



# ТЕОРІЯ ПОЛЯ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### 1. Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>105 Прикладна фізика та наноматеріали</i>
Освітня програма	<i>Прикладна фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>Очна (денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>3 кредити, 90 годин: 36 годин лекцій, 18 годин практичних, 36 годин СРС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Екзамен</i>
Розклад занять	<i>Лекції – раз на тиждень, семінар – раз на 2 тижні</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: д.ф.-м.н., проф. Жданов Валерій Іванович, <a href="mailto:ValeryZhdanov@gmail.com">ValeryZhdanov@gmail.com</a> Семінарські: д.ф.-м.н., проф. Жданов Валерій Іванович, <a href="http://phes.ipt.kpi.ua/zhdanov-valerij-ivanovych">http://phes.ipt.kpi.ua/zhdanov-valerij-ivanovych</a></i>
Розміщення курсу	

### 2. Програма навчальної дисципліни

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

Курс «Теорія поля» є складовою загального курсу теоретичної фізики, який є необхідним етапом базової фізичної освіти і закладає основу для подальшої спеціалізації. Метою навчальної дисципліни «Теорія поля» є формування у студентів знань і вмінь для теоретичного аналізу електромагнітних процесів у суцільному середовищі, зокрема, пов'язаних з поширенням електромагнітного випромінювання та реакції середовищ на електромагнітне поле. Предмет вивчення: електромагнітні процеси та явища в фізичних системах.

**Метою кредитного модуля** є формування у студентів здатностей:

Застосовувати знання з теорії електромагнітного поля для аналізу й передбачення явищ за участю стаціонарних та змінних електричного і магнітного полів, в тому числі з процесами випромінювання;

Застосовувати знання спеціальної теорії відносності для аналізу та визначення параметрів електромагнітних систем;

Застосовувати рівняння Максвелла та рівняння руху зарядів для постановки та розв'язання електродинамічних задач.

### Загальні компетентності

ЗК 1	Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
ЗК 2	Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
ЗК 5	Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.
ЗК 7	Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
ЗК 9	Здатність працювати автономно.

### Спеціальні (фахові, предметні) компетентності

ФК 5	Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики.
ФК 6	Здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем.
ФК 7	Здатність використовувати методи і засоби теоретичного дослідження та математичного моделювання в професійній діяльності.

### Програмні результати навчання

ПРН 1	Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.
ПРН 17	Знання основ професійно-орієнтованих дисциплін спеціальності для розв'язання практичних проблем прикладної фізики.

### Основні завдання кредитного модуля.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати **такі результати навчання**:

#### **Знати :**

1. мати уявлення про основні електродинамічні явища,
2. основні поняття, означення та рівняння класичної електродинаміки,
3. основні поняття, означення та рівняння спеціальної теорії відносності,

#### **вміти:**

1. виводити базові співвідношення, що впливають з рівнянь Максвелла в інтегральній, диференціальній та коваріантній формах, показувати зв'язки між ними,
2. ставити задачі на знаходження спостережуваних величин, що описують електромагнітні процеси, в нерелятивістському наближенні та у релятивістському випадку,
3. знаходити розподіли електричного та магнітного полів і траєкторії заряджених частинок в простих електромагнітних системах,
4. визначати характеристики електромагнітних хвиль у вакуумі, а також характеристики випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль в нерелятивістських процесах,
5. знаходити зв'язки спостережуваних величин при переходах між інерціальними системами відліку.

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

Необхідні навички: Курс «Теорія поля» ґрунтується на курсах електрики та магнетизму, основ математичного аналізу (лінійна алгебра, аналітична геометрія, інтегральне та диференціальне числення, векторний аналіз, елементи тензорного аналізу), диференціальних рівнянь.

«Теорія поля» забезпечує курси «Електродинаміка суцільних середовищ», «Статистична радіофізика та оптика», «Локальні методи досліджень», «Стохастичні сигнали в електрофізичних дослідженнях», «Оптика і фотоніка», а також є елементом загальної фізико-математичної

підготовки, що забезпечує індивідуальну наукову роботу студентів в рамках бакалаврських та магістерських робіт та ін.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

<b>Назви змістових модулів і тем</b>
<b>Розділ 1. Базові рівняння електродинаміки.</b>
Тема 1.1. Рівняння Максвелла (тривимірна форма).
Тема 2.1. Вільне електромагнітне поле
СРС. Електромагнітне поле як сукупність осциляторів. Власні коливання поля.
<b>Розділ 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль.</b>
Тема 2.1. Потенціали електромагнітного поля.
Тема 2.2. Випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль.
СРС. Підготовка до МКР за Розділами 1,2.
<b>Розділ 3. Коваріантне формулювання електродинаміки</b>
Тема 3.1. Перетворення Лоренца.
Тема 3.2. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки у просторі Мінковського.
Тема 3.3. Енергія та імпульс електромагнітного поля.

### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Усі посібники є в бібліотеці факультету, бібліотеці КПІ, або доступні через інтернет. Вибір розділів у посібниках зазначено нижче у переліку лекційних занять, більш точні вказівки подаються на лекціях.

#### Основна:

1. В.І.Жданов. Вступ до теорії відносності. К., НПЦ "Київський університет", 2008.
2. В.І.Жданов. Теорія поля. НТУУ "КПІ", 2014 (електронний ресурс).

#### Задачники:

3. В. І. Жданов, С. М. Пономаренко, В. Б. Долгошей. Класична електродинаміка. Збірник задач. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020 (електронний ресурс).
4. А.П. Шпак, В.І. Жданов, А.Б. Шевченко. Вступ до спеціальної теорії відносності. К. НТУУ "КПІ", 2000.

#### Допоміжна:

5. В.Й.Сугаков. Електродинаміка. К., Вища школа. 1974.
6. А.М.Федорченко. Теоретична фізика. Т.1. К., Вища школа, 1992.
7. Дж.Джексон. Классическая электродинамика. М., Мир, 1965.

8. Пановский, М.Филипс. Классическая электродинамика. М., ГИФМЛ, 1968.
9. В.В.Батыгин, И.Н.Топтыгин. Сборник задач по электродинамике. М., Наука, 1970.
10. Л.Г.Гречко, В.И.Сугаков, О.Ф.Томасевич, А.М.Федорченко. Сборник задач по теоретической физике. К., Высшая школа, 1984.
11. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М., Наука, 1967.

### Інформаційні ресурси

1. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18201?mode=full>
2. <https://drive.google.com/file/d/1wtPXrmR0n3B-iW9coFPGiOQ2uUDEvLm3/view>

6.

Навчальний контент

## 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

### ЛЕКЦІЙНІ ЗАНЯТТЯ

## РОЗДІЛ І. БАЗОВІ РІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

### Тема 1.1. Рівняння Максвелла.

*Лекції 1.1.1-1.1.2.* Рівняння Максвелла. Базові поняття та рівняння електрики та магнетизму в інтегральній та диференціальній формі. Граничні умови на межі двох областей. Рівняння Максвелла та закони збереження.

### Тема 1.2. Вільне електромагнітне поле.

*Лекція 1.2.1-1.2.3.* Плоскі монохроматичні хвилі. Спектральний розклад поля випромінювання. Співвідношення невизначеностей для хвильових процесів.

*Лекція 2.1.4.* Випадкові поля випромінювання. Спектр потужності. Когерентність. Тензор поляризації.

СРС. Електромагнітне поле як сукупність осциляторів. Власні коливання поля.

## РОЗДІЛ 2. ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

### Тема 2.1. Потенціали електромагнітного поля.

*Лекція 2.1.1.* Рівняння для потенціалів, калібрувальна інваріантність рівнянь електродинаміки. Перетворення Фур'є. Рівняння Гельмгольца для потенціалів. Умови випромінювання для ізольованої системи.

*Лекція 2.1.2.* Розв'язок рівнянь Гельмгольца та Даламбера. Запізнюючі потенціали.

### Тема 2.2. Випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль.

*Лекція 2.2.1-2.2.2.* Загальний огляд задач на випромінювання. Поле системи зарядів на великих відстанях. Дипольне випромінювання.

*Лекція 2.2.3.* Магніто-дипольне та квадрупольне випромінювання.

*Лекція 2.2.4.* Випромінювання прискореної частинки. Потенціали Лієнара-Віхерта.

Сила променевого тиску.

*Лекція 2.2.5.* Розсіювання е.м.х. вільним зарядом; формула Томсона.

СРС: Підготовка до МКР за розділами 1,2.

## РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА СПЕЦІАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

### Тема 3.1. Перетворення Лоренца.

*Лекція 3.1.1.* Тензорний характер спостережуваних величин (механіка і електродинаміка). Чотиривектор швидкості. 4-вектор струму й закон збереження заряду. Перетворення густини заряду і густини струму.

### **Тема 3.2. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки у просторі Мінковського.**

*Лекція 3.2.1.* Тензор Максвелла та коваріантна форма рівнянь електродинаміки. Відповідність тривимірної та чотиривимірної форми рівнянь Максвелла. Коваріантність тензора електромагнітного поля як наслідок рівнянь Максвелла. Виведення перетворень для електричного та магнітного полів при зміні систем відліку.

*Лекція 3.2.2.* Плоскі хвилі у 4-вимірному формулюванні. Ефект Доплера для загальних відносних рухів. Коваріантні рівняння руху зарядженої частинки та принцип відповідності.

*Лекція 3.2.3.* Чотиривектор потенціалу. Калібрувальна інваріантність та калібрування Лоренца. Рівняння для вектор-потенціалу. Розв'язок хвильового рівняння та коваріантність 4-вектора потенціалу.

### **Тема 3.3. Енергія та імпульс електромагнітного поля.**

*Лекція 3.3.1.* Тензор енергії-імпульсу електромагнітного поля. Закони збереження.

*Лекція 3.3.2.* Момент імпульсу електромагнітного поля.

### **СЕМІНАРСЬКІ ЗАНЯТТЯ**

Основні завдання циклу семінарських занять – навчити студентів застосовувати рівняння Максвелла та рівняння руху зарядів до обчислення полів, зарядів та струмів. Знаходити перетворення базових електродинамічних величин про перехід між інерціальними системами відліку. Застосовувати співвідношення релятивістської динаміки до розв'язання типових задач. Ставити задачі та знаходити траєкторії частинок в однорідних електромагнітних полях. Визначати характеристики електромагнітних хвиль у вакуумі, діаграми направленості при випромінюванні та перерізи розсіювання для найпростіших систем. Знаходити розподіли полів в статичних системах.

Семінарські заняття входять до плану (18 год.) і проводяться за наступними темами:

1. Математичний апарат. Рівняння Максвелла (інтегральна та диференціальна форма, макроскопічні й мікроскопічні). Вектори поляризації та намагнічення.
2. Задачі електростатики та магнітостатики в сферичних та циліндричних координатах. за вибором викладача.
3. Поширення монохроматичних хвиль та хвильових пакетів. Дисперсійне рівняння електромагнітного поля в пустоті та у середовищі, гаусівський хвильовий пакет, групова швидкість, фазова швидкість. Розпливання хвильового пакета у середовищі з дисперсією.
4. Запізнюючі потенціали. Час загаювання. Дипольне та квадрупольне випромінювання, хвильова зона. Випромінювання лінійного струму.
5. Діаграми спрямованості. Розсіювання випромінювання. Поляризація. Розрахунок перерізів.
6. Одновимірні перетворення Лоренца. Чотиривектори та тензори. Зв'язок коваріантної та стандартної (3-вимірної) форми рівнянь Максвелла та релятивістських рівнянь руху заряджених частинок. Перетворення полів при переходах між інерціальними системами. Релятивістська кінематика. Ефект Доплера. Розв'язання рівнянь руху заряджених частинок.

### **6. Самостійна робота студента/аспіранта**

- *підготовка до аудиторних занять (кожен тиждень)*
- *розв'язання тестових задач (10-20 хв., в залежності від складності),*

- виконання розрахункової роботи (2 тижні),
- виконання домашньої контрольної роботи (1 тиждень)

## 7.

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

- правила поведінки на заняттях: за активність нараховуються додаткові бали (до 2 балів за заняття);
- правила захисту індивідуальних завдань: проводиться співбесіда онлайн для перевірки засвоєння матеріалу з можливим розв'язанням додаткових тестових завдань;
- за розв'язання завдань підвищеної складності нараховуються додаткові бали (до 10) Штрафні бали можуть бути нараховані за неохайне оформлення письмових робіт.
- політика дедлайнів та перескладань: іспити – згідно з графіком, який формується деканатом; роботи, виконані із запізненням після опублікування правильних розв'язків не зараховуються;
- політика щодо академічної доброчесності: за наявності елементів плагіату нараховуються штрафні бали, оцінка знижується (залежно від кількості списаного матеріалу) для усіх сторін, хто має до цього відношення ;

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

Поточний контроль: експрес-опитування, опитування за темою заняття, МКР, тест тощо

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

Семестровий контроль: **екзамен**

Умови допуску до семестрового контролю: мінімально позитивна оцінка за індивідуальні завдання / зарахування усіх розрахункових робіт / семестровий рейтинг більше 25 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

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

#### Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code> .

#### Норми етичної поведінки

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code> .

#### Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

## 8.

### 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

#### Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль

##### I. БАЗОВИЙ РІВЕНЬ (допуск до іспиту).

1. Базові співвідношення векторного та тензорного аналізу, що використовуються в курсі. Знати напам'ять та вміти використовувати.
2. Рівняння Максвелла (мікроскопічні): інтегральна й диференціальна форма, граничні умови: Знати напам'ять та вміти використовувати.
3. Формули для запізнюючих потенціалів ізольованої системи (розв'язки хвильових рівнянь та рівняння Гельмгольца) Знати напам'ять та вміти використовувати.
4. Закон збереження енергії, вектор Пойнтінга. Знати напам'ять, виводити та вміти використовувати.
5. ДЛЯ МІКРОСКОПІЧНИХ РІВНЯНЬ, тривимірна форма: знати напам'ять та виводити:
  - 5.1. Зв'язок між інтегральною та диференціальною формою,
  - 5.2. Виведення умов на межі середовищ для тангенціальних та нормальних компонент полів.
  - 5.3. Потенціали поля, умова Лоренца та рівняння для потенціалів поля в калібруванні Лоренца.
  - 5.4. Плоскі монохроматичні хвилі у вакуумі. Поперечність, закон дисперсії. Орієнтація та зв'язок електричного й магнітного полів, густина потоку енергії.
6. Рівняння руху зарядженої частинки в електромагнітному полі
  - 6.1. 4-вимірна форма: знати напам'ять та виводити з принципу відповідності.
  - 6.2. 3-вимірна форма (знати напам'ять).
7. Електродинаміка у просторі Мінковського: Знати напам'ять та вміти використовувати.
  - 7.1. Означення базових величин (4-швидкість, 4-струм, тензор електромагнітного поля, квадрат інтервалу).
  - 7.2. Тензор Мінковського. Група Лоренца. Перетворення Лоренца (основні означення, одновимірний випадок, додавання швидкостей, власний час).
  - 7.3. типи векторів – коваріантні та контраваріантні Перетворення тензорів. Операції з тензорами.
  - 7.4. Тензор електромагнітного поля  $F_{\mu\nu}$  та зв'язок з 4-вектором потенціалу.
  - 7.5. Коваріантна форма мікроскопічних рівнянь Максвелла.
  - 7.6. Рівняння для 4-потенціалів.
  - 7.7. Ефект Доплера.

##### II. ОСНОВНИЙ РІВЕНЬ: Знати та виводити

###### A. Тривимірна форма рівнянь електродинаміки.

1. Мікроскопічні рівняння Максвелла; інтегральна та диференціальна форма (зв'язок, виведення диференціальної з інтегральної форми).
2. Виведення граничних умов (мікроскопічні рівняння Максвелла).
3. Закон збереження енергії: тривимірна форма мікроскопічних рівнянь поля. Вектор Пойнтінга.

4. Векторний та скалярний потенціали, калібрувальна інваріантність рівнянь електродинаміки.
5. Калібрування за Лоренцем та рівняння для потенціалів.
6. Запізнюючі потенціали у випадку ізольованої системи.
7. Рівняння Гельмгольца та його розв'язки. Умова випромінювання.
8. Потенціали Ліенара-Віхерта точкового заряду.
9. Рівняння для запізнюючого часу.
10. Випромінювання нерелятивістського заряду.
11. Магнітне поле заряду в зоні випромінювання (з потенціалів Ліенара-Віхерта).
12. Плоскі монохроматичні хвилі в ізотропному середовищі. Поперечність, закон дисперсії, зв'язок між напруженостями. Поляризація, густина потоку енергії.
13. Спектральний розклад й комплексна форма запису фізичних величин.
14. Поле на великих відстанях від нестаціонарного джерела. Хвильова зона випромінювання.
15. Дипольне випромінювання нерелятивістських систем: магнітне поле в зоні випромінювання, потужність випромінювання.
16. Дипольне випромінювання нерелятивістських систем: потужність випромінювання.
17. Магнітодипольне випромінювання: магнітне поле в зоні випромінювання.
18. Магнітодипольне випромінювання: потужність випромінювання.
19. Квадрупольне випромінювання: магнітне поле в зоні випромінювання.
20. Розсіювання лінійно-поляризованої е.м.х. нерелятивістським зарядом. Диференціальний та повний перерізи розсіювання. Формула Томсона.
21. Розсіювання природних (цілком неполяризованих) е.м.х. нерелятивістським зарядом. Диференціальний та повний перерізи.
22. Поляризація при розсіюванні вільним точковим нерелятивістським зарядом.
23. Співвідношення невизначеностей для хвильових пакетів.
24. Тензор поляризації та степінь поляризації.
25. Коефіцієнт деполіризації при розсіюванні цілком неполяризованих е.м.х. нерелятивістським зарядом.

## **Б. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА У ПРОСТОРІ МІНКОВСЬКОГО.**

26. Одновимірні перетворення Лоренца (знати і застосовувати).
27. Перетворення координат та часу для загальних відносних рухів інерціальних систем відліку (вивести з одновимірних). Інваріантність квадрата інтервалу (довести).
28. Формула додавання швидкостей (для загальних відносних рухів інерціальних систем відліку).
29. Група Лоренца (власна та загальна); тензорна алгебра в просторі Мінковського. Часоподібні, просторово-подібні та ізотропні вектори та інтервали.
30. Тензорний характер спостережних величин. 4-швидкість. Умова нормування. 4-імпульс частинки.
31. Тензорний характер спостережних величин. 4-вектор густини струму.
32. 4-вимірна форма рівнянь електромагнітного поля та зв'язок з 3-вимірною.
33. Коваріантна форма релятивістських рівнянь руху заряду у зовнішньому полі (обґрунтування з принципу відповідності для малих швидкостей).
34. Тензор електромагнітного поля (довести закон перетворення з рівнянь поля, маючи розв'язки для запізнюючих потенціалів).
35. Інваріанти поля.
36. Формули перетворення електричного та магнітного полів при переході в іншу інерціальну систему відліку (вивести).
37. Плоскі хвилі у 4-вимірному формулюванні. Рівняння ейконалу.
38. Чотиривектор потенціалу. Калібрувальна інваріантність. Зв'язок з тривимірним формулюванням.
39. Калібрування за Лоренцем. Рівняння для 4-потенціалів.



40. Релятивістський ефект Доплера.
41. Закони збереження енергії – імпульсу. Тензор енергії імпульсу.
42. Закони збереження моменту імпульсу. Чотири-тензор  $M^{\mu\nu}$  моменту імпульсу системи частинок. Чотири-тензор густини моменту імпульсу електромагнітного поля  $M^{\mu\nu\alpha}$ .
43. \*\* Принцип стаціонарної дії для електромагнітного поля. Виведення рівнянь поля з принципу стаціонарної дії.
44. \*\* Принцип стаціонарної дії для системи частинки + електромагнітне поле. Виведення рівнянь руху частинки в зовнішньому полі.

*\*\* – для самостійного вивчення*

**Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** проф, д.ф.-м.н., Жданов В.І.

**Ухвалено** кафедрою прикладної фізики (протокол № 2 від 4 вересня 2020 р.)

**Затверджено** Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 7 вересня 2020 р.)