 Енергетичні процеси та методи контролю динамічних показників магнітолевітаційного транспорту

Оскільки магнітолевітаційний транспорт в основі своєї роботи має принцип взаємодії електромагнітних полів між рухомим складом (екіпажом) та шляховою структурою, основні енергетичні процеси, що виникають в такій системі – це процеси пов’язані безпосередньо з динамічною складовою цього виду транспорту.

Підйомна сила (левітація) створюється через взаємодію шляхових котушок, що розташовуються вздовж шляхової структури, з котушками (магнітами), розташованими на рухомому складі (екіпажі). Процес левітації вимагає постійного контролю величини струму в шляхових котушках для досягнення сталого значення рівня левітації на одному рівні.

Створення рушійної сили – перетворення електричної енергії в поступальний рух екіпажу в межах секції шляхової структури.

Гальмування – зменшення швидкості рухомого складу з поверненням електроенергії в мережу (рекуперативне) або з використанням індукційних сил. Аеродинамічні процеси з’являються на високих швидкостях понад 300 км/год та стають значною причиною підвищеного рівня енерговитрат.

Досягнення високої ефективності роботи систем маглев транспорту створюється завдяки високій точності системи керування та оперативному регулюванню динамічних показників.

Одним з методів збільшення ефективності процесу керування динамічних показників є покращення визначення точності просторової орієнтації маглева відносно шляхової структури. Завдяки використанню принципів фазової

далекометрії можливо визначати поточне положення маглева. Цей підхід полягає у застосуванні методу вимірювання фазових співвідношень сигналів від двох синхронізованих генераторів високої стабільності, «опорного», розташованого в початковому або кінцевому пункті інтервалу руху, та «інформаційного», розташованого на самому транспортному засобі (магнітоплані, екіпажі). Сигнали від обох генераторів по роздільних лініях (радіовипромінюючі кабелі) зв'язку надходять в диспетчерський пункт управління рухом, де вимірюється різниця фаз цих сигналів, яка є функцією відстані між пунктом управління рухом і транспортним засобом, що рухається, з «інформаційним» генератором на борту, тобто однозначно визначає координати положення екіпажу на відповідному інтервалі руху. Однак, для керування рухом транспортного засобу диспетчерський пункт повинен мати інформацію не лише про місцезнаходження його щодо кінцевих пунктів пересування, а й про його просторове положення щодо шляхової структури, що потрібно для контролю просторового коливання, навантаження, стійкості левітаційного руху. Визначення параметрів орієнтації рухомого засобу можливе методом фазової далекометрії, якщо на рухомому засобі встановити два синхронізовані з першим генератором «інформаційних» генератора (маркера), а з кожної сторони вздовж колійної структури розташувати по два просторово рознесених радіовипромінюючих кабелі. При такій конструкції по вимірних фазових співвідношеннях «опорного» та «інформаційного» сигналів в чотирьох радіовипромінюючих кабелях можливе однозначне визначення положення кожного «інформаційного» генератора в системі координат чотирьох кабелів. Сигнал від «опорного» генератора надходить п'ятим кабелем. З огляду на те, що генератори жорстко пов'язані з транспортним засобом, їх координати визначають як місцезнаходження, так і просторову орієнтацію транспортного засобу. Цей метод навігації призначений для використання в високошвидкісних транспортних наземних системах на магнітному підвісі, організації автоматизованого управління рухом колісним транспортом на

локальних майданчиках виробничого призначення, організації швидкісного малорозмірного муніципального транспорту індивідуального користування [34].

Для відстеження динамічних характеристик та побудови потрібних ліній зв'язку можуть застосовуватись системи на базі мікроконтролерів або ПД-регуляторів зі зворотними зв'язками по струму або напрузі. В такій системі під час руху в режимі реального часу можливе моделювання стану руху маглева, аналіз стійкості та працездатності системи, відстеження його координат та саморегулювання динамічних характеристик.

Також одним з методів може бути застосування нечіткої логіки (fuzzy logic). Контролери побудовані на цій системі можуть контролювати та стабілізувати системи руху. Також є переваги в продуктивності таких систем під час перехідних процесів, які обумовлені низьким значенням перерегулювання та нульовою похибкою сталого стану.

Щоб досягти кращої ефективності системи потрібно враховувати компроміси між точністю, часом спрацювання систем керування, явищем перерегулювання, похибкам відхиленням у роботі системи в різних режимах роботи маглева.

Одним з важливих елементів у напрямку покращення показників динамічних характеристик є дослідження систем керування та координації руху маглева.

1.6 Системи керування рухом магнітолевітаційного транспорту

На відміну від традиційного залізничного транспорту, де контакт між колесом і рейкою визначає траєкторію, у маглеві рух здійснюється безконтактно, тому контроль над процесом руху транспортного засобу цілком покладається на електронно-обчислювальні комплекси.

Основними завданнями систем керування є підтримання стійкої левітації, регулювання тяги та гальмування, забезпечення бокової та вертикальної стабільності, а також синхронізація руху між різними ділянками в межах

шляхової структури. Важливою функцією виступають елементи координації і взаємодії керуючих систем та обміну даними в режимі реального часу, а також обробка масивів даних про рух та положення екіпажу.

У системах з електромагнітною підвіскою (EMS) контроль полягає у постійному регулюванні струму в електромагнітних котушках, щоб утримувати заданий зазор між екіпажем та шляховою структурою. Це завдання ускладнюється тим, що такий стан є нестійким. Тому застосовуються високошвидкісні контролери, здатні коригувати параметри в реальному часі.

Автори статті [35] розглядають проблему підвищення стабільності та динамічної ефективності підвісної системи магнітолевітаційного транспорту з електромагнітною підвіскою (EMS). В цьому дослідженні пропонується інноваційний підхід, заснований на застосуванні оператора Купмана та методики Extended Dynamic Mode Decomposition (EDMD), що дає змогу побудувати лінійну модель у розширеному просторі станів. Така модель відображає складну нелінійну динаміку системи без потреби в точному знанні її фізичних параметрів. Крім того, стаття пропонує механізм онлайн-оновлення моделі («rolling-update»), який дає змогу адаптувати систему керування в режимі реального часу при зміні умов експлуатації.

У системах електродинамічної підвіски (EDS) контроль частково спрощується завдяки стійкості левітації. Однак у таких випадках зростає важливість точності швидкодії систем керування тягою та гальмуванням, які повинні координувати роботу шляхових котушок. Для цього використовуються цифрові регулятори, що узгоджують частоту та фазу струму у котушках колії з положенням екіпажу.

Для оперативної реакції системи керування на зміну динамічних параметрів руху необхідно вирішувати завдання з визначення поточної позиції екіпажу [36]. Це необхідно для коректної роботи системи живлення, ввімкнення потрібної секції шляхової структури, безпечної зупинки та загальної координації руху.

В подальшому при розвитку та розповсюдженні магнітолевітаційного транспорту для повномасштабних ділянок, які експлуатуються, необхідно враховувати завдання з координації руху кількох екіпажів на одній лінії. Оскільки маглев може рухатися на швидкостях понад 500 км/год, необхідна високоточна система диспетчеризації, яка враховує не тільки відстань між екіпажами, але й їх динамічні параметри. У сучасних системах використовуються принципи автоматизованого керування рухом (Automatic Train Control, АТС) у поєднанні з безперервним зв'язком між поїздом і центральним сервером [37].

Необхідним елементом в питаннях управління рухом та позиціонування магнітолевітаційного транспорту є системи безпеки, які інтегровані в архітектуру управління маглевом. У випадку збою живлення або відмови окремого модуля вони мають забезпечити аварійне гальмування, стабілізацію екіпажа на аеродинамічних опорах або його плавне зниження. Для цього можуть бути застосовані дубльовані канали керування та спеціальні аварійні алгоритми [38].

В статті [75] представлено математичне моделювання безконтактного високошвидкісного двигуна з постійними магнітами. Дослідження зосереджене на визначенні втрат у магнітному осерді та електромагнітних характеристик при живленні двигуна як від змінної напруги, так і від інвертора із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Важливою особливістю є інтеграція систем керування маглевом із розподіленими енергетичними мережами. Шляхова структура магнітолевітаційного транспорту фактично є активним енергоспоживачем, тому управління включає балансування навантаження, запобігання резонансним явищам та оптимізацію енергоспоживання. Це завдання вирішується методами енергетичної координації на основі Smart Grid-технологій [39,74].

Застосування адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування є сучасним трендом [40]. Використання нейронних мереж, нечіткої логіки,

алгоритмів машинного навчання, дозволяють покращити роботу системи в умовах невизначеності та змінних зовнішніх факторів. Такі підходи дають змогу підвищити енергоефективність і зменшити навантаження на апаратні засоби екіпажу.

У статті [41] розглядається інтегрований підхід до управління рухом середньошвидкісного магнітолевітаційного поїзда, в якому поєднано управління тяговою силою лінійного двигуна та автоматизоване керування поїздом з метою максимального зниження енергоспоживання. Автори формують оптимізаційну модель, яка враховує характеристики лінійного двигуна як функцію положення, а також задають задачу динамічного програмування (DP) для визначення оптимального профілю швидкості. Запропоновано стратегію «цільового діапазону швидкості» (Target Train Speed Band, TTSB) для прискорення розв'язку DP, що дозволяє досягати компромісу між точністю рішення й обчислювальною ефективністю.

Також не менш важливим напрямом в системах керування є людино-машинні інтерфейси (Human machine interface, HMI) для операторів і диспетчерів. Вони повинні забезпечувати інтуїтивно зрозуміле відображення параметрів руху, попереджати про можливі відхилення та давати змогу швидко втручатися у роботу системи у разі нестандартних ситуацій.

У перспективі розвитку систем керування маглевом важливим є впровадження технологій Інтернету речей (IoT) та цифрових двійників (Digital Twin). Це дозволить у реальному часі моделювати стан транспортної системи, прогнозувати несправності та запобігати аваріям ще до їх виникнення [42].

Оскільки тягові системи маглеву найчастіше реалізовані на основі лінійних синхронних двигунів, то вони потребують складної системи керування фазовими зсувами, щоб забезпечити синхронізацію руху магнітного поля шляхової структури з транспортним модулем (екіпаж). Порушення цієї синхронізації може призвести до втрати тяги або виникнення аварійних режимів. В такому разі необхідним завданням є розгляд принципів формування тяги в магнітолевітаційному транспорті.

1.7 Принципи формування тяги в магнітолевітаційному транспорті

У магнітолевітаційних транспортних системах тяга формується за рахунок електромагнітної взаємодії між рухомим складом і шляховою структурою. Основою цієї взаємодії є лінійні електричні двигуни – LSM (Linear Synchronous Motor) та LIM (Linear Induction Motor), які по суті є "розгорнутими" звичайними електричними двигунами.

LIM використовує явище електромагнітної індукції. Змінне магнітне поле первинної обмотки (як правило, в екіпажу) наводить вихрові струми в шляховій обмотці. Взаємодія вихрових струмів із магнітним полем створює силу тяги. LIM є простішим за конструкцією, але має нижчий ККД та більші втрати, особливо на високих швидкостях [43].

В свою чергу, LSM працює за принципом синхронного двигуна. Обмотка статора розміщується на колії, а постійні магніти встановлені в екіпажі. Магнітне поле в шляхових котушках рухається синхронно з поїздом, створюючи тягу [44]. Така система забезпечує вищу ефективність і точність керування, що використовується у високошвидкісних маглевах, зокрема SCMaglev (Японія).

У більшості магнітолевітаційних систем застосовується технологія long-stator. Це являє собою статор, що тягнеться вздовж усієї шляхової структури, а живлення подається по секціях довжиною десятки або сотні метрів. Кожна секція активується лише тоді, коли в ній перебуває поїзд. Такий підхід забезпечує плавну тягу та високу потужність, але має суттєвий недолік – великі секції живлення є вразливими до відмови окремих котушок або силових елементів, і несправності суттєво впливають на роботу всієї лінії або повністю унеможливають її [45].

Альтернативою великим секціям є модульна шляхова структура, де статор або котушки розділені на короткі уніфіковані модулі, які можуть вмикатися незалежно один від одного. Такий підхід передбачає, що кожен модуль містить обмежену кількість шляхових котушок. В такому випадку система живлення перемикається не між великими зонами, а між окремими модулями, а у разі

виходу з ладу одного модуля система може ізолювати його та продовжити роботу, не зупиняючи роботу всієї секції. Це підвищує ремонтпридатність, гнучкість і адаптивність керування та з'являється можливість точного енергоспоживання, живлення подається лише на ту частину колії, де знаходиться екіпаж.

У статті [46] автори обґрунтовують концепцію інтегрованого тягово-левітаційного модуля для магнітолевітаційного транспорту, який поєднує функції тяги і підвіски у єдиному вузлі та пропонують перехід від традиційної довгої статорної структури до дискретних модулів. Автори показують, що такий підхід дозволить підвищити енергоефективність завдяки локальному розміщенню фотоелектричних джерел живлення та знизити капітальні й експлуатаційні витрати шляхом уніфікації модулів. Створення другого покоління модулів – комбінованих, модульно-орієнтованих та інтегрованих у систему керування рухом та підвіскою є реальним і перспективним напрямком розвитку магнітолевітаційного транспорту нового покоління.

1.8 Застосування натурального моделювання при дослідженні магнітно-левітаційного транспорту

Натурне моделювання дозволяє виконати експериментальну валідацію теоретичних гіпотез та розрахунків, здійснити перевірку очікуваних закономірностей роботи системи на практиці і виявити можливі похибки або неточності.

Стаття [47] теоретично обґрунтовує метод аналізу електромагнітного поля та моделей електричних кіл машин на основі натурального моделювання. Дослідження подібності динамічних характеристик для натурних моделей [48] показало, що шляхом використання визначених співвідношень можна виконати аналіз роботи динамічних параметрів системи.

Принцип натурального моделювання також застосовується для створення моделі прототипу високошвидкісної роторної системи [48].

Для наземного високошвидкісного магнітно-левітаційного транспорту в [49] була запропонована концепція, яка також побудована на дослідженні натурної моделі. За результатами вимірювання електричні характеристики експериментального стенда відповідали очікуваним результатам. Умовно дослідження моделей транспортних систем можна поділити на декілька етапів, комп'ютерне [50] та натурне моделювання.

При розробці та дослідженні характеристик складних електротехнічних систем, зокрема систем магнітолевітаційного транспорту, важливо забезпечити комплексну перевірку їх працездатності на основі натурального моделювання [51]. Такий підхід дозволяє досліджувати реальні фізичні процеси в умовах, максимально наближених до експлуатаційних, що є неможливим у межах лише аналітичних чи комп'ютерних методів.

Натурне моделювання в магнітолевітаційному транспорті дає можливість оцінити взаємодію електромагнітних полів, динаміку левітації, стабільність руху та роботу системи керування в реальному часі. На відміну від теоретичних моделей, воно враховує вплив зовнішніх факторів, таких як зміни напруги, температурні зміни, коливання магнітних полів, похибки датчиків контролерів. Це дозволяє сформувати повну картину поведінки системи керування в режимах наближених до робочих.

При створенні натурної експериментальної моделі магнітолевітаційного транспорту особливу увагу варто приділяти саме системі керування, яка повинна забезпечувати стійку левітацію, точність позиціонування та безпечну зміну швидкісних режимів [52]. У процесі досліджень проводиться налаштування зворотних контурів зв'язку, що дозволяють виявляти та коригувати відхилення або несправності елементів системи. Це забезпечує адаптивність та надійність роботи експериментальної установки.

Натурне моделювання також створює можливість для перевірки ефективності алгоритмів керування, динамічних характеристик підвіски та взаємодії екіпажу із шляховою структурою. Реєстрація електричних, параметрів під час випробувань дозволяє отримати реальні дані, необхідні для

подальшого вдосконалення конструкції натурального стану та його системи керування.

Таким чином, натурне моделювання є невід'ємним етапом дослідження магнітолевітаційних систем, оскільки воно поєднує експериментальну верифікацію, технологічну адаптованість та можливість аналізу динамічних процесів [71]. Його результати формують основу для подальшого вдосконалення конструкцій натурних станів та створення більш надійних рішень для високошвидкісних транспортних технологій.

1.9 Дослідження прототипів натурних моделей шляхових котушок

У статті [53] показано вплив параметрів котушок на загальну енергоефективність магнітолевітаційних систем. Основна увага в цій роботі приділена системам з надпровідними технологіями та можливості економії енергії, а не детальному аналізу параметрів звичайних шляхових котушок. Модельна частина цієї статті зосереджена на теоретичному обґрунтуванні енергетичних переваг, тоді як в цьому дослідженні ключове значення має емпіричне вимірювання індуктивності в лабораторних умовах.

Стаття [54] аналізує методики та рівняння щодо розрахунку індуктивності, які можуть бути застосовані при експериментальному визначенні параметрів шляхових котушок. Методики, що пов'язані зі створенням дослідних натурних моделей дозволяють підвищити точність вимірювань та забезпечити коректність отриманих результатів. Недоліком цієї роботи є те, що вона не враховує сучасних особливостей високошвидкісних транспортних систем, зокрема специфіку частотного та температурного впливу в маглев-системах. Фокус робиться на загальних методах обчислення індуктивності, але без прив'язки до взаємодії котушок з рухомим об'єктом або складної комутаційної динаміки.

В системах, побудованих за принципом електродинамічної підвіски (SCMaglev) вздовж шляхової структури, може бути встановлено тисячі котушок, які повинні синхронно вмикатись та вимикатись в залежності від

місця проходження екіпажу (рухомого складу). Цим визначається вимога щодо високої точності та швидкодії системи керування. Результати дослідження [55] показують залежності конструкції шляхової структури від параметрів котушок у магнітолевітаційних системах. Врахування явища впливу реактивних елементів та ефектів поверхневого струму розкриває напрямки та шляхи, які можуть покращити точність вимірювань індуктивності та інших параметрів котушок [56]. Сукупність недоліків цих досліджень полягає у відсутності пояснення впливу частоти живлення на індуктивність та статистичного аналізу вимірних параметрів.

Визначення параметрів та характеристик шляхових котушок, які необхідні для роботи магнітолевітаційного транспорту показані в роботі [57]. Стаття розглядає методи підвищення енергетичної ефективності, що важливо для майбутніх модернізацій систем маглева, зокрема з погляду зменшення втрат у шляхових елементах, таких як котушки. В цій статті виконаний аналіз ефективності у широкому сенсі, однак не розглянуто питання синхронної комутації котушок та пов'язаних із цим часових затримок.

Результати досліджень, що показані в роботах [58, 59] частково розкривають питання властивостей моделей котушок при різних частотах визначеного сигналу.

З проведеного аналізу цієї теми можна зробити висновок, що дослідження, які спрямовані на експериментальне визначення параметрів шляхових котушок, є своєчасними та необхідними. Однією з основних проблем, що впливає на високошвидкісний рух транспортного засобу є забезпечення ефективної взаємодії між магнітною підвіскою й тяговою системою.

При швидкісному русі критичним параметром стає точне керування електромагнітними полями для підтримання необхідного значення левітації, тяги та бічної стабілізації.

1.10 Висновки до першого розділу

1. Було здійснено аналіз сучасного стану розвитку магнітолевітаційного транспорту. Показано, що Японія, Китай і Німеччина досягли значних успіхів у створенні маглев-систем, які вже функціонують на пасажирських маршрутах.

2. Визначено основні проблеми розвитку магнітолевітаційного транспорту, а саме висока вартість інфраструктури, складність енергопостачання та потреба в надійних системах керування.

3. Розглянуто основні типи систем підвіски – електромагнітну (EMS) та електродинамічну (EDS), їхні переваги й обмеження.

4. Було розглянуто принцип формування тяги в системі керування магнітолевітаційним транспортом та визначено, що модульна шляхова структура з індивідуальним керуванням шляховими котушками є еволюційним розвитком технології long-stator, що створює основу для систем керування нового покоління.

5. Дослідження, які спрямовані на експериментальне визначення параметрів шляхових котушок, є своєчасними та необхідними. Однією з основних проблем, що впливає на високошвидкісний рух транспортного засобу є забезпечення ефективної взаємодії між магнітною підвіскою й тяговою системою.

РОЗДІЛ 2

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ НАТУРНОЮ МОДЕЛЛЮ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Шляхова структура магнітолевітаційного транспорту складається з послідовно з'єднаних секцій шляхових котушок, які забезпечують створення підйомної та тягової сили.

У сучасних системах маглева кожна секція отримує живлення від енергосистеми силової установки. Перехідні процеси виникають під час подачі або зняття живлення в кожній окремій секції, при перемиканні секції на наступну або при зміні режиму роботи (розгін, гальмування, стабілізація). Під час перехідних процесів система працює в нестационарному режимі роботи, що супроводжується різкою зміною амплітуди струму та напруги, коливанням магнітного поля, зміни сили тяги та підйому, а також можливими порушеннями стійкості режиму левітації.

Перехідні явища та процеси взаємопов'язані з динамікою екіпажу, що дозволяє впливати на плавність руху, стійкість левітації, дотримання принципів керування та позиціонування натурального складу.

Математичне описання перехідних процесів секцій натурної моделі шляхової структури базується на класичних рівняннях електричних кіл з зосередженими параметрами [69]. Ці рівняння можливо застосовувати для аналізу секцій шляхових котушок у магнітолевітаційних системах руху транспорту.

$$L \frac{di(t)}{dt} + R_i(i) + E(t) = u(t) \quad (1.1)$$

де L – індуктивність секції,

R – активний опір провідника,

$i(t)$ – струм секції,

$u(t)$ – напруга живлення,

E – ЕРС взаємоіндукції

Таким чином, перехідні процеси в секціях шляхової структури магнітолевітаційного транспорту – це комплекс динамічних електромагнітних явищ, які визначають працездатність роботи даної транспортної системи. Дослідження перехідних процесів є важливою складовою при розробці натурних моделей. Такі дослідження базуються на використанні імітаційного моделювання.

Основою цього розділу дисертації є імітаційне моделювання процесів шляхової енергоустановки натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

2.1 Передумови для імітаційного моделювання перехідних процесів шляхової структури натурної магнітолевітаційного транспорту

Основна ідея шляхової енергоустановки магнітолевітаційного транспорту запропонована в [1]. На основі цієї структури можна досягти поліпшення 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» [71].

На подальшому етапі енергія з первинного накопичувача потрапляє до тягового конденсатора, який передає енергію до дворежимного шляхового модуля [1, 72]. Ці складові можна визначити як «блок розподілення енергії».

У результаті цього необхідно визначити структуру та енергетичні процеси, що відбуваються в блоці розподілення енергії, а також виконати імітаційне моделювання перехідних процесів тягового модуля.

Під імітаційним моделюванням слід розуміти створення в спеціалізованих програмних середовищах комп'ютерних моделей, що в своєму вигляді та функціональним характеристикам будуть відтворювати електричні

та енергетичні процеси роботи натурної моделі шляхової структури магнітолевітаційного транспорту.

Метою такого моделювання є дослідження динаміки роботи електричних схем без фізичної побудови натурної моделі для перевірки очікуваних результатів необхідних показників підсистем при змінних вхідних параметрах.

Класифікація об'єктів моделювання та їх показників наведена в табл. 2. 1.

Таблиця 2.1

Об'єкти моделювання та їх показники

Об'єкт моделювання	Показник моделювання
Механічна підсистема	Положення та швидкість рухомого складу
	Коливання екіпажу
	Левітація
Електромагнітна підсистема	Перехідні процеси під час подачі та зняття живлення
	Взаємоіндукція між секціями
	Процес створення тягового зусилля в котушках
Система керування	Координація руху екіпажу по секціях шляхової структури
	Алгоритми стабілізації левітації
	Вплив затримок та похибок датчиків
Енергосистема	Рекуперація енергії
	Розподіл потужності між секціями
	Режими живлення системи

Таким чином, було визначено основні складові об'єкти імітаційного моделювання магнітолевітаційного транспорту та їх показники. З табл. 2.1. видно, що питання досліджень складових підсистем магнітолевітаційного

транспорту є досить широким та охоплює різні складові цієї транспортної системи.

Завданням для імітаційного моделювання натурної моделі магнітолевітаційного транспорту є визначення характеру перехідних процесів при роботі шляхових котушок та їх відключенні, визначення необхідних параметрів (значення струму та напруги), відпрацювання алгоритмів та принципів керування екіпажем.

2.2 Розподілена енергосистема шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Як було визначено в попередньому підрозділі, концепція створення шляхової енергоустановки для високошвидкісного наземного транспорту полягає в розподіленні всієї системи керування на блок первинного накопичення енергії та блок розподілення енергії, який складається з тягового конденсатора та шляхового модуля.

Шляховий модуль дозволяє керувати натурною моделлю магнітолевітаційного транспорту комбінованим способом в дворезимний спосіб «нуль» та «вісімка» [1,72].

Важливою складовою системи керування є формування імпульсів, що надходять у шляховий модуль і дозволяють реалізовувати необхідні принципи керування відповідно до умов роботи шляхової енергоустановки. Варіації цих принципів можуть мати як типовий характер – послідовні, паралельні, з затримкою сигналу, так і адаптивний характер. Наприклад, коли керуючий сигнал зникає та одразу вмикається наступний шляховий елемент, що дозволить забезпечити безперервність керування і уникнути аварійних режимів роботи.

Формування імпульсів можливе у мікроконтролерах Arduino або STM32 методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [80,82]. Цей метод дозволяє

керувати потужністю вхідного сигналу за допомогою зміни ширини імпульсу в часі.

Оскільки, система керування рухом може бути побудована за певними алгоритмами керування (підйом, тяга, стабілізація), то алгоритм роботи створення режиму тяги полягає в досягненні необхідних значень напруги та струму [72].

Наступним алгоритмом є стабілізація, що буде виконуватись в певний проміжок часу для відслідковування та корегування відхилень, при їх наявності під час роботи. Як було визначено в попередньому розділі, процес реалізації тяги може складатись з трьох етапів, які чергуються між собою – розгін, сталий рух, гальмування. Кожен з цих алгоритмів, які закладені в систему керування, є уніфікованим для кожного окремого модуля та має можливість оперативної заміни або оновлення програмного коду, чим буде забезпечена масштабованість та адаптивність системи до різних експлуатаційних умов.

Оскільки, модульна система передбачає розробку та експлуатацію типових уніфікованих шляхових модулів, то кожен модуль повинен мати свій період роботи, в залежності від необхідного алгоритму. Декілька модулів об'єднуються в секцію, розмір якої повинен відповідати розміру полюсної поділки магнітів та забезпечувати перекриття магнітних полів шляхової структури та магнітів, що встановлені на екіпажі натурної моделі.

2.3 Математичне моделювання секції шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Оскільки ключовим елементом натурної моделі магнітолевітаційного транспорту є шляховий модуль, то постає задача визначити характер перехідних процесів у блоці розподілення енергії та отримати характеристики процесу розрядження тягового конденсатора через шляхову котушку.

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.

Основна задача цього підрозділу дисертації полягає у теоретичному обґрунтуванні комп'ютерної моделі, що дозволить аналізувати перехідні процеси в тяговому конденсаторі блока розподілення енергії магнітолевітаційного транспорту.

Для проведення дослідження використано методику, яка містить імітаційне моделювання відповідного електричного кола. Це коло повинно задовольняти вимоги блока розподілення енергоустановки натурної моделі шляхової структури та створювати необхідні умови для роботи системи керування. Особливу увагу варто звернути на формуванні вхідних імпульсів із різними параметрами сигналу, такими як послідовний, паралельний та комбінований із затримкою.

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

Схема, яка представлена в дослідженні, складається з трьох найпоширеніших електричних компонентів, таких як резистор, конденсатор, котушка індуктивності, – що створюють у разі послідовного з'єднання схему *RLC*-контур (рис. 4.2).

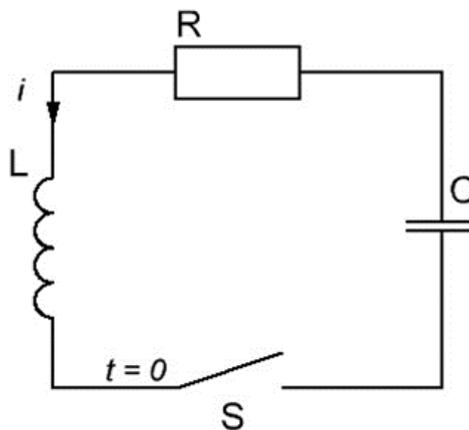


Рисунок 2.2 – Послідовна схема RLC

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 [70].

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:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = 0 \quad (2.2)$$

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

$$u_c(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (2.3)$$

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

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2.4)$$

Вираз (2.4) відповідає (2.2), розв'язок якого матиме два корені:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (2.5)$$

Перехідна напруга u_c , яку потрібно визначити згідно з виразом (2.3), буде залежати від характеру коренів, що, відповідно до (2.5), визначаються 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 (2.3) можна визначити через похідну за часом:

$$\frac{du_c}{dt} = A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t} \quad (2.6)$$

У момент комутації $t = 0$ вирази (2.3) та (2.6) будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} u_c(0) = A_1 + A_2; \\ \frac{du_c}{dt} = A_1 p_1 + A_2 p_2. \end{cases} \quad (2.7)$$

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

$$u_c(0) = u_c(-0) = U_0 \quad (2.8)$$

Сталі інтегрування визначають за таким виразом:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1}; \\ A_2 &= -U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Підставивши (2.9) у (2.3), отримуємо закон зміни $u_c(t)$ в перехідному режимі:

$$u_c(t) = U_0 \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} - U_0 \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t} \quad (2.10)$$

Перехідний струм можна знайти як похідну від (2.9):

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (2.11)$$

Напругу на індуктивності визначають за формулою:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \quad (2.12)$$

Наступним етапом є імітаційне моделювання та дослідження перехідних процесів секції натурної моделі шляхової структури магнітолевітаційного транспорту.

2.4 Дослідження перехідних процесів в секції натурної моделі шляхової структури магнітолевітаційного транспорту

Структурне зображення екіпажу та секції шляхової структури, на основі яких виконується імітаційне моделювання показано на рис. 2.3.

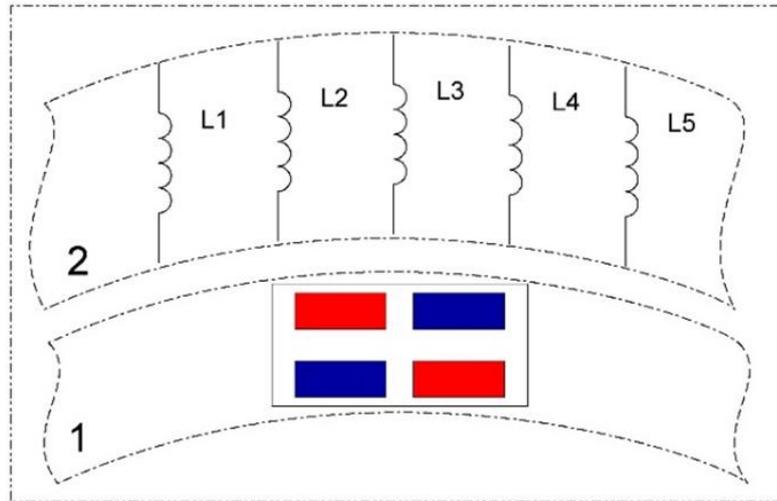


Рисунок 2.3 – Структурне зображення рухомого складу (1) та ділянки з індуктивними елементами (2) [71]

Під час різних режимів роботи (розгін, сталий рух, гальмування) можливі різні варіації схем роботи тягового модуля, а саме тяга та левітація [71].

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. 2.4).

Блок-перетворювач постійної напруги в імпульсний сигнал є керуючим елементом, що дозволяє подавати напругу на потрібну шляхову котушку у відповідний момент часу для реалізації різних режимів роботи натурної моделі.

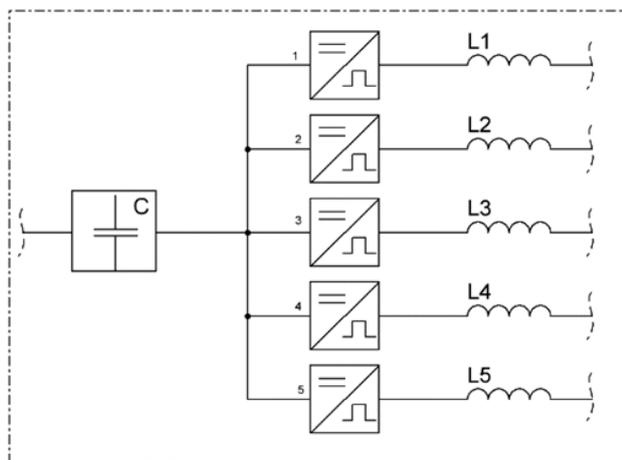


Рисунок 2.4 – Блок розподілення енергії

Для побудови функціональної схеми в програмному середовищі SciLab [84] було використано типові елементи електричних схем, де кожний відповідний блок шляхової котушки вмикається у визначений час перехідного процесу і відбувається етап зміни робочої шляхової 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 [84]. Графічні зображення результатів моделювання є процесами зміни в часі струму та напруги.

Функціональна схема блоку розподілення енергії зображена на рис. 2.5.

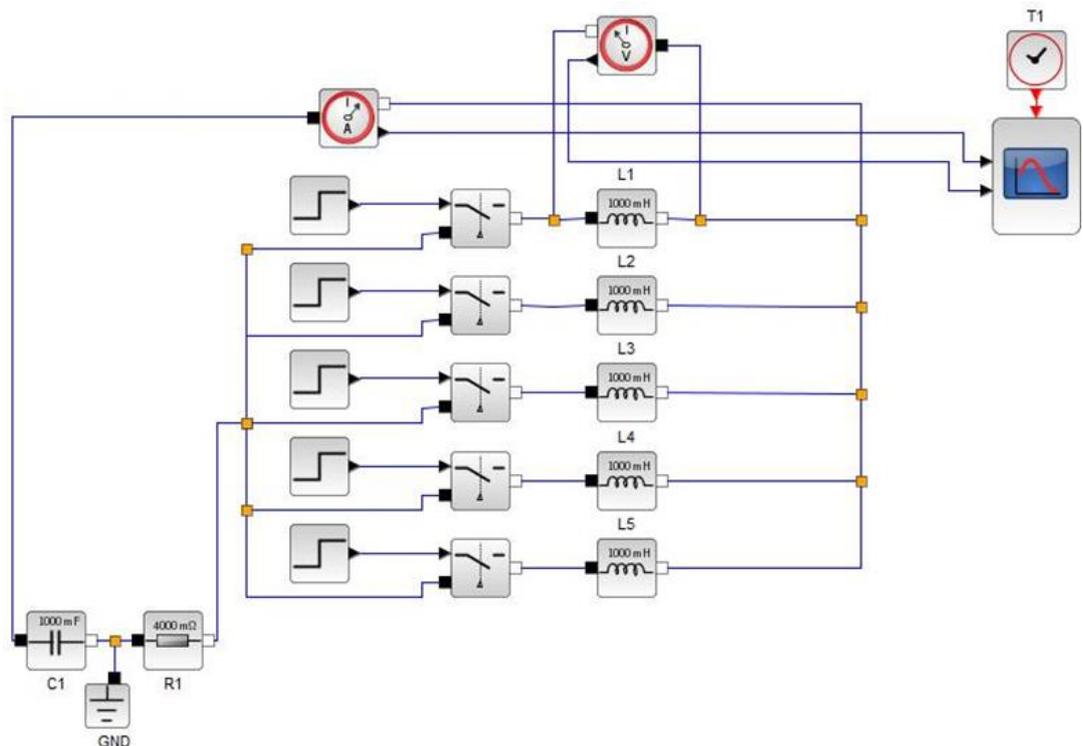


Рисунок 2.5 – Функціональна схема блоку розподілення енергії [71]

Формування вихідних імпульсів буде залежати від задач процесів керування шляховими котушками. Послідовне вмикання керівних сигналів (рис. 2.6) дозволяє встановити вмикання шляхових модулів по черзі.

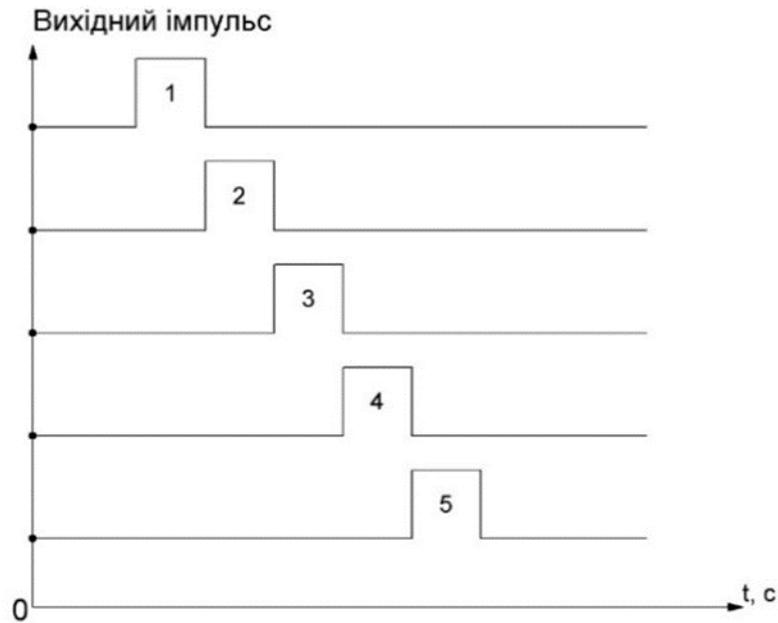


Рисунок 2.6 – Принцип послідовного вмикання шляхових котушок

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 шляхових котушок.

Послідовний режим роботи можливий для реалізації процесу керування шляховою структурою за умови, що екіпаж 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. 2.7.

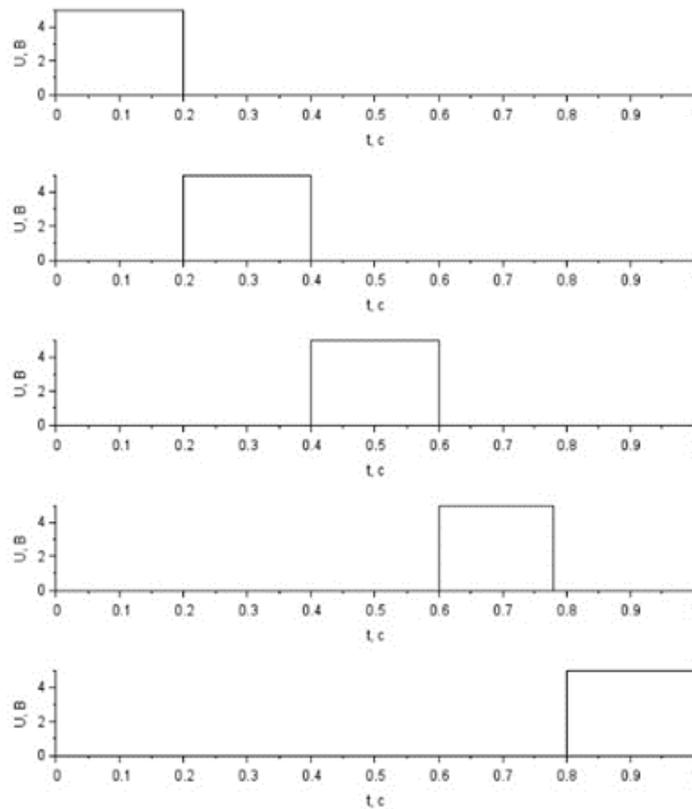


Рисунок 2.7 – Характер послідовних імпульсів заданих у середовищі Scilab

Дослідження імітаційного моделювання режимів роботи шляхової котушки натурної моделі проведено за подачі імпульсів постійної напруги амплітудою 5 В. Тривалість діапазону моделювання перехідного процесу становить 1 с. Загальний час подачі серії керівних імпульсів становить 1 с. Кожна серія цих імпульсів може мати різні значення частоти живлення системи та тривалості сигналу, відповідно до режиму керування.

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання шляхових котушок зображено на рис. 2.8.

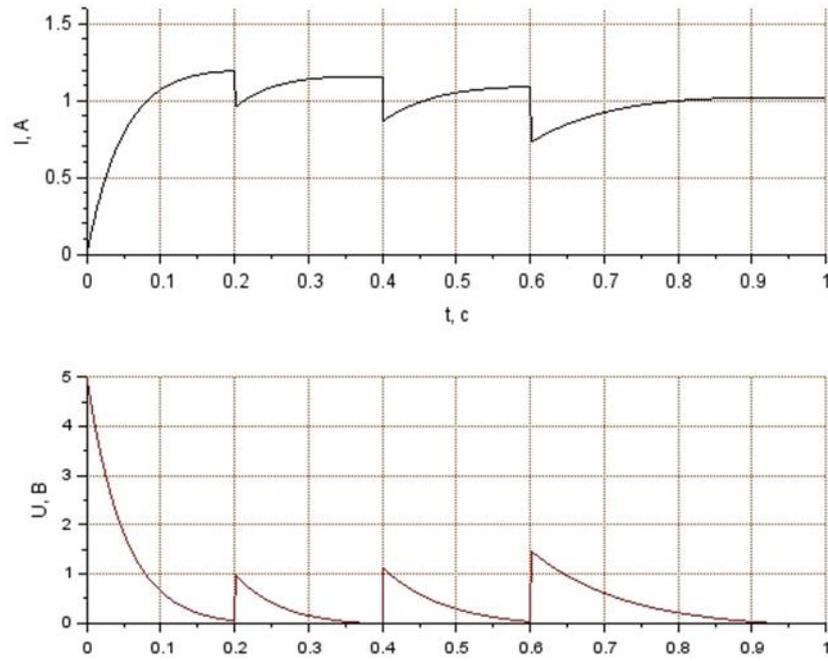


Рисунок 2.8 – Графік моделювання перехідного процесу послідовного вмикання шляхових котушок

Як видно з графіку (рис. 2.8), після кожного підключення наступної котушки спостерігається новий стрибок і подальше плавне зростання струму до встановленого значення, що відповідає наростанню внаслідок індуктивності. Нижній графік показує відповідну зміну напруги. Після кожного ввімкнення напруга короткочасно зростає і різко спадає, формуючи характерні експоненціальні криві розрядження, що відображають енергетичний перерозподіл у колі шляхової котушки. Така залежність підтверджує наявність типового L/R -перехідного процесу, властивого індуктивним елементам, та демонструє закономірність впливу послідовного підключення шляхових котушок.

Отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи систем наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

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

№	$U_{\text{поч}}, \text{В}$	$U_{\text{кінц}}, \text{В}$	$I_{\text{поч}}, \text{А}$	$I_{\text{кінц}}, \text{А}$	$t_{\text{поч}}, \text{с}$	$t_{\text{кінц}}, \text{с}$
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

Паралельне вмикання (рис. 2.9) дозволяє більш злагоджено розподіляти електричну енергію для точнішої реалізації процесу розгону екіпажу. Суть паралельного вмикання полягає в роботі одночасно двох шляхових модулів, коли умовно одна котушка індуктивності досягає половини свого часу перехідного процесу. Реалізація такого принципу керування натурною моделлю може мати місце на етапі розгону, коли потрібно досконало та плавно здійснювати перехід від однієї робочої тягової котушки до іншої.

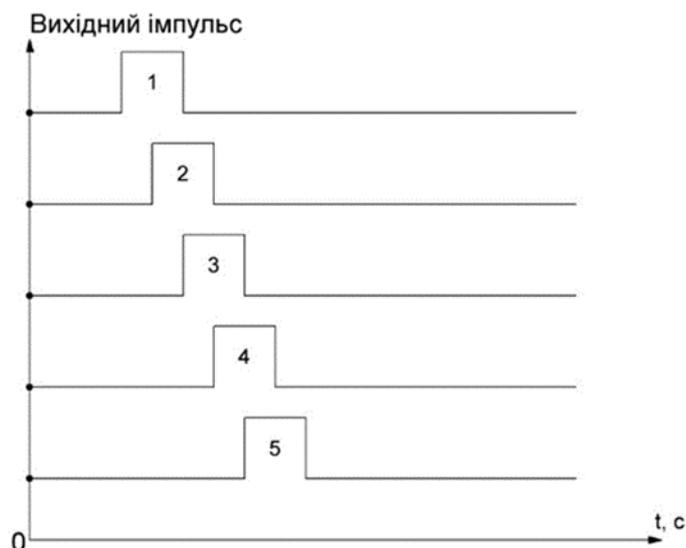


Рисунок 2.9 – Принцип паралельного вмикання шляхових котушок

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

Цей підхід до керування натурною моделлю магнітолевітаційного транспорту забезпечує плавність руху та злагоджене 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. 2.10.

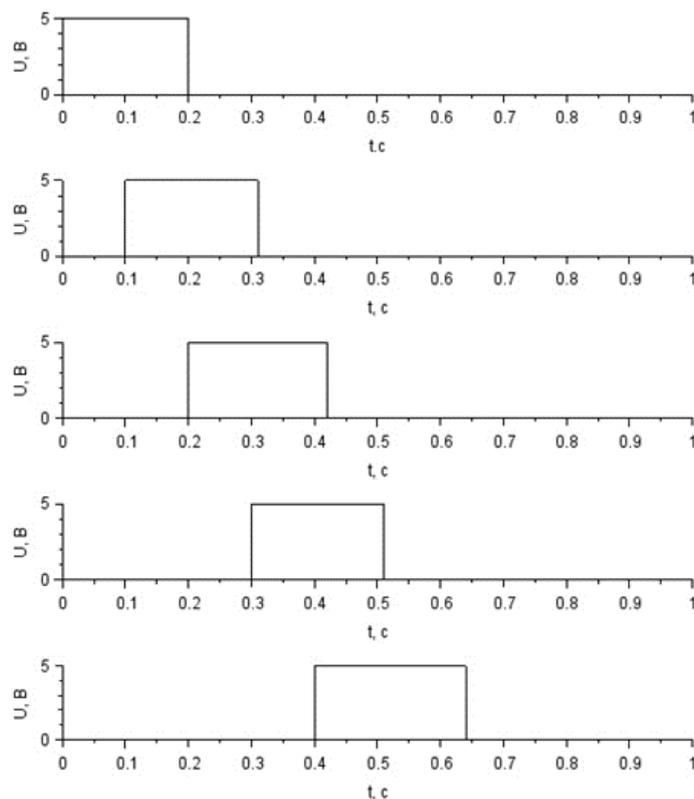


Рисунок 2.10 – Характер паралельних імпульсів у середовищі Scilab

Результати моделювання перехідного процесу за паралельного вмикання шляхових котушок зображено на рис. 2.11, отримані дані початкових і кінцевих значень напруги, струму та часу роботи системи наведено в табл. 2.3.

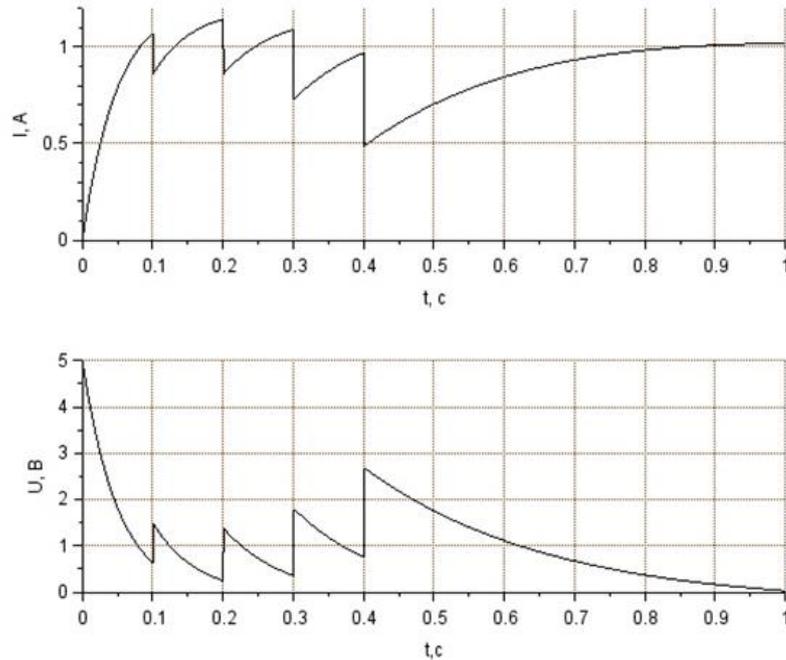


Рисунок 2.11 – Графік моделювання перехідного процесу паралельного вмикання шляхових котушок

З рис. 2.11 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 перемикання на іншу шляхову котушку починається реєстрація початку роботи наступного тягового елемента, а процес роботи попередньої шляхової котушки вважається завершеним.

Таблиця 2.3

Початкові та кінцеві значення напруг, струму та часу для паралельного вмикання шляхових котушок

№	$U_{\text{поч}}, \text{В}$	$U_{\text{кінц}}, \text{В}$	$I_{\text{поч}}, \text{А}$	$I_{\text{кінц}}, \text{А}$	$t_{\text{поч}}, \text{с}$	$t_{\text{кінц}}, \text{с}$
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) екіпажу натурної моделі або інших систем, де можливо використовувати тягові котушки. Одним із варіантів таких комбінувань є послідовне живлення шляхових котушок із затримкою сигналу на одному елементі (рис. 2.12). Потреба в такому способі керування екіпажем може виникати, наприклад, коли відбуваються деякі помилки в системі та перемикання затримується чи відбувається зупинка транспортного засобу й потрібно його зафіксувати на одній ділянці шляхової структури.

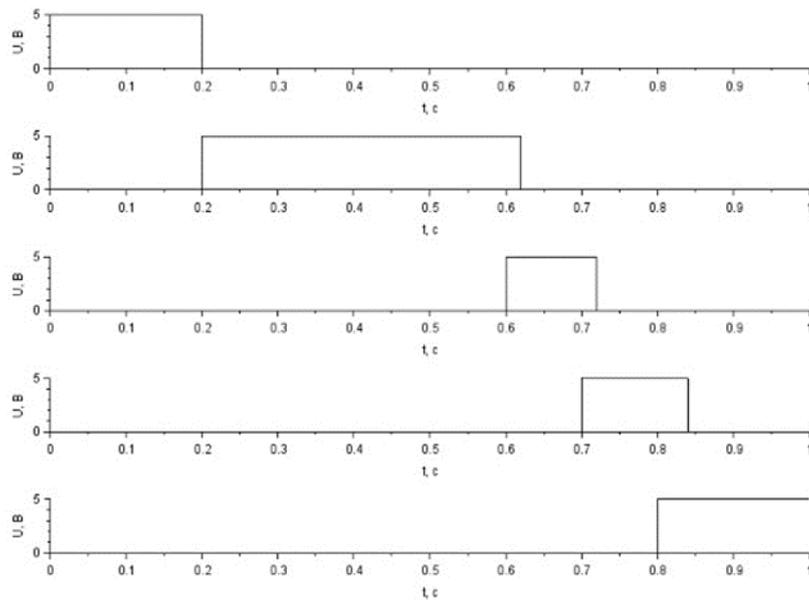


Рисунок 2.12 – Характер комбінованих імпульсів із затримкою в середовищі Scilab

Результати моделювання перехідного процесу за послідовного вмикання індуктивних елементів із затримкою зображено на рис. 2.13, отримані дані початкових і кінцевих значень напруг, струму та часу роботи системи наведено в табл. 2.4.

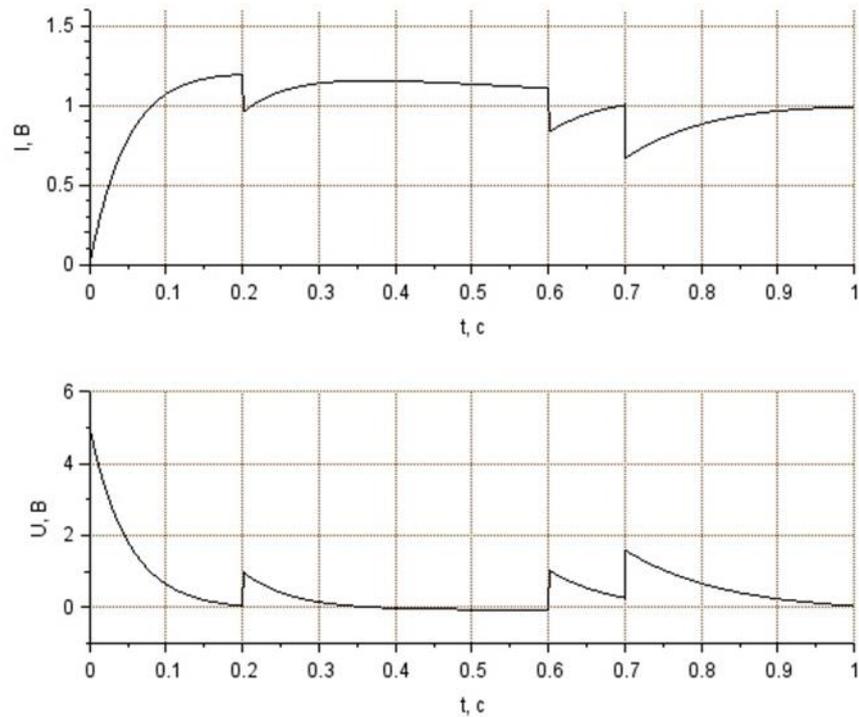


Рисунок 2.13 – Графік моделювання перехідного процесу комбінованого вмикання шляхових котушок із затримкою

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

Таблиця 2.4

Початкові і кінцеві значення напруги, струму та часу для комбінованого вмикання шляхових котушок

№	$U_{\text{поч}}, \text{В}$	$U_{\text{кінц}}, \text{В}$	$I_{\text{поч}}, \text{А}$	$I_{\text{кінц}}, \text{А}$	$t_{\text{поч}}, \text{с}$	$t_{\text{кінц}}, \text{с}$
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. 2.12 та зведені в табл. 2.4, показують, що, якщо в одному з індуктивних шляхових 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.

2.5 Дослідження перехідних процесів у колах шляхового модуля натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Для натурної моделі, що складається з кільцевої структури, було визначено один робочий модуль, в межах якого проведено імітаційне моделювання роботи двох котушок – L1 та L2 (Рис. 2.14).

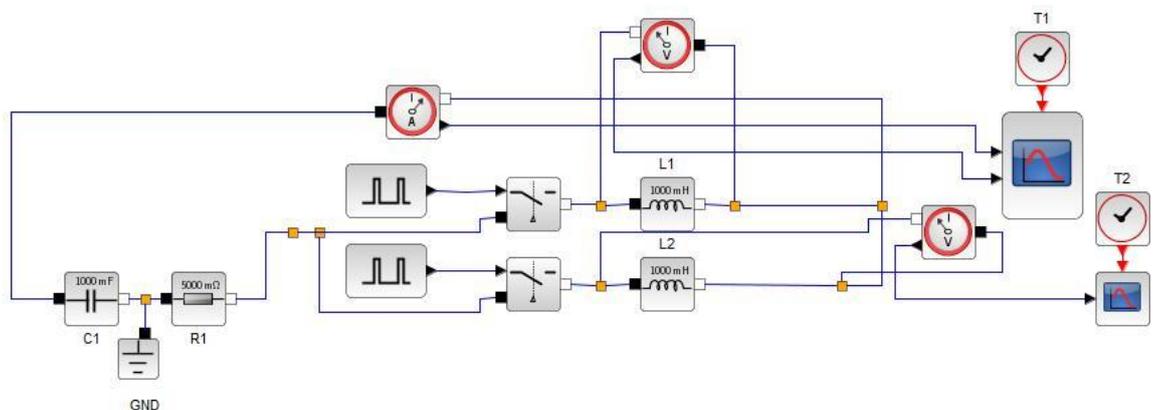


Рисунок 2.14 – Імітаційна схема шляхового модуля

В межах цієї задачі було отримано часові залежності напруги та струму $U(t)$ та $I(t)$ при живленні котушок. Це дозволило проаналізувати характер наростання струму, наявність затримок та особливості залежностей у початкові моменти часу.

Отримані графіки (рис. 2.15) мають типовий вигляд експоненційної реакції, з чітко вираженою сталою часу, що залежить від індуктивності котушки та внутрішнього опору кола.

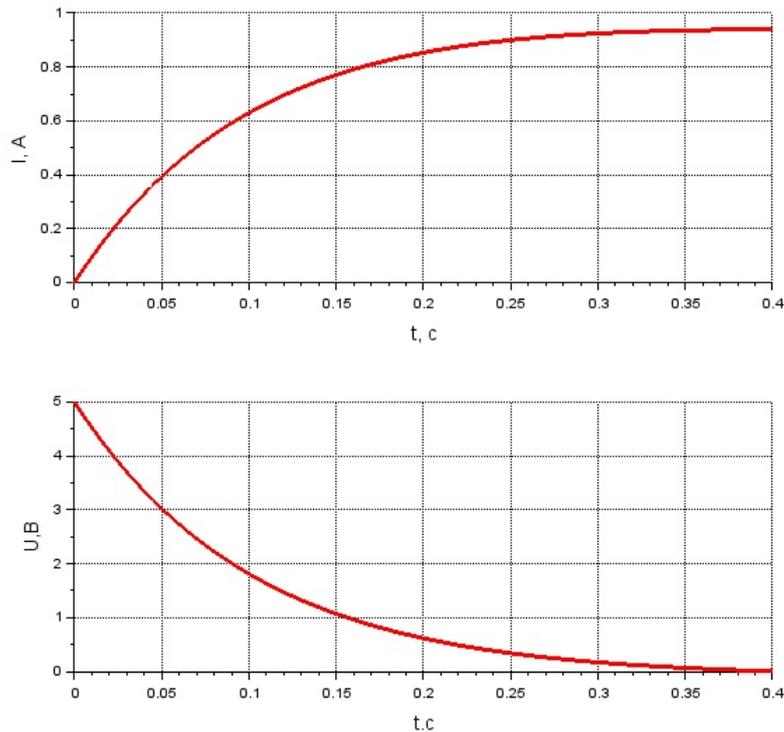


Рисунок 2.15 – Перехідні процеси в котушці L1

Проведене моделювання дозволяє визначити тривалість перехідних процесів у шляхових котушках натурної моделі.

В результаті роботи було створено комп'ютерну модель, яка дозволяє виконувати дослідження перехідних процесів для подальших етапів вдосконалення натурного стенду.

2.6 Висновки до другого розділу

1. Визначено передумови для імітаційного моделювання процесів шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Проведений аналіз об'єктів моделювання підсистем магнітолевітаційного транспорту та визначені їх показники. Оскільки дана тема складається з різних задач, які необхідно вирішити, то в даній роботі з переліку визначених показників основними є визначення положення екіпажу в межах шляхової структури, перехідні процеси під час комутації шляхових котушок, координація роботи шляхових котушок для забезпечення режиму тяги.

2. Виконано математичне моделювання секції шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

3. Отримано залежності перехідних процесів, що дозволили визначити часові характеристики перехідного процесу натурної моделі шляхового модуля. У колах шляхового модуля при початковій напрузі в 5 В, струм досягає усталеного значення 1 А за 0.4 с. При роботі секції та початковій напрузі в 5 В вмикання п'яти шляхових модулів відбувається за 1 с, відповідно до визначеного часу роботи кожного модуля.

4. Запропоновано та визначено принципи можливих алгоритмів керування натурною моделлю: послідовне, паралельне та комбіноване.

5. 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.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАТУРНОГО СТЕНДУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШЛЯХОВИХ КОТУШОК

Сучасні магнітолевітаційні транспортні системи здебільшого реалізують тягу на основі технології long-stator, де живлення подається на протяжні ділянки шляхової структури. Така система забезпечує безперервну тягу, однак має суттєві обмеження, такі як неможливість відключення окремих котушок та залежність працездатності усієї секції від одного силового елемента, а також складність модернізації. З огляду на це актуальним стає перехід до модульного принципу керування тягою, коли кожен шляховий модуль із котушками може працювати автономно, вмикатись лише у момент проходження екіпажу та бути відключеним без порушення роботи всієї системи при відмові.

Дослідження такої концепції потребує експериментальної перевірки на натурному стенді, оскільки існуючі теоретичні моделі не враховують низку факторів, такі як паразитні явища в індуктивних елементах, перехідні процеси під час перемикання та вплив проходження постійних магнітів повз шляхову котушку. Для цього була створена натурна модель із розподіленою структурою (40 модулів, об'єднаних у 8 секцій), що дозволяє дослідити процес роботи системи керування у реальних умовах [65].

Ключовим елементом такої натурної моделі є шляхові котушки, індуктивність яких визначає характер електромагнітної взаємодії та тягове зусилля [60]. Без експериментального визначення їхніх параметрів неможливо коректно сформулювати керуючий струм, розрахувати силу тяги, задати оптимальні алгоритми перемикання секцій та забезпечити роботу системи керування.

Розробка експериментального натурного стенду та дослідження параметрів шляхових котушок є необхідними для переходу від традиційної long-stator системи до розподіленої модульної системи керування маглевом

нового покоління, що забезпечує адаптивність, підвищену надійність, ремонтпридатність та зниження енергетичних витрат.

Серед наявних транспортних систем маглев є складним із погляду випробувань реальних повнорозмірних прототипів, а, значить, найбільш наближеними до реальних умов є розробка натурних моделей магнітолевітаційного транспорту.

3.1 Розробка експериментального натурного стенду магнітолевітаційного транспорту

Для досягнення визначеної мети дисертаційної роботи було виконано розробку натурного експериментального стенду (рис. 3.1) для дослідження режимів роботи системи керування шляховою структурою магнітолевітаційного транспорту. Цей етап роботи є необхідним для подальшого дослідження процесів електромагнітної взаємодії та процесів керування.

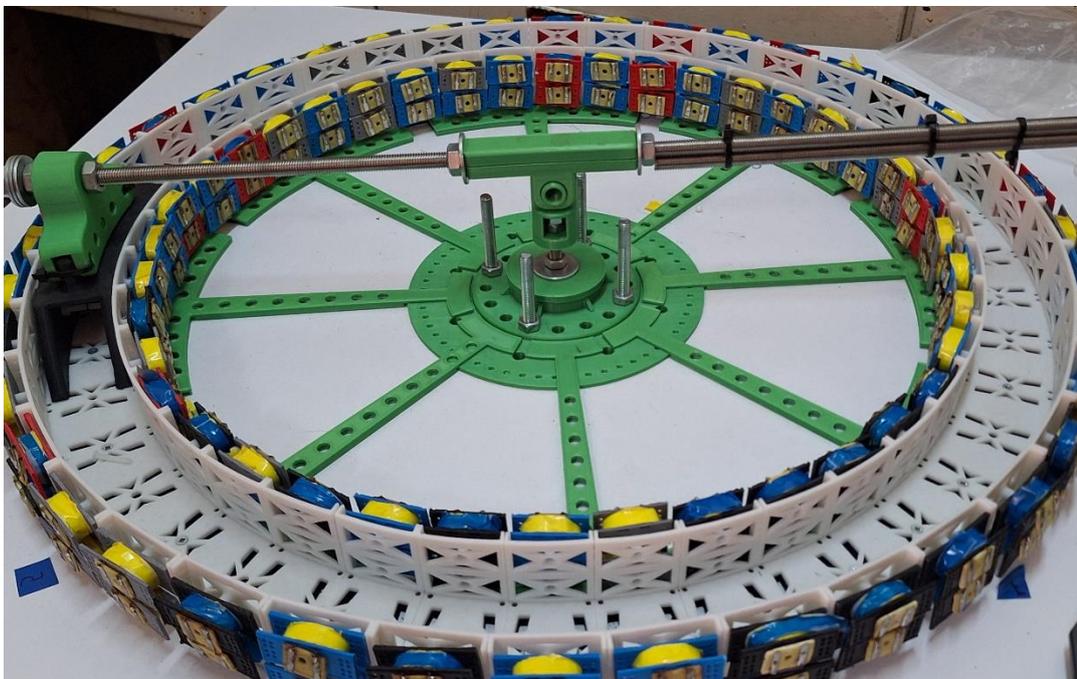


Рисунок 3.1 – Натурний стенд магнітолевітаційного транспорту

Оскільки натурний стенд складається з декількох складових, то необхідно зазначити габарити та конструктивні рішення основних елементів. Було

розроблено каркас шляхового модуля для кріплення шляхових катушок (рис.3.2). Важливим моментом є врахування габаритних розмірів зовнішньої та внутрішньої сторони шляхової структури, оскільки вони мають різні розміри, то при подальшій розробці шляхових катушок необхідно враховувати розміри постійних магнітів, які розташовані на екіпажі.

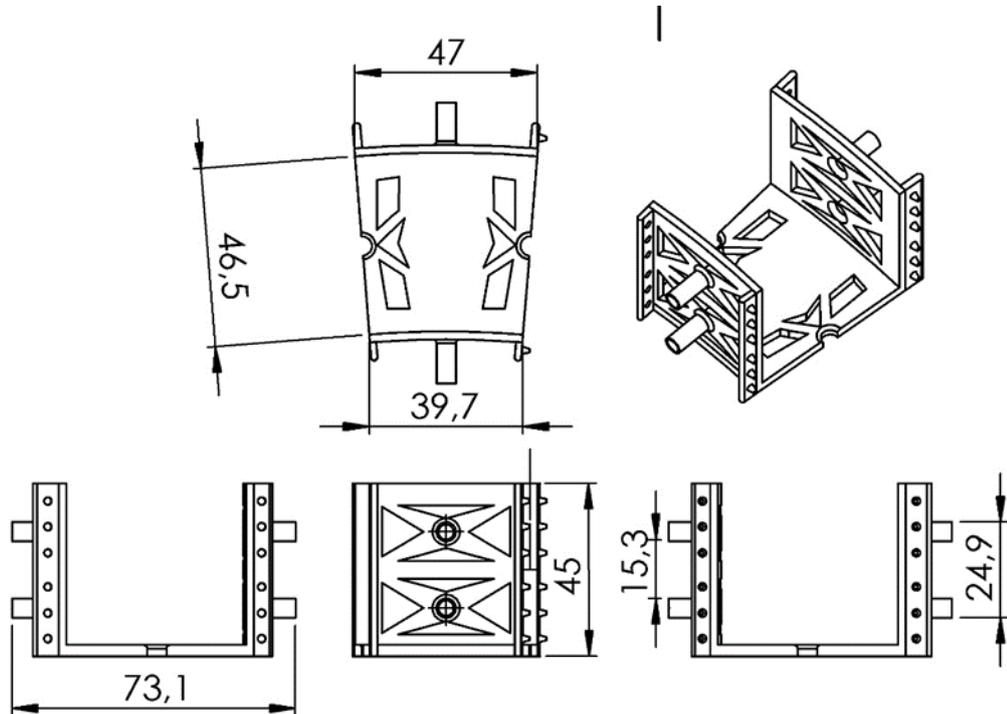


Рисунок 3.2 – Габаритні розміри каркасу шляхового модуля.

Для зручності з'єднання шляхових модулів було створено платформу (рис. 3.3).

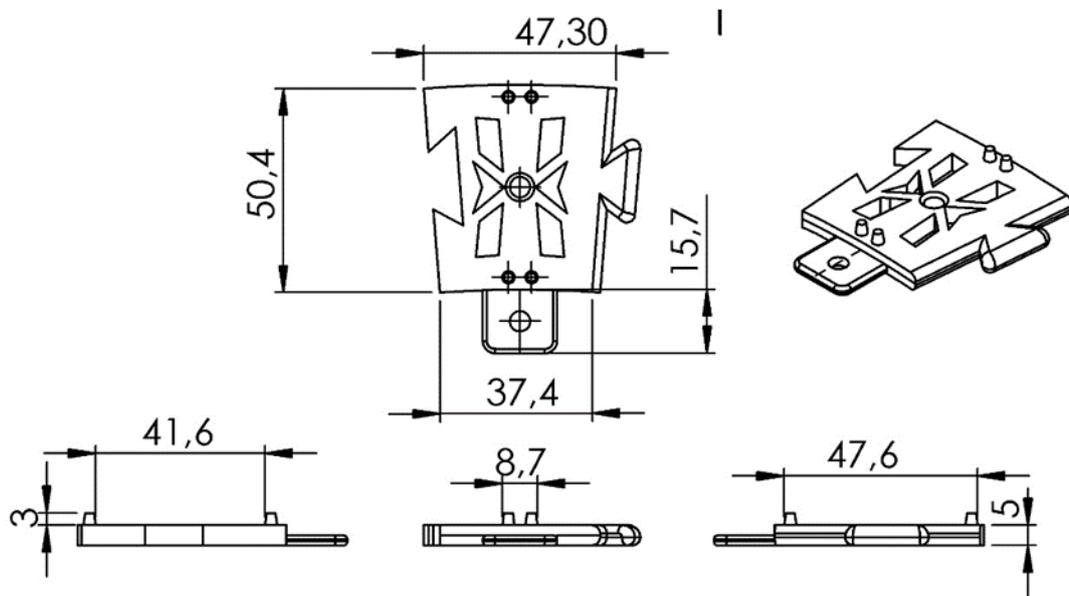


Рисунок 3.3 – Габаритні розміри платформи для шляхового модуля.

Екіпаж натурального (рис. 3.4) стенду виконує роль рухомої частини транспортної системи, що взаємодіє з магнітним полем шляхових котушок. Його конструкція має враховувати габарити шляхової структури, а також коливання при обертанні по радіальній траєкторії та виконувати фіксацію постійних магнітів, які взаємодіють з шляховими котушками. Магніти кріпляться з обох боків екіпажу у відповідності до геометрії розташування шляхових котушок – внутрішнього та зовнішнього рядів. Такий підхід дозволяє забезпечити симетричну взаємодію та дає можливість досліджувати роботу котушок у різних конфігураціях живлення, таких як «нуль» та «вісімка» [1,72]

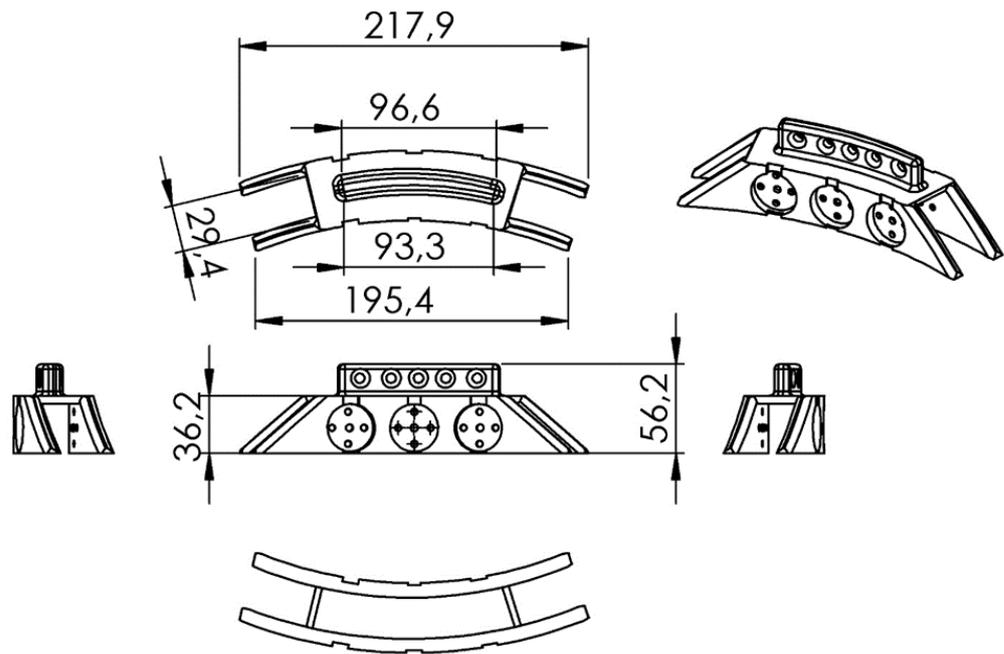


Рисунок 3.4 – Габаритні розміри екіпажу

Представлена конструкція екіпажу натурального стенду є спрощеною моделлю вагона магнітолевітаційного транспорту, розробленою для дослідження взаємодії постійних магнітів із шляховими котушками. Екіпаж та всі конструктивні елементи натурального стенду виготовлено з використанням технології 3D-друку, що дозволило забезпечити необхідну точність виготовлення, малу масу та можливість швидкої модифікації конструкції. Основна частина корпусу має дугоподібну форму, що відповідає кривизні шляхової структури експериментального стенду, та містить три посадкові місця для встановлення постійних магнітів. Центральний магніт розташований симетрично відносно осі корпусу, а два крайніх розташовані під невеликим кутом, що забезпечує стабільність під час руху вздовж напрямної та формує послідовне чергування полюсів N–S–N або S–N–S, необхідне для створення змінного магнітного поля у шляхових котушках.

Відстані між магнітами та геометричні параметри корпусу (довжина 217,9 мм, ширина 93,3 мм, висота 56,2 мм) узгоджені з розміщенням шляхових котушок, що дає змогу формувати рівномірне магнітне поле під час проходження екіпажу.

Зовнішній вигляд екіпажу з встановленими магнітами представлений на рис. 3.5.

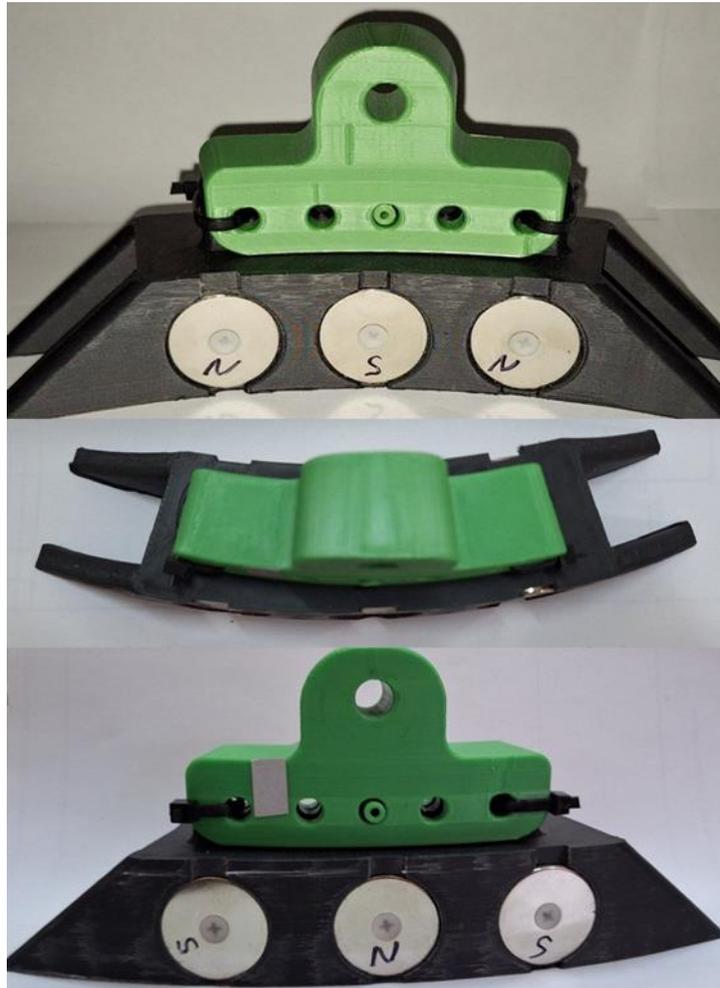


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд натурної моделі екіпажу

Шляхові котушки є основним елементом для транспортних засобів на магнітній підвісці [60]. Це обумовлено тим, що саме шляхові котушки створюють змінне магнітне поле, що дозволяє екіпажу рухатись. Основним параметром котушки є індуктивність L , яка характеризує здатність накопичувати магнітну енергію при протіканні електричного струму.

Розміри шляхової котушки, яка використана в дослідженні наведені на рис. 3.6.

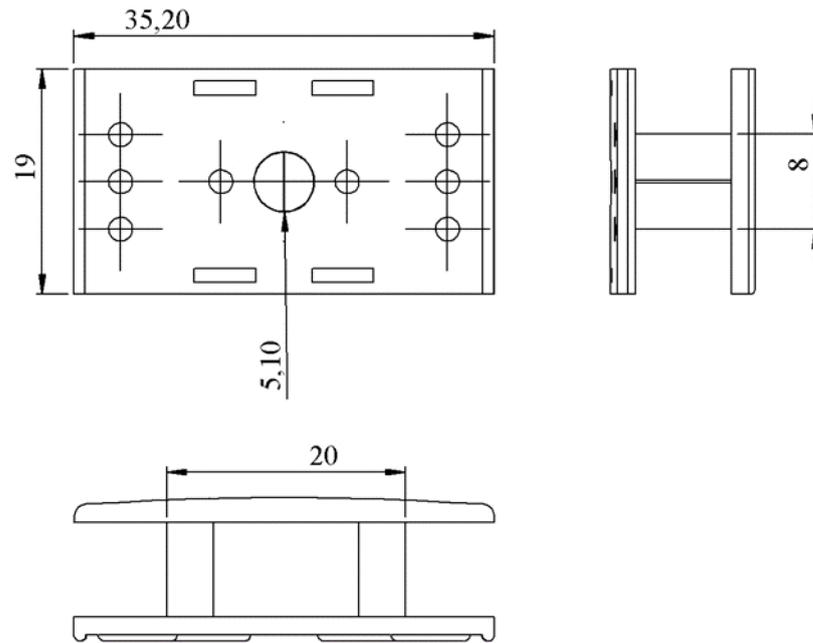


Рисунок 3.6 – Розміри натурної моделі каркасу шляхової котушки

Обмотка котушки складає її габаритні розміри, а саме: по висоті 17 мм, по ширині 32 мм.

Основними параметрами шляхових котушок є їх опір, індуктивність при заданих показниках до яких відносяться геометричні розміри, кількість витків, діаметр обмотувального проводу тощо. До динамічних параметрів шляхової котушки відноситься час увімкнення, який обмежується моментом досягнення максимальної електромагнітної сили (режим насичення).

Оскільки задача створення натурної моделі магнітолевітаційного транспорту є комплексною, то можна розділити її на різні складові, такі як досягнення процесу тяги та левітації, система керування режимами роботи.

Система тяги складається зі шляхових котушок (нерухома частина) та екіпажу (рухома частина). Проблема, що виникає в процесі розробки системи тяги, це обґрунтований вибір обмоткових параметрів натурної моделі шляхової котушки для високошвидкісного транспорту. Основою вибору є необхідне значення реактивного опору при різних режимах включення для того, щоб відбувався рух екіпажу через взаємодію магнітних полів. Якщо котушка не буде вмикатись вчасно, то екіпаж в такому разі буде мати збій в роботі у вигляді короткочасного зникнення тягової сили. Це буде впливати на загальні умови

руху екіпажу високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту.

Натурну модель секції шляхових котушок та екіпаж показано на рис. 3.7.

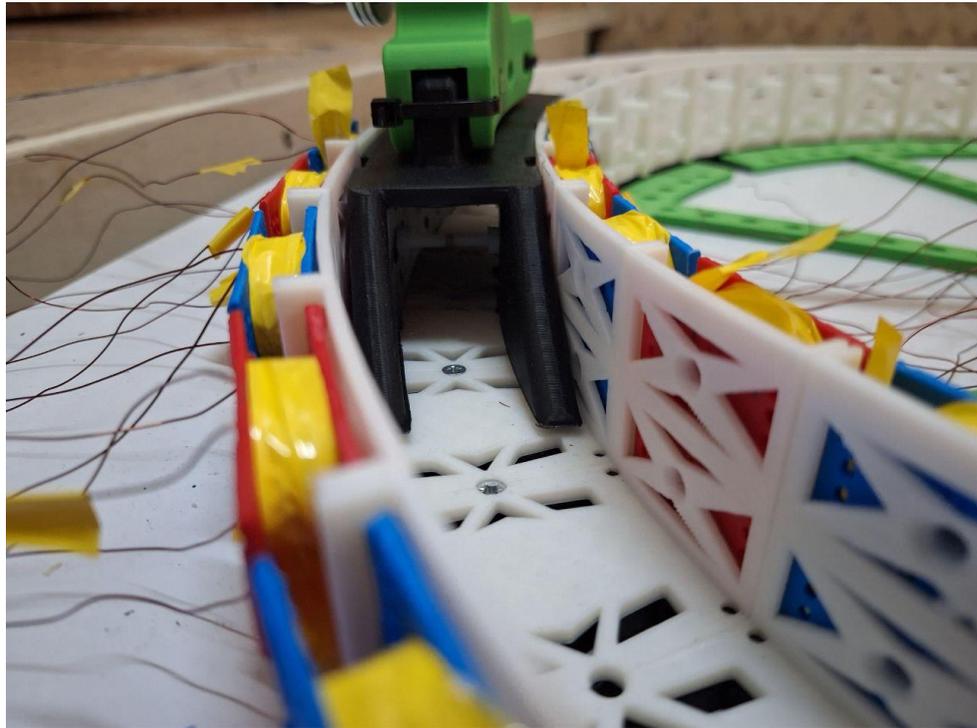
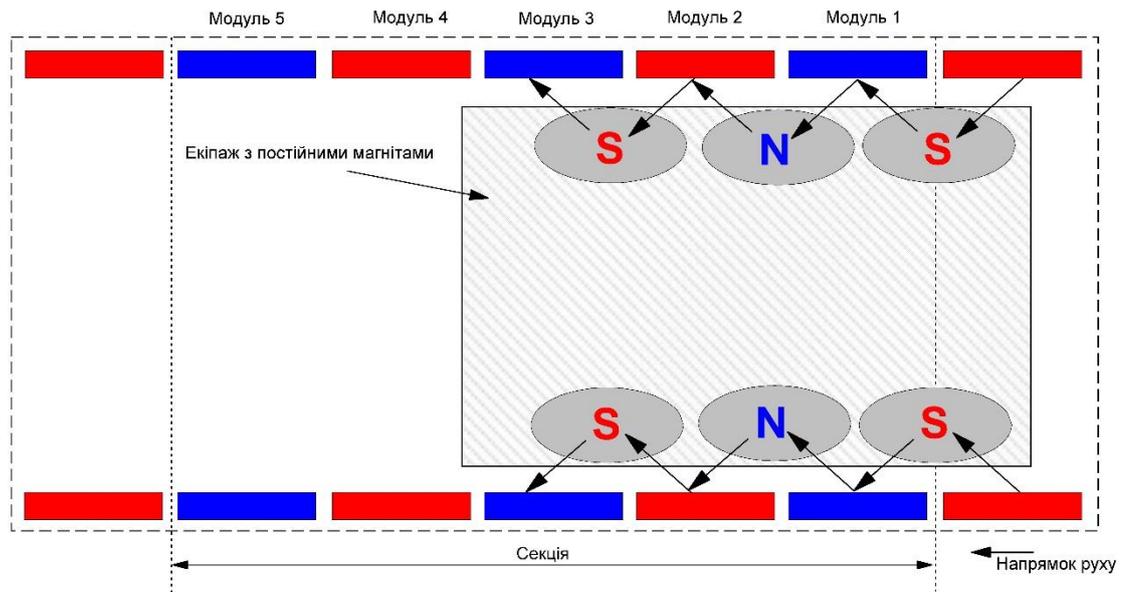


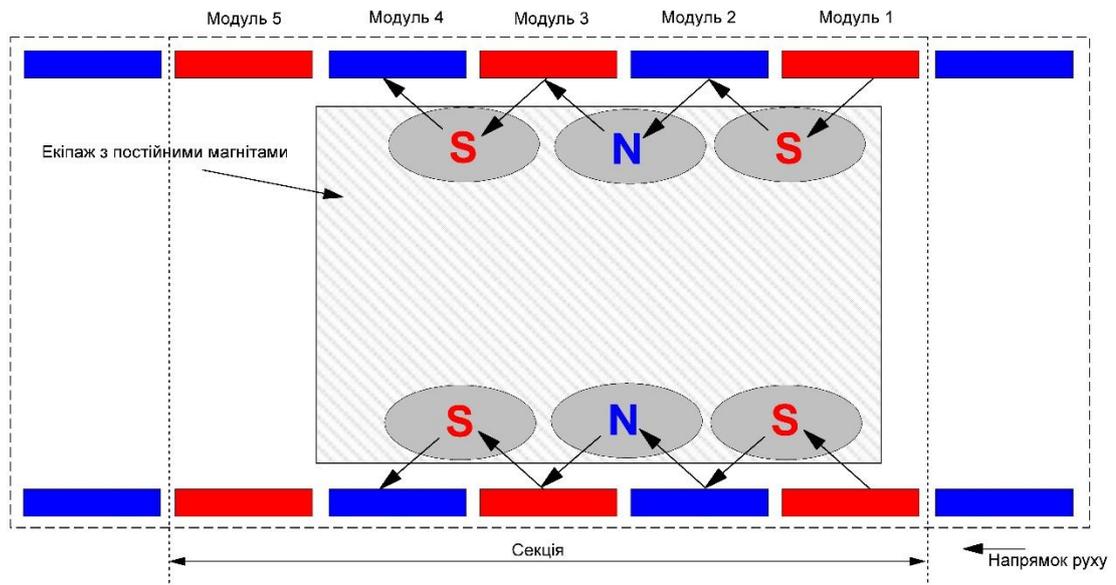
Рисунок 3.7 – Екіпаж та секція шляхових котушок натурального стенду

Даний натурний стенд відтворює принцип електродинамічної підвіски магнітолевітаційного транспорту. Однак, є певні відмінності, що полягають у створенні окремих незалежних один від одного шляхових модулів, що дозволяє перейти від довгих секцій шляхової структури до уніфікованих модульних елементів.

Створений натурний стенд дозволяє реалізувати режими роботи системи керування магнітолевітаційним транспортом, а саме тягу та левітацію. Це характеризується тим, що його конструкція та принцип роботи дозволить виконувати подачу живлення на визначені шляхові котушки під час проходження повз них екіпажу (рис. 3.8), а система керування забезпечує комутацію необхідних шляхових котушок та їх перемикання на іншу полярність в залежності від необхідного режиму роботи.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Принцип руху екіпажу натурального станду, режим тяги

а) Полярність шляхових модулів «режим 1»

б) Полярність шляхових модулів «режим 2»

Рух екіпажу натурального станду забезпечується взаємодією постійних магнітів, розміщених на екіпажі, з шляховими котушками модульної структури, які по черзі вмикаються з визначеною полярністю. У «режимі 1» на шляхові котушки подається струм такої полярності, за якої магнітні полюси котушок

створюють притягувальну силу до відповідних полюсів постійних магнітів екіпажу та одночасно відштовхувальну дію з боку попередніх модулів. У результаті формується результуюча сила, спрямована вздовж напрямку руху, яка «підтягує» екіпаж до наступного активного модуля секції. При цьому в межах однієї секції одночасно активними є лише ті модулі, що знаходяться в безпосередній зоні взаємодії з магнітами екіпажу.

Після проходження екіпажем визначеної позиції відбувається перемикання на «режим 2», тобто змінюється напрям струму в шляхових котушках. Це призводить до інверсії магнітного поля котушок і, відповідно, до зміни характеру взаємодії з постійними магнітами екіпажу. Котушки попереднього модуля переходять у режим відштовхування, а наступного – у режим притягування. Така почергова зміна полярності та послідовне вмикання модулів забезпечують безперервний поступальний рух екіпажу вздовж радіальної траєкторії стенду.

Візуалізація принципу керування наведена на рис. 3.9

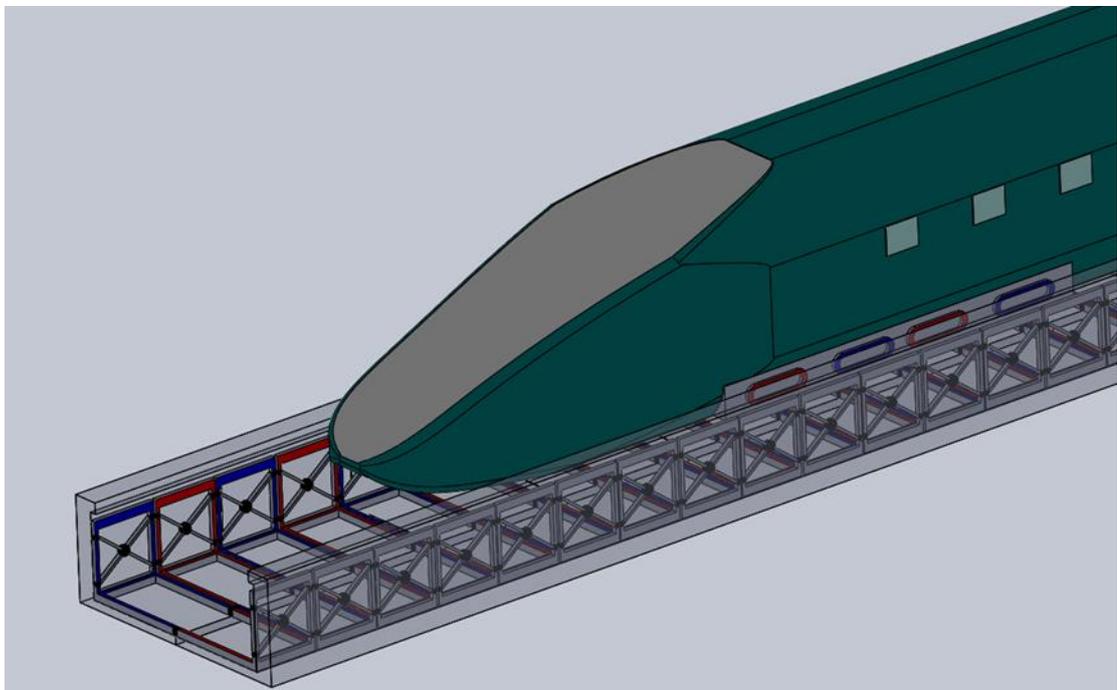


Рисунок 3.9 – Принцип керування шляховою структурою, режим тяги

Оскільки в модульному елементі розташовано дві шляхові котушки, то це дає можливість створити умови при яких ці котушки будуть працювати з різною

полярністю ввімкнення і цим самим, через взаємодію з постійними магнітами на екіпажі, можливо досягти режиму левітації (рис. 3.10).

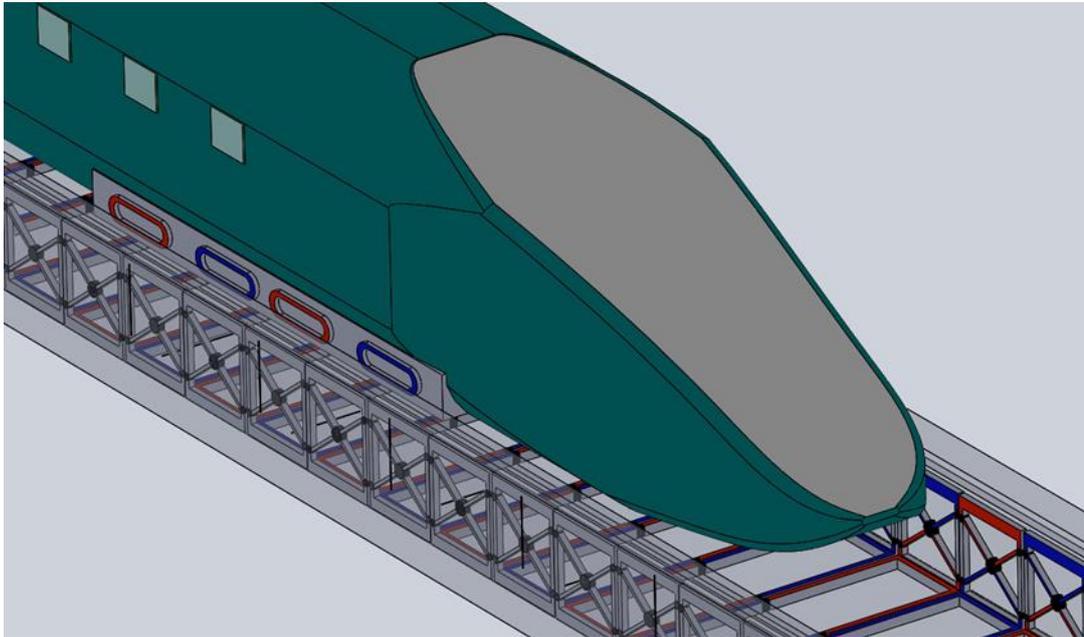


Рисунок 3.10 – Принцип керування шляховою структурою, режим левітації

Основним елементом даного натурального стенду є шляхова котушка і від неї залежить успішна реалізація визначених режимів роботи. Для раціонального вибору параметрів шляхової котушки для натурального стенду доцільно виконати дослідження прототипів з різними обмотковими параметрами.

Оскільки шляхові котушки, які розглядаються в даному розділі, створюються вперше то постає задача в їх експериментальних дослідженнях щодо зміни реактивного опору, що в подальшому дозволить застосовувати отримані значення для комп'ютерного моделювання режимів роботи шляхової структури.

3.2 Дослідження параметрів натурної моделі шляхових котушок для високошвидкісного транспорту

Використовуючи особливості електричних кіл з індуктивними елементами було проведено дослідження електричного кола з котушкою, на яку подається синусоїдальний сигнал з генератора сигналів ГЗ–33. Діюче значення напруги та струму в шляхових котушках з різними обмотковими параметрами визначалося з застосуванням осцилографа RIGOL DS1104B. Дослідження

параметрів електричного кола котушки виконувались з різним діапазоном частот (від 1 кГц до 200 кГц). Отримані результати вимірювань та розрахунків параметрів оцінювались методами математичної статистики і представлені у вигляді графічних зображень [60].

Схема експериментального визначення реактивного опору прототипів шляхових котушок наведена на (рис. 3.11).

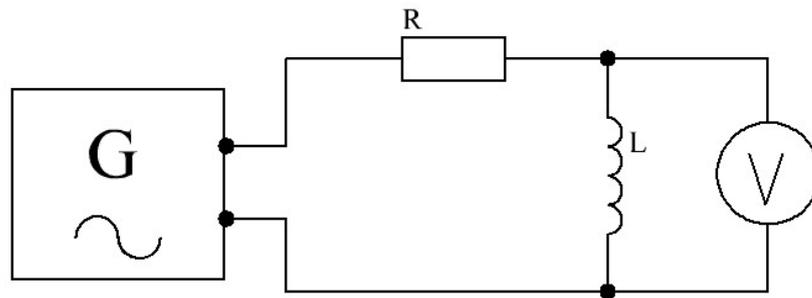


Рисунок 3.11 – Схема експерименту

Для проведення вимірювань параметрів шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту застосовувалася експериментальна установка (рис. 3.12).

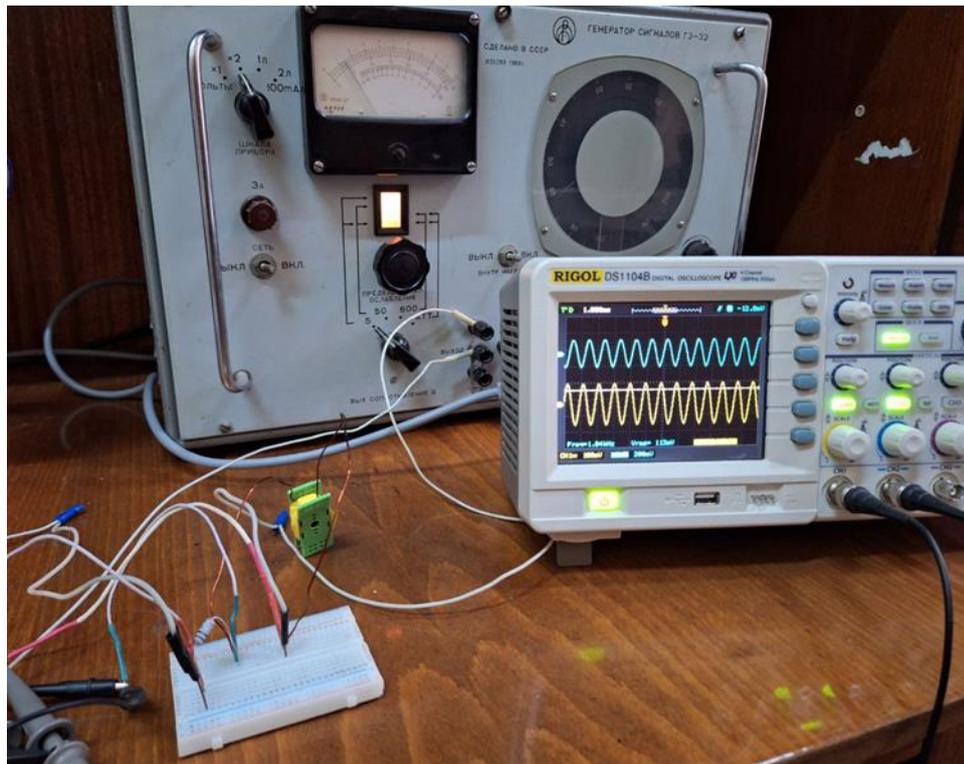


Рисунок 3.12 – Експериментальна установка для визначення електричних параметрів шляхових котушок натурної моделі високошвидкісного транспорту

Дослідження параметрів проводились для п'яти котушок з різними параметрами (діаметр провoda, кількість витків). Конструкція та розміри котушки залишались незмінними, що обумовлено попередньо визначеною геометрією випробувальних прототипів шляхових котушок.

Параметри досліджуваних котушок наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Обмоткові параметри досліджуваних котушок.

Котушка	Діаметр провoda d , мм	Витки, w кількість	Опір котушки R , Ом
A	0,6	35	0,6
B	0,45	112	1,4
C	0,36	272	4,5
D	0,2675	550	18,1
E	0,24	720	26,3

Зовнішній вигляд п'яти прототипів шляхових котушок з різними обмотковими параметрами наведений на рис. 3.13.

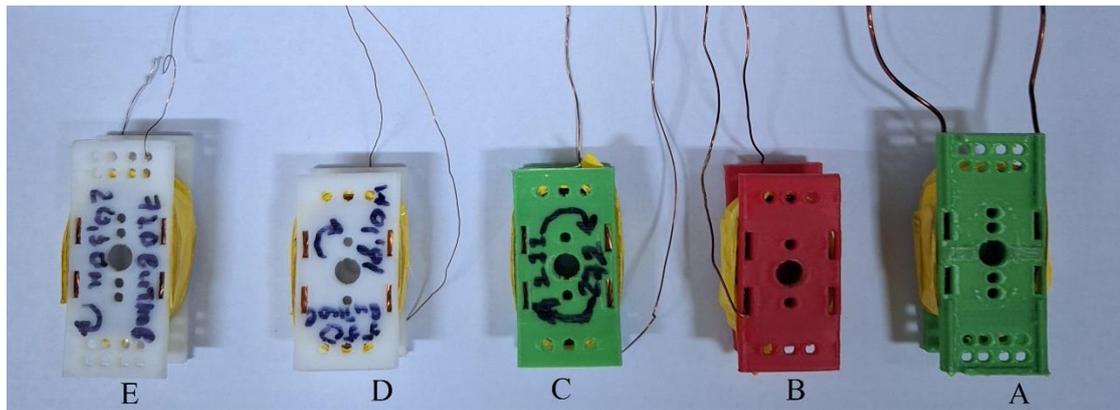


Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд п'яти прототипів шляхових котушок з різними обмотковими параметрами

Для зменшення похибки було виконано 15 вимірювань при діючому значенні струму кожної котушки та опору $R=0.4$ Ом. Резистор у вимірювальному колі дозволяє визначати діюче значення струму на шляхових котушках, при різних частотах і режимах навантаження.

Вимірювання проводились при частоті сигналу 1 кГц. (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Вимірювання діючого значення напруги при частоті сигналу $f=1$ кГц

Номер вимірювання	Котушка А	Котушка В	Котушка С	Котушка D	Котушка Е
	U_{RMS} , мВ				
1	119,46	99,94	43,06	10,27	5,15
2	107,41	110,25	44,21	9,86	6,32
3	112,75	101,82	52,7	11,97	5,26
4	115,19	105,86	55,93	10,35	5,73
5	107,24	106,86	52,96	9,31	7,98
6	103,36	100,91	52,37	12,03	5,82
7	126,3	107,02	39,92	7,13	5,97
8	124,39	104,33	49,95	7,35	6,83
9	107,42	99,64	46,28	12,55	6,2
10	101,73	106,15	46,36	13,7	6,85
11	103,12	109,12	52,73	9,44	6,98
12	104	110,64	44,45	11,89	7,21
13	114,01	104,29	45,67	10,37	7,19
14	114,62	110,16	55,24	11,77	6,71
15	103,99	108,06	44,19	11,46	5,79
Середнє значення	111	105,67	48,4	10,63	6,4

Аналогічним чином виконані вимірювання для інших значень частоти f синусоїдального сигналу. Результати вимірювань представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Діюче значення напруги для різної частоти f

Частота сигналу f , кГц	Котушка А	Котушка В	Котушка С	Котушка D	Котушка Е
	U_{RMS} , мВ				
5	26,4	24,27	11,1	2,52	1,64
10	12,17	13,9	5,82	1,37	1,04
15	8,62	8,67	3,89	0,98	0,82
20	7,5	6,567	2,97	0,806	0,761
25	5,39	5,13	2,43	0,716	0,712
30	4,62	5,0	2,04	0,716	0,652
40	3,97	3,57	1,6	0,587	0,617
50	3,12	2,95	1,15	0,577	0,689
60	2,89	2,57	1	0,642	0,641
70	2,64	2,19	0,864	0,587	0,635
80	2,27	1,97	0,766	0,609	0,738
90	2,05	1,83	0,715	0,621	0,697
100	1,95	1,68	0,729	0,575	0,753
150	1,58	1,2	1,06	0,565	0,886
200	1,25	1,02	1,39	0,662	0,716

Отримані результати досліджень представлені методом статистичного розподілу значень (рис. 3.14-3.18).

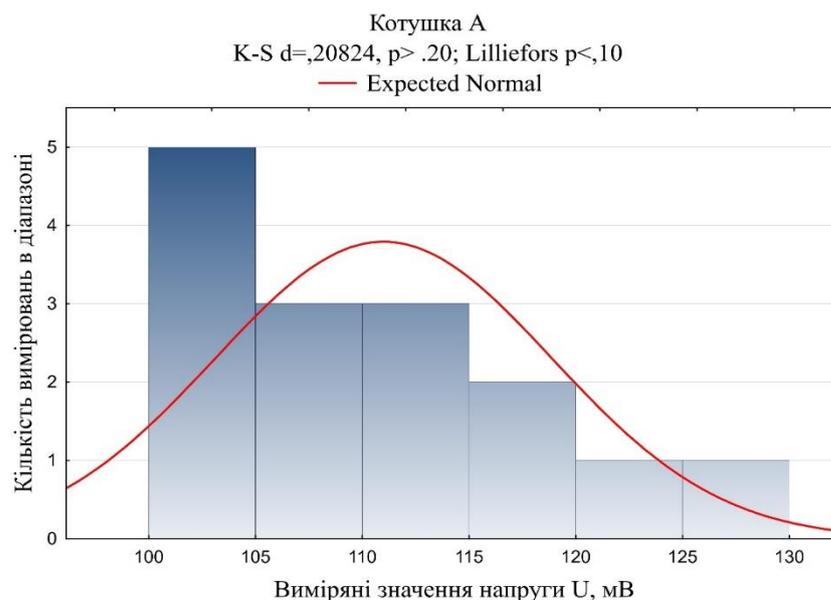


Рисунок 3.14 – Статистичний розподіл вимірних значень напруги котушки А

Для котушки А спостерігається розподіл вимірних напруг у діапазоні приблизно від 100 до 130 мВ, з найбільшою концентрацією результатів поблизу 105-110 мВ. Гістограма має асиметричний характер. Основна маса даних зосереджена лівіше від середнього значення, тоді як права сторона розтягнута. Очікувана нормальна крива (червона лінія) показує певне відхилення від нормального розподілу, що підтверджується результатами К-S тесту ($d=0.20824$, $p<0.10$). Це свідчить про те, що дані мають певні статистичні відхилення і можуть бути пов'язані з особливостями вимірювальної системи або характеристикою самої натурної моделі шляхової котушки.

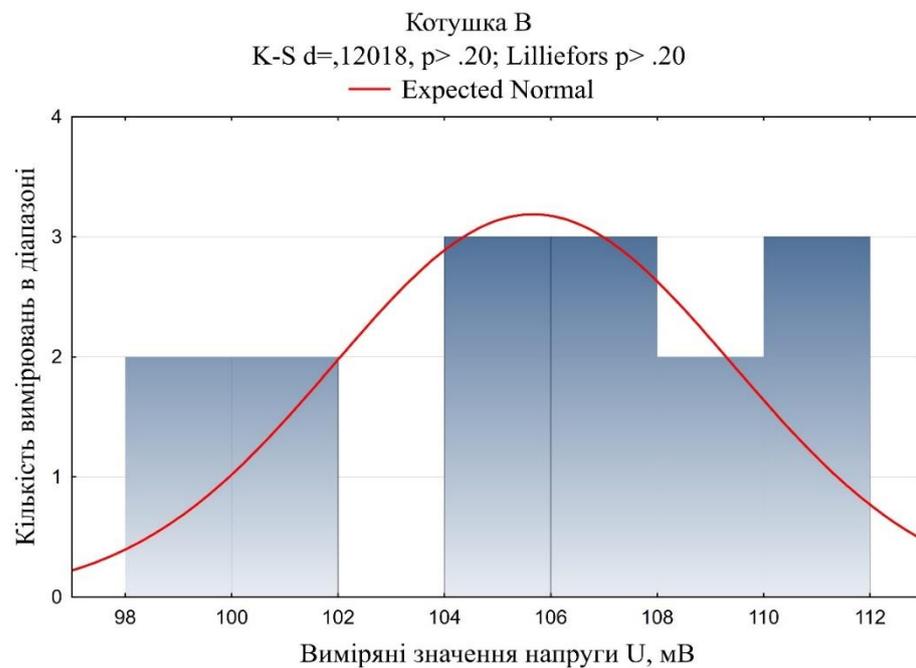


Рисунок 3.15 – Статистичний розподіл вимірних значень напруги котушки В

Котушка В демонструє більш вузький діапазон напруг (близько 98-112 мВ), при цьому більшість значень зосереджені між 104 та 110 мВ. Розподіл ближчий до нормального порівняно з котушкою А. Крива добре відтворює форму гістограми, хоча локально спостерігається нерівномірність. Перевірочний тест показав низьке значення $d=0.12018$ при високому $p>0.20$, що підтверджує узгодженість із нормальним законом розподілу. Отже, для котушки В напруга характеризується стабільним розподілом, придатним для використання у подальшому аналізі та дослідженні.

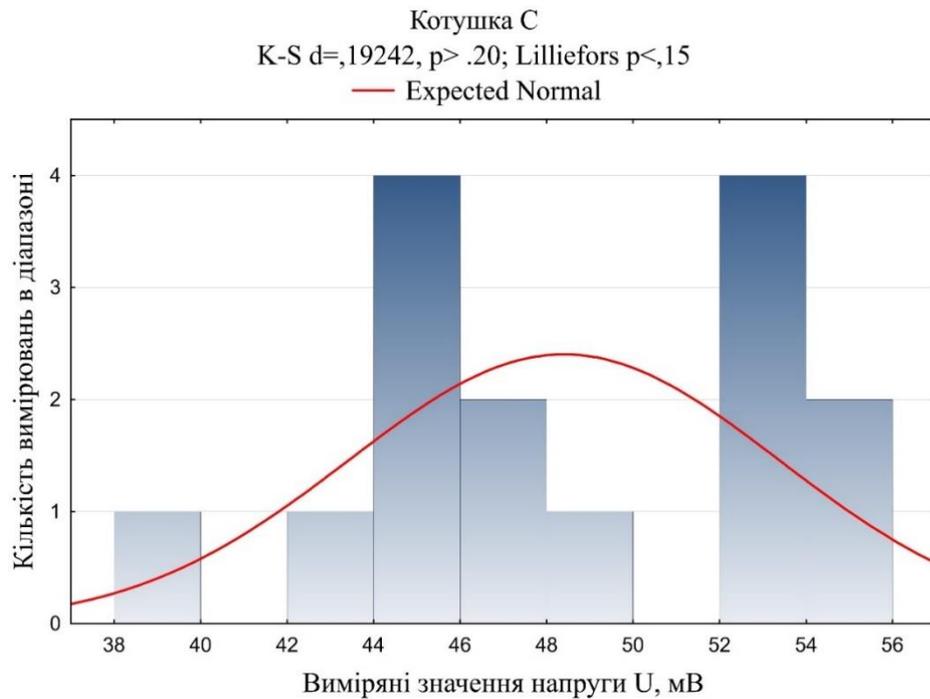


Рисунок 3.16 – Статистичний розподіл виміряних значень напруги котушки С

У котушки С виміряні напруги лежать у межах 38-56 мВ. Розподіл має певні відхилення від ідеальної симетрії. Гістограма показує два локальні максимуми (близько 44 та 50 мВ), що вказує на мультипикову структуру. Це відрізняє її від котушок А та В, які мали більш одномодальний характер. Попри це, апроксимація нормальною кривою відображає загальну тенденцію, хоча і не повністю узгоджується з фактичними даними. Параметри статистичного тесту ($d=0.19242$, $p<0.15$) свідчать про обмежене підтвердження нормальності, що вимагає додаткових досліджень стабільності вимірювань для цієї котушки.

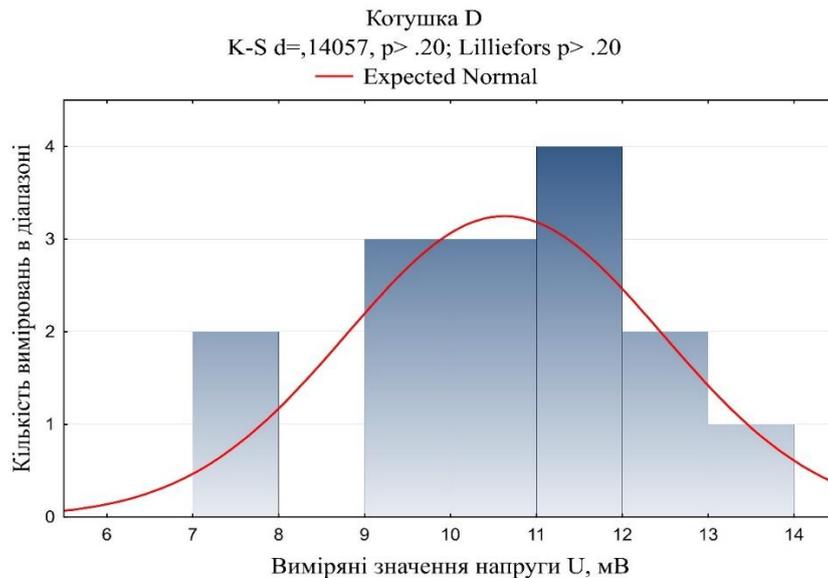


Рисунок 3.17 – Статистичний розподіл вимірних значень напруги котушки D

Для котушки D вимірні значення знаходяться у вузькому діапазоні від 6 до 14 мВ. Гістограма демонструє достатньо рівномірний розподіл із центральною концентрацією в межах 9-12 мВ. Очікувана нормальна крива добре описує форму даних, хоча присутні невеликі відхилення на краях інтервалу. Тест Колмогорова-Смірнова ($d=0.14057$, $p>0.20$) підтверджує адекватність нормального розподілу. Це означає, що для котушки D напруга може розглядатися як випадкова величина з нормальною природою варіацій.

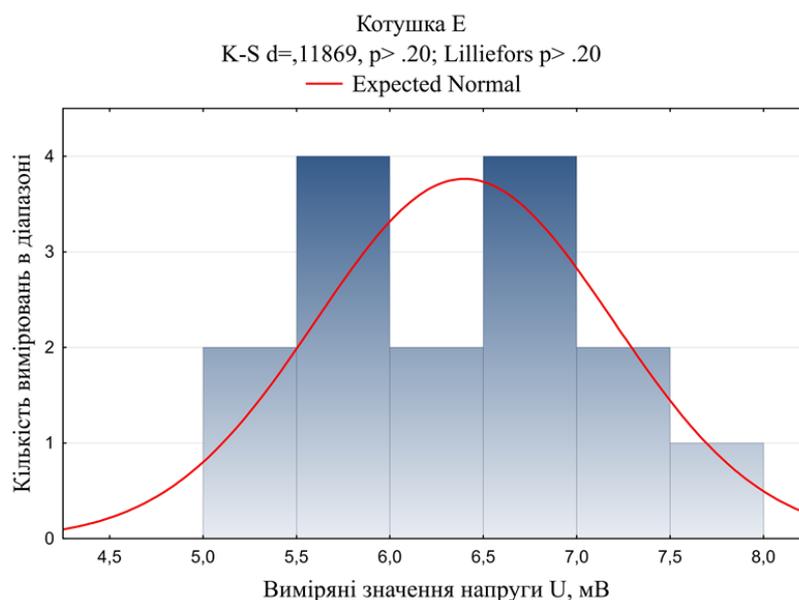


Рисунок 3.18 – Статистичний розподіл вимірних значень напруги котушки E

Котушка Е характеризується найнижчими вимірними напругами (4,5-7,5 мВ). Розподіл має чітко виражений одномодальний характер із максимумом у діапазоні 5,5-6,5 мВ. Крива нормального закону практично співпадає з емпіричною гістограмою, що підтверджується високими статистичними показниками відповідності ($d=0.11869$, $p>0.20$). Такі результати свідчать про стабільність вимірюваних параметрів та коректність моделі для аналізу даних по цій котушці.

Розрахунки параметрів проводились аналітичним методом, без використання спеціалізованого програмного забезпечення [60].

Діюче значення струму, що протікає в колі:

$$I_{RMS} = \frac{U_{RMS}}{R}, \text{ А} \quad (3.1)$$

де U_{RMS} - діюче значення напруги, В.

R - опір резистора в колі, Ом.

Значення повного імпедансу кола в загальному випадку, вираженого через загальний закон Ома:

$$Z = \frac{U_{RMS}}{I_{RMS}}, \text{ Ом} \quad (3.2)$$

де I_{RMS} - діюче значення струму, А;

Вираз для визначення індуктивного опору:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \text{ Ом} \quad (3.3)$$

Значення індуктивності L з виразу (3.3):

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}, \text{ Гн} \quad (3.4)$$

Повний опір (імпеданс) у послідовному колі з активним опором R та індуктивним опором X_L :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \text{ Ом} \quad (3.5)$$

Остаточний вираз для визначення індуктивності з урахуванням (3.3)-(3.5):

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2 \cdot \pi \cdot f}, \text{ Гн} \quad (3.6)$$

Отримані результати розрахунків зведені в табл. 3.4 та в додатку А.

Таблиця 3.4 – Визначення параметрів котушок

Котушка	U_{RMS} , В	I_{RMS} , мА	Z, Ом	X_L , Ом	L, мГн
$f=1$ кГц					
A	0,14	280	0,5	0,335	0,05
B	1,4	264	5,3	5,111	0,8
C	2,8	121	23,14	22,69	3,6
D	3	26,575	112,88	111,428	17,73
E	3,2	16	200	198,26	31,56
$f=50$ кГц					
A	0,14	7,8	17,95	17,93	0,057
B	1,4	7,375	189,8	189,825	0,6
C	2,8	2,875	973,9	973,9	3,1
D	3	1,44	2078,6	2078,6	6,6
E	3,2	1,72	1856,95	1856,8	5,9
$f=100$ кГц					
A	0,14	4,875	28,72	28,712	0,046
B	1,4	4,2	333,3	333,3	0,53
C	2,8	1,82	1536,4	1536,4	2,45
D	3	1,44	2085,86	2085,8	3,3
E	3,2	1,88	1698,4	1698,2	2,7
$f=200$ кГц					
A	0,14	3,18	44,094	44,09	0,035
B	1,4	2,55	549,01	549,02	0,43
C	2,8	3,475	805,76	805,74	0,64
D	3	1,657	1810,8	1810,68	1,44
E	3,2	1,79	1786,96	1786,77	1,42

Згідно отриманих значень (див. табл. 3.4) побудовані графіки залежності реактивного опору шляхових котушок від частоти синусоїдального сигналу f (рис. 3.19-3.23).

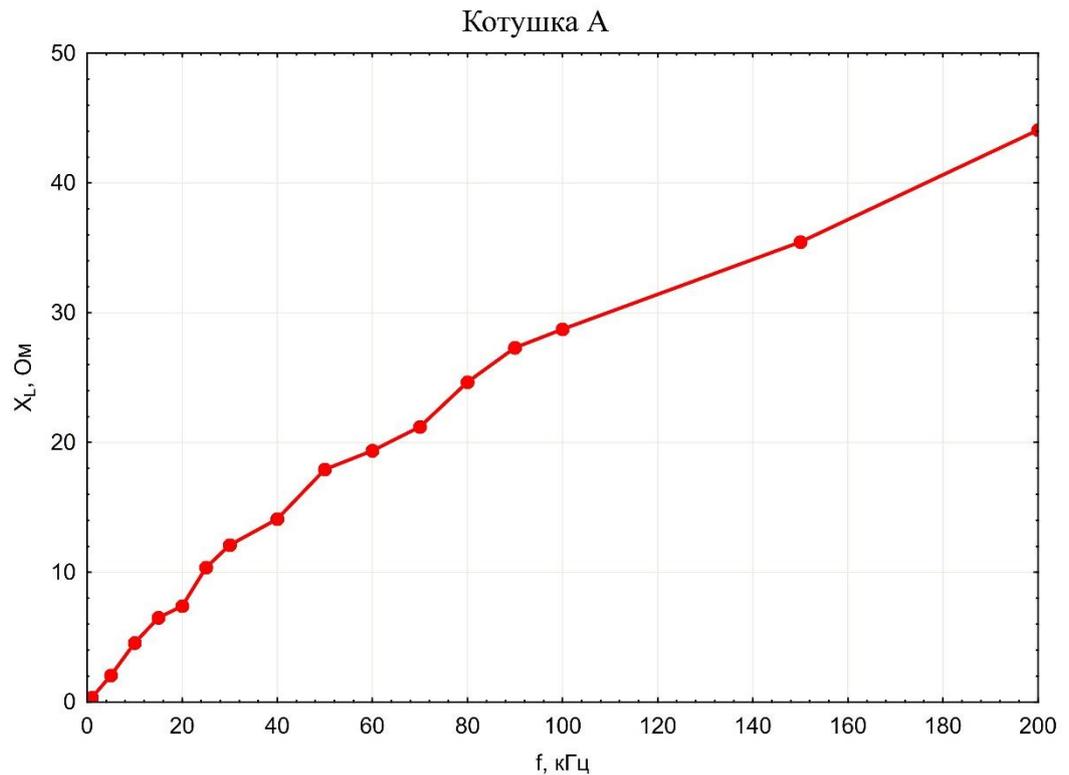


Рисунок 3.19 – Залежність зміни реактивного опору X_L від частоти синусоїдального сигналу f , котушка А

Для котушки А спостерігається майже лінійне зростання реактивного опору з частотою в усьому діапазоні частот до 200 кГц без виражених максимумів чи спадів. Така поведінка відповідає індуктивному елементу з відносно стабільним значення реактивного опору кола з індуктивним характером та незначним впливом паразитних ємностей.

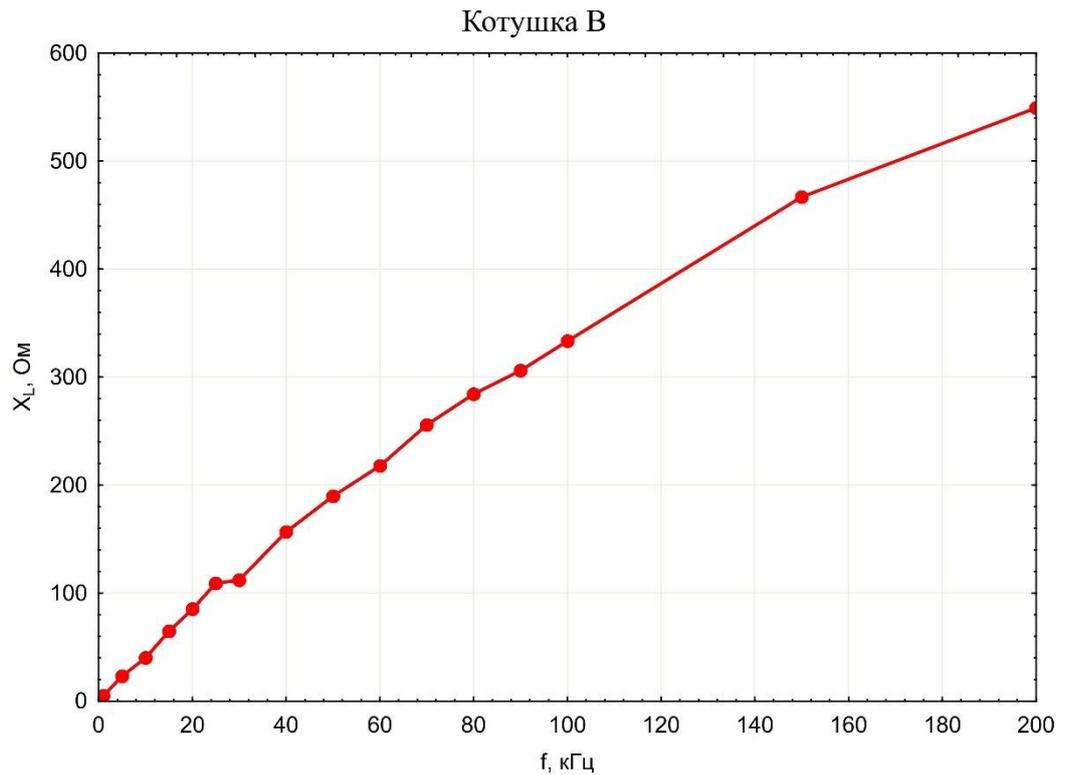


Рисунок 3.20 – Залежність зміни реактивного опору X_L від частоти синусоїдального сигналу f , котушка В

Котушка В демонструє зростання реактивного опору при збільшенні частоти, але з помітною нелінійністю. У діапазоні до приблизно 30-40 кГц нахил кривої менший, після чого зростання стає інтенсивнішим. Така форма вказує на зростаючу зміну реактивного опору кола з індуктивним характером. Водночас відсутність спадів або піків означає, що робочі частоти до 200 кГц залишаються поза областю вираженого резонансу, що дозволяє використовувати цю котушку в ширшому частотному діапазоні, ніж котушки з локальними максимумами.

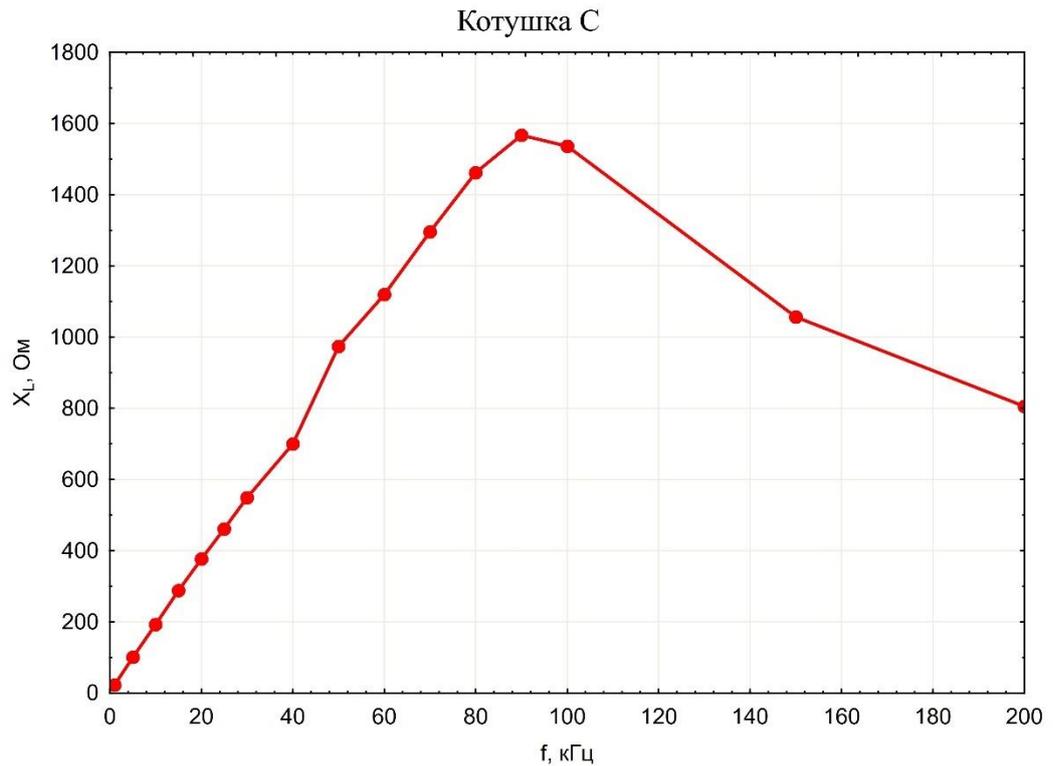


Рисунок 3.21 – Залежність зміни реактивного опору X_L від частоти синусоїдального сигналу f , котушка С

Для котушки С характерна наявність чіткого максимуму реактивного опору в області приблизно 80-100 кГц, після чого X_L зменшується зі зростанням частоти. Така поведінка є прямою ознакою резонансного впливу паразитної ємності обмотки та конструкції котушки. Це означає, що робота поблизу цієї частотної області може супроводжуватися нестабільними значеннями струму і підвищеною чутливістю до змін параметрів, тому для системи керування доцільно або працювати нижче резонансної області, або цілеспрямовано використовувати її з урахуванням цього ефекту.

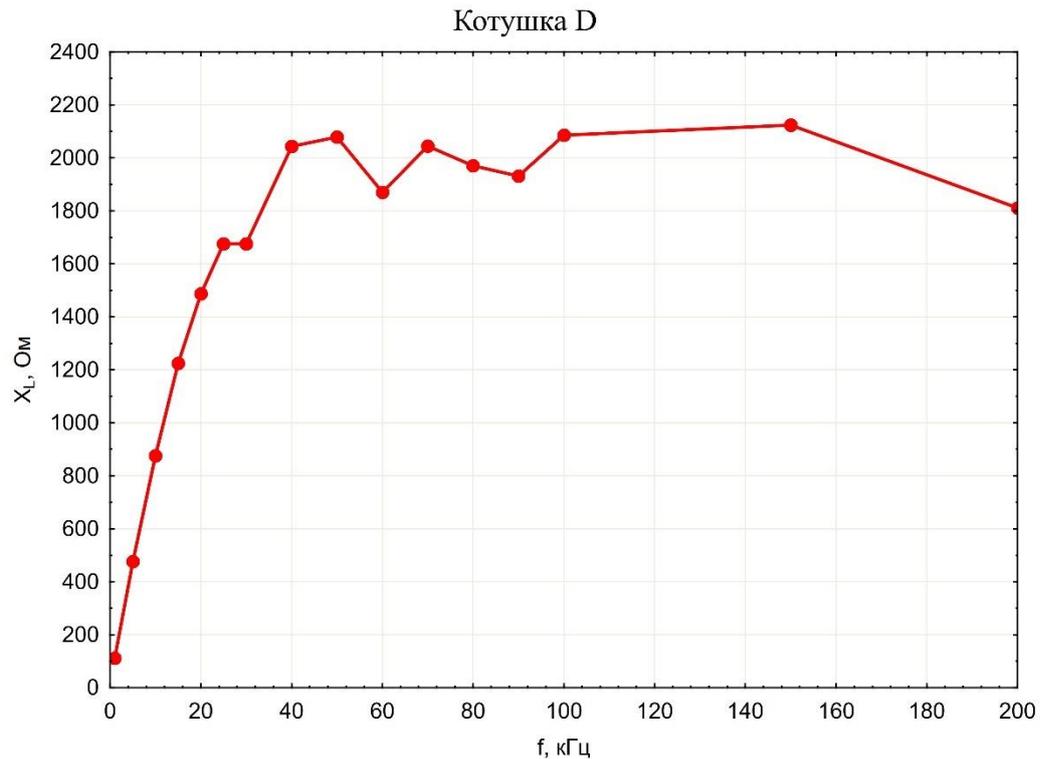


Рисунок 3.22 – Залежність зміни реактивного опору X_L від частоти синусоїдального сигналу f , котушка D

Характеристика котушки D демонструє швидке зростання реактивного опору на низьких частотах з подальшим переходом у відносно «сталі» значення в діапазоні приблизно 40-150 кГц та подальшим зниженням на 200 кГц. Отримана форма кривої вказує на складну частотну поведінку реактивного опору шляхової котушки, що може бути корисно з точки зору керування, оскільки в цьому діапазоні система менш чутлива до точного вибору частоти.

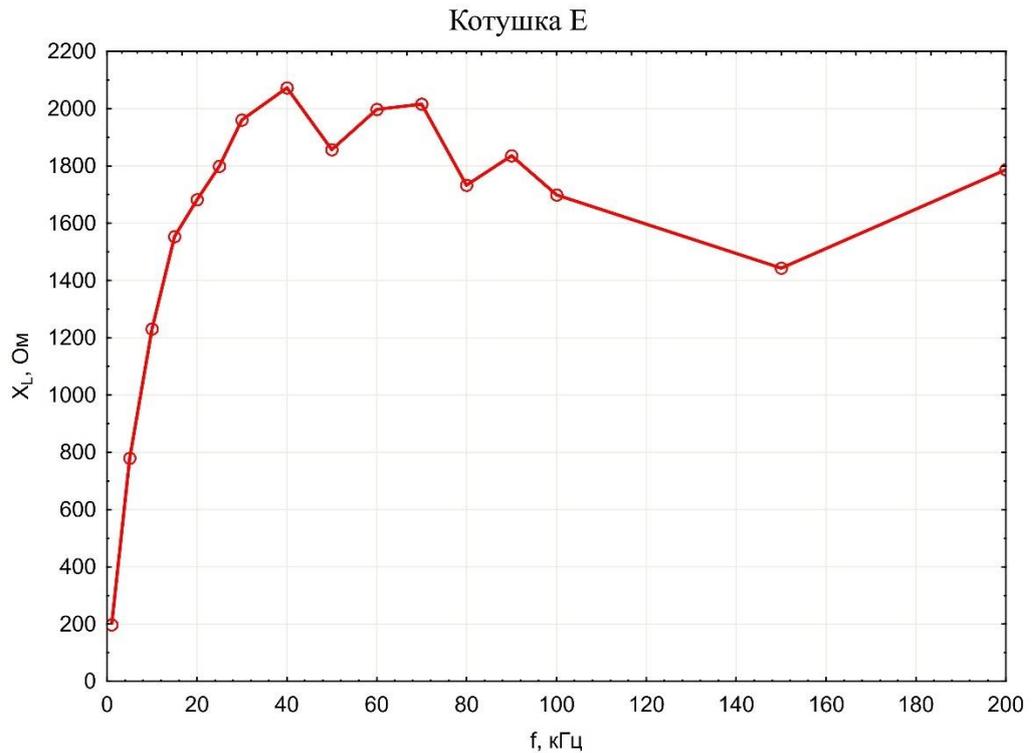


Рисунок 3.23 – Залежність зміни реактивного опору X_L від частоти синусоїдального сигналу f , котушка Е

Котушка Е має найбільш виражену нерівномірність частотної характеристики. Швидко зростання реактивного опору на низьких частотах, кілька локальних максимумів і мінімумів у діапазоні до 100 кГц та подальше зменшення з наступним повторним зростанням. Для застосування котушки з цими параметрами у натурному стенді це свідчить про те, що вибір частоти керування для цієї котушки потребує необхідних умов, оскільки малі зміни частоти можуть призводити до істотних змін реактивного опору та, відповідно, струму в колі.

Робочу частоту керування доцільно обирати в такому діапазоні, де реактивний опір шляхової котушки змінюється монотонно або слабо залежить від частоти, без локальних максимумів і спадів, що пов'язані з резонансними явищами та впливом паразитних ємностей. Частота повинна бути віддаленою від резонансних областей, оскільки поблизу них спостерігається різка зміна реактивного опору кола з індуктивним характером, що ускладнює стабілізацію струму, знижує передбачуваність електромагнітних сил та підвищує вимоги до

системи керування і силової електроніки. Крім того, робоча частота має забезпечувати прийнятний рівень реактивного опору, за якого струм у котушці не перевищує допустимі значення для елементної бази, а теплові втрати залишаються в допустимих межах, водночас дозволяючи формувати керуючі сигнали з достатньо вираженими імпульсами, що дозволить обраному мікроконтролеру виконувати подачу в силові елементи натурного стенду.

Практичним значенням отриманих результатів є створення дослідної шляхової котушки для моделей високошвидкісного транспорту, що дозволить отримувати масив даних про роботу закладених принципів керування та реакцію шляхових котушок. Результати дослідження сприяють подальшому використанню дослідних натурних моделей високошвидкісного транспорту, в основі яких є принцип дії електродинамічної тяги. Зокрема, проведені дослідження та отримані результати дозволять створити комбіновану систему керування високошвидкісним транспортом.

Обмеженням даного етапу дослідження є те, що створювана шляхова котушка відповідної моделі мала один типовий розмір і змінною характеристикою були її параметри (кількість витків, діаметр проводу). Оскільки при зміні цих параметрів буде змінюватись значення її реактивного опору, то при побудові натурних моделей необхідно розраховувати електричні параметри відповідно до розмірів натурних моделей для дослідження високошвидкісного транспорту [60].

3.3 Динамічні показники шляхової котушки натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Визначення динамічних показників (робочий час та момент насичення) шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту дозволяє визначити здатність системи забезпечувати стабільний режим тяги [60].

Оскільки, в створюваній натурній моделі шляхові котушки перемикаються в залежності від положення екіпажу, то час реакції котушки має критичне значення. Якщо котушка не встигає повноцінно досягти робочих значень в

момент проходження екіпажу, то може виникнути недостатнє тягове зусилля та навіть відсутність левітації. З іншого боку, занадто швидке наростання струму може призвести до пікових струмів та нагріву шляхових котушок.

У модульній системі керування, де шляхові котушки вмикаються і вимикаються незалежно, необхідно знати, скільки часу потрібно для досягнення стабільного режиму без перевищення зони насичення, щоб правильно задавати затримки перемикання секцій (dead time) та тривалість імпульсів. Це допоможе уникнути виходу з ладу елементів схеми керування (транзистори та драйвери).

Тому визначення часових показників робочого стану є необхідним для подальшого створення системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Для вказаного дослідження була використано експериментальний стенд (рис. 3.24).

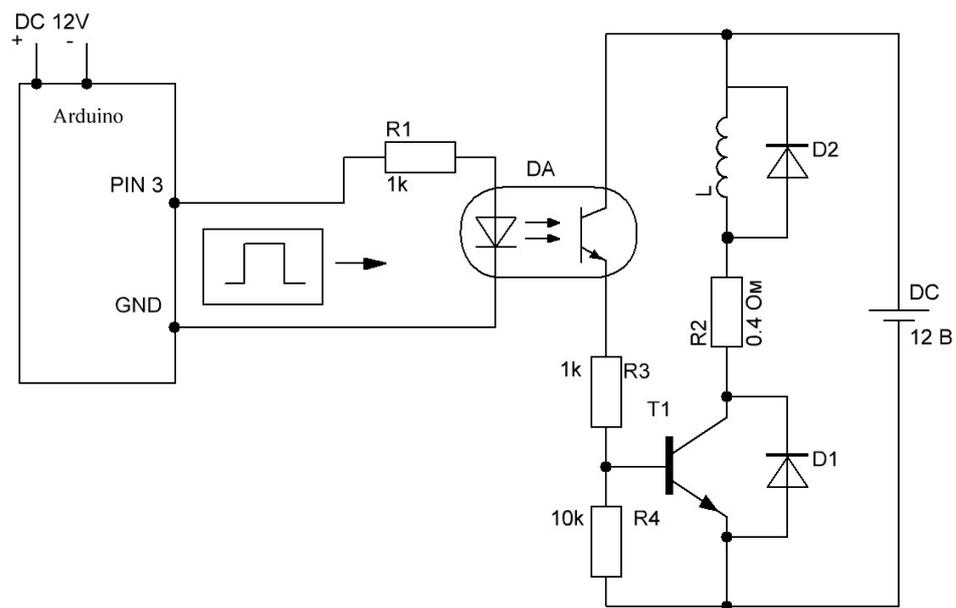


Рисунок 3.24 – Схема експериментального стенду з дослідження динамічних показників котушок

Для визначення динамічних параметрів на кожену котушку був поданий імпульс певної тривалості (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Характеристики поданих імпульсів на шляхову котушку

Котушка	Час імпульсу, мс	Час паузи, мс	Період, мс	Частота f, Гц
A	Дослідження не виконувалось			
B	0,4	0,4	0,8	1250
C	0,9	0,9	1,8	556
D	0,6	0,6	1,2	833
E	1,2	1,2	2,4	417

Для котушки А дослідження не виконувалось, оскільки обмоткові параметри цієї котушки виявились не доцільними для цього дослідження.

Осцилограми динамічних параметрів натурної моделі шляхових котушок наведені на рис. 3.25.

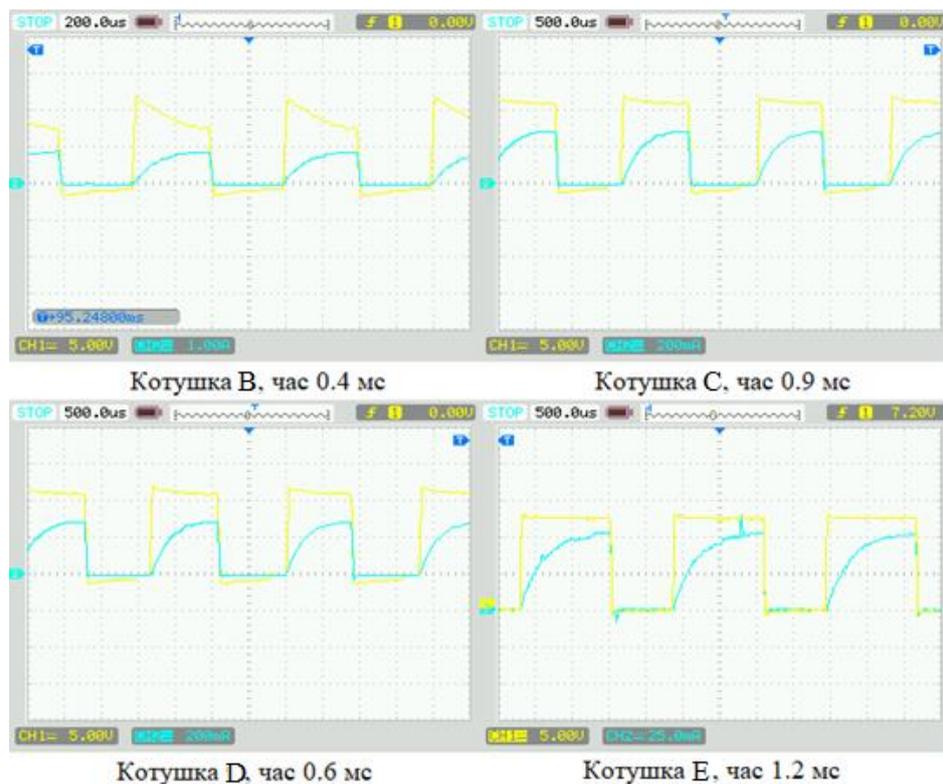


Рисунок 3.25 – Динамічні параметри шляхових котушок натурного стенду [61]

В результаті було виконано вимірювання значень часу до досягнення робочого стану для кожної котушки та середні показники зведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Середнє значення робочого часу шляхових котушок натурального стенду

Котушка	Робочий час, мс
А	Дослідження не виконувалось
В	287,6
С	675,8
Д	536,7
Е	1060,8

З отриманих результатів видно, що шляхова котушка В має найменший час досягнення робочого стану (≈ 288 мс), що свідчить про її найшвидшу реакцію. Найповільнішою є шляхова котушка Е (≈ 1061 мс), що може бути пов'язано з більшою індуктивністю або внутрішнім опором. Значення шляхових котушок С та Д займають проміжні значення.

Серед усіх досліджених котушок для подальшої роботи з розробки системи позиціонування шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту доцільно обрати котушку В, оскільки вона забезпечує найбільшу силу тяги та найшвидше досягає робочого режиму [61].

3.4 Висновки до третього розділу

1. Розроблена натурна модель, що дозволяє досліджувати режими роботи системи керування шляховою структурою магнітолевітаційного транспорту. Було запропоновано принцип секційної модульної системи керування рухом екіпажу натурної моделі. Будова натурального стенду передбачає наявність 8 секцій, кожна секція має 5 модулів (кожен модуль передбачає кріплення для 4 шляхових котушок), на екіпаж кріпиться 6 постійних магнітів (3 зовнішні, 3 внутрішні) за потрібною схемою S-N-S або N-S-N.

2. Виконано дослідження прототипів шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту та визначено їх реактивний опір в залежності від синусоїдального сигналу в діапазоні від 1 кГц до 200 кГц. Результати дослідження дозволяють оцінити необхідне значення частоти сигналу керування для натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

3. Визначено, що натурна модель шляхової котушки В має найменший час досягнення робочого стану (≈ 288 мс), що свідчить про її найшвидшу реакцію. «Найповільнішою» є шляхова котушка Е (≈ 1061 мс), що може бути пов'язано з більшим внутрішнім опором.

4. Серед усіх досліджених котушок для подальшої роботи з розробки системи позиціонування шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту доцільно обрати котушку В, оскільки вона забезпечує найбільшу силу тяги та найшвидше досягає робочого режиму, а також має проміжне значення внутрішнього опору, порівняно з іншими наявними прототипами шляхових котушок.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НАТУРНОГО СТЕНДУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХОВОГО МОДУЛЯ В РЕЖИМІ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

Для виконання мети дисертації ключовим етапом є створення системи позиціонування натурального стенду. Це дозволяє визначити діапазони просторових кутів положення екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Система позиціонування екіпажу в натурному стенді магнітолевітаційного транспорту призначена для точного визначення просторового положення рухомого об'єкта (екіпажу) відносно шляхової структури. Вона є ключовою складовою системи керування, оскільки координує подачу живлення на шляхові котушки, забезпечуючи послідовне ввімкнення та вимкнення шляхових модулів. Основою для визначення позиції є сигнал з енкодера, який фіксує поточну позицію проходження екіпажем модулів шляхової структури. Таким чином формується дискретна модель руху, де кожен відрізок траєкторії натурального стенду асоціюється з відповідною позицією та секцією котушок. Отримані сигнали подаються на мікроконтролер, який через Arduino Serial Monitor відображає послідовність сигналів в реальному часі.

Розробка системи позиціонування передбачає врахування низки факторів, таких як геометрія шляхового модуля та частота передачі даних. Важливо, щоб система була не лише функціональною, але й достатньо гнучкою для адаптації під різні алгоритми керування. Це дозволяє використовувати її для відтворення як статичних, так і динамічних режимів роботи натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Використання сучасних технологій та програмного забезпечення відкриває можливості для створення інтегрованих рішень, що поєднують

механічні та електронні підсистеми в єдину інфраструктуру системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Важливою вимогою до системи позиціонування є її потенційна сумісність із вимірювальними каналами та можливість синхронізації з програмним забезпеченням для виводу масивів даних в реальному часі, що дозволить проводити комплексні дослідження, поєднувати дані з різних джерел та формувати більш повну картину роботи шляхового модуля у різних режимах.

В поєднанні з розробкою системи позиціонування постає і завдання для експериментального визначення характеристик режиму неробочого ходу, оскільки таким чином можливо визначити необхідні положення для комутації шляхових катушок.

Режим неробочого ходу є початковим і базовим для оцінки функціональних властивостей шляхових катушок. Він дозволяє отримати інформацію про власні електромагнітні характеристики, не спотворені впливом додаткових навантажень [62].

Дослідження шляхового модуля у режимі неробочого ходу також має важливе значення для перевірки працездатності натурального стенду та дозволяє уточнити характеристики геометрії стенду та виявити недоліки в конструкції. Це забезпечує підвищення точності при подальшій розробці подібних натурних систем та зменшення похибки у прогнозуванні їх працездатності. Виявлення коливальних процесів, шумів та неузгодженостей на цьому етапі дозволяє в подальшому знизити вплив негативних факторів під час подальших досліджень.

Поєднання розробки системи позиціонування та досліджень режиму неробочого ходу створює основу для подальших досліджень динаміки натурних моделей магнітолевітаційних систем. Це дозволить не лише перевіряти гіпотези, але й відпрацьовувати нові режими та методи управління, аналізувати вплив частотних параметрів та оцінювати перспективи масштабування результатів.

Таким чином, дослідження шляхового модуля в режимі неробочого ходу та створення системи позиціонування натурального стенду є ключовим етапом у

комплексі робіт, спрямованих на потенційне вдосконалення технологій високошвидкісного транспорту.

4.1 Система позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

Для побудови системи позиціонування необхідно визначити необхідні алгоритми роботи системи (підйом, тяга, стабілізація).

Принцип створення тяги полягає в досягненні позиціонування (визначення поточної позиції екіпажу) та координації роботи всіх шляхових котушок, що дозволить давати команду на ввімкнення для створення ефекту левітації та подальшого розвитку тягового зусилля.

Наступним алгоритмом роботи є стабілізація, що буде виконуватись в певний проміжок часу для відслідковування та корегування відхилень, при їх наявності під час роботи.

Процес реалізації режиму тяги може складатись з трьох етапів, які чергуються між собою, а саме розгін, сталий рух, гальмування. Кожен з цих алгоритмів необхідно реалізувати в системі керування. Вони мають бути повторюваними для кожного окремого шляхового модуля та мати можливість оперативного корегування даних.

Робота системи позиціонування натурального стенду полягає в тому, що під час руху екіпажу в межах шляхової структури відбувається зміна положення енкодера, який передає сигнал через модуль RS422/TTL до мікроконтролера. Окремим контуром до мікроконтролера Arduino підключено датчик Холла, що дозволяє координувати початок та кінець секції або «нульову позицію». При обертанні енкодера виводиться через Arduino Serial Monitor позиція, яка в подальшому дозволяє визначити секцію, що в свою чергу визначає поточний шляховий модуль. Значення шляхового модуля буде відповідати місцю проходженню екіпажу в поточний момент часу.

Структура принципу позиціонування наведена на рис. 4.1.

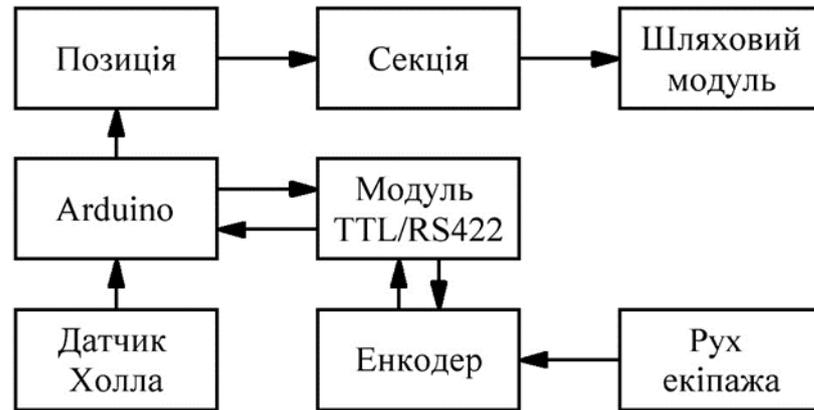


Рисунок 4.1 – Структура принципу координації натурального стенду

Створений натурний стенд магнітолевітаційного транспорту має кругову структуру та поділений на 8 секторів. На рис. 4.2 представлено схему розташування восьми секцій натурального стенду магнітолевітаційного транспорту.

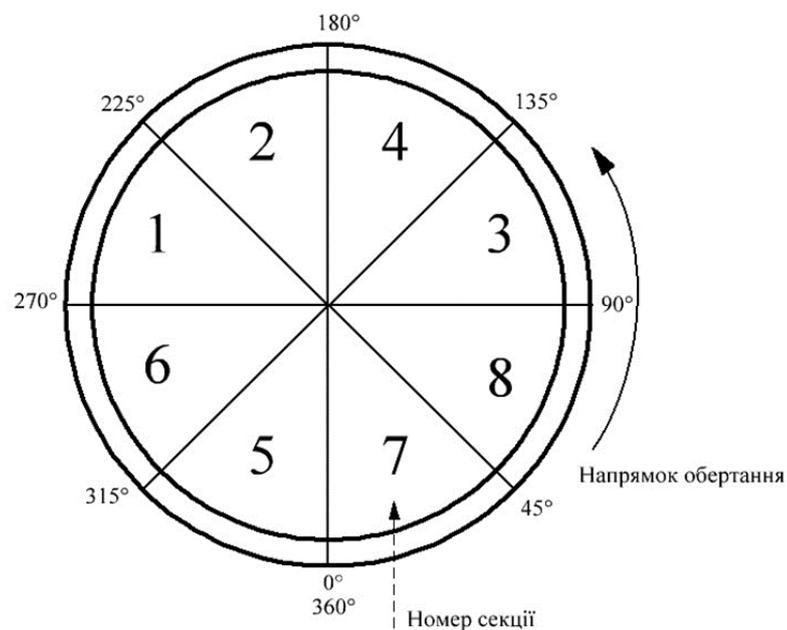


Рисунок 4.2 – Схематичне зображення порядку секцій натурального стенду

Кожна секція охоплює 45° сектору траєкторії, що відповідає 5 модулям (при загальній кількості 40 модулів).

Розташування позицій шляхових модулів натурального зображено на рис. 3.3. Кожен модуль містить чотири шляхові котушки (дві внутрішні та дві зовнішні), які призначені для створення тягового зусилля.

Для створення безперервного руху система керування повинна реалізувати алгоритм почергового перемикавання секцій, що включає дві активні секції одночасно. Поточну секцію, де перебуває екіпаж, і наступну за напрямком руху. В натурній моделі важливо враховувати перекриття магнітних полів шляхових котушок та магнітів, що встановлені на екіпажі.

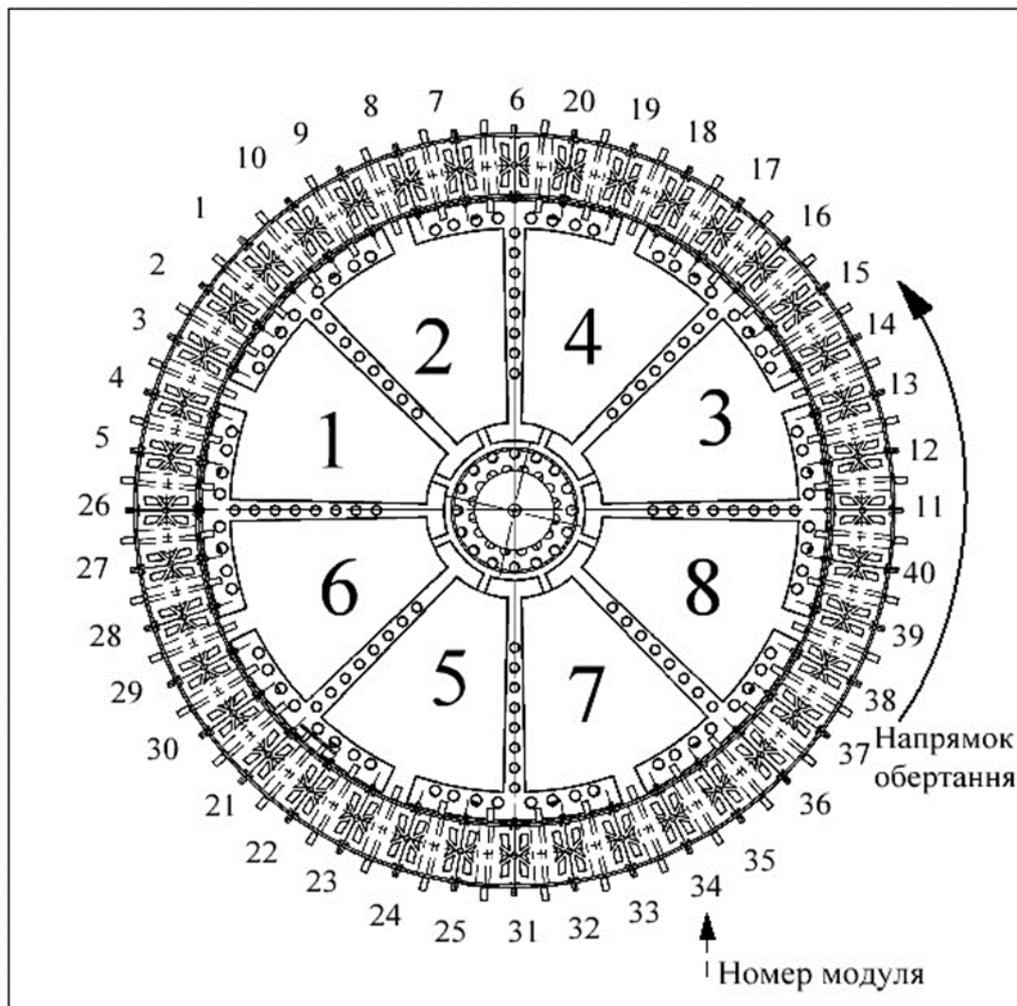


Рисунок 4.3 – Схематичне зображення порядку модулів натурального стенду

Основним елементом системи позиціонування натурального стенду є енкодер LIR-DA237T. Цей енкодер призначений для визначення кутового

положення, швидкості та напрямку обертання валів у різних електромеханічних системах. Його конструкція базується на принципі перетворення механічного переміщення (обертання) у дискретні електричні імпульси, що забезпечує цифрове відображення кутової координати.

Застосування енкодерів у експериментальних дослідженнях дозволяє отримати швидку передачу інформації, необхідну для дослідження динаміки транспортних систем. Завдяки поєднанню високої точності, надійності та універсальності, даний енкодер є доцільним вибором для системи позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Розташування енкодера на натурному стенді показано на рис. 3.4.



Рисунок 4.4 – Розташування енкодера на натурному стенді

Характеристики енкодера LIR-DA237T наведено в додатку Б.

Однак при виборі цього енкодера слід зазначити, що його інтерфейс комунікації несумісний з Arduino.

Інтерфейси RS422 та TTL належать до різних рівнів електричних сигналів, що застосовуються для передачі цифрової інформації. RS422 є диференціальним стандартом, який забезпечує високу завадостійкість і можливість передачі даних на значні відстані.

Натомість TTL (Transistor-Transistor Logic) використовується у більшості мікроконтролерів, зокрема Arduino, і характеризується однотоктним сигналом із відносно низькою напругою (зазвичай 5 В або 3,3 В). Для інтеграції цих двох середовищ необхідний перетворювач сигналів.

Процес перетворення сигналу з RS422 у TTL базується на застосуванні приймальних драйверів (line receivers), які виконують диференціальне підсилення та формування стандартного однотоктного сигналу. Такі мікросхеми, як MAX490, SN75176, AM26LS32, можуть виконувати цю функцію, забезпечуючи узгодження напруг та правильне відтворення логічних рівнів. У зворотному напрямку, для передачі даних від Arduino у лінію RS422, використовуються драйвери-передавачі, що формують диференціальні сигнали з однотоктного TTL-рівня.

В створюваній натурній моделі магнітолевітаційного транспорту для забезпечення роботи системи позиціонування та обробки сигналу, що надходить з енкодера застосовується модуль перетворення RS422/TTL, який представлений на рис. 4.5.

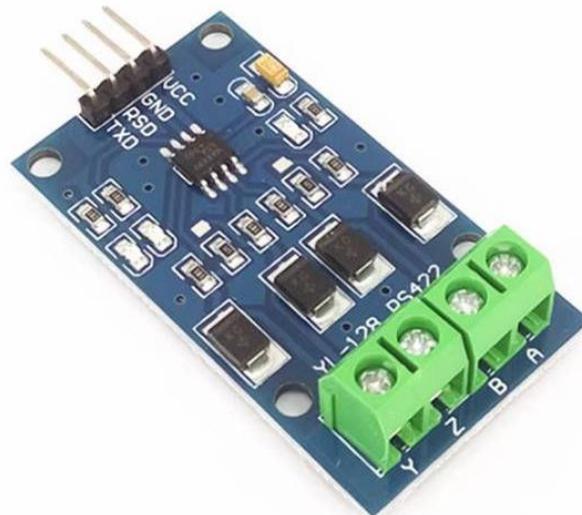


Рисунок 4.5 – Модуль RS422/TTL [77]

Застосування перетворювачів RS422/TTL дозволяє безпечно інтегрувати мікроконтролери Arduino у системи з промисловими інтерфейсами, де потрібна висока завадостійкість та стабільність передавання сигналів. Це особливо

актуально при створенні натурального стенду. Схема комунікації інтерфейсу RS422/TTL з енкодером LIR-DA237T наведена на рис. 4.6.

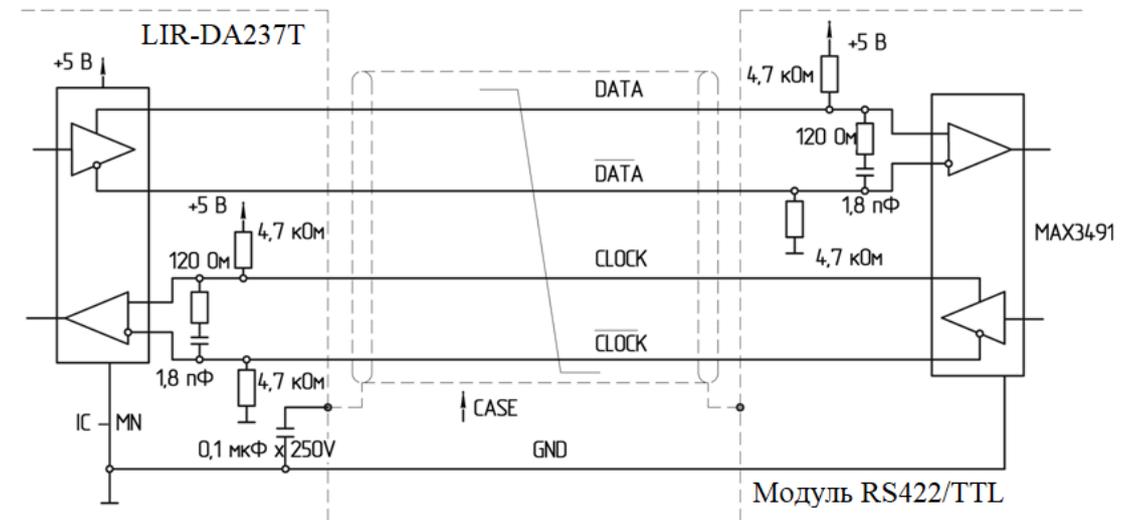


Рисунок 4.6 – Схема комунікації інтерфейсу RS422/TTL з енкодером LIR-DA237T [76]

Схема підключення енкодера LIR-DA237T передбачає використання диференціального інтерфейсу RS422 для передачі сигналів між енкодером та приймальним пристроєм. Сигнали інкрементальних каналів (A, B, Z) та тактових ліній передаються по парі проводів у диференціальному вигляді, що забезпечує високу завадостійкість та збереження форми імпульсу навіть при довгих кабельних з'єднаннях. Живлення енкодера здійснюється від джерела +5 В. У схемі також передбачено використання ліній приймачів, сумісних з RS422 (наприклад, SN75176 або AM26LS32), які перетворюють диференціальний сигнал у стандартні TTL-рівні для подальшої обробки мікроконтролером. Ця структура підключення дозволяє отримати надійну передачу даних навіть у складних умовах експлуатації, де можливі електромагнітні завади, великі відстані або вібрації.

Таким чином, рекомендована схема є універсальною основою для інтеграції енкодера LIR-DA237T для системи позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

4.2 Експериментальна перевірка системи позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

З метою верифікації працездатності розробленої системи координації натурного стенду було проведено експеримент, спрямований на фіксацію моменту подачі імпульса під час проходження екіпажу повз шляховий модуль.

На шляховому модулі встановлювався датчик Холла (рис. 4.7), що фіксував магнітне поле екіпажу при проходженні повз нього. Для системи позиціонування був обраний датчик Холла 3144Е, який є цифровим магнітним сенсором, що реагує на наявність магнітного поля, змінюючи свій вихідний стан. Він побудований на основі ефекту Холла і має вбудований компаратор, завдяки чому сигнал на виході формується у вигляді логічних рівнів (0 або 1). Така архітектура дозволяє підключати датчик безпосередньо до Arduino, що значно спрощує його використання в системах керування.

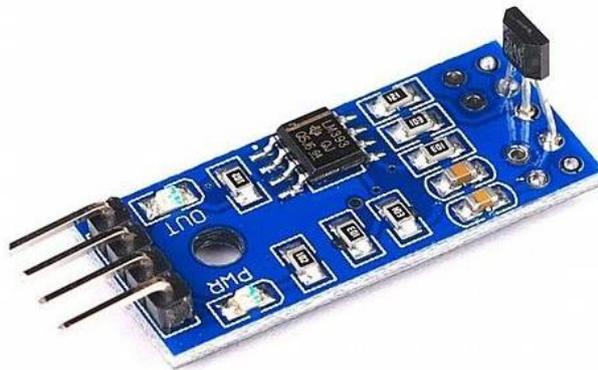


Рисунок 4.7 – Датчик Холла 3144Е [78]

У натурній моделі магнітолевітаційного транспорту датчик 3144Е може виконувати задачі з позиціонування та контролю швидкості руху екіпажу в межах шляхової структури.

Застосування датчика Холла у натурному стенді є доцільним з огляду на його простоту використання та низьку вартість. Використання кількох датчиків Холла дозволяє створювати багатоточкову систему позиціонування, яка може

застосовуватися для відпрацювання алгоритмів керування натурних моделей магнітолевітаційного транспорту.

Інтеграція 3144Е з Arduino також забезпечує можливість подальшої обробки сигналів та збереження масивів даних [78]. Використовуючи програмні бібліотеки Arduino, можна створити модель з визначення поданих імпульсів за певний проміжок часу в поєднанні зі швидкістю руху екіпажу. Таке застосування робить датчик Холла корисним інструментом не лише для вимірювання, а й для створення адаптивних систем керування в натурній моделі магнітолевітаційного транспорту.

Одним з рішень для виміру струму в натурних моделях магнітолевітаційного транспорту є модуль MCU-219 INA219 I2C. Даний цифровий датчик під'єднується до платформи Arduino і дозволяє вимірювати декілька параметрів, таких як струм, напруга, а також потужність. Швидкість передачі даних модуля складає 3.4 Мбіт/с. Застосування протоколу зв'язку I2C дозволяє під'єднувати на одну шину до 4-х різних пристроїв [79]. Для визначення динамічних показників шляхових котушок магнітолевітаційного транспорту під час перемикання на різні групи роботи можна застосовувати такі датчики або модулі виміру електричних параметрів. Контроль роботи може здійснюватись осцилографуванням вихідного сигналу рівня струму на котушці за допомогою програмно-апаратного комплексу [63].

Під час експериментальної перевірки системи позиціонування екіпаж з постійними магнітами та закріплений на обертовому механізмі, здійснював рух по шляховій структурі натурального стенду (рис. 4.8).

Після спрацювання датчика Холла, Arduino виконував команду подачі керуючого імпульсу довжиною 10 мс.

Результат експериментальної перевірки наведений на рис. 4.10.

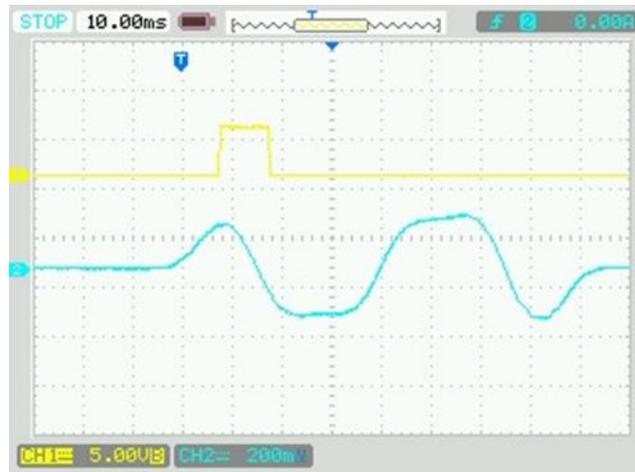


Рисунок 4.10 – Подача керуючого імпульсу при проходженні екіпажу повз шляховий модуль

В результаті була створена та експериментально перевірена система позиціонування натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Ця система дозволить реалізовувати визначені принципи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Програмний код для мікроконтролера Arduino, який застосовувався в дослідженні наведено в додатку Б.

В дослідженні [64] представлено методичний підхід до діагностики навігаційної системи магнітолевітаційної установки, що враховує аналіз точності позиціонування, реакції на зовнішні збурення та стійкості супутньої інерційної системи. Визначено чітку процедуру випробувань, яка включає вимірювання часових затримок між фактичним положенням транспортного засобу і сигналами навігаційної системи, ведення статистики похибок позиціонування у різних режимах руху та побудову діагностичних критеріїв (RMS-похибка, максимальна зміщення, частота поправок). Дослідження акцентує увагу на тому, що ефективність керування рухом

магнітолевітаційного транспортного засобу значною мірою залежить від якості позиціонування.

Таким чином, чим менша похибка системи позиціонування, тим точніше відбувається комутація модулів тягової системи. Запропоновані процедури дають можливість виявити слабкі місця системи позиціонування, наприклад, великий час затримки або нестійкість при переході між секціями системи керування.

4.3 Принцип подачі керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту

При розробці системи позиціонування важливим моментом є її здатність забезпечувати послідовну подачу керуючого імпульсу, оскільки саме таким чином забезпечується почергове вмикання шляхових котушок. Для виконання цієї задачі було відредаговано код, який використовувався для фіксації керуючого імпульсу при проходженні екіпажу повз шляховий модуль.

Було визначено, що для забезпечення принципів керування необхідно виконувати подачу керуючого імпульсу при зміні позиції енкадера, під час руху екіпажу. Таким чином, цей етап є необхідним для реалізації режимів роботи системи керування шляховою структурою натурної моделі високошвидкісного транспорту. Було проведено подачу серії імпульсів на одну шляхову котушку при зміні позиції.

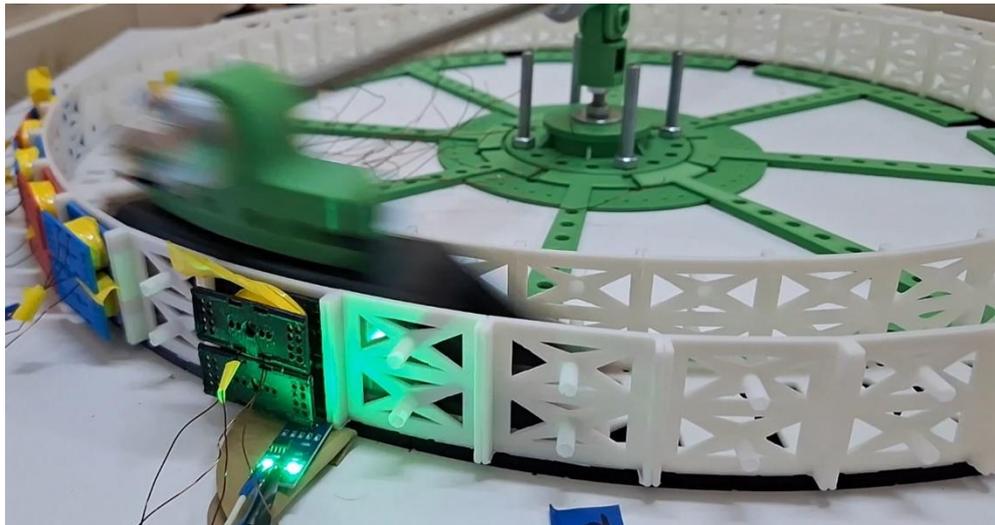


Рисунок 4.11 – Проходження екіпажу повз шляховий модуль
 Інформація з монітору серійного порту Arduino наведено на рис. 4.12.

```

COM6
-----
12:58:42.064 ->  Позиція: 249  Секція: 8  Модуль: 39
12:58:42.064 ->  Позиція: 253  Секція: 8  Модуль: 40
12:58:42.156 ->  Позиція: 85   Секція: 3  Модуль: 14
12:58:42.247 ->  Позиція: 83   Секція: 3  Модуль: 13
12:58:42.293 ->  Позиція: 90   Секція: 3  Модуль: 15
12:58:42.339 ->  Позиція: 89   Секція: 3  Модуль: 14
12:58:42.385 ->  Позиція: 93   Секція: 3  Модуль: 15
12:58:42.523 ->  Позиція: 73   Секція: 3  Модуль: 12
12:58:42.569 ->  Позиція: 77   Секція: 3  Модуль: 13
12:58:42.615 ->  Позиція: 76   Секція: 3  Модуль: 12
12:58:42.661 ->  Позиція: 78   Секція: 3  Модуль: 13
12:58:42.799 ->  Позиція: 69   Секція: 3  Модуль: 11
12:58:43.074 ->  Позиція: 109  Секція: 4  Модуль: 18
12:58:43.120 ->  Позиція: 102  Секція: 4  Модуль: 16
12:58:43.212 ->  Позиція: 116  Секція: 4  Модуль: 19
12:58:43.258 ->  Позиція: 114  Секція: 4  Модуль: 18
12:58:43.350 ->  Позиція: 123  Секція: 4  Модуль: 20
12:58:43.487 ->  Позиція: 42   Секція: 2  Модуль: 7
12:58:43.579 ->  Позиція: 45   Секція: 2  Модуль: 8
12:58:43.625 ->  Позиція: 44   Секція: 2  Модуль: 7
12:58:43.717 ->  Позиція: 46   Секція: 2  Модуль: 8
12:58:44.956 ->  Позиція: 37   Секція: 2  Модуль: 6
12:58:45.048 ->  Позиція: 39   Секція: 2  Модуль: 7
12:58:45.140 ->  Позиція: 32   Секція: 2  Модуль: 6
-----
 Автопрокручування  Показати позначки часу
  
```

Рисунок 4.12 – Arduino Serial Monitor під час перевірки принципу подачі керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу
 В результаті було отримано серію з послідовних імпульсів, які виникали після зміни позиції екіпажу (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Подача керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу

Принцип подачі керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу є необхідним для створення загальної системи керування секціями шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту [65].

Ці результати є необхідними для створення топології керування секціями та окремими модулями натурної моделі.

Програмний код для мікроконтролера Arduino, який застосовувався при перевірці подачі керуючого імпульсу при зміні позиції екіпажу натурної моделі магнітолевітаційного транспорту наведено в додатку Б.

4.4 Перспективи застосування мікроконтролерів різних типів для керування режимами роботи шляховою структурою

Розвиток натурних моделей магнітолевітаційного транспорту потребує удосконалення систем керування, здатних забезпечити точне позиціонування рухомого екіпажу та узгоджену роботу шляхових котушок. У натурних моделях маглев-транспорту це завдання ускладнюється потребою у злагодженій частоті перемикання секцій та певними часовими затримками. Ефективність руху значною мірою визначається алгоритмами керування, що координують роботу енкодера, контролера та силових елементів.

Перспективним варіантом є застосування систем позиціонування, яка складається з енкодера, що генерує керуючі імпульси при русі екіпажу та мікроконтролера STM32, що виконує апаратну обробку сигналів у реальному часі [82]. На основі цієї інформації формуються сигнали керування, які активують відповідні шляхові котушки. Використання STM32 дозволить реалізувати повний цикл керування секцією натурної моделі без проміжних пристроїв, що в результаті мінімізує затримки й підвищить точність позиціонування [66].

Базовий принцип алгоритму керування в такій системі полягає у послідовному вмиканні та вимиканні секцій шляхових котушок відповідно до положення екіпажу. При надходженні імпульсу від енкодера STM32 активує наступну секцію та деактивує попередню. Для плавності руху необхідно враховувати елемент перекриття активних секцій, коли наступна котушка вмикається до повного проходження поточної. Описаний підхід забезпечить стабільність тяги й дозволить зменшити динамічні коливання під час руху.

Для усунення часових зсувів між фіксацією положення та фактичним вмиканням котушок STM32 використовує апаратні таймери та переривання [82].

Підвищення точності позиціонування може виконувати прогнозоване керування, розраховуючи положення екіпажу на кілька тактів уперед на основі його швидкості та прискорення за допомогою необхідних датчиків. У перспективі можливе впровадження адаптивного регулятора, здатного змінювати свої параметри залежно від динаміки руху. Застосування такого способу дозволить мінімізувати помилки синхронізації при переходах між режимами розгону, рівномірного руху та гальмування.

З метою підвищення надійності можливою є перспектива розробки механізмів виявлення хибних імпульсів енкодера та самокорекції позиції. Якщо система фіксуватиме невідповідність між кількістю очікуваних і фактичних імпульсів, мікроконтролер STM32 виконуватиме корекцію поточного стану.

Запропоновані алгоритми керування на основі мікроконтролерів STM32 можуть забезпечити більш точне позиціонування екіпажу, плавне керування тягою та високу стабільність руху екіпажу натурального стенду магнітолевітаційного транспорту. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розроблення адаптивних алгоритмів і підвищення енергоефективності системи при масштабуванні кількості секцій шляху.

Іншим варіантом є застосування систем керування з різними типами мікроконтролерів та їх комунікації. Варіантами таких систем можуть бути мікроконтролери «Arduino UNO-Arduino MEGA», «Arduino UNO-STM32» [80-82].

Мікроконтролери Arduino можуть використовуватися як проміжна ланка для збору сигналів з енкодера та передачі їх до основного модуля керування. Завдяки простоті реалізації Arduino забезпечує надійне зчитування сигналів енкодера у реальному часі, фільтрацію шумів і передачу оброблених даних по інтерфейсу UART або I²C. Це дозволяє швидко відлагодити роботу енкодера та виконувати первинну діагностику сигналів, не перевантажуючи основний процесор системи [80,81].

Мікроконтролер STM32 може виконувати функцію центрального блоку обробки та керування подачею струму на шляхові котушки. Завдяки високій швидкодії та можливості апаратного оброблення переривань STM32 синхронізує імпульси з енкодера з моментами активації котушок [82]. Він визначає, коли вмикати або вимикати конкретну секцію шляху, забезпечуючи плавний перехід магнітного поля та безперервність тяги екіпажу.

Після зчитування імпульсів енкодера, Arduino формує сигнал із зазначенням номера модуля та секції, який передається на STM32. В свою чергу, STM32, отримавши ці дані, звертається до визначеної таблиці активних секцій і визначає, яку котушку активувати наступною. Система побудована таким чином, щоб мінімізувати затримку між моментом фіксації положення й подачею імпульсу на відповідну секцію.

Такі системи керування натурною моделлю магнітолевітаційного транспорту є передумовою до створення адаптивних систем позиціонування, які можуть підлаштовувати свої параметри в реальному часі для досягнення необхідного режиму роботи в умовах змінних або невідомих характеристик руху натурної моделі

У натурних моделях магнітолевітаційного транспорту для контролю руху і підтримки левітації необхідні високоточні адаптивні контролери. Один із прикладів таких контролерів, який міг би бути застосований у маглеві завдяки використанню платформи dSPACE MicroLabBox [83]. Це платформа для швидкого прототипування, яка використовується для розробки та тестування адаптивних систем управління в реальному часі. Вона підтримує складні алгоритми адаптивного керування і може бути інтегрована з різними сенсорами та виконавчими механізмами, що робить її придатною для натурних магнітолевітаційних систем. Така система може працювати з адаптивними алгоритмами, такими як Model Reference Adaptive Control (MRAC) або нейромережеві моделі, що дозволяє системі підлаштовуватися під змінні умови, наприклад, зміну швидкості [67].

4.5 Дослідження шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту в режимі неробочого ходу

Режим неробочого ходу в системах магнітолевітаційного транспорту використовується для дослідження процесів електромагнітної індукції у шляхових котушках без підключення активного джерела живлення.

Такий підхід дозволяє дослідити фундаментальні закономірності взаємодії постійних магнітів екіпажу з елементами шляхової структури та оцінити індуковані електричні сигнали в умовах, максимально наближених до реального руху.

У натурному експерименті екіпаж оснащувався системою з трьох постійних магнітів, розташованих за схемою S-N-S, що забезпечувало

чергування полярності магнітного поля та формування чіткої індукційної картини при проходженні повз шляхові котушки. Це дозволяло отримати стабільні індуквані сигнали та наблизити експеримент до умов, характерних для систем з багатополюсними магнітними підвісами.

Для ініціації руху екіпажу застосовувався привідний механізм з електродвигуном, який задавав швидкість проходження екіпажу по радіальній траєкторії шляхової структури. Вигляд привідного механізму натурального стенду магнітолевітаційного транспорту показаний на рис. 4.14.



Рисунок 4.14 – Привідний механізм натурального стенду магнітолевітаційного транспорту

Характеристику проходження екіпажу повз шляховий модуль наведено на рис. 4.15

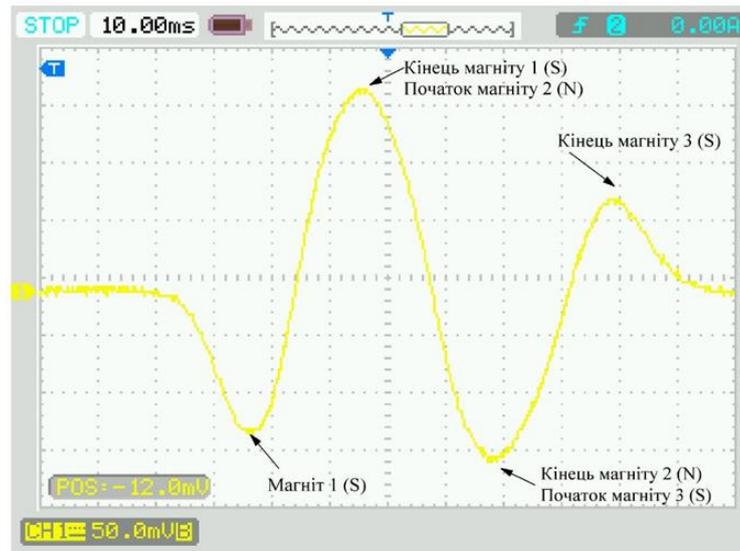
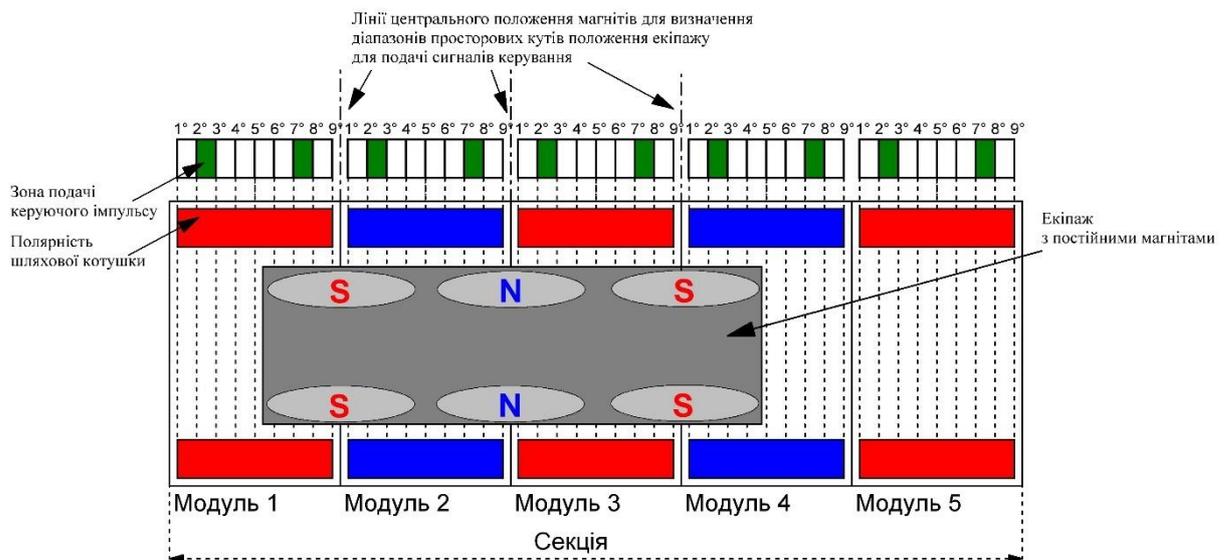


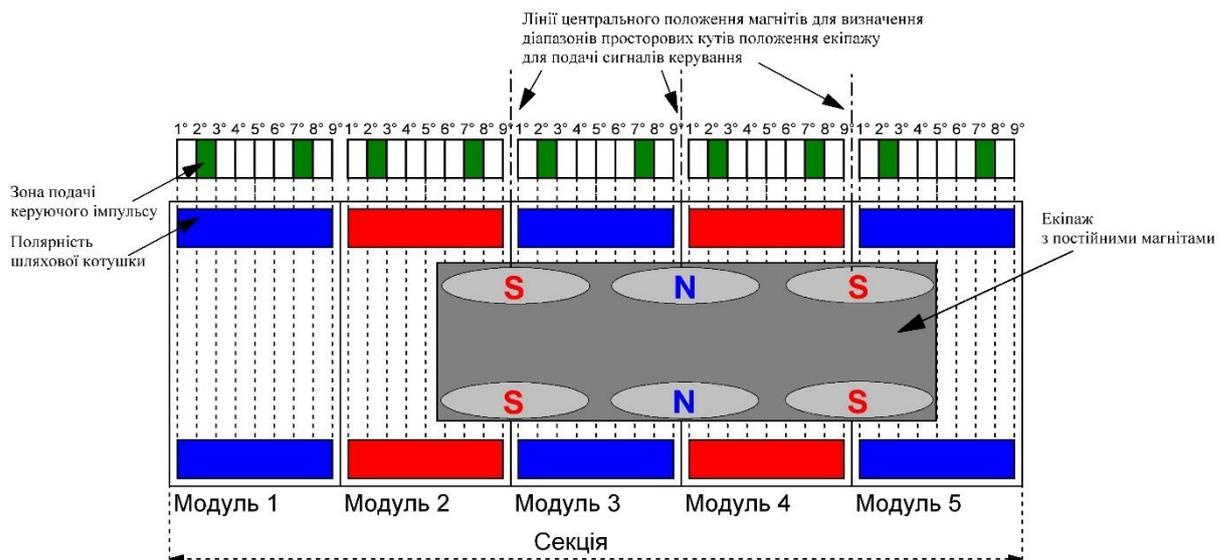
Рисунок 4.15 – Опис проходження екіпажу повз шляхову котушку

Під час проходження екіпажу повз шляхову котушку на осцилограмі (рис. 4.15) фіксується характерна зміна ЕРС, індукована рухом магнітів та обмоткою шляхової котушки. Кожен магніт формує окремий синусоїдальний сигнал. Спочатку спостерігається негативний пік при наближенні південного полюса першого магніту, далі виникає позитивний пік у момент переходу до північного полюса наступного. Такі хвилеподібні коливання відображають послідовний рух трьох магнітів екіпажу відносно однієї котушки. Максимуми та мінімуми сигналу відповідають моменту, коли вісь магніту знаходиться точно над геометричним центром котушки, тобто коли зміна магнітного потоку є найбільшою.

Найбільш раціональним моментом подачі керуючого імпульсу на шляхову котушку є ділянка перед досягненням пікового значення індукованої ЕРС, коли магніт лише входить у зону активного впливу котушки. Це дозволяє вчасно сформувати магнітне поле, яке створює тягову силу без фазового запізнення. Також доцільно завершувати подачу струму після проходження максимуму, коли магніт залишає котушку, щоб уникнути зустрічної сили та втрат енергії.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Визначення діапазонів просторових кутів для подачі керуючого імпульса

а) Полярність «режим 1»; б) Полярність «режим 2».

Таким чином, раціональним моментом подачі керуючого сигналу на шляхову котушку є інтервал між початком наростання ЕРС та досягненням піка це забезпечує максимально ефективний вплив котушки на екіпаж. Якщо умовно поділити кожен модуль на градуси (один модуль матиме 9°), то для уникнення похибок з перемиканням модулів момент вмикання шляхової котушки можна

визначити як $2...3^\circ$, а момент вимикання $7...8^\circ$. Такий режим роботи дозволить досягти робочого значення шляхової котушки.

Неробочий хід при проходженні екіпажу повз дві шляхові котушки показує реакцію котушок на магніти, що розташовані в екіпажі (рис. 4.17)



Рисунок 4.17 – Характеристика двох шляхових котушок

На модулі шляхової структури було встановлено верхню та нижню шляхові котушки, що дозволяло реєструвати осцилографом (рис. 4.18) відмінності в індукованих сигналах залежно від просторового розташування шляхової котушки відносно магнітів екіпажу.

Осцилограма неробочого ходу для двох послідовно розташованих шляхових модулів наведено на рис. 4.18.

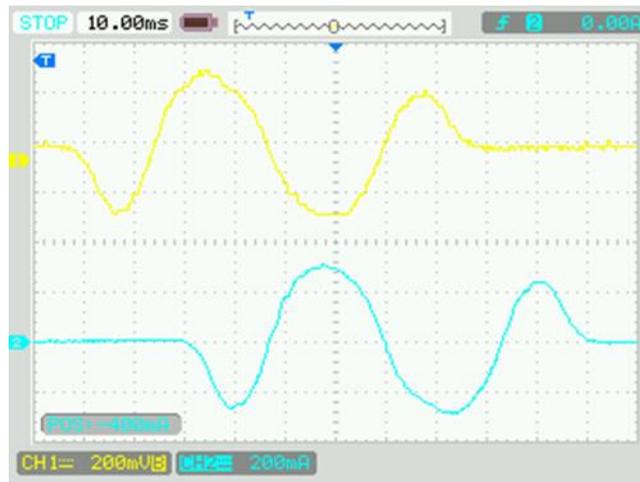


Рисунок 4.18 – Осцилограма режиму неробочого ходу
двох послідовних модулів

Окрему увагу було приділено порівнянню сигналів, знятих з верхньої та нижньої шляхової котушки. Різниця у фазі та амплітуді дозволяє зробити висновки про просторовий розподіл магнітного поля екіпажу та особливості взаємодії різних магнітних полюсів з провідниками.

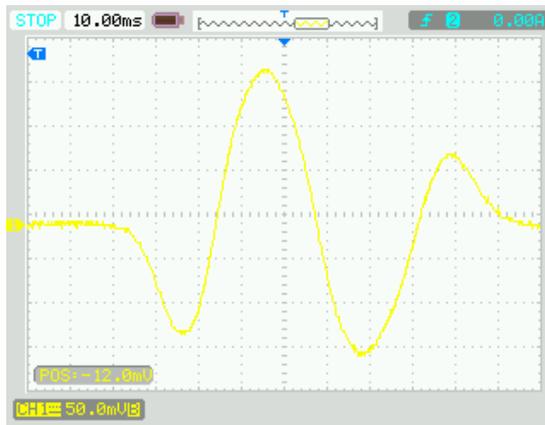
На осцилограмах (рис. 4.19) зображено індуковані сигнали у шляхових котушках внутрішньої сторони натурального стенду під час проходження екіпажу з магнітами в неробочому режимі при висоті екіпажу 0 та 4 мм.



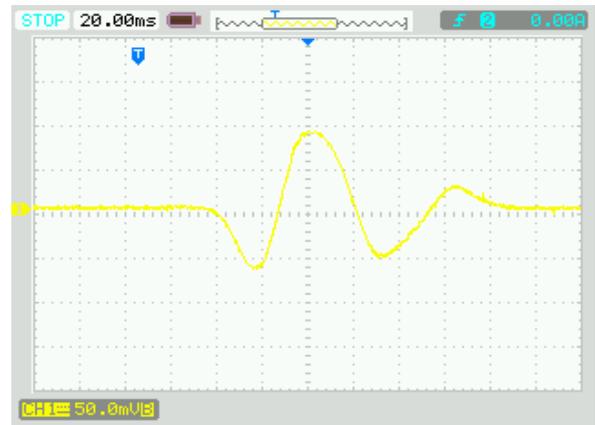
А



Б



С



Д

Рисунок 4.19 – Осцилограми шляхової котушки, внутрішня сторона,

А – верхня котушка, висота екіпажу 0 мм,

Б – верхня котушка висота екіпажу 4 мм ,

С – нижня котушка, висота екіпажу 0 мм,

Д – нижня котушка висота екіпажу 4 мм;

Індукований сигнал на рис. 4.19 має характерні коливальні форми, що зумовлено зміною магнітного потоку під час руху магнітів відносно шляхової котушки. У випадку верхньої та нижньої котушок на висоті екіпажу 0 мм (графіки А і С) спостерігаються найбільш виражені амплітуди, оскільки магнітне поле діє безпосередньо і з мінімальним послабленням.

При піднятті екіпажу на висоту 4 мм (графіки Б і Д) амплітуди сигналів помітно зменшуються, що пояснюється збільшенням відстані повітряного зазору між магнітами та шляховими котушками, а отже, зниженням індукованої

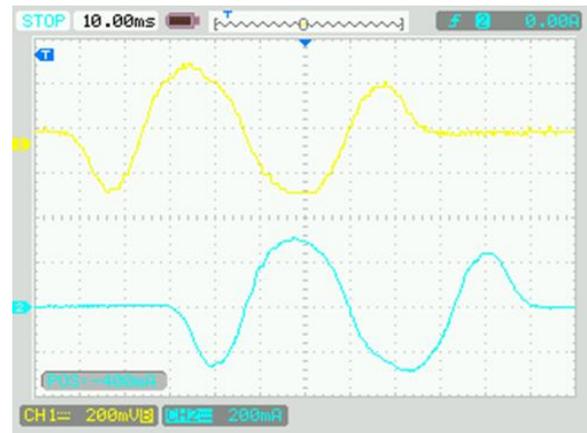
ЕРС. Також змінюється форма сигналу, оскільки імпульси ЕРС стають більш згладженими та розтягнутими у часі, що свідчить про слабший вплив магнітного поля на шляхові котушки.

Результати демонструють чітку залежність величини та форми індукованого сигналу від положення екіпажа відносно шляхових котушок. Мінімальна відстань (0 мм) забезпечує найбільш інтенсивний сигнал із різко вираженими піками, тоді як при збільшенні висоти до 4 мм інтенсивність сигналу значно знижується, що підтверджує важливість просторового розташування магнітів для ефективності індукційної взаємодії.

На осцилограмах (рис 4.20) показано характеристики неробочого ходу шляхових котушок двох послідовних модулів зовнішньої сторони натурального стенду при проходженні екіпажу з магнітами.



А



Б



С



Д

Рисунок 4.20 – Осцилограми неробочого ходу шляхових котушок двох послідовних модулів, зовнішня сторона,
 А – верхні котушки, висота екіпажу 0 мм,
 Б – нижні котушки висота екіпажу 4 мм,
 С – нижні котушки, висота екіпажу 0 мм,
 Д – нижні котушки висота екіпажу 4 мм;

На рис. 4.20 для верхніх котушок при висоті екіпажу 0 мм. (графік А) спостерігається чіткий симетричний коливальний сигнал з вираженими піками, що відповідає інтенсивному впливу магнітного поля.

У випадку нижніх котушок на висоті екіпажу 0 мм. (графік С) амплітуди сигналів дещо менші, однак форма ЕРС зберігає схожість із сигналами верхніх котушок. Це свідчить про узгодженість роботи шляхових котушок у межах двох модулів та підтверджує, що магнітне поле екіпажу рівномірно впливає на

конструкцію при мінімальному зазорі. При збільшенні висоти екіпажу до 4 мм (графіки Б та Д) амплітуди індукованих сигналів істотно зменшуються, особливо для нижніх шляхових котушок, що пов'язано з ослабленням магнітного потоку через збільшення повітряного проміжку.

Додатковим чинником спотворення сигналу є механічна складова натурної моделі, де рух екіпажу по шляховій структурі забезпечується приводним електродвигуном. Наявність електромеханічного приводу вносить в систему певні мікрівібрації та нерівномірності руху, які також можуть впливати на форму сигналу.

Особливістю роботи двох послідовних шляхових модулів є наявність фазового зсуву та більш складної форми сигналів. Це пояснюється взаємодією магнітного поля екіпажу одразу з двома шляховими модулями, в результаті чого індуковані ЕРС частково накладаються.

Отримані результати підтверджують, що під час проходження екіпажу повз послідовні шляхові модулі характер індукованих сигналів визначається відстанню екіпажу до поверхні, так і взаємним розташуванням котушок у сусідніх шляхових модулях.

На осцилограмі (рис 4.21) показано сигнали двох котушок, розташованих послідовно у різних модулях.



Рисунок 4.21 – Характеристика режиму неробочого ходу двох модулів, зовнішня сторона натурної моделі, верхня та нижня шляхові котушки, висота екіпажу 4 мм

На рис. 4.21 для верхньої котушки спостерігається більш висока амплітуда з вираженим центральним піком, тоді як сигнал нижньої котушки відстає у фазі та має меншу інтенсивність. Це вказує на те, що магнітне поле екіпажу при збільшеній висоті 4 мм слабше індукує ЕРС у нижній котушці, оскільки вона розташована далі від джерела магнітного потоку. Форма сигналу характеризується наявністю подвійних піків та додаткових коливальних компонент, що пояснюється взаємодією магнітних потоків від двох шляхових котушок та частковим накладанням сигналів із різним часовим зсувом. Це є типовим проявом багатомодульної структури, де форма ЕРС визначається не тільки положенням екіпажу, але й послідовною роботою котушок у різних шляхових модулях.

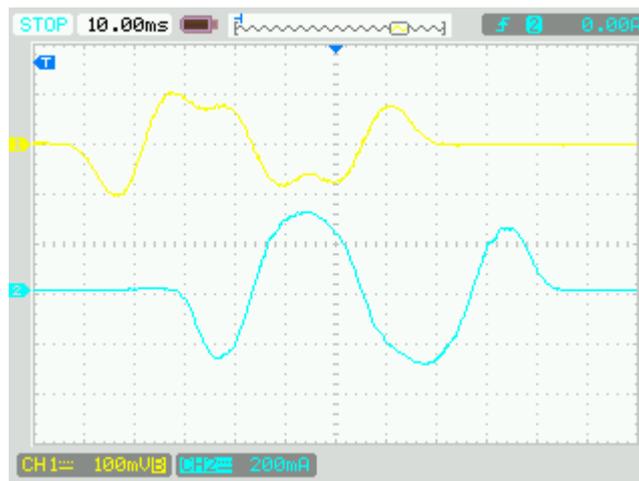


Рисунок 4.22 – Осцилограма режиму неробочого ходу двох модулів, Зовнішня сторона, модуль 1 – нижня котушка, модуль 2 – верхня котушка, висота екіпажу 4 мм

На рис. 4.22 нижня шляхова котушка (перший модуль) формує сигнал із менш вираженими піками, проте зі значною тривалістю коливань, тоді як верхня котушка (другий модуль) дає більш інтенсивний та «чіткіший» сигнал. Це підтверджує, що розташування котушки у структурі модуля істотно впливає на інтенсивність та часову форму сигналу при однаковій висоті екіпажу. У даному випадку також наявне явище фазового зсуву, коли піки сигналів

верхньої та нижньої котушок не збігаються у часі, що пов'язано з послідовним розташуванням котушок під дією магнітного поля рухомого екіпажу.

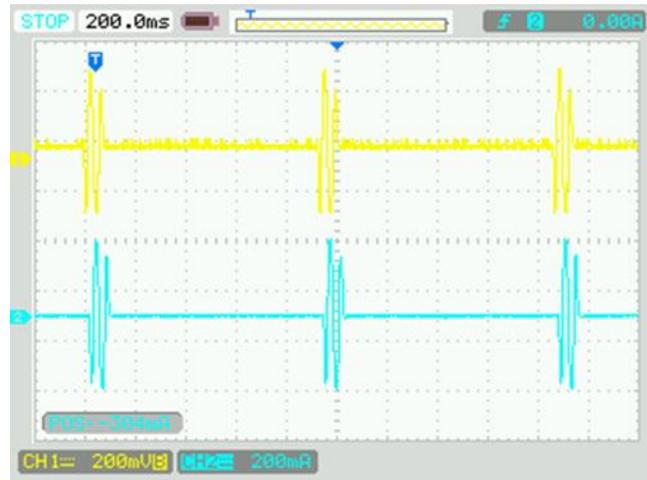


Рисунок 4.23 – Осцилограма режиму неробочого ходу, проходження екіпажем три кола повз шляховий модуль

На осцилограмі (рис. 4.23) зображено характеристику неробочого ходу при багаторазовому проходженні екіпажу повз один і той самий шляховий модуль. Спостерігаються три чіткі серії імпульсів, що відповідають трьом колам руху. Сигнали мають однакову форму та повторюваність, що свідчить про стабільність процесу індукції в шляхових котушках та відсутність суттєвих змін у параметрах руху екіпажу чи роботи натурної моделі під час експерименту. Чітка повторюваність імпульсів у часі підтверджує правильність побудованої схеми дослідження й дає можливість оцінити сталість індукційних характеристик при циклічному русі.

Важливою особливістю цього етапу дисертації є те, що режим неробочого ходу не потребує зовнішнього живлення шляхових котушок, а всі сигнали формувалися виключно завдяки природним електромагнітним процесам. Це дозволяло проводити експерименти без додаткового впливу системи живлення на результати.

Дослідження неробочого ходу також дає змогу перевірити правильність монтажу котушок, а також оцінити якість виготовлення шляхового модуля. Це

мало важливе значення на етапі калібрування та підготовки натурального стенду до подальших випробувань.

Застосування такої методики у натурному стенді дозволяє не тільки спостерігати за сигналами, але й використовувати їх як зворотний зв'язок у системі керування, наприклад, для оцінки швидкості руху екіпажу або визначення його положення відносно шляхової структури.

Режим неробочого ходу є необхідним етапом у дослідженнях магнітолевітаційного транспорту, адже він забезпечує можливість безпечної та наочної демонстрації електромагнітних процесів, що відбуваються у шляхових котушках під час руху магнітного екіпажу.

Узагальнюючи, можна сказати, що цей режим дозволяє не лише виявити основні закономірності індукції у шляхових котушках, але й забезпечує перевірку працездатності та калібрування стенду перед подальшими експериментами з живленням шляхових котушок, процесом керування та дослідженням перехідних процесів.

Основним результатом цього етапу дослідження є отримання осцилограм форми ЕРС шляхових котушок. Відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея, зміна магнітного потоку крізь витки котушки при русі магнітів викликала появу електрорушійної сили, що й відображалось на осцилограмі у вигляді періодичного сигналу. Амплітуда та частота індукованої синусоїди залежали від швидкості руху екіпажу. При збільшенні швидкості обертання електродвигуна спостерігалось, як зростання частоти проходження піків синусоїди, так і підвищення амплітуди сигналу, що свідчило про більш інтенсивну зміну магнітного потоку.

Дослідження режиму неробочого ходу дозволило оцінити характер та гармонійний склад індукваного сигналу. Наявність відхилень від ідеальної синусоїди може свідчити про нерівномірність розподілу магнітної індукції, конструктивні особливості магнітів або можливі паразитні (коливальні) впливи від електромеханічної частини стенду.

4.6 Принципи формування режимів роботи шляхової структури натурального стенду магнітолевітаційного транспорту

Формування принципів режимів роботи шляхової структури натурального стенду магнітолевітаційного транспорту полягає у використанні закономірностей електромагнітної індукції, залежності параметрів сигналу від положення та швидкості екіпажу, а також у можливості інтеграції енергосистем та датчиків виміру електричних показників в єдину секційну інфраструктуру. Це дозволить перейти до створення алгоритмів керування, які забезпечать узгоджену роботу всієї шляхової структури натурної моделі [1, 46, 71].

Сигнали для вмикання та вимикання шляхових котушок можуть формуватися за принципом послідовної активації, коли кожна секція включається у момент наближення екіпажу й вимикається після його проходження. Такий режим забезпечує мінімальні втрати енергії, адже активними залишаються лише ті котушки, що безпосередньо взаємодіють із магнітами екіпажу натурної моделі [71].

Іншим підходом є паралельна активація, коли одночасно вмикається декілька сусідніх секцій. Це створює більш протяжне поле взаємодії, що може забезпечити плавність руху екіпажу, зменшити ризик стрибків струму й підвищити стабільність тяги. Недоліком є зростання енерговитрат.

Найбільш перспективним для високошвидкісних систем є режим комбінованого керування, який поєднує послідовність і паралельність. Наприклад, основна секція вмикається вчасно, а сусідня може підключатися з регульованою затримкою для згладжування перехідних процесів. Такий принцип дозволяє адаптивно змінювати характер сигналів відповідно до швидкості руху екіпажу натурної моделі [71].

Застосування затримок у керуючих сигналах також дає змогу контролювати електромагнітну взаємодію, що є критичною для синхронізації руху та імпульсів керування на високих швидкостях. При коректному налаштуванні часових параметрів система може мінімізувати втрати й уникати небажаних коливань.

Формування сигналів для вмикання шляхових котушок є ключовою передумовою ефективного управління [68]. Вибір між послідовною, паралельною чи комбінованою стратегією має здійснюватися з урахуванням швидкісного режиму, динамічних характеристик екіпажу та вимог до енергетичної ефективності експериментальної установки. Визначені принципи керування дають можливість застосувати секційний режим роботи. Система керування дозволить вмикати або вимикати групи котушок у потрібний момент, орієнтуючись на поточне положення екіпажу натурної моделі.

Дослідження режиму неробочого ходу дозволило перевірити, що при присутності механічних коливань натурального стенду індуквані сигнали зберігають стійку форму. Це є передумовою для створення надійної системи управління, здатної працювати в умовах динамічних впливів.

Результати створення системи позиціонування показали, що шляхові котушки натурної моделі можуть потенційно виконувати певні функції, а саме створення тягового зусилля та забезпечення позиціонування. Цей результат є основою для визначених принципів управління.

4.7 Висновки до четвертого розділу

1. Визначено, що для відтворення динамічних режимів руху необхідно забезпечити точну координацію комутації шляхових модулів. Для цього було використано енкодер та датчик Холла, які дозволяють визначати положення й координати екіпажу в реальному часі.

2. Було виконано верифікацію працездатності розробленої системи позиціонування натурального стенду та проведено експеримент, спрямований на фіксацію реакції керуючої системи (подача імпульса 10 мс) у момент проходження екіпажу повз шляховий модуль.

3. Аналіз отриманих осцилограм неробочого ходу дозволив прогнозувати раціональні моменти часу для комутації шляхових модулів в режимі тяги. Раціональним моментом подачі керуючого сигналу на шляхову котушку є інтервал між початком наростання ЕРС та досягненням піка це забезпечує

максимально ефективний вплив котушки на екіпаж. Якщо умовно поділити кожен модуль на градуси (один модуль матиме 9°), то для уникнення похибок з перемиканням модулів момент вмикання шляхової котушки можна визначити як $2...3^\circ$, а момент вимикання $7...8^\circ$. Такий режим роботи дозволить досягти робочого значення шляхової котушки.

5. Дослідження шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту в режимі неробочого ходу дозволило визначити, що розміщення верхньої та нижньої шляхових котушок (при різній висоті підйому екіпажу (0 мм та 4 мм) дозволяє порівнювати індуковані в них сигнали і визначати фазові та амплітудні зсуви.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну задачу дослідження режимів роботи системи керування шляховою структурою натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

Основні наукові та практичні результати, висновки полягають в наступному.

1. Визначено передумови для імітаційного моделювання процесів шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. Проведений аналіз об'єктів моделювання підсистем магнітолевітаційного транспорту та визначені їх показники. Оскільки дана тема складається з різних задач, які необхідно вирішити, то в даній роботі з переліку визначених показників основними є визначення положення екіпажу в межах шляхової структури, перехідні процеси під час комутації шляхових котушок, координація роботи шляхових котушок для забезпечення режиму тяги.

2. 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, а також оптимізації системи керування. Отримано нові залежності, що дозволили визначити часові характеристики перехідного процесу натурної моделі шляхового модуля. У колах шляхового модуля при початковій напрузі в 5 В, струм досягає усталеного значення 1 А за 0,4 с. При роботі секції та початковій напрузі в 5 В вмикання п'яти шляхових модулів відбувається за 1 с, відповідно до визначеного часу роботи кожного модуля.

3. Запропоновано та визначено принципи можливих алгоритмів керування натурною моделлю: послідовне, паралельне та комбіноване. 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 шляхових котушок. Паралельне

вмикання дозволяє більш злагоджено розподіляти електричну енергію для точнішої реалізації процесу розгону екіпажу при одночасній роботі двох шляхових модулів.

4. Розроблено натурну модель, що дозволяє досліджувати режими роботи системи керування шляховою структурою магнітолевітаційного транспорту. Запропоновано принцип секційної модульної системи керування рухом екіпажу натурної моделі. Будова натурального стенду передбачає наявність 8 секцій, кожна секція має 5 модулів, загальне число модулів складає 40, на екіпаж кріпиться 6 постійних магнітів (3 зовнішні, 3 внутрішні) за потрібною схемою S-N-S або N-S-N. Також будова шляхового модуля передбачає, розміщення на ньому 4 шляхових котушок.

5. Виконано дослідження прототипів шляхових котушок натурної моделі магнітолевітаційного транспорту та визначено їх параметри в залежності від синусоїдального сигналу в діапазоні від 1 кГц до 200 кГц. Результати дослідження дозволяють оцінити необхідне значення частоти сигналу керування для натурної моделі магнітолевітаційного транспорту.

6. Виконано верифікацію працездатності розробленої системи позиціонування натурального стенду та проведено експеримент, спрямований на фіксацію реакції керуючої системи (подача імпульса 10 мс) у момент проходження екіпажу повз шляховий модуль.

7. Отримані осцилограми в режимі неробочого ходу дозволяють прогнозувати раціональні моменти часу для комутації шляхових модулів в режимі тяги. Раціональним моментом подачі керуючого сигналу на шляхову котушку є інтервал між початком наростання ЕРС та досягненням піку це забезпечує максимально ефективний вплив котушки на екіпаж. Якщо умовно поділити кожен модуль на градуси (один модуль матиме 9°), то для уникнення похибок з перемиканням модулів момент вмикання шляхової котушки можна визначити як $2...3^\circ$, а момент вимикання $7...8^\circ$. Такий режим роботи дозволить досягти робочого значення натурної моделі шляхової котушки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Plaksin, S., Mukha, A., Ustymenko, 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. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2022.2.58.49-53>
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. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
3. Felez, J., Vaquero-Serrano, M. A., Portillo, D., Antunez, S., Carcasi, G., Nocita, A., Schultz-Wildelau, M., Parrotta, L. A., Fasano, G., & Proietti, P. (2025). A New Concept of Hybrid Maglev-Derived Systems for Faster and More Efficient Rail Services Compatible with Existing Infrastructure. *Sustainability*, 17(11), 5056. <https://doi.org/10.3390/su17115056>
4. Kluehspies J. Maglev trends in public transport: The perspectives of Maglev transportation systems. *2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Osaka, 6–8 September 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.23919/ldia.2017.8097240> (date of access: 30.08.2025).
5. Adachi M. 1B15 Overview of superconducting maglev and Chuo Shinkansen(Vehicles-System). *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems : STECH*. 2015. Vol. 2015. P. 1B15–1_–_1B15–8_. URL: <https://doi.org/10.1299/jsmestech.2015.1b15-1> (date of access: 30.08.2025).
6. Development of new EMS-based high-speed Maglev vehicles in China - Historical and recent progress in the field of dynamical simulation / S. Ding et al. *International of Mechanical System Dynamics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/msd2.12069> (date of access: 30.08.2025).

7. International R. G. Incheon Airport maglev starts passenger services. *Railway Gazette International*. URL: <https://www.railwaygazette.com/incheon-airport-maglev-starts-passenger-services/42027> (date of access: 30.08.2025).
8. Bardhi, Arbra & Carcasi, Giuseppe & Belen, Marjorie & Blasio, Giovanni & Nocita, Angela & Puerta, Camilo & Radziszewski, Pawel & Ricci, Stefano & Rizzetto, Luca. (2024). *Potential application of Maglev Derived System to improve railway performance*. 67-74. 10.5592/CO/CETRA.2024.1615.
9. MaDe4Rail - Exploring non-traditional and emerging maglev-derived systems - Europe's Rail. *Europe's Rail*. URL: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/made4rail-exploring-non-traditional-and-emerging-maglev-derived-systems/> (date of access: 30.08.2025).
10. Federal railroad administration: Passenger Rail. *Wayback Machine*. URL: <https://web.archive.org/web/20100214150558/http://www.fra.dot.gov/us/content/618> (date of access: 30.08.2025).
11. Maglev Between D.C. And Baltimore? MTA Embarks On Environmental Study. *WAMU*. URL: <https://wamu.org/story/16/09/06/maglev-between-dc-and-baltimore-mta-embarks-on-environmental-study-of-high-speed-train/> (date of access: 30.08.2025).
12. Yavuz, M. N., & Öztürk, Z. (2021). Comparison of conventional high speed railway, maglev and hyperloop transportation systems. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(1), 113–122, <https://doi.org/10.35860/iarej.795779>
13. Skosar, V. Y., Burylov, S. V., & Dzenzerskyi, V. O. (2023). Some Problems of Ultra-High-Speed Transportation Technologies. *Science and Transport Progress*, (2(102), 5–16. <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>
14. The Effect of Operating Temperature on Transport AC Loss According to an YBCO Superconducting Tape Array Geometry / Y. J. Hwang et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 3329–3333. URL: <https://doi.org/10.1109/tasc.2010.2096793> (date of access: 30.08.2025).

15. Mosa, S.S.Y., Zhang, L. (2025). Development and Future of High-Speed Maglev Vehicle System. In: Zeng, X., Xie, X., Sun, J., Ma, L., Chen, Y. (eds) International Symposium for Intelligent Transportation and Smart City (ITASC) 2025 Proceedings. ITASC 2025. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1407. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-4702-6_17
16. Wen, J., & Wang, F. (2024). Stable Levitation of Single-point Levitation Systems for Maglev Trains by Improved Cascade Control. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 27(3-4), 348–361. <https://doi.org/10.59277/romjist.2024.3-4.08>
17. J. Lee, J. Jo, Y. Han and C. Lee, "Development of LSM control system for super speed maglev," 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), Gwangju, Korea (South), 2013, pp. 466-469, doi: 10.1109/ICCAS.2013.6703976.
18. Wang, Y., Sun, Y. G., Ji, W., & Xu, J. Q. (2024). Self-Tuning Parameters of a Maglev Control System Based on Q-Learning. *Mechatron. Intell Transp. Syst.*, 3(2), 135-145. <https://doi.org/10.56578/mits030205>
19. Zhou, X., Wen, T., & Long, Z. (2021). Research on Real-Time Monitoring and Performance Optimization of Suspension System in Maglev Train. *Applied Sciences*, 11(24), 11952. <https://doi.org/10.3390/app112411952>
20. Kuptsov, V., Fajri, P., Rasheduzzaman, M., Magdaleno-Adame, S., & Hadziristic, K. (2022). Combined Propulsion and Levitation Control for Maglev/Hyperloop Systems Utilizing Asymmetric Double-Sided Linear Induction Motors. *Machines*, 10(2), 131. <https://doi.org/10.3390/machines10020131>
21. Qiang, H., Qiao, S., Huang, H., Cheng, P., & Sun, Y. (2025). Nonlinear Adaptive Control of Maglev System Based on Parameter Identification. *Actuators*, 14(3), 115. <https://doi.org/10.3390/act14030115>
22. Pan, H., Wang, H., Yu, C., & Zhao, J. (2022). Displacement-Constrained Neural Network Control of Maglev Trains Based on a Multi-Mass-Point Model. *Energies*, 15(9), 3110. <https://doi.org/10.3390/en15093110>

23. Cui, Y., Yu, Q., & Martin, U. (2024). Optimising the Economic Feasibility of High-Speed Maglev Systems: A Simulation-Based Approach for Variable and Parameter Analysis. *Promet - Traffic&Transportation*, 36(5), 779–796. <https://doi.org/10.7307/ptt.v36i5.571>
24. Li, H., Shi, J., Li, X., Zhang, J. and Chen, Y. (2023), "Current status and reflection on the development of high-speed maglev transportation", *Railway Sciences*, Vol. 2 No. 3, pp. 327-335. <https://doi.org/10.1108/RS-07-2023-0024>
25. Popovych, O., & Kostyrytsa, O. (2024). Restoring the Scientific Potential of Ukrainian Science: Necessity and Real Prospects. *Science and Innovation*, 13(4), 5–12. <https://doi.org/10.15407/scine13.04.005>
26. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2014). *Sistemy upravleniya i energoobespecheniya magnitolevitiruyushchego transporta*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
27. Dzenzerskiy, V. O., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Y. V. (2018). Перспективна транспортно-енергетична система на основі інтеграції магнітолевітаційної технології та розподіленої фотоелектричної електростанції. *Наука та прогрес транспорту*, (1(73)), 77–86. <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
28. Smart Grid: Україна на шляху до енергетичної революції. (б. д.). Українська Енергетика. <https://ua-energy.org/uk/posts/smart-grid-ukraina-na-shliakhu-do-enerhetychnoi-revoliutsii>
29. Включення України до TEN-T: Нові логістичні можливості та інтеграція в транспортну систему ЄС. (б. д.). ETS. https://es-trans.com.ua/ukrayinoyu_proydut_marshruty_ten-t/
30. Y. J. Hwang et al., The Effect of Operating Temperature on Transport AC Loss According to an YBCO Superconducting Tape Array Geometry, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 3329-3333, June 2011, doi: 10.1109/TASC.2010.2096793.

31. Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim & Ju Lee. (2006). Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(7), 1917–1925. <https://doi.org/10.1109/tmag.2006.875842>
32. Amiee. (2025, 29 квітня). Maglev train deep dive: Superconducting tech, costs & future. Aminext <https://www.aminext.blog/en/post/maglev-trains-technology-costs-future-1>
33. Kircher, A., Fischer, A., Landgraf, M., & Thoma, S. (2025, July). Application potential of maglev technology in transport systems. *2025 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SOLI60079.2025.10738572>
34. Holota, O., Plaksin, S., & Shkil, Y. (2022). Determination of the coordinates of the spatial orientation of the magnetoplan regarding the rail structure. *Transport Systems and Technologies*, (40), 159–169. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14>
35. Han, P., Xu, J., Rong, L., Wang, W., Sun, Y., & Lin, G. (2024). Data-Driven Control Method Based on Koopman Operator for Suspension System of Maglev Train. *Actuators*, 13(10), 397. <https://doi.org/10.3390/act13100397>
36. Wang, S.-M., Wang, Y.-W., Ni, Y.-Q., & Lu, Y. (2023). Real-Time Malfunction Detection of Maglev Suspension Controllers. *Mathematics*, 11(19), 4045. <https://doi.org/10.3390/math11194045>
37. Cho, Y. W., Park, H. J., Gu, J. S., Park, C. Y., Yoon, H. S., & Cho, G. G. (2011). Development of on-board ATC system for Maglev Vehicle. *Proceedings of the 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev 2011)*, October 10–13, Daejeon, Korea.
38. H. Chen, B. Jiang, S. X. Ding and B. Huang, "Data-Driven Fault Diagnosis for Traction Systems in High-Speed Trains: A Survey, Challenges, and Perspectives," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1700-1716, March 2022, doi: 10.1109/TITS.2020.3029946.

39. Stephan, R. M., & Pereira, A. O., Jr. (2020). The Vital Contribution of MagLev Vehicles for the Mobility in Smart Cities. *Electronics*, 9(6), 978. <https://doi.org/10.3390/electronics9060978>
40. Liu, M., Wu, H., Liang, X. *et al.* Model predictive control based on LSTM neural network for maglev vehicle' suspension system. *Acta Mech. Sin.* 42, 524572 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10409-025-24572-x>
41. Lai, Q., Liu, J., Wang, Y., Xu, H., Guo, S., & Ju, M. (2023). Energy-efficient operation of medium-speed maglev through integrated traction and train control. *IET Intelligent Transport Systems*. <https://doi.org/10.1049/itr2.12458>
42. Singh, P., Elmi, Z., Krishna Meriga, V., Pasha, J., & Dulebenets, M. A. (2022). Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065>
43. Paul, S. (2022). Optimisation of input power in linear induction motor (LIM) based Maglev vehicle. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.328>
44. J. Lee, J. Jo, Y. Han and C. Lee, "Development of LSM control system for super speed maglev," *2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013)*, Gwangju, Korea (South), 2013, pp. 466-469, doi: 10.1109/ICCAS.2013.6703976.
45. Yang, H., Li, Y., & Lu, Q. (2022). Performance Simulation of Long-Stator Linear Synchronous Motor for High-Speed Maglev Train under Three-Phase Short-Circuit Fault. *World Electric Vehicle Journal*, 13(11), 216. <https://doi.org/10.3390/wevj13110216>
46. Муха, А. М., Плаксін, С. В., Устименко, Д. В., Шкіль, Ю. В., Кітаєв, О., & Антонюк, А. (2025). Аналіз передумов до створення дворежимного тягово-левітаційного модуля другого покоління. *Наука та прогрес транспорту*, (2(110)), 65–75. <https://doi.org/10.15802/stp2025/332149>

47. 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. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.08.005>
48. 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>
49. 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>
50. 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.
51. Carabelli, S., Delprete, C., Genta, G., Muzzarelli, M., & Zanolli, S. (2000). Passive Repulsive MagLev: Concept and Experimental Demonstration. *Vehicle System Dynamics*, 34(5), 333–356. <https://doi.org/10.1076/vsd.34.5.333.2056>
52. Zhu, Q., Wang, S.-M., & Ni, Y.-Q. (2024). A Review of Levitation Control Methods for Low- and Medium-Speed Maglev Systems. *Buildings*, 14(3), 837. <https://doi.org/10.3390/buildings14030837>
53. 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>
54. Leferink, Frank. (1996). Inductance calculations; experimental investigations. 235 - 240. DOI: 10.1109/ISEMC.1996.561235.
55. R. A. H. de Oliveira, R. M. Stephan, A. C. Ferreira and J. Murta-Pina, "Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev

Vehicles," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6949-6956, Nov.-Dec. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3023066.

56. Mirafzal, Behrooz & Skibinski, Gary & Tallam, Rangarajan. (2009). Determination of Parameters in the Universal Induction Motor Model. *Industry Applications, IEEE Transactions on*. 45. 142 - 151. 10.1109/TIA.2008.2009481

57. Wang, Hongliang & Qu, Ronghai & Lai, Junquan & Huang, Hailin & Liu, Hengkun. (2018). Study on High Efficiency Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Maglev. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. PP. 1-1. 10.1109/TASC.2018.2796560

58. Lv, Pin & Liu, Lulu & Su, Xunwen & Lin, Peng & Ma, Haotian & Xu, Donghui & Liu, Ziyang. (2024). Calculation of Inductance Parameters of Wound Brushless Doubly-fed Motor. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4640959/v1.

59. Wang, Hui & Zhong, Xiaobo & Shen, Gang. (2013). Analysis and experimental study on the MAGLEV vehicle-guideway interaction based on the full-state feedback theory. *Journal of Vibration and Control*. 21. DOI: 10.1177/1077546313488431.

60. Holota, O., Ustymenko, D., Mukha, A., Plaksin, S., & Chupryna, Y. (2025). Determination of the inductiveness of a physical model of track coils for high-speed transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(83)), 52–57. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331995>

61. Чуприна С. М., Муха А. М., Бондар О. І., Плаксін С. В., Устименко Д. В., Голота О. О. (2025) Дослідження динамічних показників шляхової котушки натурної моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*, (3(111)), 79–90 <https://doi.org/10.15802/stp2025/341709>

62. Коцур, М. (2024). Дослідження електромагнітних та механічних процесів асинхронно-синхронного електромеханічного перетворювача в режимі неробочого ходу. *Технічна електродинаміка*, (2), 062. <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.062>

63. He, Y., Wu, J., Xie, G., Hong, X., & Zhang, Y. (2021). Data-driven relative position detection technology for high-speed maglev train. *Measurement*, *180*, 109468. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109468>
64. Plaksin, S., Mukha, A., Ustymenko, D., Podchasov, A., & Holota, O. (2025). Development of a diagnostic procedure for assessing the performance of a magnetoplane navigation system. *Technology Audit and Production Reserves*, *4*(2(84)), 65–70. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334444>
65. Голота, О. О. (2025). Дослідження режимів керування шляхової структури натурної моделі магнітолевітаційного транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*, (30), 29–36. <https://doi.org/10.15802/tstt2025/340121>
66. Sun, N., Wang, W. L., & Xu, C. (2013). Magnetic suspension research and design of real-time display based on the Internet of Things. *Advanced Materials Research*, *774-776*, 1922-1926. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1922>
67. Gopi, R. S., Srinivasan, S., Panneerselvam, K., Teekaraman, Y., Kuppusamy, R., & Urooj, S. (2021). Enhanced Model Reference Adaptive Control Scheme for Tracking Control of Magnetic Levitation System. *Energies*, *14*(5), 1455. <https://doi.org/10.3390/en14051455>
68. Z. Shao, Y. Wang, Z. Zhong, X. Wang and Z. Ma, "Small-Signal Modeling and Decoupling Control of a Doubly-Fed Linear Motor for Maglev Application," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, doi: 10.1109/TIE.2025.3566762.
69. Liao, W. P., Zhang, Y. and Zhou, R. (2020), Analytical method to calculate transient responses of induction motor load. *IET Gener. Transm. Distrib.*, *14*: 3221-3229. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6107>
70. Костін М.О., Шейкіна О.Г. Теоретичні основи електротехніки. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – Т. 2. – 276 с.

71. Голота, О. О., Муха, А. М., Устименко, Д. В., & Плаксін, С. В. (2024). Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*, (1(105)), 30–41. <https://doi.org/10.15802/stp2024/301521>
72. Голота О. О. Розробка та дослідження моделі тягового двигуна для високошвидкісного наземного транспорту (комплексна випускна робота) : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / наук. керівник А. М. Муха ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро, 2021. 70 с.
73. Skalozub, V., Zhukovytskyi, I., Bosyi, D., Lakhno, V. (2024). Usage of Specialized Intellectual and Artificial Intelligence Systems to Improve Railway Transport Technologies. In: Śladkowski, A. (eds) Using Artificial Intelligence to Solve Transportation Problems. Studies in Systems, *Decision and Control*, vol 563. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69487-5_2
74. Бубліков, А. В., Ципленков, Д. В., Гребенюк, А. М., Ткаленко, О. С., & Нестерова, О. Ю. (2024). Особливості синтезу системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі на основі концепції Smart grid. *Електротехнічні та інформаційні системи*, (106), 8–14. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-2>
75. Kovalenko, M. A., Tsyplenkov, D. V., Kovalenko, I. Ya., Titov, E. O., & Bazarov, O. O. (2025). *Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor*. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 108–116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>
76. Omron Corporation. (n.d.). *Absolute rotary encoder E6C2-A (Cat. No. Q107-E1-02) [Datasheet]*. Retrieved November 11, 2025, from <https://edata.omron.com.au/eData/Encoders/Q107-E1-02.pdf>
77. Tempero Systems. (n.d.). *RS422 to TTL Transfers Module Bidirectional Signals Full Duplex*. Retrieved November 11, 2025, from <https://temperosystems.com.au/products/rs422-to-ttl-transfers-module-bidirectional-signals-full-duplex/>

78. ImportDukan. (n.d.). *Speed Counting Sensor 3144E Hall Switch*. Retrieved November 11, 2025, from <https://www.importdukan.com/speed-counting-sensor-3144e-hall-switch?srsltid=AfmBOoqUvaunK4339uTQSUImecok90WFNOP3WDG3uteMzztt35Fypj7d>
79. Components101. (n.d.). *INA219 Current Sensor Module*. Retrieved November 11, 2025, from <https://components101.com/modules/1na219-current-sensor-module>
80. Arduino. (n.d.). *A000066-datasheet (Arduino® UNO R3)* [PDF]. Retrieved November 11, 2025, from <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
81. Arduino. (n.d.). *A000067-datasheet* [PDF]. Retrieved November 11, 2025, from <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
82. STMicroelectronics. (2013, May 14). *STM32F103x8 and STM32F103xB medium-density performance line microcontrollers — Datasheet* [PDF]. Retrieved November 11, 2025, from <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
83. dSPACE GmbH. (2020, January). *dSPACE MicroLabBox: Product brochure* [PDF]. Retrieved November 12, 2025, from https://www.dttechsolutions.com/images/products/Dspace/dSPACE-MicroLabBox_Product-Brochure_2020-01_EN.pdf
84. Scilab. (n.d.). *Open Source Software – About Scilab* [Web page]. Retrieved November 12, 2025, from <https://www.scilab.org/about/scilab-open-source-software>

ДОДАТОК А

Таблиця 3.4 – Визначення параметрів котушок (загальна таблиця)

Котушка	U_{RMS} , В	I_{RMS} , мА	Z, Ом	X_L , Ом	L, мГн
$f=1$ кГц					
A	0.14	280	0.5	0.335	0.05
B	1.4	264	5.3	5.111	0.8
C	2.8	121	23.14	22.69	3.6
D	3	26.575	112.88	111.428	17.73
E	3.2	16	200	198.26	31.56
$f=5$ кГц					
A	0.14	66	2.12	2.035	0.065
B	1.4	60.68	23.07	23.03	0.73
C	2.8	27.75	100.9	100.8	3.2
D	3	6.3	476.2	475.85	15.15
E	3.2	4.1	780.49	780.05	24.83
$f=10$ кГц					
A	0.14	30.43	4.06	4.562	0.072
B	1.4	34.75	40.288	40.263	0.64
C	2.8	14.55	192.44	192.39	3.06
D	3	3.425	875.9	875.725	13.9
E	3.2	2.6	1230.8	1230.49	19.6
$f=15$ кГц					
A	0.14	21.55	6.469	6.469	0.069
B	1.4	21.675	64.59	64.575	0.69
C	2.8	9.725	287.9	287.88	3.05
D	3	2.45	1224.49	1224.36	12.99
E	3.2	2.06	1553.4	1553.2	16.5
$f=20$ кГц					
A	0.14	18.75	7.46	7.443	0.059
B	1.4	16.4	85.27	85.26	0.679
C	2.8	7.425	377.1	377.08	3.0
D	3	2.017	1487.5	1487.4	11.8
E	3.2	1.9	1681.99	1681.7	13.4
$f=25$ кГц					
A	0.14	13.475	10.38	10.372	0.066
B	1.4	12.825	109.16	109.15	0.695
C	2.8	6.075	460.9	460.88	2.93
D	3	1.79	1675.28	1675.18	10.66
E	3.2	1.78	1798.5	1798.42	11.4
$f=30$ кГц					
A	0.14	11.55	12.12	12.106	0.064
B	1.4	12.5	112	111.99	0.59
C	2.8	5.1	549.02	549.001	2.9

D	3	1.79	1675.8	1675.18	8.89
E	3.2	1.632	1961.08	1960.9	10.4
$f=40$ кГц					
A	0.14	9.925	14.106	14.093	0.056
B	1.4	8.93	156.86	156.86	0.62
C	2.8	4	700	699.99	2.79
D	3	1.47	2043.25	2043.169	8.13
E	3.2	1.5	2072.3	2072.2	8.2
$f=50$ кГц					
A	0.14	7.8	17.95	17.93	0.057
B	1.4	7.375	189.8	189.825	0.6
C	2.8	2.875	973.9	973.9	3.1
D	3	1.44	2078.6	2078.6	6.6
E	3.2	1.72	1856.95	1856.8	5.9
$f=60$ кГц					
A	0.14	7.23	19.38	19.37	0.051
B	1.4	6.425	217.89	217.89	0.58
C	2.8	2.5	1120	1119.99	2.97
D	3	1.64	1870.95	1869.95	4.96
E	3.2	1.6	1997.8	1997.6	5.3
$f=70$ кГц					
A	0.14	6.6	21.21	21.204	0.048
B	1.4	5.475	255.7	255.7	0.58
C	2.8	2.16	1295.85	1295.84	2.95
D	3	1.467	2044.3	2044.3	4.65
E	3.2	1.59	2015.7	2015.6	4.6
$f=80$ кГц					
A	0.14	5.68	24.67	24.66	0.049
B	1.4	4.925	284.26	284.26	0.566
C	2.8	1.92	1462.1	1462.1	2.9
D	3	1.522	1970.4	1970.4	3.92
E	3.2	1.847	1732.77	1732.57	3.45
$f=90$ кГц					
A	0.14	5.125	27.32	27.31	0.048
B	1.4	4.575	306.01	306.01	0.54
C	2.8	1.8	1567.2	1567.22	2.77
D	3	1.553	1931.4	1931.35	3.4
E	3.2	1.74	1835.65	1835.46	3.25
$f=100$ кГц					
A	0.14	4.875	28.72	28.712	0.046
B	1.4	4.2	333.3	333.3	0.53
C	2.8	1.82	1536.4	1536.4	2.45
D	3	1.44	2085.86	2085.8	3.3

E	3.2	1.88	1698.4	1698.2	2.7
$f=150 \text{ кГц}$					
A	0.14	3.95	35.44	35.44	0.038
B	1.4	3	466.7	466.7	0.49
C	2.8	2.65	1056.6	1056.6	1.2
D	3	1.4	2123.9	2123.8	2.3
E	3.2	2.2	1443.55	1443.3	1.5
$f=200 \text{ кГц}$					
A	0.14	3.18	44.094	44.09	0.035
B	1.4	2.55	549.01	549.02	0.43
C	2.8	3.475	805.76	805.74	0.64
D	3	1.657	1810.8	1810.68	1.44
E	3.2	1.79	1786.96	1786.77	1.42

ДОДАТОК Б

Таблиця – Характеристики енкодера LIR-DA237T [76].

Параметр	Значення
Тип енкодера	Абсолютний однооборотний оптиелектронний
Конструкція	Порожнистий вал (hollow shaft)
Діаметр корпусу	37,5 мм
Діаметр вала	8 мм
Маса (без кабелю)	0,1 кг
Момент інерції ротора	$3,0 \times 10^{-7}$ кг·м ²
Пусковий момент ротора	$\leq 0,005$ Н·м
Діапазон робочих температур	0...+70°C (розширений - 40...+85°C)
Максимальна швидкість обертання	6000 об/хв
Точність (допустима похибка)	$\pm 30''$
Інтерфейси	RS422, SSI, BiSS-C
Тип коду на виході	Gray code / Binary code
Напруга живлення	+5 В
Струм живлення	≤ 140 мА
Роздільна здатність (позицій/оберт)	8 біт (256)...23 біти (8 388 608)
Інкrementальний вихідний сигнал	1 Vpp, 1024 періоди/оберт

Код для системи позиціонування по датчику Холла (Розділ 4)

```
#include <SPI.h>

#define CLK_PIN 10
#define DATA_PIN 9
#define HALL_PIN 4
#define IMPULSE_PIN 13

const int BITS_TO_READ = 8;
const int NUM_SECTIONS = 8;
const int NUM_MODULES = 40;
const int MODULES_PER_SECTION = 5;
```

```

const int SECTION_SIZE = 256 / NUM_SECTIONS;

unsigned long lastStablePosition = 0;
int lastModule = -1;

// Для RPM
unsigned long lastHallTime = 0;
float rpm = 0;
bool lastHallState = false;

// Для уникнення повторного імпульсу від 2-го S
unsigned long lastImpulseTime = 0;
const unsigned long IGNORE_TIME = 400; // мс блокування після першого
спрацювання
// Gray → Binary
unsigned long grayToBinary(unsigned long num) {
    unsigned long mask;
    for (mask = num >> 1; mask != 0; mask >>= 1)
        num ^= mask;
    return num;
}

unsigned long readEncoder(int bits) {
    unsigned long data = 0;
    digitalWrite(CLK_PIN, LOW); delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(CLK_PIN, HIGH); delayMicroseconds(5);

    for (int i = 0; i < bits; i++) {
        digitalWrite(CLK_PIN, LOW); delayMicroseconds(5);
        data = (data << 1) | digitalRead(DATA_PIN);
        digitalWrite(CLK_PIN, HIGH); delayMicroseconds(5);
    }
    return grayToBinary(data);
}

unsigned long stableReadEncoder() {
    unsigned long a = readEncoder(BITS_TO_READ);

```

```

delayMicroseconds(50);
unsigned long b = readEncoder(BITS_TO_READ);
if (a == b) {
    lastStablePosition = a;
    return a;
} else {
    return lastStablePosition;
}
}
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(CLK_PIN, OUTPUT);
    pinMode(DATA_PIN, INPUT);
    pinMode(HALL_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(IMPULSE_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(CLK_PIN, HIGH);
    digitalWrite(IMPULSE_PIN, LOW);
    Serial.println(" Система з обмеженням імпульсу на перший магніт");
}
void loop() {
    // ==== Датчик Холла та RPM ====
    bool hallState = digitalRead(HALL_PIN) == LOW;
    unsigned long currentTime = millis();
    if (hallState && !lastHallState) {
        // Обчислення RPM
        unsigned long delta = currentTime - lastHallTime;
        if (delta > 0) {
            rpm = 60000.0 / delta;
            lastHallTime = currentTime;
        }
    }
    // ==== Імпульс тільки якщо минув час блокування ====
    if (currentTime - lastImpulseTime > IGNORE_TIME) {
        Serial.println("Імпульс на пін 13 (перший магніт)");
        digitalWrite(IMPULSE_PIN, HIGH);
        delay(10); // 10 мс
    }
}

```

```

        digitalWrite(IMPULSE_PIN, LOW);
        lastImpulseTime = currentTime; // блокування на ~400 мс
    } else {
        Serial.println(" Пропущено повторне спрацювання (3-й магніт)");
    }
}
lastHallState = hallState;
// ==== Енкодер та модулі ====
unsigned long position = stableReadEncoder();
int section = position / SECTION_SIZE + 1;
if (section > NUM_SECTIONS) section = NUM_SECTIONS;

int positionInSection = position % SECTION_SIZE;
int moduleInSection = (int)(positionInSection * MODULES_PER_SECTION /
(float)SECTION_SIZE);
int module = (section - 1) * MODULES_PER_SECTION + moduleInSection + 1;

if (module != lastModule) {
    Serial.print(" Позиція: ");
    Serial.print(position);
    Serial.print(" → Секція: ");
    Serial.print(section);
    Serial.print(" → Модуль: ");
    Serial.print(module);
    Serial.print(" | Швидкість: ");
    Serial.print(rpm, 1);
    Serial.println(" об/хв");
    lastModule = module;
}
delay(20);
}

```

Код для системи позиціонування при зміні модуля (Розділ 3)

```

#include <SPI.h>

#define CLK_PIN 10
#define DATA_PIN 9

```

```

#define MODULE_IMPULSE_PIN 13 // Пін, на який подається імпульс при зміні модуля

const int BITS_TO_READ = 8;
const int NUM_SECTIONS = 8;
const int NUM_MODULES = 40;
const int MODULES_PER_SECTION = 5;
const int SECTION_SIZE = 256 / NUM_SECTIONS;

unsigned long lastStablePosition = 0;
int lastModule = -1;
// Gray → Binary
unsigned long grayToBinary(unsigned long num) {
    unsigned long mask;
    for (mask = num >> 1; mask != 0; mask >>= 1)
        num ^= mask;
    return num;
}
// Зчитування енкодера
unsigned long readEncoder(int bits) {
    unsigned long data = 0;
    digitalWrite(CLK_PIN, LOW); delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(CLK_PIN, HIGH); delayMicroseconds(5);
    for (int i = 0; i < bits; i++) {
        digitalWrite(CLK_PIN, LOW); delayMicroseconds(5);
        data = (data << 1) | digitalRead(DATA_PIN);
        digitalWrite(CLK_PIN, HIGH); delayMicroseconds(5);
    }
    return grayToBinary(data);
}
// Стабільне зчитування
unsigned long stableReadEncoder() {
    unsigned long a = readEncoder(BITS_TO_READ);
    delayMicroseconds(50);
    unsigned long b = readEncoder(BITS_TO_READ);
    if (a == b) {
        lastStablePosition = a;
        return a;
    } else {
        return lastStablePosition;
    }
}

```

```

}
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(CLK_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DATA_PIN, INPUT);
  pinMode(MODULE_IMPULSE_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(CLK_PIN, HIGH);
  digitalWrite(MODULE_IMPULSE_PIN, LOW);
  Serial.println("Імпульс при кожній зміні модуля");
}
void loop() {
  unsigned long position = stableReadEncoder(); // 0-255
  int section = position / SECTION_SIZE + 1;
  if (section > NUM_SECTIONS) section = NUM_SECTIONS;
  int positionInSection = position % SECTION_SIZE;
  int moduleInSection = (int)(positionInSection * MODULES_PER_SECTION /
(float)SECTION_SIZE);
  int module = (section - 1) * MODULES_PER_SECTION + moduleInSection + 1;
  if (module != lastModule) {
    // Вивід
    Serial.print(" Позиція: ");
    Serial.print(position);
    Serial.print(" Секція: ");
    Serial.print(section);
    Serial.print(" Модуль: ");
    Serial.println(module);
    // Імпульс на пін
    digitalWrite(MODULE_IMPULSE_PIN, HIGH);
    delay(10); // Імпульс 10 мс
    digitalWrite(MODULE_IMPULSE_PIN, LOW);
    lastModule = module;
  }
  delay(20); //
}

```