

ХАРЬКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ШАБЛІЙ В'ячеслав Петрович

На правах рукопису

**ПРОБЛЕМИ СТІЙКОСТІ І ДИНАМІКИ ТРАНСПОРТУ,
ЛЕВІТУЮЧОГО НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ
„МАГНІТНА ПОТЕНЦІЙНА ЯМА“**

**01. 02.06 — Динаміка, міцність машин, приладів
та апаратури**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

ХАРКІВ 1993



00777830 (W)

AB 29.423

Роботу виконано в лабораторії надпровідних керованих динамічних систем № 344 Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова АН України.

Науковий консультант — доктор фізико-математичних наук, професор **Козоріз В. В.**

Офіційні опоненти:

- доктор фіз-мат. наук, проф. **О. О. Горошко;**
- доктор фіз-мат. наук, проф. **Є. Г. Голоскоков;**
- доктор фіз-мат. наук, проф. **К. Ш. Ходжаєв.**

Провідна організація — НТК ім. О. К. Антонова.

Захист відбудеться «_____» _____ 1994 року о _____ годині на засіданні спеціалізованої ради по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук при Харківському політехнічному інституті Д068.39.06.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського політехнічного інституту.

Автореферат розісланий «_____» _____ 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

проф. **Бортовий В. В.**

Загальна характеристика роботи.

Актуальність проблеми. В останні роки США, інші країни, а особливо держави СНД, відчувають великі ускладнення в визначенні своєї транспортної політики на найближчі роки і на подальшу перспективу. Енергетична криза показала, що світ не може більше розраховувати на необмежене використання нафти. Країни СНД і, зокрема, Україна дізнались, що із-за нехватки пального можуть бути паралізовані цілі транспортні комунікації: автомобільні, повітряні і інші.

Для незалежної України проблема транспортних комунікацій постає з ще більшою гостротою. Кількість рідкого палива, що йде на перевезки в Україні (біля 60% загального вжитку), перетворює транспорт в проблему національної безпеки, так само як і в екологічну проблему. Будівництво нових швидкісних залізних доріг, автострад і аеропортів для зниження завантаження існуючих веде не тільки до нових джерел забруднення, але й тягне за собою непомірні витрати і забирає багато землі.

Ведучі експерти всього світу в області транспорту однакові в тому, що досягти поставлених цілей неможливо лише поліпшуючи існуючі транспортні технології. Рішення одних проблем неминуче тягне за собою появу інших, не менш суттєвих. Виникає питання: які транспортні технології, якщо такі існують, змогли б задовольнити сучасним вимогам економічності і екологічної чистоти і виявились прийнятними для пасажирів, звиклих до автострад, залізних доріг і авіаліній?

Така технологія нині створена і успішно розвивається. Це технологія магнітно левітуючого транспорту або МАГЛЕВ. Така загальна назва для всякої транспортної системи, в якій підвищення керування і рух транспортних засобів проводиться за рахунок

магнітних сил. В ідеалі маглев транспорт може забезпечити екологічні і економічні переваги, об'єднати безпеку поїзда, швидкість і низьке тертя літака, зручність автомобіля, низьке вживання енергії.

До недавнього часу існували дві відомі концепції створення магнітного транспорту: концепція керованої електромагнітної левітації (EML), котра розробляється в Німеччині (проект "Transrapid") і в Японії (проект HSST JAL), і концепція надпровідної магнітної левітації (EDL), розроблювана в Японії (проект RTRI).

Порівняно недавно в світі стала відома нова українська концепція технології маглев транспорту - МПЛ левітація. Завдяки піонерським розробкам невеликої групи українських вчених і інженерів бачення ситуації в області магнітного транспорту нині суттєво змінилося. Розроблений проф. В.Козорізом в 1976 р. принцип магнітної левітації, базований на новому фізичному ефекті "магнітна потенційна яма", отримав широке світове визнання. Президент Національної Академії високошвидкісного наземного транспорту (HSST) США Флоріан А.Вічалек в оглядовій доповіді на Міжнародній конференції SAE "Технологія транспорту майбутнього" (5-8 серпня 1991 р. Портленд, Орегон, США), а також Дуглас Дж. Малевський, Aerovision Inc, і Френк Дж.Бейкер, Monitoring Automation Systems, в своїх доповідях на цій же конференції признали цю українську розробку новою концепцією магнітної левітації другого покоління, котра має ряд суттєвих переваг порівнянню до відомих розробок німецьких і японських спеціалістів.

Розвиток власної маглев технології повинно сприяти суттєвому екологічному і економічному відродженню України, так, зникнуть вихлопні гази, не буде гризоту коліс, зносу деталей. Розробка цієї

технології дозволить Україні не тільки зекономити засоби на закупці подібних систем, але й отримати мільярдні прибутки від її експорту.

Дана дисертація присвячена проблемам МПЯ левітації в застосуванні до наземного транспорту.

Метою даної роботи є:

Обґрунтування нової МПЯ технології поїзда з різною геометрією та кількістю струмонесучих прямокутних контурів, а також дослідження стійкості вагона транспортного засобу при екрануванні магнітних полів. Вивчення динаміки вільного вагона і плавності руху при зовнішніх збуреннях. Розрахунок параметрів конкретних систем для маглев транспорту, базованих на новій технології "магнітна потенційна яма".

Наукова новизна. Більшість результатів, склавших основу дисертаційної роботи, отримані вперше. До них відносяться наступні:

Отримані умови стійкості вільного вагона з одним, двома і чотирма НП магнітами на борту і проведеними вздовж шляхопроводу магнітними елементами.

Показана можливість задоволення умовам стійкості за рахунок підбору параметрів системи і отримані області стійкості вільного вагона.

Обґрунтована можливість створення стійких систем магнітного підвісу вагона при наявності екранування магнітного поля двохпровідної лінії, НП магнітів вагона, а також при комбінованому екрануванні.

Розроблені дві еквівалентні моделі динаміки вільного вагона в формах Лагранжа і Ейлера та проведено їх аналітичний і чисельний аналіз.

Вивчені питання плавності руху МПЯ поїзда і показана можливість створення систем магнітного підвісу, задовольняючих критеріям

якості руху за рахунок підбору параметрів.

Проведено розрахунок геометричних, динамічних, електромагнітних та інших параметрів біля тридцяти конкретних проєктованих систем.

Практична цінність і реалізація результатів роботи.

Основним застосуванням отриманих результатів слід вважати використання їх при розрахунку і конструюванні магнітного транспорту, базованого на новій технології "магнітна потенційна яма". Крім того, вони можуть бути використані при створенні прецизійних приладів різного призначення, при розрахунку магнітних підвісів для роторів кріотурбо- і гідрогенераторів, при створенні магнітних підшипників, кріогенних насосів і іншого.

Основні результати дисертації використані в Інституті кібернетики АН України, Кременчуцьким учбово-науковим центрі надпровідних керованих динамічних систем, науково-виробничим об'єднанні "Бінар". Акти впровадження наведені в Додатку до дисертації.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на Міжнародній конференції SAE "Технологія транспорту майбутнього" в Портленді, Орегон, США в 1991 році, Всесоюзній конференції з нелінійних коливань механічних систем, Горький, 1991 р., на конференціях "Моделювання і дослідження стійкості фізичних процесів", Київ, 1990-1993р.р., на семінарах: кафедри "Механіка і процеси керування" Санкт-Петербурзького Державного технічного університету, інституту кібернетики ім. В.М.Глушкова АН України та інших.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 26 друкованих робіт.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, восьми глав, висновків, списку літератури, додатку і включає 186 сторінок основного тексту, 86 малюнків на 43 сторінках, 22 таблиці,

список літератури (91 найменування) на 8 сторінках, додаток на 3 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі детально обгрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані цілі і задачі, дана загальна характеристика роботи, а також наведені основні результати роботи.

Перша глава присвячена загальним питанням магнітно левітуючого транспорту. Спочатку дається аналіз стану існуючих транспортних комунікацій. Перекомпливо показано, що транспортом майбутнього безсумнівно повинен бути маглев транспорт, котрий з більшості характеристик переважає будь-який інший вид транспорту.

В цій главі наведені основні принципи побудови систем магнітного транспорту. Розглянуті питання оптимізації параметрів, динаміки і плавності руху магнітних поїздів, необхідності екранування від магнітних полів.

На основі іноземних джерел і досліджень, наведених в даній дисертації, зроблено аналіз чотирьох альтернативних проектів маглев системи: Transrapid (Німеччина), HSST JAL (Японія), RTRI JNR лінійний експрес (Японія), МПЯ поїзд (Україна). Показано, що з усіх основних показників МПЯ поїзд значно переважає інші проекти (Таблиця 1).

В кінці глави розглянуті економічні аспекти побудови маглев транспорту. Показано, що при виборі правильної концепції магнітної левітації вартість будівництва лінії магнітного транспорту буде не більше, а навіть менше, ніж будівництво традиційних транспортних комунікацій.

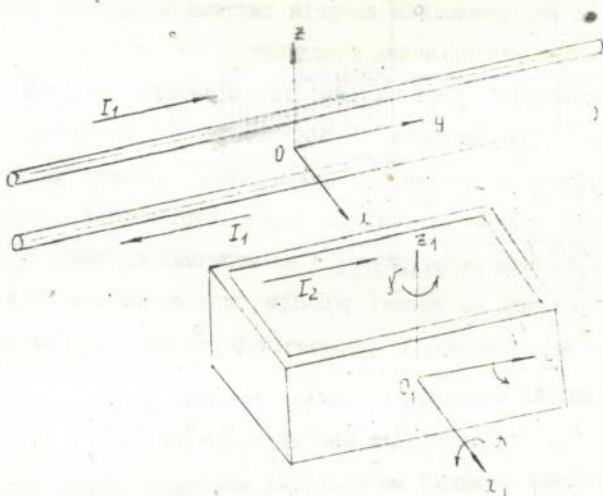
Таблиця 1. Технічні характеристики Маглев систем

N	Технічний показник	Transrapid-07 (Німеччина)	RTRI MLU 002 (Японія)	МПЯ поїзд (Україна)
1	Довжина поезда, м	52	22	до 100
2	Вага, Т	75	17	до 500
3	Принцип підвісу	Електромагнітне притягання	Електромагнітне відштовхування	Притягання на ефекті МПЯ
4	Максимальний магнітний тиск, кГ/см ²	5	10	100
5	Затрати енергії на підвіс, кВт/Т	1	0.1	0.01
6	Вазор левітації, мм	10	100	100-500
7	Кількість НП магнітів	-	12	4
8	Струм в НП магніті, А	-	$0.5 \cdot 10^6$	$10^5 - 10^6$
9	Підйомна сила, кН	900	196	5500
10	Стабілізація в вертикальній площині	необхідна	не потрібна	не потрібна
11	Стабілізація в горизонтальній площині	необхідна	необхідна	не потрібна
12	Максимальна частота коливань вагона, Гц	-	28	5
13	Рівень магнітного поля в салоні, Гс	5	200	1
14	Колеса для розгону	не потрібні	необхідні	не потрібні
15	Діапазон робочих швидкостей, км/Г	0-400	100-500	0-600
16	Тип двигуна	лінійний синхронний	лінійний синхронний	на ново у принципі
17	Наявність перетворювачів частоти	потрібна	потрібна	не потрібна
18	Енергетична ефективність в режимі прискорення, %	60	60	95
19	Енергетична ефективність рекуперації енергії при гальмуванні, %	3-5	3-5	95
20	Питома вага двигуна (вага / сила тяги)	1-5	1-5	0.1-0.2
21	Сила тяги двигуна, кН	45	51	до 1000

В другій главі вивчаються питання стійкості вільного МПЯ левітуючого вагона з одним НП магнітом в вигляді прямокутного контура.

На початку глави детально розглянуті методи отримання математичних моделей електромеханічних систем. Відзначається два основних метода: польовий підхід з застосуванням основних законів фізики для отримання рівнянь руху і формалізований підхід в складанні рівнянь Лагранжа на основі електромеханіки Уайта-Вудсона.

В цій главі застосовується перший метод. Розглядається електромеханічна система, що складається з двох електричних контурів, один із яких — двохпровідна нерухома лінія на шляхопроводі, а другий — НП прямокутник на вільному вагоні (Фіг.1).



Фіг.1. Координатний опис вільного вагона.

Таку систему ми будемо називати одноточковим підвісом МПЯ вагона. Положення вагона в просторі будемо описувати трьома декартовими координатами центра мас x, y, z і трьома кутовими Ейлера-Крилова α, β, γ , визначаючими орієнтацію вагона в просторі (Фіг.1).

Наявність в системі нескінченного електричного контура ускладнила визначення силових характеристик і потенційної енергії. Формула взаємної індуктивності для нескінченної двошпроводної лінії і прямокутника була отримана не на основі традиційної формули Неймана, в якій інтеграл перетворюється в невласний, а з використанням безпосереднього визначення взаємної індуктивності через потік взаємної індукції, обумовлений струмом двошпроводної лінії. Знайдена потенційна енергія системи в вигляді квадратичної форми від малих узагальнених координат.

Для отримання умов стійкості рівноваги вагона по всіх просторових координатах застосована класична теорема Лагранжа-Діріхле і нерівності Сильвестра. Знайдені достатні умови представляють собою сукупність шести нерівностей, залежних від п'яти безрозмірних геометричних і електричних параметрів системи n_i ($i=1,5$). З огляду на великі розміри система нерівностей в явному вигляді тут не виписана. В скороченій формі вона має вигляд:

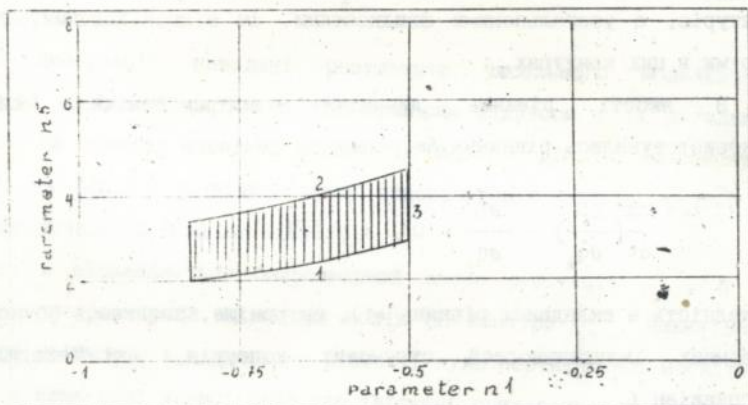
$$W_{xx} > 0, W_{zz} > 0, W_{\alpha\alpha} > 0, W_{\beta\beta} > 0, W_{\gamma\gamma} > 0, W_{xx}W_{\beta\beta} - W_{x\beta}^2 > 0, \quad (1)$$

де $W_{q_i q_k}$ - жорсткості підвісу по відповідних координатах, залежні від п'яти безрозмірних геометричних і електромеханічних параметрів n_i ($i=1,5$).

В роботі зроблено частковий аналіз стійкості по окремим координатам аналітичними методами.

Повний аналіз умов стійкості і знаходження областей стійкості

проводились чисельно при зміні двох параметрів і постійності інших трьох. Отримані області стійкості аналогічні відомим діаграмам Айнса-Стретта для рівняння Мат'є. Вони представлені в дисертації в графічному вигляді для тридцяти різних варіантів системи підвісу. Як приклад наведемо область стійкості (Фіг.2), зображену в дисертації на Фіг.2.1. Аналіз цієї області стійкості ми дамо нижче при опису змісту наступної глави.



Фіг.2. Область стійкості вільного вагона з однокотковим підвісом.

Таким чином, основним результатом глави є вперше обґрунтовані стійкості рівноваги вільного вагона з одним НІ магнітом, левітуючого на новому принципі, по п'яти просторових координатах, виключаючи координату у вздовж шляхопроводу.

В третій главі розглядається підвіс вагона з двома НІ магнітами

прямокутної форми (двохточковий підвіс). На відміну від попередньої глави тут застосований інший підхід, базований на механіці Д.Уайта і Г.Вудсона. Вперше він був застосований для систем з МПЯ левітацією В.Козорізом і полягає в тому, що для опису електромеханічних систем поряд із звичайними механічними узагальненими координатами — лінійними і кутовими, вводяться також електричні координати. Однак, тут відмінністю від попередніх робіт є те, що вибір в якості електричних координат поточкозчеплень Φ контурів неможливий із-за рівності нескінченності поточкозчеплення для двохпровідної лінії. тому в якості електричних координат вибрані заряди електричних контурів, а узагальненими швидкостями, їм відповідаючими, будуть струми в цих контурах.

В якості рівнянь динаміки електромеханічної системи використовувались рівняння Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0, \quad k = \overline{1,9} \quad (2)$$

Складність в складанні рівнянь (1), як раніше, полягає в обчисленні взаємних індуктивностей струмових контурів, які входили в лагранжіан L .

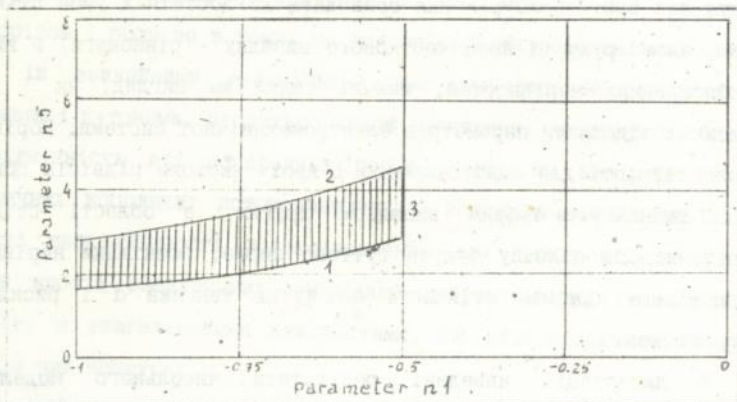
Використання інтегралів руху, впливаючих із рівнянь для електричної частини, дозволило знизити порядок системи диференціальних рівнянь (2) і звести її до шести рівнянь для механічних узагальнених координат.

На відміну від глави 2 в даній главі вивчено питання стійкості не положення рівноваги, а незбуреного руху вагона вздовж шляхопроводу, котре є частинним рішенням рівнянь динаміки. Отримання умов стійкості руху вільного вагона базується на застосуванні прямого методу Ляпунова, а в якості функції Ляпунова

вибрана повна енергія системи, що є інтегралом руху. Вимога додатньої визначеності повної енергії і виконання необхідної умови існування часткового рішення приводить до достатніх умов стійкості незбуреного руху (і його часткового випадку - рівноваги) в вигляді шестискладних нерівностей, маючих такий же вигляд, як і (1) і залежних від шести параметрів електромеханічної системи. Порівняння умов стійкості для одноточкового і двохточкового підвісів показує, що перші є частковим випадком других, а області стійкості двохточкового підвісу будуть суттєво ширше, оскільки нерівності, відповідні умовам стійкості по кутах тангенса α і рискання γ посилюються.

В дисертації наведені результати чисельного моделювання областей стійкості систем з двохточковим підвісом і їх детальний аналіз. Як приклад наведемо область стійкості (Фіг.3), зображену в роботі на Фіг.3.1 і відповідачу вищенаведеній області стійкості для одноточкового підвіса (Фіг.2).

По осі x відкладається безрозмірний зазор левітації n_1 , а по осі y - безрозмірний магнітний потік НП контура n_2 . Нижня межа області стійкості 1 відповідає рівності нулю вертикальної магнітної сили, а вище цієї кривої сила має характер притягання, що необхідно для втілення підвісу вагона. Струм в НП магнітах в такому положенні має однаковий напрямок із струмом в двохпровідній лінії. Верхня крива 2 відповідає рівності нулю жорсткості по координаті z , а нижче цієї кривої підвіс буде мати позитивну жорсткість в вертикальному напрямку, що відповідає стійкості вагона по координаті z . Права межа 3 зв'язана з виникаючою нестійкістю, зобов'язаною взаємозв'язку координат x і β . Відмітим, що при вивченні стійкості окремо по координатах x і β зправа від прямої 3 існують точки стійкості і по x , і по β окремо.



Фіг.3. Область стійкості вільного вагона з двохточковим підвісом.

Порівнюючи фіг.3 з фіг.2, котра описує область стійкості одноточкового підвісу з тими ж параметрами, можна прийти до наступних висновків. Межі 1,2,3 областей стійкості не міняються, оскільки не міняються відповідні параметри. Межа 4 фіг.2 зсувається вліво, оскільки її відповідаюча нерівність для координати γ посилюється.

Відмітим, що система, область стійкості якої зображена на фіг.3, володіє достатньо великим запасом стійкості по координаті z і можливим великим запасом левітації. Абсолютна величина безрозмірного зазору левітації $|n_1|$ може бути 0.5 - 1 і більше, а запас стійкості, при оптимальному виборі параметрів складе $|\Delta n_1| = 0.2$. При характерному розмірі НП контура 2м зазор левітації може бути 0.5 - 1 м, а запас стійкості - ± 0.2 м.

Аналіз інших областей стійкості дозволяє зробити наступні висновки.

1. Для двохточкового підвісу ширина НП прямокутника може бути більше ширини двохпровідної лінії не більше, ніж в 2 рази (відповідне обмеження для односточкового підвісу приблизно 1.1 рази.

2. Область стійкості двохточкового підвісу суттєво ширша дякуючи поліпшенню стійкості по куту тангажа α і рискання β . Це дає можливість для існування більшого числа стійких конфігурацій струмонесучих систем.

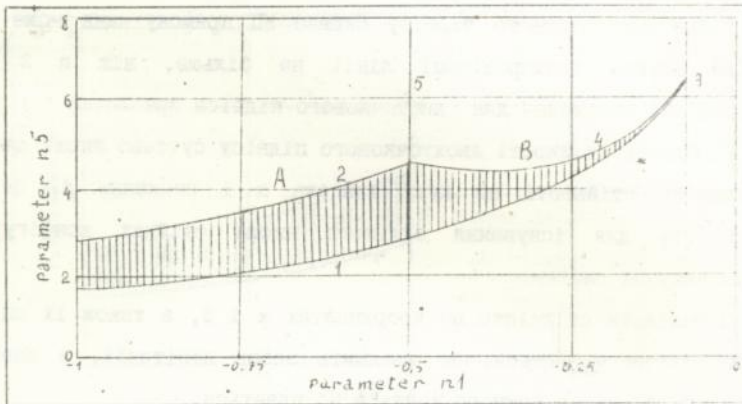
3. Оскільки стійкість по координатах x і β , а також їх спільна стійкість не міняються, то зменшить зазор левітації, а значить, вантажопідйомність кожного контура не вдається.

4. Напевно, слід вважати оптимальною формою НП прямокутника на вагоні таку, в якій довжина більша за ширину в 3.3 рази, а ширина двохпровідної лінії близька до ширини прямокутника.

Четверта глава присвячена вивченню стійкості МПЯ поїзда з чотирьохточковим підвісом. Відмінністю цієї системи від вивченої в третій главі є наявність двох двохпровідних ліній на шляхопроводі і чотирьох НП прямокутників, рознесених по довжині і ширині вагона.

Для дослідження стійкості незбуреного руху вагона застосовується та ж методика, що і в 3 главі. Отримані умови стійкості так само складають сукупність шести нерівностей від семи параметрів системи. Зміни відбуваються в двох нерівностях, відповідних куту нахилу β ($w_{\beta} > 0$) і взаємозв'язаним координатам x і β ($w_{xx} w_{\beta\beta} - w_{x\beta} > 0$), котрі посилюються.

Області стійкості, отримані чисельно, наведені в дисертації в вигляді графіків. Розглянемо область стійкості (фіг.4), котра відповідає областям стійкості, зображеним на фіг.2,3. Смісл меж 1,2,3 той же, що і на фіг.3. Очевидно, що права межа 3 на фіг.4



Фіг.4. Область стійкості вільного вагона
з чотирьохточковим підвісом.

зсунута в порівнянні з Фіг.3, що відповідає посиленню нерівності для координат x і β . Якісно новим елементом області стійкості на Фіг.4 в порівнянні з Фіг.3 є наявність межі 4, яка відповідає рішенням нерівності, що забезпечує стійкість по куту β . Пряма 5 ділить область стійкості на дві частини. Множина точок А - це область стійкості двохточкового підвісу, а В - це множина точок, в яких стабілізація вагона по куту β і взаємозв'язаним координатам x досягнута за рахунок рознесення струмових прямокутників по ширині вагона (параметрична стабілізація за рахунок підбору геометричного параметра n_5). Характерною рисою області стійкості є наявність яскраво вираженого локального максимуму по n_5 в точці $n_1 = -0.5$ і абсолютного максимуму в точці $n_1 = -0.08$. Оскільки підйомна сила пропорційна n_5 , то це говорить про те, що починаючи з зазору

левітації $n_1 = -0.5$ неможливо добитися збільшення вантажопідйомності в стійкій системі зменшенням зазору левітації до певної його величини (в нашому прикладі це - $n_1 = -0.27$). Однак максимальна вантажопідйомність може бути досягнута на межі стійкості при $n_1 = -0.08$.

Другим важливим наслідком наявності додаткової частини в області стійкості є те, що при однакових параметрах двохточкового і чотирьохточкового підвісу можна збільшити допустиму амплітуду вертикальних коливань (запас стійкості по z), не порушуючих стійкість, в 1.5-3 рази. Це дуже важливий показник для магнітного транспорту, де зазор левітації може змінюватися під дією зовнішніх збурень, таких, як посадка й висадка пасажирів, завантаження й розвантаження і інше.

Проведений аналіз показує, що подальше збільшення НП магнітів не приводить до якісної зміни умов стійкості.

В п'ятій главі вивчається вплив екранування магнітних полів на стійкість односточкового МПТ поїзда.

Спочатку розглядається питання про екранування магнітного поля двохпровідної лінії з феромагнітним екраном. Дослідження такої системи проводиться за допомогою метода відображень, котрий полягає в тому, що можна розглядати еквівалентну систему без екрана, яка складається вже із чотирьох струмових контурів: двох реальних контурів і двох їх відображень. Використовуючи ту ж методику, що і в главі 3, можна отримати умови стійкості вагона при наявності нерухомого екрана, котрі мають той же вигляд (1), а W_{q_1, q_k} залежить від шести незалежних параметрів, а не від п'яти, як у випадку без екрану. Аналіз отриманих умов у найпростішому випадку, коли відстань між екраном і двохпровідною лінією мала в порівнянні з характерними розмірами системи, показує, що стійкість по координатах x, α, β, γ не

мінється і залежить лише від геометрії системи (геометрична стійкість). Фізично цей факт зовсім очевидний, оскільки в відповідні нерівності не входять електромагнітні параметри. Мінються лише нерівності $W_{xx} > 0$ і $W_{zz} > 0$, причому, неважко помітити, що область стійкості системи з екраном можна отримати із фіг.2, збільшуючи ординати меж стійкості 1 і 2 в два рази.

Що стосується інших випадків, коли віддаль між екраном і двохрановідною лінією не мала, то знаходження достатньої області стійкості із фіг.2 в деяких випадках описано в дисертації, а в загальному випадку вимагає чисельного моделювання.

Що стосується порівняльного аналізу силових характеристик в цих двох системах, то як показано в роботі, локалізація поля двохрановідної лінії з допомогою екрану при інших рівних умовах дозволяє збільшити вантажопід'ємність підвісу приблизно в 4 рази.

Розглянута також система, моделюєча МПЯ поїзд, в якій з допомогою феромагнетика екранується поле НП магніта на вагоні. Використовуючи ті ж міркування, що і в попередньому випадку, можна отримати достатні умови стійкості руху (рівноваги) вагона. За умови малості віддалі між НП магнітом і екраном область стійкості в даному випадку буде такою ж, як і в попередньому випадку. Що стосується максимальної підйомної сили, то в випадку з рухомих магнітним екраном вона збільшується в 2 рази в порівнянні з системою без екрана.

В кінці глави розглянутий найбільш складний випадок комбінованого екранування двохрановідної лінії і НП магніта. Застосування методу відображень дає електро механічну систему з нескінченним числом струмових контурів. В роботі вдалось показати, що нескінченний ряд, сумою якого виражається кінетична коенергія магнітної взаємодії, сходиться, і тому його можна апроксимувати

кінцевим числом відображень.

Використовуючи ті ж методи, що і в двох попередніх випадках, можна отримати достатні умови стійкості в формі (1), які в розгорнутому вигляді мають дуже складну структуру. У випадку малості віддалей між відповідними екранами і контурами усоби стійкості суттєво спрощуються, а область стійкості вагона можна отримати із Фіг.2, збільшуючи ординати кривих 1 і 2 в 4 рази.

Що ж стосується максимальної вантажопід'ємності, то як показано в роботі, при наявності двох екранів, дозволяючих локалізувати магнітні поля двохпроводної лінії і НП магніта на вагоні, вона може бути збільшена в 8 разів.

Магнітний екран на вагоні може бути використаний також в якості захисту пасажирського салону від магнітного поля. Як показують розрахунки, за прийнятної ваги магнітного екрана на вагоні, котрий може бути використаний в конструктивних цілях (дах пасажирського салону), можна забезпечити рівень магнітної індукції в салоні порядку $10^{-4}T$, що відповідає природньому рівню магнітного поля Землі.

В шостій главі вивчається динаміка МПЯ левітуючого вагона з одно-, дво- і чотирьохточковим підвісом. Використовуючи результати попередніх глав вдалось вперше отримати в явному вигляді рівняння руху в формі Лагранжа:

$$x'' = -m_1^2 x - m_7^2 \beta$$

$$z'' = -m_3^2 z$$

$$\alpha'' + (1 - m_9^2) \beta'' + m_{10}^2 \gamma'' + \beta + (1 - m_9^2 + m_{10}^2) \beta' \gamma' + 2(m_{10}^2 - 1) \alpha' \beta' \beta + 2(m_9^2 - 1) \alpha' \gamma' \gamma = -m_4^2 \alpha \quad (3)$$

$$m_9^2 \beta'' + (1 - m_9^2) \alpha'' \gamma + (1 - m_9^2 - m_{10}^2) \alpha' \gamma' + (1 - m_{10}^2) \alpha'^2 \beta + 2(1 - m_{10}^2) \beta' \gamma' \gamma = -m_5^2 \beta - m_8^2 x$$

$$m_{10}^2 \gamma'' + m_{10}^2 \alpha'' \beta + (-1 + m_9^2 + m_{10}^2) \alpha' \beta' + (-1 + m_9^2) \beta'^2 \gamma + (1 - m_9^2) \alpha'^2 \gamma = -m_6^2$$

де $m_i (i=1, \overline{10}), i+2$ - безрозмірні параметри магнітної системи. Також виведені рівняння динаміки вагона в формі Ейлера і показана еквівалентність цих двох форм. Рівняння динаміки вагона виявляються суттєво нелінійними, а рівняння руху центра мас, на відміну від задач класичної механіки, виявляються взаємозв'язаними з рівняннями обертання вагона навкруги центра мас в силу нецентральної магнітної взаємодії. Ця обставина суттєво ускладнює аналіз динаміки МПІ поїзда.

В деяких часткових випадках, вказаних в дисертації, систему рівнянь вдається лінеаризувати і отримати її рішення аналітично.

В загальному випадку рівняння динаміки будуть суттєво нелінійними. В роботі запропонована ще одна наближена нелінійна модель динаміки вагона, яка при певних не дуже жорстких наближеннях достатньо добре апроксимує набагато складніші точні моделі Лагранжа і Ейлера. Порівняння результатів інтегрування наближеної нелінійної моделі і точної показує, що відповідні динамічні характеристики відрізняються не більше, ніж на 2-3%.

В загальному випадку чисельне моделювання динаміки проводилося чисельно для одно-, двох- і чотирьохточкового підвісу з використанням обох точних моделей в формі Лагранжа і Ейлера. Результати інтегрування представлені в вигляді графіків коливань по всіх координатах. Аналіз цих графіків дозволяє підтвердити стійкий характер руху вагона і обрахувати необхідні динамічні характеристики.

Як приклад розглянемо результати моделювання динаміки вагона з чотирьохточковим підвісом, параметри якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 Параметри стійкості маглев системи з чотирьохточковим МПЯ підвесом

№	Параметр	Значення
1	Довжина вагона, м	25
2	Ширина вагона, м	3
3	Висота вагона, м	3
4	Маса вагона, кг	$1.46 \cdot 10^4$
5	Моменти інерції вагона, А, С, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$3.08 \cdot 10^6$
6	Момент інерції, В, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$8.76 \cdot 10^4$
7	Довжина НП прямокутника, м	2
8	Ширина НП прямокутника, м	1
9	Ширина 2 ^х провідної лінії, м	1
10	Зазор левітації, м	0.2
11	Струм двохпровідні лінії, А	$3 \cdot 10^5$
	Жорсткості підвісу:	
12	$k_1^2 = U_{xx}$, Н/м	$7.70 \cdot 10^5$
13	$k_3^2 = U_{zz}$, Н/м	$3.38 \cdot 10^5$
14	$k_4^2 = U_{\alpha\alpha}$, Н·м	$3.40 \cdot 10^7$
15	$k_5^2 = U_{\beta\beta}$, Н·м	$7.58 \cdot 10^6$
16	$k_5^2 = U_{\gamma\gamma}$, Н·м	$7.72 \cdot 10^7$
17	$k_6^2 = U_{x\beta}$, Н	$2.32 \cdot 10^6$

Початкові умови для інтегрування були вибрані наступні:

$$\begin{aligned} x_0 &= 10^{-2}, z_0 = 10^{-2}, \alpha_0 = 10^{-3}, \beta_0 = 10^{-2}, \gamma_0 = 10^{-3}, \\ x'_0 &= 10^{-2}, z'_0 = 10^{-2}, \alpha'_0 = 10^{-3}, \beta'_0 = 10^{-2}, \gamma'_0 = 10^{-3}. \end{aligned} \quad (4)$$

Чисельне моделювання системи дало наступні результати. Власні частоти коливань, отримані із відповідних графіків, будуть такими:

$$\begin{aligned} \nu_{x1} = \nu_{\beta1} &= 1.72 \text{ Гц}, \nu_{x2} = \nu_{\beta2} = 0.303 \text{ Гц}, \nu_z = 0.77 \text{ Гц}, \\ \nu_\alpha &= 0.523 \text{ Гц}, \nu_\gamma = 0.767 \text{ Гц}. \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідні максимальні амплітуди склали:

$$A_x = 4 \cdot 10^{-2}, A_z = 1.2 \cdot 10^{-2}, A_\alpha = 2 \cdot 10^{-3}, A_\beta = 1.5 \cdot 10^{-3}, A_\gamma = 1.5 \cdot 10^{-2}.$$

Підсумовуючи отримані результати, можна зробити наступні висновки щодо динаміки МПЯ левітуючого вагона:

1. Динаміка вагона є суттєво нелінійною, тому лише в рідких випадках вдається отримати задовільні результати, використовуючи лінійну модель.

2. Отримані дві моделі динаміки вагона в формі Лагранжа (3) і в формі Ейлера еквівалентні і обидві можуть з успіхом застосовані для дослідження динаміки.

3. Отримана наближена нелінійна модель є значно простішою, ніж перераховані вище точні моделі, за певних умов вона може дати гарні результати при дослідженні динаміки.

4. Велика кількість незалежних параметрів, що визначають МПЯ левітуючий вагон, дозволяє спроектувати стійку систему з різною геометрією, великим діапазоном зміни динамічних параметрів (зокрема власних частот від 10^{-1} до 10 Гц).

Сьома глава присвячена питанням динаміки і плавності руху МПЯ поїзда. Якщо на магнітному транспорті не створити комфортні умови поїздки, які були б кращі, ніж на існуючих видах транспорту, то навіть висока швидкість не зможе привабити пасажирів.

Відомо, що поїзд, левітуючий на електродинамічному відштовхуванні (прект RTRI), не володіє внутрішніми амортизаційними властивостями і не задовольняє критерій плавності руху ні по відношенню до випадкових зовнішніх збурень вагона, ні по відношенню до періодичних збурень, діючих на шляхопровід. За ймовірної амплітуди вертикальних коливань вагона порядку 2 см, величина прискорення складає 1g при частоті коливань 3 Гц. Відчуття при цьому будуть такими ж, як у людини, що стрибає на скакалці.

Відмітим, що і по відношенню до періодичних збурень, викликаних неточністю укладки шляху, такий поїзд не задовольняє критерію плавності ходу. Якщо прийняти як приклад допустиму неточність укладки шляху на лінії Сінкансен, що апроксимується синусоїдою з амплітудою $\epsilon = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ і довжиною хвилі $\lambda = 40 \text{ м}$, то відповідні величини складуть $0.2g$ і 3.5Гц .

Зроблені в дисертації розрахунки показують, що вагон з МПЯ левітацією має внутрішній амортизаційний механізм по відношенню до обох перерахованих вище видів збурень.

Для розглянутих в роботі прикладів відповідні величини максимального прискорення МПЯ вагона за ймовірної амплітуди збурень коливань порядку 2 см складуть:

$$\begin{aligned}
 \text{для однокоткового підвісу} & - \ddot{z} = 0.048g \text{ при } \nu_z = 0.77 \text{ Гц,} \\
 & \ddot{z} = 0.002g \text{ при } \nu_x = 1.65 \text{ Гц,} \\
 \text{для двохкоткового} & - \ddot{z} = 0.068g \text{ при } \nu_z = 0.92 \text{ Гц,} \\
 \text{для чотирьохкоткового} & - \ddot{z} = 0.048g \text{ при } \nu_z = 0.77 \text{ Гц.} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Ці величини задовольняють відомий критерій плавності руху.

Таким чином, МПЯ підвіс має значні внутрішні амортизаційні можливості по відношенню до випадкових збурень, послаблюючи дію збурень приблизно на порядок, і при оптимальному підборі параметрів по плавності руху може переважити існуючі види транспорту.

Що стосується коливань, що переносить МПЯ поїзд внаслідок неточності укладки шляху, то, беручи як вихідну точність укладки шляху на лінії Сінкансен, наведену вище, отримуємо при швидкості 500 км/г наступні параметри коливань вагона для моделей наведених в цій главі:

$$\begin{aligned}
 \text{Однокотковий і чотирьохкотковий} & \\
 \text{підвіс:} & \quad \ddot{z} = 0.0088g \text{ при } \nu = 3.5 \text{ Гц,} \\
 \text{Двохкотковий підвіс:} & \quad \ddot{z} = 0.0127g \text{ при } \nu = 3.5 \text{ Гц.} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Ці величини задовольняють згаданий вище критерій плавності руху. Оцінки (7) показують, що для МПЯ поїзда можна ослабити на порядок точність укладки шляху, взявши величину $\epsilon = 3.5 \cdot 10^{-2}$. В цьому випадку умови плавності руху будуть виконані.

Якщо на систему будуть діяти великі зовнішні збурення, при яких внутрішній амортизаційний механізм не забезпечує плавності руху, то ослабити дію збурень можна з допомогою подвійного підвісу пасажирського салону. Аналіз прийнятої в роботі моделі з двохмасовим підвісом показує, що при певному підборі параметрів можна зменшити амплітуду змущених коливань на 2-3 порядки.

Застосування подвійного підвісу буде виправдано, якщо можливі зовнішні збурення будуть високочастотними або з великою амплітудою, або ж об'єднувати ці два фактори.

В восьмій главі наведено розрахунок великого числа (біля 30) конкретних систем маглев транспорту з одно-, дво- і чотирьохточковим підвісом. Тут запропонована схема розрахунку параметрів маглев систем, яка базується на результатах, отриманих в попередніх главах. Безумовно, можливі і інші схеми синтезу систем магнітної левітації. На наш погляд, викладена методика є найбільш прийнятною, може бути легко автоматизована і дає можливість оптимізації розрахункових параметрів.

Як приклад пропонуємо таблицю 3, в якій наведені параметри деяких стійких систем з чотирьохточковим МПЯ підвісом.

Таблиця 3. Параметри систем магнітної левітації з чотирьохточковим МІЯ підвісом

Параметри	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Довжина НІ прямокутника, м	2	1	2	1	2	2	1	2	1
Ширина НІ прямокутника, м	2	1	1	0.5	1	0.6	0.3	0.6	0.3
Ширина двох-провідної лінії, м	2	1	1	0.5	1	0.6	0.3	0.6	0.3
Зазор левітації, м	0.5	0.25	0.1	0.05	0.2	0.1	0.05	0.2	0.1
Струм І двох-провідної лінії, А	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6
Маса вагона, т	40	40	460	460	146	380	380	152	152
Довжина вагона, м	25	25	100	100	75	100	100	75	75
Ширина вагона, м	3	3	4	4	4	4	4	4	4
Висота вагона, м	3	3	4	4	4	4	4	4	4
Моменти інерції, кг м									
А	$2.1 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$	$3.8 \cdot 10^8$	$3.8 \cdot 10^8$	$6.9 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^8$	$3.2 \cdot 10^8$	$7.1 \cdot 10^7$	$7.1 \cdot 10^7$
В	$3 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^6$	$3.9 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$4.1 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^5$
С	$2.1 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$	$3.8 \cdot 10^8$	$3.8 \cdot 10^8$	$6.9 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^8$	$3.2 \cdot 10^8$	$7.1 \cdot 10^7$	$7.1 \cdot 10^7$

Таблиця 3. Параметри систем магнітної левітації з чотирьохточковим МПЯ підвісом (продовження).

Параметри		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координати	Жорсткості									
x	k_1^2 , Н/м	$8.8 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^6$	$4.6 \cdot 10^7$	$9.2 \cdot 10^7$	$7.7 \cdot 10^6$	$3.9 \cdot 10^7$	$7.9 \cdot 10^7$	$8.9 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^7$
z	k_3^2 , Н/м	$4 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$3.4 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^6$
α	k_4^2 , Н·м	$4 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^7$	$3.4 \cdot 10^8$	$1.4 \cdot 10^9$	$6.9 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^8$
β	k_5^2 , Н·м	$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^8$	$2.1 \cdot 10^8$	$7.6 \cdot 10^7$	$3.9 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$8.7 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^8$
γ	k_6^2 , Н·м	$8.8 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^7$	$4.6 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^9$	$7.7 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$8.9 \cdot 10^8$	$4.5 \cdot 10^8$
x β	k_7^2 , Н'	$1.8 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^7$	$1.1 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^7$	$2.7 \cdot 10^7$
	Власні частоти, Гц									
x	ν	0.75	1.07	1.59	2.25	1.16	1.6	2.29	1.22	1.73
z	ν	0.50	0.71	0.23	0.33	0.77	0.93	1.92	0.61	0.87
α	ν	0.69	0.49	0.08	0.06	0.35	0.33	0.23	0.29	0.2
β	ν	1.84	1.3	2.98	2.1	2.22	3.14	2.25	2.32	1.65
γ	ν	1.03	0.72	0.55	0.39	0.53	0.56	0.4	0.56	0.4

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Обґрунтовано новий принцип магнітної левітації поїзда, базований на ефекті "магнітна потенційна яма". Отримані умови стійкості поїзда з одним, двома і чотирма НП магнітами на борту і протягнутим магнітним елементом вздовж шляхопроводу.
2. Показана можливість задоволення умовам стійкості за рахунок підбору параметрів системи (параметрична стабілізація) і отримані області стійкості вагона.
3. Обґрунтована можливість створення стійких систем магнітної левітації при наявності екранування магнітного поля двохпровідної лінії, НП магнітів вагона і при комбінованому екрануванні та показано, що в цих випадках можна збільшити силові характеристики в 4, 2 і 8 разів відповідно. Наявність екранування НП магнітів вагона дозволяє знизити рівень магнітного поля в пасажирському салоні до прийнятної величини ~ 1 Гс.
4. Розроблені математичні моделі динаміки МПЯ поїзда і проведений їх аналітичний і чисельний аналіз.
5. Вивчені питання плавності руху МПЯ поїзда і показана можливість створення систем магнітного підвісу, задовольняючих відомим критеріям якості руху за рахунок підбору параметрів.
6. Проведено проектування і розрахунок параметрів біля 30 систем МПЯ левітуючого поїзда.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. V.S.Mikhalevich, V.V.Kozoriz, V.P.Shabliij. Magnetic Levitation Based on: Magnetic Potential Well (MPW) Effect. SAE FTT Conference, SAE # 911626, 5-8 Aug, 1991, Portland OR.
2. Шаблій В.П. Козорез В.В. Об интегрировании уравнений движения свободного физического маятника в глубокой магнитной потенциальной яме. -Электродинамика и механика сплошных сред. Математическое

моделирование. Рига: ЛГУ им.П.Стучки, 1982 г.

3. Шаблий В.П. О возможности существования равножесткой опоры, основанной на эффекте магнитная потенциальная яма. -Электродинамика и механика сплошных сред. Математическое моделирование. Рига: ЛГУ им.П.Стучки, 1982 г.

4. Шаблий В.П. О колебаниях свободного тела в глубокой магнитной потенциальной яме. -Тезисы докладов 42 научно-технической конференции, посвященной 60-летию СССР, Рига, 1982 г.

5. Шаблий В.П. Автоматическая стабилизация магнитного подвеса, основанного на эффекте МПЯ. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции, посвященной 1500-летию Киева. Киев, 1982 г.

6. Шаблий В.П. и др. О максимальной грузоподъемности магнитных опор в условиях ограничения по критическому полю. -Техническая электродинамика, 1982 г. №1. Киев, "Наукова думка".

7. Шаблий В.П. Об уравнениях движения свободного тела в магнитном поле двух идеальных круговых токов. Депонирована в ВИНТИ 1982 г. №5401-82 Деп.

8. Шаблий В.П. Чеборин О.Г. О существования равновесия в системе двух идеально проводящих токовых колец. Депонирована в ВИНТИ 2.II.82 г. №5400-82 Деп.

9. Шаблий В.П. Магнитный маятник с вертикально колеблющейся точкой подвеса. Депонирована в УкрНИИМТИ 16.05.85 г. №1045 УК-85 Деп.

10. Шаблий В.П. и др. О математической модели свободного физического маятника в глубокой магнитной потенциальной яме. Депонирована в УкрНИИМТИ 16.05.85 г. №1047 УК-85 Деп.

11. Шаблий В.П. и др. Об устойчивости равновесия тела в глубокой магнитной потенциальной яме на вращающемся основании. Депонирована в УкрНИИМТИ 16.05.85 г. №1044 УК-85 Деп.

12. Шаблий В.П. и др. О магнитном взаимодействии и устойчивости равновесия в системе двух идеально проводящих токовых прямоугольников. Депонирована в УкрНИИТИ №1685 УК-85 Деп.
13. Шаблий В.П. и др. О магнитном взаимодействии и устойчивости равновесия в системе двух идеально проводящих токовых квадратов. Депонирована в УкрНИИТИ №1439 УК-85 Деп.
14. Шаблий В.П. и др. О математической модели свободного ротора с горизонтальной осью вращения в магнитной потенциальной яме. Депонирована в УкрНИИТИ №2705 УК-85 Деп.
15. Шаблий В.П. О потенциальной энергии n свободных тел с магнитным взаимодействием идеальных токовых колец. Депонирована в УкрНИИТИ №2706 УК-85 Деп.
16. Шаблий В.П. Чеборин О.Г. Об устойчивости равновесия и динамике свободного тела в глубокой МПЯ. -Тезисы докладов научно-технической школы-семинара "Моделирование и исследование устойчивости физических процессов". Киев, 1990 г.
17. Шаблий В.П. Динамика свободного ротора с горизонтальной осью вращения. -Тезисы докладов научно-технической школы-семинара "Моделирование и исследование устойчивости физических процессов". Киев, 1990 г.
18. Шаблий В.П. Об устойчивости равновесия и динамике свободного ротора с неконтактным магнитным подвесом. -Тезисы докладов всесоюзной конференции по нелинейным колебаниям механических систем. Горький, 1991 г.
19. Козорез В.В., Шаблий В.П. Проблема устойчивости магнитных систем и её связь с принципиально новой технологией коммуникаций. -Тезисы докладов научно-технической школы-семинара "Моделирование и исследование устойчивости физических процессов". Киев, 1991 г., с. 44-45.

20. Шаблий В.П. Об устойчивости равновесия свободного тела в магнитном поле бесконечной двухпроводной линии. -Тезисы докладов научно-технической школы-семинара "Моделирование и исследование устойчивости физических процессов". Киев, 1991 г., с. 90-91.
21. Шаблий В.П. Чеборин О.Г. Магнитная левитация на основе использования эффекта магнитной потенциальной ямы. -Кибернетика и вычислительная техника. Сложные системы управления. Киев: Наукова Думка, 1992 г.
22. Шаблий В.П. Об устойчивости равновесия свободного вагона транспорта при экранировании магнитного поля двухпроводной линии. Тезисы докладов международной конференции "Моделирование и исследование устойчивости процессов. Киев. 1992 , с. 67-68
23. Шаблий В.П. и др. Численное моделирование областей устойчивости вагона с двухточечным МПЯ-подвесом. Тезисы докладов международной конференции "Моделирование и исследование устойчивости процессов. Киев. 1992 , с.68
24. В.С.Михалевич, В.В.Козорез, В.П.Шаблий. Устойчивость равновесия свободного вагона с магнитным подвесом на основе эффекта "магнитная потенциальная яма". ИК АН Украины, препринт 91-48, Киев 1991, 26 с.
25. Шаблий В.П. Об устойчивости движения и динамике МПЯ поезда с четырёхточечным подвесом. Международная конференция "Моделирование и исследование устойчивости систем. 24-28 мая 1993 г., г.Киев.
26. Шаблий В.П. Динамика и плавность движения маглев поезда с МПЯ подвесом. Международная конференция "Моделирование и исследование устойчивости систем. 24-28 мая 1993 г., г.Киев.



AB 29.423