



СПІН-ОРБІТРОНІКА

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 і астрономія</i>
Освітня програма	<i>Фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)/дистанційна/змішана</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити/120 годин</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік/МКР</i>
Розклад занять	<i>час і місце проведення аудиторних викладені на сайті http://roz.kpi.ua/</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни Практичні заняття: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни</i>
Розміщення курсу	<i>На платформі дистанційного навчання Google Клас за посиланням https://classroom.google.com/c/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf, код курсу cpi2lpf, постійне посилання на Google Meet https://meet.google.com/gbq-qxsa-nht</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Класичні спінтронні пристрої використовують обмінну взаємодію між провідними електронними спінами та локальними спінами в магнітних матеріалах для створення спін-поляризованих струмів або для маніпулювання напрямком намагніченості наномагнітів шляхом переносу спіну спін-поляризованими струмами. Новий напрямок спінтроніки – спін-орбітроніка використовує спін-орбітальну взаємодію у немагнітних матеріалах замість обмінної взаємодії в магнітних матеріалах для генерування, виявлення або використання спін-поляризованих струмів. Це відкриває шлях до спінових пристроїв, виготовлених лише з немагнітних матеріалів і працюючих без магнітних полів.

Буде вивчатись використання спін-орбітальної взаємодії для створення нових типів топологічних магнітних об'єктів, таких як магнітні скірміони або доменні стінки Дзялошинського-Морія. Також будуть вивчатись нові досягнення спін-орбітроніки, такі як зародження та динаміка індукованого струмом руху скірміонів у плівках або багаточастикових нанорозмірних структурах, а також перетворення між струмом з переносу заряду і спіновим струмом за допомогою спін-орбітальної взаємодії (спін-хол ефект).

Мета навчальної дисципліни – формування у аспірантів компетентностей в області спін-орбітроніки.

Предмет навчальної дисципліни – явища протікання передачі спин-орбітального моменту та розповсюдження спінових хвиль в нанорозмірних твердотільних матеріалах.

Програмні результати навчання:

Компетентності: (ФК01) здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання в спин-орбітроніці 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 зі спин-орбітроніки 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 зі спин-орбітроніки та дотичних міждисциплінарних напрямків з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати у контексті усього комплексу сучасних знань зі спин-орбітроніки.

Після засвоєння матеріалу дисципліни аспіранти отримають знання зі спин-орбітроніки; набудуть уміння застосовувати здобуті фундаментальні знання теорії спин-залежних ефектів в магнетиках 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, які ґрунтуються на спин-орбітальній взаємодії магнетиках, складати математичні моделі опису спин-орбітальних ефектів в магнетиках; отримають досвід практичного застосування методів опису спин-орбітальних ефектів в магнетиках, проведення досліджень і узагальнення їх результатів в області явищ і процесів, що відбуваються та супроводжують спин-орбітальні ефекти в магнетиках, самостійної роботи з навчальною, науковою та довідковою літературою у області спин-орбітроніки українською та іноземними мовами.

2. Зміст навчальної дисципліни

Назви тем	Кількість годин			
	Всього	У тому числі		
		Лекції	Практичні заняття	СРС
Тема 1. Спінтроніка. Магніторезистивна оперативна пам'ять (MRAM). Магнітні доменні стінки та пам'ять. Від спінтроніки до орбітроніки: спин-орбітальний зв'язок.	5,5	1	0,5	4
Тема 2. Хіральність. Основи хіральных спінових структур. Взаємодія Дзялошинського-Морія та нові типи магнітоопору.	5,5	1	0,5	4
Тема 3. Нерівноважний орбітальний кутовий момент для орбітроніки. Фізичні принципи спінтронної пам'яті. Орбітальний ступінь свободи: чи «заморожується» у твердих тілах? Створення нерівноважного спіну. Орбітальний момент імпульсу в нерівноважних системах. Орбітальний момент імпульсу для спінтроніки. Орбітроніка: за межами спінтроніки.	5,5	1	0,5	4
Тема 4. Спінтроніка зустрічається з орбітронікою: поява орбітального моменту імпульсу в твердих тілах. Теоретичні основи: генерація орбітального моменту імпульсу. Орбітальний	5,5	1	0,5	4

ефект Рашиби та орбітальний ефект Едельштейна. Орбітальний ефект Холла. Експериментальне виявлення орбітального моменту імпульсу. Майбутні напрямки та перспективи.				
Тема 5. Експериментальний інструментарій. Методи виготовлення зразків. Методи вимірювання магнітних властивостей зразків. Бріллюєнівське розсіювання світла.	5,5	1	0,5	4
Тема 6. Порівняння схем на основі спінового моменту імпульсу (spin-transfer torque – STT) та орбітального моменту імпульсу (spin-orbit torque – SOT).	5,5	1	0,5	4
Тема 7. Матеріали для спін-орбітальних моментів. Спін-орбітальні моменти в металах і металевих сплавах. Спін-орбітальні моменти в топологічних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в 2D матеріалах. Спін-орбітальні моменти в оксидах та магнітних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в антиферромагнетиках. Спін-орбітальні моменти в феримагнетиках.	6,5	2	0,5	4
Тема 8. Спін-орбітальний момент імпульсу в магнітних мультишарових матеріалах. Феноменологічний опис. Методи вимірювання. Аналіз напруги Холла. Феромагнітний резонанс. Магнітооптичний ефект Керра.	6,5	2	0,5	4
Тема 9. Спін-орбітальні моменти імпульсу в нецентросиметричних магнетиках. Немагнітні структури GaAs. Об'ємні феромагнітні матеріали (Ga,Mn)As та NiMnSb. Колінеарні антиферромагнетики. Антиферомагнітні топологічні ферміони Дірака. Магнітне накачування заряду в (Ga,Mn).	7	2	1	4
Тема 10. Спін-орбітальні моменти імпульсу та неоднорідні магнітні текстури. Динаміка доменної стінки під дією струму. Динаміка доменної стінки в стаціонарному режимі. Прецесійна динаміка доменної стінки. Намагнічені в площині зразки. Зразки з X доменами. Анізотропні зразки з Y доменами.	7	2	1	4
Тема 11. Перпендикулярно намагнічені зразки. Демонстрація спін-орбітальних обертових моментів при русі доменної стінки, спричиненому струмом. Рух доменної стінки під дією обертового моменту, спричиненого струмом. Двовимірні ефекти при русі доменної стінки, індукованого струмом. Рух доменної стінки під впливом комбінованих моментів.	7	2	1	4
Тема 12. Рух магнітних скірміонів під дією спін-орбітальних моментів. Вплив безпорядку.	7	2	1	4
Тема 13. Топологічні характеристики доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів в феро- та антиферромагнетиках.	7	2	1	4
Тема 14. Походження ефектів спін-орбітального зв'язку. Рівняння Дірака та рівняння Паулі.	7	2	1	4
Тема 15. Спінове розщеплення, спричинене інверсійною асиметрією.	7	2	1	4
Тема 16. Анізотропне зеєманівське розщеплення в квазі-2D системах.	7	2	1	4
Тема 17. Рівні Ландау та циклотронний резонанс.	7	2	1	4
Тема 18. Пристрої на основі спін-орбітальних моментів. Трьохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять (SOT-MRAM, STT-MRAM). Двохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять.	7	2	1	4

Нейроморфні пристрої та схеми на основі спин-орбітальних моментів. Безпольове перемикання. Міркування індустріалізації.				
Разом	116	30	14	72
Залік	4			4
Всього годин	120	30	14	76

3. Навчальні матеріали та ресурси

Базова [1–5]

Додаткова [6–12]

- [1] D. Go, Y. Mokrousov, and M. Kläui, Non-Equilibrium Orbital Angular Momentum for Orbitronics, Europhys. News 55, 28 (2024).
- [2] D. Jo, D. Go, G.-M. Choi, and H.-W. Lee, Spintronics Meets Orbitronics: Emergence of Orbital Angular Momentum in Solids, Npj Spintron. 2, 19 (2024).
- [3] S. Ning, H. Liu, J. Wu, and F. Luo, Challenges and Opportunities for Spintronics Based on Spin Orbit Torque, Fundam. Res. 2, 535 (2022).
- [4] X. Huang, S. Sayed, J. Mittelstaedt, S. Susarla, S. Karimeddiny, L. Caretta, H. Zhang, V. A. Stoica, T. Gosavi, F. Mahfouzi, Q. Sun, P. Ercius, N. Kioussis, S. Salahuddin, D. C. Ralph, and R. Ramesh, Novel Spin–Orbit Torque Generation at Room Temperature in an All-Oxide Epitaxial La 0.7 Sr 0.3 MnO 3 /SrIrO 3 System, Adv. Mater. 33, (2021).
- [5] Q. Shao, P. Li, L. Liu, H. Yang, S. Fukami, A. Razavi, H. Wu, K. Wang, F. Freimuth, Y. Mokrousov, M. D. Stiles, S. Emori, A. Hoffmann, J. Akerman, K. Roy, J.-P. Wang, S.-H. Yang, K. Garello, and W. Zhang, Roadmap of Spin–Orbit Torques, IEEE Trans. Magn. 57, 1 (2021).
- [6] T. Guillet, Tuning the Spin-Orbit Coupling in Ge for Spin Generation, Detection and Manipulation. Materials Science [Cond-Mat.Mtrl-Sci], Université Grenoble Alpes, 2020.
- [7] S. Ghosh and S. Grytsiuk, Orbitronics with Uniform and Nonuniform Magnetic Structures, in (2020), pp. 1–38.
- [8] A. Manchon, J. Železný, I. M. Miron, T. Jungwirth, J. Sinova, A. Thiaville, K. Garello, and P. Gambardella, Current-Induced Spin-Orbit Torques in Ferromagnetic and Antiferromagnetic Systems, Rev. Mod. Phys. 91, 035004 (2019).
- [9] R. Winkler, Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems (Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2003).
- [10] Y. Yin, Spin-Orbitronics. Novel Interactions and Magnetoresistances in Ultrathin Magnetic Films (Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2018).
- [11] Y. Cao, G. Xing, H. Lin, N. Zhang, H. Zheng, and K. Wang, Prospect of Spin-Orbitronic Devices and Their Applications, IScience 23, 101614 (2020).
- [12] D. C. Vaz, A. Barthélémy, and M. Bibes, Oxide Spin-Orbitronics: New Routes towards Low-Power Electrical Control of Magnetization in Oxide Heterostructures, Jpn. J. Appl. Phys. 57, 0902A4 (2018).

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. Спінтроніка. Магніторезистивна оперативна пам'ять (MRAM). Магнітні доменні стінки та пам'ять. Від спінтроніки до орбітроніки: спин-орбітальний зв'язок. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
2	Лекція 2. Хіральність. Основи хіральных спінових структур. Взаємодія Дзялошинського-Морія та нові типи магнітоопору.

	<i>Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
3	<i>Лекція 3. Нерівноважний орбітальний кутовий момент для орбітроніки. Фізичні принципи спітронної пам'яті. Орбітальний ступінь свободи: чи «заморожується» у твердих тілах? Створення нерівноважного спіну. Орбітальний момент імпульсу в нерівноважних системах. Орбітальний момент імпульсу для спітроніки. Орбітроніка: за межами спітроніки. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
4	<i>Лекція 4. Спітроніка зустрічається з орбітронікою: поява орбітального моменту імпульсу в твердих тілах. Теоретичні основи: генерація орбітального моменту імпульсу. Орбітальний ефект Рашби та орбітальний ефект Едельштейна. Орбітальний ефект Холла. Експериментальне виявлення орбітального моменту імпульсу. Майбутні напрямки та перспективи. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
5	<i>Лекція 5. Експериментальний інструментарій. Методи виготовлення зразків. Методи вимірювання магнітних властивостей зразків. Бріллюенівське розсіювання світла. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
6	<i>Лекція 6. Порівняння схем на основі спінового моменту імпульсу (spin-transfer torque – STT) та орбітального моменту імпульсу (spin-orbit torque – SOT). Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
7	<i>Лекція 7. Матеріали для спін-орбітальних моментів. Спін-орбітальні моменти в металах і металевих сплавах. Спін-орбітальні моменти в топологічних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в 2D матеріалах. Спін-орбітальні моменти в оксидах та магнітних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в антиферромагнетиках. Спін-орбітальні моменти в феримагнетиках. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
8	<i>Лекція 8. Спін-орбітальний момент імпульсу в магнітних мультишарових матеріалах. Феноменологічний опис. Методи вимірювання. Аналіз напруги Холла. Феромагнітний резонанс. Магнітооптичний ефект Керра. Спін-орбітальні моменти імпульсу в нецентросиметричних магнетиках. Немагнітні структури GaAs. Об'ємні феромагнітні матеріали (Ga,Mn)As та NiMnSb. Колінеарні антиферромагнетики. Антиферромагнітні топологічні ферміони Дірака. Магнетне накачування заряду в (Ga,Mn). Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
9	<i>Лекція 9. Спін-орбітальні моменти імпульсу та неоднорідні магнітні текстури. Динаміка доменної стінки під дією струму. Динаміка доменної стінки в стаціонарному режимі. Прецесійна динаміка доменної стінки. Намагнічені в площині зразки. Зразки з X доменами. Анізотропні зразки з Y доменами. Перпендикулярно намагнічені зразки. Демонстрація спін-орбітальних обертових моментів при русі доменної стінки, спричиненому струмом. Рух доменної стінки під дією обертового моменту, спричиненого струмом. Двовимірні ефекти при русі доменної стінки, індукованого струмом. Рух доменної стінки під впливом комбінованих моментів. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
10	<i>Лекція 10. Рух магнітних скірміонів під дією спін-орбітальних моментів. Вплив безпорядку. Топологічні характеристики доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів в феро- та антиферромагнетиках. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
11	<i>Лекція 11. Походження ефектів спін-орбітального зв'язку. Рівняння Дірака та рівняння Паулі. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>
12	<i>Лекція 12. Спінове розщеплення, спричинене інверсійною асиметрією. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>

13	Лекція 13. Анізотропне зеєманівське розщеплення в квазі-2D системах. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
14	Лекція 14. Рівні Ландау та циклотронний резонанс. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
15	Лекція 15. Пристрої на основі спін-орбітальних моментів. Трьохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять (SOT-MRAM, STT-MRAM). Двохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять. Нейроморфні пристрої та схеми на основі спін-орбітальних моментів. Безпольове перемикавання. Міркування індустріалізації. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].

Практичні заняття

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

№	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на CPC)
1	Практичне заняття 1. Спінтроніка. Магніторезистивна оперативна пам'ять (MRAM). Магнітні доменні стінки та пам'ять. Від спінтроніки до орбітроніки: спін-орбітальний зв'язок. Хіральність. Основи хіральних спінових структур. Взаємодія Дзялошинського-Морія та нові типи магнітоопору. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
2	Практичне заняття 2. Нерівноважний орбітальний кутовий момент для орбітроніки. Фізичні принципи спінтронної пам'яті. Орбітальний ступінь свободи: чи «заморожується» у твердих тілах? Створення нерівноважного спіну. Орбітальний момент імпульсу в нерівноважних системах. Орбітальний момент імпульсу для спінтроніки. Орбітроніка: за межами спінтроніки. Спінтроніка зустрічається з орбітронікою: поява орбітального моменту імпульсу в твердих тілах. Теоретичні основи: генерація орбітального моменту імпульсу. Орбітальний ефект Рашби та орбітальний ефект Едельштейна. Орбітальний ефект Холла. Експериментальне виявлення орбітального моменту імпульсу. Майбутні напрямки та перспективи. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
3	Практичне заняття 3. Експериментальний інструментарій. Методи виготовлення зразків. Методи вимірювання магнітних властивостей зразків. Бріллюєнівське розсіювання світла. Порівняння схем на основі спінового моменту імпульсу (spin-transfer torque – STT) та орбітального моменту імпульсу (spin-orbit torque – SOT). Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
4	Практичне заняття 4. Матеріали для спін-орбітальних моментів. Спін-орбітальні моменти в металах і металевих сплавах. Спін-орбітальні моменти в топологічних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в 2D матеріалах. Спін-орбітальні моменти в оксидах та магнітних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в антиферромагнетиках. Спін-орбітальні моменти в ферромагнетиках. Спін-орбітальний момент імпульсу в магнітних мультишарових матеріалах. Феноменологічний опис. Методи вимірювання. Аналіз напруги Холла. Феромагнітний резонанс. Магнітооптичний ефект Керра. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].

5	Практичне заняття 5. Спін-орбітальні моменти імпульсу в нецентросиметричних магнетиках. Немагнітні структури GaAs. Об'ємні феромагнітні матеріали (Ga,Mn)As та NiMnSb. Колінеарні антиферомагнетики. Антиферомагнітні топологічні ферміони Дірака. Магнетне накачування заряду в (Ga,Mn). Спін-орбітальні моменти імпульсу та неоднорідні магнітні текстури. Динаміка доменної стінки під дією струму. Динаміка доменної стінки в стаціонарному режимі. Прецесійна динаміка доменної стінки. Намагнічені в площині зразки. Зразки з X доменами. Анізотропні зразки з Y доменами. Перпендикулярно намагнічені зразки. Демонстрація спін-орбітальних обертових моментів при русі доменної стінки, спричиненому струмом. Рух доменної стінки під дією обертового моменту, спричиненого струмом. Двовимірні ефекти при русі доменної стінки, індукованого струмом. Рух доменної стінки під впливом комбінованих моментів. Рух магнітних скірміонів під дією спін-орбітальних моментів. Вплив безпорядку. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
6	Практичне заняття 6. Топологічні характеристики доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів в феро- та антиферомагнетиках. Походження ефектів спін-орбітального зв'язку. Рівняння Дірака та рівняння Паулі. Спінове розщеплення, спричинене інверсійною асиметрією. Анізотропне зеєманівське розщеплення в квазі-2D системах. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].
7	Практичне заняття 7. Рівні Ландау та циклотронний резонанс. Пристрої на основі спін-орбітальних моментів. Трьохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять (SOT-MRAM, STT-MRAM). Двохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять. Нейроморфні пристрої та схеми на основі спін-орбітальних моментів. Безпольове перемикування. Міркування індустріалізації. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].

Контрольні роботи

Метою контрольної роботи є перевірка вмінь аспірантів самостійно розв'язувати наукові задачі зі спін-орбітроніки, 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 спін-орбітроніки. 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.	СРС 1. Спінтроніка. Магніторезистивна оперативна пам'ять (MRAM). Магнітні доменні стінки та пам'ять. Від спінтроніки до орбітроніки: спін-орбітальний зв'язок. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].	4
2.	СРС 2. Хіральність. Основи хіральных спінових структур. Взаємодія Дзялошинського-Морія та нові типи магнітоопору. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].	4

3.	<i>CPC 3. Нерівноважний орбітальний кутовий момент для орбітроніки. Фізичні принципи спінтронної пам'яті. Орбітальний ступінь свободи: чи «заморожується» у твердих тілах? Створення нерівноважного спіну. Орбітальний момент імпульсу в нерівноважних системах. Орбітальний момент імпульсу для спінтроніки. Орбітроніка: за межами спінтроніки. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
4.	<i>CPC 4. Спінтроніка зустрічається з орбітронікою: поява орбітального моменту імпульсу в твердих тілах. Теоретичні основи: генерація орбітального моменту імпульсу. Орбітальний ефект Рашби та орбітальний ефект Едельштейна. Орбітальний ефект Холла. Експериментальне виявлення орбітального моменту імпульсу. Майбутні напрямки та перспективи. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
5.	<i>CPC 5. Експериментальний інструментарій. Методи виготовлення зразків. Методи вимірювання магнітних властивостей зразків. Бріллюєнівське розсіювання світла. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
6.	<i>CPC 6. Порівняння схем на основі спінового моменту імпульсу (spin-transfer torque – STT) та орбітального моменту імпульсу (spin-orbit torque – SOT). Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
7.	<i>CPC 7. Матеріали для спін-орбітальних моментів. Спін-орбітальні моменти в металах і металевих сплавах. Спін-орбітальні моменти в топологічних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в 2D матеріалах. Спін-орбітальні моменти в оксидах та магнітних ізоляторах. Спін-орбітальні моменти в антиферромагнетиках. Спін-орбітальні моменти в феримагнетиках. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
8.	<i>CPC 8. Спін-орбітальний момент імпульсу в магнітних мультишарових матеріалах. Феноменологічний опис. Методи вимірювання. Аналіз напруги Холла. Феромагнітний резонанс. Магнітооптичний ефект Керра. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
9.	<i>CPC 9. Спін-орбітальні моменти імпульсу в нецентросиметричних магнетиках. Немагнітні структури GaAs. Об'ємні феромагнітні матеріали (Ga,Mn)As та NiMnSb. Колінеарні антиферромагнетики. Антиферромагнітні топологічні ферміони Дірака. Магнетонне накачування заряду в (Ga,Mn). Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
10.	<i>CPC 10. Спін-орбітальні моменти імпульсу та неоднорідні магнітні текстури. Динаміка доменної стінки під дією струму. Динаміка доменної стінки в стаціонарному режимі. Прецесійна динаміка доменної стінки. Намагнічені в площині зразки. Зразки з X доменами. Анізотропні зразки з Y доменами. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
11.	<i>CPC 11. Перпендикулярно намагнічені зразки. Демонстрація спін-орбітальних обертових моментів при русі доменної стінки, спричиненому струмом. Рух доменної стінки під дією обертового моменту, спричиненого струмом. Двовимірні ефекти при русі доменної стінки, індукованого струмом. Рух доменної стінки під впливом комбінованих моментів. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
12.	<i>CPC 12. Рух магнітних скірміонів під дією спін-орбітальних моментів. Вплив безпорядку.</i>	4

	<i>Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	
13.	<i>CPC 13. Топологічні характеристики доменних стінок, скірміонів, скірміоніумів в феро- та антиферромагнетиках. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
14.	<i>CPC 14. Походження ефектів спін-орбітального зв'язку. Рівняння Дірака та рівняння Паулі. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
15.	<i>CPC 15. Спінове розщеплення, спричинене інверсійною асиметрією. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
16.	<i>CPC 16. Анізотропне зеєманівське розщеплення в квазі-2D системах. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
17.	<i>CPC 17. Рівні Ландау та циклотронний резонанс. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
18.	<i>CPC 18. Пристрої на основі спін-орбітальних моментів. Трьохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять (SOT-MRAM, STT-MRAM). Двохконтактна спін-орбітальна магніторезистивна оперативна пам'ять. Нейроморфні пристрої та схеми на основі спін-орбітальних моментів. Безпольове перемикавання. Міркування індустріалізації. Література: базова [1-5], додаткова [6-12].</i>	4
19.	<i>Підготовка до заліку</i>	4

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/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>);
- 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 «Спін-орбітроніка» за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>. 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 «Спін-орбітроніка» 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 cpi2lpf. Акаунти студентів, які приєдналися до Google Класу не з акаунта на домені @LLL.kpi.ua, будуть вилучатися з навчального курсу «Спін-орбітроніка» 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 WhatsApp чат дисципліни перевіряються не будуть);

- Листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни.

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	4	120	30	14	76	Залік

Рейтинг студентів 2 курсу магістратури ФМФ з «Спін-орбітроніка» складається з балів, які вони отримують за:

- 1) практичні заняття
- 2) СРС
- 3) МКР
- 4) Додаткові бали за активність на практичних заняттях (10 балів максимум).
- 5) Залік.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Аспірантам, які успішно здали МКР (модульна контрольна робота) та розв'язують задачі на практичних заняттях, можуть нараховуватися за семестр максимум 100 балів. Оцінювання МКР та оцінювання вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях та СРС 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/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>. МКР складається з одного тесту 50 балів максимум. Оцінювання вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях складається з двох тестів по 25 балів максимум за кожен тест. Кожен з тестів можливо пройти тільки один раз. Відповідно перед кожною атестацією, а також в кінці семестру всі набрані студентом бали в Google Класі будуть вноситись до системи АІС «Електронний кампус» КПІ імені Ігоря Сікорського.

Необхідною умовою допуску до заліку із «Спін-орбітроніки» є задовільне виконання МКР (не менше 25 балів), задовільні вміння розв'язання задач на практичних заняттях (не менше 25 балів), а також сумарний стартовий рейтинг не менше 50 балів.

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

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Сума вагових балів контрольних заходів зі «Спін-орбітроніки» протягом семестру складає **$R_c = 100$ балів.**

Рейтингова шкала зі «Спін-орбітроніки» складає **$R_D = R_c = 100$ балів.**

Якщо аспірант протягом семестру набрав не менше 60 балів, він отримує залік автоматом.

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

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

Якщо ж аспірант протягом семестру набрав менше 60 балів, він має скласти залікову контрольну роботу у вигляді тесту 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/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>, ваговий коефіцієнт якої складає 100 балів. При цьому, стартовий рейтинг не враховується. Кількість балів, набраних на заліковій контрольній роботі, переводиться в оцінку за тою ж шкалою. Якщо аспірант набрав протягом семестру 60 балів і більше, але хоче підвищити свою рейтингову оцінку, він може це зробити шляхом складання залікової контрольної роботи у вигляді тесту 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/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>, ваговий коефіцієнт якої складає 100 балів. При цьому, стартовий рейтинг не враховується.

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/NzEwNzgyMTI5NTU5?cjc=cpi2lpf>;
- Сертифікати проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою можуть бути зараховані за умови виконання вимог, наведених у Наказі № 7-177 від 01.10.2020 р. «Про затвердження положення про визнання в КПІ ім. Ігоря Сікорського результатів навчання, набутих у неформальній/інформальній освіті».

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 № 1/06-25 від 25.06.2025).

Погоджено Методичною комісією Фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2024).