

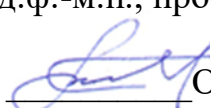
**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства
освіти і науки України

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ІМаг НАН України та МОН України

д.ф.-м.н., професор



Олександр ТОВСТОЛИТКІН

«30» червня 2023 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)

Н 5 Теорія коливань та хвиль в магнетизмі

(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
2024 / 2025	Товстолиткін О.І.		№5-24, 13.06.2024
20____/ 20____			
20____/ 20____			
20____/ 20____			



Інститут магнетизму Національної академії наук України та
Міністерства освіти і науки України

ТЕОРІЯ КОЛИВАНЬ ТА ХВИЛЬ В МАГНЕТИЗМІ

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	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити: 120 годин (денна: 36 годин – лекції, 84 годин – СР)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Екзамен/МКР
Розклад занять	http://ukr.imag.kiev.ua
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	http://ukr.imag.kiev.ua

Програма навчальної дисципліни

Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчання та результати навчання

Опис дисципліни. Програму навчальної дисципліни «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика» підготовки доктора філософії спеціальності 104 «Фізика та астрономія». Викладання курсу в Інституті магнетизму враховує фахову орієнтацію майбутнього науковця. У результаті вивчення дисципліни «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» аспірант повинен поглиблено орієнтуватись в загальній теорії лінійних та слабконелінійних коливань та хвиль, знати основні особливості та підходи до дослідження коливної та хвильової динаміки намагніченості в магнітовпорядкованих матеріалах та структурах, актуальні напрямки досліджень у галузі, зокрема, напрямки магنونіки та спін-хвильової електроніки. Передбачено контроль якості отриманих знань у опитування на лекціях та модульної контрольної роботи.

Мета навчальної дисципліни. Метою навчальної дисципліни є розширення та поглиблення об'єму знань з теорії коливань і хвиль (яка в багатьох програмах першого та другого рівня

вищої освіти взагалі не виділяється в окремий курс і побіжно розглядається в курсах загальної фізики та електроніки) з акцентом на застосування до проблем надвисокочастотної та субтерагерцової динаміки магнітовпорядкованих матеріалів та структур на їх основі, вивчення особливостей магнітної динаміки та опанування методами її теоретичного аналізу.

Предмет навчальної дисципліни: теорія, методи опису та моделювання коливань і хвиль у магнітовпорядкованих матеріалах та структурах.

Програмні результати навчання:

Компетентності:

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність)

СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, 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.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку фізики та/або астрономії, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

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.

РН05. Розробляти моделі процесів і систем у фізиці та/або астрономії та дотичних міждисциплінарних напрямках, використовувати їх у науково-дослідницькій діяльності для отримання нових знань та/або створення розробок та інноваційних продуктів.

РН09. Глибоко розуміти загальні принципи та методи природничих наук, а також методологію наукових досліджень, місце фізики в системі наукових знань як методологічної основи природничих, інженерних наук та технологій; застосовувати їх у власних дослідженнях у сфері фізики та/або астрономії та у викладацькій діяльності.

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

Пререквізити. Для успішного засвоєння курсу «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» аспірант має опанувати наступні дисципліни першого (бакалаврського) рівня: «Диференціальні рівняння», «Лінійна алгебра», «Математичний аналіз», «Рівняння математичної фізики» (або всі розділи «Вищої математики», якщо вищенаведені курси об'єднані в один), а також дисципліну третього (освітньо-наукового) рівня «Математичні методи в теоретичній фізиці».

Постреквізити. Навчальна дисципліна «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» є однією з основ формування наукової складової структурно-логічної схеми освітньої програми. Компетентності, знання, уміння та досвід, отримані в процесі вивчення дисципліни «Теорія коливань та хвиль в магнетизмі» використовуються при засвоєнні освітнього компонента

«Сучасні методи моделювання у фізиці магнітних явищ» і є необхідними для якісного виконання наукових досліджень за темою дисертації.

Зміст навчальної дисципліни

Назви тем	Всього	Кількість годин	
		У тому числі	
		Лекції	СР
Тема 1. Опис динаміки феромагнетиків.	6	2	4
Тема 2. Лінійний осцилятор.	6	2	4
Тема 3. Нелінійний осцилятор.	6	2	4
Тема 4. Параметричний резонанс.	6	2	4
Тема 5. Параметричний резонанс в магнетиках.	6	2	4
Тема 6. Автогенератори.	6	2	4
Тема 7. Система взаємодіючих осциляторів.	6	2	4
Тема 8. Нелінійна взаємодія осциляторів.	6	2	4
Тема 9. Перехід до неперервних середовищ.	6	2	4
Тема 10. Електродинаміка гіротропних середовищ.	6	2	4
Тема 11. Магнітостатичне наближення.	6	2	4
Тема 12. Дипольно-обмінні спінові хвилі у плівках.	6	2	4
Тема 13. Дипольно-обмінні спінові хвилі у хвильоводах.	6	2	4
Тема 14. Нелінійна спін-хвильова взаємодія.	6	2	4
Тема 15. Хвилі у зв'язаних хвильоводах.	8	2	6
Тема 16. Параметричне збудження та підсилення спінових хвиль.	8	2	6
Тема 17. Активні середовища з розподіленими параметрами.	8	2	6
Тема 18. Спін-хвильові моди у наноструктурах.	8	2	6
Разом	116	36	80
МКР	2		2
Екзамен	2		2
Всього годин	120	36	84

Навчальні матеріали та ресурси

1. І. О. Анісімов. Коливання та хвилі. Конспект лекцій. – Електронний ресурс. <http://ioa.rpd.univ.kiev.ua/book/content.html>
2. В. В. Данилов, І. В. Зависяк, О. Ю. Нечипорук, Спін-Хвильова Електродинаміка: підручник (Київ, ВПЦ «Київський університет», 2008).
3. G. Gurevich and A. Melkov, Magnetization Oscillations and Waves (CRC Press, New York, 1996).
4. M. I. Rabinovich and D. I. Trubetskov, Oscillations and Waves in Linear and Nonlinear Systems (Kluwer, Boston, 1989)
5. V. S. L'vov, Wave Turbulence Under Parametric Excitation (Springer-Verlag, New York, 1994).
6. S. O. Demokritov, ed., Spin Wave Confinement (Jenny Stanford Publishing, 2008).
7. S. O. Demokritov, ed., Spin Wave Confinement: Propagating Waves (Pan Stanford Publishing, Singapore, 2017).
8. Р. В. Верба, Ю. І. Джежеря, В. Ю. Боринський, Д. М. Поліщук, А. Ф. Кравець, Магнітна та термоіндукована динаміка у нанoeлементax синтетичних антиферомагнетиків (Діса плюс, Харків, 2023).

Допоміжна література.

9. D.K. Arrowsmith and R.J. Mondragon, Stability Region Control for a Parametrically Forced Mathieu Equation, *Meccanica* **34**, 401 (1999).
10. T. Brächer, P. Pirro, and B. Hillebrands, Parallel pumping for magnon spintronics: Amplification and manipulation of magnon spin currents on the micron-scale, *Phys. Rep.* **699**, 1 (2017)
11. A. Slavin and V. Tiberkevich, Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 1875 (2009).
12. V.E. Demidov, S. Urazhdin, G. de Loubens, O. Klein, V. Cros, A. Anane, S. O. Demokritov, Magnetization oscillations and waves driven by pure spin currents, *Phys. Rep.* **673**, 1 (2017).
13. R. Verba, G. Melkov, V. Tiberkevich, and A. Slavin Collective spin-wave excitations in a two-dimensional array of coupled magnetic nanodots, *Phys. Rev. B.* **85**, 014427 (2012).
14. B. A. Kalinikos, and A. N. Slavin, Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **19**, 7013 (1986).
15. K. Yu. Guslienko and A. N. Slavin, Boundary conditions for magnetization in magnetic nanoelements, *Phys. Rev. B* **72**, 014463 (2005).
16. Q. Wang, B. Heinz, R. Verba, M. Kewenig, P. Pirro, M. Schneider, T. Meyer, B. Lägél, C. Dubs, T. Brächer, A. V. Chumak, Spin Pinning and Spin-Wave Dispersion in Nanoscopic Ferromagnetic Waveguides, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 247202 (2019).
17. P. Krivosik and C. E. Patton, Hamiltonian formulation of nonlinear spin-wave dynamics: Theory and applications, *Phys. Rev. B* **82**, 184428 (2010)
18. 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).
19. Q. Wang, P. Pirro, R. Verba, A. Slavin, B. Hillebrands, A. V. Chumak, Reconfigurable nanoscale spin-wave directional coupler, *Sci. Adv.* **4**, e1701517 (2018).
20. A. Slavin and V. Tiberkevich, Spin Wave Mode Excited by Spin-Polarized Current in a Magnetic Nanocontact is a Standing Self-Localized Wave Bullet, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 237201 (2005).
21. J. C. Slonczewski, Excitation of spin waves by an electric current, *J. Magn. Magn. Mater.* **195**, L261 (1999).
22. D. A. Bozhko, H. Yu. Musiienko-Shmarova, V. S. Tiberkevich, A. N. Slavin, I. I. Syvorotka, B. Hillebrands, A. A. Serga, Unconventional spin currents in magnetic films, *Phys. Rev. Research* **2**, 023324 (2020).

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. Опис динаміки феромагнетиків. Рівняння Ландау-Ліфшиця, магнітна енергія та ефективне поле. Феноменологічний опис дисипації. Рівняння Ландау-Ліфшиця-Бар'яхтара. [2-3].
2	Лекція 2. Лінійний осцилятор. Фазовий портрет. Феромагнітний резонанс. Високочастотна магнітна сприйнятливність. [1, 3].
3	Лекція 3. Нелінійний осцилятор. Природа нелінійності магнітної динаміки. Ефект фолдоверу. Резонанс на субгармоніках. [1, 3].
4	Лекція 4. Параметричний резонанс. Рівняння Мат'є. Теорема Флоке. Зони параметричної нестійкості. Вимушена динаміка параметричного осцилятора [1, 4, 9].
5	Лекція 5. Параметричний резонанс в магнетиках. Механізм параметричного зв'язку. Обмеження росту параметричної нестійкості. [3, 5, 10].
6	Лекція 6. Автогенератори. Граничний цикл. Синхронізація. Спін-трансферні осцилятори та спінові осцилятори Холла. [1, 4, 7, 11-12].
7	Лекція 7. Система взаємодіючих осциляторів. Антиферомагнітний резонанс. Колективні коливання у ґратках магнітних наноточок. [3-4, 13].
8	Лекція 8. Нелінійна взаємодія осциляторів. Співвідношення Менлі-Роу. Тримагнетонний розпад. Вибухова нестійкість. [1, 4, 5].
9	Лекція 9. Перехід до неперервних середовищ. Дисперсійна залежність. Поширення хвильових пакетів. Поняття групової швидкості. [1, 4].
10	Лекція 10. Електродинаміка гіротропних середовищ. Швидкі та повільні спіново-електромагнітні хвилі. [2-3].
11	Лекція 11. Магнітостатичне наближення. Рівняння Уокера. Магнітостатичні хвилі у плівках: прямі, зворотні та поверхневі магнітостатичні хвилі. [2-3].
12	Лекція 12. Дипольно-обмінні спінові хвилі у плівках. Магнітостатична функція Гріна. Невзаємні спінові хвилі [2, 8, 14].
13	Лекція 13. Дипольно-обмінні спінові хвилі у хвильоводах. Ефект дипольного закріплення спінів. Крайові моди. [6, 15-16].
14	Лекція 14. Нелінійна спін-хвильова взаємодія. Гамільтонівський формалізм для нелінійної спін-хвильової взаємодії. Три- та чотирьоххвильова нестійкість [5, 17-18].
15	Лекція 15. Хвилі у зв'язаних хвильоводах. Спрямований спін-хвильовий відгалужувач. Нелінійність відгалужувача. [4, 7, 19].
16	Лекція 16. Параметричне збудження та підсилення спінових хвиль. Основи S-теорії. [3, 5, 7, 10].

17	Лекція 17. Активні середовища з розподіленими параметрами. Просторова динаміка спін-трансферних та спінових осциляторів Холла. Нелінійна локалізація та булети. [4, 6, 20-21].
18	Лекція 18. Спін-хвильові моди у наноструктурах. Стоячі та азимутальні біжучі моди. Нетипові квазістаціонарні моди магнітних наносистем [6, 8, 22].

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 конспектів та рефератів із вибраних тем. 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 аудиторних занять	40
2	Підготовка до МКР	20
3	Підготовка до екзамену	20

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 (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, 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: опитування за темою заняття, МКР.

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

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

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

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

- 1) за роботу на аудиторних заняттях;
- 2) за модульну контрольну роботу (МКР);
- 3) за відповідь на екзамені.

Система рейтингових балів

1) Аудиторні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 4. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на аудиторних заняттях становить $12 \times 4 = 48$ бали. Нарахування балів на одному аудиторному занятті:

- відмінні відповіді 4 балів;
- дуже добрі, добрі відповіді 3,2 балів;
- задовільні, достатні відповіді 1 бал.

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). Екзамен. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюються у 20 балів. Всього $2 \times 20 = 40$ балів.

Нарахування балів за відповідь на екзамені:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 36-40 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 30-35 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 24-29 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів, 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

Розробник:

д. ф.-м. н., с. д. Верба Роман Володимирович

Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Рівняння Ландау-Ліфшиця, магнітна енергія, ефективне поле, дисипативні доданки.
2. Вільна та вимушена динаміка лінійного осцилятора. Принцип суперпозиції сили.
3. Феромагнітний резонанс. Високочастотна магнітна сприйнятливність.
4. Нелінійний осцилятор. Нелінійний резонанс. Резонанс на субгармоніках.
5. Природа нелінійності магнітної динаміки. Ефект фолдоверу.
6. Параметричний резонанс. Рівняння Мат'є. Зони параметричної нестійкості.
7. Параметричний резонанс в магнетиках. Механізм параметричного зв'язку.
8. Механізми обмеження росту параметричної нестійкості в магнетиках.
9. Автогенератор Ван-дер-Поля. Граничний цикл.
10. Синхронізація автогенераторів зовнішнім сигналом.
11. Спін-трансферні осцилятори та спінові осцилятори Холла.
12. Власні коливання системи взаємодіючих осциляторів. Розштовхування мод.
13. Антиферомагнітний резонанс.
14. Магнітодипольна взаємодія. Колективні коливання у ґратках магнітних наноточок.
15. Нелінійна взаємодія трьох осциляторів. Співвідношення Менлі-Роу.
16. Вибухова нестійкість.
17. Дисперсійна залежність хвиль. Поширення хвильових пакетів. Поняття групової швидкості.
18. Швидкі та повільні спіново-електромагнітні хвилі.
19. Магнітостатичне наближення, суть та умови застосування. Рівняння Уокера.
20. Прямі об'ємні магнітостатичні хвилі у плівках.
21. Зворотні об'ємні магнітостатичні хвилі у плівках.
22. Поверхневі магнітостатичні хвилі
23. Дипольно-обмінні спінові хвилі у плівках. Магнітостатична функція Гріна.
24. Невзаємні спінові хвилі – хвилі Деймона Ешбаха, хвилі за наявності взаємодії Дзялошинського-Морія.
25. Дипольно-обмінні спінові хвилі у хвильоводах. Латеральне квантування та загальна структура спектру.
26. Ефект дипольного закріплення спінів.
27. Крайові моди у феромагнітних хвильоводах.
28. Нелінійна спін-хвильова взаємодія. Гамільтонівський формалізм для нелінійної спін-хвильової взаємодії.
29. Три- та чотирьоххвильова нестійкість
30. Хвилі у зв'язаних хвильоводах. Розщеплення дисперсій. Передача енергії між хвильоводами.
31. Спрямований спін-хвильовий відгалужувач. Нелінійність відгалужувача.
32. Параметричне збудження та підсилення спінових хвиль.
33. Обмеження росту параметричної нестійкості спінових хвиль – S-теорія.
34. Просторова динаміка спін-трансферних та спінових осциляторів Холла.
35. Нелінійна локалізація та спін-хвильові булети

36. Спін-хвильові моди у наноструктурах. Загальні правила та наближений розрахунок спектру.
37. Стоячі спін-хвильові моди та азимутальні біжучі моди.
38. Нетипові квазістаціонарні моди магнітних наносистем з порушеною симетрією.