

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

Л. Ф. ЧОРНОГОР

НЕЛІНІЙНА РАДІОФІЗИКА

Підручник

Харків – 2015

УДК 530.18+534.1, 550.338
ББК 32.814
Ч-49

Рецензенти:

В. М. Яковенко – академік НАН України (Інститут радіофізики та електроніки НАН України, м. Харків);

С. М. Шульга – доктор фіз.-мат. наук, професор (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна).

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 7 від 1.07.2015 р.)*

Чорногор Л. Ф.

Ч-49 Нелінійна радіофізика : підручник / Л. Ф. Чорногор. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – 204 с.

ISBN 978-966-285-228-8

Викладено загальні питання нелінійної електродинаміки: вихідні рівняння, методи їх розв'язання, самовплив та взаємодія хвиль, теорія ударних хвиль і солітонів, нестійкості. Наведені численні приклади нелінійних явищ з електродинаміки, квантової та космічної радіофізики, фізики плазми тощо. Обговорюються питання детермінованого хаосу та самоорганізації.

Для студентів старших курсів, аспірантів і наукових робітників відповідного профілю.

46 іл., 4 табл., 44 бібл.

Чорногор Л. Ф.

Ч-49 Нелинейная радиофизика : учебник / Л. Ф. Черногор. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. – 204 с.

ISBN 978-966-285-228-8

Изложены общие вопросы нелинейной электродинамики: исходные уравнения, методы их решения, самовоздействие и взаимодействие волн, теория ударных волн и солитонов, неустойчивости. Приведены многочисленные примеры нелинейных явлений из электродинамики, квантовой и космической радиофизики, физики плазмы и т. д. Обсуждаются вопросы детерминированного хаоса и самоорганизации.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных работников соответствующего профиля.

46 илл., 4 табл., 44 библи.

Chernogor L. F.

Ч-49 Nonlinear Radio Physics : textbook / L. F. Chernogor. – Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University, 2015. – 204 p.

ISBN 978-966-285-228-8

The textbook is concerned with the following general principals of nonlinear electrodynamics: basic equations, techniques for their solution, self-action, interaction, shock wave and soliton theory, and instabilities. The numerous examples of nonlinear phenomena are presented from the field of electrodynamics, quantum and space radio- physics, plasma physics, etc. Deterministic chaos and self-organization are discussed.

The textbook is intended for graduate and postgraduate students, and scientists in the field.

46 Figures, 4 Tables, 44 References.

**УДК 530.18+534.1, 550.338
ББК 32.814**

ISBN 978-966-285-228-8

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2015
© Чорногор Л. Ф., 2015
© Дончик І. М., макет обкладинки, 2015



ЗМІСТ

Передмова наукового редактора	8
Передмова	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА. СТРУКТУРА, ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ КУРСУ	13
1.1. Основні етапи формування уявлень про нелінійний світ.....	13
1.2. Причини виникнення нелінійних явищ.....	15
1.3. Структура, цілі та задачі курсу.....	17
<i>Питання для самоконтролю</i>	18
РОЗДІЛ 2. НЕЛІНІЙНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА	19
2.1. Якісна картина нелінійних явищ.....	19
<i>Питання для самоконтролю</i>	20
2.2. Нелінійні рівняння електродинаміки.....	21
2.2.1. Точний розв'язок нелінійних рівнянь електродинаміки.....	21
2.2.2. Нелінійне хвильове рівняння.....	24
<i>Питання для самоконтролю</i>	25
<i>Задачі</i>	25
2.3. Методи нелінійної електродинаміки.....	25
2.3.1. Метод малих збурень.....	26
2.3.2. Метод повільних амплітуд.....	27
2.3.3. Метод нелінійної квазіоптики.....	29
2.3.4. Рівняння ейконалу та переносу.....	30
2.3.5. Метод нелінійної геометричної оптики.....	31
<i>Питання для самоконтролю</i>	31
2.4. Самовплив і взаємодія плоских електромагнітних хвиль.....	31
2.4.1. Амплітудний самовплив хвилі.....	31
2.4.2. Фазовий самовплив хвилі.....	36
2.4.3. Амплітудна взаємодія хвиль.....	37
2.4.4. Фазова взаємодія хвиль.....	39
2.4.5. Нестационарний процес самовпливу хвилі. Динаміка фронту просвітління (помутніння).....	40
<i>Питання для самоконтролю</i>	44
<i>Задачі</i>	45
2.5. Нелінійні стаціонарні хвилі.....	46
2.5.1. Лінійні стаціонарні хвилі.....	47
2.5.2. Укручення профілю хвилі.....	47

2.5.3. Вплив дисипації. Рівняння Бюргерса та його точні розв'язки	48
2.5.4. Ударна хвиля	49
2.5.5. Коротка історія дослідження ударних хвиль. Приклади ударних хвиль	53
2.5.6. Вплив дисперсії. Рівняння Кортвега – де Вріза та його точні розв'язки	54
<i>Питання для самоконтролю</i>	58
<i>Задачі</i>	58
2.6. Солітони	59
2.6.1. Властивості класичного солітона	60
2.6.2. Коротка історія дослідження солітонів.....	60
2.6.3. Рівняння Бюргерса – Кортвега – де Вріза та його розв'язок	61
2.6.4. Дисипативний солітон	62
2.6.5. Електричні домени (солітони Ганна)	64
2.6.6. Нелінійна відокремлена хвиля в радіоелектронних приладах	67
2.6.7. Нелінійна відокремлена хвиля в плазмі.....	69
2.6.8. Рівняння синус-Гордона. Солітон і антисолітон	69
2.6.9. Нелінійне рівняння Шрьодінгера. Солітон обвідної	71
2.6.10. Багатовимірний солітон.....	74
2.6.11. Приклади солітонів	74
2.6.12. Можливі застосування солітонів	76
<i>Питання для самоконтролю</i>	77
<i>Задачі</i>	78
2.7. Самовплив пучків електромагнітних хвиль	80
2.7.1. Оцінка величини ефекту.....	81
2.7.2. Критична інтенсивність пучка	81
2.7.3. Ефект самоканалювання.....	82
<i>Питання для самоконтролю</i>	84
2.8. Когерентна взаємодія хвиль. Нестійкості.....	84
2.8.1. Двохвильова взаємодія	84
2.8.2. Врахування згасання при двохвильовій взаємодії.....	87
2.8.3. Трихвильова взаємодія (несамоузгоджена постановка задачі)	88
2.8.4. Врахування згасання при трихвильовій взаємодії.....	89
2.8.5. Трихвильова взаємодія (самоузгоджена постановка задачі)	91
2.8.6. Вибухова нестійкість	92
<i>Питання для самоконтролю</i>	94
<i>Задачі</i>	94
2.9. Основні результати	97
РОЗДІЛ 3. НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В КВАНТОВІЙ РАДІОФІЗИЦІ	99
3.1. Коротка історична довідка	99
<i>Питання для самоконтролю</i>	100
3.2. Механізми нелінійних явищ.....	101
3.2.1. Тепловий механізм	101

3.2.2. Стрикційний механізм.....	102
3.2.3. Керрівський механізм.....	103
3.2.4. Механізм нелінійності Поккельса.....	104
3.2.5. Атомний механізм.....	104
3.2.6. Релятивістський механізм.....	105
3.2.7. Вакуумний механізм.....	105
3.2.8. Порівняння механізмів.....	106
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>107</i>
3.3. Генерація другої гармоніки.....	108
3.3.1. Вихідні рівняння.....	108
3.3.2. Амплітуда другої гармоніки.....	109
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>110</i>
<i>Задачі.....</i>	<i>110</i>
3.4. Використання нелінійних явищ.....	110
3.4.1. Генерація оптичних гармонік.....	111
3.4.2. Параметричні генератори світла.....	111
3.4.3. Нелінійна спектроскопія.....	112
3.4.4. Адаптивна оптика.....	113
3.4.5. Лазерний керований термоядерний синтез.....	114
3.4.6. Інші застосування нелінійних явищ.....	115
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>115</i>
3.5. Основні результати.....	116
РОЗДІЛ 4. НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В ПЛАЗМОВІЙ РАДІОФІЗИЦІ.....	117
4.1. Загальні відомості про плазму.....	117
4.1.1. Методи теоретичного опису плазми.....	118
4.1.2. Основні параметри плазми.....	118
4.1.3. Плазмова частота.....	119
4.1.4. Діелектрична проникність холодної ізотропної плазми.....	121
4.1.5. Показники заломлення та поглинання хвиль.....	123
4.1.6. Вплив зовнішнього магнітного поля.....	124
4.1.7. Подвійне променезаломлення.....	126
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>126</i>
4.2. Механізми нелінійних явищ у плазмі.....	127
4.2.1. Тепловий (нагрівний) механізм.....	127
4.2.2. Стрикційний механізм.....	129
4.2.3. Іонізаційний механізм.....	130
4.2.4. Релятивістський механізм.....	130
4.2.5. Порівняння механізмів.....	131
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>132</i>
4.3. Рівняння балансу енергії та концентрації частинок.....	132
<i>Питання для самоконтролю.....</i>	<i>133</i>
4.4. Збурення концентрації електронів.....	133
4.4.1. Прилипання та рекомбінація електронів.....	133
4.4.2. Іонізація газу електричним полем.....	134
4.4.3. Порушення гідростатичної рівноваги.....	134

<i>Питання для самоконтролю</i>	135
<i>Задачі</i>	135
4.5. Самовплив електромагнітних хвиль	136
4.5.1. Тепловий самовплив хвиль	136
4.5.2. Стрикційний самовплив хвиль	139
4.5.3. Самовплив іонізуючих хвиль	139
<i>Питання для самоконтролю</i>	140
<i>Задачі</i>	140
4.6. Інші нелінійні ефекти	143
4.6.1. Самофокусувальна нестійкість	143
4.6.2. Резонансні нестійкості	144
4.6.3. Параметричні нестійкості	144
<i>Питання для самоконтролю</i>	145
4.7. Особливості нелінійних явищ у напівпровідниках	145
4.7.1. Основні нелінійні явища	146
4.7.2. Використання нелінійних явищ	147
<i>Питання для самоконтролю</i>	147
4.8. Основні результати	147
РОЗДІЛ 5. НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В КОСМІЧНІЙ РАДІОФІЗИЦІ	148
5.1. Короткі відомості про навколоземний космос	148
<i>Питання для самоконтролю</i>	150
5.2. Результати експериментів	150
<i>Питання для самоконтролю</i>	154
5.3. Механізми нелінійних явищ	154
<i>Питання для самоконтролю</i>	155
5.4. Крос-модуляція радіохвиль	155
5.4.1. Розрахунок величини збурень	155
5.4.2. Розрахунок величини крос-модуляції	156
5.4.3. Аналіз величини крос-модуляції	157
<i>Питання для самоконтролю</i>	158
<i>Задачі</i>	158
5.5. Самомодуляція радіохвиль	159
<i>Питання для самоконтролю</i>	160
<i>Задачі</i>	160
5.6. Нестійкості в іоносфері	160
5.6.1. Самофокусувальна нестійкість	160
5.6.2. Резонансні нестійкості	161
5.6.3. Розпадні нестійкості	162
<i>Питання для самоконтролю</i>	162
5.7. Штучні іоносферні неоднорідності. Ракурсне розсіяння радіохвиль	162
<i>Питання для самоконтролю</i>	164
<i>Задачі</i>	164
5.8. Штучне плазмове дзеркало в атмосфері	164
<i>Питання для самоконтролю</i>	165

<i>Задачі</i>	165
5.9. Ефект Г. Г. Гетманцева.....	166
<i>Питання для самоконтролю</i>	167
5.10. Сонячні енергетичні станції	167
<i>Питання для самоконтролю</i>	168
<i>Задачі</i>	168
5.11. Великомасштабні та глобальні збурення в іоносфері. Вплив на магнітосферу.....	168
<i>Питання для самоконтролю</i>	171
5.12. Солітони в навколоземному просторі.....	171
<i>Питання для самоконтролю</i>	171
5.13. Основні результати	171
РОЗДІЛ 6. НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА В СТАТИСТИЧНІЙ РАДІОФІЗИЦІ	173
6.1. Постановка задачі	173
6.2. Методи розв'язання нелінійних стохастичних задач.....	174
6.2.1. Усереднення точного розв'язку	174
6.2.2. Методи лінеаризації	175
6.2.3. Метод статистичної лінеаризації	176
6.2.4. Рівняння Дайсона для середніх	177
6.2.5. Поняття про рівняння Фокера – Планка.....	178
<i>Питання для самоконтролю</i>	179
<i>Задачі</i>	179
6.3. Основні результати.....	180
РОЗДІЛ 7. АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ НЕЛІНІЙНОЇ РАДІОФІЗИКИ	181
7.1. Детермінований хаос в радіофізиці	181
7.1.1. Поняття хаосу. Математичний апарат хаосу	181
7.1.2. Поняття про геометрію фракталів. Фрактали в математиці та природі.....	182
7.1.3. Формування ідеї динамічного хаосу. Модель Лоренца.....	186
7.1.4. Причини виникнення хаосу	188
7.1.5. Умови та сценарії виникнення хаосу.....	189
7.1.6. Приклади хаотичних радіофізичних систем	189
<i>Питання для самоконтролю</i>	191
7.2. Явище самоорганізації в радіофізиці.....	192
7.2.1. Поняття самоорганізації. Синергетика.....	192
7.2.2. Формування синергетичної ідеї	193
7.2.3. Властивості автохвиль	195
7.2.4. Застосування автохвиль у радіоелектроніці	195
7.2.5. Інші приклади самоорганізації	196
<i>Питання для самоконтролю</i>	197
<i>Задачі</i>	197
7.3. Основні результати	198
ВИСНОВКИ	200
ЛІТЕРАТУРА	202



Передмова наукового редактора

Книга за університетським курсом «Нелінійна радіофізика» являє собою першу й удалу спробу підготовки навчального посібника такого типу. Вона написана на основі лекцій, що читаються з ініціативи Л. Ф. Черногора з 1980-х рр. на радіофізичному факультеті Харківського державного університету (тепер ХНУ імені В. Н. Каразіна). Наскільки мені відомо, курс «Нелінійна радіофізика» і на сьогоднішній день читається тільки в згаданому університеті. Безсумнівно, настане час, коли цей курс стане звичним (таким же, як математична або теоретична фізика) для студентів-радіофізиків і інших університетів. За задумом автора підручника, курс повинен завершувати радіофізичну освіту студентів, традиційно присвячену в основному лінійним процесам і ефектам.

Підручник охоплює основні розділи радіофізики – електродинаміку, теорії коливань і хвильових процесів, електроніку, квантову й статистичну радіофізику, поширення радіохвиль тощо. Перед автором стояла важка задача оптимального вибору матеріалу, що викладається, з настільки широкого кола питань. Як мені видається, Л. Ф. Черногор із цією задачею впорався. Звичайно, не всі питання розкриті однаково повно, але найцікавіші з них описані детально.

Необхідно відзначити вдалу структуру підручника й кожного його розділу. Він, звичайно, починається з короткого екскурсу в історію, потім викладаються класичні нелінійні ефекти й сучасний стан питань. Розділи, як і вся книга, закінчуються основними результатами. Така структура виявляється дуже зручною для студентів.

Головною заслугою книги, на мій погляд, є те, що в ній уперше стверджується, що в цілому світ – нелінійний, що фізика (радіофізика) – нелінійна, а традиційні лінійні дисципліни – лише граничний випадок. Такий погляд на фізику, безумовно, нетривіальний. Додамо, що відомий фізик і радіофізик сучасності академік В. Л. Гінзбург дотримувався думки, що нелінійна фізика – лише частина, і досить мала, всієї фізики.

Коротко про автора. Л. Ф. Черногор – заслужений професор Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат трьох престижних премій колишнього

СРСР, Державної премії УРСР у галузі науки та техніки. Він – відомий фахівець в області космічної фізики, нелінійної радіофізики, поширення радіохвиль дистанційного радіозондування геокосмосу та фізичної екології. Його публікації (а їх більше 1000 найменувань, із них 27 книг) присвячені дослідженню багатьох нелінійних явищ: взаємодії потужного радіо-випромінювання з геокосмічною плазмою, впливу землетрусів, потужних вибухів, стартів і польотів космічних апаратів на навколоземне середовище й т. п. Однак головною заслугою Л. Ф. Черногора є виявлення й пояснення в 70–80 рр. ХХ ст. невідомого раніше явища – генерації стимульованих потужним радіовипромінюванням великомасштабних радіофізичних і геофізичних процесів в іоносферно-магнітосферній плазмі¹. У колишньому СРСР виявлення таких явищ кваліфікувалося як відкриття.

Навчальний посібник доповнений збірником задач², більшість із яких – оригінальні.

Книга написана на високому науковому й методичному рівні, без сумніву, буде сприяти підготовці нових поколінь фахівців-науковців.

¹ Див. про це, наприклад, роботу: Гармаш К. П. Эффекты в околоземной космической плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 6. – С. 17–40.

² Див. : Лазоренко О. В. Нелинейные явления в радиофизике: Сборник задач / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015. – 164 с.



ВИСНОВКИ

З кожним роком усе більше зростає цікавість до дуже несподіваної і «мальовничої» картини явищ нелінійної фізики⁴.

1. *Нелінійні явища* в сучасній науці не виключення, а *закономірність*. Навколишній світ – нелінійний, він описується нелінійними рівняннями. Нелінійна фізика набагато «об’ємніша» за лінійну фізику явищами, оскільки остання являє собою граничний випадок нелінійної фізики.

Нелінійність – заперечення категорії лінійності. Нелінійність відкидає фундаментальний принцип суперпозиції, нічого не пропонуючи замість. У цьому розумінні вона не має конструктивізму.

Сьогодні ми ще дуже мало знаємо про багато дивних явищ нелінійного світу, ще менше вміємо їх використовувати.

2. У класичній науці нелінійність являє собою особливу окрему характеристику об’єктів.

У сучасній науці нелінійність – універсальна фундаментальна і головна властивість світу.

Уявлення про нелінійність світу визрівали поступово.

В *античний* і *середньовічний* періоди елементи нелінійності з’являлися в математиці й були відсутніми в природознавстві.

Протягом *натурфілософського* періоду (XVII–XVIII ст.) натуралісти вперше зіштовхнулися з нелінійністю. Для них це була окрема складність у розв’язанні задач.

У XIX ст. (*класичний* період) були усвідомлені окремі незвичайні властивості нелінійних явищ, були проведені перші спостереження, отримані перші точні розв’язки, розроблені наближені методи аналізу певних нелінійних задач у фізиці.

⁴ Кернер Б. С. Автосолитони / Б. С. Кернер, В. В. Осипов. – М. : Наука, 1991. – С. 9.

У першій половині ХХ ст. (*новий* період) відбувається нагромадження даних про нелінійні явища в різних науках. Розробляються наближені методи їхнього опису. Формується «нелінійна мова».

Нелінійність представляється *окремою характеристикою* об'єктів.

У другій половині ХХ – на початку ХХІ ст. (*сучасний* період) інтенсивно досліджуються нелінійні явища в різних природничих науках, відбуваються революційні зміни в уяві про нелінійність світу. Формується *нелінійне мислення і нелінійний світогляд*. Обґрунтована *нелінійна парадигма*.

Стає зрозумілим, що *нелінійність – універсальна фундаментальна й головна властивість світу*. Нелінійність керує еволюцією світу.

3. Усе різноманіття причин виникнення нелінійності можна спробувати звести до двох випадків. У першому з них нелінійність є «вродженою», тобто є наслідком внутрішніх причин, які відображаються нелійними рівняннями, що описують стан системи.

У другому випадку нелінійність є «привнесеною». Сюди відносяться нерівновагі або відкриті системи, системи зі значним енерговмістом або енерговиділенням, коливання зі значною амплітудою, сильні хвилі й т. п.

4. У радіофізиці найбільший інтерес представляє нелінійність *електродинамічного типу*, пов'язана з поширенням сильних електромагнітних хвиль у середовищах або ж з описом коливальних процесів з великою амплітудою.

5. *Солітон* – фундаментальне поняття в нелінійній фізиці, він відіграє таку ж всеосяжну роль, як осцилятор у лінійній фізиці.

6. Одним з найважливіших досягнень нелінійної фізики є вивчення *можливості виникнення хаосу* в простих нелінійних динамічних системах.

Не менш дивним фактом є *можливість самоорганізації*, виникнення порядку з хаосу.

Хаос і порядок – два граничних стани нелінійної динамічної системи. При зміні її параметрів вони можуть безупинно трансформуються один в одного. *Не буває ні абсолютного хаосу, ні абсолютного порядку*. Усяка реальна система перебуває в деякому проміжному стані. Деградація і самоорганізація – два можливих шляхи еволюції відкритої системи.

7. Низка нелінійних явищ широко використовується на практиці. В радіофізиці й електроніці їх застосовують для генерації й підсилення коливань і хвиль, для оброблення й зберігання інформації, а також при розробці нових каналів телекомунікацій.