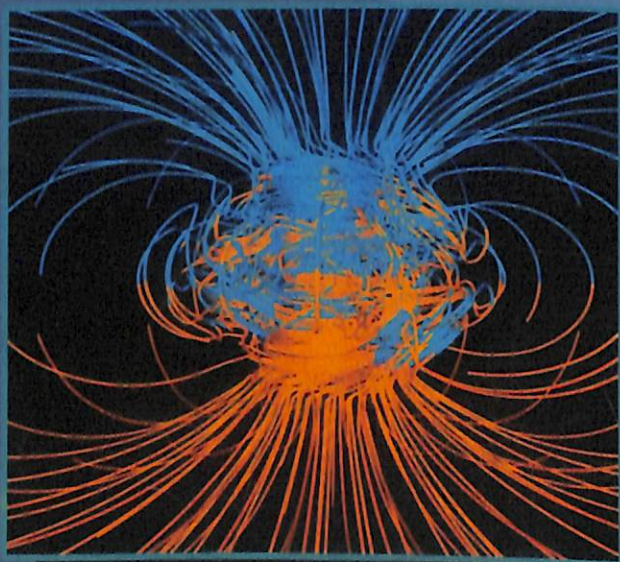


МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

В. Д. Карлов, І. Г. Леонов

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ



Харків
2021

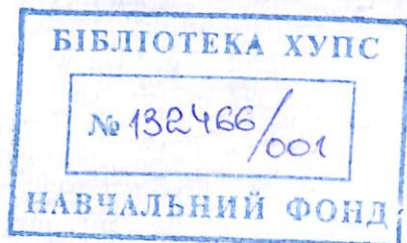
S37
K23

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

В. Д. Карлов, І. Г. Леонов

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Підручник для бакалаврів
та магістрів з радіотехніки



Харків
2021

УДК 001.89:537.8(075.8)
К92

*Затверджено до видання вченою радою
Харківського національного університету
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
як підручник (протокол № 26 від 22.10.2019)*

Рецензенти: Л. Ф. Купченко, доктор технічних наук, професор (ХНУІС);
О. І. Сухаревський, доктор технічних наук, професор,
провідний
науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил
Харківського національного університету Повітряних Сил імені
Івана Кожедуба

Карлов В. Д.
К92 Теорія електромагнітного поля: підручник для бакалаврів та
магістрів з радіотехніки/ В. Д. Карлов, І. Г. Леонов. – Х :
ХНУПС, 2021. – 292 с.

Наведені основні положення загальної теорії електромагнітного поля, в яких розглянуті питання процесів випромінювання, поширення, дифракції, інтерференції, дисперсії електромагнітних хвиль та структури поля в різних середовищах поширення. Приведено методи розрахунку параметрів електромагнітного поля для сучасних і перспективних радіоселекtronічних засобів у дальній зоні. Велика увага приділяється розв'язанню системи рівнянь Максвелла з урахуванням принципів Ферма, Гюйгенса та суперпозиції, які дозволяють проводити аналіз електромагнітного поля для будь-яких початкових вимог. Питання розглянуті на понятійному, фізичному та аналітичному рівнях. Тому використання підручника можливо для навчання як бакалаврів, так і магістрів у галузях "Електроніка та телекомунікації" та "Восни науки, національна безпека, безпека державного кордону". Розглянуті питання дозволяють покращити якість поняття принципів дії та методів експлуатації сучасних радіотехнічних систем і визначити вплив різноманітних факторів, що виникають у процесі поширення електромагнітного поля, на їх характеристики, зокрема в зоні дії ООС.

Підручник призначений для курсантів, які навчаються за спеціальностями "Телекомунікації та радіотехніка", "Озброєння та військова техніка". "Військове управління".

УДК 001.89:537.8(075.8)

© Карлов В. Д., Леонов І. Г., 2021

© Харківський національний університет Повітряних
Сил імені Івана Кожедуба, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	7
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ.....	9
Розділ 1. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	12
1.1. Векторні характеристики електромагнітного поля.....	15
1.2. Магнітні та електричні властивості середовища.....	18
1.3. Класифікація матеріальних середовищ.....	24
1.4. Рівняння Максвелла.....	26
1.4.1. Закон повного струму. Перше рівняння Максвелла.....	26
1.4.2. Закон електромагнітної індукції. Друге рівняння Максвелла.....	29
1.4.3. Теореми Гауса для електричної та магнітної індукції. Третє і четверте рівняння Максвелла.....	32
1.4.4. Закон збереження заряду.....	35
1.4.5. Фізичний зміст рівнянь Максвелла.....	36
Розділ 2. РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ МАЛОЇ ШВИДКОСТІ ПРОТІКАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ.....	39
2.1. Класифікація електромагнітних процесів за швидкістю їх протікання.....	39
2.1.1. Статичне поле.....	39
2.1.2. Стаціонарне поле.....	41
2.1.3. Квазістаціонарне поле.....	42
2.1.4. Швидкозмінне поле.....	43
2.2. Система рівнянь Максвелла для електростатичного поля.....	44
2.2.1. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для електростатичного поля.....	44
2.2.2. Приклади розв'язання системи рівнянь Максвелла для електростатичних полів.....	48
2.2.3. Електростатичне поле рівномірно зарядженої кулі.....	48
2.2.4. Поле системи заряджених куль. Принцип суперпозиції.....	50
2.2.5. Загальний розв'язок рівнянь Лапласа та Пуассона для електростатичного поля.....	56
2.2.6. Енергія електростатичного поля.....	58
2.3. Система рівнянь Максвелла для стаціонарного електромагнітного поля.....	62
2.3.1. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для стаціонарного електричного поля.....	62
2.3.2. Порівняння стаціонарного електричного поля з електростатичним.....	64
2.3.3. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для стаціонарного магнітного поля.....	66

2.3.4. Електричне поле плоского витка зі струмом. Магнітний диполь.....	70
2.3.5. Енергія стаціонарного магнітного поля.....	72
2.4. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для квазістаціонарного електромагнітного поля.....	74
Розділ 3. РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ШВИДКОЗМІННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	77
3.1. Система рівнянь Максвелла для періодичних електромагнітних полів.....	78
3.2. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для плоских електромагнітних хвиль у вільному просторі.....	81
3.3. Плоскі гармонічні хвилі в однорідному середовищі.....	86
3.3.1. Потужність плоскої хвилі в однорідному середовищі.....	90
3.3.2. Плоскі гармонічні хвилі в середовищі без втрат.....	92
3.4. Дисперсія плоских хвиль.....	97
3.4.1. Особливості дисперсії хвиль в однорідних середовищах.....	97
3.4.2. Вплив дисперсії на висотну рефракцію плоских хвиль у тропосфері.....	104
3.4.3. Вплив дисперсії на групову швидкість пакета плоских хвиль.....	106
3.5. Плоскі гармонічні хвилі в середовищі, яке проводить струм.....	110
3.6. Втрати енергії гармонічними хвилями в середовищі, яке проводить струм.....	115
3.7. Поляризація плоских гармонічних хвиль.....	120
3.8. Ефект Доплера при поширенні плоских гармонічних хвиль.....	126
3.8.1. Класичний ефект Доплера.....	127
3.8.2. Ефект Доплера для електромагнітних хвиль.....	129
Розділ 4. РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ПЛОСКИХ ХВИЛЬ В АНІЗОТРОПНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	134
4.1. Рівняння Максвелла для однорідних анізотропних середовищ.....	134
4.2. Тензор діелектричної проникності іоносферної плазми у постійному магнітному полі.....	139
4.3. Тензор магнітної проникності фериту.....	144
4.3.1. Тензор магнітної проникності фериту у постійному магнітному полі.....	144
4.3.2. Властивості фериту у квазістаціонарному магнітному полі. Магнітний гістерезис.....	151
4.4. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для плоских електромагнітних хвиль в анізотропних середовищах.....	154
4.4.1. Розв'язання системи рівнянь Максвелла для плоских електромагнітних хвиль при поширенні у фериті, який знаходиться у поперемножному магнітному полі.....	155
4.4.2. Ефект Фарадея. Феромагнітний резонанс.....	158

4.4.3. Розв'язання системи рівнянь Максвелла при поширенні плоских електромагнітних хвиль у фериті, який знаходиться у поперечному магнітному полі	162
4.4.4. Резонанс у фериті, який знаходиться у поперечному магнітному полі	166
Розділ 5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ НА МЕЖІ ПОДІЛУ СЕРЕДОВИЩ	168
5.1. Параметри плоскої хвилі, що поширюється у довільному напрямку	168
5.2. Граничні умови на поверхні поділу середовищ	171
5.2.1. Граничні умови для нормальних складових електромагнітного поля	171
5.2.2. Граничні умови для тангенціальних складових векторів електромагнітного поля	175
5.2.3. Граничні умови на поверхні ідеальних діелектриків і провідників	179
5.3. Хвильові явища на плоских межах поділу середовищ	181
5.3.1. Нормальне падіння плоскої ТЕМ хвилі на межу поділу середовищ	181
5.3.2. Довільне падіння плоскої ТЕМ хвилі на межу поділу середовищ	186
5.3.2.1. Плоска паралельно поляризована ТЕМ хвиля	187
5.3.2.2. Плоска перпендикулярно поляризована ТЕМ хвиля	191
5.3.2.3. Аналіз коефіцієнтів відбиття	192
5.3.2.4. Глибина проникнення поля в провідник. Поверхневий опір	195
5.4. Тиск електромагнітних хвиль	199
Розділ 6. ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ	204
6.1. Скалярний та векторний потенціали у довільному змінному полі	206
6.2. Розв'язання неоднорідних хвильових рівнянь	210
6.2.1. Елементарне джерело електромагнітного поля	211
6.2.2. Збудження однорідних сферичних хвиль	213
6.2.3. Розв'язання хвильового рівняння по Кірхгофу	218
6.3. Збудження хвиль елементарними вібраторами	222
6.3.1. Збудження хвиль елементарними електричними вібраторами	222
6.3.2. Аналіз поля елементарного електричного вібратора	229
6.3.3. Потужність випромінювання та опір випромінювання елементарного електричного вібратора	239
6.3.4. Досліди Герца. Диполь Герца	241
6.3.5. Збудження хвиль елементарними магнітними вібраторами	247
Розділ 7. ДИФРАКЦІЯ ТА ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ	252
7.1. Дифракція електромагнітних хвиль	255

7.1.1. Область простору, істотна при поширенні радіохвиль.....	255
7.1.2. Залежність напруженості результуючого ЕМП від кількості зон Френеля.....	261
7.2. Приклади виникнення дифракції у радіотехнічній практиці.....	263
7.2.1. Дифракції радіохвиль на непрозорому скрані з круглим отвором	263
7.2.2. Дифракції радіохвиль на непрозорій піаплощині.....	264
7.3. Інтерференція електромагнітних хвиль.....	265
7.4. Когерентність електромагнітних хвиль.....	274
7.5. Багатопроменева інтерференція електромагнітних хвиль. Інтерференційні решітки.....	281
ВІСНОВОК.....	290
ЛІТЕРАТУРА.....	291

ПЕРЕДМОВА

У підручнику на основі основних принципів електродинаміки і розв'язання системи рівнянь Максвелла аналізуються збудження, поширення, відображення і заломлення електромагнітних хвиль у різних середовищах їх поширення. Розглянуто особливості поширення радіохвиль в однорідних, неоднорідних, ізотропних, анізотропних, дисперсійних і не дисперсійних середовищах. Більш докладно розглянуто поширення плоских гармонічних радіохвиль у вільному просторі і поблизу поверхні розподілу двох середовищ поширення при різних початкових умовах.

Для кращого засвоєння понять і термінів у окремих розділах розглянуті стаціонарні й статичні електричні та магнітні поля. Електромагнітне поле аналізується залежно від швидкості його збудження, форми фазового фронту і середовища поширення. При розгляді наведені практичні приклади кожного з видів полів.

У підручнику велика увага приділена фізичній інтерпретації явищ електромагнетизму.

Загальний зміст і побудова викладу в основному відповідають першій частині курсу "Електродинаміка та поширення радіохвиль", що читається багато років курсантам (студентам) Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

З метою зменшення обсягу підручника виключені докладні висновки окремих рівнянь. Ці висновки курсант (студент) за необхідності може знайти в літературі, перелік якої наведено в кінці підручника.

Підручник в основному відповідає вимогам підготовки у галузях "Авіоніка" і "Електроніка та радіотехніка". Він призначений для очної форми навчання бакалаврів і магістрів, а також може бути використаний студентами з інших радіотехнічних і електротехнічних галузей підготовки у вищих навчальних закладах. Він може бути корисний для ад'юнктів (аспірантів) і науковців радіотехнічних та суміжних спеціальностей.

Для більш поглибленого вивчення предмета і отримання навичок з вирішення завдань в кінці підручника наведено список рекомендованої літератури.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити глибоку вдячність своїм колегам з кафедри Фізики і радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба: професору Л. Ф. Купченку, професору Л. Г. Корнієнку, доценту А. В. Белоусову за важливі зауваження і поради, які сприяли поліпшенню змісту підручника.