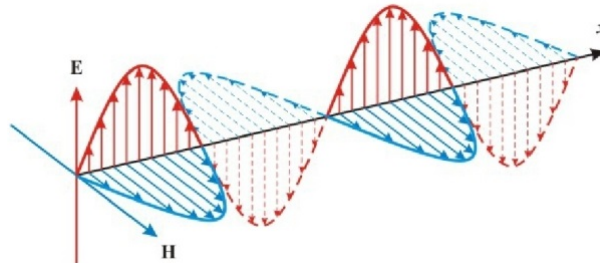




# [RE-110] ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ



## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	17 - Електроніка та телекомунікації
Спеціальність	172 - Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма	172Б РТС - Радіотехнічні інформаційні технології (ЄДЕБО id: 6842)172Б РОС - Радіозв'язок і оброблення сигналів (ЄДЕБО id: 6364)172Б РСІ - Радіосистемна інженерія (ЄДЕБО id: 7350)172Б ІТР - Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки (ЄДЕБО id: 49229)172Б ІТМР - Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки (ЄДЕБО id: 5627)172Б ІКР - Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія (ЄДЕБО id: 49228)172Б РКС - Радіотехнічні комп'ютеризовані системи (ЄДЕБО id: 49227)172Б ІТРЕТ+ - Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки (ЄДЕБО id: 57907)172Б ІКРІ+ - Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія (ЄДЕБО id: 57910)172Б РТКС+ - Радіотехнічні комп'ютеризовані системи (ЄДЕБО id: 57920)172Б ТРЕБ - Технології радіоелектронної боротьби (ЄДЕБО id: 63920)G5Б ТРЕБ - Технології радіоелектронної боротьби (ЄДЕБО id: )G5Б ІТРЕТ - Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки (ЄДЕБО id: )G5Б ІКРІ - Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія (ЄДЕБО id: )G5Б РТКС - Радіотехнічні комп'ютеризовані системи (ЄДЕБО id: 83620)
Статус дисципліни	Нормативна
Форма здобуття вищої освіти	Очна
Рік підготовки, семестр	2 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	7.5 кред. (Лекц. 54 год, Практик. 36 год, Лаб. 36 год, СРС. 99 год )
Семестровий контроль/контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	<a href="https://rozklad.kpi.ua">https://rozklad.kpi.ua</a>
Мова викладання	Українська / Англійська

Інформація про керівника курсу / викладачів

Лекц.: [Пільтяй С. І.](#),  
Практ.: [Пільтяй С. І.](#),  
Лаб.: [Пільтяй С. І.](#),  
СРС.: [Пільтяй С. І.](#)

Розміщення курсу

<https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=642>

## Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна "Електродинаміка та поширення радіохвиль" присвячена вивченню основних властивостей електромагнітного поля, набуття студентами конкретних знань про поширення електромагнітних хвиль. Студенти навчаються визначати основні характеристики електромагнітних хвиль; формувати електромагнітні хвилі з різними видами поляризації; вимірювати поляризаційні діаграми і визначати за ними поляризацію хвиль; розв'язувати крайові задачі електродинаміки; розраховувати і вимірювати параметри ліній передачі і резонаторів; вимірювати розподіли полів у лініях передачі та резонаторах.

Після засвоєння навчальної дисципліни "Електродинаміка та поширення радіохвиль" студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

#### Знання:

- фундаментальних законів та основ теорії електромагнітного поля;
- методів розв'язку основних задач електродинаміки;
- структури і характеристик електромагнітних полів у вільному просторі, середовищах з втратами, лініях передачі та резонаторах;
- методів вимірювання розподілів полів у хвилеводах і резонаторах.

#### Уміння:

- розраховувати основні параметри плоских електромагнітних хвиль;
- визначати коефіцієнти відбиття і проходження на межі поділу середовищ;
- розв'язувати крайові задачі електродинаміки для хвилеводів, резонаторів;
- працювати з вимірювальною апаратурою діапазону надвисоких частот.

#### Досвід:

- формування електромагнітних хвиль із різними видами поляризації;
- вимірювання поляризаційних діаграм для хвиль різних поляризацій;
- проведення вимірювань характеристик хвилеводів і розподілу поля в них;
- експериментального дослідження резонаторів і визначення їх параметрів.

### Програмні компетентності

#### Загальні компетентності

ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;

ЗК 4. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності;

ЗК 7. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;

ЗК 8. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.

#### *Фахові компетентності*

ФК 3. Здатність використовувати базові методи, способи та засоби отримання, передавання, обробки та зберігання інформації;

ФК 4. Здатність здійснювати комп'ютерне моделювання пристроїв, систем і процесів з використанням універсальних пакетів прикладних програм;

ФК 6. Здатність проводити інструментальні вимірювання в інформаційно-телекомунікаційних мережах, телекомунікаційних та радіотехнічних системах;

ФК 10. Здатність здійснювати монтаж, налагодження, налаштування, регулювання, досліду перевірку працездатності, випробування та здачу в експлуатацію споруд, засобів і устаткування телекомунікацій та радіотехніки;

ФК 14. Здатність самостійно вивчати науково-технічну інформацію, вітчизняний і закордонний досвід з тематики інвестиційного (або іншого) проекту розробки засобів телекомунікацій та радіотехніки;

ФК 15. Здатність проводити розрахунки у процесі проектування споруд і засобів інформаційно-телекомунікаційних мереж, телекомунікаційних та радіотехнічних систем, відповідно до технічного завдання з використанням як стандартних, так і самостійно створених методів, прийомів і програмних засобів автоматизації проектування.

#### *Програмні результати навчання*

ПРН 1. Аналізувати, аргументувати, приймати рішення при розв'язанні спеціалізованих задач та практичних проблем телекомунікацій та радіотехніки, які характеризуються комплексністю та неповною визначеністю умов;

ПРН 7. Грамотно застосовувати термінологію галузі телекомунікацій та радіотехніки;

ПРН 8. Описувати принципи та процедури, що використовуються в телекомунікаційних системах, інформаційно-телекомунікаційних мережах та радіотехніці;

ПРН 13. Застосовування фундаментальних і прикладних наук для аналізу та розробки процесів, що відбуваються в телекомунікаційних та радіотехнічних системах;

ПРН 18. Знаходити, оцінювати і використовувати інформацію з різних джерел, необхідну для розв'язання професійних завдань, включаючи відтворення інформації через електронний пошук.

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

Дисципліна "**Електродинаміка та поширення радіохвиль**" ґрунтується на знаннях, набутих студентами після вивчення дисциплін "Вища математика", "Загальна фізика", "Основи теорії кіл". Студенти повинні володіти основами векторного аналізу, електростатики, електродинаміки, теорії коливальних і хвильових процесів, теорією довгих ліній.

Отримані знання та навички після вивчення дисципліни «Електродинаміка та поширення радіохвиль» використовуються надалі в дисциплінах "Пристрої НВЧ", "Антени", "Проектування приймальних пристроїв НВЧ", "Автоматизоване проектування антен та пристроїв НВЧ",

"Електромагнітна сумісність", «Антенні системи», «Супутникові інформаційні системи», при виконанні курсових та дипломних робіт.

### **3. Зміст навчальної дисципліни**

В ході вивчення дисципліни "Електродинаміка та поширення радіохвиль" передбачено розгляд наступних розділів та тем:

#### **Розділ 1. Електромагнітне поле у вакуумі**

Тема 1. Основні положення електростатики

Тема 2. Основні положення магнетостатики

Тема 3. Рівняння Максвелла для полів у вакуумі

#### **Розділ 2. Рівняння Максвелла для полів в середовищі. Матеріальні рівняння. Закон збереження енергії**

Тема 1. Середовища (електромагнітний погляд)

Тема 2. Рівняння Максвелла для полів у середовищі

#### **Розділ 3. Хвилі. Поширення хвиль у необмежених середовищах**

Тема 1. Основні характеристики хвилі

Тема 2. Плоскі гармонічні електромагнітні хвилі в середовищі без втрат

Тема 3. Поширення плоских гармонічних хвиль у середовищі з втратами

#### **Розділ 4. Хвилі. Поширення хвиль у необмежених середовищах**

Тема 1. Основні характеристики хвилі

Тема 2. Плоскі гармонічні електромагнітні хвилі в середовищі без втрат

Тема 3. Поширення плоских гармонічних хвиль у середовищі з втратами

#### **Розділ 5. Електромагнітні потенціали. Електромагнітні хвилі, випромінені елементарним випромінювачем**

Тема 1. Електромагнітні потенціали

Тема 2. Випромінювання електромагнітних хвиль елементарним електричним випромінювачем (диполем Герца)

Тема 3. Природа електромагнітних хвиль. Фазові швидкості полів хвиль, випромінених електричним диполем Герца

Тема 4. Фазові швидкості енергетичних характеристик хвиль, випромінених електричним диполем Герца

#### **Розділ 6. Граничні умови. Межові (крайові) задачі електродинаміки. Єдиність розв'язку межових задач**

Тема 1. Граничні умови

Тема 2. Наближені граничні умови

Тема 3. Межові задачі електродинаміки. Єдиність розв'язку межових задач

#### **Розділ 7. Деякі принципи, леми та теореми електродинаміки**

#### **Розділ 8. Хвильові процеси, обумовлені межами поділу середовищ**

Тема 1. Хвильові процеси під час похилого падіння плоскої електромагнітної хвилі на межу поділу

Тема 2. Поширення електромагнітних хвиль у багатошарових структурах

Структурою курсу передбачено проведення лекційних, практичних та лабораторних занять, а також виконання модульної контрольної роботи та розрахунково-графічної роботи.

### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

#### **Рекомендована література**

1. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Конспект лекцій: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / С.

- І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. - 171 с.
2. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля: Підручник для студентів ВНЗ / За заг. ред. В. М. Шокало та В. І. Правди. — Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009. — 286 с.
  3. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль: Підручник для студентів ВНЗ / За заг. ред. В. М. Шокало та В. І. Правди. — Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2010. — 435 с.
  4. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Збірник задач: навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 88 с.
  5. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Практикум: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. І. Пільтяй; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 54 с.
  6. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Лабораторний практикум: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія», «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. М. Купрій, С. І. Пільтяй, В. І. Найденко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. - 93 с.
  7. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Методичні вказівки та завдання розрахунково-графічної роботи: навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / О. М. Купрій, В. І. Найденко; Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 25 с.
  8. Прикладна електродинаміка інформаційних систем / А. С. Андрущак, З. Ю. Готра, О. С. Кушнір. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. — 304 с.
  9. Захарія Й. А. Методи прикладної електродинаміки. — Львів: «Бескид Біт», 2003. — 352 с.
  10. Технічна електродинаміка. Конспект лекцій / Укл. В.В. Пілінський, П.В. Попович. — К.: Національний Технічний Університет України "КПІ", 2006. — 224 с.

## Навчальний контент

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

#### Лекційні заняття

##### Розділ 1. Електромагнітне поле у вакуумі

##### 1.1. Основні положення електростатики

##### 1.1.1. Закон Кулона. Напруженість електричного поля. Потенціал

##### 1.1.2. Теорема Гауса в інтегральній і диференціальній формах

##### 1.1.3. Рівняння Пуассона і рівняння Лапласа

##### 1.1.4. Зібрання рівнянь електростатики

##### 1.1.5. Електричний диполь

##### 1.2. Основні положення магнетостатики

##### 1.2.1. Закон Ампера

##### 1.2.2. Магнітна індукція

##### 1.2.3. Закон Кулона для рухомих зарядів. Сила Лоренца

##### 1.2.4. Основні закони магнетостатики

##### 1.2.5. Зібрання рівнянь магнетостатики

##### 1.2.6. Відповідність між законами електростатики і магнетостатики

##### 1.2.7. Магнітний диполь

##### 1.3. Рівняння Максвелла для полів у вакуумі

##### 1.3.1. Вступні пояснення

##### 1.3.2. Закон електромагнітної індукції Фарадея

##### 1.3.3. Закон збереження заряду. Струм зміщення. Фізична природа струму зміщення. Рівняння Максвелла в диференціальній формі для полів у вакуумі

1.3.4. Джерела електромагнітного поля. Сторонні струми і заряди. Сторонні магнітні струми і заряди

Джерела електричного і неелектричного походження. Сторонні струми і заряди

Поверхневі, лінійні і точкові джерела

Сторонні магнітні струми і заряди

1.3.5. Відповідність між законами електродинаміки

1.3.6. Кроки розвитку теорії електромагнетизму від основних принципів до рівнянь Максвелла

1.3.7. Рівняння Максвелла в інтегральній формі

1.3.8. Рівняння Максвелла і спеціальна теорія відносності

1.3.9. Закон збереження енергії електромагнітного поля у вакуумі. Вектор Пойнтінга

1.3.10. Останні зауваження щодо рівнянь Максвелла для полів у вакуумі

1.3.11. Історичний екскурс щодо рівнянь Максвелла

Розділ 2. Рівняння Максвелла для полів в середовищі. Матеріальні рівняння. Закон збереження енергії

2.1. Середовища (електромагнітний погляд)

2.1.1. Діелектрики. Поляризація діелектрика. Вільні і зв'язані заряди

Поляризованість діелектрика. Електричне поле в діелектрику і на його межі

2.1.2. Магнетики. Намагнічування магнетика. Магнітне поле в магнетику і на його межі

2.1.3. Провідники в електромагнітному полі

2.1.4. Надпровідники в електромагнітному полі

2.2. Рівняння Максвелла для полів у середовищі

2.2.1. Макроскопічні рівняння Максвелла для середовищ в термінах полів  $E$  і  $B$

2.2.2. Рівняння Максвелла для середовищ в термінах полів  $E$ ,  $D$ ,  $B$  і  $H$ . Стандартна форма рівнянь Максвелла

2.2.3. Рівняння Максвелла у стандартній формі з магнітними джерелами

2.2.4. Рівняння Максвелла в інтегральній стандартній формі з магнітними джерелами

2.2.5. Рівняння Максвелла в альтернативній інтегральній формі з магнітними джерелами

2.2.6. Неповнота рівнянь Максвелла для середовищ у стандартній формі

2.2.7. Типи матеріальних рівнянь. Класифікація середовищ за типами матеріальних рівнянь

2.2.8. Електромагнітні властивості метаматеріалів

2.2.9. Рівняння Максвелла для середовищ в термінах полів  $E$  і  $H$

2.2.10. Закон збереження енергії електромагнітного поля в середовищах у диференціальній формі

2.2.11. Закон збереження енергії електромагнітного поля в середовищах в інтегральній формі

2.2.12. Швидкість поширення енергії електромагнітного поля

Розділ 3. Рівняння Максвелла для гармонічних процесів. Комплексні матеріальні рівняння

3.1. Метод комплексних амплітуд. Моделі середовищ

3.1.1. Метод комплексних амплітуд. Комплексні амплітуди векторів поля

3.1.2. Поняття комплексної частоти

3.1.3. Рівняння Максвелла для комплексних амплітуд

3.1.4. Поняття комплексної діелектричної проникності

3.1.5. Поділ середовищ за значенням  $\tan \delta$

3.1.6. Аналітичні властивості комплексної діелектричної проникності. Співвідношення Крамерса-Кроніґа

3.1.7. Модель середовища Лоренца. Визначення комплексної діелектричної проникності діелектрика

3.1.8. Комплексна діелектрична проникність ненамагніченої плазми

3.1.9. Комплексна діелектрична проникність намагніченої плазми

3.1.10. Комплексна діелектрична проникність металів

3.1.11. Комплексна магнітна проникність

3.1.12. Рівняння Максвелла для гармонічних процесів

3.2. Енергетичні характеристики електромагнітного поля під час гармонічних процесів

- 3.2.1. Енергетичні характеристики електромагнітного поля в методі комплексних амплітуд
- 3.2.2. Миттєва, середня і змінна в часі величини вектора Пойнтінга
- 3.2.3. Енергетичні характеристики гармонічного електромагнітного поля
- 3.2.4. Баланс енергії під час гармонічних процесів у недисперсному середовищі
- 3.2.5. Розсіяна і накопичена енергія електромагнітного поля у дисперсних середовищах/ Розсіяна енергія в дисперсному середовищі/ Накопичена енергія в дисперсному середовищі
- 3.2.6. Теорема комплексної енергії

### 3.3. Рівняння електродинаміки в частинних похідних другого порядку

- 3.3.1. Хвильові рівняння
- 3.3.2. Рівняння Гельмгольца
- 3.3.3. Диференціальний оператор Лапласа
- 3.3.4. Про розв'язання хвильових рівнянь
- 3.3.5. Поля, визначені з рівнянь Максвелла і з хвильових рівнянь

## Розділ 4. Хвилі. Поширення хвиль у необмежених середовищах

### 4.1. Основні характеристики хвилі

- 4.1.1. Загальні відомості про хвилі
- 4.1.2. Плоскі хвилі
- 4.1.3. Гармонічні хвилі
- 4.1.4. Однорідні та неоднорідні хвилі
- 4.1.5. Фазова швидкість
- 4.1.6. Негармонічні хвилі
- 4.1.7. Дисперсія хвиль
- 4.1.8. Група хвиль (хвильовий пакет)
- 4.1.9. Групова швидкість
- 4.1.10. Поширення радіоімпульсу гаусової форми в дисперсному середовищі

### 4.2. Плоскі гармонічні електромагнітні хвилі в середовищі без втрат

- 4.2.1. Хвиля з компонентами  $E_x$ ,  $H_y$
- 4.2.2. Пряма плоска електромагнітна хвиля
- 4.2.3. Вектор Пойнтінга. Порції густини потоку енергії
- 4.2.4. Густина енергії електричного поля. Густина енергії магнітного поля. Густина енергії електромагнітного поля. Порції густини енергії електромагнітного поля
- 4.2.5. Швидкість поширення енергії електромагнітної хвилі в середовищі без втрат
- 4.2.6. Зворотна плоска електромагнітна хвиля
- 4.2.8. Хвилі з довільною орієнтацією векторів  $E$  і  $H$
- 4.2.9. Поляризація електромагнітних хвиль
- 4.2.10. Поширення хвиль у довільному напрямку
- 4.2.11. Комплексні хвилі

### 4.3. Поширення плоских гармонічних хвиль у середовищі з втратами

- 4.3.1. Коефіцієнт фази. Коефіцієнт згасання
- 4.3.2. Фазова швидкість хвилі в середовищі з втратами
- 4.3.3. Хвильовий опір
- 4.3.4. Поля хвилі в середовищі з втратами
- 4.3.5. Глибина проникнення поля. Скін-ефект
- 4.3.6. Одиниці вимірювання згасання
- 4.3.7. Межа застосування групової швидкості
- 4.3.8. Вектор Пойнтінга хвилі, що поширюється в однорідному ізотропному середовищі з втратами
- 4.3.9. Активна і реактивна густини потоку енергії
- 4.3.10. Густина енергії електромагнітного поля хвилі, що поширюється в середовищі з втратами
- 4.3.11. Активна і реактивна густини енергії електромагнітної хвилі
- 4.3.12. Алгоритм відокремлення активної і реактивної густин енергії

- 4.3.13. Швидкість поширення енергії хвилі в середовищі з втратами
- 4.3.14. Збудження середовища стрибком Гевісайда магнітного поля

Розділ 5. Електромагнітні потенціали. Електромагнітні хвилі, випромінені елементарним випромінювачем

#### 5.1. Електромагнітні потенціали

- 5.1.1. Визначення електричних векторного і скалярного потенціалів
- 5.1.2. Рівняння для електричних векторного і скалярного потенціалів
- 5.1.3. Визначення напруженості електричного поля лише через векторний потенціал
- 5.1.4. Розв'язок хвильових рівнянь для електричних потенціалів
- 5.1.5. Магнітні векторний і скалярний потенціали
- 5.1.6. Рівняння для магнітних векторного і скалярного потенціалів
- 5.1.7. Визначення напруженості магнітного поля лише через магнітний векторний потенціал
- 5.1.8. Розв'язки хвильових рівнянь для магнітних потенціалів
- 5.1.9. Комплексні амплітуди потенціалів і полів

#### 5.2. Випромінювання електромагнітних хвиль елементарним електричним випромінювачем (диполем Герца)

- 5.2.1. Поля елементарного електричного випромінювача
- 5.2.2. Фізичне пояснення природи збудження полів диполя Герца
- 5.2.3. Зони випромінювання
- 5.2.4. Діаграма спрямованості
- 5.2.5. Вектор Пойнтінга
- 5.2.6. Силкові лінії вектора Пойнтінга
- 5.2.7. Густина енергії електромагнітного поля диполя Герца
- 5.2.8. Швидкість поширення енергії
- 5.2.9. Потужність, що випромінюється елементарним електричним випромінювачем. Опір випромінювання
- 5.2.10. Елементарний магнітний випромінювач
- 5.2.11. Використання елементарних випромінювачів

#### 5.3. Природа електромагнітних хвиль. Фазові швидкості полів хвиль, випромінених електричним диполем Герца

- 5.3.1. Фаза компонент полів хвилі, випроміненої електричним диполем Герца, в комплексній формі
- 5.3.2. Дійсна форма полів хвилі, випромінюваної електричним диполем Герца
- 5.3.3. Фази компонент електромагнітного поля, випромінюваного диполем Герца
- 5.3.4. Порівняння хвиль, випромінюваних диполем Герца, з плоскими хвилями в середовищі з втратами
- 5.3.5. Зменшення амплітуд компонент  $H_\phi$ ,  $E_r$  і  $E_\theta$  при збільшенні  $kr$
- 5.3.6. Фазові швидкості компонент електромагнітної хвилі, випромінюваної диполем Герца
- 5.3.7. Про ставлення щодо того, що фазова швидкість може бути в межах від  $-\infty$  до  $+\infty$
- 5.3.8. Математичний погляд на природу відмінності фазових швидкостей компонент

#### 5.4. Фазові швидкості енергетичних характеристик хвиль, випромінених електричним диполем Герца

- 5.4.1. Фазова швидкість вектора Пойнтінга електромагнітної хвилі
- 5.4.2. Фазова швидкість енергії електромагнітної хвилі

Розділ 6. Граничні умови. Межові (крайові) задачі електродинаміки. Єдиність розв'язку межових задач

#### 6.1. Граничні умови

- 6.1.1. Нормальна і тангенціальна проєкції
- 6.1.2. Граничні умови для полів поверхневого струму і поверхневого заряду
  - 6.1.2.1. Граничні умови для тангенціальних компонент
  - 6.1.2.2. Граничні умови для нормальних компонент



- 6.1.3. Граничні умови на поверхні розриву матеріальних параметрів, яка містить джерела струму і заряду
  - 6.1.3.1. Граничні умови для тангенціальних складових магнітного поля
  - 6.1.3.2. Граничні умови для тангенціальних складових електричного поля
  - 6.1.3.3. Граничні умови для нормальних складових електричного і магнітного полів
- 6.1.4. Граничні умови для нормальних складових струму
- 6.1.5. Граничні умови на поверхні ідеального провідника
- 6.1.6. Граничні умови в термінах еквівалентних поверхневих джерел
- 6.1.7. Граничні умови для вектора Пойнтінга
  - 6.1.7.1. Граничні умови для нормальних компонент вектора Пойнтінга
  - 6.1.7.2. Граничні умови для тангенціальних компонент вектора Пойнтінга
- 6.1.8. Електромагнітні поля на межі розриву параметрів стану за умови  $j_S = 0$ ,  $\rho_S = 0$ ,  $j_m S = 0$ ,  $\rho_m S = 0$
- 6.1.9. Електричні стінки. Магнітні стінки
- 6.1.10. Симетрія струмів і симетрія полів
- 6.1.11. Джерела та їх зображення в електричній стінці і магнітній стінці
  - 6.1.11.1. Теорія зображень
- 6.1.12. Струми в безпосередній близькості до стінки
- 6.1.13. Граничні умови на нескінченності (умови випромінювання)
- 6.1.14. Граничні умови на ребрах і вістрях
- 6.1.15. Умови періодичності (теорема Флоке)

## 6.2. Наближені граничні умови

- 6.2.1. Граничні умови на поверхні добре провідних тіл (умови Щукіна–Леонтовича)
- 6.2.2. Граничні умови для полів, розсіяних решіткою. Е-поляризація
- 6.2.3. Граничні умови для полів, розсіяних решіткою. Н-поляризація

## 6.3. Межові задачі електродинаміки. Єдиність розв'язку межових задач

- 6.3.1. Межові задачі електродинаміки
- 6.3.2. Єдиність розв'язку межових задач

## Розділ 7. Деякі принципи, леми та теореми електродинаміки

- 7.1. Принцип суперпозиції
- 7.2. Принцип дуальності
- 7.3. Лема Лоренца
- 7.4. Теорема взаємності
- 7.5. Збудження полів заданими сторонніми струмами і полями. Формули для полів на основі леми Лоренца
- 7.6. Функція Гріна
- 7.7. Принцип еквівалентності
  - 7.7.1. Принцип еквівалентності Лау
  - 7.7.2. Принцип еквівалентності Щелкунова
- 7.8. Інтегральний зв'язок струмів в об'ємі  $V$  з полями на поверхні  $S$ , що обмежує об'єм  $V$
- 7.9. Математичне обґрунтування принципу еквівалентності
  - 7.9.1. Принцип еквівалентності для області 1
  - 7.9.2. Принцип еквівалентності для області 2
- 7.10. Теорема індукції

## Розділ 8. Хвильові процеси, обумовлені межами поділу середовищ

- 8.1. Хвильові процеси під час похилого падіння плоскої електромагнітної хвилі на межу поділу
  - 8.1.1. Постановка задачі. Довільна, паралельна, перпендикулярна поляризація
  - 8.1.2. Паралельна (Н) поляризація
    - 8.1.2.1. Поля в областях 1 і 2
    - 8.1.2.2. Розв'язання межової задачі. Коефіцієнт відбиття за магнітним полем. Коефіцієнт

проходження за магнітним полем

8.1.2.3. Коефіцієнт відбиття за потужністю та коефіцієнт проходження за потужністю хвилі з паралельною поляризацією

8.1.3. Перпендикулярна (E) поляризація

8.1.3.1. Поля в областях 1 і 2

8.2.3.2. Розв'язання межової задачі. Коефіцієнт відбиття за електричним полем. Коефіцієнт проходження за електричним полем

8.1.3.3. Коефіцієнт відбиття за потужністю та коефіцієнт проходження за потужністю хвилі з перпендикулярною поляризацією

8.1.4. Повне проходження хвилі. Кут Брюстера (кут повної поляризації)

8.1.5. Зміна поляризації хвилі

8.1.6. Повне внутрішнє відбиття хвилі

8.1.7. Хвилі, що спрямовуються плоскою межею поділу діелектриків. Поверхневі хвилі

8.1.8. Шар діелектрика на ідеальному провіднику як хвилевід

8.1.9. Поверхневий імпеданс

8.1.10. Хвилі в плоскому діелектричному хвилеводі

8.1.11. Хвильові процеси на межі поділу діелектрика й ідеального провідника. Хвилевід з двох площин

8.1.12. Хвильові процеси на межі поділу діелектрика і реального провідника

8.2. Поширення електромагнітних хвиль у багат шарових структурах

8.2.1. Постановка задачі

8.2.2. Паралельна (H) поляризація

8.2.3. Перпендикулярна (E) поляризація

## 5. Практичні заняття

Метою практичних занять є набуття вмінь розв'язання задач електродинаміки та навичок розрахунку основних параметрів ліній передачі, резонаторів і випромінювачів. Темі практичних занять наведено нижче.

1. Доведення основних тотожностей і теорем векторного аналізу. Література [1-7].
2. Векторний аналіз. Потенціальні та соленоїдні поля. Література [1-7], [9].
3. Основні поняття електродинаміки. Рівняння Максвелла. Література [1-7], [9].
4. Статичні електромагнітні поля. Теорема Гаусса. Література [1-7].
5. Стаціонарні поля. Розрахунок ємностей та індуктивностей. Література [1-7].
6. Плоскі електромагнітні хвилі, розрахунок основних параметрів. Література [1-10].
7. Загасання плоских електромагнітних хвиль. Література [1-7], [9].
8. Поляризація плоских електромагнітних хвиль. Література [1-10].
9. Зв'язок між лінійним і коловим поляризаційними базисами. Література [1-8].
10. Відбиття і заломлення плоских електромагнітних хвиль. Література [1-10].
11. Формули Френеля. Зміна поляризації електромагнітних хвиль. Література [1-7].
12. Прямокутні та круглі хвилеводи. Типи хвиль та їх параметри. Література [1-9].
13. Однохвильовий режим роботи хвилеводів. Критичні частоти. Література [1-9].
14. Розрахунок елементів збудження хвилеводів. Література [1-7].
15. Лінії передачі з хвилями типу Т. Параметри ліній передачі. Література [1-9].
16. Розрахунок хвильових опорів коаксіальних і смужкових ліній. Література [1-9].
17. Об'ємні резонатори. Резонансні частоти та добротності. Література [1-8].
18. Елементарні випромінювачі. Розрахунок основних параметрів. Література [1-8].

## 6. Лабораторні роботи

Основною метою лабораторних робіт є поглиблене засвоєння теоретичного матеріалу і набуття студентами навичок експериментального дослідження властивостей електромагнітних коливань, хвиль і структур, у яких вони виникають. Лабораторні роботи

забезпечені методичними вказівками [8]. Теми лабораторних робіт представлено в таблиці. Студенти виконують 6 лабораторних робіт із 7 відповідно до номеру бригади та графіку робіт.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	Дослідження поляризації електромагнітних хвиль	6
2	Дослідження явищ, що виникають при поширенні електромагнітних хвиль в анізотропних середовища	6
3	Дослідження електромагнітних хвиль над провідною площиною	6
4	Дослідження дисперсних характеристик основних хвиль у прямокутному хвилеводі і коаксіальній лінії передачі	6
5	Дослідження структури поля в металевих хвилеводах і резонаторах	6
6	Дослідження дифракції електромагнітних хвиль	6
7	Дослідження випромінювання елементарних випромінювачів електромагнітних хвиль	6

## 6. Самостійна робота студента

№ з/п	Назви тем і питань, що виносяться на самостійне опрацювання та посилання на рекомендовану навчальну літературу	Кількість годин СРС
1	Об'єкт вивчення і області застосування електродинаміки. Література [1-6].	1
2	Векторний аналіз. Література [1-7], [9-14].	1
3	Поняття електричного заряду і струму, їх щільностей. Основні властивості електричних зарядів і струмів. Література [1-6].	1
4	Електричне і магнітне поля. Рівняння Максвелла. Їх фізичний зміст. Література [1-6], [9-14].	1
5	Матеріальні рівняння. Поляризованість і намагніченість середовищ. Література [1-6], [9-14].	1
6	Електричні та магнітні властивості середовищ. Класифікація середовищ за їх електромагнітними властивостями. Література [1-6], [9-14].	1
7	Граничні умови на провідних вістрях і ребрах. Література [1-6], [9-14].	1
8	Співвідношення Крамерса-Кроніга. Література [1-6], [9-14].	1
9	Рівняння балансу активної і реактивної потужностей. Література [1-6].	1
10	Умови випромінювання Зоммерфельда. Література [1-6], [9-14].	1
11	Рівняння Гельмгольца в основних системах координат. Література [1-7].	1
12	Методи розрахунку скалярного і векторного потенціалів. Література [1-7].	1
13	Метод дзеркальних зображень. Література [1-6], [9-14].	1
14	Взаємна індуктивність. Методи розрахунку індуктивності. Література [1-7].	1
15	Електромагнітні хвилі в провідних середовищах. Загасання хвиль. Глибина проникнення хвилі. Скін-ефект. Література [1-7], [9-14].	1
16	Поляризація електромагнітних хвиль. Види поляризації, їх властивості. Коефіцієнт еліптичності в різних поляризаційних базисах. Література [1-7].	1
17	Закони Снелла. Повне внутрішнє відбиття електромагнітних хвиль, його застосування в техніці. Література [1-6], [9-14].	1
18	Формули Френеля для коефіцієнтів відбиття та заломлення плоскої електромагнітної хвилі на межі середовищ. Література [1-6], [9-14].	1
19	Ефект Фарадея. Застосування ефекту Фарадея в техніці. Ефект Коттона-Мутона. Література [1-6], [9-14].	1
20	Явище феромагнітного резонансу. Застосування феромагнітного резонансу в техніці. Література [1-6], [9-14].	1

21	Підготовка до МКР 1	2
22	Виконання частин 1, 2 розрахункової роботи. Література [1-7], [9-14].	6
23	Лінії передачі, їх класифікація та застосування. Література [1-6], [9-14].	1
24	Поширення електромагнітних хвиль між двома провідними площинами. Хвилі типу Е і Н. Література [1-6], [9-14].	1
25	Параметри хвиль у хвилеводах, методи їх вимірювання. Література [1-8].	1
26	П- і Н-подібні хвилеводи, їх переваги та недоліки. Література [1-6], [9-14].	1
27	Хвильовий опір ліній передачі. Методи його вимірювання. Література [1-6].	1
28	Копланарна лінія передачі. Її хвилі, поля та параметри. Література [1-7].	1
29	Одномодові та багатомодові оптоволоконні лінії передачі. Література [1-7].	1
30	Квазіоптичні лінії передачі, їх конструкції та параметри. Література [1-7].	1
31	Підготовка до МКР 2	2
32	Виконання частини 3 розрахункової роботи. Література [1-7], [9-14].	2
33	Квазістаціонарні резонатори: конструкції, розподіли полів і струмів, основні параметри, області застосування. Література [1-6], [9-14].	1
34	Коаксіальний резонатор: конструкція, розподіли полів і струмів, основні параметри, області застосування. Література [1-6], [9-14].	1
35	Прямокутний резонатор: конструкція, розподіли полів і струмів, основні параметри, області застосування. Література [1-14].	1
36	Циліндричний резонатор: конструкція, розподіли полів і струмів, основні параметри, області застосування. Література [1-14].	1
37	Відкриті діелектричні резонатори: конструкції, розподіли полів, основні параметри, області застосування. Література [1-6], [9-14].	2
38	Відкриті хвилевідні резонатори: конструкції, розподіли полів, основні параметри, області застосування. Література [1-6], [9-14].	1
39	Відкриті дзеркальні резонатори: конструкції, розподіли полів, основні параметри, області застосування. Література [1-6], [9-14].	1
40	Збудження хвиль у хвилеводах. Елементи збудження, їх конструкції та правила розміщення. Розрахунок вимушених хвиль. Література [1-7], [9-14].	3
41	Збудження коливачів у об'ємних резонаторах. Елементи збудження. Розрахунок вимушених коливачів. Література [1-7], [9-14].	2
42	Виконання частини 4 розрахункової роботи. Література [1-7], [9-14].	2
43	Основні параметри антен. Диполь Герца. Література [1-8], [11-14].	5
44	Елементарні випромінювачі. Елемент Гюйгенса. Література [1-6].	5
45	Дифракція електромагнітних хвиль. Література [1-6], [11-17].	4
46	Підготовка до екзамену	30
47	Усього годин	99

### Індивідуальні завдання

Передбачено виконання студентами розрахунково-графічної роботи (РГР). Метою її виконання є отримання вмінь розв'язувати задачі електродинаміки. РГР містить 10 задач із основних розділів дисципліни. У задачах 1-3 потрібно визначити параметри плоских електромагнітних хвиль. Задачі 4-6 присвячені процесам відбиття і заломлення плоских електромагнітних хвиль. У задачах 7, 8 потрібно розрахувати основні параметри і зобразити поля в прямокутному та круглому хвилеводах, а в задачах 9, 10 — у прямокутному і циліндричному резонаторах.

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

Вивчення кредитного модуля складається із прослуховування лекційного курсу, участі у практичних заняттях, виконання лабораторних робіт, модульних контрольних робіт і розрахунково-графічної роботи. Таким чином, основною методичною вимогою є узгодження часу вивчення тем лекційного курсу з виконанням відповідних завдань інших видів навчання.

Усі матеріали, необхідні для вивчення кредитного модуля і підготовки до екзамену, є в інформаційному пакеті. Інформаційний пакет містить:

- методичні вказівки до виконання лабораторних робіт;
- завдання на розрахунково-графічну роботу;
- перелік запитань до екзамену.

Інформаційний пакет у електронному вигляді надається студентам на початку семестру, що дає можливість планувати самостійну роботу.

Поточний контроль якості засвоєння навчального матеріалу кредитного модуля відбувається відповідно до РСО, складеної таким чином, що спонукає студентів ритмічно працювати протягом семестру.

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

#### Рейтингова система оцінювання результатів навчання

Рейтинг студента з дисципліни (РД) є сумою балів поточної успішності навчання — стартового рейтингу (РС) та екзаменаційних балів (РЕ):

$$РД = РС + РЕ.$$

Розмір стартової шкали РС = 70 балів.

Розмір екзаменаційної шкали РЕ = 30 балів.

Розмір шкали рейтингу з дисципліни РД = 100 балів.

#### Система рейтингових балів РС та критерії оцінювання

РС складається з балів, одержаних за виконання таких робіт:

1. Готовність до кожної з 6 лабораторних робіт надає такі бали:

- відмінне знання теоретичного матеріалу за темою роботи	1
- задовільне знання теоретичного матеріалу за темою роботи	0,5
- незадовільне знання теоретичного матеріалу за темою роботи	0
Максимальна сума балів за готовність до лабораторних робіт	6

2. Захист кожної з кожної з 6 лабораторних робіт надає такі бали:

- повна відповідь (не менше 80% потрібної інформації)	4
- неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації)	2
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації)	0
Максимальна сума балів за захист лабораторних робіт	24

3. Виконання кожного тестового завдання на двох МКР дає такі рейтингові бали:

- правильна відповідь	1
- неправильна відповідь	0
Максимальна сума балів за виконання МКР	20

4. Виконання кожної з 10 задач РГР надає такі рейтингові бали:

- повний правильний розв'язок задачі та правильна відповідь	2
- частковий розв'язок задачі, наявні помилки	1
- незадовільне розв'язання задачі або несвоєчасне виконання	0
Максимальна сума балів за виконання РГР	20

Максимальний РС дорівнює:  $РС = 6 + 24 + 20 + 20 = 70$  балів.

#### **Умови допуску до екзамену:**

1. Задача повністю виконаної розрахунково-графічної роботи;
2. Виконання всіх лабораторних робіт, оформлення і здача звітів по них;
3. Отримання не менше ніж 30 балів РС протягом семестру.

Протягом останнього тижня семестру студентам, які не набрали 30 балів, надається можливість підвищення РС шляхом перездачі МКР.

#### **Система рейтингових балів РЕ та критерії оцінювання**

На екзамені студентами виконується письмова контрольна робота. Кожен білет містить два теоретичних питання та одну задачу за основними розділами навчальної дисципліни. Кожне теоретичне питання оцінюється максимум у 10 балів. Задача оцінюється у 10 балів.

Відповідь на кожне теоретичне питання надає такі бали:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації)	10
- достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації або незначні неточності)	7
- неповна відповідь (не менше 50% потрібної інформації та деякі помилки)	4
- незадовільна відповідь (менше 50% потрібної інформації)	0

Розв'язок задачі надає такі бали:

- повний правильний розв'язок задачі та правильна відповідь	10
- правильний хід рішення, наявність незначних помилок	7
- частковий розв'язок задачі, наявні значні помилки	4
- незадовільний або відсутній розв'язок задачі	0

Максимальний РЕ дорівнює:  $РЕ = 10 + 10 + 10 = 30$  балів.

Система рейтингової оцінки успішності доводиться до відома студентів на першій лекції семестру. Хід одержання рейтингових балів повідомляється студентам викладачем, який виконує рейтингову оцінку успішності. Підсумовування рейтингових балів відбувається на останній лекції семестру.

#### **Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою**

<b>Кількість балів</b>	<b>Оцінка</b>
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

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

### ***Опис матеріально-технічного та інформаційного забезпечення дисципліни***

Лабораторні роботи за дисципліною «Електродинаміка та поширення радіохвиль» проводяться у двох лабораторіях радіотехнічного факультету: 320-17, 326-17. Лабораторії обладнано генераторами надвисокочастотних коливань, рупорними та дипольними антенами, резонаторами, вимірювальними лініями, опорно-поворотними пристроями, атенюаторами, фазозсувачами, вольтметрами, коаксіальними та хвилевідними лініями передачі. Загалом у лабораторіях міститься 7 макетів — по одному на кожну виконувану роботу. Лабораторні роботи виконуються за такими темами: 1) Дослідження випромінювання електричного і магнітного диполів; 2) Дослідження поляризації електромагнітних хвиль; 3) Дослідження явищ, що виникають при поширенні електромагнітних хвиль в анізотропних середовища; 4) Дослідження електромагнітних хвиль над провідною площиною; 5) Дослідження дисперсних характеристик основних хвиль у прямокутному хвилеводі і коаксіальній лінії передачі; 6) Дослідження структури поля в металевих хвилеводах і резонаторах; 7) Дослідження дифракції електромагнітних хвиль.

---

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

**Складено** [Пільтяй С. І.](#); [Найденко В. І.](#);

**Ухвалено** кафедрою РІ (протокол № 06/2023 від 23.06.2023 )

**Погоджено** методичною комісією факультету/ННІ (протокол № 06-2023 від 29.06.2023 )