

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства  
освіти і науки України

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор  
ІМаг НАН України та МОН України  
д.ф.-м.н., професор

 **Олександр ТОВСТОЛИТКІН**  
«30» червня 2023 р.



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)**

**В 2 Сучасні методи моделювання у фізиці магнітних явищ**

(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 104 Фізика та астрономія

третього освітнього (освітньо-  
наукового) рівня вищої освіти – доктора  
філософії

Київ – 2023

**Розробник:** д. ф.-м. н., с. д. \_\_\_\_\_ Роман ВЕРБА  
(підпис)

**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол від 28.06.2023р. № 1

Голова науково-методичної ради \_\_\_\_\_ Ольга САЛЮК  
(підпис)

Робочу програму затверджено Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України

Протокол від 29 червня 2023 № 6-23

Голова Вченої ради \_\_\_\_\_ Олександр ТОВСТОЛИТКІН  
(підпис)

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником освітньої програми):** Фізика 30 червня 2023 р.

(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ Юрій ДЖЕЖЕРЯ  
(підпис)

Пролонговано Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІМаг НАН України та МОН України	підпис	№ протоколу, дата протоколу
20___ / 20___			
20___ / 20___			
20___ / 20___			
20___ / 20___			



# СУЧАСНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ У ФІЗИЦІ МАГНІТНИХ ЯВИЩ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітня програма	Фізика
Статус дисципліни	За вибором
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	3 кредити: 90 годин (денна: 26 годин – лекції, 24 години – практичні заняття, 40 години – СР)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Залік
Розклад занять	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua/content/files/rozklad-2023-2024.pdf">http://ukr.imag.kiev.ua/content/files/rozklad-2023-2024.pdf</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: д. ф.-м. н., с. д. Верба Роман Володимирович, verrv@ukr.net моб. +38(095)902-23-68
Розміщення курсу	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua">http://ukr.imag.kiev.ua</a>

### Програма навчальної дисципліни

#### Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

**Опис дисципліни.** Програму навчальної дисципліни «Сучасні методи моделювання у фізиці магнітних явищ» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика» підготовки доктора філософії спеціальності 104 «Фізика та астрономія». У результаті вивчення дисципліни аспірант повинен поглиблено орієнтуватись у методах моделювання магнітної динаміки, у першу чергу мікромагнітних методах, володіти навичками написання програм для мікромагнітного моделювання у пакеті MuMax3, а також методами обробки та інтерпретації даних моделювання.

**Мета навчальної дисципліни.** Метою навчальної дисципліни є ознайомлення аспірантів із сучасними методами моделювання статичних та динамічних властивостей магнітних

структур, в першу чергу з методами мікромагнітного моделювання із використанням вільно доступного пакету моделювання MuMax3.

**Предмет навчальної дисципліни:** методи мікромагнітного моделювання магнітних мікро- та наноструктур, .

**Програмні результати навчання:**

*Компетентності:*

ЗК03. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методика, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

*Результати навчання:*

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

РН04. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп'ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

**Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

**Пререквізити.** Для успішного засвоєння курсу «Сучасні методи моделювання у фізиці магнітних явищ» аспірант має опанувати нормативні дисципліни «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» та «Актуальні проблеми фізики магнітних явищ».

**Постреквізити.** Знання, отримані аспірантами з дисципліни «Сучасні методи моделювання у фізиці магнітних явищ» використовуються при виконанні дисертаційних досліджень, підготовці наукових доповідей та статей.

**Зміст навчальної дисципліни**

Назви тем	Кількість годин			
	Всього	У тому числі		
		Лекції	Практичні заняття	СР
Тема 1. Основи мікромагнітного підходу.	4	2	-	2
Тема 2. Знайомство з пакетом мікромагнітного моделювання MuMax3.	6	2	2	2
Тема 3. Вивід та обробка даних моделювання.	8	2	2	4
Тема 4. Складні геометричні структури та області в MuMax3.	8	2	2	4
Тема 5. Моделювання статичних властивостей магнітних структур.	8	2	2	4
Тема 6. Моделювання спектру та структури спінових хвильових мод.	10	2	4	4

Тема 7. Просторово неоднорідні статичні та динамічні поля.	8	2	2	4
Тема 8. Моделювання динаміки, індуковано спіновим струмом.	8	2	2	4
Тема 9. Розширення пакету MuMax3.	8	2	2	4
Тема 10. Моделювання стохастичної динаміки намагніченості.	8	2	2	4
Тема 11. Методи моделювання нелінійно багатомодової динаміки намагніченості.	10	2	4	4
<b>Разом</b>	<b>86</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>40</b>
МКР	2	2		
Залік	2	2		
<b>Всього годин</b>	<b>90</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>40</b>

## Навчальні матеріали та ресурси

### Базова література.

1. W. F. Brown, *Micromagnetics* (Wiley, New York, 1963).
2. A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge, The design and verification of MuMax3, *AIP Adv.* **4**, 107133 (2014).
3. MuMax3 – GPU-accelerated micromagnetism [Електронний посібник користувача]. <https://mumax.github.io/index.html>
4. R. V. Verba, A. Hierro-Rodriguez, D. Navas, J. Ding, X. M. Liu, A. O. Adeyeye, K. Y. Guslienko, G. N. Kakazei, Spin-wave excitation modes in thick vortex-state circular ferromagnetic nanodots, *Phys.Rev. B* **93**, 214437 (2016).
5. M. d’Aquino, C. Serpico, and G. Miano, Geometrical integration of Landau-Lifshitz-Gilbert equation based on the mid-point rule, *J. Comp. Phys.* **209**, 730 (2005).
6. V. Tyberkevych, A. Slavin, P. Artemchuk, and G. Rowlands, Vector hamiltonian formalism for nonlinear magnetization dynamics, препринт arXiv:2011.13562 (2020).

### Допоміжна література.

7. D. Navas, R. V. Verba, A. Hierro-Rodriguez, S. A. Bunyaev, X. Zhou, A. O. Adeyeye, O. V. Dobrovolskiy, B. A. Ivanov, K. Y. Guslienko, G. N. Kakazei, Route to form skyrmions in soft magnetic films, *APL Mater.* **7**, 081114 (2019).
8. Р. В. Верба, Ю. І. Джежеря, В. Ю. Боринський, Д. М. Поліщук, А. Ф. Кравець, Магнітна та термоіндукована динаміка у наноелементах синтетичних антиферромагнетиків (Діса плюс, Харків, 2023).
9. R. Verba, G. Melkov, V. Tiberkevich, and A. Slavin, Fast switching of a ground state of a reconfigurable array of magnetic nano-dots, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 192412 (2012).
10. A. Etesamirad, J. Kharlan, R. Rodriguez, I. Barsukov, and R. Verba, Controlling Selection Rules for Magnon Scattering in Nanomagnets by Spatial Symmetry Breaking, *Phys. Rev. Applied* **19**, 044087 (2023).

## Навчальний контент

### Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

#### Лекційні заняття.

№	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СР)
1	Лекція 1. Основи мікромагнітного підходу. Континуальне наближення для магнітної динаміки. Рівняння Ландау-Ліфшиця-Гільберта. [1].
2	Лекція 2. Знайомство з пакетом мікромагнітного моделювання MuMax3. Основні принципи та властивості пакету. Встановлення пакету. Інтерфейс. [2, 3]
3	Лекція 3. Вивід та обробка даних моделювання. Величини для виводу. Вивід зрізу даних. Просторові розподіли – формати OVF1 та OVF2. Зчитування та обробка виведених даних [2, 3].
4	Лекція 4. Складні геометричні структури та області в MuMax3. Розбиття області моделювання на регіони. Глобальні та регіональні параметри. Вивід даних з регіону. [2, 3].
5	Лекція 5. Моделювання статичних властивостей магнітних структур. Мінімізації енергії та її особливості. Моделювання гістерезису. Топологічні структури. Можливі проблеми та їх вирішення. [2, 3, 7].
6	Лекція 6. Моделювання спектру та структури спін-хвильових мод. Імпульсне збудження та Фур'є перетворення. Моделювання реальних спектрів спін-хвильового резонансу. Моделювання профілів спін-хвильових мод. [2, 4, 8].
7	Лекція 7. Просторово неоднорідні статичні та динамічні поля. Функція Mask. [2, 3].
8	Лекція 8. Моделювання динаміки, індукованої спіновим струмом. Спін-поляризований та чистий спіновий струми. Неадіабатичний момент Жанг-Лі. [2, 3].
9	Лекція 9. Розширення пакету MuMax3. Додавання власних членів до енергії. Міжшаровий обмін та моделювання синтетичних та природних антиферромагнетиків. [2, 3, 7-8].
10	Лекція 10. Моделювання стохастичної динаміки намагніченості. Теплові флуктуації в MuMax3. Схеми для моделювання стохастичної динаміки в інших пакетах. Mid-point rule [2, 5, 9].
11	Лекція 11. Методи моделювання нелінійної багатомодової динаміки намагніченості. Вкорочені рівняння для динаміки амплітуд мод. Гамільтонівський формалізм для розрахунку коефіцієнтів міжмодової взаємодії. [6, 10].

### Практичні заняття

№	Назва теми заняття та перелік основних питань
1	Знайомство з пакетом мікромагнітного моделювання MuMax3. Встановлення пакету. Взаємодія з інтерфейсом. Тестові програми. [2, 3].
2	Вивід та обробка даних моделювання. Разовий та періодичний вивід. Вивід зрізу даних. Просторові розподіли – формати OVF1 та OVF2. Зчитування та обробка виведених даних. Програма MuView. [2, 3].
3	Складні геометричні структури та області в MuMax3. Розбиття області моделювання на регіони. Глобальні та регіональні параметри. Вивід даних з регіону. [2, 3].
4	Моделювання статичних властивостей магнітних структур. Моделювання гістерезису. Топологічні структури. [2, 3, 7].
5	Моделювання спектру та структури спін-хвильових мод. Імпульсне збудження та Фур'є перетворення. Моделювання реальних спектрів спін-хвильового резонансу. Моделювання профілів спін-хвильових мод. [2, 4, 8].

6	Просторово неоднорідні статичні та динамічні поля. Функція Mask. [2, 3].
7	Моделювання динаміки, індукованої спіновим струмом. Спін-поляризований та чистий спіновий струми. Неадіабатичний момент Жанг-Лі. Моделювання спінтронних осциляторів. [2, 3].
8	Розширення пакету MuMax3. Додавання власних членів до енергії. Двовісна анізотропія. Міжшаровий обмін та моделювання синтетичних та природних антиферромагнетиків. [2, 3, 8].
9	Моделювання стохастичної динаміки намагніченості. Теплові флуктуації в MuMax3. Схеми для моделювання стохастичної динаміки в інших пакетах. Написання програми з використанням mid-point rule. [2, 5, 9].
10	Методи моделювання нелінійної багатомодової динаміки намагніченості. Моделювання вкорочених рівнянь для динаміки амплітуд мод. Розрахунок коефіцієнтів міжмодової взаємодії на основі змодельованих профілів. [6, 10].

### Самостійна робота аспіранта

З метою чіткої організації самостійної роботи студентів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки до практичних занять та написання прикладних програм. Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до практичних занять	28
2	Підготовка до МКР	6
3	Підготовка до заліку	6

### Політика та контроль

#### Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-інститутського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (відключення телефонів є обов'язковим);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 8 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-інститутського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-інститутського розпорядку).

#### Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Поточний контроль: виконання завдань на практичних заняттях, МКР.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестрова атестація проводиться у вигляді заліку. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і інститутська шкала.

Умови допуску до семестрового контролю: виконання завдань на практичних заняттях та СР (для допуску необхідно отримати не менше 40 балів).

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на практичних заняттях;

- 2) за модульну контрольну роботу (МКР);  
3) за відповіді на заліку.

Система рейтингових балів

1) Практичні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 6. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на практичних заняттях становить  $10 \times 6 = 60$  балів. Нарахування балів на одному практичному занятті (за написання прикладних програм):

- відмінне виконання практичних завдань – 6 балів;
- дуже добре, добре виконання практичних завдань – 5,4 бали;
- достатнє, задовільне виконання практичних завдань – 3,2 бали.

2) Модульна контрольна робота (МКР). Ваговий коефіцієнт дорівнює 12. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить  $1 \times 12 = 12$  балів. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 11-12 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) 8-10 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) 6-7 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

3). Залік. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюються у 14 балів. Всього  $2 \times 14 = 28$  балів.

Нарахування балів за відповідь на заліку:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 25-28 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 18-24 бали;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 12-18 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів (практичні заняття та МКР), він може отримати залік автоматом.

Для виставлення фінальних оцінок рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за інститутською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
90-100	Відмінно
75-89	Добре
60-74	Задовільно
Менше 60	Незадовільно
Не виконано інші умови допуску до заліку	Не допущено



## **Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Континуальне наближення для магнітної динаміки. Область застосування та обмеження.
2. Рівняння Ландау-Ліфшиця, магнітна енергія, ефективне поле, дисипативні доданки.
3. Основні принципи та властивості пакету MuMax3. Особливості взаємодії з інтерфейсом.
4. Вивід даних моделювання. Величини для виводу. Вивід зрізу даних.
5. Вивід просторових розподілів. Формати OVF1 та OVF2.
6. Зчитування та обробка виведених даних.
7. Розбиття області моделювання на регіони. Глобальні та регіональні параметри. Вивід даних з регіону.
8. Моделювання статичних властивостей магнітних структур. Мінімізації енергії та її особливості.
9. Методи моделювання гістерезису.
10. Моделювання топологічних структур.
11. Методи моделювання спектру спін-хвильового резонансу.
12. Моделювання профілів спін-хвильових мод.
13. Задання просторово неоднорідних статичних та динамічних полів.
14. Моделювання динаміки, індукованої спіновим струмом.
15. Додавання власних членів до енергії.
16. Зміна обміну між областями. Міжшаровий обмін та моделювання синтетичних антиферромагнетиків.
17. Можливості MuMax3 для моделювання природних антиферромагнетиків.
18. Моделювання стохастичної динаміки намагніченості. Теплові флуктуації в MuMax3.
19. Моделювання стохастичного рівняння Ландау-Ліфшиця-Гільберта. Mid-point rule.
20. Методи моделювання нелінійної багатомодової динаміки намагніченості. Вкорочені рівняння для динаміки амплітуд мод.
21. Гамільтонівський формалізм для розрахунку коефіцієнтів міжмодової взаємодії і його інтеграція з мікромагнітними розрахунками.