



# ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ТА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>17 Електроніка та телекомунікації</i>
Спеціальність	<i>172 Телекомунікації та радіотехніка</i>
Освітня програма (спеціалізація)	<i>Інженерія та програмування інфокомунікацій; Інформаційно-комунікаційні технології; Системи та мережі електронних комунікацій</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2- й курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>7,5 кредитів – 225 годин (54 лекц., 27 практ., 27 лаб.роб., 117 СРС)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен</i>
Розклад занять	<i>6 годин на тиждень</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<p><i>Лектор: кандидат технічних наук, професор Якорнов Євгеній Аркадійович, 097-223-59-05, yakornovits@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент Живков Олександр Петрович, 068-685-67-45, zhivkovalex@gmail.com</i></p> <p><i>Практичні: кандидат технічних наук, професор Якорнов Євгеній Аркадійович, 097-223-59-05, yakornovits@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент Живков Олександр Петрович, 068-685-67-45, <a href="mailto:zhivkovalex@gmail.com">zhivkovalex@gmail.com</a></i></p> <p><i>Лабораторні: кандидат технічних наук, професор Якорнов Євгеній Аркадійович, 097-223-59-05, yakornovits@gmail.com; кандидат технічних наук, доцент Живков Олександр Петрович, 068-685-67-45, <a href="mailto:zhivkovalex@gmail.com">zhivkovalex@gmail.com</a></i></p>
Розміщення курсу	<a href="https://classroom.google.com/c/MTYzMDEzNjE5NTkw">https://classroom.google.com/c/MTYzMDEzNjE5NTkw</a> , код курсу 7jrad5m за запрошенням викладача

### Програма навчальної дисципліни

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

Дисципліна „Електродинаміка та поширення радіохвиль” є однією з дисциплін циклу загальної підготовки фахівців за напрямом 17 “Електроніка та телекомунікації”, спеціальністю 172 “Телекомунікації та радіотехніка”, відноситься до нормативних компонент освітньої програми. Кредитний модуль вивчається в четвертому семестрі відповідно до навчального плану.

Предметом навчальної дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль”, як об’єкту навчання, є формування у студентів системи знань про електромагнітне поле, як особливий вид матерії, електромагнітні хвилі – носії телекомунікаційної інформації, умови генерації, підсилювання, випромінювання (прийому) та поширення електромагнітних хвиль у різноманітних середовищах,

технічних пристроях надвисоких частот, спрямовуючих та трансформуючих електромагнітні хвилі, а також розуміння принципів роботи таких пристроїв, їх математичних моделей і моделей їх елементів.

### **Мета та завдання навчальної дисципліни**

1.1. Мета навчальної дисципліни.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів наступних **компетентностей**:

- орієнтуватися в закономірностях створення електромагнітного поля, виникнення та випромінювання електромагнітних хвиль;

- розуміти роботу пристроїв надвисоких частот та антен на базі використання електромагнітних хвиль;

- орієнтуватися в особливостях розповсюдження електромагнітних хвиль у різних середовищах, у тому числі в тропосфері Землі.

1.2. Основні завдання навчальної дисципліни.

-вивчити теорію електромагнітного поля;

- знати особливості розрахунку поля та розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі і направляючих структурах;

- вивчити теорію випромінювання електромагнітних хвиль та параметри і конструкції антен.

Згідно з вимогами програми дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль” студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

#### **знання:**

- призначення фізичних величин, що використовуються для характеристики поля, електродинамічних структур та електромагнітних процесів;

- основні фізичні властивості електромагнітного поля, методи аналізу електромагнітних явищ, закономірностей випромінювання електромагнітних хвиль, поширення радіохвиль в різноманітних середовищах та направляючих структурах;

- характеристики елементарних випромінювачів та реальних антен;

- принципи роботи та характеристики антен і пристроїв надвисоких частот а також їх елементів;

- основи теорії антен;

- основи проектування та розрахунків типових антен і пристроїв надвисоких частот;

- основні призначення та експлуатації антен і пристроїв надвисоких частот;

- область простору, що істотно впливає на поширення радіохвиль;

- особливості поширення в атмосфері радіохвиль різних діапазонів;

- фізичні явища, процеси та закономірності в електронних пристроях надвисоких частот;

- енергетичний розрахунок радіоліній зв'язку.

#### **уміння:**

- проводити якісний аналіз електромагнітних процесів у будь яких електродинамічних структурах та антенах;

- розраховувати поля випромінювання, поля в вільному просторі та різних середовищах;

- розраховувати поля в основних електродинамічних структурах та геометричні розміри цих структур;

- володіти технікою експериментального дослідження полів у вільному просторі та замкнутих електродинамічних структурах;

- розробляти рекомендації щодо призначення та експлуатації антен, елементів і пристроїв надвисоких частот на основі довідкових даних, а також при альтернативному виборі необхідних антен, елементів і пристроїв надвисоких частот;

- розраховувати параметри антен та радіоліній зв'язку.

Ці уміння забезпечує формування у студентів наступних **програмних компетентностей** та набуття **програмних результатів навчання**:

#### **а) програмні компетентності:**

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

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

#### **б) програмні результати навчання:**

- ПРН 2 - застосовувати результати особистого пошуку та аналізу інформації для розв'язання якісних і кількісних задач подібного характеру в інформаційно-комунікаційних мережах, телекомунікаційних і радіотехнічних системах;

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

- ПРН 21 - Забезпечувати надійну та якісну роботу інформаційно-комунікаційних мереж, телекомунікаційних та радіотехнічних систем;

- ПРН 25 - Виконувати пошуково-дослідні роботи по вдосконаленню сучасних безпроводових технологій, провадити розрахунки необхідних параметрів проєктованих мереж; створювати та оформлювати проєктну і експлуатаційну документацію, проводити розрахунки і вимірювання частотно-територіального планування, здійснювати технічне забезпечення безпроводових мереж та систем мобільних інфокомунікацій.

#### **досвід:**

- з методами вирішення задач електродинаміки та розрахунку антен;

- з перспективами розвитку радіотехніки надвисоких частот.

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

Для успішного засвоєння дисципліни здобувач повинен володіти знаннями з вищої математики, загальної фізики, основ теорії кіл, інженерної та комп'ютерної графіки та основ метрології.

Навчальна дисципліна підготовлює студентів до вивчення наступних навчальних дисциплін: «Системи мережного каналутворення та комутації», «Теорія систем мобільних інфокомунікацій», «Безпроводові мережі та технології» та інші.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

### ***Вступ до дисципліни “Електродинаміка та поширення радіохвиль”***

Мета, завдання і структура дисципліни.

#### ***Тема 1. Основні та додаткові рівняння електромагнітного поля***

Основні і додаткові рівняння електромагнітного поля в диференційній та інтегральній формах, їх фізична суть. Рівняння балансу енергії електромагнітного поля та її передача для гармонічних коливань. Поняття о методах рішення рівнянь Максвелла.

#### ***Тема 2. Електромагнітні хвилі, їх параметри і характеристики та особливості поширення хвиль у ізотропних однорідних і неоднорідних середовищах***

Класифікація і параметри електромагнітних хвиль. Аналіз хвильових параметрів плоскої хвилі у різних середовищах. Поляризація плоских електромагнітних хвиль. Похиле та нормальне падіння плоскої хвилі на межі розподілу двох середовищ. Явище повного відбиття та проходження хвиль на межі розподілу двох середовищ. Поняття про анізотропні середовища.

#### ***Тема 3. Особливості поширення електромагнітних хвиль у базових лініях передачі телекомунікаційних систем***

Класифікація ліній передач (хвилеводів), поняття про їх розрахунок. Параметри спрямовуючих (зв'язаних) електромагнітних хвиль. Основна та вищі типи хвиль у хвилеводах. Потужність, що переноситься хвилею у лініях передачі. Затухання електромагнітних хвиль в реальних хвилеводах. Розрахунок електромагнітних хвиль у прямокутному хвилеводі. Діаграма (спектр) типів хвиль прямокутного хвилеводу. Основна хвиля прямокутного хвилеводу: структура її електромагнітного поля, потужність, що переноситься біжучою хвилею, затухання основної хвилі. Вищі типи хвиль у прямокутному хвилеводі. Застосування прямокутного хвилеводу у лініях передачі телекомунікаційних систем, розрахунок його розмірів. Поняття про круглі, еліптичні, коаксіальні і діелектричні хвилеводи та світловоди.

#### ***Тема 4. Режими у лініях передачі та узгодження в хвилевідних трактах телекомунікаційних систем***

Режими біжучих, стоячих та змішаних хвиль. Принципи та методи усунення відбитих хвиль в хвилевідних трактах телекомунікаційних систем. Вузкосмугове узгодження навантаження у лініях передачі за допомогою чвертьхвильових трансформаторів та реактивних елементів. Поняття про широкосмугове узгодження.

#### ***Тема 5. Випромінювання та дифракція електромагнітних хвиль***

Поняття про випромінювання як процес перетворення енергії зв'язаних електромагнітних хвиль в енергію вільних електромагнітних хвиль. Визначення елементарних випромінювачів та їх основні типи. Визначення поля випромінювання електричного та магнітного диполів у будь-якій точці

простору, ближньої та дальньої зонах. Основні властивості поля диполів в ближній та дальній зонах. Характеристика та діаграма спрямованості випромінювачів. Потужність та опір випромінювання диполів. Метод дзеркальних відображень для електричного та магнітного диполів. Типи задач дифракції. Метод Гюйгенса-Кірхгофа. Алгоритм розрахунку і отримання загальних співвідношень для поля випромінювання з прямокутного отвору в екрані. Розрахунок складових поля для випромінюючого елемента Гюйгенса. Визначення складових поля випромінювання і ширини діаграми спрямованості при рівномірному і косинусоїдальному розподіленні поля на прямокутного отвору.

#### ***Тема 6. Взаємні нерегулярні елементи та пристрої хвилевідних трактів телекомунікаційних систем***

Визначення, склад типового хвилевідного тракту телекомунікаційних систем та основні вимоги до його елементів та пристроїв. Багатополоснікі надвисоких частот та методи їхнього опису. Хвильові матриці розсіювання і передачі, їх основні властивості. Хвильові матриці найпростіших чотириполосників та взаємозв'язок їх з матрицями опорів та провідностей. Конструкції та принцип дії найпростіших чотириполосників надвисоких частот. Селективні по частоті чотириполосники надвисоких частот (фільтри надвисоких частот): класифікація частотних фільтрів надвисоких частот, принципи їх побудови; застосування частотних фільтрів у вирішенні проблеми електромагнітної сумісності в телекомунікаційних системах. Полосні (полоснопропускаючі) та режекторні (полоснозагороджуючі) частотні фільтри надвисоких частот. Діелектричні фільтри. Хвилевідні фільтри типів хвиль. Основні властивості шестиполосників (трьохплечих пристроїв надвисоких частот - трійників), їх використання в якості розподільвачів та суматорів потужності. Механічні комутатори надвисоких частот. Поляризаційні фільтри і трійники. Спрямовані вісьмиполосники, їх хвилеві матриці розсіювання, параметри та класифікація по конструкції елементів зв'язку. Конструкції і принцип дії спрямованих відгалужувачів та мостів надвисоких частот. Диплексери (частотно-розділові пристрої) надвисоких частот.

#### ***Тема 7. Керовані та некерувані пристрої хвилевідних трактів телекомунікаційних систем***

Коротка характеристика застосування в пристроях надвисоких частот феритів, напівпровідникових діодів і сегнетоелектриків. Еквівалентні схеми напівпровідникових діодів надвисоких частот при подачі на них напруги зміщення протилежної полярності. Конструкції (схеми) і принцип дії пристроїв керування амплітудою коливань надвисоких частот. Електричні керувані фазообертачі (пристрої керування фазою). Некерувані фізичні явища в намагнічених феритах. Феритові циркулятори і вентиля.

#### ***Тема 8. Електровакуумні прилади надвисоких частот***

Особливості електронних приладів надвисоких частот. Класифікація електровакуумних приладів надвисоких частот. Взаємодія електронів зі статистичними електричним та магнітним полями: сила і потужність взаємодії поля и заряду, швидкість електрону на виході зазору с потенціалом  $U_0$ , сила Лоренца, циклотронна частота. Взаємодія електронів з електромагнітним полем. Комплексні параметри ламп і залежність параметрів ламп від частоти. Хвилевідні і нехвилевідні (квазістаціонарні) об'ємні резонатори надвисоких частот. Добротність резонаторів. Пролітні і відбивні клістрони. Призначення, класифікація та принцип дії уповільнювальних систем. Лампи біжучої та зворотної хвилі.

#### ***Тема 9. Твердотільні прилади і пристрої надвисоких частот***

Фізичні процеси в діодних твердотільних генераторах надвисоких частот. Лавинно-пролітні діоди і діоди Ганна. Порівняння характеристик і параметрів підсилювачів на діодах Ганна і лавинно-пролітних діодах та генераторів на діодах Ганна і лавинно-пролітних діодах. Біполярні і польові транзистори надвисоких частот. Напівпровідникові і гібридні інтегральні схеми надвисоких частот. Модулі надвисоких частот. Малошумні лінійні підсилювачі. Транзисторні малошумні підсилювачі. Підсилювачі на тунельних діодах. Параметричні підсилювачі.

#### ***Тема 10. Теорія антен***

Визначення й структура антенних систем. Класифікація антен. Параметри передавальних і приймальних антен. Визначення й класифікація антенних решіток. Теорема множення характеристик спрямованості, комплексний множник неперервної прямолінійної системи випромінювачів. Фазовані антенні решітки. Прямолінійні випромінюючі системи. Випромінюючі розкриви. Плоскі фазовані антенні решітки. Використання антенних решіток для захисту від навмисних завад. Основи синтезу антен. Надспрямованість антен, визначення, особливості.

#### ***Тема 11. Техніка антен***

Антери стоячих хвиль. Антери бігучих хвиль. Апертурні антени. Хвилевідні випромінювачі й оптимальні рупорні антени із прямокутним і круглим розкривом. Дзеркальні антени. Рупорно-параболічні антени. Перископічні антени. Лінзові антени.

#### ***Тема 12. Поширення радіохвиль***

Класифікація електромагнітних хвиль по діапазонам частот і по механізму їхнього поширення в навколосемному просторі. Структура й склад земної атмосфери. Вплив Землі й атмосфери на поширення радіохвиль. Напруженість поля й потужність сигналу при поширенні радіохвиль у вільному просторі. Зони Френеля: визначення, властивості, розміри. Відбиття радіохвиль від поверхні Землі. Істотна для відбиття зона поверхні Землі. Комплексний інтерференційний множник Землі, його властивості. Дальність прямої видимості. Поле ультракоротких хвиль в областях тіні й півтіні. Области інтерференції й дифракції. Дифракційний множник ослаблення Фока. Структура й електричні властивості тропосфери. Нормальна тропосфера. Рефракція радіохвиль у тропосфері. Ослаблення радіохвиль у тропосфері. Далеке тропосферне поширення радіохвиль. Поширення радіохвиль в іоносфері.

#### **4. Рекомендована тематика практичних (семінарських) занять**

Метою практичних занять в дисципліні „Електродинаміка та поширення радіохвиль” є закріплення теоретичних знань та набуття практичних навичок в розрахунку електромагнітного поля в різних середовищах та пристроїв надвисоких частот.

Приблизна тематика практичних занять

##### ***Тема 1. Основні та додаткові рівняння електромагнітного поля***

###### **ПЗ. 1 Основні рівняння електродинаміки**

Основні рівняння електромагнітного поля в диференціальній та інтегральній формах, їх фізична сутність. Додаткові рівняння електромагнітного поля. Граничні умови для векторів електромагнітного поля.

###### **ПЗ. 2 Баланс енергії електромагнітного поля**

Теорема Умова-Пойнтинга в диференціальній та інтегральній формах. Фізична сутність складових теорем Умова-Пойнтинга. Баланс енергії електромагнітного поля для активного и пасивного об'єктів. Класифікація електромагнітних хвиль та їх основні параметри.

***Тема 2. Електромагнітні хвилі, їх параметри і характеристики та особливості поширення хвиль у ізотропних однорідних і неоднорідних середовищах***

###### **ПЗ. 3 Плоскі електромагнітні хвилі в однорідних ізотропних середовищах**

Параметри плоскої електромагнітної хвилі в середовищі з втратами. Плоскі електромагнітні хвилі в ідеальному і реальному діелектриках. Особливості розповсюдження електромагнітних хвиль в напівпровідному середовищі та в провідниках. Поляризація плоских електромагнітних хвиль.

###### **ПЗ. 4 Плоскі електромагнітні хвилі в неоднорідних середовищах**

Відбиття і заломлення плоских електромагнітних хвиль. Явище повного внутрішнього відбиття. Явище повного заломлення електромагнітних хвиль. Відбиття плоских електромагнітних хвиль від границі розподілу ідеальний діелектрик – ідеальний провідник при нормальній і паралельній поляризації.

***Тема 3 Особливості поширення електромагнітних хвиль у базових лініях передачі телекомунікаційних систем***

###### **ПЗ. 5 Електромагнітні хвилі у прямокутному хвилеводу**

Спектр типів хвиль у прямокутному хвилеводу. Складові і структура електромагнітного поля основної хвилі в прямокутному хвилеводу. Гранична потужність, розрахунок розмірів поперечного сечення і робочого діапазону частот прямокутному хвилеводу. Складові і структурі електромагнітного поля вищих типів хвиль в прямокутному хвилеводу, їх використання.

***Тема 4 Режими у лініях передачі та узгодження в хвилевідних трактах телекомунікаційних систем***

###### **ПЗ. 6 Режимі в лініях передачі**

Параметри режиму в лініях передачі, вхідний опір лінії. Режим біжучої хвилі. Умови виникнення та основні властивості режиму стоячих хвиль. Характерні особливості режиму змішаних хвиль, його застосування.

###### **ПЗ. 7 Узгодження у лініях передачі**

Узгодження за допомогою чвертьхвильових трансформаторів, їх конструктивні особливості для різноманітних ліній передачі. Узгодження за допомогою реактивних елементів. Поняття про широкопasmове узгодження.

##### ***Тема 5 Елементарні випромінювачі та дифракція електромагнітних хвиль***

###### **ПЗ. 8 Поле випромінювання електричного і магнітного диполів**

Основні властивості поля випромінювання елементарних випромінювачів в ближній та дальній зонах. Характеристика та діаграма спрямованості електричного та магнітного диполів. Потужність та опір випромінювання електричного та магнітного диполів.

***Тема 6. Взаємні нерегулярні елементи та пристрої хвилевідних трактів телекомунікаційних систем***

### **ПЗ. 9. Фільтри НВЧ**

Селективні по частоті чотириполюсники надвисоких частот (фільтри НВЧ). Полоснопропускаючі та режекторні (полоснозагороджуючі) частотні фільтри НВЧ.

### **ПЗ. 10. Спрямовані восьмиполюсники НВЧ**

Спрямовані вісьмиполюсники, їх хвилеві матраці розсіювання, параметри та класифікація по конструкції елементів зв'язку. Конструкції і принципи дії спрямованих відгалужувачів та мостів надвисоких частот.

#### ***Тема 7. Керовані та невзаємні пристрої хвилевідних трактів ТКС***

### **ПЗ. 11. Електрично керовані пристрої та пристрої на намагнічених феритах**

Конструкції (схеми) і принцип дії пристроїв керування амплітудою коливань надвисоких частот. Електричні керовані фазообертачі. Невзаємні фізичні явища в намагнічених феритах. Феритові циркулятори і вентилялі.

#### ***Тема 8. Електровакуумні прилади НВЧ***

### **ПЗ. 12. Фізичні процеси в прольотних і відбивних клістронах**

Хвилевидні і нехвилевидні (квазістаціонарні) об'ємні резонатори надвисоких частот. Добротність резонаторів. Пролітні і відбивні клістроны. Призначення, класифікація та принцип дії уповільнювальних систем. Лампи біжучої та зворотної хвилі.

#### ***Тема 11. Техніка антен***

### **ПЗ. 13. Апертурні антени надвисоких частот.**

Рупорні антени. Параболічні антени. Лінзові антени.

## **5. Рекомендований перелік лабораторних робіт (комп'ютерних практикумів)**

Основними цілями 3-х циклів 2-х годинних лабораторних робіт є практичне підтвердження окремих теоретичних положень дисципліни, набуття умінь роботи з обладнанням та вимірювальними пристроями техніки надвисоких частот і антен.

#### ***Тема 2 Електромагнітні хвилі, їх параметри і характеристики та особливості поширення хвиль у ізотропних однорідних і неоднорідних середовищах***

**ЛР. 1** Дослідження густини потоку енергії електромагнітного поля та законів відбиття і переломлення плоских хвиль.

**ЛР. 2** Дослідження поляризаційних характеристик плоских хвиль.

#### ***Тема 3 Особливості поширення електромагнітних хвиль у базових лініях передачі телекомунікаційних систем***

**ЛР. 3** Дослідження електромагнітного поля та режимів роботи у прямокутному хвилеводі.

#### ***Тема 4 Режими у лініях передачі та узгодження в хвилевідних трактах телекомунікаційних систем***

**ЛР. 4** Узгодження передавальних ліній з навантаженням.

#### ***Тема 5 Елементарні випромінювачі та дифракція електромагнітних хвиль***

**ЛР. 5** Дослідження діаграм спрямованості елементарних випромінювачів і відбиття плоских хвиль від екрана.

#### ***Тема 6 Взаємні нерегулярні елементи та пристрої хвилевідних трактів телекомунікаційних систем***

**ЛР. 6** Дослідження фільтрів надвисоких частот.

**ЛР. 7** Дослідження характеристик спрямованого відгалужувача та властивостей хвилевідних мостів.

#### ***Тема 7 Керовані та невзаємні пристрої хвилевідних трактів телекомунікаційних систем***

**ЛР. 8** Дослідження феритових пристроїв надвисоких частот та механічно керованого фазообертача.

#### ***Тема 8 Електровакуумні прилади надвисоких частот***

**ЛР. 9** Дослідження спектра резонансних частот прохідного прямокутного резонатора.

**ЛР. 10** Дослідження зон генерації відбивного клістрона та коефіцієнта сповільнення уповільнювальної системи лампи зворотної хвилі.

#### ***Тема 11 Техніка антен***

**ЛР. 11** Вимірювання направлених і поляризаційних параметрів рупорних антен.

**ЛР. 12** Дослідження дзеркальної антени.

**ЛР. 13** Дослідження фазованої антенної решітки.

#### ***Тема 12 Поширення радіохвиль***

**ЛР. 14** Дослідження зон Френеля у вільному просторі

## 6. Навчальні матеріали та ресурси

### Основна література:

1. Шокало В.М., Правда В.І., Усін В.А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д.В. Електродинаміка та поширення радіохвиль, Ч.1. Основи теорії електромагнітного поля. - Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009. - 286 с.
2. Шокало В.М., Правда В.І., Усін В.А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д.В. Електродинаміка та поширення радіохвиль, Ч.2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль. - Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2010. - 435 с.
3. Ліпатов А.О. Пристрої НВЧ телекомунікаційних систем: Навчальний посібник. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003. – 440с.

### Допоміжна література:

4. Pozar, D. M. (2011). Microwave Engineering (4 ed.). John Wiley & Sons.
5. Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley. 4th Edition. 2016
6. H. Sizon. Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications. Springer., 2015.
7. Ільченко М.Ю., Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Наритник Т.М., Савельєв О.В., Якименко Ю.І. Інтегральні пристрої НВЧ телекомунікаційних систем. К.: Техніка, 1998. — 110 с.
8. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи – К.: Наукова думка, 2017 – 730 с.
9. Поширення радіохвиль в зоні покриття безпроводових мереж зв'язку. Теоретичні основи та приклади розв'язання задач [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. О. Кравчук, Л. О. Афанасьєва, Д. А. Міночкін, І. М. Кравчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 107 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36935>)

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

Методика опанування навчальної дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль” полягає у набутті практичних навичок застосування положень теорії електромагнітного поля, його генерації, підсилювання та випромінювання, теорії антен і обробки електромагнітних хвиль надвисокого діапазону частот для розв'язання конкретних технічних задач, що виникають при розробці та експлуатації аналогових високочастотних складових телекомунікаційного обладнання, інформаційно-телекомунікаційних та радіотехнічних систем, набуття стійких вмінь прийняття науково обґрунтованих, усвідомлених, підтверджених розрахунками рішень.

## 8. Самостійна робота студента (СРС)

Для активізації сприйняття математичних та прикладних ідей дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль” студент повинен повторити матеріал, який було викладено в курсі математичного та векторного аналізу.

Для підвищення швидкості та надійності засвоєння базових положень теорії при СРС потрібно приділити більше уваги розв'язанню задач.

Для осмисленого і живого сприйняття дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль” рекомендується проводити комп'ютерні імітаційні експерименти для перевірки теоретичних положень, викладених на лекціях і практичних заняттях, а також використовувати написання рефератів по перспективним напрямкам розвитку техніки надвисоких частот.

Контроль якості опанування студентом дисципліни здійснюється шляхом опитування на лекціях, практичних заняттях, при перевірці модульної контрольної роботи (МКР) і домашньої контрольної роботи (ДКР), а також при проведенні іспиту.

## Політика та контроль

## 9. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Матеріал дисципліни „Електродинаміка та поширення радіохвиль” вивчається у четвертому семестрі на лекціях та практичних заняттях. Теоретичний матеріал викладається та в подальшому використовується для розв'язання задач на базі підручників та навчальних посібників, рекомендованих Міністерством освіти і науки України для студентів закладів вищої освіти, а також монографій ІТС. Приклади застосування розрахунків наведені в методичних вказівках до підготовки к лекціям, практичним заняттям і лабораторним роботам з дисципліни «Електродинаміка та поширення радіохвиль».

Оцінка успішності студентів по кредитному модулі визначається на основі рейтингової системи.

## 10. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання

1. Рейтинг студента з кредитного модуля розраховується виходячи із 100-бальної шкали, з них 70 балів складає стартова шкала. Стартовий рейтинг (протягом семестру) складається з балів, що студент отримує за:

- виконання контрольних робіт (5 експрес-контролів) - 15 балів;
- виконання МКР – 18 балів;
- виконання лабораторних робіт – 21 бал;
- виконання ДКР – 16 балів.

2. Критерії нарахування балів.

2.1. Експрес-контрольні роботи оцінюються із 3 балів кожна:

- «відмінно» – повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 3 балів;
- «добре» – достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації) або повна відповідь з незначними неточностями – 2 балів;
- «задовільно» – неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки – 1 бал;
- «незадовільно» – відповідь не відповідає вимогам до «задовільно» – 0 балів.

2.2. Модульна контрольна робота оцінюється із 18 балів:

- «відмінно» – правильно і повністю виконані всі завдання (не менше 90% потрібної інформації) – 17-18 балів;
- «добре» – частково виконані завдання (не менше 75% потрібної інформації) – 14-15 балів;
- «задовільно» – завдання контрольної роботи виконані із помилками (не менше 60% потрібної інформації) – 11-12 балів;
- «незадовільно» – завдання не виконані або містять грубі помилки, МКР не зараховано – 0 балів.

2.3 Максимальний ваговий бал за одну виконану та захищену лабораторну роботу – 1,5 бал.

- а) оцінка якості теоретичної підготовки до роботи оцінюється 0,5 б;
- б) оформлення звіту – 0,5 б;
- в) захист роботи – 0,5 б.

2.4 ДКР складається з ряду самостійних частин (розділів), зв'язаних загальною постановкою задачі та охоплюючи три теми дисципліни.

*Критерії оцінювання:*

- розрахунки виконані правильно, у повному обсязі, відповідають варіанту завдання й вимогам оформлення текстових і графічних матеріалів, які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є повні розділи самоперевірки, змістовні висновки - 16 балів;

- розрахунки виконані правильно, у повному обсязі, відповідають варіанту завдання, але є, незначні відхилення від вимог оформлення текстових і графічних матеріалів (не більше двох відхилень), які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є не повна самоперевірка, (самоперевірка відсутня не більше ніж на один пункт завдання), і/або поверхневі висновки - 12 балів (відповідає звичайній оцінці «добре»);

- розрахунки виконані правильно, відповідають варіанту завдання, але не в повному обсязі, (відсутній хоча б один пункт завдання), є відхилення від вимог оформлення текстових і графічних матеріалів (не більше чотирьох відхилень), які прийняті на кафедрі для курсових робіт проектів і дипломів. У роботі є не повна самоперевірка, (самоперевірка відсутня не більше ніж на два пункти завдання), і/або поверхневі висновки - 10 балів;

- менш 10 балів ДКР не приймається й відправляється на доробку.

3. Календарна проміжна атестація студентів проводиться за значенням поточного рейтингу студента на час атестації. Якщо значення цього рейтингу не менше 50 % від максимально можливого на час атестації, студент вважається атестованим. Умовою позитивної першої атестації є отримання не менше 8 балів. Умовою позитивної другої атестації – отримання не менше 22 балів.

4. Умовою допуску до екзамену є стартовий рейтинг не менше 30 балів.

5. На екзамені студенти відповідають на питання білету. Кожен білет містить 6 запитань (завдань). Кожне запитання (завдання) оцінюється у 5 балів за такими критеріями:

– «відмінно», повна відповідь, не менше 90% потрібної інформації (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 5 балів;



- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації, є незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 4 бали;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 60% потрібної інформації, деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 3 балів;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «задовільно» – 0 балів.

6. Сума стартових балів та балів за екзаменаційну контрольну роботу переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з таблицею:

Бали	Оцінка
100...95	Відмінно
94...85	Дуже добре
84...75	Добре
74...65	Задовільно
64...60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
не зараховані лабораторні роботи і ДКР або стартовий рейтинг менше 30 балів	Не допущено

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

- положення про рейтингову систему оцінки успішності доводиться на першому занятті з дисципліни;
- попередня рейтингова оцінка  $R$  з кредитного модуля (дисципліни) доводиться до студентів на останньому занятті;
- календарна атестація студентів з дисципліни проводиться викладачами за значенням поточного рейтингу студента на час атестації  $t$ . Якщо значення цього рейтингу не менше **50%** від максимально можливого ( $R_t$ ) на час атестації  $RD_t \geq 0,5R$ , студент вважається задовільно атестованим. В іншому випадку – в атестаційній відомості виставляється "незараховано".

Перелік питань до екзамену з дисципліни представлений у додатку.

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

**Складено:** к.т.н., професор Якорнов Євгеній Аркадійович,  
к.т.н., доцент Живков Олександр Петрович,

**Ухвалено** кафедрою телекомунікацій (протокол № 9 від 25.05.2024 р.)

**Погоджено** Методичною комісією ІТС (протокол № 4 від 13.06.2024 р.)

## Додаток

1. Рівняння Максвелла в диференціальній і інтегральній формах, їх фізичний зміст.
2. Додаткові рівняння електромагнітного поля (ЕМП).
3. Матеріальні рівняння.
4. Граничні умови для дотичних і нормальних складових ЕМП.
5. Основні рівняння ЕМП у комплексній формі. Комплексна діелектрична проникність. Класифікація середовищ на надвисоких частотах (НВЧ).
6. Баланс енергії ЕМП. Теорема Умова – Пойнтінга. Фізична сутність теореми і її складових.
7. Поняття о хвильових рівняннях.
8. Запізнілі потенціали. Хвильовий процес.
9. Класифікація електромагнітних хвиль (ЕМХ).
10. Параметри ЕМХ, їхні фізичний зміст.
11. Особливості поширення ЕМХ у середовищі з утратами.
12. Особливості розповсюдження ЕМХ в ідеальному та реальному діелектриках.
13. Поляризація плоских ЕМХ: параметри поляризації, поляризаційні характеристики та діаграми.
14. Лінійна поляризація ЕМХ.
15. Кругова й еліптична поляризації ЕМХ.
16. Відображення і переломлення ЕМХ на границі розподілу двох середовищ.
17. Метаматеріали. Поняття про від'ємне заломлення електромагнітної хвилі.
18. Фізичні процеси в намагніченому фериті: прецесія електронів, феромагнітний резонанс при поширенні ЕМХ у фериті. Ефект Фарадея.
19. Класифікація хвилеводів.
20. Методика розрахунку ЕМП у регулярному однорідному хвилеводі, мембранні рівняння.
21. Постійна поширення  $E$ -,  $H$ -,  $T$ -хвиль у хвилеводів в робочому діапазоні частот: видів виразів, фізичний зміст.
22. Вивід співвідношень для характеристичного опору  $E$ -,  $H$ - и  $T$ - хвиль у хвилеводах в діапазонах поширення хвиль та відсічки.
23. Потужність, яка переноситься хвилею по хвилеводу. Гранична і припустима потужності хвилеводу.
24. Складові ЕМП у прямокутному хвилеводі.
25. Діаграма (спектр) типів хвиль у прямокутному хвилеводі.
26. Структура ЕМП основної хвилі у прямокутному хвилеводі.
27. Прямокутний хвилевід: достоїнства і недоліки, застосування в ТКС, розрахунок розмірів поперечного перерізу.
28. Круглі хвилеводи. Їхні достоїнства і недоліки, структура поля основної хвилі. Розрахунок радіуса хвилеводу для передачі енергії основною хвилею.
29. Структура ЕМП основної хвилі у коаксіальному хвилеводі.
30. Представлення хвилеводу еквівалентної двохпровідної лінією. Хвилевий опір.
31. Параметри режиму в лініях передачі.
32. Кругова номограма (діаграма) повних опорів (провідностей).
33. Режим біжучих хвиль у лінії передачі: визначення, умови виникнення, властивості.
34. Режим стоячої хвилі, його визначення, умови виникнення, властивості, застосування.
35. Режим змішаних хвиль у лінії передачі: визначення, умови виконання, властивості, застосування.
36. Визначення опору навантаження лінії передачі методом еквівалентного перетину.
37. Призначення погоджувачих пристроїв. Загальні принципи і методика узгодження на НВЧ.
38. Узгодження навантаження з лінією передачі за допомогою чверть хвильових трансформаторів.
39. Узгодження хвилеводів за допомогою реактивних елементів: принцип узгодження, конструкції, методика розрахунку.
40. Складові поля випромінювання електричного диполя в довільній крапці простору.
41. Визначення складових ЕМП елементарного електричного диполя в ближній зоні.
42. Вивід співвідношень для ЕМП елементарного електричного диполя в далекій зоні. Аналіз отриманих співвідношень.
43. Характеристики і діаграми спрямованості елементарних випромінювачів. Застосування спрямованого і неспрямованого випромінювання в телекомунікаційних системах.
44. Діаграми спрямованості елементарного електричного диполя та елемента Гюйгенса.
45. Потужність випромінювання та опір випромінювання елементарного електричного диполя (вібратора).
46. Складові поля випромінювання магнітного диполя в дальній зоні.
47. Порівняння опорів випромінювання електричного і магнітного диполів.
48. Метод дзеркальних зображень для електричного і магнітного диполів.
49. Дифракція ЕМХ, задачі дифракції. Метод Гюйгенса – Кірхгофа.

50. Алгоритм розрахунку і складові поля випромінювання з прямокутного отвору в екрані.
51. Складові поля випромінювання і ширина діаграми спрямованості при рівномірному розподілі поля на прямокутному отворі.
52. Визначення ширини діаграми спрямованості при косинусоїдальному розподілі поля на одній із сторін прямокутного отвору.
53. Визначення, склад типового хвилевідного тракту телекомунікаційних систем та основні вимоги до його елементів та пристроїв.
54. Багатополюснікі надвисоких частот та методи їхнього опису. Хвильові матриці розсіювання і передачі, їх основні властивості.
55. Хвильові матриці найпростіших чотиріполюсників та взаємозв'язок їх з матрицями опорів та провідностей. Конструкції та принцип дії найпростіших чотиріполюсників надвисоких частот.
56. Селективні по частоті чотиріполюсники надвисоких частот (фільтри надвисоких частот): класифікація частотних фільтрів надвисоких частот, принципи їх побудови; застосування частотних фільтрів у вирішенні проблеми електромагнітної сумісності в телекомунікаційних системах.
57. Полосні (полоснопропускаючі) та режекторні (полоснозагороджуючі) частотні фільтри надвисоких частот.
58. Режекторні фільтри НВЧ на базі осередків метаматеріалів. Основні параметри та характеристики.
59. . Основні властивості шестиполусників (трьохплечих пристроїв надвисоких частот – трійників), їх використання в якості розподільувачів та суматорів потужності.
60. Механічні комутатори надвисоких частот. Поляризаційні фільтри і трійники.
61. Спрямовані вісьмиполюсники, їх хвилеві матриці розсіювання, параметри та класифікація по конструкції елементів зв'язку.
62. Конструкції і принцип дії спрямованих відгалужувачів та мостів надвисоких частот.
63. Коротка характеристика застосування в пристроях надвисоких частот феритів, напівпровідникових діодів і сегнетоелектриків.
64. Еквівалентні схеми напівпровідникових діодів надвисоких частот при подачі на них напруги зміщення протилежної полярності.
65. Конструкції (схеми) і принцип дії пристроїв керування амплітудою коливань надвисоких частот.
66. Електричні керовані фазообертачі (пристрої керування фазою).
67. Невзаємні фізичні явища в намагнічених феритах. Феритові циркулятори і вентиля.
68. Класифікація електровакуумних приладів надвисоких частот.
69. Взаємодія електронів зі статистичними електричним та магнітним полями: сила і потужність взаємодії поля и заряду, швидкість електрону на виході зазору с потенціалом  $U_0$ , сила Лоренца, циклотронна частота.
70. Взаємодія електронів з електромагнітним полем.
71. Хвилевидні і нехвилевидні (квазістаціонарні) об'ємні резонатори надвисоких частот. Добротність резонаторів.
72. Пролітні і відбивні клістрони.
73. Призначення, класифікація та принцип дії уповільнювальних систем.
74. Лампи біжучої та зворотної хвилі.
75. Лавинно-пролітні діоди і діоди Ганна.
76. Біполярні і польові транзистори надвисоких частот. Напівпровідникові і гібридні інтегральні схеми надвисоких частот.
77. Модулі надвисоких частот.
78. Малошумні лінійні підсилювачі.
79. Транзисторні малошумні підсилювачі.
80. Підсилювачі на тунельних діодах.
81. Визначення й структура антенних систем. Класифікація антен.
82. Параметри передавальних і приймальних антен.
83. Визначення й класифікація антенних решотік.
84. Теорема множення характеристик спрямованості, комплексний множник неперервної прямолінійної системи випромінювачів.
85. Фазовані антенні решітки.
86. Прямолінійні випромінюючі системи.
87. Випромінюючі розкриви.
88. Плоскі фазовані антенні решітки.
89. Антени стоячих хвиль і бігучих хвиль.
90. Хвилевидні випромінювачі й оптимальні рупорні антени із прямокутним і круглим розкритом.

91. Дзеркальні антени.
92. Рупорно-параболічні антени.
93. Перископічні антени.
94. Лінзові антени.
95. Структура й склад земної атмосфери. Вплив Землі й атмосфери на поширення радіохвиль.
96. Напруженість поля й потужність сигналу при поширенні радіохвиль у вільному просторі.
97. Зони Френеля: визначення, властивості, розміри.
98. Відбиття радіохвиль від поверхні Землі. Істотна для відбиття зона поверхні Землі. Комплексний інтерференційний множник Землі, його властивості.
99. Дальність прямої видимості.
100. Поле ультракоротких хвиль в областях тіні й півтіні.
101. Області інтерференції й дифракції. Дифракційний множник ослаблення Фока.
102. Структура й електричні властивості тропосфери. Нормальна тропосфера.
103. Рефракція радіохвиль у тропосфері.
104. Ослаблення радіохвиль у тропосфері.
105. Далеке тропосферне поширення радіохвиль.
106. Поширення радіохвиль в іоносфері.