

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

**РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТА ЗАГАСАННЯ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У НЕОДНОРІДНИЙ  
ТА ОБМЕЖЕНІЙ ПЛАЗМІ**

Навчальний посібник

Харків – 2015

УДК 533.951 (075.8)

ББК 22.333я73

А 35

**Рецензенти:**

**І. О. Анісімов** – професор, доктор фізико-математичних наук, заслужений діяч науки і техніки України, декан факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**В. І. Маслов** – доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник ННЦ Харківський фізико-технічний інститут;

**В. М. Мельник** – завідувач відділу РІ НАНУ, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол № 7 від 01.07.2015 р.)*

**Азаренков М. О.**

А 35

Розповсюдження та загасання електромагнітних хвиль у неоднорідній та обмеженій плазмі : навчальний посібник / [М. О. Азаренков, І. Б. Денисенко, С. В. Івко, М. І. Гришанов]. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – 140 с.

ISBN 978-966-285-261-5

Посібник складено на основі лекцій, які автори читали упродовж багатьох років у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна студентам 5 курсу фізико-технічного факультету, які вивчають курс «Плазмова електроніка». Його зміст відповідає програмі з фізики плазми для студентів класичних університетів, які навчаються за напрямками «Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми». Наведено методики отримання компонентів електромагнітного поля, дисперсійного співвідношення, просторових та часових декрементів загасання, яке обумовлено зіткненнями частинок плазмового середовища та неоднорідністю плазми, густин потоку енергії та енергії, що припадає на одиницю площі поверхні, для хвиль, що розповсюджуються в обмеженій та неоднорідній плазмі. Розглянуто поверхневі та об'ємні хвилі у випадку холодної плазми та у випадку, коли теплова швидкість електронів є істотною. Показано, як зовнішнє магнітне поле впливає на властивості хвиль, що розповсюджуються в обмеженій плазмі. Наведено приклади застосування методу геометричної оптики для дослідження властивостей електромагнітного поля хвиль, які розповсюджуються вздовж неоднорідної плазми, та для випадку похилого падіння хвилі на шар неоднорідної плазми.

**УДК 533.951 (075.8)**

**ББК 22.333я73**

ISBN 978-966-285-261-5

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2015

© Азаренков М. О., Денисенко І. Б., Івко С. В., Гришанов М. І., 2015

© Дончик І. М., макет обкладинки, 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	5
РОЗДІЛ 1. РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У НЕОДНОРІДНІЙ ПЛАЗМІ.....	7
1.1. Основні припущення та рівняння .....	7
1.2. Розповсюдження електромагнітних хвиль вздовж градієнта густини неоднорідної плазми .....	9
1.2.1. Наближений розв'язок хвильового рівняння для вектора електричного поля .....	10
1.2.2. Більш коректний наближений розв'язок хвильового рівняння.....	13
1.2.3. Випадки, коли геометрична оптика незастосовна. Відбиття хвиль .....	16
1.3. Похиле падіння хвилі на шар плазми .....	18
1.3.1. Хвиля з магнітним вектором, який лежить у площині падіння ( <i>s</i> -поляризована хвиля) .....	20
1.3.2. Хвиля з електричним вектором, який лежить у площині падіння ( <i>p</i> -поляризована хвиля) .....	23
1.4. Про особливості поля електромагнітної <i>p</i> -поляризованої хвилі в точці плазмового резонансу.....	26
1.5. Формування плазмових хвиль .....	32
Контрольні завдання до розділу 1 .....	37
РОЗДІЛ 2. ВИСОКОЧАСТОТНІ ПОВЕРХНЕВІ ХВИЛІ В ОБМЕЖЕНІЙ ВІЛЬНІЙ ХОЛОДНІЙ ПЛАЗМІ .....	39
2.1. Дисперсія, структура електромагнітного поля, фазова та групова швидкості поверхневих хвиль, що поширюються на пласкій межі холодної плазми з вакуумом.....	39
2.2. Об'ємна та поверхнева густини електронів .....	46
2.3. Загасання хвилі .....	48
2.4. Енергетичні характеристики поверхневої хвилі .....	49
2.5. Доказ того, що <i>H</i> -хвилі в холодній плазмі не можуть бути хвилями поверхневого типу .....	52
2.6. Зворотні поверхневі хвилі у присутності тонкого діелектричного шару .....	53
2.7. Дисперсійне рівняння для хвиль, що поширюються у циліндричному стовпі плазми, який міститься в металевому хвилеводі.....	58
2.8. Тонкий циліндричний хвилевід .....	64

2.9. Швидкі Е-хвилі у плазмовому хвилеводі .....	67
2.10. Швидкі Н-хвилі у плазмовому хвилеводі.....	71
Контрольні завдання до розділу 2.....	74
<b>РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ТЕПЛОВОГО РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ХВИЛЬ В ОБМЕЖЕНИХ ПЛАЗМОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....</b>	<b>76</b>
3.1. Вплив теплового руху електронів на поверхневу хвилю на межі плазма – вакуум.....	76
3.2. Поверхневі хвилі на межі плазма – метал .....	82
3.3. Низькочастотні хвилі в сильно неізотермічній плазмі.....	86
3.3.1. Поверхневі низькочастотні хвилі у напівобмеженій плазмі....	89
3.3.2. Поверхневі низькочастотні хвилі у вузькому хвилеводі .....	91
3.3.3. Властивості об’ємних низькочастотних хвиль .....	92
Контрольні завдання до розділу 3.....	94
<b>РОЗДІЛ 4. ЗАГАСАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ У НЕОДНОРІДНИХ ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЕВОДАХ.....</b>	<b>95</b>
4.1. Загасання поверхневих хвиль, що розповсюджуються у циліндричному хвилеводі з малою перехідною областю.....	95
4.2. Загасання поверхневої хвилі у тонкому циліндричному хвилеводі.....	101
4.3. Несиметричні потенціальні поверхневі хвилі .....	103
Контрольні завдання до розділу 4 .....	109
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У МАГНІТОАКТИВНИХ ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЕВОДАХ.....</b>	<b>110</b>
5.1. Загальні положення.....	110
5.2. Об’ємні хвилі .....	115
5.3. Потенціальні хвилі у тонкому хвилеводі .....	121
5.4. Непотенціальні поверхневі хвилі на межі плазма – метал, що розповсюджуються поперек зовнішнього магнітного поля .....	128
Контрольні завдання до розділу 5.....	133
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>134</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>138</b>