

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Для службового користування
Прим. № 64

ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ Віктор Олександрович

УДК 629.439.027

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ
ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.07 — Рухомий склад залізниць і тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 1998



Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті транспортних систем і технологій Національної академії наук України «Трансмаг»

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Манашкин Лев Абрамович,
Дніпропетровський державний технічний
університет залізничного транспорту,
завідувач кафедри теоретичної механіки

доктор технічних наук, професор
Бахвалов Юрій Олексійович,
заслужений діяч науки Російської Федерації,
Новочеркаський державний політехнічний
університет, завідувач кафедри прикладної математики

доктор технічних наук, професор
Омельяненко Віктор Іванович,
Харківський державний політехнічний
університет, завідувач кафедри
локомотивобудування

Провідна установа:

Інститут технічної механіки Національної академії наук
України та Національного космічного агентства України,
м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться 25 грудня 1998 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському державному технічному

НТБ
ДНУЗТ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Повноцінне зростання продуктивних сил та вирішення виникаючих у зв'язку з цим транспортних проблем в наступному сторіччі буде неможливим без наземних транспортних систем, які здійснюють перевезення пасажирів та вантажів зі швидкостями порядку 500 км/год. Цей високошвидкісний наземний транспорт (ВШНТ), немов глобальний метрополітен, зв'яже в одне ціле основні науково-промислові центри. Він зближить час міжміських перевезень та внутрішньоміських переїздів, що дозволить більш ефективно використовувати кадровий та економічний потенціали різних регіонів. Тому створення ВШНТ є нарізною проблемою для подальшого технічного, економічного та соціального розвитку суспільства.

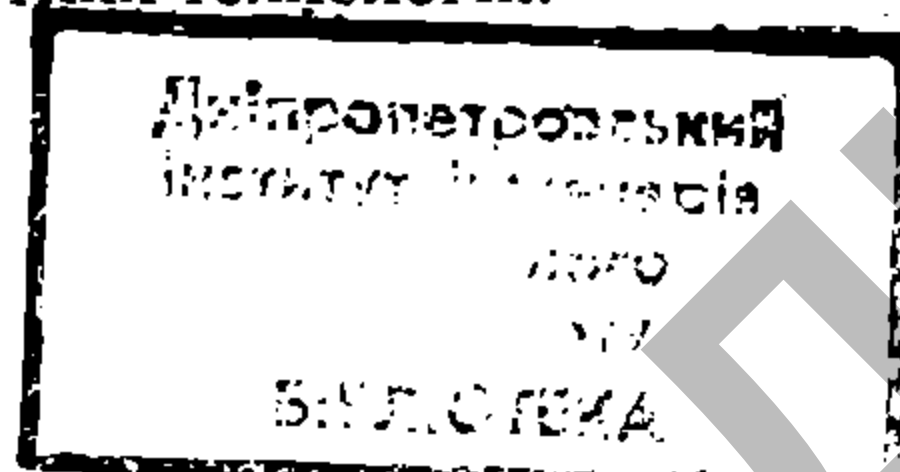
Одним з перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розробка безконтактного транспорту на магнітному підвісі, в якому левітація та рух транспортного засобу здійснюються за допомогою магнітного поля. В даний час інтенсивні теоретичні та експериментальні дослідження в галузі ВШНТ на магнітному підвісі провадяться в Німеччині, Японії, США, Італії та інших країнах світу, зокрема в Україні.

Існують дві основні системи магнітного підвісу (левітації) для ВШНТ:

1. Електромагнітний підвіс (ЕМП), в якому використовується притягування електромагнітів поїзда до феромагнітної шляхової структури.
2. Електродинамічний підвіс (ЕДП), заснований на ефекті відштовхування, який виникає при взаємодії магнітного поля надпровідного (НП) магніта, що рухається, з полем вихрових струмів, наведених ним в електропровідній шляховій структурі.

Систему ЕМП можна реалізувати за допомогою відомих технічних засобів. Але принциповим недоліком такої системи є необхідність стабілізації кліренсу (зазору між електромагнітами та шляховою структурою). Це вимагає спеціальної швидкодіючої системи управління струмом електромагнітів підвісу. Крім того, при використанні системи ЕМП кліренс складає всього біля 10 мм. Малий кліренс, особливо при великих швидкостях руху, вимагає надзвичайно високоякісної шляхової структури, що значно збільшує капітальні та експлуатаційні витрати, а в ряді кліматичних та сейсмонебезпечних зон робить застосування цього підвісу практично неможливим.

В системі ЕДП, де використовуються надпровідні магніти, зазор складає 100-200 мм, що значно знижує вартість будівництва шляху та його експлуатації. Якщо внаслідок яких-небудь обурень зазор зменшується, то підйомна сила зростає, що приводить до відновлення зазору; тобто, такий підвіс не вимагає спеціального управління. Основним силовим елементом цієї системи є транспортний надпровідний магніт — кріомодуль, розробка якого пов'язана з вирішенням нових технічних проблем та подальшим розвитком транспортних технологій.



Враховуючи конструктивні особливості та потенційні можливості систем ВШНТ на магнітному підвісі, а також останні успіхи в галузі надпровідних матеріалів, можна зробити висновок, що найбільш перспективною є система з ЕДП. Вона може забезпечити високу продуктивність перевезень зі швидкостями руху 250-500 км/год при мінімальному впливі на навколишнє середовище, незначній витраті енергії та незалежності від погодних умов. Виконані (у тому числі в ІТСТ НАН України "Трансмаг") економічні дослідження показують, що така транспортна система найбільш раціональна на відстанях 1000-2000 км, заповнюючи вакуум між швидкостями колісного та авіаційного транспорту. Її може бути цілком природно вписано до існуючих схем залізниць з використанням їх енергомереж та інфраструктури. Однак, практичне втілення такої системи стримується наявністю цілого комплексу невирішених науково-технічних проблем. Зокрема, недостатньо розроблено методи розрахунку силових взаємодій в системі ЕДП, немає ефективних методів дослідження динаміки та стійкості руху левітуючого екіпажу, бракує методик та обладнання для комплексного експериментального дослідження систем електродинамічної левітації, відомі конструктивні рішення транспортних кріомодулів не у повній мірі задовольняють сучасним вимогам.

Дану дисертацію присвячено розв'язанню наукових та технічних проблем розробки та створення високошвидкісного наземного транспорту з електродинамічним підвісом.

Треба підкреслити, що дослідження в області магнітного підвішування представляють значний інтерес не тільки для створення транспорту недалекого майбутнього, але й для інших галузей техніки. Система ВШНТ з використанням надпровідних магнітів є принципово новою технологією, на базі якої може бути створено цілий клас новітніх систем різного призначення (зокрема, судна з магнітогідродинамічними рушіями, електродинамічні прискорювачі мас, технологічне обладнання з безконтактним переміщенням робочих органів). Таким чином, вказана проблема має загальнонаукове та загальнотехнічне значення. Все це свідчить про перспективність, важливість та актуальність дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота виконувалася згідно Постанов ДКНТ СРСР від 1988 р. № 323, Кабінету Міністрів України від 1996р. № 517 та Президії НАН України від 1989 р. № 33, від 1995 р. № 47.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка основних принципів та методів дослідження, проектування і створення високошвидкісного наземного транспорту на електродинамічному підвісі з використанням надпровідних магнітів. Це передбачає вирішення комплексу наукових та технічних проблем, зокрема:

1) розвиток теорії та методів розрахунку систем електродинамічної левітації; визначення статичних та динамічних характеристик різних варіантів підвісу та вибір його раціональних конструктивних схем;

2) розробка та створення стендів для випробування систем левітації з використанням надпровідних магнітів; проведення комплексу експериментальних досліджень систем підвісу;

3) розробка основ розрахунку і проектування транспортних надпровідних магнітів; створення надпровідних магнітів з поліпшеними тепловими та механічними характеристиками;

4) створення стендів для проведення статичних та динамічних випробувань кріомодулів та їх окремих вузлів; експериментальне дослідження механічних, теплових і електромагнітних характеристик розроблених кріомодулів;

5) експериментальне відпрацювання технології експлуатації транспортних кріомодулів;

6) розробка методів та алгоритмів для дослідження динаміки і стійкості екіпажу з електродинамічним підвісом;

7) аналіз динамічних характеристик екіпажів з різними конструктивними схемами та типами підвішування; вибір раціональних схем та систем підвісу, виходячи з умов навантаження, стійкості та безпеки руху.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації розроблено науково-технічні основи створення високошвидкісного наземного транспорту з електродинамічним підвісом. Вперше отримано теоретичні результати в області магнітного підвішування та динаміки високошвидкісного левітуючого транспорту, які полягають в наступному:

- розроблено узагальнену теорію розрахунку силових взаємодій в системі ЕДП з суцільною шляховою структурою, яка дозволяє, на відміну від відомих результатів, враховувати розміри поперечного перетину джерела магнітного поля, а також проводити розрахунки для котушок довільної форми;
- запропоновано новий ефективний метод розрахунку підвісу та бокової стабілізації для систем ЕДП з дискретною шляховою структурою;
- розроблено уточнені математичні моделі та методи дослідження динаміки транспортних систем з електродинамічним підвісом з суцільною та дискретною шляховими структурами;
- дано класифікацію типів нестійкості стаціонарного режиму і запропоновано метод вибору стійких динамічних моделей ВШНТ з дискретною шляховою структурою.

Практичне значення одержаних результатів. Дисертація містить нові конструктивні та технологічні рішення основних елементів та вузлів електродинамічного підвісу з використанням надпровідних магнітів. Ці прикладні розробки полягають в наступному:

- запропоновано оригінальні системи електродинамічної левітації з використанням багатошарового шляхового полотна;
- знайдено конструктивні рішення транспортних надпровідних магнітів, які мають поліпшені теплові та механічні характеристики;

- розроблено та створено нове стендове устаткування для дослідження елементів та вузлів ВШНТ;
- розроблено і створено діючий макетний зразок екіпажу ВШНТ на електродинамічному підвісі з використанням надпровідних магнітів.

Пріоритет оригінальних технічних рішень, запропонованих в дисертаційній роботі та використаних при створенні основних вузлів транспортних засобів, макетного екіпажу ВШНТ і випробувальних стендів, захищено 39 авторськими свідоцтвами. Дані технічні рішення, а також розроблені в дисертації методи динамічного розрахунку і запропоновані рекомендації по вибору раціональних конструктивних схем екіпажу та підвісу можуть бути безпосередньо використані при проектуванні високошвидкісного магнітолевітуючого транспорту.

Результати досліджень можуть також знайти застосування в розробці спеціальних транспортних пристроїв (електродинамічних прискорювачів та інш.), а також при створенні надпровідних магнітів для різних галузей техніки.

Розроблені в дисертації методики розрахунку силових взаємодій в системах підвісу мають самостійне практичне значення для рішення різних задач магнітної левітації.

Особистий внесок здобувача. У рамках програм ДКНТ СРСР та Президії НАН України автор був керівником науково-дослідних робіт з розробки та створення високошвидкісного наземного транспорту з використанням електродинамічної левітації. Йому належить формулювання проблеми та вибір стратегії її розв'язання, оперативне керівництво теоретичними і експериментальними дослідженнями. Особистий внесок автора відображено в окремому розділі колективної монографії [1], роботах [6, 29, 30], написаних без співавторів, а також у статтях [2-5, 7-28, 70-75], в яких здобувачу належить постановка задачі, вибір методу досліджень і аналіз отриманих результатів. Конструкторські та технологічні розробки, які захищено авторськими свідоцтвами [31-69], створено під керівництвом і за безпосередньою участю здобувача.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи було представлено і докладено на I, II, III Всесоюзних науково-технічних конференціях "Підсумки та перспективи створення високошвидкісного наземного транспорту (ВШНТ)" (Новочеркаськ; 1976р., 1980р., 1984р.), науково-технічному семінарі "Проблеми створення високошвидкісного наземного транспорту на надпровідних магнітах" (Ленінград; 1990р.), Всесоюзних науково-практичних конференціях "Науково-технічний прогрес і перспективи розвитку нових спеціалізованих видів транспорту" ("Спецтранс"; Москва, 1985р., 1990р.), Всесоюзній науково-практичній конференції "Застосування нових видів транспорту в народному господарстві та перспективи їх розвитку" (Тюмень; 1978р.), семінарах з проблем машинознавства в Інституті машинознавства АН СРСР (Москва; 04.1987р., 01.1990р.), засіданні Бюро Наукової ради з проблеми "Комплексний розвиток транспорту" при ДКНТ СРСР (Москва;

1986р.), міжвідомчій координаційній раді з нових видів транспорту при Держплані СРСР і ДКНТ СРСР (Москва; 1987р.), XIV Міжнародній конференції з технічної надпровідності та криогенних матеріалів (Київ, 1992р.), I Міжнародній конференції з електромеханіки та електротехнології (МКЕЕ-94; Суздаль, 1994р.), VII і IX міжнародних конференціях "Проблеми механіки залізничного транспорту" (Дніпропетровськ; 1992р., 1996р.), Міжнародній конференції "Міський транспорт і навколишнє середовище у 21-му сторіччі" (Саутгемптон, Англія; 1995р.).

Публікації. Основний зміст, наукові положення і результати роботи опубліковано в монографії та 35 статтях, які надруковано у науково-технічних журналах, матеріалах конференцій і семінарів, а також депоновано в органах науково-технічної інформації. Пріоритет основних технічних рішень, які запропоновано в дисертації, захищено 39 авторськими свідоцтвами.

Структура і об'єм дисертації Дисертація складається з вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел з 164 найменувань та додатка. Загальний обсяг роботи складає 360 стор., в тому числі 261 стор. тексту, 76 стор. з рисунками, 23 стор. додатку.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано важливість і актуальність проблеми, що розглядається, сформульовано мету і задачі дослідження, дано коротку характеристику отриманих в дисертації теоретичних та практичних результатів.

У розділі 1 «Огляд літератури і вибір напрямку досліджень» дано критичний аналіз досліджень в області високошвидкісного магнітолевітуючого транспорту. Відмічено, що зусиллями вчених різних країн (Астахов В.І., Бахвалов Ю.О., Бочаров В.І., Васильєв С.В., Вінокуров В.О., Дроздов С.В., Кім К.І., Кочетков В.М., Лазарян В.А. та його школа, Нагорський В.Д., Омеляненко В.І., Бочерс Р.Х., Девіс Л.С., Івамото М., Менендец Р., Мірік Дж., Оно Є., Рейтц Дж.Р., Торнтон Р.Д., Уранкар Л., Чун-ву Лі, Ямада Т. та інші) вирішено багато які важливі теоретичні задачі та запропоновано значну кількість конструктивних та технологічних рішень в області створення транспорту з ЕДП. Отримані результати ставлять на порядок денний практичну реалізацію таких систем. Разом з тим, ряд задач, що стосуються безпосередньо розрахунку ВШНТ з ЕДП, або розроблено недостатньо детально, або взагалі не розглядалися в літературі.

Так, при розрахунку систем підвісу зі суцільною шляховою структурою використовуються ідеалізовані математичні моделі, що приводить до погрішності у визначенні електродинамічних сил. Кількість розглянутих типів підвісу мала, практично не досліджено підвіс з багат шаровим полотном. Існуючі методи розрахунку систем ЕДП з дискретною шляховою структурою трудомісткі.

Недостатньо розвинено методи дослідження динаміки левітуючого транспорту. Розглянуто обмежену кількість конструктивних схем і типів підвішування, причому, як

правило, використовувалися спрощені динамічні моделі. Практично не досліджено рух на криволінійних дільницях шляху. Відсутні ефективні методи аналізу стійкості стаціонарного руху системи. Не розглянуто вплив пружності несучих конструкцій шляхової структури на величини електродинамічних сил.

Відомі конструктивні рішення ряду основних вузлів та силових елементів систем підвісу не у повній мірі задовольняють сучасним вимогам. Так, для основного силового елемента ЕДП – кріомодуля – не вдалося знайти рішення, яке досить повно задовольняє суперечливим вимогам міцності та теплозахисту.

Наявність широкого кола невирішених або недостатньо вивчених задач визначила основні напрями даної роботи. Останні включають теоретичні дослідження в області магнітної левітації та динаміки левітуючого екіпажу, розробку нових типів підвісу і кріомодулів з поліпшеними характеристиками, створення стендів для комплексного дослідження систем левітації, проведення циклу експериментальних досліджень вузлів кріомодулів та левітуючого екіпажу. Таким чином, в роботі використовується комплексна методика досліджень, яка включає математичне та фізичне моделювання і велику кількість натурних експериментів.

У розділі 2 «Розвиток теорії і методів розрахунку електродинамічних сил в системах підвісу зі суцільним шляховим полотном» розглядаються різні системи підвісу. Основну увагу приділено розробці загальної методики розрахунку сил, діючих на джерело первинного магнітного поля у вигляді однієї або декількох котушок. Визначено залежність цих сил від форми та розмірів котушок, швидкості руху, товщини і структури шляхового полотна, його електричної провідності та магнітної проникності, а також від інших параметрів систем підвісу.

Ці задачі раніше розглядалися в літературі з використанням ряду спрощуючих припущень. Так, джерело первинного магнітного поля представлялося контуром простої форми, який утворено струмовими нитками нескінченно малого перетину. Однак спрощення реальної форми котушок та ігнорування розмірів їх поперечного перетину вносить погрішності в розрахунок силових характеристик систем ЕДП. Тому в дисертації розглянуто загальну задачу розрахунку систем ЕДП, в яких джерело первинного магнітного поля має довільну форму та кінцеві розміри поперечного перетину.

Розрахункову схему нормально-потокової системи ЕДП подано на рис.1. Одна або декілька котушок, в яких протікає постійний струм, рухаються з постійною швидкістю v над плоским електропровідним шляховим полотном товщиною T і нескінченними розмірами в горизонтальних напрямках. Струм котушки створює первинне магнітне поле, яке наводить в шляховому полотні вихрові струми, які, в свою чергу, створюють вторинне магнітне поле. Взаємодія цього поля зі струмом котушки приводить до виникнення діючих на неї сил.

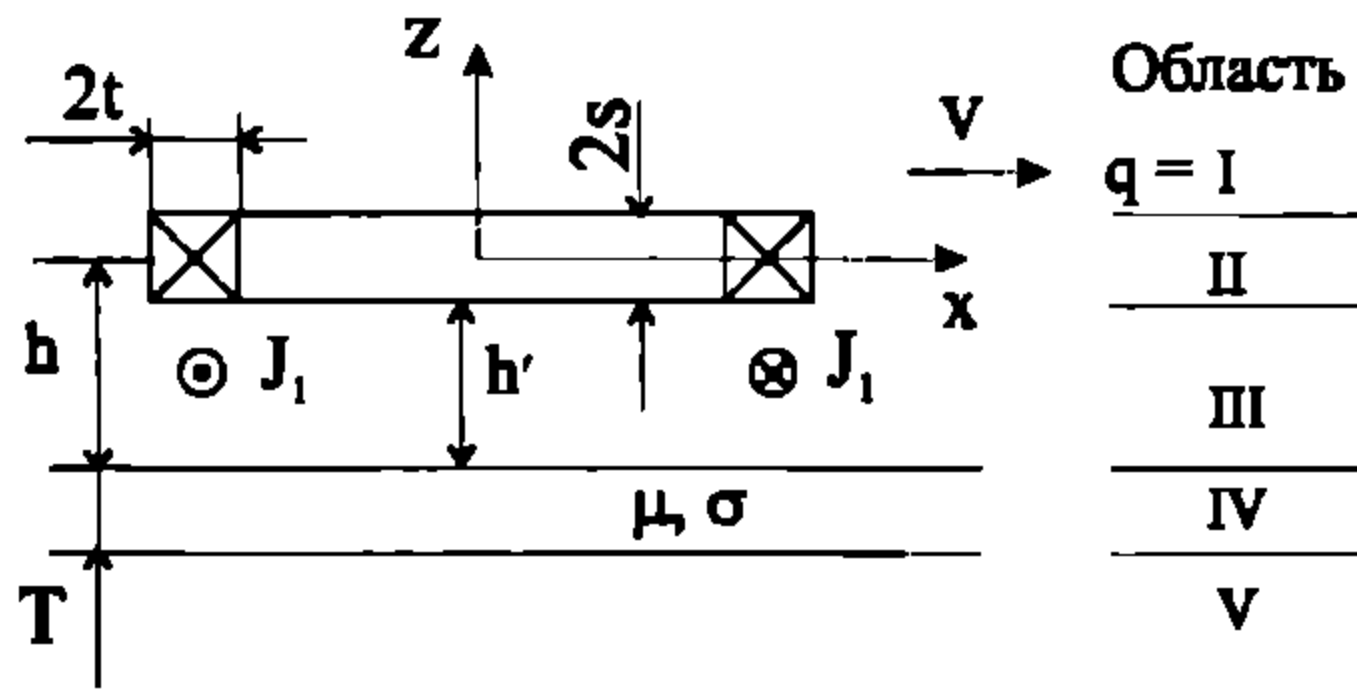


Рис.1. Розрахункова схема нормально-поточної системи

Розподіл магнітних та електричних полів описуються системою рівнянь Максвелла. Після деяких перетворень та природних спрощуючих припущень отримано наступну крайову задачу відносно вектора магнітної індукції \vec{B} :

$$\Delta \vec{B} + \mu \sigma v \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} = -\mu g_0 \vec{J}_1; \quad (1)$$

$$B_z^q = B_z^{(q+1)}; \quad \frac{1}{\mu^q} B_{x,y}^q = \frac{1}{\mu^{(q+1)}} B_{x,y}^{(q+1)}; \quad \vec{B} \Big|_{z=\pm\infty} = 0,$$

де B_x^q, B_y^q, B_z^q — компоненти вектора \vec{B} на межах q -ї області, \vec{J}_1 — вектор щільності струму джерела магнітного поля.

Рішення задачі знайдено за допомогою двовимірного інтегрального перетворення Фур'є. Шуканий вектор сили \vec{F} , діючої на котушку, визнається через \vec{B} за законом Ампера. Відповідний інтеграл по об'єму котушки після ряду перетворень приведено до виду

$$\vec{F} = 8\pi^2 \mu_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\vec{\chi}}{k_x^2 k} \text{sh}^2(ks) R(\vec{k}) |J_{1y}(\vec{k}, s, t)|^2 e^{-2kh} dk_x dk_y, \quad (2)$$

де

$$R(\vec{k}) = \frac{\alpha - k}{\alpha + k} (1 - e^{-2\alpha\tau}) / \left[1 - \left(\frac{\alpha - k}{\alpha + k} \right)^2 e^{-2\alpha\tau} \right];$$

$$\vec{\chi} = [-jk_x, -jk_y, k]; \quad \vec{k} = [k_x, k_y, 0]; \quad \alpha^2 = k^2 - jk_x \mu_0 \sigma v; \quad j^2 = -1;$$

$J_{1y}(\vec{k}, s, t)$ — y -складова Фур'є-образу щільності струму котушки.

В теорії ЕДП компоненти вектора \vec{F} прийнято називати підйнятною (левітаційною) $F_L = F_z$, гальмівною $F_D = -F_x$ та боковою $F_S = F_y$ силами.

Для котушок, що складаються з кусочно-лінійних усічених призматичних елементів, за допомогою (2) рішення знайдено в явному вигляді. Оскільки котушку довільної форми можна скіль завгодно точно апроксимувати вказаними елементами, то цей результат дозволяє розраховувати силові характеристики ЕДП при довільній формі котушок з урахуванням реальних розмірів їх поперечного перетину.

За допомогою отриманих результатів проведено детальний аналіз залежності сил, діючих на котушку, і левітаційної якості $k_L = F_L / F_D$ від швидкості руху та основних параметрів системи підвісу (форми котушки, розмірів її поперечного перетину, товщини полотна і висоти підвісу).

При дослідженні впливу форми котушки на левітаційні характеристики системи підвісу розглянуто прямокутну, ромбічну і круглу котушки з однаковим периметром середнього витка. Зіставлення отриманих залежностей дозволило узагальнити на випадок котушок з кінцевим розміром поперечного перетину наступне емпіричне правило, сформульоване раніше [1] для ідеальних струмових контурів: значення сил зростають при збільшенні площі котушки. Згідно з цим правилом максимальні значення сил відповідають кільцевій котушці. Однак, з практичної точки зору, найбільш доцільним є використання вузьких прямокутних котушок, оскільки це дозволяє зменшити ширину шляхової структури.

При дослідженні впливу конфігурації поперечного перетину струмових елементів на левітаційні характеристики системи ЕДП встановлено, що розміри поперечного перетину котушки істотно впливають на силові характеристики системи ЕДП. Найбільш доцільним є застосування котушки з найбільшим по горизонталі розміром (шириною) $2t$ поперечного перетину, оскільки це приводить до збільшення підйімальної сили.

На рис.2 наведено криві підйомної F_L (пунктир) та гальмівної F_D (безперервні лінії) сил від швидкості руху для прямокутної котушки (розміри по середньому перетину вздовж осей x та y : $1,5 \times 0,5$ м; $2s \times 2t = 0,08 \times 0,08$ м) за висоти підвісу $h' = h - s = 0,2$ м та різних значеннях товщини T полотна; кривим 1 відповідає значення $T = 0,005$ м, 2 – $0,01$ м, 3 – $0,02$ м, 4 – $0,1$ м; сили нормовані на величину $F_0 = 8\mu_0 N^2 / \pi^2$, де N — намагнічуюча сила котушки, μ_0 — магнітна проникність вакуума. Як видно, при збільшенні товщини полотна

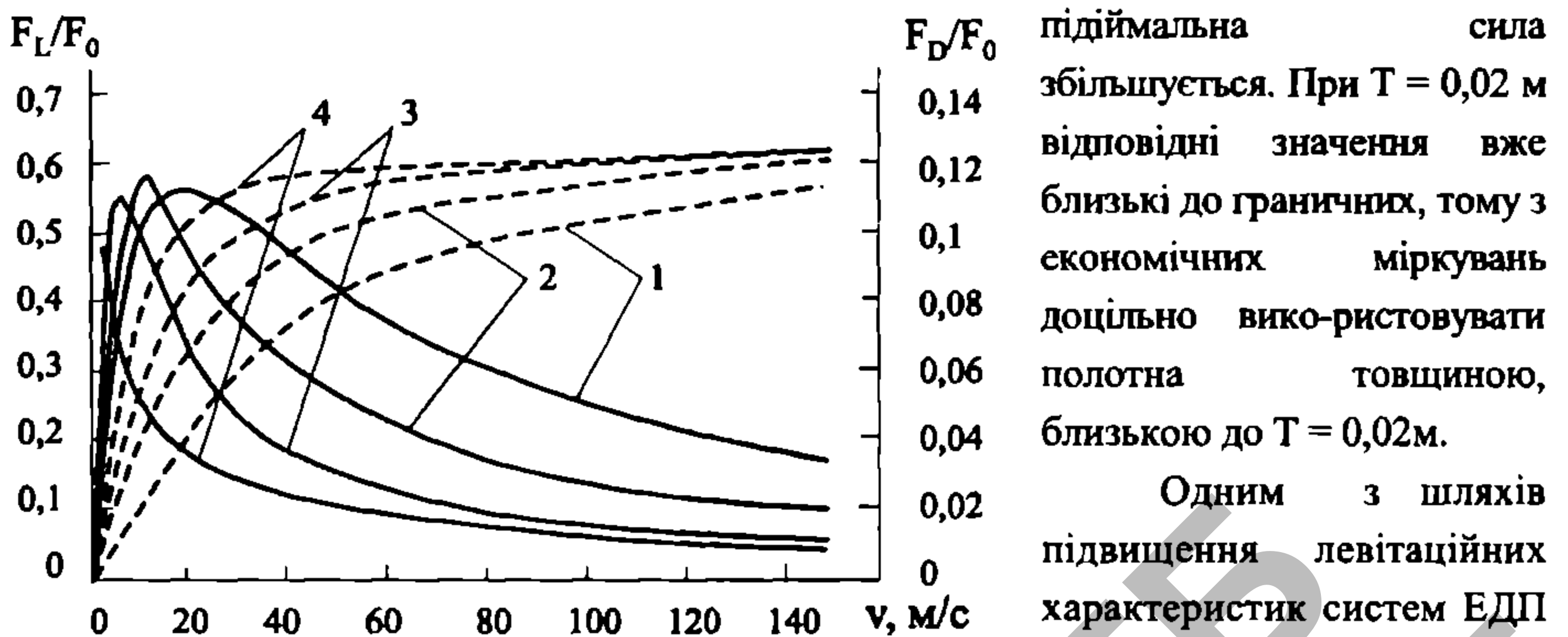


Рис.2. Залежності підйомної та гальмівної сил від швидкості руху

Різні варіанти систем електродинамічного підвісу з модифікованою шляховою структурою запропоновано дисертантом в роботах [11,14,19,23,28].

Конструктивна схема однієї з найбільш загальних систем – нуль-потоккової системи ЕДП з двошаровим полотном – подано на рис.3. Дві котушки жорстко пов'язані між собою; напрями струмів в котушках протилежні. Між котушками

знаходиться шляхове полотно, що складається з двох шарів: верхнього провідного і нижнього феромагнітного, який має завдану магнітну проникність.

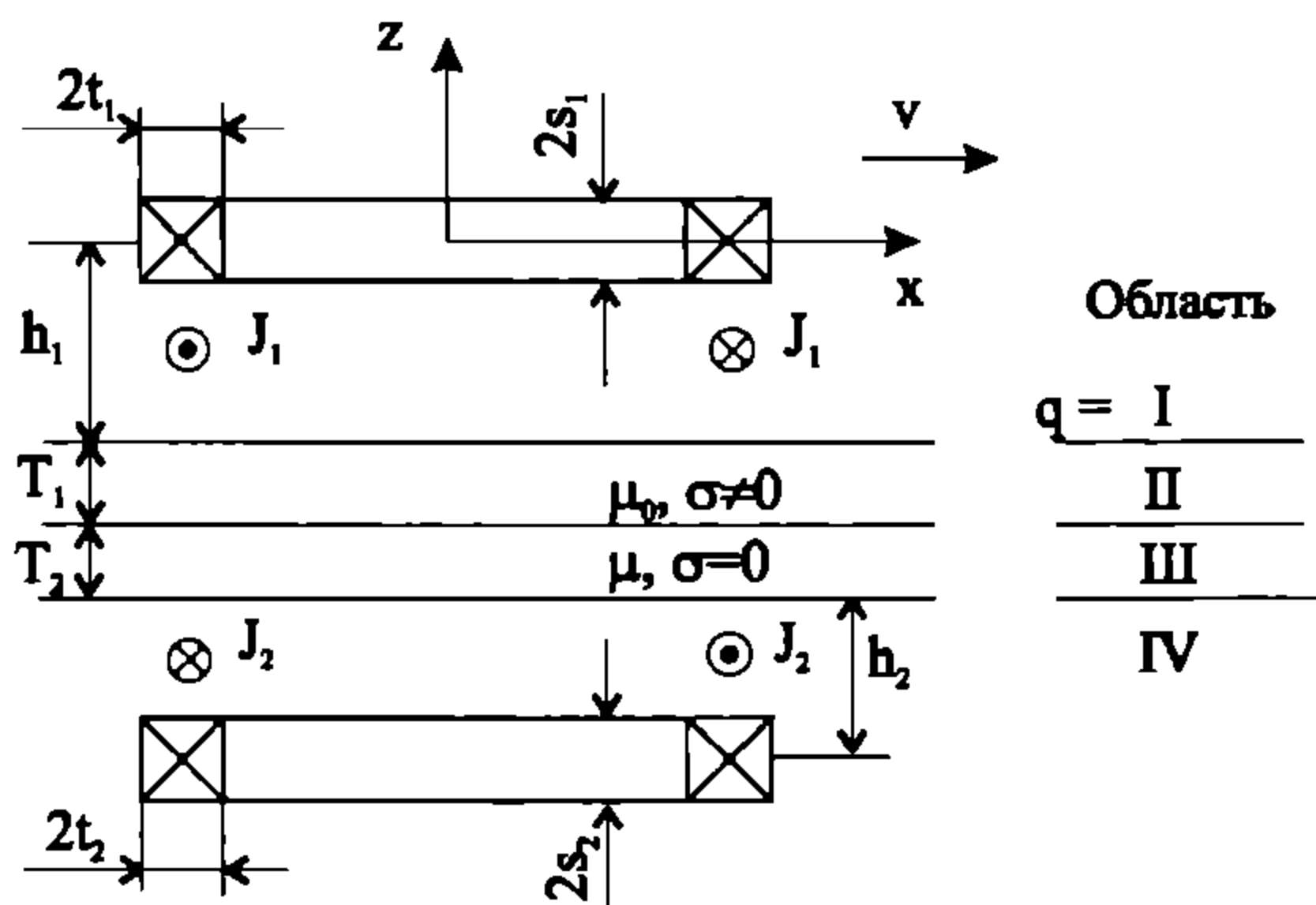


Рис.3. Конструктивна схема нуль-поточної системи ЕДП з двошаровим полотном

варіантом ЕДП (рис. 1) та типовій нуль-поточної системі, в якій використовується одношарове полотно (рис. 3 при $T_2=0$).

У розділі 3 «Розвиток теорії та методів розрахунку електродинамічних сил в системах підвісу і стабілізації з дискретною шляховою структурою» розглянуто системи з шляховою структурою у вигляді окремих замкнених контурів. При русі поїздних котушок магнітний потік, що створюється ними, індукує е.д.с. в цих контурах, в результаті чого виникають електродинамічні сили, які забезпечують левітацію і напрям (бокову стабілізацію) екіпажу.

Типові схеми електродинамічного підвісу з дискретною шляховою структурою подано на рис.4, де 1 – поїздні котушки, 2 – контури підвісу, 3 – контури напрямку.

У нуль-поточній системі направляючі контури з'єднані між собою в замкнений

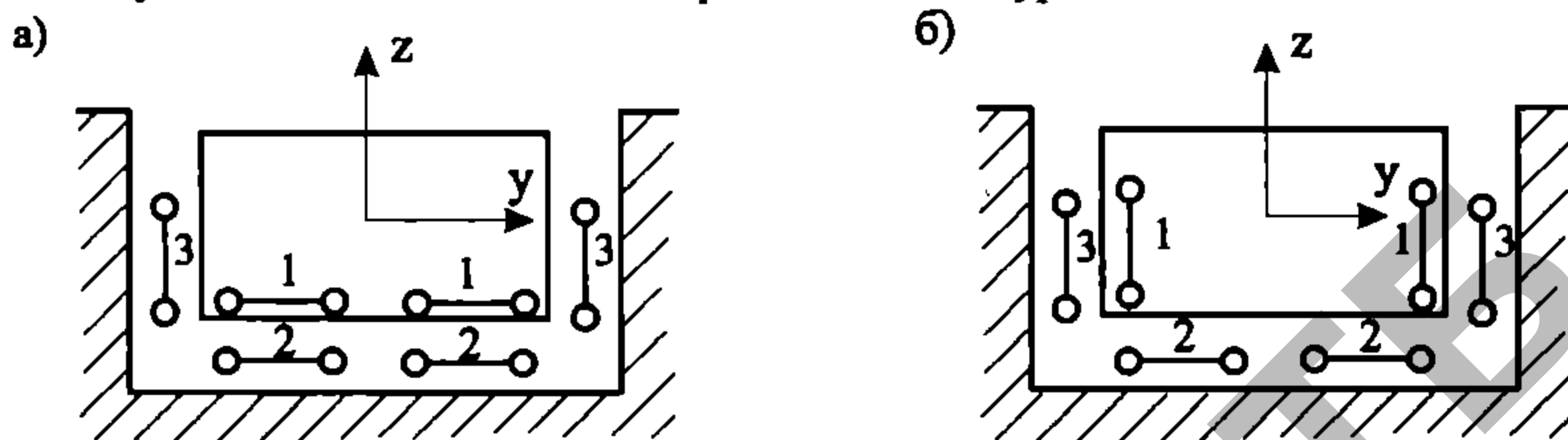


Рис.4. Типові схеми електродинамічного підвісу з дискретною шляховою структурою

ланцюг. У комбінованій системі котушки, розташовані на бокових стінках шляхопроводу, виконують одночасно функції підвісу і напрямку. Поліпшені характеристики підвісу досягаються при використанні контурів у вигляді "вісімки",

За допомогою описаної вище методики знайдено співвідношення для сил, діючих на систему жорстко пов'язаних котушок, кожна з яких має довільну форму та кінцеві розміри поперечного перетину. Чисельні розрахунки для прямокутних струмових контурів показали, що система, яка розглядається, має більш високі левітаційні характеристики порівняно з нормально-поточним

Область
$q = I$
II
III
IV

розташованих на бокових стінках шляхопроводу. У принципі, можливо застосування інших схем, наприклад, з похилим розташуванням котушок і шляхових контурів.

Задача розрахунку сил, діючих на поїздні котушки, вимагає відшукування стаціонарного рішення великої кількості рівнянь (які визначають струми в контурах підвісу і напрямку) і є досить трудомісткою. Тому різними авторами запропоновано методи її наближеного рішення. На жаль, загальним недоліком цих методів є відсутність оцінки достовірності отриманих результатів та швидке зростання трудомісткості рішення при збільшенні порядку системи.

У даному розділі запропоновано ефективний метод розрахунку систем електродинамічного підвісу і напрямку. Як відомо, струми в шляхових контурах описуються наступною системою диференціальних рівнянь:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = e, \quad (3)$$

де I – вектор-стовпець струмів $i_k(t)$, $k = 1, \dots, p$ (p – число шляхових контурів, що враховуються); L – квадратна матриця коефіцієнтів l_{nk} самоіндукції ($n = k$) та взаємоіндукції ($n \neq k$) шляхових контурів; R – діагональна матриця з елементами r , де r – активний опір контура; e – вектор-стовпець е.д.с. e_k , які наведено магнітним потоком поїздних котушок у шляхових контурах.

У разі стаціонарного руху подовжні координати котушок визначаються виразами $x_i = x_{i0} + vt$; решта координат котушок постійні. При цьому інтерес представляє стале рішення, при якому струми в контурах задовольняють співвідношенню

$$i_s(t) = i_0(t - sT), \quad (4)$$

де $T = H/v$; H – крок контурів. Таким чином, для визначення струмів $i_s(t)$, а, отже, електродинамічних сил досить обчислити струм в одному контурі.

Внаслідок співвідношення (4) задача визначення $i_0(t)$ зводиться до рішення диференційно – різницевого рівняння

$$l_0 \frac{di_0}{dt} + r i_0(t) = - \sum_{s \neq 0} l_s \frac{di_0(t - sT)}{dt} + e_0(t), \quad (5)$$

де $l_s = l_{nk}$ ($s = |n-k|$).

Ідею запропонованого метода оснований на такому міркуванні: коефіцієнт взаємної індукції l_s ($s \neq 0$) суттєво менш за коефіцієнт самоіндукції l_0 і швидко зменшується з ростом s (наприклад, в випадку квадратних контурів з боками $a = 0,3$ м та кроком $H = 0,36$ м маємо $l_1/l_0 = 0,0609$, $l_2/l_0 = 0,00420$, $l_3/l_0 = 0,00115$, $l_4/l_0 = 0,000473$). Тому природно вирішувати рівняння методом послідовних наближень, прийнявши у якості нульового наближення $i_0^0(t)$ рішення при $l_s = 0$ ($s \neq 0$). Підставивши $i_0^0(t)$ до правої частини (5), визначаємо $i_0^1(t)$ і т.і. Процес повторюється, доки $\max |i_0^{k+1}(t) - i_0^k(t)| < \epsilon$, де ϵ – обумовлена точність.

Таким чином, запропонований метод, на відміну від відомих методів, допускає ефективну оцінку точності результатів, що отримуються. Крім того, трудомісткість методу мало залежить від числа контурів шляхової структури, що враховуються.

Для оцінки ефективності описаного методу проведено числові розрахунки різних схем підвісу і напрямку. У всіх випадках збіжність послідовних наближень є вельми швидкою; вже друге наближення $i_0^2(x)$ практично співпадає з точним рішенням.

За допомогою вказаного методу виконано аналіз впливу параметрів підвісу на величини електродинамічних сил. Розглядалися системи підвісу з горизонтальним та вертикальним розташуванням поїздних котушок і шляхових контурів, причому останні мали вигляд прямокутників або "вісімок". У результаті дано порівняльний аналіз різних схем підвісу і рекомендації щодо вибору їх параметрів. Зокрема, встановлено, що при фіксованих розмірах поїздних котушок середні значення левітаційної F_L та гальмівної F_D сил (на відміну від їх змінних складаючих $F_L(t)$ і $F_D(t)$) мало залежать від довжин шляхових контурів. За прийнятої умови мінімум $|F_L(t)|$ і $|F_D(t)|$ досягається, коли відношення подовжніх сторін шляхових контурів та поїздних котушок близькі до $1/3$ і $2/3$ (помітимо, що друге відношення переважніше, оскільки воно відповідає меншій витраті матеріалів шляхових контурів на одиницю довжини шляху).

При використанні контурів у вигляді "вісімки" левітаційна сила дещо меншає порівняно з прямокутними контурами, однак левітаційне відношення k_L значно збільшується за рахунок істотного зниження гальмівних сил.

У системах електродинамічного підвішування на екіпажі встановлюється декілька поїздних котушок. Індуковані ними струми в шляхових контурах підсумовуються, внаслідок чого сили, діючі на кожну з котушок, відрізняються від сил у разі окремої котушки ($n=1$). У роботі проаналізовано вплив відстаней δ між сусідніми котушками, а також напрямів відповідних струмів на величини електродинамічних сил.

На рис.5 для випадку двох котушок подано графіки відповідних левітаційних сил в залежності від відстані δ при згідному (рис.5а) і зустрічному (рис.5б) напрямках струмів в сусідніх котушках. Як видно, левітаційна сила F_L^1 в першій (у напрямі руху) котушці практично не залежить від δ і напрямів струмів та дорівнює силі F_L^0 у разі окремої котушки, в той час як сила у другій котушці F_L^2 при згідному напрямі струмів менше, а при зустрічному — більше F_L^0 . Таким чином, для збільшення сумарної левітаційної сили необхідно, щоб напрями струмів у сусідніх котушках були протилежні. Цей висновок справедливий у разі трьох та більше котушок.

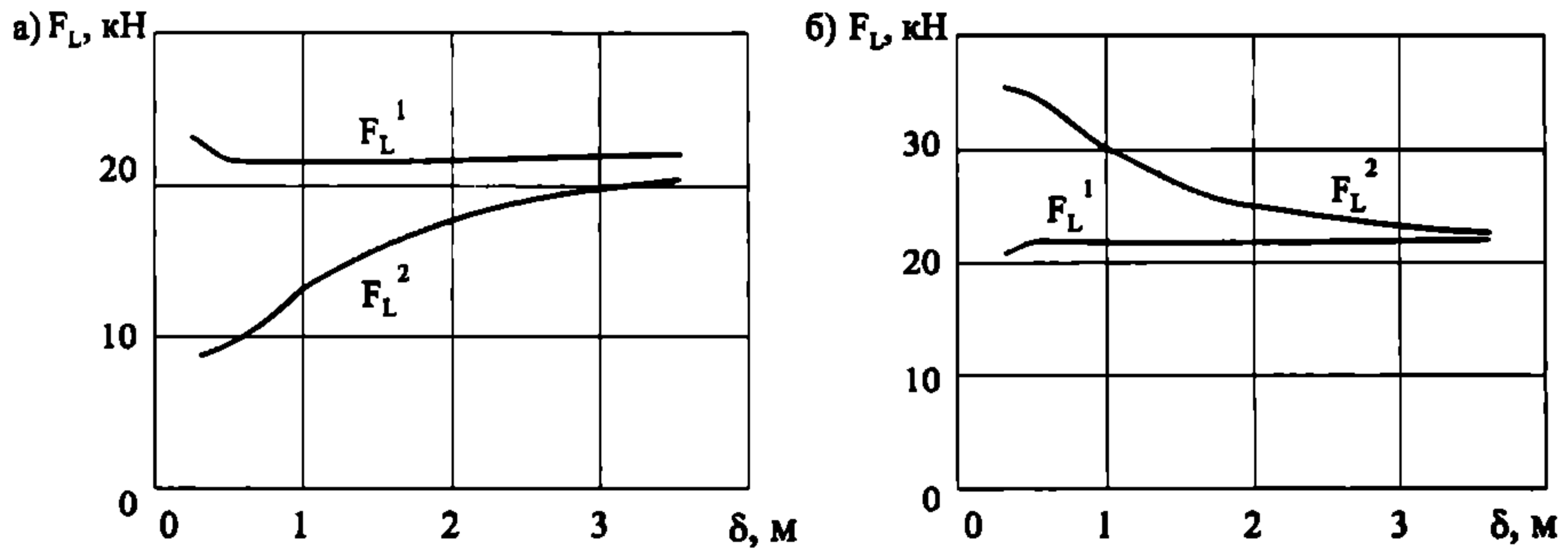


Рис.5. Залежність левітаційних сил від віддалення поміж котушками при швидкості $v = 100$ м/с

Для дослідження динамічних характеристик системи ЕДП з дискретною шляховою структурою було розглянуто вертикальні коливання котушки відносно її стаціонарного руху (при якому середня левітаційна сила дорівнює вазі системи). Ці коливання описуються рівнянням

$$m\ddot{z} = F_L(I, z) - mg, \quad (6)$$

де z – вертикальна координата котушки; m – маса системи; g – прискорення сили ваги; $I = (i_1, \dots, i_p)$ – вектор струмів в контурах, визначуваний рівнянням (3). Таким чином, для рішення задачі необхідно вирішувати спільно рівняння (3) та (6).

Рішення задачі виконувалося чисельними методами для різних швидкостей руху

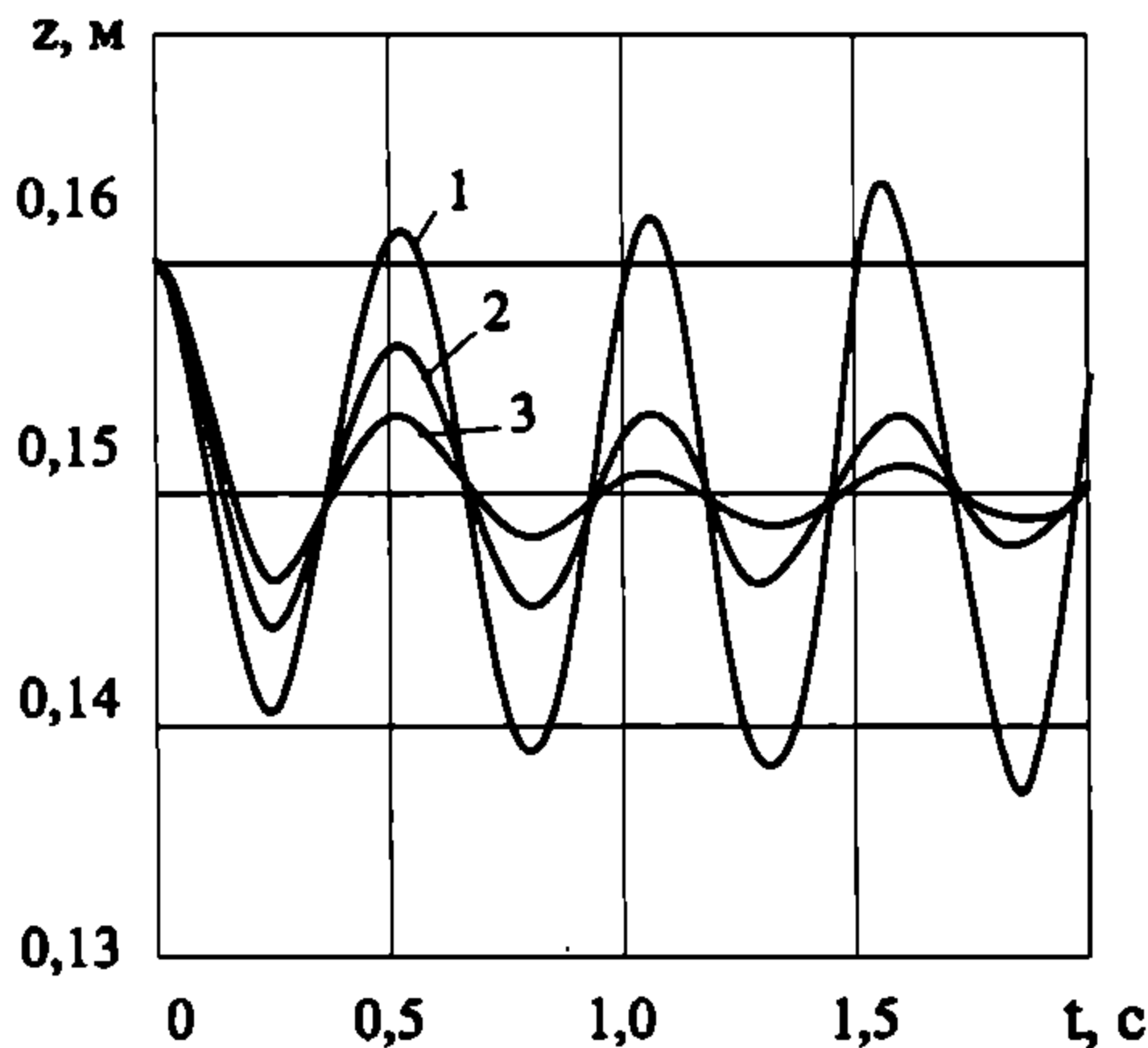


Рис.6. Вертикальні коливання екіпажу в системі з дискретною шляховою структурою

допомогою динамічного гасителя коливань з в'язким тертям ($1 - \chi = 0$; $2 - \chi = 0.025$; $3 - \chi = 0.075$, де χ – відносна маса гасителя). Як видно, ефективна стабілізація досягається вже при $\chi=0,025$; зі збільшенням маси гасника швидкість затухання коливань зростає.

і схем підвішування. У всіх розглянутих випадках рух є коливальним, причому амплітуди послідовних відхилень від положення рівноваги зростають. Таким чином, стаціонарний рух в системі з дискретною шляховою структурою є нестійким.

Помітимо, однак, що у всіх випадках швидкість зростання амплітуд порівняно невелика, тому введення зовнішніх дисипативних сил дозволяє стабілізувати систему. На рис.6 подано результати дослідження стабілізації системи за

Найважливішими показниками якості високошвидкісних транспортних засобів є їх динамічні характеристики, що визначають, зрештою, можливість і умови транспортування пасажирів та вантажів. Тому створення транспортних засобів з електродинамічним підвісом вимагає глибоких теоретичних досліджень в області динаміки систем ЕДП. У розділі 4 «Динаміка транспортних систем з електродинамічним підвісом» розроблено методи дослідження коливань, стаціонарних режимів та стійкості руху левітуючих екіпажів; за допомогою цих методів проведено аналіз різних конструктивних схем екіпажів і типів підвісу.

Екіпаж моделювався системою твердих тіл (корпус, надпровідні магніти, рами візків), з'єднаних між собою пружно-дисипативними елементами. Розглядалися як суцільна, так і дискретна шляхові структури.

Найбільш детально досліджено стаціонарні режими прямолінійного руху, а також руху по шляху постійної кривизни. При цьому передбачалося, що електродинамічні та аеродинамічні гальмівні сили врівноважуються силою тяги лінійного двигуна.

Транспортний засіб з електродинамічним підвісом являє собою електромеханічну систему, поведінка якої в загальному випадку описується механічними змінними (узагальненими координатами екіпажу) та електричними змінними (струмами в елементах підвісу і напрямку). Поведінку механічних змінних визначає система диференціальних рівнянь Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_\nu} - \frac{\partial T}{\partial q_\nu} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_\nu} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_\nu} = Q_\nu \quad (\nu = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

де q_ν – узагальнені координати; n – число мір свободи системи; T , Π і Φ – відповідно кінетична енергія, потенційна енергія та функція розсіяння; Q_ν – узагальнені сили. За узагальнені координати прийнято подовжні, поперечні, вертикальні та відповідні кутові переміщення твердих тіл системи (бокове качання, галопування, виляння).

У системі з дискретною шляховою структурою електричні змінні визначаються системою рівнянь (3). У вираз Q_ν входять електродинамічні сили, які залежать від струмів у контурах підвісу та напрямку. Останні, в свою чергу, залежать від відносного положення поїздних котушок і шляхових струмопровідних елементів та, тим самим, від координат q_ν . Таким чином, системи рівнянь відносно механічних і електричних змінних виявляються пов'язаними та в загальному випадку їх необхідно вирішувати спільно.

У системі зі суцільним струмопровідним полотном обчислення електродинамічних сил при довільному характері руху поїздних котушок являє собою надзвичайно складну задачу. Тому при дослідженні динаміки такої системи використовувалася апроксимація рішень, отриманих для сил взаємодії котушки, яка здійснює гармонійні коливання відносно шляхового полотна.

У стаціонарному режимі руху транспортної системи зі суцільним струмопровідним полотном координати постійні ($q_0(t) \equiv q_0$). Підстановка їх в (7) приводить до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно q_0 . Ці рівняння вирішувалися ітераційними методами.

Стаціонарні режими руху можуть бути фізично реалізовані, за умов їх стійкості; тому аналіз стійкості є найважливішим елементом динамічного розрахунку системи. У системі зі суцільною шляховою структурою стійкість досліджувалася за рівняннями першого наближення. З цією метою рівняння збуреного руху лінеаризовувалися в околиці q_0 і обчислювалися власні значення λ_k відповідної матриці; рух стійкий, якщо $\max[\text{Re}(\lambda_k)] < 0$.

Дослідження нестационарних режимів руху провадилось за допомогою чисельного інтегрування. Було розглянуто наступні конструктивні схеми транспортної системи зі суцільним струмопровідним полотном (рис.7): I – надпровідні магніти прикріплено до кузова жорстко або за допомогою пружно-дисипативних елементів; II – магніти жорстко прикріплено до окремої рами, з'єднаної з кузовом пружно-дисипативними зв'язками; III – магніти прикріплено до двох рам, які безпосередньо не зв'язані між собою або пов'язані за допомогою пружних чи шарнірних елементів. Для всіх схем розглядалися випадки П-образної та U-образної шляхової структури.

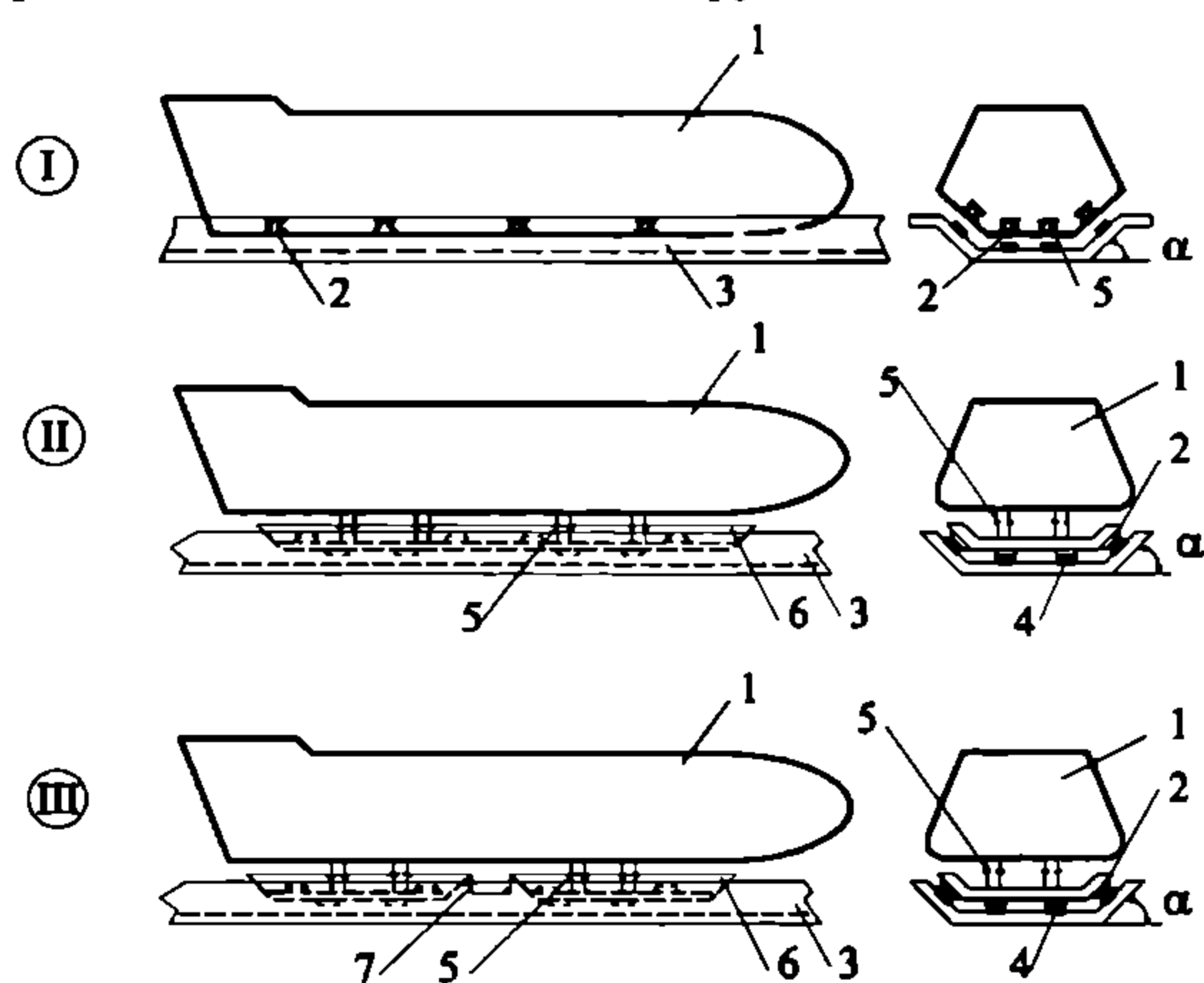


Рис. 7. Розрахункові схеми транспортних систем зі суцільною шляховою структурою.

- 1 - кузов; 2 - надпровідний магніт; 3 - шляхова структура;
- 4 - струмопровідний елемент шляхової структури;
- 5 - пружно-дисипативні елементи; 6 - рама;
- 7 - пружний елемент або шарнір.

обумовлена тим, що тут коефіцієнт дисипації електродинамічного підвісу є від'ємним. Стабілізацію досягнуто введенням пружно-дисипативних зв'язків між кузовом та магнітами. Однак запас стійкості малий; окрім того, система вельми чутлива до збурень.

У системі з окремою рамою (схема II) стаціонарний рух стійкий при всіх швидкостях. Динамічні характеристики екіпажу поліпшуються при пониженні центра ваги корпусу. Однак загасання по координатах бокового віднесення, бокового качання і виляння дуже повільне.

прикріплено до окремої рами, з'єднаної з кузовом пружно-дисипативними зв'язками; III – магніти прикріплено до двох рам, які безпосередньо не зв'язані між собою або пов'язані за допомогою пружних чи шарнірних елементів. Для всіх схем розглядалися випадки П-образної та U-образної шляхової структури.

При прямолінійно-му русі у схемі I при жорсткому кріпленні магнітів до кузова стаціонарний рух стійкий при $v < 70$ м/с та нестійкий при $v > 70$ м/с. Нестійкість

В екіпажах з двома рамами (схема III) дещо збільшується показник стійкості руху системи. Найкращі показники отримано для U-образної шляхової структури, де швидкість загасання коливань досить велика по всіх координатах (при цьому виявляється, що схема з пов'язаними рамами переважніше за схему з вільними рамами). Таким чином, проведені дослідження показали, що найкращі динамічні якості при стаціонарному прямолінійному русі має схема з двома пов'язаними проміжними рамами та жорстко прикріпленими до них магнітами при U-образній шляховій структурі.

Досліджено також коливання і стійкість руху системи зі суцільною шляховою структурою на криволінійних ділянках змінної та постійної кривизни. Як показали розрахунки, частоти та швидкості загасання коливань при русі по криволінійному шляху постійної кривизни близькі до відповідних величин при прямолінійному русі. Як і належало чекати, в перехідних і кругових кривих бокове віднесення та бокове качання

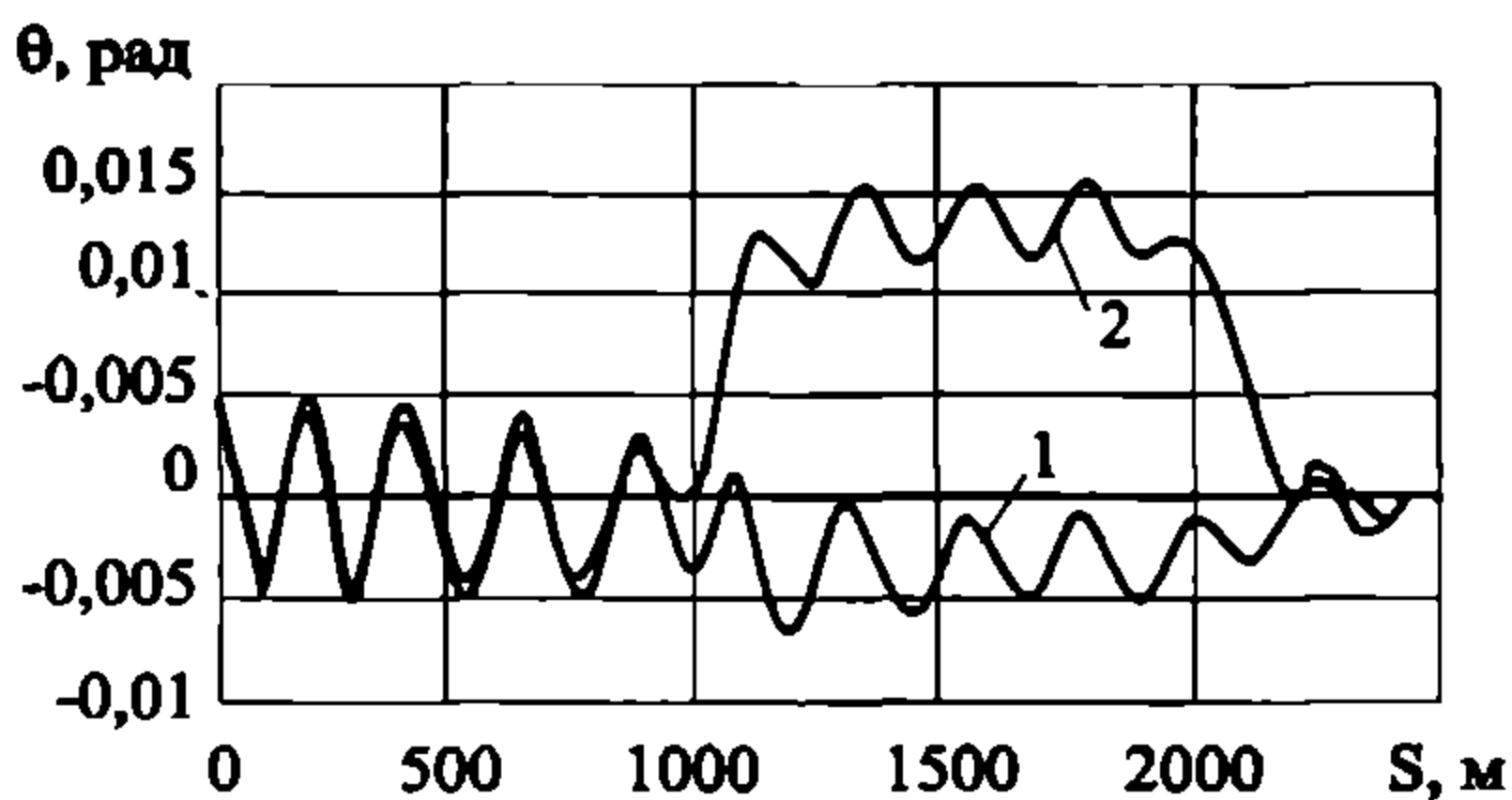


Рис.8. Залежності кутів бокового качання кузову (1) та рами (2) від пройденого шляху.

амплітуда бокового качання кузова дорівнює 0.35 рад, в той час як для U-образної структури вона дорівнює лише 0.006 рад (рис.8, де $0 < S \leq 800$ м – прямолінійна ділянка шляху, $800 < S \leq 1300$ м – вхідна перехідна крива, $1300 < S \leq 1800$ м – кругова крива, $1800 < S \leq 2300$ м – вихідна перехідна крива). Таким чином, з точки зору коливань та стійкості руху системи на криволінійних ділянках шляху найкращою також є схема III з U-образною шляховою структурою.

Було також досліджено аварійні режими руху, викликані знеструенням одного з надпровідних магнітів. Системи порівнювалися за запасом стійкості та амплітудам коливань, а також за критерієм безпеки (відсутності зіткнень з шляховою структурою після знеструення). Виявилось, що в схемі з пружно-пов'язаними рамами безпека забезпечується 16 магнітами, в той час як в інших схемах необхідно до 24 магнітів.

У системах з дискретною шляховою структурою, незважаючи на наявність періодичної складової електродинамічних сил $F(q)$, координати стаціонарного режиму також практично постійні. Підстановка середніх значень $F(q)$ в (7) приводить до системи рівнянь відносно q . Для відшукування $F(q)$ необхідно знайти сталі рішення

кузову значно зростають завдяки дії відцентрових сил. Найбільш сильно цей ефект виявляється у разі П-образної шляхової структури, що пояснюється значним перевищенням центра ваги над центром повороту корпусу. Так, для кривої радіуса $R=8000$ м при швидкості $v=120$ м/с для схеми III з П-образною структурою

системи диференціальних рівнянь, яка описує струми в шляхових контурах; рішення цієї задачі здійснено запропонованим в розділі 3 методом.

Як відмічено вище, за наявності збурень в системі підвісу з дискретною шляховою структурою амплітуди вертикальних коливань зростають, що свідчить про нестійкість стаціонарного режиму. При дослідженні просторових коливань такої системи виявлено інший тип нестійкості, при якому швидке наростання початкових збурень не супроводиться коливаннями системи відносно рівноважного стану. У механіці такі типи нестійкості називаються відповідно флатерним та дивергентним.

На відміну від флатерної, дивергентна нестійкість не усувається дисипативними силами. Численні розрахунки показали, що в більшості розглянутих конструктивних схем така нестійкість має місце в широкому діапазоні параметрів. Оскільки кількість змінних параметрів системи велика, а перевірка стійкості конкретної системи вимагає проведення трудомістких розрахунків, то вибір стійкої конструктивної схеми являє собою вельми складну задачу.

Для вибору стійких динамічних моделей та параметрів систем з електродинамічним підвісом у дисертації запропоновано метод, який не вимагає інтегрування рівнянь системи. Ідея методу полягає в заміні котушок на пружні опори, потенційні функції яких дорівнюють усередненим за часом потенційним функціям електродинамічних сил. У результаті задача зводиться до аналізу механічної системи з пружними опорами, умовою стійкості якої служить позитивна визначеність відповідної квадратичної форми, яка визначає потенційну енергію системи.

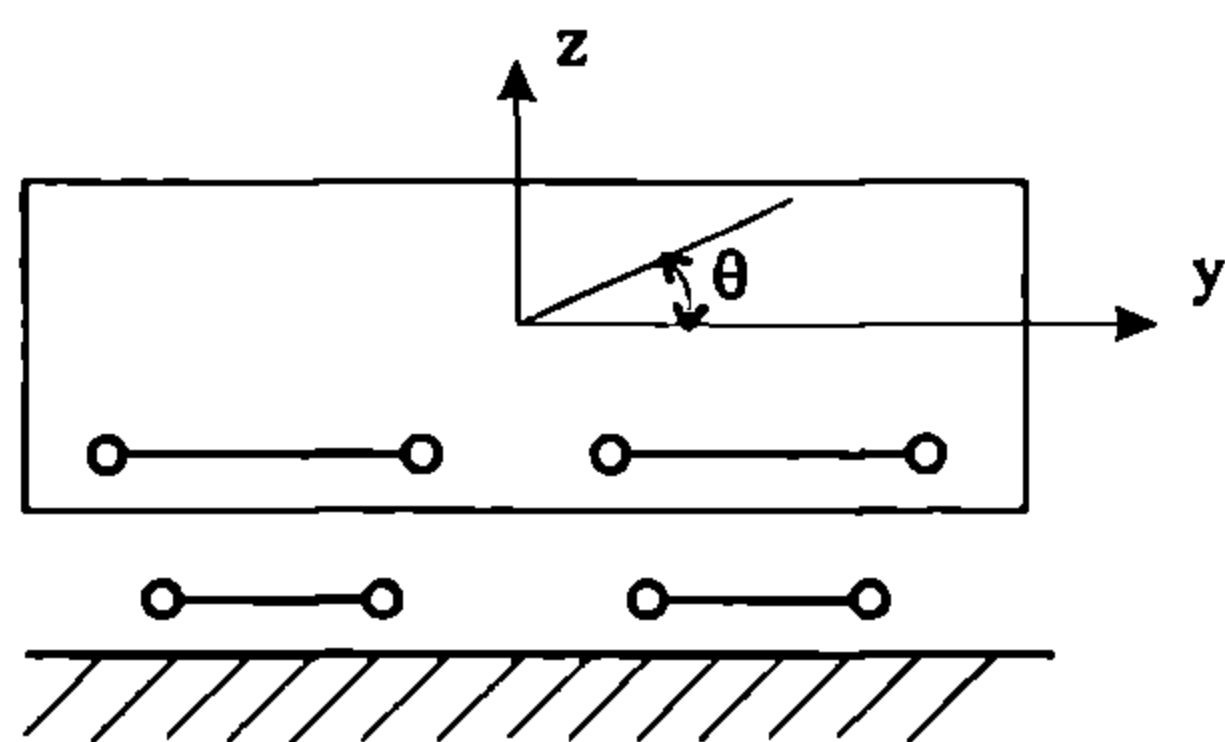


Рис. 9. Динамічна схема екіпажу

Для оцінки достовірності запропонованої методики проведено числові розрахунки коливань системи, поданої на рис.9, в площині YOZ. На рис.10а наведено графіки коливань системи при значеннях параметрів, за яких потенційна функція має мінімум по z та максимум по y . Як видно, система нестійка, причому рух по

вертикальній z та кутівій θ координатах є коливальним зі зростаючими амплітудами, в той час як бокове відхилення зростає монотонно (тобто по координаті y має місце дивергентна нестійкість). На рис. 10б подано коливання у випадку позитивно визначеної потенційної функції. Як видно, всі амплітуди монотонно убивають, тобто стаціонарний рух системи стійкий. Таким чином, запропонована методика дозволяє отримувати достовірні висновки про стійкість стаціонарного руху системи.

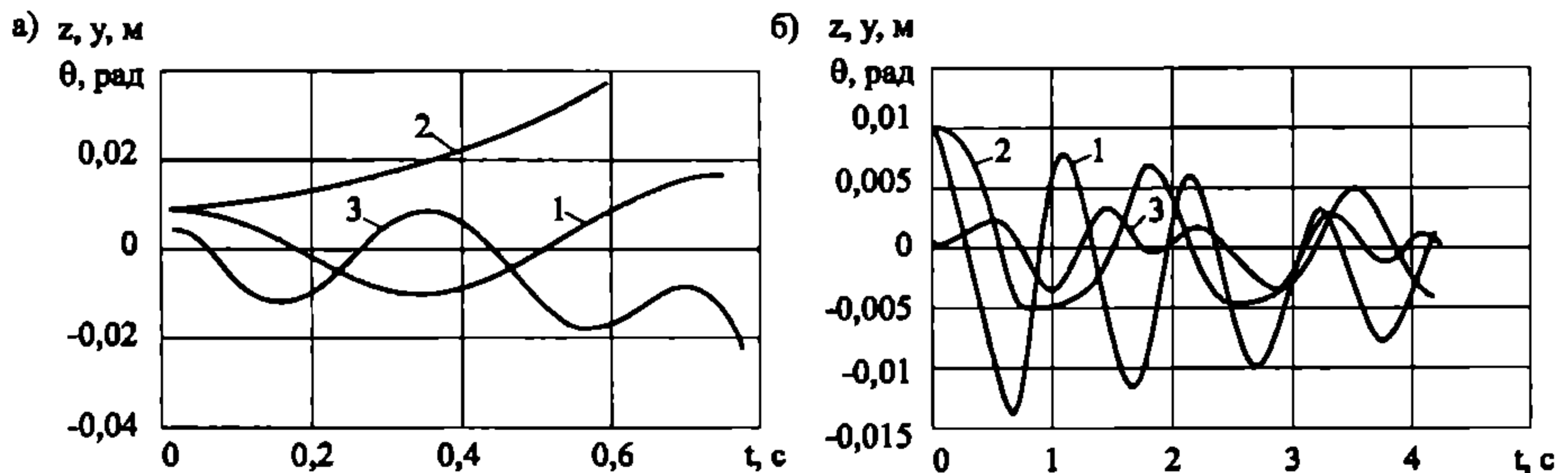


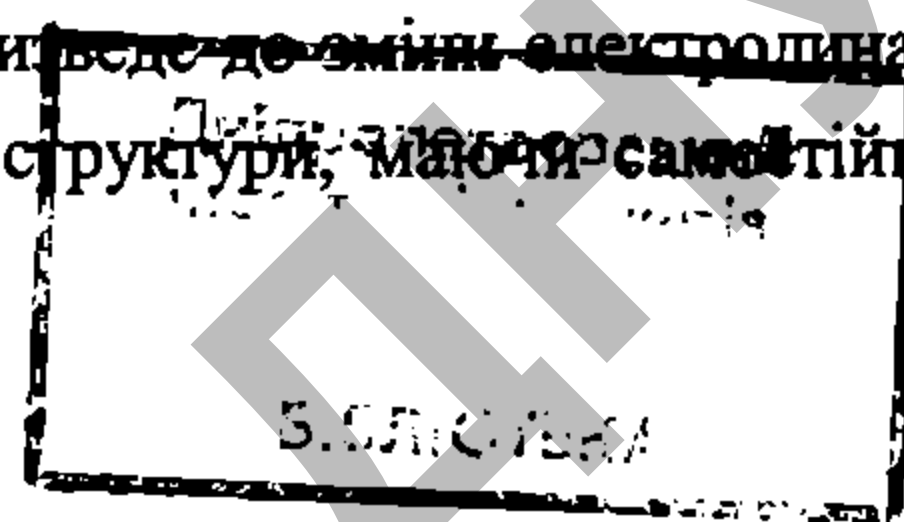
Рис. 10. Просторові коливання системи: 1 - z, 2 - y, 3 - θ

Описану методику доцільно використати для синтезу параметрів системи, за яких дивергентну нестійкість буде виключено. Що ж до флатерної нестійкості, то, як відмічено вище, вона усувається введенням дисипативних зв'язків. При знайдених параметрах остаточний висновок про стійкість може бути зроблений за допомогою безпосереднього інтегрування рівнянь обуреного руху системи, однак такий шлях досить трудомісткий. Тому для стаціонарного руху в дисертації розроблено методику перевірки стійкості за Ляпуновим.

Задачу зведено до дослідження перетворення $u_T = V(u_0)$, яке зв'язує сукупність всіх (механічних та електричних) змінних на початку і наприкінці інтервалу руху $[0, T=H/v]$. Стаціонарні значення змінних служать нерухомою точкою цього перетворення. Особливість даної задачі полягає в тому, що для електричних змінних умови стаціонарності мають вигляд (4), що вимагає перенумерації контурів наприкінці кожного інтервалу; ця обставина врахована в структурі оператора V . Стаціонарний режим асимптотично стійкий, якщо $|\rho_i| < 1$, де ρ_i – власні значення матриці U , яка отримується лінеаризацією перетворення $V(u)$ в його нерухомій точці. Для обчислення U необхідно n разів проінтегрувати систему рівнянь у варіаціях, яка відповідає рівнянням (3) і (7). Перевірка умови стійкості зводиться до відшукування максимального за модулем власного значення матриці U ; для рішення цієї задачі існують ефективні чисельні процедури.

За допомогою описаного алгоритму проведено розрахунки стійкості стаціонарного руху екіпажу при різних схемах підвішування. Отримані результати перевірялися безпосереднім інтегруванням рівнянь системи (3) та (7) при малих початкових збуреннях стаціонарного режиму. У всіх випадках висновки про стійкість руху співпадали: при виконанні умови стійкості $|\rho_i| < 1$ початкові обурення прагнули до нуля; в іншому випадку амплітуди обурень зростали.

Звичайно передбачається, що шляхова структура транспорту на магнітному підвісі розташовується на естакаді. Однак, при проходженні левітуючого екіпажу електродинамічні сили, прикладені до шляхових контурів, викликають коливання естакади. У результаті вертикальні відстані між поїздними котушками та шляховими контурами будуть мінятися, що, в свою чергу, приведе до зміни електродинамічних сил. Таким чином, динамічний розрахунок шляхової структури, маючи самостійне значення,



59759

представляє в той же час інтерес з точки зору динаміки екіпажу. Для оцінки цього ефекту в дисертації розроблено методику динамічного розрахунку несучих конструкцій у разі дискретних контурів підвісу.

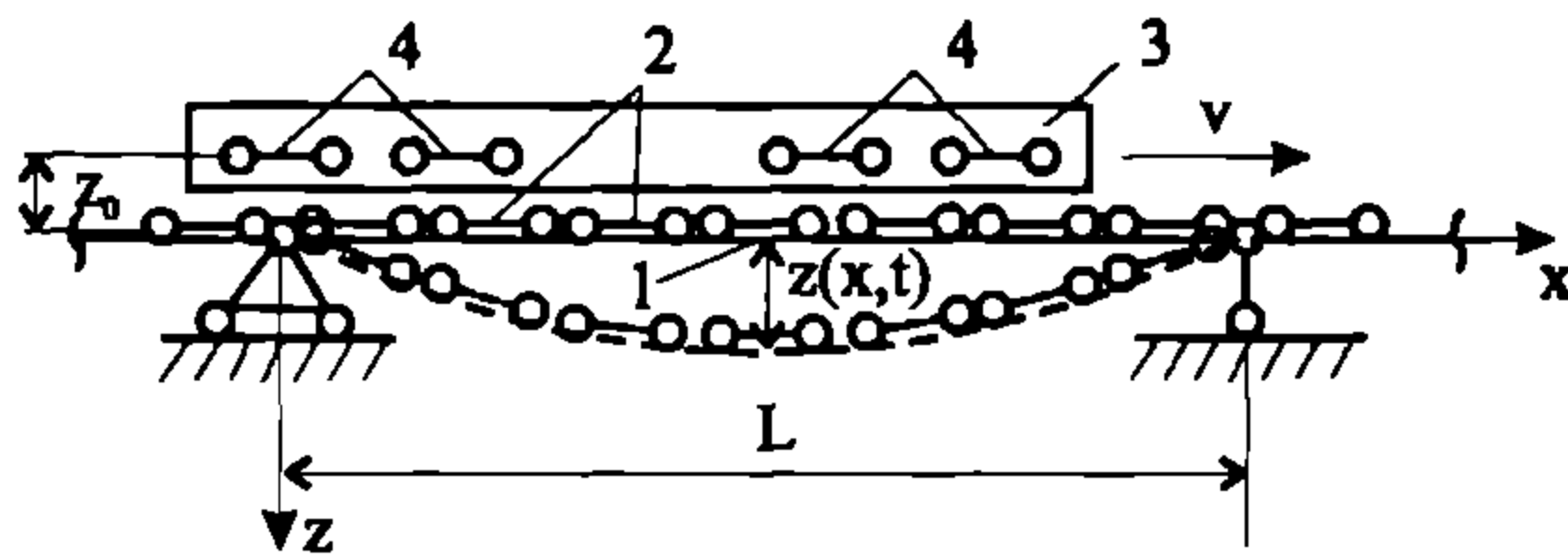


Рис. 11. Схема для динамічного розрахунку шляхової структури

Для простоти передбачено, що шляхові контури розташовано на шарнірно опертих балках (рис.11, де 1– балка, 2– шляхові контури, 3 – екіпаж, 4 – поїздні котушки), однак розвинена методика легко узагальнюється на інші системи. Вертикальні електро-динамічні

сили вважаються зосередженими та прикладеними в центрі відповідного контура. Розглянуто стаціонарний режим, коли екіпаж рухається з постійною швидкістю вздовж прямолінійної осі шляхової структури.

Динамічний прогиб балки $z(x, t)$ представлено у вигляді розкладання за формами її власних коливань; узагальнені координати прогибу балки $u_i(t)$ визначено внаслідок чисельного рішення відповідної системи диференціальних рівнянь спільно з рівняннями (3). При знайдених $u_i(t)$ можна визначити динамічні переміщення і згинаючі моменти в будь-яких заданих перетинах балки.

Відповідно до описаної методики було проведено розрахунки коливань балки прольотом $L = 18$ м при різній швидкості руху v . Як показали результати розрахунків, податливість шляхової структури приводить до зменшення середнього значення левітаційної сили на 10-15%. Крім того, в ній з'являється значна періодична складова з періодом $T = L/v$. Ці обставини необхідно враховувати при проектуванні та розрахунку транспортних екіпажів з електродинамічним підвісом.

У розділі 5 «Експериментальне дослідження систем підвісу з використанням надпровідних магнітів» приведено результати відповідних експериментів. Експериментам передувала велика підготовча робота, пов'язана з розробкою та створенням кріомодулів, випробувальних стендів, макетного екіпажу ВШНТ, оригінальної вимірювальної апаратури та іншого обладнання. Велику кількість запропонованих при цьому конструктивних рішень було захищено авторськими свідоцтвами.

Основними задачами експериментів були:

- практична реалізація конкретних видів підвісу для ВШНТ;
- експериментальне визначення сил, діючих на НП котушки;
- перевірка функціональних можливостей транспортних кріомодулів та систем їх життєзабезпечення;
- порівняння отриманих результатів з теорією для перевірки правильності вибору математичних моделей при розрахунку силових взаємодій.

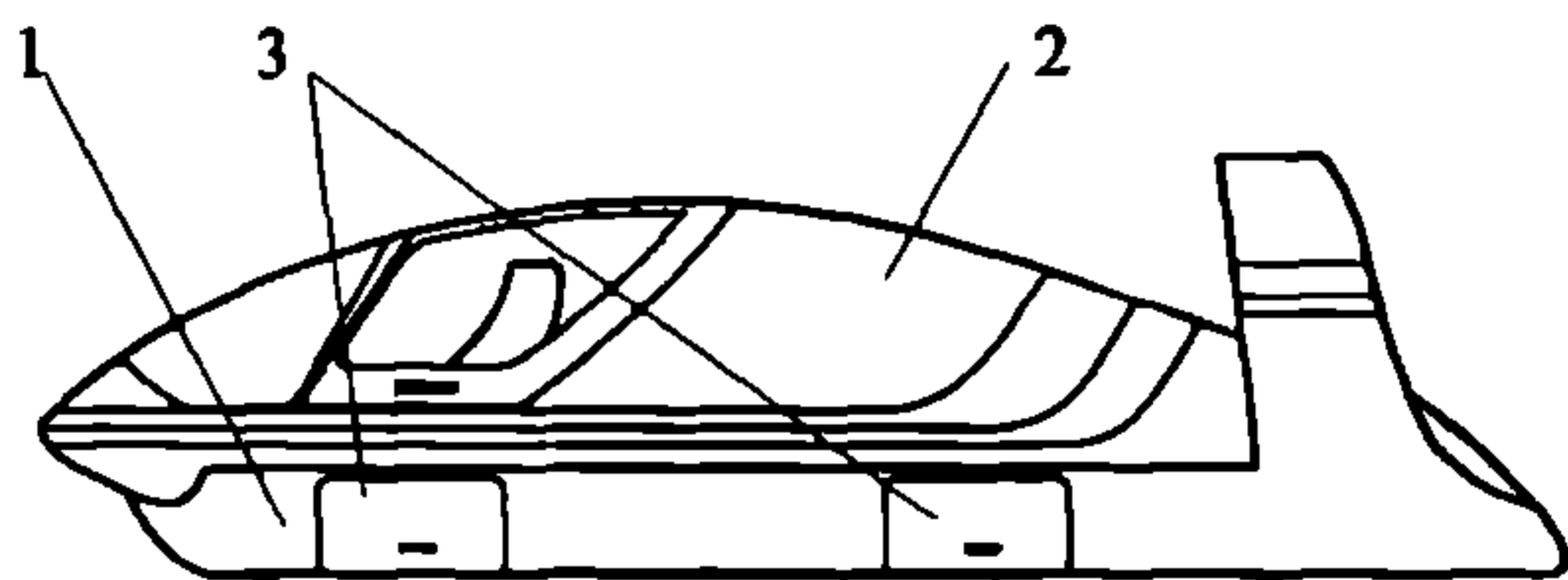


Рис. 12. Макетний екіпаж ВШНТ

Експериментальна модель екіпажу ВШНТ (рис.12) має довжину 6,0 м, ширину 2,5 м і висоту 1,5 м. Екіпаж складається з опорної рами 1, на якій жорстко закріплено кузов 2. В опорній рамі є чотири вузли 3 (по два з кожного боку) для кріплення і жорсткої

фіксації кріомодулів. У експериментах було використано кріомодулі типу КТ-10М (детальний опис їх конструкції приведено в розділі 8).

Левітаційні характеристики макетного екіпажу ВШНТ досліджувалися на стенді електродинамічної шляхової структури (4ЕДШС), який розміщено на експериментальному полігоні ІТСТ НАН України "Трансмаг". Стенд 4ЕДШС являє собою імітатор шляхової структури, який виконано у вигляді чотирьох алюмінієвих барабанів. Барабани попарно розташовано на валах, які обертаються за допомогою двигунів постійного струму. Екіпаж розташовано над імітатором шляхової структури так, що кріомодулі знаходяться безпосередньо над барабанами. Експеримент проведено за "способом зверненого руху": носові та кормові барабани оберталися з однаковою швидкістю назустріч один одному. При цьому екіпаж вільно переміщався по вертикальній осі під дією сили левітації.

Було проведено три серії випробувань при повній вазі макетного екіпажу $P = 6$ кН, 10 кН та 14 кН і середній намагнічуючій силі в котушках $N=200$ кА (при $P=6$ кН замість макетного екіпажу використано більш легку платформу, обладнану вузлами для кріплення кріомодулів). На рис.13 експериментальні залежності висоти підвісу h від швидкості руху v показано крапками, відповідні теоретичні залежності $h(v)$ – суцільними лініями.

Як впливає з рис.13, в якісному відношенні експериментальна і теоретична залежність узгоджуються поміж собою. При всіх швидкостях експериментальні значення висоти підвісу більше теоретичних на 3-5 мм. Це пов'язано, мабуть, з наявністю крайових ефектів, обумовлених кінцевою шириною барабанів імітатора шляхової структури.

Залежність гальмівної сили від швидкості руху в експерименті визначено по зміні навантаженості привідних двигунів; було отримано добру узгодженість з теорією. Загалом комплекс проведених експериментів показав надійну роботу кріомодулів. Він підтвердив, що при використанні системи електродинамічного підвісу можуть бути досягнуті великі левітаційні зазори ($\sim 0,1$ м «в світлі»). Хороша якісна і цілком задовільна кількісна узгодженість між теорією і експериментом підтвердила правильність вибору математичної моделі та аналітичних методів, які використано для описання електродинамічного підвісу.

У розділі 5 проведено також експериментальне дослідження підвісу, принцип дії якого засновано на відомій властивості замкнутої НП котушки зберігати повне

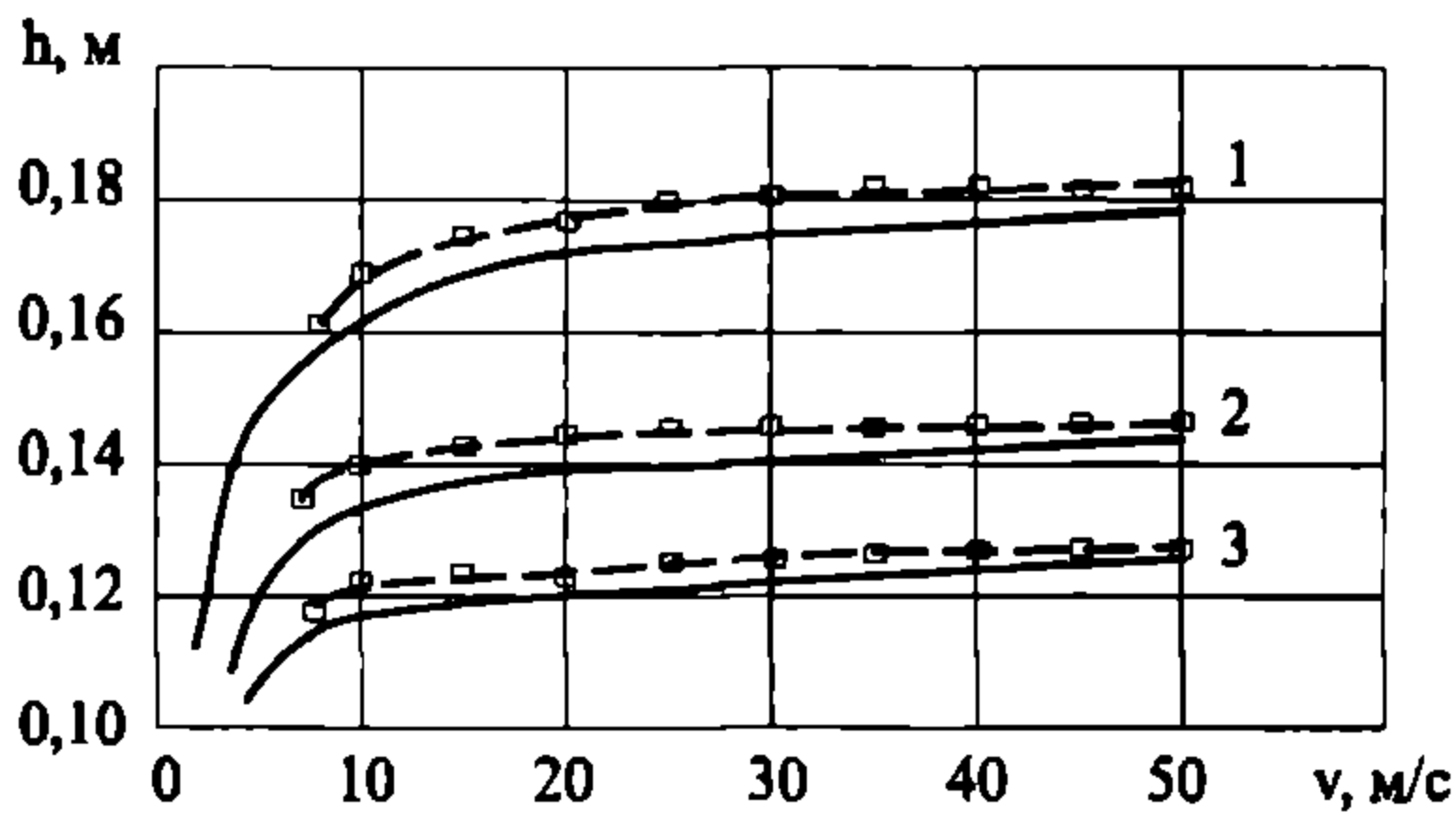


Рис.13. Теоретичні та експериментальні залежності висоти підвісу h від швидкості руху.
1 - $P = 6$ кН; 2 - $P = 10$ кН; 3 - $P = 14$ кН

потокочеп-лення. Для реалізації цього підвісу необхідно перевести НП котушку у робочий стан та замкнути її, попередньо розташувавши в неоднородному магнітному полі. У разі зміщення котушки від положення, у якому її переведено до автономного режиму, в ній виникає струм, завдяки взаємодії якого з

зовнішнім магнітним полем виникає повертаюча сила. Тобто НП котушка прагнучиме зберігати просторове положення відносно джерела зовнішнього магнітного поля. В експерименті таку систему підвісу було реалізовано за допомогою двох кріомодулів: стаціонарного, який робив у примусовому режимі та грав роль джерела зовнішнього магнітного поля, і левітуючого, який було підвішено після замикання накоротко його НП котушки. При цьому встановлено стійкість підвісу, виявлено хорошу відповідність теоретичної та експериментальної залежностей повертаючої сили, яка діє на підвішений кріомодуль, від величини зміщення останнього відносно положення рівноваги.

Однією з основних проблем при створенні високошвидкісного транспорту з електродинамічним підвісом є розробка транспортного надпровідного магніта – кріомодуля. При цьому важливого значення набуває конструктивне узгодження вимог забезпечення теплового режиму і функцій передачі електродинамічних сил на екіпаж. При технічній реалізації ці вимоги суперечать один одному. Тому в розділі 6 «Розробка елементів системи внутрішньої підвіски кріомодулів зі збалансованими

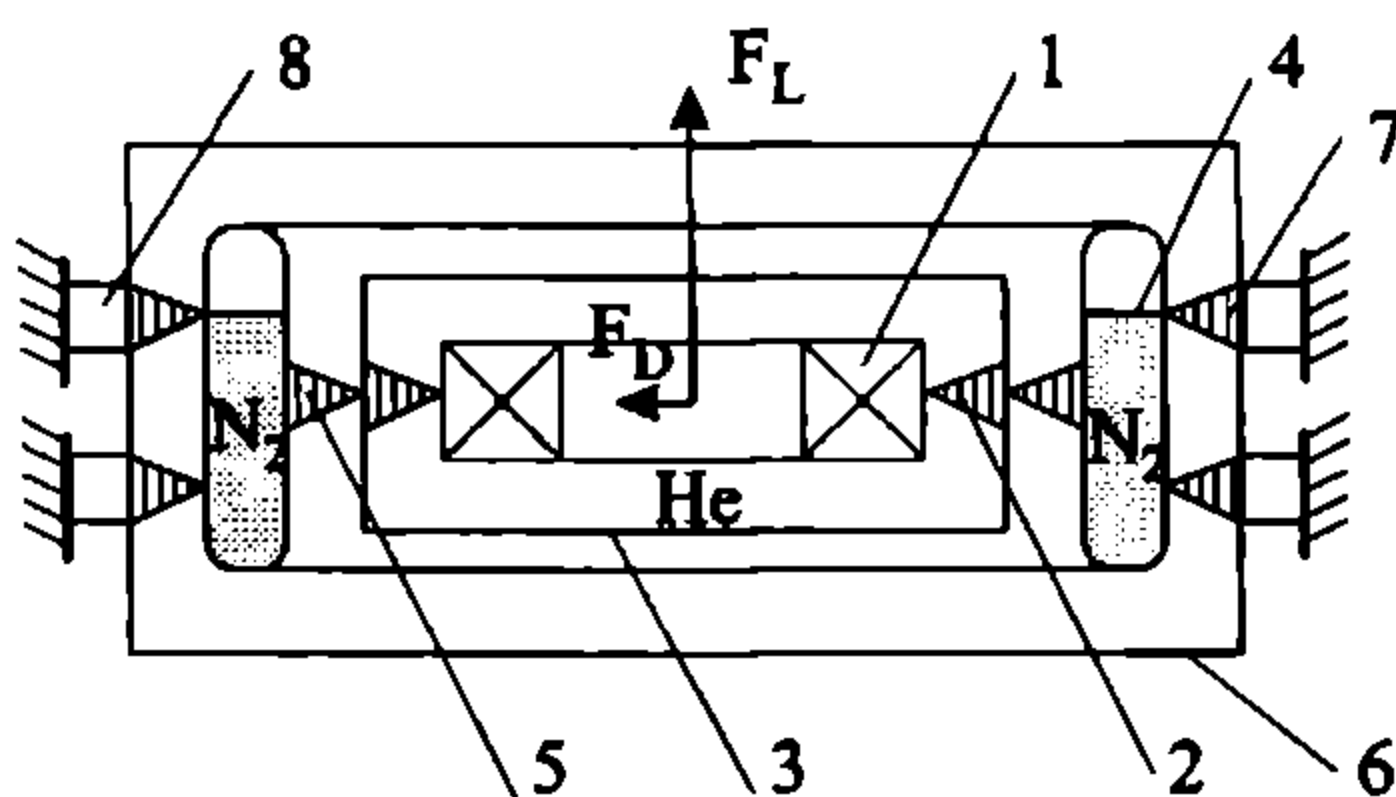


Рис. 14. Силова схема НП магніта

тепловими та механічними характеристиками» проведено детальний аналіз цієї проблеми і запропоновано ряд нових технічних рішень щодо розробки опорних елементів внутрішньої підвіски кріомодулів.

Принципову схему кріо-модуля подано на рис.14. Сили F_L і F_D прикладено до НП котушки 1, яку закріплено за допомогою опор 2

всередині гелієвого контейнера 3. Контейнер закріплено до азотної силової рами 4 за допомогою опор 5. На корпус кріостату 6 навантаження передаються по опорах 7, звідки вони знімаються опорами 8, які є елементами зовнішньої підвіски, встановленими на екіпажі ВШНТ.

Опори внутрішньої підвіски можуть бути розділені на групи по температурних умовах і динаміці теплового навантаження. На кожен групу опор діє одне й те ж механічне навантаження, але відмінність температурних умов і швидкості дифузії теплової енергії істотним образом визначає конструкцію опор та принципи підбору матеріалів. Опори, що з'єднують зони з різною температурою, служать каналами теплопритоку в кріогенні судини. Теплоприток може порушити стійкість роботи НП котушки і тому повинен бути мінімізований, зокрема, за рахунок зменшення перетинів опор. Останнє, однак, вступає в суперечність з вимогами забезпечення міцності опор. Ця суперечність між температурними та міцностними вимогами створює одну з основних труднощів при створенні транспортних кріомодулів. У дисертації розроблено ряд технічних прийомів, які ведуть до розв'язання цієї проблеми.

Зокрема, запропоновано збільшувати термічний опір взаємодіючих опор за рахунок мінімізації їх контактуючих поверхонь і розроблено методику розрахунку теплопритоку таких опор. Опори подібного типу [39] являють собою декілька стержнів, сполучених між собою за допомогою гайок; при цьому кут профілю різьблення стержня не рівний куту профілю різьблення гайки. У цьому випадку механічний та тепловий контакти проміж стержнем та гайкою здійснюються не по всій різьбовій поверхні, а тільки по вузькій гвинтовій доріжці, площа якої у багато разів менше площі різьбової поверхні.

На ефекті зменшення теплопровідності за рахунок обмеження площі контакту засноване інше технічне рішення [37], в якому контакт здійснюється за допомогою системи кульок. Ще один метод зменшення теплопровідності опори полягає в зменшенні її механічної навантаженості за рахунок компенсуючих силових навантажень [46,47].

Істотне зменшення сумарного теплопритоку досягається шляхом автоматичної заміни типу опорних елементів за допомогою спеціального пристрою [32,33]. Останній має дві системи опор для гелієвого контейнера. Одна з них розрахована на великі механічні навантаження і має більш високу сумарну теплопровідність. Інша компенсує тільки вагу гелієвого контейнера, має малий перетин і, відповідно, низьку теплопровідність. У залежності від режиму роботи кріомодуля (робочий або холостий) підвіска гелієвого контейнера здійснюється відповідною системою опор, інша ж в цей час не функціонує.

Таким чином, розроблені прийоми та рішення дають можливість забезпечити передачу великих механічних сил з НП котушки на екіпаж транспортного засобу без порушення теплового режиму.

З точки зору експлуатації транспортні кріомодулі мають ряд специфічних відмінностей від стаціонарних НП установок. Відмінності пов'язані з тим, що в процесі експлуатації кріомодулі відокремлені від агрегатів, за допомогою яких вони приводяться до робочого стану. Забезпечення автономного режиму функціонування транспортних кріомодулів вимагає рішення ряду складних задач. У розділі 7 «Розробка стендів для випробувань і установок для експлуатації транспортних кріомодулів» розроблено пристрої [49,50] для утилізації відпрацьованого гелію та його рефрижерації по замкненому циклу. Розроблені установки дозволяють збільшити ресурс автономного режиму роботи кріомодулів.

Дослідження пасивних методів забезпечення автономного режиму привело до розробки твердотілих акумуляторів холоду на основі твердіючих газів [44]. Навколо НП котушки, а також у всіх пустотах всередині обмотки за спеціальною технологією формується твердотіле середовище, яке внаслідок сильного переохолодження виконує функцію теплового демпфера. Встановлено, що найкращою речовиною у якості робочого тіла в акумуляторі холоду є твердий неон.

Для переведення кріомодуля у робочий стан після його заохолодження необхідно завести струм до надпровідної котушки. З цією метою в експериментах, які описано у розділі 5, використовувалося стаціонарне транзисторне джерело живлення, забезпечуюче регулювання величини струму та швидкості його зростання. В розділі 7 показано можливість і перспективність використання для цієї мети свинцево-кислотних акумуляторів. Дослідження щодо використання хімічних джерел струму в бортових системах енергозабезпечення екіпажів ВШНТ сприяли створенню стартерних акумуляторів для спеціальної техніки [68] та розробці акумуляторів з бінарною системою електролітів [69], орієнтованих на власну сировинну базу України.

Вузли і деталі транспортних НП магнітів мають складну будову і працюють в умовах багатофакторного впливу, тому методи математичного та фізичного моделювання повинні доповнюватися експериментальними дослідженнями, що вимагає розробки спеціальних установок і стендових комплексів. У розділі 7 розроблено пристрої, за допомогою яких можуть бути досліджені кількісні характеристики складних динамічних процесів взаємодії НП магнітів з шляховою структурою, систем теплозахисту, деталей внутрішньої підвіски НП котушки, а також питання експлуатаційної надійності кріомодулів.

Зокрема, розроблено установку [48], яка моделює процес взаємодії змінного магнітного потоку з деталями, оболонками та екранами металевих кріомодулів. Вона дозволяє досить просто і точно вивчити кількісну сторону такого складного процесу, як дисипація енергії в оболонках кріомодуля.

При розробці магнітної безконтактної опори для транспортних засобів з використанням НП магнітів представляє інтерес визначення раціонального профілю шляхового полотна при заданій формі НП контура. Достовірні відомості такого роду можна отримати шляхом фізичного моделювання процесів магнітного підвішування за

допомогою розробленого в дисертації стенду [64]. Стенд містить модель НП котушки кріомодуля, встановлену на барабані, та розташований проти неї імітатор шляхового полотна, який виконано у вигляді заповненої розплавленим металом ємкості. НП котушка моделюється за допомогою комплексу з постійних магнітів, форма якого може мінятися. При обертанні барабана взаємодія магнітного потоку з металом супроводиться викривленням поверхні останнього. Показано, що шляхова структура отриманого при цьому профілю відповідає мінімальній гальмівній силі.

Для всебічних випробувань повномасштабних кріомодулів розроблено стенд, який забезпечує комплекс технологічних процедур для виведення НП магніта на робочий режим і реєстрацію його технічних характеристик. Стенд являє собою маніпуляційно-вимірювальний комплекс, оснащений кріогенним обладнанням і апаратурою. Експериментальні дослідження кріомодуля на стенді дають найбільш достовірні відомості щодо міцностних властивостей оболонок, якості теплоізоляції, електромагнітних властивостей НП котушки, а також про герметичність оболонок, гідравлічної та комунікаційної систем. Досліджуються також динамічні процеси, які протікають у кріомодулі на всіх стадіях приведення його до робочого стану.

Розроблений парк установок і стендів уможливує проведення всебічних досліджень як макетів та фрагментів кріомодулів, так і їх повномасштабних модифікацій. Виготовлені установки не мають серійних промислових аналогів та є унікальними пристроями.

На основі отриманих результатів в розділі 8 «Розробка і створення транспортних кріомодулів» розроблено два принципово різних кріомодуля: металевий кріомодуль КТ-10М та кріомодуль КТК-1, зовнішній корпус якого виготовлено з композитних матеріалів.

При розробці кріомодуля КТ-10М було використано запропоновані технічні рішення, що стосуються опор внутрішньої підвіски [31,34,39], екранно-вакуумного теплозахисту [65] і способу герметизації роз'ємних з'єднань [61]. Кріомодуль КТ-10М є універсальним пристроєм, тобто може одночасно виконувати декілька функцій: силового вузла підвісу, магніта збудження в лінійному синхронному двигуні, а також вузла стабілізації, який забезпечує бокову стійкість екіпажу ВШНТ. За допомогою описаних вище стендів було проведено теплові, механічні та електромагнітні випробування кріомодуля. Порівняння кріомодуля КТ-10М з кріомодулями, які побудовано провідними закордонними фірмами, показало, що він не поступається кращим зарубіжним НП магнітам. Тому він може служити базовою моделлю для створення повномасштабного комерційного зразка транспортного НП магніта.

Кріомодуль КТК-1 відрізняється наявністю оригінальної сотопластової теплоізоляції, яка забезпечує високу механічну міцність і низьку теплопровідність. Використання композитних матеріалів для виготовлення оболонки та опор дало можливість значно збільшити ефективність системи теплозахисту кріомодуля, підвищити його функціональну стійкість, знизити витрату холодоагентів і збільшити

тривалість автономного робочого режиму НП магніта, а також істотно зменшити вагу кріомодуля.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено значну прикладну проблему, яка полягає у розробці науково-технічних основ створення високошвидкісного наземного транспорту з використанням електродинамічної левітації на надпровідних магнітах. Ця проблема пов'язана зі створенням новітніх технологій та має важливе значення для подальшого наукового, технічного і економічного розвитку суспільства. Представлені в дисертації результати отримано на базі комплексного підходу, який включає теоретичні дослідження, математичне та фізичне моделювання, конструкторські та технологічні розробки.

Основні теоретичні результати роботи відносяться до досліджень систем електродинамічного підвісу та динаміки левітуючого екіпажу і полягають у такому:

1) запропоновано узагальнену теорію та методику розрахунку силових взаємодій у системах електродинамічної левітації зі суцільною шляховою структурою; такий підхід, на відміну від існуючих, дозволяє більш повно враховувати конструктивні особливості різних типів підвішування, тобто як форму і розташування магнітних котушок, так і розміри їх поперечного перетину;

2) запропоновано шлях підвищення левітаційних характеристик систем електродинамічного підвісу зі суцільним шляховим полотном, який полягає у використанні феромагнітних елементів в структурі полотна; розроблено оригінальну комбіновану систему електродинамічної левітації з двошаровим шляховим полотном, одним з шарів якого є феромагнетик;

3) розроблено ефективний метод розрахунку підвісу та бокової стабілізації в системах електродинамічної левітації з дискретною шляховою структурою, який дозволяє, на відміну від існуючих методів, обчислювати електродинамічні сили з обумовленою точністю;

4) розроблено математичні моделі левітуючих транспортних систем, які враховують зв'язок між рівняннями руху екіпажу та рівняннями струмів в елементах підвісу; запропоновано методики і алгоритми для дослідження динаміки левітуючого екіпажу та стійкості його руху на прямолінійних та криволінійних ділянках шляху; проведено аналіз динамічних характеристик різних конструктивних схем і систем левітації та визначено їх раціональні рішення відповідно до умов навантаженості, стійкості та безпеки руху;

5) дано класифікацію типів нестійкості стаціонарного режиму руху левітуючого екіпажу і запропоновано метод, який дозволяє вибирати стійкі конструктивні схеми високошвидкісного наземного транспорту з дискретною шляховою структурою без інтегрування відповідних диференціальних рівнянь;

б) запропоновано методику розрахунку поведінки конструктивних елементів шляхової структури за умов динамічної взаємодії з левітуючим екіпажем; встановлено, що пружність шляхової структури суттєво (~10–15%) знижує величини електродинамічних сил.

В області розробки, проектування і експериментального дослідження основних силових вузлів електродинамічного підвісу отримано наступні результати:

7) розроблено основи розрахунку і проектування транспортних надпровідних магнітів та пристроїв їх автономного життєзабезпечення;

8) створено транспортні кріомодулі з поліпшеними тепловими та механічними характеристиками; ці кріомодулі здатні забезпечувати багатокоординатну силову взаємодію транспортного засобу зі системами підвісу, напряму і тяги;

9) створено парк оригінальних експериментальних стендів для випробування систем електродинамічної левітації, комплексного дослідження механічних, теплових і електромагнітних характеристик розроблених кріомодулів та їх окремих вузлів. Виготовлені установки не мають серійних аналогів та є унікальними пристроями;

10) експериментально відпрацьовано технологію експлуатації транспортних кріомодулів, яка включає до себе наступні етапи: вакуумування, заохолодження, заведення струму до надпровідної котушки, переведення до стану “замороженого” магнітного потоку, робота в автономному режимі на транспортному засобі та вивід з робочого режиму;

11) розроблено, створено і випробувано на імітаторові шляхової структури діючу модель екіпажу високошвидкісного наземного транспорту з електро-динамічним підвісом на надпровідних магнітах. Результати експериментів показали гарну якісну та кількісну відповідність з розробленою теорією, надійну роботу всього комплексу встановленої на екіпажі автономної апаратури та переконливо продемонстрували, що при використанні системи електродинамічної левітації можуть бути досягнуті великі (~0,1 м в “світлі”) левітаційні зазори, які на порядок вище зазорів при електромагнітному підвісі (~0,01 м в “світлі”). Тим самим експериментально доведено перспективність вибраного напряму технічної реалізації системи підвісу для високошвидкісного магнітолевітуючого наземного транспорту;

12) запропоновано оригінальні технічні рішення, які використано при створенні основних вузлів транспортних засобів, макетного зразку та випробувальних стендів. Ці технічні рішення, пріоритет яких захищено 39 авторськими свідоцтвами, в комплексі з розробленими в дисертації рекомендаціями щодо вибору раціональних конструктивних схем екіпажу та підвісу можуть бути безпосередньо використані при проектуванні високошвидкісного магнітолевітуючого транспорту.

Отримані у дисертації теоретичні та експериментальні результати, а також створене обладнання використано для проведення науково-дослідних робіт в ІГТМ НАН України та ІТСТ НАН України. Технічні рішення, зв'язані з розробкою бортових джерел енергозабезпечення транспортних засобів, впроваджено на

Дніпропетровському акумуляторному заводу при виробництві акумуляторних батарей для спеціальної техніки. Рішенням Міністерства оборони України та Міністерства промислової політики України ці акумулятори прийнято на постачання для Збройних Сил України.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бочаров В.И., Салли И.В., Дзензерский В.А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах. – Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1988. – 152 с.
2. Салли И.В., Дзензерский В.А., Долгошеев Э.А., Горский О.И. Электродинамическое подвешивание экипажей ВСНТ // Электровозостроение. – 1979. – № 19. – С.163-170.
3. Горский О.И., Дзензерский В.А., Воровский В.Ю. Сверхпроводящий магнит для исследования вихревых токов в динамических моделях // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1984. – № 2. – С.92-94.
4. Дзензерський В.О., Воровський В.Ю., Горський О.І. та інші. Надпровідні магніти і кріостати для екіпажів високошвидкісного наземного транспорту на магнітному підвішуванні // Вісник Академії наук УРСР. – 1986. – № 7. – С.26-33.
5. Дзензерский В.А., Воровский В.Ю., Горский О.И. и др. Прочность материалов и конструкций при низких температурах в сильных магнитных полях // В сб.: Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наукова думка, 1990. – С.81-86.
6. Дзензерский В.А. Проблемы и перспективы развития электродинамической системы высокоскоростного наземного транспорта на сверхпроводящих магнитах // Проблемы создания высокоскоростного транспорта на сверхпроводящих магнитах: Мат. научно-техн. семинара. – Ленинград, ЛДНТП, 1990. – С.4-12.
7. Дзензерский В.А., Бобришов А.М., Финагина И.И., Левченко Ж.А. О влиянии механического сопротивления на силовые характеристики электродинамического подвеса при его испытании на стенде // Проблемы создания высокоскоростного наземного транспорта на сверхпроводящих магнитах: Мат. научно-техн. семинара. – Ленинград, ЛДНТП, 1990. – С.51-55.
8. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А., Кулиненко В.О. Устойчивое электродинамическое подвешивание тел без использования сверхпроводников // Письма в журнал технической физики. – 1990. – Т.16. – № 18. – С.4-8.
9. Горский О.И., Дзензерский В.А. Наблюдение бифуркации колебательной моды левитирующего (подвешенного) над (под) ВТСП постоянного магнита // Письма в журнал технической физики. – 1991. – Т.17. – № 4. – С.54-57.
10. Буряк А.А., Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А., Ляшенко В.И. Исследование магнитной левитации тел на низкотемпературных сверхпроводящих контурах // Журнал технической физики. – 1991. – Т.61. – № 2. – С.82-87.
11. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А., Кулиненко В.О. Электродинамическая система подвешивания на двухслойном ферромагнитном полотне // Журнал

- технической физики. – 1991. – Т.61. – № 11. – С.1-5.
12. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е. Направления развития высокоскоростного наземного транспорта // Транспорт: Наука, техника, управление. – М., ВИНТИ. – 1991. – № 2. – С.27-31.
 13. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е. Тенденции развития путевых структур альтернативных видов скоростного наземного транспорта // Транспорт: Наука, техника, управление. – М., ВИНТИ. – 1991. – № 10. – С.25-32.
 14. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А., Кулиненко В.О. Левитационные характеристики системы электродинамического подвеса над двухслойным полотном // Изв.АН СССР, Сер.: Энергетика и транспорт. – 1991. – № 4. – С.101-105.
 15. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А. Исследование сложных колебаний в переменном магнитном поле при подвешивании сверхпроводника // Журнал технической физики. – 1992. – Т.62. – № 9. – С.118-124.
 16. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А. Частотные характеристики многоконтурных систем подвешивания // Известия РАН. Серия: Энергетика и транспорт. – 1992. – № 5. – С.125-129.
 17. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е. Вопросы экологии высокоскоростного наземного транспорта: проблема шума // Транспорт: Наука, техника, управление. – М., ВИНТИ. – 1992. – № 7. – С.18-24.
 18. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е. Экологические проблемы воздействия магнитного поля на пассажиров магнито-левитирующего поезда // Транспорт: Наука, техника, управление. – М., ВИНТИ. – 1992. – № 11-12. – С.2-11.
 19. Бурьлов С.В., Горский О.И., Дзензерский В.А. Левитационные характеристики комбинированной системы электродинамического подвеса нуль-поточного типа // Известия РАН. Серия: Энергетика и транспорт. – 1993. – № 2. – С.76-82.
 20. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е. Эволюция магнитолевитирующего транспорта // Транспорт: Наука, техника, управление. – М., ВИНТИ. – 1993. – № 2. – С.30-39.
 21. Gorsky O.I., Dzenzersky V.A., Lyashenko V.I., Shustov G.R., Zeldina E.A. The low-temperature Superconducting Magnet Suspension System // Physica C. – Elsevier. – 1994. – V.230. – P.213-216.
 22. Дзензерский В.А., Кузенцова Т.И., Радченко Н.А. Оценка динамических характеристик экипажей с электродинамическим подвесом, имеющих различные структуры конструктивных схем // Механика транспорта: вес поезда, скорость, безопасность движения. Межвузовский сборник научных трудов / Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта. – 1994. – С.43-52.
 23. Выдута Е.Л., Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А. О левитационных характеристиках электродинамического подвеса над многослойными полотнами // Известия РАН. Серия: Энергетика. – 1994. – № 2. – С.85-90.
 24. Дзензерский В.А., Радченко Н.А. Исследование колебаний и устойчивость движения вагона с электродинамическим подвесом // Прикладная механика. – 1994. – т.30. – №1. – С.76-81.

25. Дзензерский В.А., Кузнецова Т.И., Радченко Н.А. Стабилизация левитационного движения экипажа на магнитном подвешивании // Техническая механика. – 1994. – вып. 3. – С.96-100.
26. Дзензерский В.А., Зевин А.А., Филоненко Л.А. Устойчивость вертикальных колебаний в системе электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой // Прикл. механика. – 1995. – Т.31. – № 7. – С.88-93.
27. Dzenzersky V.A., Khatchapuridze N.M., Manashkin A.L., Radchenko N.A., Zevin A.A. Dynamical analysis of electrostatically suspended vehicles // FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN TRANSPORT AND THE ENVIRONMENT (URBAN TRANSPORT 95). – Urban Transport and the Environment for the 21-st Century. Editor: L.J.Sucharov. – Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston. – P.467-474.
28. Выдугая Е.Л., Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А. О левитационных характеристиках в системах электродинамического подвеса // Известия РАН. Серия: Энергетика. – 1995. – № 4. – С.131-135.
29. Дзензерский В.А. Устойчивость движения левитирующего экипажа с электродинамическим подвесом // Техн. механика. – 1998. – Вып.7. – С.87-93.
30. Дзензерский В.А. Динамический расчет путевой структуры левитирующего экипажа с электродинамическим подвесом // Техн. механика. – 1998. – Вып.8. – С.70-75.
31. А.с. 1047323 СССР, МКИ³ H01F 7/22; B61B 13/08. Криомодуль для высокоскоростного наземного транспорта / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 3373982/27-11; Заявлено 31.12.81. – 7 с.: ДСП.
32. А.с. 1050484 СССР, МКИ³ H01L 39/00. Транспортный криомодуль / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, В.Ю.Воровский и А.А.Буряк (СССР). – № 3423654/18-11; Заявлено 12.04.82. – 7 с.: ДСП.
33. А.с. 1080688 СССР, МКИ³ H01L 39/04. Транспортный криомодуль / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 3449350/27-11; Заявлено 07.06.82. – 6 с.: ДСП.
34. А.с. 1103461 СССР, МКИ³ B61B 13/08, H 01 L 39/04. Транспортный криомодуль / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, Ю.К.Трикоз, А.А.Буряк и В.И.Ляшенко(СССР). – № 3430517/27-11; Заявлено 27.04.82. – 6 с.: ДСП.
35. А.с. 1134029 СССР, МКИ³ H01F 7/22. Сверхпроводящий магнит / В.А.Дзензерский, В.Ю.Воровский, В.И.Ляшенко и А.А.Буряк (СССР). – № 3584745/24-07; Заявлено 20.04.83. – 5 с.: ДСП.
36. А.с. 1145756 СССР, МКИ³ G01M 17/00. Стенд для испытания сверхпроводящих магнитов / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, В.И.Ляшенко, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 3618283/27-11; Заявлено 12.07.83. – 5 с.: ДСП.
37. А.с. 1145859 СССР, МКИ³ H01L 39/04, H 01 F 7/22. Криомодуль для высокоскоростного наземного транспорта / В.А.Дзензерский, А.А.Буряк, Ю.К.Трикоз и О.И.Горский (СССР). – № 3663323/24-25; Заявлено 16.11.83; – 8 с.: ДСП.
38. А.с. 1156327 СССР, МКИ³ B61B 13/08. Система стабилизированного подвеса экипажа высокоскоростного наземного транспорта / И.В.Салли, В.А.Дзензерский,

- О.И.Горский и А.А.Буряк (СССР). – № 3546874/27-11; Заявлено 28.01.83. – 8 с.: ДСП.
39. А.с. 1166622 СССР, МКИ³ H01F 7/22 // H01F 27/26. Сверхпроводящий электромагнит / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, В.И.Ляшенко и А.А.Буряк (СССР). – № 3581164/24-07; Заявлено 20.04.83. – 6 с.: ДСП.
40. А.с. 1169288 СССР, МКИ³ B61B 13/08. Транспортное средство на электродинамической подвеске / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, О.И.Горский и А.А.Буряк (СССР). – № 3688893/27-11; Заявлено 09.01.84. – 4 с.: ДСП.
41. А.с. 1170699 СССР, МКИ³ B61B 13/08, H01F 7/22. Криомодуль / В.А.Дзензерский, А.А.Буряк, Ю.К.Трикоз, В.И.Бочаров, С.В.Васильев и Н.М.Новогренко (СССР). – № 3656468/27-11; Заявлено 19.10.83. – 7 с.: ДСП.
42. А.с. 1181446 СССР, МКИ³ H01F 7/22. Сверхпроводящая магнитная система / В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 3743370/24-07; Заявлено 18.05.84. – 8 с.: ДСП.
43. А.с. 1212211 СССР, МКИ⁴ H01F 7/22. Криомодуль для скоростных транспортных систем на магнитной подушке / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк, Ю.К.Трикоз, В.И.Бочаров и С.В.Васильев (СССР). – № 3773318/24-07; Заявлено 23.07.84. – 2 с.: ДСП.
44. А.с. 1248465 СССР, МКИ⁴ H01F 7/22. Способ криостатирования сверхпроводящей системы / И.В.Салли, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и О.И.Горский (СССР). – № 3804124/24-07; Заявлено 23.10.84. – 3 с.: ДСП.
45. А.с. 1250035 СССР, МКИ⁴ G01M 17/00. Имитатор путевой структуры транспортного средства с магнитным подвешиванием / В.А.Дзензерский, В.И.Бочаров, М.Б.Бондаренко, С.В.Васильев, А.А.Буряк, Ю.К.Трикоз, О.И.Горский, А.Я.Лесник, В.И.Ляшенко и В.Ю.Воровский (СССР). – № 3826489/27-11; Заявлено 18.12.84. – 2 с.: ДСП.
46. А.с. 1289021 СССР, МКИ⁴ B61B 13/08, H01F 7/22. Криомодуль для транспортного средства / В.А.Дзензерский, А.А.Буряк, Ю.К.Трикоз и О.И.Горский (СССР). – № 3675030/27-11; Заявлено 15.12.83. – 4 с.: ДСП.
47. А.с. 1334573 СССР, МКИ⁴ B60L 13/04, H01F 7/22. Транспортный криомодуль / В.А.Дзензерский, А.А.Буряк, О.И.Горский и В.Ю.Воровский (СССР). – № 3826662/31-11; Заявлено 17.12.84. – 7 с.: ДСП.
48. А.с. 1351383 СССР, МКИ⁴ G01M 17/00. Стенд для имитации работы магнитной подвески транспортного средства / В.А.Дзензерский, О.И.Горский, Г.Р.Шустов, А.А.Буряк и В.Ю.Воровский (СССР). – № 3892280/31-11; Заявлено 29.04.85. – 5 с.: ДСП.
49. А.с. 1360059 СССР, МКИ⁴ B60L 13/04, H01F 7/22. Сверхпроводящая система для электродинамического подвеса экипажа / В.А.Дзензерский, В.Ю.Воровский, А.А.Буряк, Т.В.Макарова и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 3964184/31-11; Заявлено 15.10.85. – 3 с.: ДСП.
50. А.с. 1432924 СССР, МКИ⁴ B60L 13/04, H01F 7/22. Транспортный криомодуль / В.А.Дзензерский, В.Ю.Воровский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР).

- № 4238752/31-11; Заявлено 29.04.87. – 3 с.: ДСП.
51. А.с. 1477067 СССР, МКИ⁴ G01M 17/00. Стенд для испытания сверхпроводящих магнитов / В.А.Дзензерский, А.Я.Лесник, Е.Ю.Ситник, И.В.Поддубный, А.А.Ерохин, С.В.Васильев, В.И.Матин, И.О.Падас, А.И.Ковырзин и А.М.Бобришов (СССР). – № 4111990/31-11; Заявлено 18.06.86. – 4 с.: ДСП.
52. А.с. 1524349 СССР, МКИ⁴ B60L 13/04, G01M 17/00. Стенд для испытания ротора кольцевого двухстороннего синхронного двигателя / В.А.Дзензерский, А.Я.Лесник, А.М.Бобришов, А.Н.Ерохин, И.В.Поддубный, Е.Ю.Ситник и В.И.Матин (СССР). – № 4183896/31-11; Заявлено 19.11.87. – 4 с.: ДСП.
53. А.с. 1524350 СССР, МКИ⁴ B60L 13/10. Транспортное средство с магнитным подвешиванием / В.А.Дзензерский, Е.Ю.Ситник, О.И.Горский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 4400488/31-11; Заявлено 30.03.88. – 4 с.: ДСП.
54. А.с. 1524359 СССР, МКИ⁴ B60L 13/10. Транспортная система с аэро-динамической подвеской / В.А.Дзензерский, В.Н.Потураев, Б.Л.Заславский, А.И.Кучеренко (СССР). – № 4348267/31-11; Заявлено 23.12.87. – 3 с.: ДСП.
55. А.с. 1533195 СССР, МКИ⁴ B60L 13/10. Транспортная система с электро-динамическим подвесом / С.В.Васильев, К.К.Ким, В.И.Матин, В.А.Дзензерский и Б.Л.Заславский (СССР). – № 4341006/31-11; Заявлено 05.11.87. – 6 с.: ДСП.
56. А.с. 1552522 СССР, МКИ⁴ B61B 13/08. Транспортная система с электродинамическим подвесом / С.В.Васильев, К.К.Ким, А.В.Куракин, Т.И.Маргулис, С.Н.Цыган и В.А.Дзензерский (СССР). – № 4365924/31-11; Заявлено 14.01.88. – 5 с.: ДСП.
57. А.с. 1552523 СССР, МКИ⁴ B60L 13/10. Система высокоскоростного наземного транспорта с электродинамическим подвесом / С.В.Васильев, К.К.Ким, А.В.Куракин, Т.И.Маргулис, С.Н.Цыган, В.А.Дзензерский и В.И.Матин (СССР). – № 4342396/31-11; Заявлено 14.12.87. – 5 с.: ДСП.
58. А.с. 1563110 СССР, МКИ⁴ B60L 13/10. Транспортная система с электродинамическим подвесом / С.В.Васильев, В.А.Дзензерский, С.Н.Цыган, А.В.Куракин, К.К.Ким и В.И.Матин (СССР). – № 4431413/31-11; Заявлено 27.05.88. – 4 с.: ДСП.
59. А.с. 1571920 СССР, МКИ⁵ B60L 13/04. Система подвеса экипажа высокоскоростного наземного транспорта / В.А.Дзензерский, О.И.Горский, А.А.Буряк и Е.Ю.Ситник (СССР). – № 4472030/23-11; Заявлено 10.08.88. – 5 с.: ДСП.
60. А.с. 1572311 СССР, МКИ⁵ H01F 7/22. Сверхпроводящий электромагнит / В.А.Дзензерский, А.М.Бобришов, Г.Р.Шустов и В.И.Ляшенко (СССР). – № 4343259/24-07; Заявлено 09.10.87. – 4 с.: ДСП.
61. А.с. 1609808 СССР, МКИ⁵ C09K 3/10. Способ герметизации разъемных соединений криогенной техники / В.И.Ляшенко, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз (СССР). – № 4291263/23-05; Заявлено 28.07.87; Опубл. 30.11.90, Бюл. № 44. – 2 с.
62. А.с. 1612475 СССР, МКИ⁵ B60L 13/10. Транспортная система с подвесом на сверхпроводящих магнитах / С.В.Васильев, Б.Л.Заславский, В.А.Дзензерский, А.А.Буряк и В.И.Матин (СССР). – № 4705879/31-11; Заявлено 10.05.89. – 6 с.: ДСП.
63. А.с. 1646182 СССР, МКИ⁵ B60L 13/02, B64F 1/06. Электромагнитный ускоритель транспортного средства / В.А.Дзензерский, О.И.Горский, А.А.Буряк и Ю.К.Трикоз

- (СССР). – № 4709657/31-11; Заявлено 10.05.89. – 6 с.: ДСП.
64. А.с. 1665256 СССР, МКИ⁵ G01M 17/00, B60L 13/04. Стенд для моделирования магнитной подвески транспортного средства / В.А.Дзензерский, И.В.Салли, О.И.Горский, Ю.К.Трикоз, Е.Ю.Ситник и А.А.Буряк (СССР). – № 4633811/11; Заявлено 11.01.89; Опубл. 23.07.91, Бюл. № 27. – 3 с.
65. А.с. 1708090 СССР, МКИ⁵ H01F 7/22. Сверхпроводящий магнит / В.А.Дзензерский, Н.Ф.Линский, В.Н.Бижко, А.М.Бобришов и А.А.Буряк (СССР). – № 4747813/07; Заявлено 11.10.89. – 5 с.: ДСП.
66. А.с. 1830831 СССР, МКИ⁵ B60L 13/04. Система магнитной подвески транспортного средства / В.А.Дзензерский, О.И.Горский, В.И.Ляшенко, А.А.Буряк и Е.Ю.Ситник (СССР). – № 4727335/11; Заявлено 07.04.89. – 3 с.: ДСП.
67. А.с. 1837492 СССР, МКИ⁵ B60L 13/04. Транспортное средство на электродинамической подвеске / В.А.Дзензерский, О.И.Горский, В.И.Ляшенко, А.А.Буряк и В.А.Чернобай (СССР). – № 4905337/11; Заявлено 28.01.91. – 4 с.: ДСП.
68. Патент № 24887А. Украина, МКИ⁶ H01M 2/10. Аккумуляторная батарея / В.А.Дзензерский, С.В.Васильев, В.И.Матин, В.Н.Привалов, Ю.И.Скосарь и И.И.Соколовский (Украина); Акционерное общество закрытого типа «Оберон-Центр». – № 97073945; Заявл. 17.12.97.
69. В.з. 4025699 Германия, МКИ H01M 2/14, H01M 4/42, H01M 4/50. Akkumulator / Vassil'ev S.V., Dzenzerskij V.A., Ostapenko E.I., Levotman E.S. (СССР); Theess. Rolf (Германия). – № P4025699.5; Заявл. 14.08.90; Опубл. 2002.92. – 6 с.
70. Дзензерский В.А., Горский О.И., Шинкаренко В.Я. Распределение вихревых токов и электродинамическая левитация для полотна многослойной структуры. – Днепропетровск, 1980. – 7 с. Деп. в ВИНТИ Библиогр. указатель “Депонированные рукописи” № 8, № 1794-80 деп.
71. Дзензерский В.А., Горский О.И., Шинкаренко В.Я. Система электродинамического подвешивания экипажей ВСНТ. – Днепропетровск., 1980. – 8 с. Деп. в ВИНТИ Библиогр. указатель “Депонированные рукописи” № 6, № 905-80 деп.
72. Васильев В.В., Васильев С.В., Дзензерский В.А., Ким. К.К., Матин В.И. Характеристики электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой при угловом и боковом смещениях обмотки возбуждения. – Псков, 1988. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ 03.01.89, № 70-В89.
73. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е., Цукров И.И. Конечно-элементный анализ влияния некоторых особенностей нагружения на прочностные характеристики сверхпроводящих криомодулей. – Днепропетровск, 1990. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 15.05.90. № 2653-В90.
74. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е., Цукров И.И. Анализ деформационных свойств многоопорных пластинчатых элементов транспортных сверхпроводящих криомодулей. – Днепропетровск, 1990. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ 20.08.90. № 4692-В90.
75. Дзензерский В.А., Крютченко В.Е., Лашер А.Н., Уманов М.И. О сферах применения транспортной системы с экипажами на электродинамическом подвесе. – Днепропетровск, 1991. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ 22.06.91. № 2078-В91.

Дзензерський В.О. Науково-технічні основи створення високошвидкісного наземного транспорту з використанням електродинамічної левітації.– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць і тяга поїздів. – Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 1998.

У дисертації вирішено комплекс наукових і технічних проблем, пов'язаних зі створенням високошвидкісного наземного транспорту на електродинамічному підвісі з використанням надпровідних магнітів. Розвинено теорію розрахунку силових взаємодій в системах електродинамічної левітації та запропоновано нові варіанти систем підвісу. Розроблено оригінальні математичні моделі та запропоновано методи дослідження динамічних характеристик левітуючого екіпажу; дано аналіз різних конструктивних схем і типів підвішування. Розроблено основи розрахунку і проектування транспортних надпровідних магнітів, виготовлено транспортні кріомодулі з поліпшеними характеристиками, відпрацьовано технологію їх експлуатації. Створено парк експериментальних установок і проведено дослідження основних елементів та вузлів транспортних екіпажів з електродинамічним підвісом. Розроблено, створено і перевірено модель магнітолевітуючого екіпажу.

Ключові слова: високошвидкісний наземний транспорт, електродинамічна левітація, транспортний кріомодуль, динамічні характеристики, стійкість руху.

НТБ
ДНУЗТ

Дзензерский В.А. Научно-технические основы создания высокоскоростного наземного транспорта с использованием электродинамической левитации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов. – Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1998.

В диссертации решен комплекс научных и технических проблем, связанных с созданием высокоскоростного наземного транспорта на электродинамическом подвесе с использованием сверхпроводящих магнитов. Развита теория расчета силовых взаимодействий в системах электродинамической левитации и предложены новые варианты систем подвеса. Разработаны оригинальные математические модели и предложены методы исследования динамических характеристик левитирующего экипажа; дан анализ различных конструктивных схем и типов подвешивания. Разработаны основы расчета и проектирования транспортных сверхпроводящих магнитов, изготовлены транспортные криомодули с улучшенными характеристиками, отработана технология их эксплуатации. Создан парк экспериментальных установок и проведены исследования основных элементов и узлов транспортных экипажей с электродинамическим подвесом. Разработана, создана и испытана модель магнитолевитирующего экипажа.

Ключевые слова: высокоскоростной наземный транспорт, электродинамическая левитация, транспортный криомодуль, динамические характеристики, устойчивость движения.

Dzenzersky V.A. Scientific and technical problems of high-speed ground transport with the use of electrodynamic levitation. – Manuscript.

Doctorate (Tech. Sc.) thesis by speciality 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. – The Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport, Dnipropetrovsk, 1998.

A complex of scientific and technical problems of maglev transport using electrodynamic levitation with superconducting magnets is solved. Methods for computation of electrodynamic forces are developed and new types of levitation systems are offered. Original mathematical models and new methods for investigation of dynamical characteristics of a levitating vehicle are worked out; diverse structural schemes and types of levitation are analyzed. Methods for computation and design of transport cryomodulus are worked out; new cryomodulus with improved physical properties are created and their service conditions are established. A complex of test installations is created and basic elements of transport vehicles with electrodynamic levitation are being tested. A model of a levitating vehicle is created and tested.

Key words: high-speed ground transport, electrodynamic levitation, transport cryomodulus, dynamical characteristics, stability of motion.

ДЗЕНЗЕРСЬКИЙ Віктор Олександрович

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ
ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ**

(Автореферат)

Підписано до друку 20.11.98 р. Формат 60 × 84/16
Папір Polluxе. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 2,0.
Обл. вид. арк. 2,0. Тираж 80 прим. Зак. № 88
Безкоштовно.

Друкарня Дніпропетровського акумуляторного заводу
320005, м. Дніпропетровськ, вул. Писаржевського, 5