

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука

Затверджено

на засіданні кафедри теоретичної фізики
імені професора Івана Вакарчука
фізичного факультету
Львівського національного університету
імені Івана Франка
(протокол № 1 від 31.08.2023 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

Силабус
з навчальної дисципліни «Електродинаміка»,
що викладається в межах
ОПП «Комп'ютерні технології в прикладній фізиці»
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
для здобувачів з спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Львів 2023

Назва дисципліни	Електродинаміка
Адреса викладання дисципліни	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань — 10 Природничі науки Спеціальність — 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Викладачі дисципліни	професор кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, д.ф.-м.н., проф. Ровенчак Андрій Адамович
Контактна інформація викладачів	andrij.rovenchak@lnu.edu.ua ; andrij.rovenchak@gmail.com https://physics.lnu.edu.ua/employee/rovenchak-a-a
Консультації з курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Zoom, Microsoft Teams, Skype.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/elektrodynamika-prykladna-fizyka
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Електродинаміка» є нормативною і розрахована на слухачів спеціальності «105 Прикладна фізика та наноматеріали» освітнього рівня бакалавра. Її викладають у VI семестрі в обсязі 5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб стисло подати основи класичної та релятивістської електродинаміки, спеціальної теорії відносності, електродинаміки середовища.
Мета та цілі дисципліни	Метою і завданням навчальної дисципліни «Електродинаміка» є формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із електромагнітним полем. Це передбачає виклад основ теорії електромагнітних процесів у вакуумі та в середовищі, поглиблення знань, одержаних в загальному курсі «Електрика», засвоєння математичного апарату класичної теорії поля, вивчення теорії електромагнітного поля Максвелла–Лоренца і релятивістської теорії електромагнітного поля.
Література для вивчення дисципліни	Базова: 1. В. А. Головацький, <i>Електродинаміка</i> . Чернівці: Рута, 2011. 2. В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. В. Сібрук, <i>Теорія електромагнітного поля</i> . Київ: НАУ, 2017. 3. А. М. Федорченко, <i>Теоретична фізика</i> , т. 1, 1988. 4. L. L. Deraad, K. A. Milton, J. Schwinger, and Wu-yang Tsai, <i>Classical Electrodynamics</i> . CRC Press, 2019. 5. J. D. Jackson, <i>Classical Electrodynamics</i> . 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. Допоміжна: 1. М. В. Блажівська, О. І. Григорчак, Ю. С. Криницький та ін.; за ред. Ю. С. Криницького та А. А. Ровенчака, <i>Збірник задач з електродинаміки</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2015. 2. В. М. Мигаль, <i>Випромінювання електромагнітних хвиль: Методичні вказівки до розв'язування задач з вибраних розділів електродинаміки для студентів III курсу фізичного факультету</i> . Львів: ЛДУ, 1999. 3. В. В. Обуховський, <i>Збірка задач для контрольних робіт з</i>

	<p><i>електродинаміки</i>. Київ: Вид-во КНУ імені Тараса Шевченка, 2003.</p> <p>4. A. Rovenchak, Yu. Krynytskyi. Radiation of the electromagnetic field beyond the dipole approximation. <i>Am. J. Phys.</i> 86(10): 727–732 (2018); https://doi.org/10.1119/1.5052427</p> <p>Інформаційні ресурси:</p> <p>1. Eric Weisstein’s World of Physics https://scienceworld.wolfram.com/physics/</p> <p>2. Wikipedia. https://www.wikipedia.org</p> <p>3. The Feynman Lectures on Physics. Vol. II: The electromagnetic field. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html</p>
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	150 годин, з яких 96 годин аудиторних занять, з них 48 годин лекцій, 48 годин практичних занять, та 54 години самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях</p> <p>ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК 9. Здатність працювати автономно.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p>СК 6. Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем.</p> <p>СК 7. Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.</p> <p><i>Програмні результати навчання, на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p>ПРН 01. Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв’язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.</p> <p>ПРН 02. Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.</p>
Ключові слова	Рівняння Максвелла; потенціали електромагнітного поля; умови випромінювання; релятивістська механіка; рівняння Максвелла–Лоренца
Формат курсу	Очний
Теми	Див. Табл. 1 Схема курсу
Підсумковий контроль, форма	Іспит у кінці VI семестру. Форма: Письмово-усний.
Пререквізити	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, електрика.
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Презентація, лекції, розв’язування задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.
Необхідне обладнання	персональний комп’ютер, загальнонавчальні комп’ютерні програми й операційні системи, проєктор

<p>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</p>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • робота на практичних заняттях під час семестру, 20% семестрової оцінки; максимальна кількість балів — 20 (10 балів (усереднена оцінка) за розв'язування задач біля дошки + 10 балів за роботу на практичних); кожна відповідь біля дошки оцінюється відповідно до такої 10-бальної шкали: <ul style="list-style-type: none"> 9–10 — задача розв'язана повністю правильно; 7–8 — розв'язок в основному правильний, є незначні технічні огріхи; 5–6 — задача розв'язана частково; 3–4 — записано лише кілька вихідних виразів; 1–2 — записано лише один вихідний вираз; 0 — відмова відповідати; робота на практичних оцінюється так: <ul style="list-style-type: none"> 9–10 — активна участь у 13–16 заняттях; 7–8 — активна участь у 9–12 заняттях; 5–6 — активна участь у 5–8 заняттях; 1–4 — активна участь у 1–4 заняттях; 0 — жодної активної участі в практичних заняттях; • 2 контрольні роботи (на практичних заняттях): 30% семестрової оцінки; максимальна кількість балів — 30; кожна контрольна складається з трьох задач по 5 балів відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> 5 — задача розв'язана повністю правильно; 4 — розв'язок в основному правильний, є незначні технічні огріхи; 3 — задача розв'язана частково; 2 — записано лише кілька вихідних виразів; 1 — записано лише один вихідний вираз; 0 — розв'язок відсутній. • результати іспиту: 50% підсумкової оцінки; максимальна кількість балів — 50: <ul style="list-style-type: none"> тестова частина — 30 балів (питання з варіантами вибору відповідей); два розширених теоретичних питання по 10 балів кожне відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> 9–10 — студент повністю володіє матеріалом; 6–8 — рівень володіння матеріалом достатній; 3–5 — рівень володіння матеріалом частковий; 1–2 — студент майже не володіє матеріалом; 0 — відповідь відсутня. <p>Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.</p> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p> <p>Письмові роботи: Очікується, що студенти виконають дві контрольні роботи.</p> <p>Академічна доброчесність: Очікується, що контрольні роботи студентів будуть оригінальними. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p>
---	--

	<p>Відвідання занять є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і практичні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків, визначених для виконання усіх видів письмових робіт, передбачених курсом.</p> <p>Література. Усю літературу, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані за роботу на практичних заняттях, контрольних роботах та на іспиті. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнь на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін.</p> <p>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</p>
<p>Орієнтовний перелік питань на іспит</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки. 2. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів. 3. Математичний апарат електродинаміки: ряд Фур'є та інтегральне перетворення Фур'є; δ-функція Дірака. Густина точкового заряду. 4. Потенціали електромагнітного поля. Градієнтна інваріантність електромагнітного поля. 5. Калібрування Кулона і Лоренца, рівняння Д'Аламбера. Поперечний струм. 6. Рівняння неперервності. Закон збереження заряду. 7. Закон збереження енергії. Умови випромінювання. 8. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень. 9. Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі. 10. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля. 11. Рівняння для статичних полів. Розрахунок потенціалів і полів через густини зарядів і струмів. 12. Мультипольні розвинення. Потенціали і поля електричного та магнітного диполів. Електричний квадрупольний момент. 13. Потенціали Лієнара–Віхерта. 14. Поле рухомого точкового заряду. 15. Випромінювання точкового заряду. 16. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя. 17. Поле системи зарядів на великих віддальх від джерела, близька і хвильова зони. 18. Дипольне і квадрупольне випромінювання. 19. Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори. 20. Релятивістська механіка вільної частинки: інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, 4-вектор енергії-імпульсу. 21. Заряджена частинка в електромагнітному полі: функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху. 22. Варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої

	<p>частинки в просторі Мінковського.</p> <p>23. Тензор електромагнітного поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.</p> <p>24. Знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.</p> <p>25. Мікро- та макрополя. Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів.</p> <p>26. Вектори поляризації та намагнічення. Рівняння поля в середовищі.</p> <p>27. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях: неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі.</p> <p>28. Умови на межі двох середовищ.</p> <p>29. Поляризація середовища у змінному полі.</p> <p>30. Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення.</p> <p>Типові задачі можна переглянути тут.</p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Електродинаміка»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	<p>1. Вступ. Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки. Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення.</p> <p>2. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів. Закон Кулона; вихровий характер магнітного поля; закон Фарадея; джерела магнітного поля; закон Ерстеда; закон Ампера. Математичний апарат: δ-функція Дірака; густина точкового заряду.</p> <p>3. Потенціали електромагнітного поля. Означення потенціалів, рівняння для потенціалів, градієнтна інваріантність електромагнітного поля, калібрування Кулона і Лоренца. Рівняння д'Аламбера. Поперечний струм.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 5 год	2 тижні
3–4	<p>4. Закони збереження. Рівняння неперервності як форма запису закону збереження заряду. Закон збереження заряду. Закон збереження енергії. Умови випромінювання.</p> <p>5. Закони збереження. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень Максвелла.</p> <p>6. Статичні поля у вакуумі. Рівняння для статичних полів. Безпосереднє розв'язування рівнянь для потенціалів.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 7 год	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
5–6	<p>7. Мультипольні розвинення. Потенціали і поля електричного та магнітного диполів.</p> <p>8. Мультипольні розвинення. Електричний квадрупольний момент. Вищі мультипольні моменти. Приклади розрахунків мультипольних моментів.</p> <p>9. Вільне електромагнітне поле. Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі. Фазова та групова швидкості.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 7 год	2 тижні
7–8	<p>10. Вільне електромагнітне поле. Поляризація електромагнітних хвиль. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля.</p> <p>11. Потенціали Лієнара–Віхерта. Поле рухомого точкового заряду: особливості диференціювання потенціалів Лієнара–Віхерта, обчислення полів.</p> <p>12. Поле і потенціали заряду, який рухається. Випромінювання точкового заряду. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, (підсумкова к/р 1), самостійна робота — 7 год	2 тижні
9–10	<p>13. Поле системи зарядів на великих віддальх від джерела. Близька і хвильова зони. Дипольне і квадрупольне випромінювання.</p> <p>14. Принципи відносності. Інтервал між подіями. Чотиривимірні простори Мінковського. Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.</p> <p>15. Релятивістська механіка вільної частинки: інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, енергія й імпульс; 4-вектор енергії-імпульсу. Рівняння руху вільної частинки у формі Лагранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 7 год	2 тижні
11–12	<p>16. Заряджена частинка в електромагнітному полі: функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху. 4-потенціали поля і закони їх перетворення.</p> <p>17. Тензор електромагнітного поля: варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського; тензор поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.</p> <p>18. Основні співвідношення електродинаміки у просторі Мінковського: 4-форма рівнянь електродинаміки; варіаційний принцип в теорії поля; інтеграл дії для зарядів і поля; знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 7 год	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
13–14	<p>19. 4-форма законів збереження. Тензор енергії-імпульсу. Рівняння Лоренца–Абрагама–Дірака.</p> <p>20. Мікро- та макрополя, мікроскопічні рівняння Максвелла–Лоренца. Усреднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів. Вектори поляризації та намагнічення. Умови на межі двох середовищ.</p> <p>21. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях: неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі; діа- та парамагнетизм.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, самостійна робота — 7 год	2 тижні
15–16	<p>22. Загальна характеристика матеріальних рівнянь. Статичні поля в середовищі. Енергія поля в середовищі, індуковані заряди і струми, індуктивності. Сили в статичних полях.</p> <p>23. Поляризація середовища в змінному полі. Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення. Дисперсні і прозорі середовища.</p> <p>24. Умови квазістатичності та рівняння квазістатичних явищ. Нормальний та аномальний скін-ефекти.</p>	Лекції — 6 год, практичні — 6 год, (підсумкова к/р 2), самостійна робота — 7 год	2 тижні