

**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 01.09.2025 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

**Силабус**  
**з навчальної дисципліни «Електродинаміка 2»,**  
**що викладається в межах**  
**ОПП «Фізика та астрофізика»**  
**першого (бакалаврського) рівня вищої освіти**  
**для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія**

## 2025/26 н.р.

<b>Назва дисципліни</b>	Електродинаміка
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 12, 79005, м. Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	Галузь знань — 10 Природничі науки Спеціальність — 104 Фізика та астрономія
<b>Викладачі дисципліни</b>	професор кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, д.ф.-м.н., проф. Ровенчак Андрій Адамович
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:andrij.rovenchak@lnu.edu.ua">andrij.rovenchak@lnu.edu.ua</a> ; <a href="mailto:andrij.rovenchak@gmail.com">andrij.rovenchak@gmail.com</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/rovenchak-a-a">https://physics.lnu.edu.ua/employee/rovenchak-a-a</a>
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Zoom, Microsoft Teams тощо.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/elektrodynamika-2">https://physics.lnu.edu.ua/course/elektrodynamika-2</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Електродинаміка 2» є нормативною і розрахована на слухачів спеціальності «104 Фізика та астрономія» (ОПП «Фізика та астрофізика») освітнього рівня бакалавра. Її викладають у VI семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS). Це друга частина загального річного курсу класичної електродинаміки.
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Курс розроблено таким чином, щоб стисло подати основи спеціальної теорії відносності, релятивістської електродинаміки, електродинаміки середовища.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою і завданням навчальної дисципліни «Електродинаміка 2» є формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із електромагнітним полем. Це передбачає виклад основ теорії електромагнітних процесів у середовищі, поглиблення знань, одержаних в загальному курсі «Електрика», засвоєння математичного апарату класичної теорії поля, вивчення теорії релятивістської теорії електромагнітного поля.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 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. А. Ровенчак, Ю. С. Криницький, В. П. Пастухов. <i>Класична електродинаміка</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2025. 4. А. М. Федорченко, <i>Теоретична фізика</i> , т. 1, 1988. 5. L. L. Deraad, K. A. Milton, J. Schwinger, and Wu-yang Tsai, <i>Classical Electrodynamics</i> . CRC Press, 2019. 6. J. D. Jackson, <i>Classical Electrodynamics</i> . 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. <b>Допоміжна:</b> 1. М. В. Блажиєвська, О. І. Григорчак, Ю. С. Криницький та ін.; за ред. Ю. С. Криницького та А. А. Ровенчака, <a href="#">Збірник задач з електродинаміки</a> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2015. 2. В. В. Обуховський, <i>Збірка задач для контрольних робіт з електродинаміки</i> . Київ: Вид-во КНУ імені Тараса Шевченка, 2003.

	<p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eric Weisstein's World of Physics <a href="https://scienceworld.wolfram.com/physics/">https://scienceworld.wolfram.com/physics/</a></li> <li>2. Wikipedia. <a href="https://www.wikipedia.org">https://www.wikipedia.org</a></li> <li>3. The Feynman Lectures on Physics. Vol. II: The electromagnetic field. <a href="https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html">https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	90 годин, з яких 64 годин аудиторних занять, з них 32 годин лекцій, 32 годин практичних занять, та 26 години самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p><b>К01.</b> Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.</p> <p><b>К06.</b> Навички міжособистісної взаємодії.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p><b>К16.</b> Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.</p> <p><b>К18.</b> Здатність оцінювати порядок величин у різних дослідженнях, так само як точності та значимості результатів.</p> <p><b>К21.</b> Здатність моделювати фізичні системи та астрономічні явища і процеси.</p> <p><b>К23.</b> Здатність виконувати теоретичні та експериментальні дослідження автономно та у складі наукової групи.</p> <p><b>К24.</b> Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.</p> <p><b>К25.</b> Здатність самостійно навчатися і опановувати нові знання з фізики, астрономії та суміжних галузей.</p> <p><b>К26.</b> Розвинуте відчуття особистої відповідальності за достовірність результатів досліджень та дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.</p> <p><b>К28.</b> Орієнтація на найвищі наукові стандарти – обізнаність щодо фундаментальних відкриттів та теорій, які суттєво вплинули на розвиток фізики, астрономії та інших природничих наук.</p> <p><i>Програмні результати навчання (ПР), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p><b>ПР01.</b> Знати, розуміти та вміти застосовувати основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.</p> <p><b>ПР03.</b> Знати і розуміти експериментальні основи фізики: аналізувати, описувати, тлумачити та пояснювати основні експериментальні підтвердження існуючих фізичних теорій.</p> <p><b>ПР04.</b> Вміти застосовувати базові математичні знання, які використовуються у фізиці та астрономії: з аналітичної геометрії, лінійної алгебри, математичного аналізу, диференціальних та інтегральних рівнянь, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії груп, методів математичної фізики, теорії функцій комплексної змінної, математичного моделювання.</p>

	<p><b>ПР05.</b> Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.</p> <p><b>ПР06.</b> Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії.</p> <p><b>ПР08.</b> Мати базові навички самостійного навчання: вміти відшукувати потрібну інформацію в друкованих та електронних джерелах, аналізувати, систематизувати, розуміти, тлумачити та використовувати її для вирішення наукових і прикладних завдань.</p> <p><b>ПР11.</b> Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки.</p> <p><b>ПР12.</b> Вміти представляти одержані наукові результати, брати участь у дискусіях стосовно змісту і результатів власного наукового дослідження.</p> <p><b>ПР16.</b> Мати навички роботи із сучасною обчислювальною технікою, вміти використовувати стандартні пакети прикладних програм і програмувати на рівні, достатньому для реалізації чисельних методів розв'язування фізичних задач, комп'ютерного моделювання фізичних та астрономічних явищ і процесів, виконання обчислювальних експериментів.</p> <p><b>ПР24.</b> Розуміти місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки і технологій.</p>
<b>Ключові слова</b>	Рівняння Максвелла; 4-формалізм, тензор електромагнітного поля, спеціальна теорія відносності, релятивістська механіка; релятивістська електродинаміка, рівняння Максвелла–Лоренца, електродинаміка середовища.
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Див. Табл. 1 Схема курсу
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Іспит у кінці VI семестру. Форма: Письмово-усний.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, електрика, перша частина курсу класичної електродинаміки.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, розв'язування задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, загальнонавчавні комп'ютерні програми й операційні системи, проєктор
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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"> <li>9–10 — задача розв'язана повністю правильно;</li> <li>7–8 — розв'язок в основному правильний, є незначні технічні огріхи;</li> <li>5–6 — задача розв'язана частково;</li> <li>3–4 — записано лише кілька вихідних виразів;</li> <li>1–2 — записано лише один вихідний вираз;</li> <li>0 — відмова відповідати;</li> </ul> </li> </ul>

робота на практичних оцінюється так:

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:

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:

тестова частина — 30 балів (питання з варіантами вибору відповідей); два розширених теоретичних питання по 10 балів кожне відповідно до такої шкали:

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.

Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.

Підсумкова максимальна кількість балів — 100.

**Письмові роботи:** Очікується, що студенти виконають дві контрольні роботи.

**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.

**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.

**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><b>Політика виставлення балів.</b> 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><b>Орієнтовний перелік питань на іспит</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки.</li> <li>2. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів.</li> <li>3. Математичний апарат електродинаміки: ряд Фур'є та інтегральне перетворення Фур'є; <math>\delta</math>-функція Дірака. Густина точкового заряду.</li> <li>4. Потенціали електромагнітного поля. Градієнтна інваріантність електромагнітного поля.</li> <li>5. Калібрування Кулона і Лоренца, рівняння Д'Аламбера. Поперечний струм.</li> <li>6. Рівняння неперервності. Закон збереження заряду.</li> <li>7. Закон збереження енергії. Умови випромінювання.</li> <li>8. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень.</li> <li>9. Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі.</li> <li>10. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля.</li> <li>11. Рівняння для статичних полів. Розрахунок потенціалів і полів через густини зарядів і струмів.</li> <li>12. Мультипольні розвинення. Потенціали і поля електричного та магнітного диполів. Електричний квадрупольний момент.</li> <li>13. Потенціали Ліснара–Віхерта.</li> <li>14. Поле рухомого точкового заряду.</li> <li>15. Випромінювання точкового заряду.</li> <li>16. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.</li> <li>17. Поле системи зарядів на великих відстанях від джерела, близька і хвильова зони.</li> <li>18. Дипольне і квадрупольне випромінювання.</li> <li>19. Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.</li> <li>20. Релятивістська механіка вільної частинки: інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, 4-вектор енергії-імпульсу.</li> <li>21. Заряджена частинка в електромагнітному полі: функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху.</li> <li>22. Варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського.</li> <li>23. Тензор електромагнітного поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.</li> <li>24. Знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.</li> <li>25. 4-форма законів збереження. Тензор енергії-імпульсу.</li> <li>26. Мікро- та макрополя. Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів.</li> <li>27. Вектори поляризації та намагнічення. Рівняння поля в середовищі.</li> <li>28. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях: неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі.</li> </ol>

	<p>29. Умови на межі двох середовищ.</p> <p>30. Поляризація середовища у змінному полі.</p> <p>31. Комплексна діелектрична проникність, дисперсійні співвідношення.</p> <p>32. Квазістатичні явища. Скін-ефект.</p> <p>Типові задачі можна <a href="#">переглянути тут</a>.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу «Електродинаміка 2»\*

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Теорія відносності</b>			
1	<p><b>Принципи відносності. Інтервал між подіями. Чотиривимірні простори Мінковського.</b> Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.</p> <p>Література: Б1–6, Д1, 2</p>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	1 тиждень
2	<p><b>Релятивістська механіка вільної частинки:</b> інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, енергія й імпульс; 4-вектор енергії-імпульсу; закони перетворення енергії й імпульсу. Рівняння руху вільної частинки у формі Лагранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.</p> <p>Література: Б1–6, Д1, 2</p>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
3	<p><b>Заряджена частинка в електромагнітному полі:</b> функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху. Приклади.</p> <p>Література: Б1–6, Д1, 2</p>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
4	<p><b>Тензор електромагнітного поля:</b> варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського; тензор поля і його властивості; перетворення потенціалів і полів; інваріанти поля.</p> <p>Література: Б1–6, Д1, 2</p>	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень

\* Поклики на літературу подано відповідно до переліку базової (Б) та допоміжної (Д) літератури.

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Коваріантна форма рівнянь електродинаміки</b>			
5	<b>Основні співвідношення електродинаміки у просторі Мінковського:</b> 4-струм і перетворення Лоренца; 4-форма рівнянь електродинаміки; варіаційний принцип в теорії поля; інтеграл дії для зарядів і поля; знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
6	<b>Чотиривимірна форма законів збереження:</b> тензор енергії-імпульсу; 4-сила і густина сили. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
7	<b>4-форма для сили радіаційного гальмування.</b> Рівняння Лоренца–Абрагама–Дірака. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 1 год	1 тиждень
8	<b>Випадок довільного поля.</b> Дія, рівняння руху, тензор енергії-імпульсу. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год (підсумкова к/р 1), самостійна робота — 2 год	1 тиждень
<b>Рівняння макроскопічної електродинаміки</b>			
9–10	<b>Мікро- та макрополя, мікроскопічні рівняння Максвелла–Лоренца.</b> Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів. Вектори поляризації та намагніченості. Умови на межі двох середовищ. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 4 год, практичні — 4 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні
11–12	<b>Поляризація і намагніченість середовища в постійних полях:</b> неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі; діа- та парамагнетизм. Провідність. Модель Друде. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 4 год, практичні — 4 год, самостійна робота — 3 год	2 тижні
13–14	<b>Загальна характеристика матеріальних рівнянь.</b> Енергія поля в середовищі. Ємність. Індуктивність. Сили у статичних полях. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 4 год, практичні — 4 год, самостійна робота — 2 год	2 тижні
15	<b>Поляризація середовища у змінному полі.</b> Комплексна діелектрична проникність, дисперсні співвідношення. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год, самостійна робота — 2 год	1 тиждень
16	<b>Квазістатичні явища.</b> Умови квазістатичності та рівняння квазістатичних явищ. Нормальний та аномальний скін-ефекти. Література: Б1–6, Д1, 2	Лекції — 2 год, практичні — 2 год (підсумкова к/р 2), самостійна робота — 2 год	1 тиждень