

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ



КРУЧИНІН ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 517.925.51

**ОПТИМАЛЬНЕ ФОКУСУВАННЯ ПУЧКА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК
В ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮЮЧИХ СИСТЕМАХ З ТРУБКАМИ ДРЕЙФУ
В ФОРМІ ЕЛІПТИЧНИХ ЦИЛІНДРІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки)

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль 2026

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гарашенко Федір Георгійович
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
професор кафедри моделювання складних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бомба Андрій Ярославович,
Національний університет водного господарства
та природокористування
Міністерства освіти і науки України, м. Рівне,
професор кафедри комп'ютерних наук та прикладної
математики

доктор технічних наук, професор
Чернуха Ольга Юріївна,
Інститут прикладних проблем механіки і математики
імені Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів,
провідний науковий співробітник відділу числових
методів математичної фізики

Захист відбудеться 30 вересня 2026 р. о 13:00 на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті
імені Івана Пулюя за адресою м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопіль-
ського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46025,
м. Тернопіль, вул. Руська, 56 та на офіційному сайті університету <https://tntu.edu.ua/>

Автореферат розісланий «25» серпня 2026 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Михайло ФРИЗ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток сучасних прискорювальних технологій зумовлює необхідність підвищення ефективності керування пучками заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах. Особливої ваги набуває задача забезпечення оптимального фокусування пучка, оскільки саме від нього залежать стабільність динаміки частинок, мінімізація втрат та досягнення заданих параметрів пучка. Традиційні конструкції трубок дрейфу, як правило, мають осесиметричну (циліндричну) геометрію, що обмежує можливості керування просторово-часовими параметрами пучка. У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних геометричних конфігурацій, зокрема трубок дрейфу у формі еліптичних циліндрів, які дозволяють створювати анізотропні електромагнітні поля та забезпечувати більш гнучке керування процесами фокусування.

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю розвитку методів математичного моделювання та чисельного аналізу процесів фокусування пучків заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах із неосесиметричною геометрією. Особливого значення набуває розробка математичних моделей, що дозволяють адекватно описувати динаміку пучка в електромагнітних полях, сформованих трубками дрейфу еліптичної форми, а також створення ефективних алгоритмів чисельної реалізації таких моделей.

У цій роботі алгоритми чисельного розрахунку областей стійкості та структурно-параметричної оптимізації застосовуються для дослідження рівнянь руху пучків заряджених частинок з різною формою задання прискорюючих та фокусуєчих полів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі моделювання складних систем у Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка в рамках фундаментальних досліджень України. Основні положення та результати роботи є складовою частиною закінчених НДР.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі моделювання складних систем Київського національного університету ім. Тараса Шевченка в рамках держбюджетних тем: «Розробка структурованих математичних та програмних технологій для моделювання, аналізу, оцінки та оптимізації складних систем» (б/т №01БФ015-05, номер державної реєстрації № 0101U000968), «Розвиток теорії та створення програмно-алгоритмічних засобів для моделювання, аналізу, оцінки та оптимізації складних систем в умовах невизначеності» (б/т №11БФ015-01, номер державної реєстрації № 0111U004651) та «Створення інформаційно-аналітичних технологій моделювання та оптимізації структурно заданих систем» (б/т №16БФ015-01, номер державної реєстрації № 0116U004775).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка математичних моделей, методів та алгоритмів оптимального фокусування пучка заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах з трубками дрейфу у формі еліптичних циліндрів, а також підвищення ефективності транспортування пучка за рахунок мінімізації втрат та покращення його просторово-енергетичних характеристик.

Основними завданнями дисертації є:

1. Розробити та обґрунтувати підхід до математичного моделювання заряджених частинок як складних динамічних систем із внутрішньою структурою зв'язків.
2. Розвинути підхід до математичного моделювання заряджених частинок як системи зі змінною структурою внутрішніх зв'язків та дослідити вплив еволюції структури на динаміку системи.
3. Побудувати математичні моделі руху електронів у фрактальних структурах.
4. Дослідити коливальні процеси у фрактальних середовищах із використанням методів математичного та комп'ютерного моделювання.
5. Розробити математичні та комп'ютерні моделі руху електронів у системах прискорення та фокусування.
6. Дослідити критерії практичної стійкості лінійних систем та методи оцінювання областей стійкості; математичного та комп'ютерного моделювання.
7. Розробити нетрадиційні математичні моделі технічних об'єктів, що формалізують складні фізичні явища для вирішення інженерних задач проектування прискорювальних систем.
8. Модифікувати обчислювальні методи для ефективного чисельного розв'язання побудованих моделей.
9. Розробити алгоритмічну організацію комп'ютерного моделювання процесів фокусування для автоматизації розрахунків областей стійкості.
10. Здійснити верифікацію розроблених комп'ютерних моделей та алгоритмів для формування конкретних інженерних рекомендацій щодо конструювання технічних об'єктів.

Об'єкт дослідження – процес фокусування та транспортування пучка заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах з трубками дрейфу нециліндричної (еліптичної) форми, що розглядається як процес математичного та комп'ютерного моделювання реальних технічних об'єктів.

Предмет дослідження – математичні моделі та чисельні методи аналізу процесів фокусування і динаміки пучка заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах з еліптичними трубками дрейфу.

Методи дослідження – у дисертаційній роботі використано методи математичного моделювання, теорії диференціальних рівнянь, математичної фізики, теорії стійкості за Ляпуновим, варіаційних принципів механіки та чисельного аналізу. Для моделювання динаміки заряджених частинок застосовано рівняння класичної електродинаміки та рівняння руху Лоренца. Чисельне інтегрування систем диференціальних рівнянь виконано методом Рунге–Кутти третього порядку. Для аналізу процесів фокусування та оцінювання областей стійкості використано методи комп'ютерного моделювання та чисельного експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено математичну модель фокусування пучка заряджених частинок у лінійних прискорюючих системах з трубками дрейфу у формі еліптичних циліндрів, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує анізотропію електромагнітного поля, зумовлену нециліндричною геометрією каналу, що

дозволило підвищити точність опису процесів фокусування та транспортування пучка.

2. Вперше досліджено вплив еліптичності поперечного перерізу трубок дрейфу на стійкість руху та параметри фокусування пучка заряджених частинок, що дало можливість визначити умови підвищення ефективності транспортування частинок у прискорювальному каналі.

3. Удосконалено математичні моделі чисельного аналізу динаміки заряджених частинок у прискорюючо-фокуруючих системах за рахунок застосування методів практичної стійкості та функцій Ляпунова, що забезпечило підвищення надійності чисельного моделювання нестійких траєкторій.

4. Вперше отримано математичну модель транспорту електронів у фрактальному ефекті Джозефсона, яка враховує нелінійні властивості середовища та ефекти пам'яті у фрактальних структурах.

5. Вперше побудовано математичну модель узагальненого закону Ома для фрактальних структур із використанням операторів Джексона.

Практичне значення отриманих результатів. У роботі сформульовано основні співвідношення математичних моделей прискорювачів заряджених частинок та імпульсних електромагнітних систем із внутрішньою фрактальною структурою.

Реалізація та впровадження результатів роботи. Результати дисертаційної роботи використано у ПАТ «Квантор» під час розроблення програмно-розрахункових моделей, алгоритмів чисельного аналізу та засобів комп'ютерного моделювання електрофізичних процесів у неоднорідних електромагнітних полях.

Результати роботи впроваджено у навчальному процесі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій в рамках виконання освітньо-наукової програми “Комп'ютерні науки”. Отримані результати використано для розроблення математичних моделей, алгоритмічних та програмних засобів для аналізу, оцінки та оптимізації складних інформаційних систем.

Впровадження підтверджені відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати, що складають зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: побудова математичної моделі, побудова програм для чисельного моделювання та розрахунки.

У роботі [1] особистий внесок здобувача: побудована математична модель руху електронів з фазовими обмеженнями. Отримані рівняння для динаміки пучка в лінійних резонансних прискорювально-фокусувальних системах з трубками дрейфа. Проведено комп'ютерне моделювання руху електронів в таких системах.

У роботі [2] особистий внесок здобувача: запропоновано нелінійний метод чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь разом з рівняннями для поточних індексів Ляпунова. Було проведено чисельне розв'язання системи рівнянь.

У роботі [3] особистий внесок здобувача: наведено та розглянуто чисельне моделювання параметричних пристроїв з використанням перемикачів. Проведено розрахунок параметричного генератора імпульсів на відрізках кабелів.

У роботі [4] особистий внесок здобувача: розглянуто чисельне моделювання струму та напруги в Джозефсонівському тунельному контакті з фрактальним ізолюючим шаром. Проведено розрахунки фазових портретів коливань напруги в Джозефсонівському контакті.

У роботі [5] особистий внесок здобувача: було отримано рівняння руху електронів для фрактальних структур. Було отримано закон Ома для фрактальних структур. Були проведені чисельні розв'язки для фрактального закону Ома.

У роботі [6] особистий внесок здобувача: отримано рівняння руху частинок у фрактальних середовищах. Вивчено динаміку заряджених частинок у постійному магнітному полі. Було проведено чисельне розв'язання системи рівнянь.

У роботі [7] особистий внесок здобувача: запропонована нова методологія для надпровідного датчика, який вимірює гравітаційні збурення. Було приведено прикладне програмне забезпечення.

У роботі [8] особистий внесок здобувача: було застосовано варіаційний принцип Гауса-Герца для вивчення еволюції складних систем під впливом імпульсних дій. Було проведено об'єднання результатів нелокальної теорії Власова та принципу Гауса-Герца, що дозволяє сформулювати варіаційний принцип для еволюції фрактальних систем. Було проведено чисельне розв'язання системи рівнянь.

У роботі [9] особистий внесок здобувача: дослідження алгоритмів чисельного розрахунку областей стійкості в системах прискорення та фокусування. Проведено комп'ютерне моделювання руху електронів в таких системах.

У роботі [10] особистий внесок здобувача: отримано рівняння руху частинок у фрактальних середовищах. Вивчено динаміку заряджених частинок у постійному магнітному полі. Було проведено чисельне розв'язання системи рівнянь.

У роботі [11] особистий внесок здобувача: отримано рівняння руху частинок у фрактальних середовищах, підрахована похідна Джексона. Було отримано закон Ома для фрактальних структур.

У роботі [12] особистий внесок здобувача: розглянуто генератор хаотичних коливань на основі Джозефсонівського тунельного контакту з фрактальним ізолюючим шаром. Проведено розрахунки фазових портретів коливань напруги в Джозефсонівському контакті.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, включених до дисертації, оприлюднені здобувачем на наукових конференціях, симпозіумах, нарадах, а саме: міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (Київ, Україна, 2024), Міжнародна конференція “Science: Development and factors its influence”(Амстердам, Нідерланди, 2024), Міжнародна конференція “Science and Education in Progress” (Дублін, Ірландія, 2024), НАТО-семінар “Advanced Nanomaterials for Detection of CBRN” (Одеса, Україна, 2019).

Результати також доповідались на наукових семінарах: Київський авіаційний інститут, Київський національний університет ім. Т.Г. Шевченка, Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 12 наукових працях. Результати дисертації опубліковано таким чином: статті у наукових журналах – 7; в тезах конференцій – 5.

З них: 4 статті, що індексуються науково-метричними базами Scopus та Web of Science, з яких 1 за квантилем (Scopus Q1), 1 стаття за квантилем (Scopus Q3), 2 статті за квантилем (Scopus Q4) та 3 статті у фахових наукових періодичних виданнях.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 204 сторінок, із них основного тексту 148 сторінок, 47 рисунків за текстом, список використаних джерел із 86 найменувань на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення досліджень, сформульовано мету роботи та задачі дослідження та практичне значення отриманих результатів.

У розділі 1 «Математичне моделювання систем частинок з внутрішньою структурою зв'язків і варіаційні принципи механіки» розглядаються фрактальні моделі внутрішніх зв'язків складних систем та енергія зв'язку фрактальних кластерів зі скейлінгом.

У даному розділі розглядаються математичні моделі складних систем частинок, у яких визначальну роль відіграє внутрішня структура зв'язків (контактних, пружних, хімічних або ефективних) та її ієрархічна організація. Для широкого класу реальних агрегатів, кластерів і мережевих матеріалів така структура демонструє масштабну самоподібність, що природно описується фрактальними характеристиками. З огляду на це, класичні евклідові підходи до опису енергії, кінетики та термодинаміки є неповними, а адекватне моделювання вимагає поєднання мережевих (графових), скейлінгових та варіаційних методів.

Одним з перших центрів прискорювальної техніки в Україні став Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ), заснований у 1928 р. Саме тут почали розробляти та створювати лінійні резонансні прискорювачі електронів з середини ХХ ст. і до 1991 р. А. Вальтер, Г. Латишев, О. Лейпунський, К. Сінельников — молоді вчені УФТІ, які у 1932 р. здійснили один із перших експериментів із керованого прискорення частинок.

У роботі враховано підходи до математичного моделювання та чисельного аналізу, розвинуті у працях Ф.Г. Гаращенко, А.Я. Бомби, М.Р. Петрика, О.Ю. Чернухи у галузі математичного моделювання складних систем.

Фрактали — придатний засіб для дослідження моделей складних систем. Термін фрактал відноситься до деякої статичної геометричної конфігурації, такої як миттєвий знімок водоспаду. Хаос — термін динаміки, що використовується для опису явищ, подібних до турбулентної поведінки в природі. У цьому розділі ці поняття використовуються для єдиного підходу до багатьох фізичних явищ, що відбуваються в природі та електрофізичних пристроях. Там виявляються і характерні для фракталів властивості самоподібності.

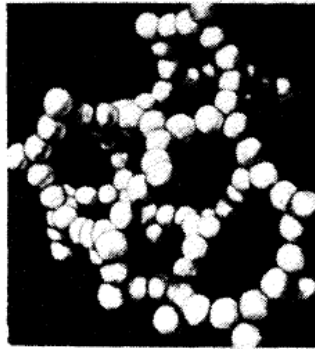


Рис.1. Типова система із фрактальними зв'язками

Однією з характерних для фрактала статичних залежностей є залежність усередненої по кутах кореляційної функції від відстані до геометричного центру. При цьому середня щільність частинок у кластері $\rho(r)$ у міру віддалення від центру всередині кластера змінюється за законом, що збігається із законом спадання просторових кореляцій: $\rho(r) = \rho_1 (l_1/r)^{3-D_f}$, де ρ_1 – густина мономерів, з яких побудована фрактальна структура. З цих загальних співвідношень фрактальної геометрії випливає просте співвідношення між масовим числом фрактального кластера A (тобто числом мономерів, з якого складається кластер), зовнішнім розміром кластера, а R_A та характерним розміром l_m мономерів: $A \propto (R_A/l_m)^{D_f}$ або $R_A = l_m A^{1/D_f}$.

З цих співвідношень випливає залежність фрактальної розмірності кластера з масовим числом A і середньою густиною від масового числа A_m та середньої щільності ρ_m безструктурних одиниць – мономерів, з яких побудований кластер:

$$D_f = 3 \frac{\ln(A/A_m)}{\ln(A/A_m) + \ln(\rho_m/\rho)}. \quad (1)$$

Фрактальна розмірність характеризує властивості масштабної інваріантності системи, які пов'язані з її параметром когерентності. Наведемо оцінку співвідношення між параметром когерентності та фрактальною розмірністю.

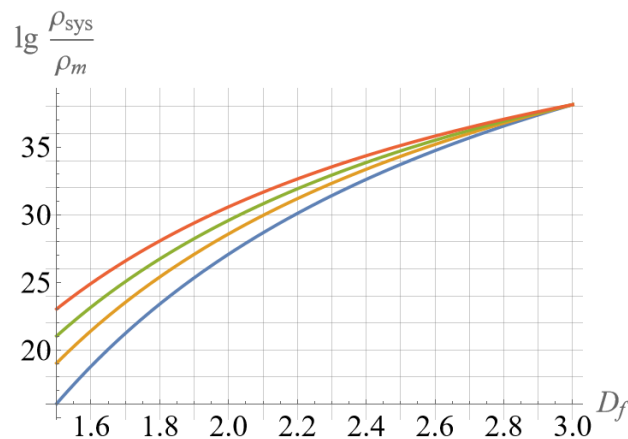


Рис. 2. Залежність логарифма відношення густини від фрактальної розмірності

Зміна фрактальної розмірності системи супроводжується зміною енергії зв'язку, дефекту мас, когерентного прискорення та масової сили, що діє на систему. Дефект маси системи характеризує її стійкість. Крім маси найважливішою характеристикою системи має бути інерція системи щодо сил. Маса системи залежить від її структури і зв'язків у ній і визначає інерцію системи, що покоїться. Інерція на відміну маси залежить від системи відліку. Найважливішою властивістю систем частинок, що визначають процеси еволюції у складних системах, є інерційність систем. У розділі розглядається еволюція в неінерційних системах відліку за їх когерентних прискорень. Когерентну частину системи в загальному випадку можна вважати фрактальним кластером. Оскільки потенційна енергія речовини, переважно, пропорційна щільності, то вона є функцією з коефіцієнтом подібності $k_{sc} = D_f - 3$: $U(r) \propto \rho(r) \propto r^{k_{sc}}$, тобто $U(\alpha r) = \alpha^{k_{sc}} U(r)$. З віріальної теореми для систем з потенційною енергією, що має подібність, співвідношення між середніми значеннями кінетичної $\overline{W_{kin}}$ та потенційної енергії $\overline{U}$ задовольняє

рівності $\frac{\overline{W_{kin}}}{\overline{U}} = \frac{k_{sc}}{2}$. Якщо врахувати, що когерентна частина має в основному потенційну енергію, а вся кінетична енергія зосереджена в нерегулярній та некогерентній складовій, то можна отримати оцінку параметра порядку $\eta \approx \overline{U} / (\overline{W_{kin}} + \overline{U}) = 1 / \left(1 + \frac{k_{sc}}{2}\right)$. Звідси: $\eta \approx (3 - D_f) / (D_f - 1)$, $0 \leq \eta \leq 1$, а енергія зв'язку фрактальних кластерів може бути представлена у вигляді: $B_{drop} = B_v + B_{surf} + B_q + B_{kin} + B_{el}$,

$$\text{де } B_v \approx g_0 A + a_0 (\rho / \rho_0)^{2/3}, \quad B_{surf} = -\sigma S_{drop}, \quad S_{drop} = 4\pi R_A^2 (A / A_m)^{\gamma-2/3}, \quad \gamma = 2 / D_f,$$

$$B_q = -\frac{3}{5} \frac{e^2 Z(Z-1)}{R_A}, \quad B_{kin} = -\rho_0 A^{\frac{3-D_f}{D_f}} T, \quad B_{el} = -\frac{3}{4} a_e \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{4/3} \left(\frac{Z}{A}\right)^{4/3}.$$

У розділі розглянуто термодинаміку та кінетику когерентно корельованих станів складних ієрархічних систем частинок. У неінерційній системі відліку з когерентним прискоренням, ініційованим початковими масовими силами, виникають турбулентні потоки флуктуацій вакууму та потоки ентропії $\vec{j}_S$ від самоузгоджених полів у системах частинок. Відповідно до варіаційного принципу еволюції, у відповідь на когерентне прискорення та відповідні ентропійні потоки, зв'язки в системі (і, отже, відповідні об'єкти зв'язності простору – часу, в якому розвивається система) починають варіюватися так, щоб система частинок була максимально вільна в гармонії з анізотропією простору, що виникла в результаті прискорення. При цьому внесок варіації зв'язків і геометрії простору відображається в тому, що це рівняння (за формою, що збігається з рівнянням для вільних частинок) має бути записано в геометрії Картана:

$$\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{u}, t)}{\partial t} + \text{div}_{\vec{r}}(\vec{u} f(\vec{r}, \vec{u}, t)) + \text{div}_{\vec{u}}(\langle \dot{\vec{u}} \rangle f(\vec{r}, \vec{u}, t)) = -\text{div}_{\vec{u}}(\vec{j}_S), \quad (2)$$

$$\vec{j}_S = \left(\frac{1}{\alpha_S} \bar{\sigma}_s \vec{u} \right) f(\vec{r}, \vec{u}, t), \langle \dot{\vec{u}} \rangle = \frac{1}{m} \vec{F}_B. \quad (3)$$

Найпростіші рішення, що відповідають найбільш симетричним рухам, можна отримати прямо з наведеного вище рівняння безперервності, якщо уявити його у просторі Картана: $u^\alpha \frac{\partial f}{\partial x^\alpha} - \Gamma_{\alpha\gamma}^\sigma u^\alpha u^\gamma \frac{\partial f}{\partial u^\sigma} = 0$.

У важливому окремому випадку, коли явний внесок дивергенції $div_{\vec{u}}(\cdot)$ в кінетичні рівняння можна не враховувати, то рівняння квазістаціонарних станів набуває вигляду: $u^\alpha \frac{\partial f}{\partial x^\alpha} - \Gamma_{\alpha\gamma}^\sigma u^\alpha u^\gamma \frac{\partial f}{\partial u^\sigma} = 0$.

Це наближення справедливе у двох випадках:

- коли повністю відсутні зовнішні сили в системі та потік у фазовому просторі $P_S = 0$ (Цей випадок відповідає повній рівновазі в системі);
- коли зовнішні сили прямо не діють у системі, але потік енергії, частинок або ентропії постійний у фазовому просторі $P_S = const$ (Цей випадок відповідає сильному відхиленню від рівноваги)

$$u^\alpha \frac{\partial f}{\partial x^\alpha} - \Gamma_{\alpha\gamma}^\sigma u^\alpha u^\gamma \frac{\partial f}{\partial u^\sigma} + \frac{\partial}{\partial u^\alpha} \left(\left\langle \frac{D\vec{u}}{d\tau} \right\rangle^\alpha f + P_s \right) = 0. \quad (4)$$

Варіаційний принцип еволюції динамічної системи формулюється, як узагальнення принципу Гауса–Герца, а функціонал варіаційного принципу еволюції є узагальненням функції примусу Гауса, залежить тільки від прискорення щодо одного дотичного шару. Для розуміння сенсу узагальнення розглянемо докладніше вихідний принцип Гауса – найменшого примусу для систем зі зв'язками, який стверджує, що дійсний рух відрізняється від інших можливих рухів системи. Тобто положення, які займуть точки системи в момент $t + \Delta t$ у дійсному русі, виділяються між усіма положеннями, що допускаються зв'язками, тим, що для них міра примусу: $Z_G = \sum_{i=1}^N m_i s_i^2$, має мінімальне значення (тут s_i – довжина вектора

між точками, що представляють справжнє та будь-яке можливе положення точки). Важливо, що при варіюванні Гауса (через фіксовані швидкості) варіації прискорень $\delta \vec{a}_i^*$ та $\delta \vec{\mathcal{G}}^*(t)$ визначаються рівняннями такого ж виду, що і для віртуальних переміщень $\delta \vec{r}_i$ та $\delta \varphi(t)$ відповідно. Скориставшись виразами для усунення та поворотів як окремих частинок, так і всієї системи за малий інтервал часу Δt можна отримати вираз для повної функції, оптимізація якої дає динаміку частинок і еволюцію параметрів структури системи. Цю функцію можна назвати функцією динамічної гармонізації Z_{dh} та подати у вигляді суми двох вкладів

$$Z_{dh} \left(\left\{ \vec{a}_i^* \right\}_{i=1}^N, a_z, a_\perp, \mathcal{G}_z \right) = Z_{GaussN} \left(\left\{ \vec{a}_i^* \right\}_{i=1}^N \right) + Z_{cog} (a_z, a_\perp, \mathcal{G}_z), \quad (5)$$

де:

$$Z_{GaussN} \left(\left\{ \vec{a}_i^* \right\}_{i=1}^N \right) = \sum_{i=1}^N m_i s_i^2 = \sum_{i=1}^N m_i \left(\frac{(\Delta t)^2}{2} \left(m_i \vec{a}_i^* - \vec{F}_i \right) \right)^2 = \sum_{i=1}^N K_i \left(m_i \vec{a}_i^* - \vec{F}_i \right)^2, \quad (6)$$

$$K_i = m_i \frac{(\Delta t)^4}{4} \quad (7)$$

дає динаміку всіх частинок ансамблю без урахування когерентності, а

$$Z_{cog} (a_z, a_{\perp}, \mathcal{G}_z) = K_z \left(m_z a_z^* - F_{mz} \right)^2 + K_{\perp} \left(m_{\perp} a_{\perp}^* - F_{m\perp} \right)^2 + K_{\omega} \left(I_z \mathcal{G}_z^* - M_{mz} \right)^2, \quad (8)$$

$$K_z = m_z \frac{(\Delta t)^4}{4}, K_{\omega} = l_{\perp 0}^2 m_{eff} \frac{(\Delta t)^4}{4} \quad (9)$$

когерентна динаміка системи як цілого.

У розділі 2 «Математичне моделювання еволюції, варіації структури зв'язків систем частинок та їх варіаційні принципи» розглянуто моделі варіацій зв'язків у системі частинок та модифікація варіаційного принципу для систем із змінними зв'язками.

Метою цього розділу є побудова математичних моделей для систем частинок зі змінною структурою зв'язків, формулювання узагальнених варіаційних принципів для таких систем і виведення рівнянь еволюції, придатних для подальшої чисельної реалізації.

Розглянемо систему з N частинок, яка однорідна в одному із просторових напрямків з характерним розміром l_a у цьому напрямку. Такою системою може бути кластер частинок з максимальним зовнішнім радіусом R_N . Внутрішню структуру системи в координатному просторі характеризуватимемо фрактальною розмірністю D_f (або іншими дробовими розмірностями, що характеризують кореляції та зв'язки в системі) з енергією зв'язку $B = B(N, D_f)$. Тоді зв'язки в координатному просторі системи задаються функціями: $R_N = \psi_1(N, D_f, l_a)$, $l_a = \psi_2(N, D_f, R_N)$.

Структура системи відбивається у її енергетичних характеристиках та у інформації, «записаної» у її зв'язках і найважливішою є залежність дефекту маси

$\delta m = \frac{B(S)}{c^2}$ та енергії зв'язку B від ентропії $S(t)$ або інформації, записаної у

структурі системи: $M_{sys}(S(t)) = M_0 - \delta m(S(t))$. При цьому дефект маси та параметр

системи $\eta \approx \frac{\delta m}{M_0}$ виявляються пов'язані між собою: $\eta \approx \frac{\delta m}{M_0} = \frac{B(S)}{M_0 c^2}$. Дія масової сили,

природно, викликає прискорення системи як цілого, і рівняння Ньютона ($\vec{u}$ –

швидкість всієї системи, як цілого) має вигляд: $\frac{d}{dt}(M_{sys}(S(t))\vec{u}) = \vec{F}_m$ та виникає когерентне прискорення усієї системи $\vec{a}_m = \frac{d}{dt}(\vec{u})$. Рівняння динаміки вводячи виробництво ентропії у системі $\sigma_s = \frac{dS}{dt}$, має вигляд: $\frac{1}{M_0} \frac{dM_{sys}(S)}{dt} = -\frac{1}{m_s}(-\sigma_s)$, $m_s = M_0 c^2 \left(-\frac{dS}{dB} \right)$, в якому m_s – структурна інерційність системи. Самоузгоджену силу $\vec{F}_s$ та самоузгоджене прискорення $\vec{a}_s$ можна висловити через виробництво ентропії та структурну інерційність $\vec{F}_s = M_{sys} \vec{a}_s$, $\vec{a}_s = \frac{1}{m_s}(-\sigma_s)\vec{u}$. Подання сили $\vec{F}_s$, що має характер «в'язкості», через ентропію дозволяє назвати її ентропійною. Між повним масовим, когерентним прискоренням $\vec{a}_m$ та виробництвом ентропії $(-\sigma_s)$ існує прямий зв'язок: $\vec{a}_m = \vec{a}_0 + \frac{1}{m_s}(-\sigma_s)\vec{u}$, $\vec{a}_0 = \frac{\vec{F}}{m}$. При збігу напрямів прискорень за рахунок масової сили і ентропійного прискорення, що ініціює процес, виникає позитивний зворотний зв'язок і вибуховий процес синтезу структур.

Динаміку поступального руху всієї системи як цілого вздовж напрямку когерентності – осі z можна природно врахувати у варіаційному принципі, якщо уявити функцію примусу у вигляді, що враховує ефективну наведену масу системи зі зв'язками M_{eff} , когерентне прискорення системи w_{cogz} вздовж напрямку когерентності та ентропійну самоузгоджену силу:

$$Z_{Gz} = \frac{(\Delta t)^4}{4} M_{eff} (M_{eff} w_{cogz} - F_{sz})^2, \quad \frac{1}{M_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{m_{0i} - \delta m_i}. \quad (10)$$

Прояв когерентності при ініціюванні обертання системи навколо виділеної осі описується відповідними кутами повороту $\varphi_i(t)$, кутовими швидкостями $\omega_i = \frac{d\varphi_i}{dt}$ та прискореннями $\frac{d\omega}{dt}$. Використовуючи виробництво ентропії:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I_z} \frac{\delta I_z}{dt} \omega = \left(-\frac{1}{I_z} \frac{d(\delta I_z)}{dS_q} \right) \left(-\frac{dS_q}{dt} \right) \omega \approx \frac{1}{\alpha_{s\omega}} (-\sigma_s) \omega, \quad (11)$$

$$\alpha_{s\omega} = I_z \left(-\frac{dS}{d(\delta I_z)} \right), K_{sz} = I_z \frac{1}{\alpha_{s\omega}} (-\sigma_s) \omega \quad (12)$$

Для застосування моделей та варіаційних механічних принципів для електрофізичних систем необхідно провести ретельну аналогію між механічними, дина-

мічними, еволюційними параметрами та відповідними фізичними величинами електрофізичних систем.

У розділі 3 «Моделювання динаміки та еволюції систем заряджених частинок у прискорювальних системах з фіксованими і віртуальними електродами» наведено аналогію електрофізичних та механічних систем на основі модифікованого варіаційного принципу. Отримано та проаналізовано рівняння для електрофізичних систем з внутрішньою фрактальною структурою.

У цьому розділі розглянуто математичні моделі, що описують рух, колективну взаємодію та еволюцію систем заряджених частинок (електронних й іонних пучків, плазмових згустків) у прискорювальних та електрофізичних пристроях, де електродна структура може бути як геометрично заданою (фіксовані електроди), так і такою, що формується самою динамікою.

У цьому розділі вивчено коливання струму в контурі з Джозефсонівським контактом типу (Рис. 3), де, як зазвичай, позначають надпровідний матеріал, а тонкий фрактальний шар – резистивний. Нелінійність і властивості пам'яті у фрактальному контакті, дозволяють використовувати такий контакт, як ефективний генератор хаотичних сигналів, що легко перебудовується, з контрольованою статистичною структурою.

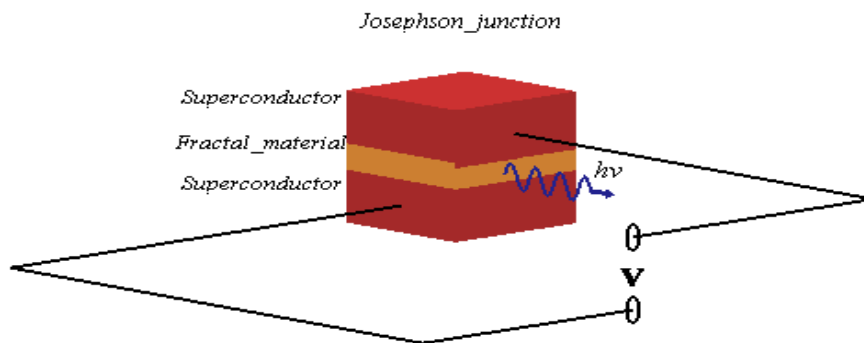


Рис. 3. Схема контакту

Нехай ізолюючий шар у тунельному контакті складається з суміші двох компонентів – провідної та діелектричної. Якщо провідність металевої компоненти σ_m , а діелектричної σ_D , то ефективна провідність σ_e двокомпонентного нескінченного середовища на порозі протікання залежить тільки від $\xi = \frac{\sigma_D}{\sigma_m}$ і описується

законом $\sigma_e = \sigma_m \xi^u$, де u – критичний індекс. Підкреслимо, що нелінійна провідність ізолюючого фрактального шару зростає при прагненні $\xi \rightarrow 0$, а ефективне поле нелінійності падає, тобто, на порозі протікання фрактальний шар стає аномально нелінійним. Ця властивість нелінійної провідності фрактального матеріалу дозволяє створювати додаткову нелінійність в контакті двох надпровідників і керувати властивостями цього контакту. Як відомо, система, що складається з двох надпровідників, що слабо взаємодіють, до яких прикладена різниця потенціалів $U(t)$, феноменологічно описується різницею фаз хвильових функцій у надпровідниках відповідно

до співвідношення $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} U(t)$ та існуванням у повному струмі системи I осцилюючої надпровідної частини струму I_s в міру сили зв'язку між надпровідниками: $I_s = I_c \sin(\varphi(t))$.

Нелінійність провідності фрактального шару ізолятора призводить до рівняння:

$$\frac{\hbar C}{2e} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\hbar}{2e R_0} (\xi^{1/2} + \alpha_D \xi^{-3/2} \alpha_e U(t)^2) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + I_c \sin(\varphi(t)) = I(t). \quad (13)$$

Режими коливань струму та напруги в Джозефсонівському контакті суттєво залежать від співвідношення провідностей компонент композитного матеріалу ξ . Це впливає з порівняння фазових портретів коливань напруги в Джозефсонівському контакті для близьких значень параметра ξ , зображених на Рис. 6.

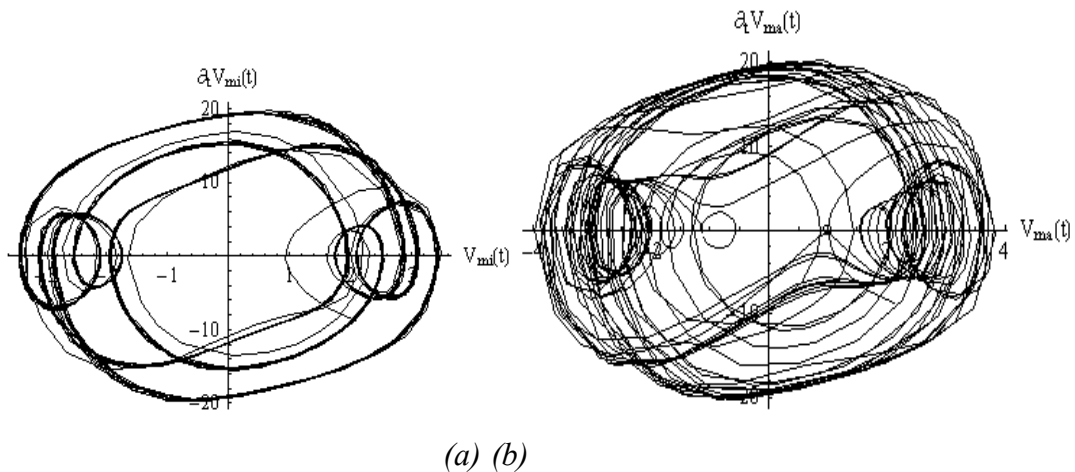


Рис. 4 Фазові траєкторії коливань фрактального Джозефсонівського контакту при $\xi = 0.1$ (a) та при $\xi = 0.09$ (b). Розмірність напруги в мілівольти, координати Y : мілівольти / сек

Таким чином, Джозефсонівський контакт з фрактальним шаром має нелінійні властивості, що дозволяють ефективно керувати режимом коливання за допомогою повільної зміни співвідношення провідностей компонентів композитного матеріалу. Це пов'язано безпосередньо з тим, що фрактальне середовище має пам'ять.

Найуживанішими узагальненнями є дробові інтегро-диференціальні оператори та кінцеві апроксимації диференціальних операторів $D_h f(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$.

Зазвичай оператори похідної визначаються з урахуванням операторів нескінченно малого зсуву $Df(x) = \lim_{h \rightarrow 0} D_h f(x)$. Фрактальні середовища характеризуються властивостями подібності о зміні просторових масштабів, тому найбільш природним узагальненням поняття похідної є похідна Джексона, у якій визначення швидкості процесу замість операторів зсуву використовується операція масштабування (з

коефіцієнтом подоби q): $D_q f(x) = \frac{f(qx) - f(x)}{qx - x}$. У граничному випадку похідна Джексона перетворюється на звичайну похідну $Df(x) = \lim_{q \rightarrow 1} D_q f(x)$. Суттєвою особливістю фрактального резистора є його незворотність та існування пам'яті.

Розглянемо найпростіший ланцюг, що є генератором струму, що створює імпульс струму $i_g(t)$, який протікає через фрактальне навантаження та утворює падіння напруги на ній $u(t)$. Рівняння Кірхгофа для такого ланцюга можна записати у вигляді $i_g(t) = i_d(t) + (I^{1-\nu} u)(t)$. Застосовуючи оператор дробової похідної до струму, легко отримати рівняння для нього: $D^{1-\nu} i_d + u(t) = R(t)$, $R(t) = D^{1-\nu} i_g(t)$.

Скориставшись $i_d = \frac{dq}{dt}$, для заряду отримуємо дробове узагальнення рівняння нелінійного осцилятора з правою частиною $\frac{d^{2-\nu} q}{dt^{2-\nu}} + u(t) = R(t)$.

Введемо регуляризований заряд $\tilde{q}$: $D^{-\nu} q = \tilde{q}$. При цьому нерегуляризований заряд пов'язаний із зарядом, що спостерігається, за допомогою співвідношення: $q = D^{\nu} \tilde{q}$. Розглянемо шар нерівноважного провідного середовища з втратами товщиною, до якого прикладена різниця потенціалів U . І тут можна записати рівняння руху електронів як $m \frac{dv}{dt} + \frac{1}{\tau} v = e \frac{U}{L}$, де τ – середній час між зіткненнями. Якщо середовище або має пам'ять, або має складну (фрактальну) структуру, при якій сила діє не у всіх точках простору, то втрати в середовищі можна описати дробовою похідною та замінити оператор $\frac{d}{dt} + \frac{1}{\tau}$ на оператор D^{ν} . Тоді отримуємо

наступне рівняння $D^{\nu} v = \frac{e}{m} \frac{U}{L}$. Подіавши на його ліву та праву частини оператором $\hat{I}^{\nu}$ отримуємо $v = \hat{I}^{\nu} \left(\frac{e}{m} \frac{U}{L} \right) + F(t)$. Звідки й приходимо до співвідношення між повним струмом I через площу перерізу S та різницею потенціалів U . На відміну від звичайного лінійного співвідношення між цими величинами, що представляє нормальний закон Ома, ми отримуємо $I = \frac{n_e e^2 S}{mL} \hat{I}^{\nu}(U)$.

У розділі 4 «Комп'ютерне моделювання прискорення і фокусування в прискорювальних системах з фіксованими і віртуальними електродами і трубками дрейфа» розглянуті задачі розв'язування нестійких траєкторій частинок у прискорювачі, використання методів практичної стійкості на основі другого методу Ляпунова, функції Ляпунова та нелінійних чисельних алгоритмів дозволяє стійко проводити надійний чисельний аналіз траєкторій заряджених частинок у прискорювачі. У цьому розділі подано методологію та практичні алгоритми

комп'ютерного моделювання процесів прискорення, фазового захоплення та фокусування заряджених частинок у прискорювальних структурах з фіксованими електродами.

Розділ присвячений розробці чисельних алгоритмів для оцінки областей практичної стійкості при еліпсоїдальних фазових обмеженнях. Таку область практичної стійкості в системах прискорення та фокусування називають областю захвата частинок у режимі прискорення.

Розглянемо математичну модель, яка відповідає реальним процесам в різних прискорюючо-фокуруючих системах, в такій формі $\frac{dx}{dt} = f(x, t)$, $\frac{dy}{dt} = A(x, t)y$ на відріжку $[t_0, T]$. Тут підсистема (1) є нелінійною, в якій x - n -вимірний вектор, $f(x, t)$ – вектор-функція розмірності n , друга підсистема (2) є лінійною за y , y – вектор розмірності m , $A(x, t)$ – квадратна матриця відповідної розмірності $m \times m$.

Динаміку пучка в лінійних резонансних прискорюючо-фокуруючих системах з трубками дрейфа можна записати як

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = \alpha(\xi)\cos\phi, \quad \frac{d\phi}{d\xi} = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (14)$$

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} = \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \left\{ \left[-\frac{1}{2} \frac{d\alpha}{d\xi} + g(\xi) \right] x - \alpha(\xi) \frac{dx}{d\xi} \right\} \cos\phi, \quad (15)$$

$$\frac{d^2y}{d\xi^2} = \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \left\{ \left[-\frac{1}{2} \frac{d\alpha}{d\xi} - g(\xi) \right] y + \alpha(\xi) \frac{dy}{d\xi} \right\} \cos\phi, \quad \xi \in [0, T]. \quad (16)$$

Тут γ та ϕ – приведена енергія та фаза частинки, x, y – радіальні координати, $\xi = \frac{z}{\lambda}$ – безрозмірна повздовжня координата, λ – довжина хвилі височастотного поля, $\alpha(\xi)$ – неперервно диференційовна функція, яка відповідає амплітуді напруженості поля на осі, $g(\xi)$ – функція керування, яка визначається несиметрією поля в прискорюючих зазорах шляхом використання електродів в формі еліптичних циліндрів (Рис. 9).

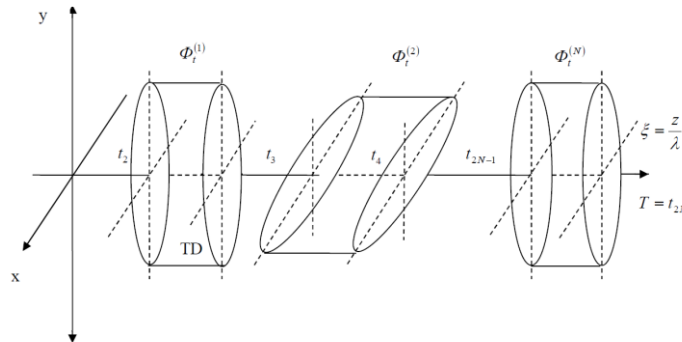


Рис. 5. ТД – трубка дрейфа, ПЗ – прискорюючий зазор

В якості еліпсоїдальних фазових обмежень можна взяти наступні $\Phi_i^{(i)} = \{y \in R^4 : c_i(t)y_1^2 + d_i(t)y_3^2 \leq 1\}, t \in [t_{2i-1}, t_{2i}], i = 1, 2, \dots, N$. При визначенні оптималь-

ної геометрії електродів додатні функції $c_i(t)$ та $d_i(t)$ можна вибрати оптимальним чином. Система звичайних диференціальних рівнянь запишемо в формі з матрицею

$$A(\gamma, \phi, \xi) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \left(-\frac{1}{2} \frac{d\alpha}{d\xi} + g(\alpha) \right) \cos \phi & -\frac{\alpha(\xi)\gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1} \left(-\frac{1}{2} \frac{d\alpha}{d\xi} - g(\xi) \right) \cos \phi & -\frac{\alpha(\xi)\gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \phi \end{pmatrix}. \quad (17)$$

На першому етапі функції $c_i(t)$ та $d_i(t)$ можна взяти сталими, а довжини півосей сусідніх еліпсоїдів можна взяти рівними.

Для чисельного аналізу оберемо модельні функції, що зображені на Рис. 6 та Рис. 7.

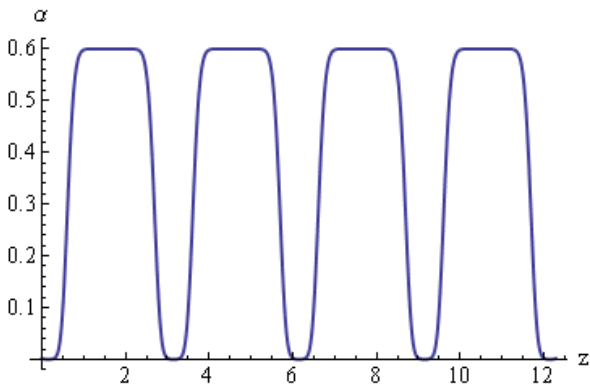


Рис. 6. Профіль прискорюючого поля $\alpha(z)$ вздовж осі прискорювача. Тут вісь Y у МВ/м, z у м.

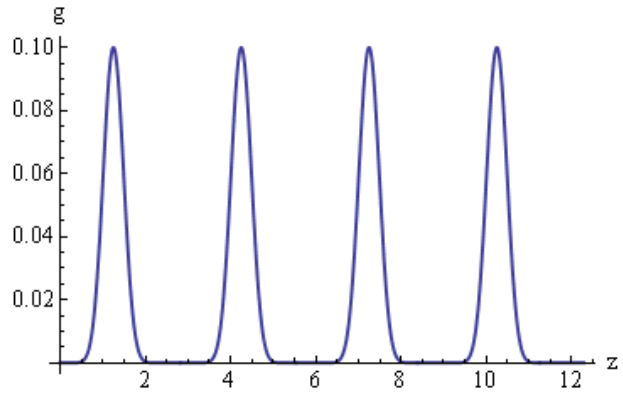


Рис. 7. Профіль функції фокусування $g(z)$, що визначає анізотропію поля. Тут вісь Y у МВ/м, z у м.

Отримана в результаті розрахунку, зміна енергії частинки в прискорювачі залежна від поздовжньої координати зображена на Рис. 8 та Рис. 9.

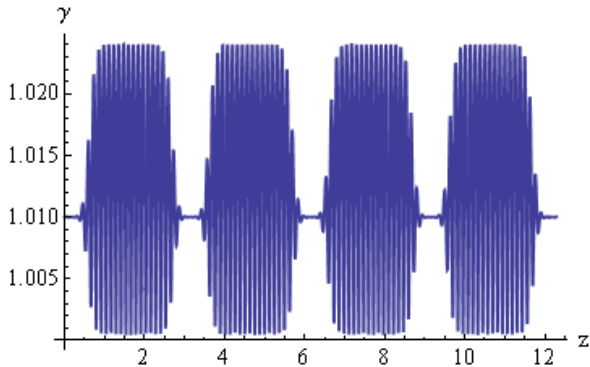


Рис. 8. Зміна енергії зарядженої частинки вздовж каналу прискорювача. Енергія γ наведена у MeV, координата z — у м.

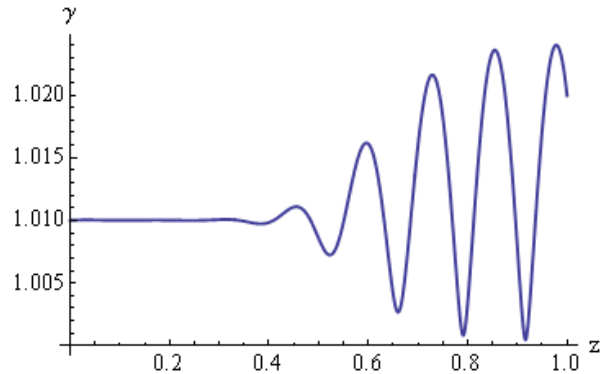


Рис. 9. Початкова ділянка процесу прискорення частинки: залежність енергії $\gamma(z)$ (MeV) від поздовжньої координати z (м).

Залежності поперечних координат частинок від поздовжньої координати в прискорювачі зображені на Рис. 10 та Рис. 11.

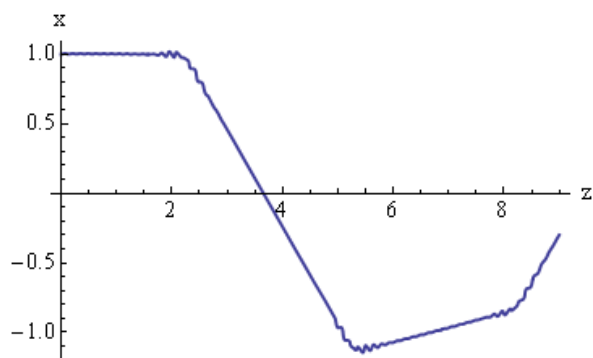


Рис. 10. Траєкторія частинки у поперечному напрямку x залежно від поздовжньої координати z . Тут x вимірюється в м, z – в м.

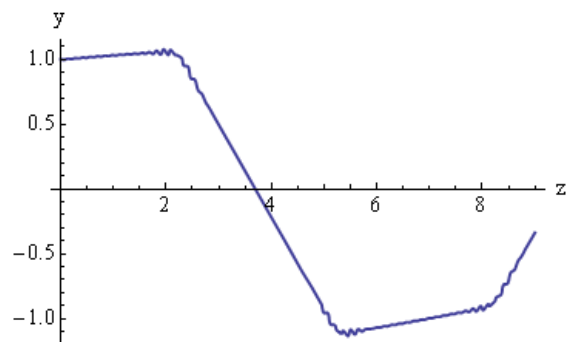


Рис. 11. Залежність поперечної координати y від поздовжньої координати. Тут y вимірюється в м, z – в м.

Видно, що, незважаючи на нестійкість завдання визначення траєкторій частинок у прискорювачі, використання методів практичної стійкості на основі другого методу Ляпунова, функції Ляпунова та нелінійних чисельних алгоритмів дозволяє стійко проводити надійний чисельний аналіз заряджених траєкторій частинок у прискорювачі

Ефективність цих алгоритмів на вирішення рівнянь, що містять нестійкості, пов'язана, передусім, з тим, що вони практично реалізують самоузгоджений метод усереднення динаміки частинок у прискорювачі, а усереднення призводить до самоузгодженого «дисипативного» характеру руху частинок, ступінь «дисипації» якого пов'язується з показником.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання - побудова математичних моделей в системах прискорення і фокусування та моделювання руху електронів у фрактальних структурах. Основні наукові й практичні результати полягають в наступному:

1. Розроблено та обґрунтовано підхід до математичного моделювання заряджених частинок як складних динамічних систем із внутрішньою структурою зв'язків, що дозволяє враховувати колективні ефекти та вплив структури середовища на динаміку частинок

2. Запропоновано узагальнену модель, що враховує колективні ефекти, взаємодію між частинками та вплив зовнішніх електромагнітних полів у лінійних прискорюючих системах.

3. Сформульовано варіаційні принципи опису еволюції механічних та електрофізичних систем, які забезпечують узгоджений опис динаміки систем із фрактальною структурою зв'язків

4. Розвинуто підхід до математичного моделювання заряджених частинок як складної динамічної системи з внутрішньою структурою зв'язків, що змінюється в процесі еволюції. Запропонована постановка задачі дозволяє враховувати як індивідуальну динаміку частинок, так і колективні ефекти, зумовлені їх взаємодією.

5. На основі варіаційних принципів механіки побудовано функціонал дії для системи з варійованою структурою зв'язків та отримано відповідні рівняння руху.

6. Розроблено математичну модель транспорту електронів у фрактальному ефекті Джозефсона, яка враховує нелінійні властивості фрактального середовища та дозволяє досліджувати режими переносу заряду в неоднорідних структурах.

7. Застосовано математичну модель квантових процесів для дослідження транспорту у фрактальних структурах.

8. Побудовано математичну модель узагальненого закону Ома для фрактальних структур із використанням операторів Джексона, що дозволило описати процеси електропереносу у середовищах із властивостями пам'яті та масштабної інваріантності.

9. Розроблено та реалізовано комплекс комп'ютерних моделей для дослідження процесів прискорення та фокусування пучків заряджених частинок у лінійних прискорювальних системах із трубками дрейфу, зокрема еліптичної форми. Запропонований підхід забезпечує узгоджене врахування геометричних, електродинамічних і колективних ефектів.

10. Розроблено алгоритми чисельного розрахунку областей стійкості та дослідження рівнянь руху пучків заряджених частинок, які забезпечують ефективний аналіз процесів прискорення та фокусування у системах з різними типами електромагнітних полів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Гаращенко Ф.Г., Кручинін Д.С. Оцінки областей практичної стійкості з еліпсоїдальними фазовими обмеженнями і їх використання // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2011. – Сер.фіз.-мат. – Вип. 3. – С. 123-130.
2. Гаращенко Ф.Г., Кручинін Д.С. Про чисельні дослідження динаміки пучка в електрофізичних установках // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – Сер. фіз.-мат. – Вип. 3. – С. 81-87.
3. Гаращенко Ф.Г., Кручинін Д.С., Новіков В.Е. До чисельного моделювання параметричних електрофізичних пристроїв // Вісник Національного університету водного господарства та інженерії природокористування. – 2024. – Вип. 4. – С. 71–83.

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

4. Kruchinin S.P., Klepikov V.F., Novikov V.E., Kruchinin D.S. Nonlinear current oscillations in the fractal Josephson junction // Materials Science. – 2005. – Vol. 23, No 4. – P. 1009-1013. (Scopus Q4)
5. Garaschenko F., Kruchinin D., Novikov V. Quantum analysis of oscillatory processes in fractal media // Int.J. Mod.Phys. B. – 2008. – Vol. 22. – P.3923-3929. (Scopus Q3)

6. Klepikov V., Kruchinin D., Novikov V. Dynamics of charged particles in fractal media // Modern Physics Letters B. – 2020. – Vol. 34, No. 19-20. – P. 2040066. [https://doi: 10.1142/S0217984920400667](https://doi.org/10.1142/S0217984920400667) (Scopus Q4)
7. Kruchinin S.P., Eglitis R.I., Kruchinin D.S., Krak I.V., Babak V.P., Novikov V.E., Polishchuk A.P. Modeling of mechanical and electrical systems with fractal structure under impulse action and coherent acceleration // Symmetry. – 2024. – Vol. 16, No. 12. – P. 1700. <https://doi.org/10.3390/sym16121700> (Scopus Q1)

Тези доповідей на конференціях

8. Кручинін Д.С. Моделювання руху частинок в електрофізичних установах. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТКК-2024) / Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція. 21-22 травня 2024 р. Київ, Україна. Збірка тез. – С. 378-379.
9. Кручинін Д.С. Моделювання руху електронів в фрактальних структурах. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024) / Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція. 21-22 травня 2024 р. Київ, Україна. Збіркатез. – С. 380-381.
10. Kruchinin D. Quantum analysis of oscillatory processes in fractal media / Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Science: Development and Factors its Influence» (August 6-8, 2024). Amsterdam, Netherlands, No 211. – Pp. 36-40.
11. Kruchinin D., Krak Yu. Fractal Josephson junction / Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Science and Education in Progress». (August 16-18, 2024). Dublin, Ireland. –Pp. 35-40.
12. Yatsenko V., Kruchinin D., Vlahovic B., Morozova I., Kruchinin S. Superconducting gravimeters based on advanced nanomaterials and quantum neural network / Advanced Nanomaterials for Detection of CBRN, NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology / J. Bonca, S. Kruchinin (eds.). 2020. – Springer Nature B.V.– P. 227-234. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2030-2_15.

АНОТАЦІЯ

Кручинін Д.С. Оптимальне фокусування пучка заряджених частинок в лінійних прискорюючих системах з трубками дрейфа в формі еліптичних циліндрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (з технічних наук). – Київський національний університет ім. Тараса Шевченка. Кафедра моделювання складних систем факультету комп'ютерних наук та кібернетики, 2026.

Тема дисертаційної роботи Кручиніна Д.С. присвячена побудові математичних моделей в системах прискорення і фокусування та моделювання руху електронів у фрактальних структурах. Метою даної дисертації є моделювання руху частинок в електрофізичних установах. Тематика дисертаційної роботи є актуальною та належить до практично важливих. Дисертація характеризується науковою новизною та практичною цінністю і має важливе значення для розвитку методів математичного

моделювання руху електронів в електрофізичних установках. Обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення досліджень, сформульовано мету роботи, задачі дослідження та практичне значення отриманих результатів. Розглядаються фрактальні моделі внутрішніх зв'язків складних систем та енергія зв'язку фрактальних кластерів зі скейлінгом. Розроблені математичні моделі складних систем частинок, у яких визначальну роль відіграє внутрішня структура зв'язків (контактних, пружних, хімічних або ефективних) та її ієрархічна організація. Побудована математична модель для систем частинок зі змінною структурою зв'язків, формулювання узагальнених варіаційних принципів для таких систем і виведення рівнянь еволюції, придатних для подальшої чисельної реалізації.

Отримано та проаналізовано математичні моделі для електрофізичних систем з внутрішньою фрактальною структурою. Проаналізовано математичну модель системи з Джозефсонівським контактом між фрактальними середовищами. Вперше отримані рівняння для транспорту електронів у фрактальному ефекті Джозефсона. Проведено регуляризацію рівнянь динаміки заряджених частинок у фрактальному середовищі за допомогою операторів Джексона та розроблена математична модель узагальнення закону Ома. Вивчена математична модель, яка описує динаміку заряджених частинок у постійному магнітному полі. Розглянуті задачі розв'язування нестійких траєкторій частинок у прискорювачі, використання методів практичної стійкості на основі другого методу Ляпунова, функції Ляпунова та нелінійних чисельних алгоритмів дозволяє стійко проводити надійний чисельний аналіз траєкторій заряджених частинок у прискорювачі. В даній роботі алгоритми чисельного розрахунку областей стійкості та структурно-параметричної оптимізації застосовуються для дослідження рівнянь руху пучків заряджених частинок з різною формою задання прискорюючих та фокусуючих полів. Подано методологію та практичні алгоритми комп'ютерного моделювання процесів прискорення, фазового захоплення та фокусування заряджених частинок у прискорювальних структурах з фіксованими електродами.

Ключові слова: математичне моделювання, лінійний прискорювач, фрактальна структура, квантові процеси, диференціальне рівняння, чисельний метод.

ABSTRACT

Kruchynin D.S. Optimal focusing of a beam of charged particles in linear accelerating systems with drift tubes in the form of elliptical cylinders. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 – “Mathematical modeling and computational methods” (in technical sciences). – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Department of Complex Systems Modeling, Faculty of Computer Sciences and Cybernetics, 2026.

The topic of the dissertation work of Kruchynin D.S. is devoted to the construction of mathematical models in acceleration and focusing systems and modeling of electron motion in fractal structures. The purpose of this dissertation is modeling of particle motion in electrophysical installations. The topic of the dissertation is relevant and practically important. The dissertation has scientific novelty and practical value and is of great

importance for the development of the science of modeling electron motion in electrophysical installations.

The relevance of the topic and the need for research are substantiated, the purpose of the work, research tasks and practical significance of the results are formulated. Fractal models of internal connections of complex systems and the binding energy of fractal clusters with scaling are considered. Mathematical models of complex particle systems are developed, in which the internal structure of connections (contact, elastic, chemical or effective) and its hierarchical organization play a decisive role. A mathematical model for particle systems with a variable structure of connections is constructed, generalized variational principles for such systems are formulated and evolution equations are derived,

Mathematical models for electrophysical systems with an internal fractal structure have been obtained and analyzed. A mathematical model of a system with a Josephson contact between fractal media has been analyzed. Equations for electron transport in the fractal Josephson effect have been obtained for the first time. The equations of the dynamics of charged particles in a fractal medium have been regularized using Jackson operators and a mathematical model of the generalization of Ohm's law has been developed. A mathematical model describing the dynamics of charged particles in a constant magnetic field has been studied. The problems of solving unstable particle trajectories in an accelerator have been considered, and the use of practical stability methods based on the second Lyapunov method, the Lyapunov function, and nonlinear numerical algorithms allows for a stable and reliable numerical analysis of the trajectories of charged particles in an accelerator. In this paper, algorithms for numerical calculation of stability regions and structural-parametric optimization are used to study the equations of motion of charged particle beams with different forms of accelerating and focusing fields. The methodology and practical algorithms for computer modeling of the processes of

acceleration, phase capture and focusing of charged particles in accelerating structures with fixed electrodes are presented.

Key words: mathematical modeling, linear accelerator, fractal structure, quantum processes, differential equation, numerical method.