

Національна академія наук України
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Пилиповський Олександр Васильович

УДК 537.611

**РЕГУЛЯРНА І ХАОТИЧНА ДИНАМІКА
ТОПОЛОГІЧНИХ ЗБУДЖЕНЬ У МАГНІТНИХ
НАНОСИСТЕМАХ**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка на кафедрі математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Шека Денис Дмитрович,
професор кафедри математики та теоретичної
радіофізики факультету радіофізики, електроніки
та комп'ютерних систем Київського національного
університету імені Тараса Шевченка

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук
Лев Богдан Іванович,
завідувач відділу синергетики Інституту
теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН
України

доктор фізико-математичних наук
Голуб Володимир Олегович,
завідувач відділу нелінійної магнітної динаміки
конденсованого середовища Інституту магнетизму
Національної академії наук України та
Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться «___» _____ 2016 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

Автореферат розісланий «___» _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фіз.-мат. наук

Кузьмичев В. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження статички та надшвидкої динаміки у наномасштабах обумовлене прогресом в експериментальних технологіях і потребі в мініатюризації та пришвидшенні роботи електронних пристроїв. Магнітні вихори мають потенційно широке практичне застосування в якості елементів магнітної пам'яті й датчиків магнітного поля. Вихрові розподіли у векторних полях входять до класу топологічно нетривіальних об'єктів, які грають значну роль у багатьох фізичних процесах. Яскравими прикладами останнього можуть слугувати спостереження вихрових структур у надпровідниках II-го роду, в Бозе—Ейнштейнівському конденсаті, гідрогазодинаміці тощо.

Як було нещодавно встановлено, нетривіальна форма магнітних надротів і плівок суттєво впливає на статистику і динаміку намагніченості. Ненульові кривина і кручення призводять до ефектів, які раніше спостерігалися у хіральних магнетиках. Так, індукована геометричною формою зразка анізотропія призводить до зміни основного стану і зсуву магнетонного спектру, що характерно для тонких плівок із взаємодією Дзялошинського—Моріі.

Практична цінність досліджень магнітних вихорів і магнетиків криволінійної форми полягає в широкому прикладному застосуванні нелінійних ефектів у наноелектроніці (елементи магнітної пам'яті та приладів спітроніки) і запитах технологій на необхідність використання мікро- і нанооб'єктів складної форми. Фундаментальними є питання прояву хаотичної динаміки, динаміки точкових сингулярностей і кіральних ефектів у магнітних наноструктурах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Дослідження проводилися в рамках наступних наукових проектів:

1. Держбюджетна науково-дослідна робота № 11БФ052-03 «Фізичні та інформаційні процеси у конденсованому середовищі та біологічних системах з великою кількістю зв'язків» в рамках комплексної наукової програми «Новітні та ресурсозберігаючі технології», державний реєстраційний номер 0111U006937; виконавець робіт за проектом.
2. Науковий проект «Динаміка солітонів і вихорів у наномігнетиках», підтриманий науково-дослідною роботою МОН України, державний реєстраційний номер 0108U005929, термін виконання: 2010 р.; виконавець робіт за проектом.
3. Наукові дослідження за держбюджетною темою КНУ № 11ДФ052-06

«Надшвидкі явища в динаміці магнітних вихорів в наночастинках», державний реєстраційний номер 0111U008886, термін виконання: 2011 р.; виконавець робіт за проектом.

4. Науковий проект «Dynamics of Topological Singularities in Magnetic Nanoparticle», за підтримки Bavarian Academic Center for Central, Eastern and Southeastern Europe (BAYHOST), термін виконання: 2012 р.; індивідуальний проект.

5. Науковий проект «Динаміка топологічних збурень в наномагнетиках зі складною геометрією», державний реєстраційний номер 0113U007543, термін виконання: 2013 р.; виконавець робіт за проектом.

6. Науковий проект «Bloch Point Dynamics in a Magnetic Nanoparticle under the action of DC magnetic field» за підтримки Bavarian Academic Center for Central, Eastern and Southeastern Europe (BAYHOST), термін виконання: 2014 р.; індивідуальний проект.

7. Науковий проект «Magnetization States on a Möbius Strip» за підтримки DAAD (Deutsche Akademische Austauschdienst Dienst), реєстраційний номер 91530902-FSK, термін виконання 2015 р.; індивідуальний проект.

8. Науковий проект «Curvature induced effects in nanowires» за підтримки Alexander von Humboldt Foundation, термін виконання: 2015 р.; виконавець робіт за проектом.

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є аналітичне і чисельне дослідження:

- динаміки та механізму перемикання полярності магнітних вихорів в наночастинках з магнітом'якого феромагнетика під дією монохроматичного магнітного поля, прикладеного вздовж вісі зразка у формі диску;
- перемикання полярності вихору в магнітом'якій феромагнітній наночастинці під дією сталого магнітного поля, прикладеного вздовж вісі зразка у формі диску, і динаміки точок Блоха, які динамічно утворюються в цьому процесі, мікромагнітної структури точки Блоха;
- взаємовпливу криволінійної геометрії феромагнітних наночастинок із нетривіальною топологією магнітних станів на прикладі кільця Мебіуса.

Об'єктом дослідження є статичні та динамічні явища в магнітовпорядкованих системах.

Предметом дослідження є магнітні топологічні солітоноподібні збудження: вихори, точки Блоха і доменні стінки.

Методи дослідження. Методи дослідження, застосовані в дисертаційній роботі, включають в себе такі методи математичної фізики, як методи багатьох масштабів (використано для аналізу слабконелінійного резонансу полярності вихору під дією періодичного накачування), колективних змінних (для аналізу динаміки магнітного вихору і точок Блоха), варіаційний метод (для аналізу структури точки Блоха у радіально-симе-

тричному полі, структура вихору в зразку із поверхневою анізотропією). Перевірка аналітичних розрахунків виконувалася за допомогою пакетів мікромагнітних моделювань OOMMF, MAGPAR і пакету спін-граткових моделювань SLaSi.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні характеру динаміки полярності вихору під дією монохроматичного поля, структурі та характері динаміки точки Блоха в обмежених зразках, зв'язку геометричних і магнітних характеристик криволінійних зразків на прикладі кільця Мебіуса. Оригінальні результати є наступними:

1. Встановлено наявність режимів хаотичної та регулярної динаміки осередка магнітного вихору в феромагнітному нанодиску під дією монохроматичного поля, прикладеного вздовж вісі диску; виявлено умови контрольованого перемикання полярності. Запропоновано механічну модель частинки зі змінною масою в двоямному потенціалі під дією періодичного збудження.
2. Розраховано мікромагнітну структуру точки Блоха в магнітом'якому феромагнетіку сферичної форми. Передбачено можливість стабілізації точки Блоха радіально-симетричним магнітним полем.
3. Описано тонку структуру блохівської лінії в феромагнітному зразку та встановлено, що наявність неєлівської анізотропії призводить до її деформації та народження точок Блоха. Встановлено характер руху точок Блоха.
4. Розраховано діаграму стаціонарних станів феромагнітного кільця Мебіуса із легкономальною анізотропією. Встановлено зв'язок між геометричною кіральністю кільця і магнітною кіральністю доменних стінок, які у ньому виникають.

Практичне значення одержаних результатів Результати досліджень, проведених у рамках дисертаційної роботи, встановлюють швидкодію запам'ятовувального пристрою, в якому зміна полярності вихорів здійснюється монохроматичними імпульсами магнітного поля, прикладеного вздовж вісі тонких циліндричних зразків. Наявність хаотичної динаміки в таких системах відкриває можливості для їх використання у криптографічних системах. Вивчення динаміки поблизу вищих резонансів радіально-симетричних мод відкриває нові шляхи до надшвидкої зміни полярності вихорів. Властивості сильно неоднорідних розподілів намагніченості в сферичних зразках можуть бути використані у магнітометричних дослідженнях, де феромагнітні кулі є елементами кантілеверів і при дослідженні розсіяння спінових хвиль. Дослідження статички й динаміки точок Блоха представляє практичний інтерес через їх роль у процесах зміни полярності вихорів і перемагнічування нанодротів для збільшення швидкодії наноелектронних пристроїв, таких як магнітна оперативна

пам'ять.

Дослідження магнітокіральних ефектів на прикладі кільця Мебіуса, представлене у даній роботі, є яскравою ілюстрацією взаємовпливу топології та кривини поверхні нанооб'єктів. Розуміння зв'язку між ними є важливим для розробки новітніх приладів наноелектроніки й спінтроніки, прикладом яких можуть бути так звана «трекова» магнітна пам'ять (англ. racetrack memory) — магнітні дроти у вигляді підкови, по яким переміщуються доменні стінки, — чи високочутливі датчики у вигляді радіально або дотично намагнічених нанотрубок.

Особистий внесок здобувача. Автор безпосередньо приймав участь у постановці задач, розробці прийомів і методів розв'язку, проведенні розрахунків і написанні статей. Основні результати, які складають зміст дисертаційної роботи, були отримані особисто здобувачем:

1. Передбачено наявність регулярної та хаотичної динаміки полярності магнітного вихору в магнітом'якому нанодиску під дією магнітного поля, прикладеного вздовж осі зразка. Шляхом мікромагнітних моделювань побудовано діаграму динамічних станів, яка вказує конкретний тип динаміки полярності вихору в залежності від параметрів прикладеного поля. Проведено аналіз характеристик хаотичної динаміки, її теоретичний опис в рамках моделей відсічки й вихорового осердя. Вказано параметри хвильового пакету магнітного поля, яке дозволяє змінювати полярність вихору контрольованим чином. Опубліковано в [1, 2].
2. Здійснено теоретичний опис структури намагніченості у точці Блоха в сферичній наночастинці із врахуванням магнітостатичної взаємодії, як за відсутності так і з врахуванням зовнішнього поля, яке стабілізує її положення в центрі зразка. Здійснено перевірку теоретичного розрахунку шляхом спін-ґраткових моделювань. Опубліковано в [3].
3. Здійснено аналітичний розрахунок структури осердя магнітного вихору в ґайзенберґівському феромагнетіку із неелівською поверхневою анізотропією. Проведено чисельний аналіз динаміки перемикання полярності вихору в такому зразку. Здійснено теоретичний опис в рамках моделі нитчастого вихорового осердя. Розраховано розподіл намагніченості у легкоплівочній плівці із неелівською поверхневою анізотропією під дією сталого магнітного поля, прикладеного перпендикулярно до її поверхні. Опубліковано в [4, 5].
4. Шляхом мікромагнітних моделювань побудовано діаграму стаціонарних станів магнітного кільця Мебіуса і пласкої смужки із легкономальною анізотропією. Встановлено особливості структури доменних стінок, які виникають за різних геометричних параметрів кільця. Опубліковано в [6].

Усі результати чисельних розрахунків були також отримані особисто автором.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на семінарах кафедри математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, відділу квантової електроніки Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова (Київ), першої кафедри теоретичної фізики інституту фізики Байройтського університету (Universität Bayreuth, Байройт, Німеччина), Інституту інтегровних нанонаук (Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Дрезден, Німеччина), Башкирського державного університету (Уфа, Російська Федерація), Школи математики Бристольського університету (School of Mathematics, University of Bristol, Бристоль, Великобританія) і були представлені на наступних конференціях: Young Scientists' Conference "Modern Problems of Theoretical Physics" (24–26 листопада 2009 р., Київ, Україна); X International Young Scientists' Conference on Applied Physics (16–19 червня 2010 р., Київ, Україна); II Young Scientists Conference "Modern Problems of Theoretical Physics" (22–24 листопада 2010 р., Київ, Україна); XI International Young Scientists' Conference on Applied Physics (15–18 червня 2011 р., Київ, Україна); III Young Scientists Conference "Modern Problems of Theoretical Physics" (21–23 листопада 2011 р., Київ, Україна); XII International Young Scientists' Conference on Applied Physics (23–26 травня 2012 р., Київ, Україна); 3rd Young Scientists' Conference "Low Temperature Physics" (14–18 травня 2012 р., Харків, Україна); International Conference "Problems of Theoretical Physics" (8–10 жовтня 2012 р., Київ, Україна); VIII International Conference "Electronics and Applied physics" (24–27 жовтня 2012 р., Київ, Україна); IV Young Scientists Conference "Modern Problems of Theoretical Physics" (23–26 жовтня 2012 р., Київ, Україна); International Workshop "Domain microstructure and dynamics in magnetic elements" (8–11 квітня 2013 р., Іракліон, Греція); 11th EUROPT Workshop on Advances in Continuous Optimization (26–28 червня 2013 р., Флоренція, Італія); 4th International Conference of Young Scientists "Low Temperature Physics" (3–7 червня 2013 р., Харків, Україна); XIII International Young Scientists' Conference on Applied Physics (12–15 червня 2013 р., Київ, Україна); V Young Scientists Conference "Problems of Theoretical Physics" (24–27 грудня 2013 р., Київ, Україна); VI Young Scientists Conference "Problems of Theoretical Physics" (25–27 листопада 2014 р., Київ, Україна); 5th International Conference for Young Scientists "Low Temperature Physics" (2–6 червня 2014 р., Харків, Україна); Humboldt Kolleg "The Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society" (12–14

червня 2014 р., Київ, Україна); International Conference on Magnetism (5–10 липня 2015 р., Барселона, Іспанія).

Публікації. Матеріали, представлені в даній дисертаційній роботі, опубліковано в 25 роботах. Серед них 6 статей у провідних фахових українських і зарубіжних рецензованих наукових журналах [1–6] і 19 матеріалів конференцій [7–25].

Структура дисертаційної роботи. Робота складається з вступу, трьох основних розділів, висновку, 4-х додатків і списку використаних джерел. Робота викладена на 149 сторінках тексту. Список використаних джерел містить 210 найменувань, викладених на 33 сторінках. Дисертація містить 47 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, показано новизну і практичну цінність отриманих результатів, приведено інформацію про їх апробацію, коротко викладено зміст розділів.

У **розділі 1** представлено результати досліджень динаміки магнітних вихорів (розподілів намагніченості із замкненим потоком у площині) у феромагнітних наноточках циліндричної форми під дією монохроматичного магнітного поля, прикладеного вздовж вісі зразка. У п. 1.1 розглядаються основні положення наномагнетизму, відомості про динаміку магнітних вихорів, хаотичну динаміку у магнетизмі.

Один з новітніх резонансних методів зміни полярності вихору (напрямку позаплощинної компоненти намагніченості в його центрі вгору чи вниз) — застосування монохроматичного поля $\mathbf{B} = B_0 \sin(2\pi ft)\mathbf{e}_z$, прикладеного вздовж вісі зразка. У п. 1.2 описано діаграму динамічних режимів полярності вихору μ в залежності від амплітуди B_0 і частоти f , побудовану за допомогою мікромагнітних моделювань в пакеті OOMMF, див. рис. 1. Встановлено наявність наступних динамічних режимів: (i) *Відсутність перемикань*: нелінійний резонанс за малих амплітуд поля (рис. 1). (ii) *Хаотична динаміка полярності* нерухомого вихору у встановлених діапазонах параметрів (f, B_0) (рис. 1). Потужність спектру коливань спадає із частотою за степеневим законом. (iii) *Регулярні перемикання* полярності нерухомого вихору: автокореляційна функція є періодичною, а в спектрі добре виражені дискретні піки з рівними проміжками між ними (рис. 1). (iv) *Переривчасті перемикання* на межі областей наявності і відсутності перемикань (рис. 1). (v) *Іррегулярна вихоро-магнітна динаміка*, яка супроводжується виходом вихору з центру зразка і утворенням пар вихор-антивихор під час перемикання (рис. 1).

Опис явища зміни полярності нерухомого вихору можна здійснити із врахуванням ефектів дискретності реальної кристалічної ґратки. Застосовано модель відсічки, в якій невелика область в центрі осердя вважається немагнітною, і модель вихрового осердя, в якій осердя вихору описується лише чотирма спінами, а всі інші вважаються «замороженими» в площині у вихровому розподілі. Опис повномасштабних моделювань здійснено в термінах динаміки ефективної частинки зі змінною масою \mathcal{M} і лагранжианом (наведено для моделі відсічки)

$$\mathcal{L}^{\text{ef}} = \frac{\mathcal{M}(\mu)}{2} \left(\frac{d\mu}{d\tau} \right)^2 - \mathcal{U}(\mu) + 2\mu h \sin \omega\tau, \quad (1)$$

$$\mathcal{M}(\mu) = 1/(4 - \mu^2), \quad \mathcal{U}(\mu) = [-\kappa\mu^2 + \text{Li}_2(\mu^2)]/2,$$

де τ — нормований час, h і ω — амплітуда і частота збудження, κ — параметр відсічки, Li_2 — ділогарифмічна функція. Мінімуми двоямного потенціалу \mathcal{U} відповідають протилежним рівноважним полярностям вихору, а рух частинки — зміні динамічної полярності вихору μ .

У п. 1.3 описано, як можна здійснювати послідовні перемикання полярності із контролем кінцевого стану системи шляхом прикладання хвильових пакетів визначеної тривалості.

У **розділі 2** наведено результати досліджень статички та динаміки точки Блоха (їжакоподібного розподілу намагніченості з сингулярністю в центрі) в обмежених феромагнітних зразках (сферичних наночастинках і наноточках). У п. 2.1 наводяться відомі дані про статичку і динаміку точкових сингулярностей в різних фізичних системах, проблеми чисельного моделювання точок Блоха і шляхи їх подолання.

У п. 2.2 розв'язано задачу знаходження мікромагнітного розподілу точки Блоха у магнітом'якому зразку сферичної форми. Класи точок Блоха, які виникають в процесі зміни полярності вихорів, можна описати анзацем

$$\Theta(\vartheta) = p\vartheta + \pi(1 - p)/2, \quad \Phi(\varphi) = q\varphi + \gamma, \quad p, q = \pm 1. \quad (2)$$

де ϑ і φ — кути фізичної сферичної системи координат, а Θ і Φ задають напрямок намагніченості в локальній сферичній системі координат. Вони всі мають однакову обмінну енергію $E^{\text{ex}} = 3\ell^2/R^2$ в одиницях $4\pi M_s^2 V$, де

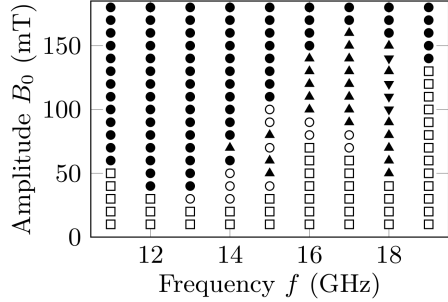


Рис. 1: Діаграма динамічних режимів полярності вихору. □ полярність стала; ▲ хаос; ▼ регулярна динаміка; ○ переривчаста динаміка; ● вихід з центру.

M_s — намагніченість насичення, V — об'єм кулі радіусом R , ℓ — магнітна довжина. Магнітостатична енергія визначає кут підкручування намагніченості γ в площині, перпендикулярній до осі симетрії. Розрахунок магнітостатичної енергії точки Блоха із $q = -1$, показує, що вона не залежить від γ і $E^{\text{ms}} = 7/30$. Енергія точки Блоха із $q = +1$ описується виразом

$$E_{q=1}^{\text{ms} p}(\gamma) = \frac{1}{30} (7 + 4p \cos \gamma + 4 \cos 2\gamma). \quad (3)$$

Рівноважний кут повороту γ_0 відповідає мінімуму енергії (3) та рівний

$$\gamma_0 = \arccos\left(-\frac{p}{4}\right) \approx \begin{cases} 105^\circ, & p = +1, \\ 76^\circ, & p = -1, \end{cases} \quad (4)$$

що добре узгоджується із чисельним розрахунком енергії кубічної спінової ґратки для різних значень γ .

Точка Блоха може бути стабілізована в центрі зразка прикладанням поля, симетрія якого відповідає її мікромагнітному розподілу (близьке до радіально-симетричного, або поле між двома соленоїдами). У полях, амплітуда яких не перевищує певного критичного значення, кут підкручування набуває залежності від відстані до центру зразка r . У сильніших полях реалізується радіально однорідний розподіл.

У п. 2.3 розглядається легкоплщинний гайзенберґівський феромагнетик у формі диску із врахуванням неелівської поверхневої анізотропії різних знаків (додатна і від'ємна — енергетично вигідний напрямок вздовж нормалі, або вздовж поверхні). Її наявність модифікує межові умови для намагніченості, що є джерелом виникнення неоднорідних станів. Зокрема, у вихорі деформується форма блохівської лінії: її радіус зменшується поблизу основ диску або на середині його вісі в залежності від знаку коефіцієнту поверхневої анізотропії $\varkappa = \mathcal{K}_s/\mathcal{K}$, віднесеного до коефіцієнту легкоплщинної анізотропії \mathcal{K} . У випадку $|\varkappa| < 1$ ширину блохівської лінії можна описати виразом

$$w(\eta) = \ell \left(1 - \frac{\tilde{\varkappa} \cosh \eta}{\tilde{\varkappa} \cosh L_0 + 2 \sinh L_0} \right), \quad \tilde{\varkappa} = \frac{\varkappa a}{\ell \sqrt{\zeta(3)}}, \quad L_0 = \frac{L}{2\ell \sqrt{\zeta(3)}}, \quad (5)$$

де $\eta = z/[\ell \sqrt{\zeta(3)}]$, L — товщина диску, $\zeta(3) \approx 1,202$ — стала Апері. Вираз (5) добре узгоджується із результатами спін-ґраткових моделювань. Така бочко- або подушкоподібна форма блохівської лінії (звужена на краях або в центрі відповідно) в залежності від знаку \varkappa призводить до неоднорідної зміни полярності вихору під дією сталого магнітного поля. У полі, близькому до поля перемикання, блохівська лінія суттєво звужується і змінює форму на протилежну: деформована подушкоподібна замість бочкоподібної і навпаки. При подальшому адіабатичному збільшенні поля, в найтоншому місці лінії (у центрі вісі, або поблизу основ диска) відбувається розрив: народжуються точки Блоха, рух яких перемагнічує лінію.

Якісний опис цього процесу дано в термінах моделі нитчастого вихрового осердя — розширення моделі вихрового осердя, наведеної у п. 1.2, на тривимірний випадок. Вона описується гамільтоніаном

$$\frac{\mathcal{H}_c}{4K\mathcal{S}^2} = \sum_{n=1}^N \left[(1 + \varkappa_n - 2\lambda) \frac{\mu_n^2}{2} - (h + 2\lambda m_b) \mu_n - \frac{4\lambda}{\sqrt{5}} \sqrt{(1 - m_b^2)(1 - \mu_n^2)} \times \right. \\ \left. \times \cos \psi_n \right] - \lambda \sum_{n=1}^{N-1} \left[\mu_n \mu_{n+1} + \sqrt{(1 - \mu_n^2)(1 - \mu_{n+1}^2)} \cos(\psi_n - \psi_{n+1}) \right], \quad (6)$$

де \mathcal{S} — довжина вектору спіну, коефіцієнт $\lambda \sim \ell^2$, m_b — намагніченість поза осердям вихору, пара (μ_n, ψ_n) — полярність та фаза намагніченості в n -ій кристалографічній площині, а \varkappa_n — параметр анізотропії в ній. Координата точки Блоха в цій моделі відповідає міжвузельному простору поміж n -ї та $(n+1)$ -ї площин, в яких $\mu_n \mu_{n+1} < 0$, а її рух вздовж вісі зразка z — послідовній зміні полярностей μ_n в сусідніх площинах, див. рис. 2. Модель відтворює форму блохівської лінії та динаміку зміни полярності вихорів, зокрема народження додаткових пар точок Блоха у товстих зразках.

У розділі 3 наводяться результати чисельного розрахунку стаціонарних станів намагніченості у феромагнітному кільці Мебіуса із легконормальною анізотропією. У п. 3.1 наводяться літературні дані про магнітокіральні ефекти. У п. 3.2 описано стаціонарні стани намагніченості в кільці Мебіуса.

В залежності від геометричних параметрів кільця і значення фактору якості $Q = K/4\pi M_s^2$, де $K > 0$ — коефіцієнт легкоосьової анізотропії, можливе утворення чотирьох стаціонарних станів, див. рис. 3а. (i) Якщо анізотропія досить слабка ($Q < 1$), реалізується *вихровий стан* в площині кільця (рис. 3а). (ii) При $Q > 1$ (сильна анізотропія) стан системи визначається конкуренцією між обмінною взаємодією і анізотропією, що призводить до виникнення *поперечної блохівської доменної стінки*, див. рис. 3. Напрямок її кіральності (поворот намагніченості за чи проти годинникової стрілки) є протилежним до геометричної кіральності кільця. Енергетично вигідне положення стінки в зразку відповідає «вертикальній» частині кільця (iii) Конкуренція між магнітостатичною взаємодією і анізотропією реалізується при $Q \sim 1$. При цьому виникає *повздовжня блохівська доменна*

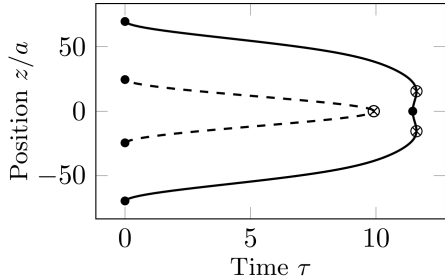
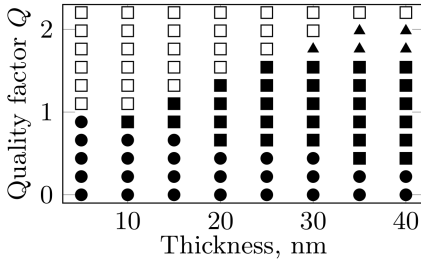
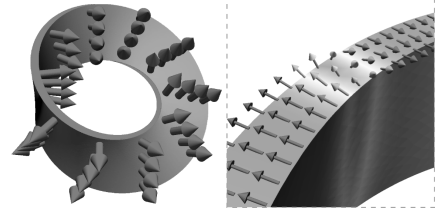


Рис. 2: Рух точок Блоха в дисках різної товщини (модель). В більш товстому зразку народжується додаткова пара. ● народження; ⊗ анігіляція. a — стала ґратки.



(a) ● вихор; □ поперечна доменна стінка; ■ повздовжня доменна стінка; ▲ три поперечних стінок.



(b) Ліворуч: розподіл намагніченості в кільці. Праворуч: структура доменної стінки.

Рис. 3: (a) Стаціонарні стани кільця Мебіуса. (b) Поперечна доменна стінка в кільці Мебіуса.

стінка, енергетично вигідна кіральність якої співпадає з геометричною кіральністю кільця (рис. 3a). (iv) У досить товстих кільцях Мебіуса за великих значень Q можливе утворення *непарної кількості поперечних доменних стінок* (рис. 3a).

Зв'язок між геометричною і магнітною кіральностями для повздовжньої і поперечної доменних стінок є наслідком обмінно-індукованої ефективної взаємодії Дзялошинського—Моріі, а обране положення поперечної доменної стінки — ефективної анізотропії, які виникають у наноманетиках, форма яких відрізняється від пласкої.

У додатку А наводиться розрахунок розподілу намагніченості у плівці з неелівською поверхневою анізотропією під дією сталого магнітного поля. У додатку Б описано моделювання зміни полярності в гайзенберґівському феромагнетикі з обмінною анізотропією. Додаток В містить розрахунки розподілу намагніченості у кільці під дією сталого магнітного поля. У додатку Г наводяться деталі моделі нитчастого вихрового осердя.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено результати досліджень динаміки магнітних топологічних солітоноподібних збуджень (вихорів і точок Блоха) і особливостей формування розподілів намагніченості у наноманетиках різної геометричної форми. Основні оригінальні результати дисертаційної роботи полягають в наступному.

1. Встановлено, що монохроматичне накачування радіально-симетричних магнетонних мод на фоні магнітного вихору призводить до динаміки намагніченості, за якої можлива регулярна і хаотична динаміка полярності. Запропоновано теоретичну модель, яка пояснює їх появу в рамках механічної аналогії коливаний частинки із змінною масою у ефективному

двоємному потенціалі. Невелика амплітуда накачування призводить до слабконелінійного резонансу, а подальше її зростання — до стрибків між еквівалентними мінімумами потенціалу, які відповідають протилежним значенням полярності. Запропоновано спосіб контрольного перемикання полярності вихорів за допомогою хвильових пакетів.

2. Аналітично знайдено розподіл намагніченості в околі точки Блоха в феромагнітному зразку сферичної форми, який визначається конкуренцією обмінної і магнітостатичної взаємодії. Запропоновано спосіб її стабілізації просторово-неоднорідним полем.

3. Встановлено, що в залежності від знаку неєлівської поверхневої анізотропії вихор набуває бочко- або подушкоподібної форми. Неоднорідність блохівської лінії є причиною народження точок Блоха в процесі її перемагнічування. В рамках запропонованої моделі нитчастого вихрового осердя описано вплив сталого магнітного поля на планарний вихор в диску і динаміку точок Блоха.

4. Виявлено магнітокіральні ефекти, зумовлені топологією кільця Мебіуса. Побудовано діаграму рівноважних станів намагніченості в феромагнітному кільці Мебіуса з легкоконормальною анізотропією. Знайдено умови формування топологічно індукованих просторово неоднорідних магнітних структур.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Механізм швидкого аксіально симетричного перемикання полярності магнітного вихору / О. В. Пилиповський, Д. Д. Шека, В. П. Кравчук [та ін.] // *Укр. фіз. журн.* — 2013. — Т. 5., № 6. — С. 596–603.
2. Regular and chaotic vortex core reversal by a resonant perpendicular magnetic field / O. V. Pylypovskiy, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // *Phys. Rev. B.* 2013. — Vol. 88. — P. 014432.
3. *Pylypovskiy, O. V.* Bloch point structure in a magnetic nanosphere / O. V. Pylypovskiy, D. D. Sheka, Y. Gaididei // *Phys. Rev. B.* 2012. — Vol. 85. — P. 224401.
4. Effects of surface anisotropy on magnetic vortex core / O. V. Pylypovskiy, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, Y. Gaididei // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* — 2014. — Vol. 361. — P. 201 – 205.
5. Vortex Polarity Switching in Magnets with Surface Anisotropy / O. V. Pylypovskiy, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, Y. Gaididei // *Фізика низьких температур.* — 2015. — Т. 41, № 5. — С. 466–481.
6. Coupling of Chiralities in Spin and Physical Spaces: The Möbius Ring as a Case Study / O. V. Pylypovskiy, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka [et al.] //

- Phys. Rev. Lett.* — 2015. — May. — Vol. 114. — P. 197204.
7. *Pylypovskiyi, O. V.* Dynamics of the Vortex Switching Process in a Magnetic Nanodisk under the Influence of Transversal Magnetic Field / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka // Abstracts of the Young Scientists' Conference "Modern Problems of Theoretical Physics", December 24-26, 2009, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2009.
 8. *Pylypovskiyi, O. V.* Bloch point dynamics in vortex polarity switching process / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka // Proceeding of X International Young Scientists' Conference on Applied Physics, June 16-19, 2010, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2010. — P. 34–35.
 9. *Pylypovskiyi, O. V.* Dynamics of point singularities in magnetic nanodots under the field influence / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka // Abstracts of the Young Scientists Conference "Modern Problems of Theoretical Physics", December 22-24, 2010, Kiev, Ukraine. Kyiv, 2010. — P. 86.
 10. *Pylypovskiyi, O. V.* Vortex polarity switching in magnetic nanodisk mediated by the Bloch point injection / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka // Proceeding of XI International Young Scientists' Conference on Applied Physics, June 15-18, 2011, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2011. — P. 79–80.
 11. *Pylypovskiyi, O. V.* Structure of the Bloch Point in Spherical Nanoparticle / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Abstracts of the Young Scientists Conference "Modern Problems of Theoretical Physics", December 21-23, 2011, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2011. — P. 55.
 12. *Pylypovskiyi, O. V.* Influence of magnetic and stray field on a Bloch point structure / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Proceeding of XII International Young Scientists' Conference on Applied Physics, May 23-26, 2012, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2012. — P. 77–78.
 13. *Pylypovskiyi, O. V.* Radial-dependent Bloch point in magnetic nanosphere / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, Y. Gaididei // Abstracts of the Young Scientists' Conference "Low Temperature Physics", May 14-18, 2012, Kharkiv, Ukraine. — Kharkiv, 2012. — P. 85.
 14. Deterministic and chaotic vortex dynamics in magnetic nanodots / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // Proceedings of the International Conference "Problems of Theoretical Physics", October 8-10, 2012, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2012. — P. 102.
 15. Axial-symmetric vortex polarity switching in ferromagnetic particles / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // Proceedings of the VIII International Conference "Electronics and Applied physics" (Kyiv, Ukraine, October 24-27, 2012). — Kyiv, 2012. — P. 61–62.
 16. Vortex Polarity Reversal in Magnetic Nanodisk Under AC Magnetic Field Pumping / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // Proceedings of the IV Young Scientists Conference "Modern Problems of

- Theoretical Physics” October 23-26, 2012, Kiev, Ukraine. — Kyiv, 2012. — P. 60.
17. *Pylypovskiyi, O. V.* Origin of regular and chaotic ultrafast reversal of magnetic vortex core / O. V. Pylypovskiyi // Abstracts of the International Workshop “Domain microstructure and dynamics in magnetic elements”, Heraklion, Crete, April 8–11, 2013. — Heraklion, 2013. — P. 17.
 18. *Pylypovskiyi, O. V.* SLaSi: a spin-lattice simulation tool / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka // Book of Abstract of 11th EUROPT Workshop on Advances in Continuous Optimization, Florence, Italy, June 26-28, 2013. — Florence, 2013. — P. 11.
 19. The breaking of the vortex polarity switching symmetry by the surface anisotropy / O V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, Y. Gaididei // Proceedings of the 4th International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics”, Kharkiv, Ukraine, June 3-7, 2013. — Kharkiv, 2013. — P. 49.
 20. Bloch Point Mediated Vortex Polarity Switching In Presence of Surface Anisotropy / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, Y. Gaididei // Proceeding of the XIII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics, June 12-15, 2013, Kyiv, Ukraine. — Kyiv, 2013. — P. 83–84.
 21. Magnetic vortex core reversal in Heisenberg magnets with surface anisotropy / O V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk, Y. Gaididei // Proceedings of the V Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, Kyiv, Ukraine, December 24-27, 2013. — Kyiv, 2013. — P. 93.
 22. Coupling of Magnetical and Geometrical Chiralities in a Möbius Ring / O V. Pylypovskiyi, V. P. Kravchuk, D. D. Sheka [et al.] // Proceedings of the VI Young Scientists Conference “Problems of Theoretical Physics”, Kyiv, Ukraine, November 25-27, 2014. — Kyiv, 2014. — P. 36.
 23. Ground magnetization states in a Möbius Strip / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // Proceedings of the V International Conference for Young Scientists “Low Temperature Physics” (Kharkiv, Ukraine, June 2-6, 2014). — Kharkiv, 2014. — P. 74.
 24. Möbius-strip shaped nanomagnet with easy-axis anisotropy / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // Book of Abstracts, Humboldt Kolleg “The Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society”, Kyiv, Ukraine, June 12–14, 2014. — Kyiv, 2014. — P. 44.
 25. Geometry-induced effects on domain walls on curved surfaces / O. V. Pylypovskiyi, D. D. Sheka, V. P. Kravchuk [et al.] // International Conference on Magnetism, July 5–10, 2015, Barcelona, Spain. Book of Abstracts. — Barcelona, 2015. — July. — P. TU.F-P83.

АНОТАЦІЯ

Пилиповський О. В. Регулярна і хаотична динаміка топологічних збуджень у магнітних наносистемах — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2016.

Встановлено типи динамічних режимів полярності вихору під дією монохроматичного магнітного поля, прикладеного вздовж осі зразка. Запропоновано моделі, які описують її хаотичну і регулярну динаміку. Знайдено розподіл намагніченості в околі точки Блоха в ферромагнітному зразку сферичної форми, який визначається конкуренцією обмінної, магнітостатичної енергій та зовнішнього поля. Встановлено форму блохівської лінії та механізм зміни полярності вихору в зразку з поверхневою анізотропією. Виявлено магнітокіральні ефекти, зумовлені топологією кільця Мебіуса та побудовано діаграму рівноважних станів намагніченості в ферромагнітному кільці з легкоконормальною анізотропією.

Ключові слова: вихор, точка Блоха, магнітокіральні ефекти

АННОТАЦИЯ

Пилиповский А. В. Регулярная и хаотическая динамика топологических возбуджений в магнитных наносистемах — Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2016.

Определены типы динамических режимов полярности вихря под воздействием монохроматического магнитного поля, приложенного вдоль оси образца. Предложены модели, описывающие её хаотическую и регулярную динамику. Найдено распределение намагнитченности в окрестности точки Блоха в ферромагнитном образце сферической формы, определяемое конкуренцией обменной, магнитостатической энергий и внешних полей. Определена форма блоховской линии и механизм изменения полярности вихря в образце с поверхностной анизотропией. Обнаружены магнитокиральные эффекты, обусловленные топологией кольца Мебиуса и построена диаграмма равновесных состояний намагнитченности в ферромагнитном кольце с легкоконормальной анизотропией.

Ключевые слова: вихрь, точка Блоха, магнитокиральные эффекты

ABSTRACT

Pylypovskyi O. V. Regular and chaotic dynamics of topological excitations in magnetic nanosystems — Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

Vortex polarity switching in magnetic nanodots under the action of monochromatic magnetic field applied along the nanodot axis is described theoretically and using micromagnetic simulations. The following dynamical regimes of the vortex polarity are found:

- i weakly nonlinear oscillations near one of the equilibrium polarities;
- ii chaotic polarity switching of the motionless vortex in the nanodot center;
- iii regular polarity switching of the of the motionless vortex in the nanodot center (discrete peaks in the FFT spectrum of dynamics are clearly observed);
- iv intermittent oscillations;
- v irregular vortex motion with polarity switching via mechanism of pair vortex-antivortex creation.

These dynamical regimes are explained using cut-off and vortex core models in terms of the motion of the effective particle with variable mass inside the double-well potential with minima corresponding to the opposite equilibrium polarities. While a low-amplitude external pumping excites only weakly-nonlinear oscillations near one of the wells, larger amplitudes enforce jumps between wells. The regular or chaotic jumps behavior is dependent on the frequency and amplitude of the pumping.

Micromagnetic distribution of Bloch point is found analytically as result of the competition between exchange and magnetostatic interactions. The first one is determined by the general structure of the Bloch point and is invariant relative to the simultaneous rotation of magnetization around given axis. The angle of rotation is determined by the magnetostatic interaction. The Bloch point can be stabilized by external gradient magnetic field. Theoretical predictions are in a good agreement with spin-lattice simulations.

Vortex structure in the disk-shaped Heisenberg magnets with surface anisotropy and polarity switching process under the action of static magnetic field are described theoretically and using spin-lattice simulations. The easy-surface (positive) and easy-axis (negative) surface anisotropy of Néel type modifies boundary conditions for the magnetization. It is the source of inhomogeneous shape of the Bloch line: it becomes barrel- or pillow-shaped depending on the sign of the surface anisotropy. The width of the vortex

core decreases under the action of the static magnetic field applied along the disk axis. If the field amplitude is close to the switching threshold, Bloch line shape is changed to the opposite, deformed pillow- or barrel-shaped one. It is the origin of the inhomogeneous polarity switching: in the most thin places (in the line center or disk face surfaces respectively) Bloch line breaks and Bloch points are nucleated. Their motion switches Bloch line magnetization and, finally, vortex polarity in the sample. A qualitative description of this process is given using wired core model, an extension of the vortex core model to the three-dimensional case.

The stationary magnetization states of the ferromagnetic Möbius ring with easy-normal anisotropy are studied numerically. It is shown that in comparison with flat systems, the interplay between geometric chirality of the ring and magnetic chirality (clockwise or counter-clockwise magnetization rotation direction) appears due to curvature of the sample. Due to competition between magnetostatic interaction and anisotropy, the following stationary states are possible depending on the ring thickness and value of the anisotropy:

- i Vortex state in the case of weak anisotropy when magnetization lies preliminary in the ring surface.
- ii Topologically protected transversal domain wall in samples with strong anisotropy. The energetically favorable domain wall chirality is the opposite to the geometrical chirality of the ring and the preferable wall position is in the “vertical” place of the ring.
- iii The longitudinal domain wall with the energetically preferable chirality coinciding with the geometrical chirality of the ring is observed in systems with approximately the same strengths of the magnetostatic interaction and anisotropy.
- iv An odd number of transversal domain walls is observed in thick rings with strong easy-axis anisotropy.

The described coupling of chiralities is the result of exchange-induced effective Dzyaloshinskii–Moriya interaction. An effective exchange-induced anisotropy determines the position of the transverse domain wall in the ring.

Key words: vortex, Bloch point, magnetochiral effects

Пилиповський Олександр Васильович

Регулярна і хаотична динаміка топологічних збуджень у магнітних наносистемах. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 3. Формат $60 \times 84/16$. Обл.-вид. арк – 1.00

Підписано до друку 31.03.2016. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України,
03680, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б.