



НАЗВА КУРСУ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Третій (освітньо-науковий)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>104 Фізика та астрономія</i>
Освітня програма	<i>Антиферромагнітна спінтроніка</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів/150 годин</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік</i>
Розклад занять	
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, телеграм-чат «Антиферромагнітна спінтроніка» https://t.me/+f9pslW_rgYMONzgy</i>
Розміщення курсу	<i>На платформі дистанційного навчання Google Клас за посиланням https://classroom.google.com/c/NTg4NTEwMzQ5MzU0?cjc=wq4dmke , код курсу wq4dmke, постійне посилання на Google Meet https://meet.google.com/cck-xcyr-mzd</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Антиферромагнітні матеріали можуть представляти майбутнє спінтронних застосувань завдяки численним цікавим властивостям, які вони поєднують: вони стійкі проти збурень, спричинених магнітними полями, не створюють магнітостатичних полів розсіяння, демонструють надшвидку динаміку і здатні створювати значні магнітотранспортні ефекти. Протягом останнього десятиліття великі зусилля були спрямовані на розкриття властивостей спінового транспорту в антиферромагнітних матеріалах. Чи можна використовувати спіновий транспорт для керування антиферромагнітним порядком та як можна детектувати збурення антиферромагнітного впорядкування - ось деякі з тих захоплюючих проблем, які вирішуються в даний час. Антиферромагнітна спінтроніка розпочала з досліджень перенесення спінів і зазнала певного поштовху протягом останніх кількох років з публікацією новаторських статей про використання спін-орбітальних взаємодій в антиферромагнетиках. Антиферромагнітна спінтроніка пропонує можливості для кардинально нових концепцій маніпуляцій спінами в електроніці.

Будуть вивчатися найвизначніші спінтронні ефекти на основі теоретичного та експериментального аналізу магнітних властивостей антиферромагнітних матеріалів. Будуть вивчатися як ефекти, пов'язані з переносом спіну, такі як обертальний момент із при переносі спіну, довжина проникнення спіна, рух доменної стінки та динаміка "намагнічування", так і явища, пов'язані зі спін-орбітою, такі як (тунельний) анізотропний магнітоопір, спін-хол та зворотні спінові гальванічні ефекти. Також будуть вивчатися ефекти, пов'язані зі спіновою

калоритронікою, такі як спіновий ефект Зеєбека, ефекти пов'язані з транспортом магніонів в антиферромагнетиках, ефекти розповсюдження спінових хвиль в антиферромагнетиках.

Мета навчальної дисципліни – формування у аспірантів компетентностей в області антиферромагнітної спінтроники.

Предмет навчальної дисципліни – явища протікання спінових струмів та розповсюдження спінових хвиль в нанорозмірних антиферромагнетиках.

Програмні результати навчання:

Компетентності: (ФК01) здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання в антиферромагнітній спінтрониці та дотичних до них міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з магнетизму та суміжних галузей.

Знання: (ПРН01) передові концептуальні та методологічні знання з антиферромагнітної спінтроники і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень з відповідного напрямку, отримання нових знань та/або здійснення інновацій.

Уміння: (ПРН05) планувати і виконувати дослідження з антиферромагнітної спінтроники та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати у контексті усього комплексу сучасних знань з антиферромагнітної спінтроники.

Після засвоєння матеріалу дисципліни аспіранти отримають знання з антиферромагнітної спінтроники; набудуть уміння застосовувати здобуті фундаментальні знання теорії спін-залежних ефектів в антиферромагнетиках при розробці нових наукових методик та в новітніх промислових технологій, в зразках нових матеріалів, для пояснення отриманих даних і передбачення нових наукових результатів, класифікувати та описувати явища протікання спінових струмів в антиферромагнетиках, скласти математичні моделі опису спінових струмів в антиферромагнетиках; отримають досвід практичного застосування методів опису спінових струмів в антиферромагнетиках, проведення досліджень і узагальнення їх результатів в області явищ і процесів, що відбуваються та супроводжують протікання спінових струмів в антиферромагнетиках, самостійної роботи з навчальною, науковою та довідковою літературою у області антиферромагнітної спінтроники українською та іноземними мовами.

2. Зміст навчальної дисципліни

Назви тем	Кількість годин			
	Всього	У тому числі		
		Лекції	Практичні заняття	СРС
Тема 1. Спін та спіновий магнітний момент електронів, атомів, фотонів.	8	2	1	5
Тема 2. Спінтроніка та пристрої пам'яті. Загальні принципи антиферромагнітної спінтроники. Спін-поляризований струм.	8	2	1	5
Тема 3. Процеси перетворення «спін-заряд». Зворотній спіновий ефект Хола. Зворотній ефект Рашиби-Едельштейна. Спіновий ефект Зеєбека. Спін-залежні ефекти в магнітних наноструктурах.	8	2	1	5
Тема 4. Обмінна взаємодія, обмінна анізотропія (exchange bias).	8	2	1	5

Тема 5. Повна енергія антиферромагнетика.	8	2	1	5
Тема 6. Запис і зчитування магнітних станів в антиферромагнетиках. Генерування, детектування і розповсюдження спінових струмів в антиферромагнетиках. Антиферромагнітні матеріали для спінтроніки.	8	2	1	5
Тема 7. Швидка динаміка магнітних моментів в антиферромагнетиках. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку.	8	2	1	5
Тема 8. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку в сігма-моделі.	8	2	1	5
Тема 9. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку в сігма-моделі в сферичній системі координат для вектора антиферромагнетизма.	8	2	1	5
Тема 10. Магнітна пам'ять на основі антиферромагнітних матеріалів. Антиферромагнітні домени, доменні стінки, скірміони, скірміоніуми.	8	2	1	5
Тема 11. Докритичний та надкритичний рух антиферромагнітних доменних стінок та скірміонів.	8	2	1	5
Тема 12. Ефективна маса антиферромагнітних скірміонів. Рівняння Тіля. Сили, що діють на антиферромагнітні скірміони.	8	2	1	5
Тема 13. Топологічні характеристики антиферромагнітних доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів.	8	2	1	5
Тема 14. Спінові хвилі в антиферромагнетиках. Закон дисперсії спінових хвиль.	8	2	1	5
Тема 15. Антиферромагнітні магнетні кристали.	8	2	1	5
Тема 16. Поняття про спін-орбітроніку.	8	2	1	5
Тема 17. Магнони.	8	2	1	5
Тема 18. Квантова теорія спінових хвиль.	8	2	1	5
Разом	144	36	18	90
Залік	6			6
Всього годин	150	36	18	96

3. Навчальні матеріали та ресурси

Базова [1–5]

Додаткова [6–11] ([6] [7] [8] [9] [10] [11])

- [1] О. І. Товстолиткін, М. О. Боровий, В. В. Курилюк, and Ю. А. Куницький, *Фізичні Основи Спінтроніки* (Нілан-ЛТД, Вінниця, 2014).
- [2] S. Bandyopadhyay and M. Cahay, *Introduction to Spintronics* (CRC Press Taylor & Francis Group, 2008).
- [3] T. X. Jungwirth, Marti, P. Wadley, and J. Wunderlich, *Antiferromagnetic Spintronics*, ArXiv: **1509.05296**, 1 (2015).
- [4] T. Chirac, *New Spintronic Components Based on Antiferromagnetic Materials*, Université Paris-Saclay, 2020.
- [5] C. Bull, *Development of MTJs and Antiferromagnetic Materials for Spintronic Applications*, the University of Manchester, 2020.
- [6] V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono, and Y. Tserkovnyak, *Antiferromagnetic Spintronics*, Rev. Mod. Phys. **90**, 015005 (2018).
- [7] A. Hirohata, *Advances in Antiferromagnetic Spintronics*, Magnetochemistry **8**, 37 (2022).

- [8] E. V. Gomonay and V. M. Loktev, *Spintronics of Antiferromagnetic Systems (Review Article)*, *Low Temp. Phys.* **40**, 17 (2014).
- [9] R. M. Menezes, J. Mulkers, C. C. de S. Silva, and M. V. Milošević, *Deflection of Ferromagnetic and Antiferromagnetic Skyrmions at Heterochiral Interfaces*, *Phys. Rev. B* **99**, 104409 (2019).
- [10] X. Wu and O. Tchernyshyov, *How a Skyrmion Can Appear Both Massive and Massless*, *SciPost Phys.* **12**, 159 (2022).
- [11] A. M. Kosevich, B. A. Ivanov, and A. S. Kovalev, *Magnetic Solitons*, *Phys. Rep.* **194**, 117 (1990).

Навчальний контент

4. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Лекція 1. Спін та спіновий магнітний момент електронів, атомів, фотонів [1–5].
2	Лекція 2. Спінтроніка та пристрої пам'яті. Загальні принципи антиферромагнітної спінтроніки. Спін-поляризований струм [1–5].
3	Лекція 3. Процеси перетворення «спін-заряд». Зворотній спіновий ефект Хола. Зворотній ефект Рашиби-Едельштейна. Спіновий ефект Зеєбека. Спін-залежні ефекти в магнітних наноструктурах [1–5].
4	Лекція 4. Обмінна взаємодія, обмінна анізотропія (<i>exchange bias</i>) [1–5].
5	Лекція 5. Повна енергія антиферромагнетика [1–5].
6	Лекція 6. Запис і зчитування магнітних станів в антиферромагнетиках. Генерування, детектування і розповсюдження спінових струмів в антиферромагнетиках. Антиферромагнітні матеріали для спінтроніки [1–5].
7	Лекція 7. Швидка динаміка магнітних моментів в антиферромагнетиках. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку [1–5].
8	Лекція 8. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку в сігма-моделі [11].
9	Лекція 9. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетіку в сігма-моделі в сферичній системі координат для вектора антиферромагнетизма [11].
10	Лекція 10. Магнітна пам'ять на основі антиферромагнітних матеріалів. Антиферромагнітні домени, доменні стінки, скірміони, скірміоніуми [1–5].
11	Лекція 11. Докритичний та надкритичний рух антиферромагнітних доменних стінок та скірміонів [1–5].
12	Лекція 12. Ефективна маса антиферромагнітних скірміонів. Рівняння Тіля. Сили, що діють на антиферромагнітні скірміони [1–5].
13	Лекція 13. Топологічні характеристики антиферромагнітних доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів [1–5].
14	Лекція 14. Спінові хвилі в антиферромагнетиках. Закон дисперсії спінових хвиль [1–5].
15	Лекція 15. Антиферромагнітні магнетні кристали [1–5].
16	Лекція 16. Поняття про спін-орбітроніку [1–5].
17	Лекція 17. Магнони [1–5].
18	Лекція 18. Квантова теорія спінових хвиль [1–5].

Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять з кредитного модуля передбачають формування у студентів практичних навичок представлення результатів наукових досліджень.

№	Назва теми заняття та перелік основних питань
---	---

	<i>(перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)</i>
1	<i>Практичне заняття 1. Спін електронів, атомів, фотонів [1–5].</i>
2	<i>Практичне заняття 2. Обмінна взаємодія, обмінна анізотропія (exchange bias) [1–5].</i>
3	<i>Практичне заняття 3. Повна енергія антиферромагнетика [1–5].</i>
4	<i>Практичне заняття 4. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетику [1–5].</i>
5	<i>Практичне заняття 5. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетику в сігма-моделі [1–5].</i>
6	<i>Практичне заняття 6. Антиферромагнітні домени, доменні стінки, скірміони, скірміоніуми [1–5].</i>
7	<i>Практичне заняття 7. Докритичний та надкритичний рух антиферромагнітних доменних стінок та скірміонів [1–5].</i>
8	<i>Практичне заняття 8. Ефективна маса антиферромагнітних скірміонів. Рівняння Тіля. Сили, що діють на антиферромагнітні скірміони [1–5].</i>
9	<i>Практичне заняття 9. Магнони. Квантова теорія спінових хвиль [1–5].</i>

Контрольні роботи

Метою контрольної роботи є перевірка вмінь аспірантів самостійно розв'язувати наукові задачі з антиферромагнітної спінтроники, вмінь використання відповідних теоретичних, експериментальних методів та програмних продуктів.

Перевірка практичних навичок відбувається у вигляді контрольної роботи, завданнями до якої є складання презентації власних наукових досліджень в галузі антиферромагнітної спінтроники.

Перевірка знання теоретичного матеріалу на контрольних заходах відбувається у вигляді усних запитань викладача та відповідей студента з окремих розділів програми.

5. Самостійна робота студента/аспіранта

№	Назва теми СРС та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)	Кількість годин СРС
1.	<i>СРС 1. Спін електронів, атомів, фотонів [6–11].</i>	5
2.	<i>СРС 2. Магнітні властивості матеріалів [6–11].</i>	5
3.	<i>СРС 3. Спін-залежні ефекти в магнітних наноструктурах [6–11].</i>	5
4.	<i>СРС 4. Спінова динаміка [6–11].</i>	5
5.	<i>СРС 5. Спінові явища в низькорозмірних структурах [6–11].</i>	5
6.	<i>СРС 6. Магнони. Квантова теорія спінових хвиль [6–11].</i>	5
7.	<i>СРС 7. Експериментальні методи дослідження магнітних властивостей наноматеріалів [6–11].</i>	5
8.	<i>СРС 8. Мікромагнітне моделювання [6–11].</i>	5
9.	<i>СРС 9. Магнітна пам'ять на основі антиферромагнітних матеріалів [6–11].</i>	5
10.	<i>СРС 10. Запис і зчитування магнітних станів в антиферромагнетиках [6–11].</i>	5
11.	<i>СРС 11. Генерування, детектування і розповсюдження спінових струмів в антиферромагнетиках [6–11].</i>	5
12.	<i>СРС 12. Швидка динаміка магнітних моментів в антиферромагнетиках. Рівняння Ландау-Ліфшиця в антиферромагнетику [6–11].</i>	5
13.	<i>СРС 13. Антиферромагнітні матеріали для спінтроники [6–11].</i>	5
14.	<i>СРС 14. Моделювання антиферромагнітних наноструктур [6–11].</i>	5

15.	СРС 15. Експериментальні дослідження наддивидкої динаміки в магнітоелектричних антиферромагнетиках [1–12].	5
16.	СРС 16. Процеси перетворення «спін-заряд». Зворотній спіновий ефект Хола. Зворотній ефект Рашиби-Едельштейна. Спіновий ефект Зеєбека [1–12].	5
17.	СРС 17. Розробка магнітних тунельних контактів та антиферромагнітні матеріали для застосувань спінтроники [1–12].	5
18.	СРС 18. Нові перспективні напрямки антиферромагнітної спінтроники [1–12].	11

Політика та контроль

6. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-університетського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила захисту індивідуальних завдань (тестування <https://classroom.google.com/c/NTq0MTq2MjUwODQx?cjc=2ijvjcs>);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 7 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-університетського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-університетського розпорядку);
- Студент зобов'язаний зареєструватися на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals (в минулому G Suit For Education) на домені @LLL.kpi.ua та приєднатися до Google Класу «Антиферромагнітна спінтроніка» за посиланням <https://classroom.google.com/c/NTg4NTEwMzQ5MzU0?cjc=wq4dmke>. Для цього студенту необхідно спочатку отримати акаунт в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua. Для отримання акаунта в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua необхідно заповнити Google Форму: https://sikorsky-distance.kpi.ua/reg_gsuite/. Після реєстрації та модерації заявки студента, адміністратор надішле студенту на пошту пароль та логін до акаунту, з яким студент зможе використовувати всі доступні інструменти та сервіси Google Workspace for Education Fundamentals. Google Workspace for Education Fundamentals – це пакет спеціалізованого хмарного програмного забезпечення, інструментів для спільної роботи та дистанційного навчання від компанії Google. Основна складова пакету – система управління навчанням Google Клас, яка дозволяє викладачу створювати навчальні класи, оцінювати завдання, надавати учням зворотній зв'язок, публікувати оголошення і поширювати навчальні матеріали. Викладач може бачити, хто виконав завдання, а хто ще продовжує над ним працювати, а також читати питання і коментарі учнів. Для приєднання до навчального курсу «Антиферромагнітна спінтроніка» студенту потрібно перейти у Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com>, натиснути зображення «+» у верхньому правому кутку браузера, вибрати «Приєднатися до класу» та ввести код курсу 2ijvjcs. Акаунти студентів, які приєдналися до Google Класу не з акаунта на домені @LLL.kpi.ua, будуть вилучатися з навчального курсу «Антиферромагнітна спінтроніка» Google Класу тому, що автоматичний імпорт оцінок за тестування можливий виключно з акаунта на домені @LLL.kpi.ua. Система Google Клас

автоматично надсилає кожному студенту бали по кожному з видів контролю на електронну пошту. Тому для ознайомлення з балами за кожен окремий вид контролю студенту необхідно змінити налаштування електронної пошти так, щоб ці електронні листи не потрапляли у спам. Всі виконані завдання для перевірки викладачем студент повинен завантажувати через систему Google Клас (результати виконання завдань, надіслані через телеграм-чат перевіряються не будуть);

- Листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через та телеграм-чат «Антиферромагнітна спінтроніка» https://t.me/+f9pslW_rgYM0Nzgy .

7. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль: тести

Календарний контроль: контроль виконання самостійної роботи проводиться двічі на семестр у формі тестів як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

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

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни згідно з робочим навчальним планом.

Семестр	Навчальний час		Розподіл навчальних годин			Контрольні заходи
	Кредити	Акад. год.	Лекції	Практичні заняття	СРС	Семестр атест.
2	5	150	36	18	96	Екзамен

Рейтинг студентів 2 курсу магістратури ФМФ з «Антиферромагнітної спінтроніки» складається з балів, які вони отримують за:

- 1) практичні заняття
- 2) СРС
- 3) екзамен.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Студентам, які успішно виконують завдання практичних занять та СРС (самостійна робота студентів), можуть нараховуватися за семестр максимум 60 балів. СРС полягає у самостійній роботі із вивчення лекційного матеріалу. Перевірка виконання СРС та вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях здійснюватиметься оцінюванням результатів тестування на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua в системі Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com/c/NTg4NTEwMzQ5MzU0?cjc=wq4dmke> . Кожен з тестів можливо пройти тільки один раз. Рейтингові (вагові) бали занять і рейтингові оцінки по всіх видах контролю в Google Класі дорівнюють відповідним балам в Силабусі з коефіцієнтом 10 для зручності розрахунку балів (щоб не використовувати дробові числа). Відповідно перед кожною атестацією, а також в кінці семестру всі набрані студентом бали в Google Класі будуть ділитися на 10 і вноситись до системи АІС «Електронний кампус» КПІ імені Ігоря Сікорського.

Необхідною умовою допуску до екзамену з «Антиферромагнітної спінтроніки» є задовільне виконання СРС (не менше 24 балів).

Екзаменаційна робота з «Антиферромагнітної спінтроніки» складається з 2 питань (2 теоретичних питання), кожне теоретичне питання максимально оцінюється в 20 балів. Всього 40 балів.

Критерії оцінювання (до екзамену):

- *Студент демонструє фрагментарні знання навчального матеріалу, не достатньо розуміючи зв'язок між окремими розділами програми, робить не достатньо обґрунтовані висновки (0-23 бали).*
- *Студент правильно відтворює навчальний матеріал, знає основоположні теорії і факти, вміє наводити окремі власні приклади на підтвердження певних думок (24-30 балів)*

- Студент добре володіє вивченим матеріалом, застосовує знання в стандартних ситуаціях, вміє аналізувати і систематизувати інформацію, використовує загальновідомі докази із самостійною і правильною аргументацією (31-35 балів)
- Студент має гнучкі знання в межах вимог навчальної програми, аргументовано використовує їх в різних ситуаціях, уміє знаходити інформацію та аналізувати її, ставити і розв'язувати проблеми (36-40 балів)

Сума вагових балів контрольних заходів з «Антиферромагнітної спітроніки» протягом семестру складає:

$R_C = 60$ балів.

Екзаменаційна складова шкали **$R_E = 40$ балів.**

Рейтингова шкала з Антиферромагнітної спітроніки складає **$R_D = R_C + R_E = 100$ балів.**

Для виставлення оцінок до залікової книжки рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Студенти, які набрали протягом семестру стартовий рейтинг з дисципліни (r_C) менше 0,4 $R_C = 24$ балів, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з Антиферромагнітної спітроніки і мають академічну заборгованість.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
95-100	Відмінно
85-94	Дуже добре
75-84	Добре
65-74	Задовільно
60-64	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані інші умови допуску до екзамену	Не допущено

8. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль наведено в тестах в системі дистанційного навчання Google Клас <https://classroom.google.com/c/NTg4NTEwMzQ5MzU0?cjc=wq4dmke> ;
- можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою не передбачена.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено професором кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, д.ф.-м.н., професором Горобець О.Ю.

Ухвалено кафедрою загальної фізики та моделювання фізичних процесів (протокол № 06-23 від 07.06.2023).

Погоджено Методичною комісією Фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2023).