

ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Дашков Андрій Васильович

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТО
ДИНАМІЧНИХ РУШІЙНИХ СИСТЕМ

0.5.07.10 - електроракетні двигуни та енергоустановки
літаючих апаратів



АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Харків -1996



АВ 34.928

дисертація є рукописом

Роботу виконано у Харківському авіаційному інституті ім.
М.С. Жуковського Міністерства освіти України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук
Рашкован Василь Маркович

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ:

доктор фізико-математичних наук, професор
Репалов Микола Семенович (Національний науковий центр Харківського
фізико-технічного інституту, м. Харків)

кандидат технічних наук
Підгорний Валентин Олександрович (Харківський авіаційний інститут)

ПРОВІДНА УСТАНОВА: Інститут проблем машинобудування
Національної академії наук України (м. Харків)

Захист відбудеться "21" червня 1996 року с 14 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради 202.27.04 у Харківському
авіаційному інституті Міністерства освіти України за адресою:
310123, м. Харків, вул. Чкалова, 17, Лабораторний корпус, ауд. 202

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського авіаційного
інституту Міністерства освіти України (310123, м. Харків, вул. Чкалова, 17)

Автореферат розіслано "20" травня 1996 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

ім. В. Стефаника
АН України

Незим В.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Дисертаційну роботу присвячено питанням використання надпровідних магнітних елементів у рушійних системах типу ЕРД, електромагнітних гарматах, що передбачає дослідження нових принципів при створенні технічних приладів, які використовують індукційний метод прискорення. Вибір такої тематики обумовлено двома обставинами.

По-перше, новий злет інтересу до надпровідних приладів, особливо до їх технологічних вживань, який спостерігається в багатьох випадках завдяки швидкому розвитку та прогресу у галузі криогенної техніки та криогенного матеріалознавства, а також відкриттю високотемпературної надпровідності.

По-друге, на вибір дисертаційної тематики вплинув підйом наукової активності у галузі так званих "електромагнітних технологій" (EM technologies), які на цей час втілюють галузі створення прискорювачів плазми, ЕРД, експериментальних електромагнітних гармат, проектів систем для доставки необхідного вантажу у космос з поверхні Землі.

Завдяки деяким своїм властивостям надпровідні магнітні елементи можуть бути використані як активні прискорюючі елементи в різноманітних рушійних системах для підвищення ефективності їх роботи. В дисертаційній роботі, на відміну від інших робіт, розглянуто динамічні властивості надпровідних багатозв'язаних систем, та проаналізовано їх можливе використання для прискорювачів плазми та твердих тіл. При цьому спектр можливих використань розглянутих пристроїв є великим.

Швидкий прогрес у галузі здешевлення та зменшення розмірів криогенної апаратури дозволяє говорити про використання

розглянутої системи у галузі створення та використання електроракетних двигунів (ЕРД) та надпровідних рушійних систем. Основні переваги запропонованих систем - високий рівень перетворення накопиченої магнітної енергії у енергію руху, а також відсутність омичних втрат. Ще одне використання розглянутої системи - це створення нових конструкцій електромагнітних гармат, які можуть бути використані як для експериментальних цілей, так і для космічних досліджень. Подібні пристрої вкрай необхідні у планетарних дослідженнях різного класу, дослідженнях входу космічних апаратів у верхні шари атмосфери, різних експериментах по зіткненню. В перспективі електромагнітні гармати можуть стати пристроями для доставки корисного вантажу у космос з поверхні Землі. Впровадження розглянутих у дисертації принципово нових схем прискорення у цю галузь може дати значне підвищення ефективності розходу енергії. При цьому знімається декілька серйозних технологічних проблем, пов'язаних з використанням гармати Маршала, таких, як ерозія рельсів при великих розрядних струмах, необхідність створення накопичувачів та розрядників складної конструкції, наявність складних систем комутації та управління.

Усі вказані аргументи свідчать про те, що широкі перспективи практичного використання прискорювальних та рушійних систем з надпровідними активними елементами потребують виконання великого спектру теоретичних та експериментальних досліджень, чим підкреслюється актуальність вибраної теми досліджень та визначаються головні задачі дисертаційної роботи.

Мета роботи. Формулювання, теоретичні дослідження та експериментальні обґрунтування фізичних принципів побудови високоефективних прискорюючих пристроїв на основі

надпровідних систем з магнітною взаємодією, які мають різноманітні технічні застосування в якості індукційного пульсуючого ЕРД, багатосекційного прискорювача плазми і макротіл, рушійних систем космічних апаратів, електромагнітних гармат, експериментальних стендів тощо.

Основні завдання дослідження: розробка загальної схеми та математичної моделі індукційного імпульсного ЕРД з надпровідною прискорюючою котушкою; розробка загальної схеми та математичної моделі багатосекційного прискорювача плазмових утворень з надпровідною системою котушок; розробка загальної схеми та математичної моделі індукційного надпровідного прискорювача твердих макротіл; одержання та аналіз основних динамічних характеристик та прискорюючих можливостей запропонованих надпровідних динамічних систем; перевірка отриманих результатів за допомогою математичного моделювання та аналізу чисельних та фізичних експериментів.

Методи досліджень. Загальна методика виконання дисертаційної роботи складається із аналітичних, числових та фізико-експериментальних засобів досліджень. Аналітичні дослідження, проведення і аналіз числових експериментів базується на створенні нових фізичних і технічних схем та розробці адекватних математичних моделей надпровідних динамічних та рушійних систем з електромагнітною взаємодією. Експериментальні засоби склалися із досліджень силових та енергетичних характеристик взаємодії елементів надпровідних динамічних систем з метою перевірки основних фізичних посилок і принципів створення надпровідних рушійних систем та підтвердження адекватності математичних моделей їх фізичним і технічним образам.

Обґрунтування теоретичної та практичної цінності дослідження та його наукова новизна. Наукова новизна заключається в основних результатах роботи, які дозволяють говорити про можливість створення надпровідних прискорюючих систем, що використовують нові фізичні принципи та методи каскадного прискорення, основною перевагою яких є високий коефіцієнт перетворення накопиченої енергії у енергію руху. Наукова новизна та значимість полягає в тому, що: - встановлено основні особливості та поведінку динамічних характеристик прискорення у системі двох співвісних надпровідних витків, які являються елементами рушійних систем; висунуто і обґрунтовано основні принципи застосування деяких особливостей отриманих характеристик прискорення; - розроблено математичні моделі та проведено аналіз конкретної схеми індукційного електрореактивного двигуна з надпровідним елементом; отримано основні динамічні характеристики процесу прискорення; показано значне підвищення к.к.д. порівняно із звичайною "теплою" системою; проведено оцінку втрат енергії при пульсуючому режимі роботи надпровідника; - виконано порівняння з експериментальними даними по індукційним ЕРД; - виконано електродинамічні розрахунки багатосекційної системи індукційного прискорення, включаючи математичну модель із врахуванням реальної форми плазмових згустків; знайдено параметри оптимального вимкнення надпровідних струмонесучих елементів; проаналізовано ефективність перетворення магнітної енергії у енергію руху та її залежність від різних параметрів системи; - розглянуто та проаналізовано основні моменти та технічні проблеми інженерної реалізації запропонованої системи прискорення та створення нових надпровідних рушійних систем; -

виконано електродинамічні розрахунки індукційного прискорювача макротіл з надпровідним струмонесучим елементом; розглянуто проблему стійкості відносно малих збурень прискорюваного тіла будь-якої форми у каналі прискорення; отримано умови та визначено діапазон стійкості запропонованих систем; проведено порівняння із існуючими системами прискорення твердих тіл - рельсотронами.

У прикладному плані отримані результати дають повне описання динаміки процесів прискорення в активних надпровідних системах, а також основних технічних особливостей та проблем роботи досліджуваних систем. Створений пакет прикладних програм може використовуватись для інженерного розрахунку запропонованих систем прискорення, а також для подальшого, більш ускладненого розгляду таких систем.

Реалізація наукових розробок. Результати дисертаційної роботи впроваджуються в організаціях України по виконанню національної програми "Критичні технології", в ННЦ ХФТІ, Інституті кібернетики, Інституті електродинаміки, ІПМАШ АН України.

Особистий внесок дисертанта у роботи, які опубліковано разом із співавторами. В роботах [1-15] автор приймав участь у постановці задачі, аналітичних та чисельних розрахунках, запропонував конкретні схеми досліджуваних пристроїв, приймав участь у формуванні заключних висновків.

Апробація роботи: Дисертаційна робота є підсумком досліджень, проведених у Харківському авіаційному інституті ім. М.Е. Жуковського у рамках розвитку пріоритетних програм, наказ Міносвіти України № 4 від 18.06.1992 і в плані виконання національної програми України "Критичні технології". Основні

результати, які покладено в основу дисертації, доповідалися на міжнародних та українських конференціях:

"Моделювання та стійкість фізичних процесів" (Київ, 1992, 1993, 1994, 1995 рр.), "Magnetism&Magnetic Materials" (Philadelphia, 1995).

Публікації: Матеріали дисертації відображено та опубліковано у трьох наукових звітах по НДР, 5 наукових статтях, 6 тезах доповідей на республіканських та міжнародних конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація має 149 сторінок машинописного тексту, 44 сторінки малюнків, 4 сторінки таблиць, 9 сторінок списку використаної літератури та складається із вступу, п'яти глав, висновку, списку літератури. Особистий внесок автора відображено у 15 наукових працях та тезах доповідей, опублікованих за темою дисертації, з яких дві написано без співавторів.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність, мета, наукова новизна та практична цінність роботи. Викладається короткий зміст дисертації і формулюються наукові положення та результати роботи, які виносяться на захист.

У першій главі проводиться огляд робіт у галузі прискорювачів плазми індукційного типу та технічного використання надпровідних матеріалів. Головною метою цього огляду є аналіз робіт по використанню надпровідникових матеріалів для створення індукційних електрореактивних двигунів, прискорювачів плазми, та електромагнітних гармат. Наведено основні галузі технічного застосування надпровідності -

експериментальні установки для створення сильних магнітних полів, надпровідні хвилеводи, створення криогенних двигунів та трансформаторів, систем передачі електроенергії, створення швидкодіючих елементів для обчислювальних машин, тощо. Відзначено невелику кількість робіт, які б мали відношення до використання надпровідників у галузі електроракетних двигунів та прискорювачів плазми з відносно невеликими (для надпровідників) рівнями накопиченої енергії. Виходячи з цього, обґрунтовано висновок про недостатність досліджень у напрямках використання надпровідних матеріалів у галузі будування індукційних пульсуючих електроракетних двигунів, індукційних гармат для прискорення твердих тіл і визначено необхідність їх розширення.

Другу частину огляду присвячено аналізу експериментальних та теоретичних робіт по індукційним пульсуючим двигунам та прискорювачам, електромагнітним гарматам. Аналізуються основні експериментальні результати по створенню індукційних електрореактивних двигунів - пульсуючий двигун фірми TRW та двигуни з рухомою магнітною хвилею, розглядаються їх схеми та принципи роботи. Крім цього, було зроблено огляд стану досліджень електромагнітних гармат що використовуються для прискорення твердих тіл до швидкостей 5-10 км/с. Як доведено, такі пристрої мають дуже велике значення для деяких планетарних досліджень, експериментів зіткнення, моделювання входу космічних апаратів у верхні шари атмосфери, проектування систем запуску корисного вантажу у космос з поверні Землі. Наведено основні експериментальні результати по розробці плазмового рельсотрону - НУРАС, проекту системи запуску у космос корпорації SAIC та інших проектів та досліджень. Проаналізовано основні недоліки плазмових рельсотронів - невелика кількість пострілів у тиждень,

невеликий к.к.д. Обгрунтовано основні переваги індукційного методу прискорення - простоту системи живлення, високу "швидкострільність", високий розрахунковий к.к.д. і таке інше.

Виходячи з розглянутого, сформульовано постановку задачі дисертаційної роботи, основною метою якої є - дослідження конкретних схем індукційних прискорювачів плазми та твердих тіл, які використовують надпровідні струмонесучі елементи, та оцінка цих схем з точки зору ефективності перетворення накопиченої енергії в енергію руху, а також порівняння з вже відомими "теплыми" системами.

У другій главі розглянуто особливості електромагнітної взаємодії надпровідних динамічних систем струмонесучих витків та окремі експериментальні дослідження. Основною метою цього розгляду є вибір теоретичної моделі для наступного моделювання конкретних пристроїв, а також визначення основних особливостей взаємодії у таких системах, та аналіз їх з точки зору використання для створення нових прискорювальних систем. Вивчення динамічних властивостей надпровідних струмонесучих систем розглядалось на прикладі взаємодії системи двох тонких ідеальнопровідних витків, математичну модель якої отримано за допомогою Лагранжевого формалізму на основі запису функції кінетичного потенціалу. Математична модель руху надпровідного витка, яка може використовуватись як для моделювання прискорення твердих тіл, так і для моделювання прискорення плазми, включає рівняння руху

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = I_1 I_2 \frac{dL_{12}}{dx}; \quad (1)$$

(I_1, I_2 - струми у витках, L_{12} - їх взаємоіндуктивність) та інтеграли руху, які відображають принцип постійності магнітного потоку, що пронизує контур витка:

$$L_1 I_1 + L_{12} I_2 = \text{const} = \psi_1; \quad (2)$$

$$L_2 I_2 + L_{12} I_1 = \text{const} = \psi_2$$

На основі рівнянь (1),(2), що в певній мірі характеризують процеси прискорення в надпровідних системах, отримано динамічні характеристики таких систем та проаналізовано їх особливості. Підтверджено відомий факт, виявлений Козорізом В.В. про наявність точки зміни знаку сили взаємодії, за умови:

$$\frac{\psi_2}{\psi_1} = \frac{L_{12}}{L_1}, \quad (3)$$

та обґрунтовано наявність екстремальних точок на характеристиках швидкостей, за умов, коли один із струмів у взаємодіючих елементах проходить через нуль. Проаналізовано фізичний процес перекачки магнітної енергії нерухомих надпровідних елементів в енергію руху прискорюваних витків, та зроблено висновки щодо збереження екстремального значення швидкості руху методом виводу із надпровідного стану нерухомого витка у визначений момент часу, коли струм в ньому наближається до нульової позначки. Із фізичних та числових експериментальних досліджень визначено умови оптимального, бездисипаційного розімкнення нерухомої надпровідної котушки, однією із умов якої є таке співвідношення між початковими магнітними енергіями взаємодіючих елементів: $\frac{\psi_2}{\psi_1} > \kappa \sim 1$. Крім цього, встановлено

основні динамічні характеристики розглянутої схеми електромагнітної взаємодії надпровідних витків, та проведено їх аналіз. Експериментальні дослідження по перевірці основних

фізичних принципів динаміки взаємодії систем надпровідних котушок, та порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними результатами дають їх розходження не більш ніж на 15 %, що є цілком задовільним при практичному їх використанні.

У третій главі виконано електродинамічні розрахунки індукційного імпульсного електрореактивного двигуна з надпровідною прискорюючою котушкою, принципова схема якого показана на мал. 1. Для опису та аналізу процесу прискорення плазми розроблено теоретичну модель, що включає такі рівняння:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = I_1 I_2 \frac{dL_{12}}{dx} + I_2 I_3 \frac{dL_{23}}{dx} , \quad (4)$$

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{12} I_2) + \frac{d}{dt}(L_{13} I_3) + R_1 I_1 = U ,$$

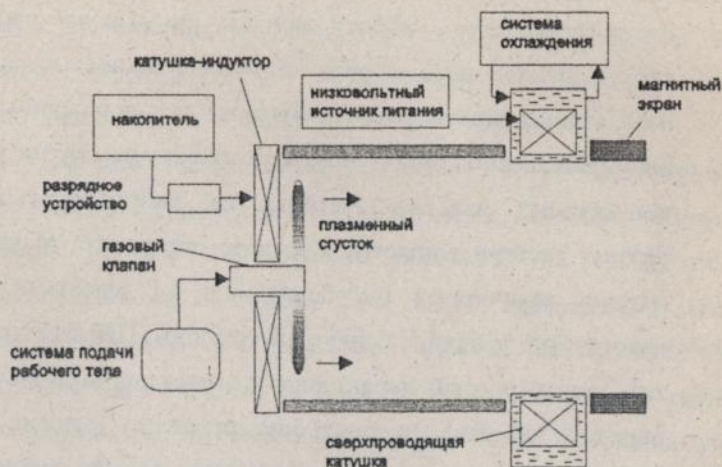
$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{12} I_1) + \frac{d}{dt}(L_{23} I_3) = 0 ,$$

$$L_3 \frac{dI_3}{dt} + \frac{d}{dt}(L_{13} I_1) + \frac{d}{dt}(L_{23} I_2) = 0 ,$$

$$I_1 = -C_1 \frac{dU}{dt} .$$

в яких індекси 1,2,3 відповідно відносяться до котушки-індуктора, плазмового згустку, та надпровідної котушки. На основі аналізу числових експериментів отримано основні динамічні характеристики двигуна: зміну струму індуктора протягом прискорення, зміну індукційного струму в прискорюваному згустку протягом прискорення, поведінку заведеного у надпровідну котушку струму протягом прискорення. Аналіз цих характеристик показав наявність двох режимів прискорення - синхронного та асинхронного. Виявлено, що для синхронного режиму к.к.д. двигуна не перевищує кількох відсотків. У асинхронному режимі

Принципова схема індукційного ЕРД з надпровідною котушкою.



мал. 1.

розрахунковий к.к.д. системи може досягати 70-80 відсотків. Проведено порівняння з "теплою" системою прискорення (без надпровідникової котушки). Показано, що для такої схеми прискорення максимальний розрахунковий к.к.д. досягає приблизно 50 %. Основною причиною підвищення ефективності двигуна запропонованої схеми є факт збереження надпровідниковим витком своєї енергії постійною. Таким чином було доведено, що при рівних накопичених енергіях в "теплій" та надпровідниковій системах досягаємі швидкості плазмових утворень приблизно однакові, однак к.к.д. надпровідної системи може бути значно вищим. Також показано, що при однакових енергіях конденсаторного накопичувача в обох схемах, надпровідниковий двигун в порівнянні з "теплим" дає підвищення швидкості плазми майже у два рази, розмірні оцінки якої дають величину порядку 15-30 км/с. Проаналізовано залежність к.к.д.

надпровідного двигуна від геометричних та енергетичних параметрів системи. Проведено оцінки втрат енергії при імпульсному режимі роботи двигуна, що включає наступні види втрат: а) гістерезисні втрати на надпровідних матеріалах при імпульсних режимах роботи; б) втрати в надпровідному матеріалі від поля власного струму; в) втрати на вихрові струми у металевих конструкціях двигуна; г) втрати на забезпечення криогенного режиму системи в цілому. Доведено, що втрати а) та б) є дуже малими величинами (не більш ніж 0.1 відсотків від енергії, накопиченої у надпровідниковій котушці). Цей факт пов'язаний з тим, що для енергій, характерних для електрореактивних двигунів (порядку 300 Дж), надпровідник працює у режимі, коли його власний струм багато менше критичного. Оцінки вихрових втрат у металевих конструкціях дають величину порядку 0.1 відсотка від енергії, накопиченої у надпровідних елементах. При аналізі втрат енергії на забезпечення криогенного режиму було прийнято два режими охолодження надпровідної котушки - автономний та рефрижираторний. У автономному режимі кріостат заповнюється хладагентом (гелієм) на старті, та в подальшому не має будь-якого підживлення. Час роботи такого двигуна у надпровідному режимі обмежується швидкістю випаровування гелію. Зроблені оцінки показали, що можливість забезпечення автономного режиму охолодження може досягати десятків дБб без значного погіршення вантажних параметрів системи. У рефрижираторному режимі оцінювались втрати енергії на живлення системи охолодження парів гелію, застосовуючи відому формулу для циклу Карно. При цьому ефективність детандерної та компресорної системи приймалась рівною 10 %. Зроблена оцінка показала, що втрати енергії за цикл (якщо двигун працює з частотою 1 Гц), приблизно

дорівнюють 0.2 відсоткам від енергії, накопиченої у надпровідниковій котушці. Таким чином доведено, що значний вплив на величину розрахункового к.к.д. має головним чином процес іонізації робочого тіла (коефіцієнт використання робочого тіла). Для різних систем він коливається від 0.3 до 0.6.

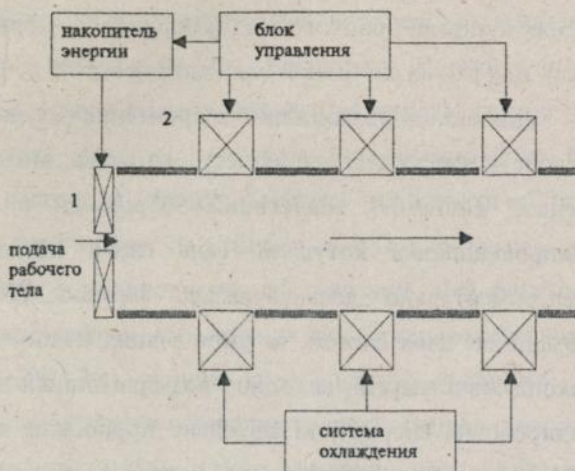
Для оцінки розходження теоретичних результатів, отриманих за допомогою моделі струмонесучого витка, виконано розрахунки "теплої" системи аналогічній зображеній на мал.1, але без надпровідникової котушки. Така схема індукційного двигуна експериментально досліджувалась фірмою TRW. Враховуючи відмінності двох систем, за умов рівних накопичених у ємісному накоплювачі енергій, виконано розмірні оцінки для досліджуваної надпровідної системи, та здійснено порівняння з двигуном фірми TRW. Переваги запропонованої надпровідної системи прискорення плазмових утворень над системою фірми TRW забезпечується, на наш погляд, більш вдалим технічним рішенням з використанням нових кріогенних ефектів.

Четверту главу присвячено електродинамічним розрахункам багатосекційної системи прискорення плазмових згустків, що побудована на обґрунтованих принципах прискорення та вимикання нерухомих надпровідних витків за умов оптимального режиму роботи такої схеми. Принципову схему прискорювача, яка досліджувалась у цій главі, показано на мал. 2. Система рівнянь, яка описує процес прискорення, має вигляд:

$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \sum_{j=1}^4 I_j I_1 \cdot \frac{dL_{1j}}{dx} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^5 L_{ij} \cdot I_j = \psi_i \quad i = 1, \dots, 5$$

Принципова схема багатосекційного надпровідного прискорювача.
1 - котушка-індуктор; 2 - надпровідна струмонесуча котушка.



мал. 2.

де кількість нерухомих витків - 4, а індекс 5 відноситься до плазмового згустку. Аналіз руху плазмового згустку у багатосекційній системі надпровідних витків показав схожість характеристик з випадком двох взаємодіючих витків. Для аналізу руху згустку при послідовному каскадному вимкненні нерухомих котушок, програмно змодельовано процес прискорення і вимикання витків. Отримано графіки послідовного приросту швидкості у багатосекційній системі, та доведено, що приріст швидкості не є пропорційним кількості надпровідних елементів, що розмикаються. Аналіз отриманих характеристик показав, що умова оптимального бездисипаційного процесу розімкнення надпровідних нерухомих елементів (3) залежить від взаємної індуктивності нерухомого витка та плазмового згустка, який в окремих теоретичних моделях також розглядався як тонкий

гнучкий виток. Так як реальні плазмові утворення мають об'ємну форму, тому в більш строгих математичних моделях процес прискорення описувався з врахуванням реальних форм плазмодів. В таких випадках модель плазмового згустку велась шляхом усереднення лагранжиану по всім часткам плазми та формі згустку, а також розкладу лагранжиану на характерні рухи часток: поперечний, повздожний та обертовий. Отримані рівняння руху мали вигляд:

$$\begin{cases} N \cdot M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = I_e \cdot \frac{d\Phi}{dx}; \\ \frac{d}{dt} \{ I_e \cdot L_e + \Phi \} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

де еквівалентний магнітний потік

$$\Phi = \frac{\int_V \mathbf{n}(\vec{r}) \cdot \psi_e(\vec{r}) \cdot \mathbf{A}_\varphi(\vec{R} + \vec{r}) dV}{\int_S \mathbf{n}(\vec{r}) \cdot \psi(\vec{r}) ds} \quad (7)$$

В рівнянні (7) $\mathbf{A}_\varphi(\vec{R} + \vec{r})$ є векторний потенціал магнітного поля, створеного системою надпровідних витків, $\psi_e(\vec{r}) \cdot \mathbf{n}(\vec{r})$ - відповідно функції розподілу частинок по обертовим швидкостям та густині.

Чисельні розрахунки рівнянь (6,7) дали якісну адекватність результатам з моделюванням згустку як тонкого витка. Крім того, у розрахунках розглядалась еліпсоїдальна форма згустка, для якої умова бездисипаційного розімкнення виявилась більш жорсткою, ніж для випадку попереднього моделювання, що відображається

співвідношенням $\frac{\Psi_e}{\Psi_1} > \kappa \sim 1.8$

Останній розділ у цій главі присвячено аналізу основних технічних схем та вирішенню проблем конструювання запропонованого багатосекційного прискорювача. Аналізуються

питання вибору перемикаючих пристроїв, системи охолодження, конструкції надпровідних котушок. Наводяться основні схеми електроживлення та охолодження системи. Розглянуто питання вибору матеріалу надпровідної обмотки, що є досить важливим фактором.

П'яту главу присвячено розгляду електродинамічної моделі індукційного прискорювача твердих макротіл з надпровідними елементами. В розглянутій схемі індукційні струми заводяться у прискорюване тіло за допомогою розряду накопичувача енергії на котушку-індуктор, а подальше його прискорення проходить у системі надпровідних струмонесучих витків. Для моделювання та електродинамічних розрахунків такої системи використовувалось рівняння Лагранжу другого роду за умов наявності дисипаційних процесів. В більш простих випадках розглядалось прискорення рухомого тіла у полі надпровідного витка на основі слідуючих рівнянь:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dL_{12}}{dx}$$

$$\psi_1 = L_1 \cdot I_1 + L_{12} \cdot I_2 \quad (8)$$

$$L_2 \cdot \frac{dI_2}{dt} + \frac{dL_{12}}{dt} \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = 0 \quad (9)$$

На основі чисельних експериментів отримано основні динамічні характеристики запропонованої схеми прискорення: залежності для струмів у надпровідних витках, поведінку швидкості рухомого тіла в процесі прискорення і таке інше. На основі аналізу рівнянь (8) та з результатів числових експериментів отримано характеристики процесів затухання струму у прискорюваному елементі, а також характеристики прискорення для різних параметрів системи (співвідношення магнітних потоків у витках, геометричних та

енергетичних параметрів і таке інше). Аналіз результатів розрахунків систем з дисипаційними процесами виявило можливість прикорення рухомих елементів без розімкнення нерухомих котушок, а також показало якісну адекватність одержаних характеристик з випадком прискорення в більш простих моделях.

З точки зору поліпшення динамічних характеристик системи (її "швидкострільності") розглядалось питання про стійкість руху прискорюваного тіла у каналі прискорення. Технічне забезпечення вказаної стійкості може дати значне підвищення надійності таких систем та збільшить кількість пострілів у тиждень в порівнянні з рельстронними електромагнітними гарматами. Для аналізу та отримання умов стійкості використовувався метод функцій Ляпунова, основною проблемою при використанні якого є можливість запису функції Ляпунова, яка повинна задовольняти деяким визначеним умовам. Для розглянутого випадку вдалося записати функцію Ляпунова, застосовуючи функцію Гамільтона системи. Далі, застосовуючи теорему Румянцева про стійкість системи відносно частини змінних, а також використовуючи критерій Сільвестра, було отримано умови стійкості відносно змінних ρ (відхилення по вісі) та θ, φ (відхилення по кутам Єйлера):

$$\left\{ -\psi_1 \psi_2 \cdot (L_1 L_2 + L_{12}^2) + L_{12} (\psi_1^2 \cdot L_2 + \psi_2^2 \cdot L_1) \right\}_0 > 0 \quad (10)$$

Доведено, що отримані умови стійкості (11) можуть використовуватись для будь-якої геометричної форми рухомого тіла. Аналіз умови стійкості у випадку руху тонкого надпровідного витка показав наявність стійкості в усьому діапазоні руху при виконанні умови протилежно заведених початкових магнітних потоків у системі: $\psi_1 \cdot \psi_2 < 0$. При однакових знаках початкових

магнітних потоків переборкою параметрів (відношення магнітних потоків, відношення індуктивностей) забезпечується стійкість рухомого тіла на відстанях, що наближені до характерних розмірів системи (які не перевищують діаметр нерухомого витка).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні результати, що отримано у дисертаційній роботі, полягають у тому, що:

1) Проведено теоретичні та чисельно-експериментальні дослідження взаємодії двох надпровідних витків, один з яких є нерухомим, як однієї із моделей надпровідного індукційного прискорювача. Отримано залежності для швидкості руху, зміни струму у витках та виявлено особливості процесів взаємодії у вигляді екстремуму швидкості, або точки зміни знаку сили взаємодії. Висунуто припущення відносно ймовірних вживань цих особливостей (принцип розімкнення) для прискорення плазми, твердих тіл.

2) Проведено експериментальні дослідження силової та енергетичної взаємодії між трьома надпровідними котушками, що показало якісне та кількісне співпадіння експериментальних результатів з теоретичними даними.

3) Доведено, що деякі особливості взаємодії за участю надпровідних елементів можуть служити для вирішення задач підвищення ефективності функціонування індукційних імпульсних ЕРД та прискорювачів плазми.

4) Запропоновано та розглянуто схему індукційного пульсуючого ЕРД з надпровідним прискорюючим елементом, розроблено математичну модель системи та виконано

електродинамічні розрахунки, які підтверджують можливість отримання у запропонованій схемі значних розрахункових к.к.д на рівні 70 %.

5) Показано більш високу ефективність прискорення в надпровідних динамічних системах та вказано на переваги запропонованих схем в порівнянні із класичними схемами індукційного прискорення, які використовують ємкісні накопичувачі енергії.

6) Проведено аналіз електродинамічної моделі багатосекційного прискорювача та вказується на можливість оптимізації процесу вимикання надпровідних котушок системи та досягнення розрахункових к.к.д до 50 відсотків;

7) Доведено, що з використанням надпровідних елементів можливе створення індукційного прискорювача макротіл з енергетичними характеристиками, що не поступаються кращим закордонним пристроям, таким як НУРАС (Японія), але з переважаючими характеристиками по енергоємності та "швидкострільності" пристрою; оптимізація параметрів запропонованого прискорювача вказує на спроможність досягнення швидкості більш ніж 10 км/с, що є важливим фактором для багатьох видів експериментальних досліджень та практичного його використання;

8) Доведено, що в запропонованому індукційному прискорювачі макротіл за допомогою підбору відповідних параметрів системи може бути досягнуто надійну стійкість осесиметричного руху тіл у каналі прискорення, чим забезпечується його дієздатність і висока ефективність.

Основні положення дисертації відображені в роботах:

1. Дашков А.В. Динамические характеристики ускоряющей системы с идеальнопроводящими элементами. Межвуз. сб. науч. трудов "Моделирование и технология производства ЛА", Харьков, 1993. с. - 43-46.
2. Дашков А.В., Рашкован В.М. "Динамика свободных магнитных тел в МПЯ сверхпроводящих витков". - Авиационно-космическая техника и технологии. Труды ХАИ, Харьков, 1994. с.335-346.
3. Дашков А.В., Козорез В.В., Рашкован В.М., Березовский В.В., "Система магнитной стыковки космических объектов" - Авиационно-космическая техника и технологии. Труды ХАИ, Харьков, 1995, - с.204-211.
4. Дашков А.В., Березовский В.В., Общая постановка задачи об оптимальной стабилизации в системе с идеальнопроводящими элементами. Межвуз. сб. науч. трудов "Моделирование и технология производства ЛА", Харьков, 1993. с. 59-62.
5. Дашков А.В., Березовский В.В., Пигнастый О.М., Рашкован В.М. Сравнительный анализ двух методов ускорения плазмы. Межвуз. сб. науч. трудов при секции "Физика плазмы". Харьков, 1993. с. 20.
6. Dashkov A.V., Kozorez V.V., Pignasty O.M., Rashkovan V.M., Zub S.S. Magnetic system of space object's docking. The program of 40th Annual Conference Magnetism & Magnetic Materials. Philadelphia, Pennsylvania, November 6-9, 1995. p. 103.
7. Дашков А.В., Березовский В.В., Пигнастый О.М., Рашкован В.М. Устойчивость свободного токового витка в квадрупольной системе сверхпроводящих колец. // Моделирование и исследование устойчивости процессов: Тезисы докл. конф. Киев, 1992. с 16-17.
8. Дашков А.В., Березовский В.В. Математическое моделирование процессов в криогенном ускорителе плазмы. // Моделирование и

исследование устойчивости процессов: Тезисы докладов конференции. Киев, 1993.

9. Дашков А.В., Березовский В.В., Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М. Исследование физических процессов в элементах и узлах криогенных сверхпроводящих энергосиловых установок Л.А. Отчет ХАИ о НИР. НАИ 92121. Харьков, 1992. - 89 с.

10. Дашков А.В., Березовский В.В., Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М., Соловьев В.В. Исследование движения заряженных частиц в электромагнитных полях сверхпроводящих токнесущих элементов. Отчет ХАИ о НИР. НАИ 9214. Харьков, 1992. - 117 с.

11. Дашков А.В., Березовский В.В., Зуб С.Н., Ляхно В.В., Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М. Особенности движения зарядов в сверхпроводящих циклических ускорителях. Отчет ХАИ о НИР. Г-402-20/95, Харьков, 1995. - 65 с.

12. Дашков А.В., Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М. Динамика плазменных сгустков в МПЯ сверхпроводящих витков. // Моделирование и исследование устойчивости процессов. Тезисы докл. конф. Киев, 1992. с. 48-49.

13. Дашков А.В. Динамика магнитных тел в сверхпроводящих ускорительных системах. // Моделирование и исследование устойчивости систем: Тезисы докл. конф. Киев, 1995. - с. 36.

14. Дашков А.В., Рашкован В.М. Устойчивость движения токового витка в магнитном поле идеально проводящего кольца. // Моделирование и исследование устойчивости процессов: Тезисы докл. конф. Киев, 1993.

15. Дашков А.В., Березовский В.В., Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М. "Способ формирования электронно-ионных колец" Заявка на авторский патент. Приоритет от 11.10.1995.

SUMMARY

Dashkov A.V. Investigation of the superconductor electromagnetodynamics engine systems.

Dissertation on receiving of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a speciality 05.07.10 - electrical rocket engines and power device, Kharkov aviation institute. Kharkov, 1996.

The dissertation work is devoted the consideration of providing the superconductive elements with the magnetic interaction by making new schemes of the induction plasma engine and solid body's accelerators. The investigation is based on analysis the main properties of the superconductivity current elements, the analysis of the interaction properties in the dynamic superconductive system, and experimental confirmation of the theoretically get results. The specific schemes of the providing facilities were considered on the getting feature of interaction in the superconduction system: - the inductive impulsive ERE with the superconductive element of acceleration; - the inductive polysection plasma accelerator; - the inductive superconductive accelerator of macrosolids.

АННОТАЦИЯ

Дашков А.В. Исследование сверхпроводящих электромагнито динамических двигательных систем.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.10 - электроракетные двигатели и энергосиловые установки, Харьковский авиационный институт, Харьков, 1996. Диссертационная работа посвящена рассмотрению внедрения сверхпроводящих элементов с магнитным

взаимодействием для создания новых систем индукционных ЭРД, ускорителей плазмы, ускорителей твердых тел. Исследование базируется на анализе характеристик взаимодействия в динамической сверхпроводящей системе, а также экспериментальных подтверждениях полученных теоретических результатов. На основе полученных особенностей взаимодействия в сверхпроводящих системах рассмотрены конкретные схемы предлагаемых устройств: - индукционный импульсный ЭРД с сверхпроводящим ускоряющим элементом; - индукционный многосекционный ускоритель плазмы; - индукционный сверхпроводящий ускоритель макротел.

Ключові слова: індукційні прискорювачі, імпульсні плазмові прискорювачі, прискорювачі макротіл, електромагнітні гармати, електроракетні двигуни.

Дашков Андрій Васильович

Дослідження надпровідних електромагнітодинамічних рушійних систем.

відповідальний за випуск професор Белан М.В.

Підписано до друку 14.05.96.

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк.

Ум. -друк. арк. 1.0. Тираж 80 прим.

Замовлення № 28.

Харківський авіаційний інститут

310070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

Ротапринт друкарні ХАІ

310070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

AB 34928

AB 34.928