



[RE-44] ЕЛЕКТРОННІ ТА КВАНТОВІ ПРИЛАДИ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ



Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	G - Інженерія, виробництво та будівництво
Спеціальність	G5 - Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка
Освітня програма	Всі ОП
Статус дисципліни	Вибіркова (Ф-каталог)
Форма здобуття вищої освіти	Очна
Рік підготовки, семестр	Доступно для вибору починаючи з 3-го курсу, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кред. (Лекц. 16 год, Практ. год, Лаб. 30 год, СРС. 74 год)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Залік
Розклад занять	https://schedule.kpi.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лекц.: Турєєва О. В. , Лаб.: Турєєва О. В. , СРС.: Турєєва О. В.
Розміщення курсу	https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=801

Програма навчальної дисципліни

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

Сучасний розвиток радіотехнічних систем спеціального призначення, а саме радіолокаційних станцій, систем радіопротидії та РЕБ, інформаційних супутникових систем, що працюють в діапазоні частот від 1 до 300 ГГц, потребують потужних генераторів та підсилювачів (від

одиниць кВт і вище). Реалізувати генераторну і підсилювальну функцію в таких системах можна тільки із застосуванням електронно-вакуумних приладів: клістронів, магнетронів, ламп прямої і зворотної хвилі.

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

- здатність оцінювати конструкторсько-технологічні, інженерні та науково-технічні рішення і враховувати особливості роботи електронних приладів НВЧ діапазону з точки зору дотримання умов безпеки життєдіяльності, енергоефективності та екологічності;
- здатності пояснити фізичні основи роботи електронних та квантових приладів НВЧ і принципи інженерно-конструкторської реалізації електронно-вакуумних та квантових приладів для роботи в НВЧ діапазоні;
- здатності здійснювати аналіз та вимірювання основних характеристик електронних та квантових приладів мікрохвильового діапазону з урахуванням сучасних тенденцій розвитку радіоелектронних систем;

Предмет вивчення дисципліни «**Електронні та квантові прилади НВЧ**» є фізичні основи роботи електронних та квантових приладів НВЧ; принципи інженерно-конструкторської реалізації електронно-вакуумних та квантових приладів для роботи в НВЧ діапазоні, особливості застосування в радіотехнічних системах.

У відповідності до освітніх програм **програмні результати навчання**:

знання:

- принципів дії та особливостей побудови приладів НВЧ типу "О" із зосередженою за розподіленою взаємодією електронного потоку з електромагнітним полем;
- фізичних основ роботи та особливостей побудови приладів НВЧ із схрещеними полями типу "М";
- принципів інженерно-конструкторської реалізації електронних та квантових приладів для роботи в НВЧ та оптичному діапазоні.

уміння:

- аналізувати роботу, оцінювати та вимірювати основні характеристики електровакуумних приладів НВЧ;
- вимірювати основні характеристики електронних та квантових приладів мікрохвильового діапазону;
- орієнтуватися в сучасній елементній базі РЕА, характеристиках і параметрах електронних та квантових приладів НВЧ діапазону, критеріях застосування приладів при побудові радіоелектронних систем.

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

Міждисциплінарні зв'язки: забезпечується вивченням таких дисциплін як «Загальна фізика», «Вища математика», «Основи теорії кіл», «Електродинаміка та поширення радіохвиль».

Одержані знання та навички після вивчення дисципліни «Електронні та квантові прилади НВЧ» використовуються подалі в дисциплінах «Трансівери сучасних радіотехнічних систем», «Основи радіолокаційних систем», «Системи радіопротидії», «Радіонавігаційні системи», при виконанні курсових та дипломних робіт.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Введення. Фізичні основи побудови електронних приладів НВЧ.

Тема 1.1 Введення. Особливості приладів НВЧ та оптичного діапазонів. Области використання НВЧ - електронних та квантових приладів.

Тема 1.2 Фізичні основи побудови електронних приладів НВЧ. Рівняння руху електрона в змінному електричному полі. Обмін енергією між електроном та змінним електричним полем. Час та кут прольоту електронів.

Розділ 2. Прилади з короткочасною взаємодією з полем

Тема 2.1 Принцип дії приладів з короткочасною взаємодією електронів з полем. Групування пучка електронів по швидкості та щільності в дворезонаторному пролітному клістріні, просторово-часова діаграма. Параметр групування. Залежність струму конвекції від параметра групування. Генератор на основі дворезонаторного пролітного клістрона.

Тема 2.2 Багаторезонаторні клістри. Устрій і схема вмикання. Частотно-фазові характеристики, потужність, к.к.д. Обмеження в зростанні вихідної потужності при збільшенні анодної напруги, струму пучка електронів. Застосування пролітного клістрона в якості підсилювача сигналів. Вплив коефіцієнтів відбивання виходу підсилювача сигналів і навантаження на режим роботи лінії передачі (фідера) і потужність у навантаженні.

Тема 2.3 Відбивний клістрон. Групування електронів, просторово-часова діаграма. Зони генерації, потужність, к.к.д. Електронне та механічне перестроювання частоти. Конструкції, області використання.

Розділ 3. Прилади з тривалою взаємодією електронів з полем

Тема 3.1 Устрій та загальна характеристика ламп біжучої хвилі (ЛБХ) і області їх застосування. Сповільнюючі системи, поняття про просторові гармоніки, дисперсійні характеристики сповільнюючих систем. Групування електронів в полі біжучої хвилі. Умови взаємодії пучка електронів з полем біжучої хвилі. Умови фазового синхронізму потоку електронних згустків з полем робочої просторової гармоніки біжучої хвилі.

Тема 3.2 Лампи зворотної хвилі (ЛЗХ) типу "О". Устрій та принцип роботи. ЛЗХ як генератор з розподіленим внутрішнім зворотним зв'язком. Електронне перестроювання частоти генерації. Вихідна потужність, к.к.д. Застосування ЛЗХ.

Розділ 4. Прилади НВЧ із схрещеними полями

Тема 4.1 Фізичні основи роботи приладів НВЧ із схрещеними полями типу "М". Вплив сили Лоренца на траєкторію електрона, що рухається в постійному магнітному полі. Циклотронна частота. Циліндричний діод в постійному магнітному полі, поняття про критичну величину магнітної індукції.

Тема 4.2 Рух електронів в схрещених електричному та магнітному полях. Групування електронів в приладах типу "М". Особливості передачі енергії від потоку електронів високочастотному полю в приладах типу "М". Принцип фазового синхронізму для приладів типу "М".

Тема 4.3 Класифікація приладів НВЧ типу "М" у відповідності з типом сповільнюючої системи та електронного потоку. Магнетрон як прилад типу "М" з замкнутим електронним потоком. Особливості формування електронного потоку і передачі його енергії високочастотному полю в магнетроні. Робочий тип коливачів. Робочі характеристики. Потужність, к.к.д. Области використання.

Розділ 5. Основи побудови квантових приладів.

Тема 5.1 Фізичні основи дії квантових приладів мікрохвильового та оптичного діапазонів. Енергетичні рівні, нормальна та інверсна заселеність рівнів, спонтанні та індуковані переходи

між рівнями.

Тема 5.2 Оптичні квантові генератори (лазери). Умови самозбудження. Різновиди лазерів по типу активного середовища, способам накачки, режиму роботи. Оптичні резонатори. Устрій імпульсного лазера на рубіні. Характеристики. Области використання.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна література.

1. Панфілов І.П., Флейта Ю.В. Електронні та квантові прилади НВЧ: Навч. посібник для вузів. Модуль 1. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2010. – 120 стор.
2. Тараненко В.П. Електронні та квантові прилади НВЧ. Київ, "Вища школа", 1974. 248 с.
3. 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: Підручник для студентів ВНЗ / За заг. ред. В.М. Шокало та В.І. Правди. Харків: ХНУРЕ; Колегіум, 2009. 286 с.

Допоміжна.

1. [David M. Pozar](#), Microwave Engineering, John Wiley & Sons, 2011.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Планується проведення лабораторних робіт з метою ознайомлення із зразками електронних приладів НВЧ, дослідження їх характеристик з використанням радіовимірювальної НВЧ апаратури. Лабораторні роботи виконуються за темами:

- дослідження характеристик магнетронного генератора;
- дослідження характеристик лампи зворотної хвилі типу О;
- дослідження режимів роботи та характеристик відбивного клістрону;
- дослідження характеристик підсилювача на лампі біжучої хвилі.

Індивідуальні завдання:

ДКР - домашня контрольна роботи.

Мета домашньої контрольної роботи – більш глибоке засвоєння матеріалів теоретичного курсу, закріплення навиків самостійного використання набутих знань. Робота проводиться за всіма розділами лекційного матеріалу.

6. Самостійна робота студента

На самостійну роботу студентів відводиться 66 годин. Вона складається з:

- опрацювання матеріалу лекцій – 8 год.;
- підготовки до лабораторних робіт – 20 год.;
- підготовка до модульної контрольної роботи – 10 год.;
- виконання домашньої контрольної роботи - 12
- підготовка до заліку – 16 год.;

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Рекомендовані методи навчання:

- метод проблемного навчання: проблемний виклад на окремих лекціях, і дослідницький метод при виконанні лабораторних робіт;
- особистісно-орієнтований - у вигляді навчальних дебатів під час виконання лабораторних робіт;
- застосування комп'ютерних засобів при виконанні домашньої контрольної роботи.

Правила відвідування занять. Відвідування лекцій та лабораторних занять є обов'язковою, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для виконання семестрових контрольних заходів. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за своєчасність і якість виконання лабораторних робіт, а також виконання домашньої контрольної роботи.

Призначення заохочувальних та штрафних балів. Заохочувальні бали виставляються за: активну участь на лекціях і лабораторних заняттях, Кількість заохочуваних балів не більше 5; Штрафні бали можуть виставлятися за: невиконання або невчасне виконання завдань. Кількість штрафних балів не більше 5.

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>.

Навчання іноземною мовою Навчальна дисципліна «Електронні та квантові прилади НВЧ» передбачає її вивчення українською мовою. У процесі викладання навчальної дисципліни використовуються матеріали та джерела українською та англійською мовою.

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

Рейтингова оцінка з дисципліни RD (тобто екзаменаційна оцінка за семестр) формується як сума балів поточної успішності навчання та екзаменаційних балів. RD розраховується за 100-бальною шкалою. Рейтинг студента складається з балів, які він отримує за:

- експрес-контроль з лабораторних занять. Контроль проводиться у вигляді індивідуального опитування за темою лабораторного заняття;
- виконання та захист лабораторних робіт;
- модульну контрольну роботу;
- виконання ДКР;
- відповідь на заліку;

Штрафні та заохочувальні бали:

- не допуск до лабораторної роботи у зв'язку з неправильною відповіддю на експрес-контролі мінус 2 бали
- активна участь на заняттях плюс 5 балів

Система рейтингових балів та критерії оцінювання в семестрі

1. В семестрі виконується 4 ЛР. За кожен ЛР нараховуються бали:

Експрес-контроль з лабораторних занять

- повна відповідь 4 бали
- повна відповідь з неістотними помилками 2 бали
- неправильна відповідь 0 балів

Максимальна сума балів за експрес-контроль 16 балів

Захист лабораторних робіт (ЛР)

- повна відповідь при захисті ЛР 4 бали
- неповна відповідь при захисті ЛР 2 бали
- незадовільна відповідь при захисті ЛР 0 балів

Максимальна сума балів за ЛР **4x4+4x4=32 бали**

1. Модульний контроль МКР :

- повна відповідь 12 балів
- відповідь має неістотні неточності 6 балів
- відповідь неповна, є істотні помилки 3 бали
- незадовільна відповідь, немає відповіді 0 балів

Максимальна сума балів за МКР **12 балів**

1. Домашня контрольна робота (ДКР)

- правильний розрахунок з детальним описом 16 балів
- і приведеною програмою, зроблені висновки 8 балів
- неповний розрахунок з неістотними помилками 8 балів
- розрахунок неправильний 0 балів

Максимальна сума балів за ДКР **16 балів**

Розрахунок шкали рейтингу

Сума максимально можливих балів контрольних заходів (поз.1-3) протягом семестру складає:

$$R_{\text{сем}} = 32 + 12 + 16 = 60 \text{ балів}$$

Екзаменаційна оцінка шкали RD дорівнює 40% і становить 40 балів:

$$RD = R_{\text{сем}} + R_{\text{екз}} = 60 + 40 = 100 \text{ балів}$$

Умовою допуску до заліку є сума балів не менше $0,5 \cdot R_{\text{сем}}$ тобто > 30 балів, відсутність заборгованостей з лабораторних робіт та виконання ДКР. Студентам, які мають $R_{\text{сем}}$ менше 30 балів, протягом останнього тижня семестру надається можливість підвищити $R_{\text{сем}}$ та отримати допуск до семестрового заліку.

Рейтингові оцінки з дисципліни для виставлення їх до екзаменаційної відомості та залікової книжки трансформуються до таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

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

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Дистанційний курс навчальної дисципліни - <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=801>

Приблизний перелік питань для МКР.

1. Поясніть, завдяки якому фізичному явищу збуджуються коливання в другому резонаторі дворезонаторного клістрона.
2. Що таке параметр групування? Від яких величин і чому він залежить?
3. Пояснити за допомогою просторово-часової діаграми процес формування згустків в пролітному проміжку дворезонаторного клістрона?
4. Дворезонаторний клістрон часто використовується як помножувач частоти. Чому це можливо? Що треба зробити із елементами його конструкції щоб підвищити вихідну потужність на бажаній гармоніці?
5. В проміжок між двома з'єднаними зовні електродами влітає електрон. Швидкість електрону дорівнює Ve , відстань між електродами дорівнює d . Зобразіть часову залежність наведеного струму.
6. Як пов'язані величини конвекційного струму і наведеного ім струму між двома з'єднаними пластинами, проміжок між якими збуджується цим струмом?
7. Чим пояснюється низький реальний ККД дворезонаторного клістрона?
8. Завдяки чому підвищується коефіцієнт підсилення потужності і електронний ККД у багаторезонаторних клістронах?
9. Наведіть формулу для крутизни електронного перестроювання частоти генератора на відбивному клістріні і поясніть зміст величин, що входять до цієї формули.
10. Які негативні явища виникають в підсилювачі на вакуумному тріоді при збільшенні частоти вхідного сигналу?
11. Чому в генераторі на відбивному клістріні є багато зон генерації?
12. Що таке рівень одноступінчастої компресії підсилення клістронного підсилювача?
13. Пояснити принцип роботи магнетрона на прикладі конструкції 8-резонаторного приладу.
14. Що таке групова і фазова швидкості електромагнітної хвилі? Які швидкості однакові, а які відрізняються для просторових гармонік?
15. Поясніть процес перестроювання частоти генерації у генераторі на лампі зворотної хвилі.
16. Відомо, що динамічний діапазон підсилювача на ЛБХ обмежений зверху – вихідна потужність з ростом вхідної починає падати. Які конструктивні міри приймаються для «подовження» лінійної характеристики?
17. Чому принципово коефіцієнт корисної дії ЛБХ не може бути високим?
18. Відомо, що у схрещених електричному і магнітному полях траєкторія електрона, що починає рух із нульовою початковою швидкістю, – це циклоїда. А якою буде траєкторія цього електрона, якщо електричне і магнітне поле спрямовані однаково?
19. Завдяки чому у магнетронному генераторі сповільнюється електромагнітна хвиля?
20. Який тип хвилі використовується у сповільнюючій системі лампи зворотної хвилі?
21. Чому найчастіше використовуваним типом коливань резонаторного блоку багаторезонаторного магнетрона є π -тип коливань (π -мода)?
22. Яка з компонент змінного електричного поля хвилі відповідає за групування електронів в багаторезонаторному магнетроні?
23. Назвіть мінімум дві причини великого значення коефіцієнта корисної дії магнетрона порівняно з лампою біжучої хвилі.

Опис матеріально-технічного та інформаційного забезпечення дисципліни

Метою виконання лабораторних робіт є ознайомлення із зразками електронних приладів НВЧ, дослідження їх характеристик з використанням радіовимірювальної НВЧ апаратури.

Лабораторна робота №1- Дослідження режимів роботи та характеристик відбивного клістрону

Обладнання: досліджуваний генератор на відбивному клістріні 4-см діапазону, стабілізований блок живлення типу З-490 М, генератор пилкоподібної напруги, осцилограф, вимірювач потужності МЗ-10 (М4-2), частотомір ЧЗ-68, хвилеводний тракт, коаксіально-хвилевідний перехід, детекторна секція, змінний атенюатор ножового типу, спрямований відгалужувач. 2 стенди, 6 робочих місць.

Лабораторна робота №2- Дослідження характеристик лампи зворотної хвилі О-типу (ЛЗХ- О)

Обладнання: досліджуваний генератор на лампі зворотної хвилі О-типу 3-см діапазону ОВ-19, блок живлення, частотомір 42-30, підсилювачем У2-1 А осцилограф, вимірювач потужності Я2М-66, частотомір ЧЗ-66, хвилеводний тракт, хвилеводний перемикач, коаксіально-хвилевідний перехід, детекторна секція, атенюатор, вентиль, спрямований відгалужувач. 1 стенд, 4 робочих місця.

Лабораторна робота №3- Дослідження характеристик магнетронного генератора

Обладнання: досліджуваний магнетронний блок на основі пакетованного магнетрону безперервної дії, блок живлення, вимірювач потужності МЗ-10 (М4-2), хвилемір візуальний ВВ-1, хвилеводний тракт, трансформатор повних опорів, коаксіально-хвилевідний перехід, детекторна секція, атенюатор, вентиль, спрямований відгалужувач. 1 стенд, 4 робочих місця.

Лабораторна робота №4- Дослідження характеристик лампи біжучої хвилі О-типу (ЛБХ - О).

Обладнання: досліджуваний підсилювач на лампі біжучої хвилі О-типу (ЛБХ - О) 3-см діапазону, генератор НВЧ сигналів Г4-32А, блок живлення, вимірювачі потужності МЗ-10 (М4-2), хвилеводний тракт, коаксіально-хвилевідний перехід, детекторна секція, атенюатор, вентиль, спрямований відгалужувач. 1 стенд, 4 робочих місця.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено [Турєєва О. В.](#);

Ухвалено кафедрою РТС (протокол № 06/2025 від 24.06.2025)

Погоджено методичною комісією факультету/ННІ (протокол № 06/2025 від 25.06.2025)