

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени В. Н. КАРАЗИНА

Л. Ф. ЧЕРНОГОР

# НЕЛИНЕЙНАЯ РАДИОФИЗИКА

Учебник

3-е изд., доп. и испр.

(перевод с укр.)

Харьков–2016

УДК 530.18+534.1, 550.338

ББК 32.814

Ч-49

**Рецензенты:**

**В. М. Яковенко** – академик НАН Украины (Институт радиофизики и электроники НАН Украины, г. Харьков);

**С. Н. Шульга** – доктор физ.-мат. наук, профессор Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

*Утверждено в печать решением Ученого совета  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 7 от 1.07.2015 г.)*

**Чорногор Л. Ф.**

Ч-49 Нелінійна радіофізика : підручник / Л. Ф. Чорногор. – 3-тє вид., доп. і перероб. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. – 208 с.

ISBN 978-966-285-255-4

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.

**Черногор Л. Ф.**

Ч-49 Нелинейная радиофизика : учебник / Л. Ф. Черногор. – 3-е изд., доп. и испр. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2016. – 208 с.

ISBN 978-966-285-255-4

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, 2016. – 208 p.

ISBN 978-966-285-255-4

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 978-966-285-255-4

© Харьковський національний університет  
імені В. Н. Каразіна, 2016

© Черногор Л. Ф., 2016

© Дончик І. Н., макет обложки, 2016



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	9
<b>РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О НЕЛИНЕЙНЫХ ЯВЛЕНИЯХ. СТРУКТУРА, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСА</b> .....	12
1.1. Основные этапы формирования представлений о нелинейном мире.....	13
1.2. Причины возникновения нелинейных явлений .....	15
1.3. Структура, цели и задачи курса .....	17
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<b>РАЗДЕЛ 2. НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА</b> .....	19
2.1. Качественная картина нелинейных явлений .....	19
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
2.2. Нелинейные уравнения электродинамики.....	21
2.2.1. Точное решение нелинейных уравнений электродинамики .....	21
2.2.2. Нелинейное волновое уравнение .....	24
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задача</i>	
2.3. Методы нелинейной электродинамики.....	25
2.3.1. Метод малых возмущений .....	26
2.3.2. Метод медленно меняющихся амплитуд .....	27
2.3.3. Метод нелинейной квазиоптики .....	29
2.3.4. Уравнения эйконала и переноса.....	30
2.3.5. Метод нелинейной геометрической оптики .....	31
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
2.4. Самовоздействие и взаимодействие плоских электромагнитных волн .....	31
2.4.1. Амплитудное самовоздействие волны .....	31
2.4.2. Фазовое самовоздействие волны.....	36
2.4.3. Амплитудное взаимодействие волн.....	37
2.4.4. Фазовое взаимодействие волн .....	39
2.4.5. Нестационарный процесс самовоздействия волны. Динамика фронта просветления (помутнения) .....	40
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	

2.5. Нелинейные стационарные волны .....	46
2.5.1. Линейные стационарные волны .....	47
2.5.2. Укручение профиля волны.....	48
2.5.3. Влияние диссипации. Уравнение Бюргерса и его точные решения .....	49
2.5.4. Ударная волна.....	50
2.5.5. Краткая история исследования ударных волн. Примеры ударных волн .....	53
2.5.6. Влияние дисперсии. Уравнение Кортевега – де Вриза и его точные решения .....	54
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
2.6. Солитоны .....	60
2.6.1. Свойства классического солитона.....	60
2.6.2. Краткая история исследования солитонов .....	60
2.6.3. Уравнение Бюргерса – Кортевега – де Вриза и его решение ....	61
2.6.4. Диссипативный солитон.....	62
2.6.5. Электрические домены (солитоны Ганна) .....	64
2.6.6. Нелинейная уединенная волна в радиоэлектронных приборах.....	67
2.6.7. Нелинейная уединенная волна в плазме.....	69
2.6.8. Уравнение синус-Гордона. Солитон и антисолитон .....	70
2.6.9. Нелинейное уравнение Шредингера. Солитон огибающей .....	72
2.6.10. Многомерный солитон .....	75
2.6.11. Примеры солитонов .....	75
2.6.12. Возможные применения солитонов .....	77
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
2.7. Самовоздействие пучков электромагнитных волн .....	81
2.7.1. Оценка величины эффекта .....	81
2.7.2. Критическая интенсивность пучка.....	82
2.7.3. Эффект самоканалирования.....	83
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
2.8. Когерентное взаимодействие волн. Неустойчивости .....	85
2.8.1. Двухволновое взаимодействие .....	85
2.8.2. Учет затухания при двухволновом взаимодействии.....	88
2.8.3. Трехволновое взаимодействие (несамосогласованная постановка задачи).....	89
2.8.4. Учет затухания при трехволновом взаимодействии .....	91
2.8.5. Трехволновое взаимодействие (самосогласованная постановка задачи).....	92
2.8.6. Взрывная неустойчивость .....	93
2.9. Основные результаты .....	99
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	

<b>РАЗДЕЛ 3. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ</b> .....	101
3.1. Краткая историческая справка .....	101
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
3.2. Механизмы нелинейных явлений .....	103
3.2.1. Тепловой механизм .....	103
3.2.2. Стрикционный механизм .....	104
3.2.3. Керровский механизм .....	105
3.2.4. Механизм нелинейности Поппельса .....	106
3.2.5. Атомный механизм .....	107
3.2.6. Релятивистский механизм .....	107
3.2.7. Вакуумный механизм .....	107
3.2.8. Сравнение механизмов .....	108
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
3.3. Генерация второй гармоники .....	110
3.3.1. Исходные уравнения .....	110
3.3.2. Амплитуда второй гармоники .....	111
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
3.4. Использование нелинейных явлений .....	113
3.4.1. Генерация оптических гармоник .....	113
3.4.2. Параметрические генераторы света .....	114
3.4.3. Нелинейная спектроскопия .....	115
3.4.4. Адаптивная оптика .....	115
3.4.5. Лазерный управляемый термоядерный синтез .....	117
3.4.6. Другие применения нелинейных явлений .....	117
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
3.5. Основные результаты .....	118
<b>РАЗДЕЛ 4. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПЛАЗМЕННОЙ РАДИОФИЗИКЕ</b> .....	119
4.1. Общие сведения о плазме .....	119
4.1.1. Методы теоретического описания плазмы .....	120
4.1.2. Основные параметры плазмы .....	120
4.1.3. Плазменная частота .....	122
4.1.4. Диэлектрическая проницаемость холодной изотропной плазмы .....	123
4.1.5. Показатели преломления и поглощения волн .....	125
4.1.6. Влияние внешнего магнитного поля .....	126
4.1.7. Двойное лучепреломление .....	128
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
4.2. Механизмы нелинейных явлений в плазме .....	129
4.2.1. Тепловой (нагревный) механизм .....	129
4.2.2. Стрикционный механизм .....	131
4.2.3. Ионизационный механизм .....	132
4.2.4. Релятивистский механизм .....	132
4.2.5. Сравнение механизмов .....	133

<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
4.3. Уравнения баланса энергии и концентрации частиц .....	135
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
4.4. Возмущение концентрации электронов .....	136
4.4.1. Прилипание и рекомбинация электронов.....	136
4.4.2. Ионизация газа электрическим полем .....	136
4.4.3. Нарушение гидростатического равновесия.....	137
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
4.5. Самовоздействие электромагнитных волн в плазме.....	139
4.5.1. Тепловое самовоздействие волн .....	139
4.5.2. Стрикционное самовоздействие волн .....	142
4.5.3. Самовоздействие ионизирующих волн.....	142
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
4.6. Другие нелинейные эффекты .....	146
4.6.1. Самофокусировочная неустойчивость.....	146
4.6.2. Резонансная неустойчивость.....	147
4.6.3. Параметрическая неустойчивость .....	147
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
4.7. Особенности нелинейных явлений в полупроводниках.....	148
4.7.1. Основные нелинейные явления .....	149
4.7.2. Использование нелинейных явлений.....	149
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
4.8. Основные результаты .....	150
<b>РАЗДЕЛ 5. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ</b>	
<b>РАДИОФИЗИКЕ</b> .....	151
5.1. Краткие сведения об околоземном космосе .....	151
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.2. Результаты экспериментов .....	153
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.3. Механизмы нелинейных явлений .....	157
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.4. Кросс-модуляция радиоволн .....	158
5.4.1. Расчет величины возмущений .....	158
5.4.2. Расчет величины кросс-модуляции .....	159
5.4.3. Анализ величины кросс-модуляции.....	160
<i>Задачи</i>	
5.5. Самомодуляция радиоволн .....	162
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
5.6. Неустойчивости в ионосфере .....	163
5.6.1. Самофокусировочная неустойчивость.....	163
5.6.2. Резонансная неустойчивость.....	164
5.6.3. Распадные неустойчивости .....	164

<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.7. Искусственные ионосферные неоднородности. Ракурсное рассеяние радиоволн .....	165
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
5.8. Искусственное плазменное зеркало в атмосфере .....	167
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
5.9. Эффект Г. Г. Гетманцева .....	169
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.10. Солнечные энергетические станции .....	170
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
5.11. Крупномасштабные и глобальные возмущения в ионосфере. Воздействие на магнитосферу .....	171
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.12. Солитоны в околоземном пространстве .....	174
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
5.13. Основные результаты.....	175
<b>РАЗДЕЛ 6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СТАТИСТИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКЕ</b> .....	176
6.1. Постановка задачи.....	176
6.2. Методы решения нелинейных стохастических задач .....	177
6.2.1. Усреднение точного решения.....	177
6.2.2. Методы линеаризации.....	178
6.2.3. Метод статистической линеаризации.....	179
6.2.4. Уравнение Дайсона для средних.....	180
6.2.5. Понятие об уравнении Фокера – Планка .....	181
6.3. Основные результаты.....	182
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
<b>РАЗДЕЛ 7. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОФИЗИКИ</b> .....	184
7.1. Детерминированный хаос в радиофизике .....	184
7.1.1. Понятие хаоса. Математический аппарат хаоса.....	184
7.1.2. Понятие о геометрии фракталов. Фракталы в математике и природе .....	185
7.1.3. Формирование идеи динамического хаоса .....	190
7.1.4. Причины возникновения хаоса .....	191
7.1.5. Условия и сценарии возникновения хаоса.....	192
7.1.6. Примеры хаотических радиофизических систем.....	193
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
7.2. Явление самоорганизации в радиофизике .....	195
7.2.1. Понятие самоорганизации. Синергетика .....	196
7.2.2. Формирование синергетической идеи.....	197

7.2.3. Свойства автоволн.....	198
7.2.4. Применение автоволн в радиоэлектронике.....	199
7.2.5. Другие примеры самоорганизации.....	199
7.3. Основные результаты .....	200
<i>Вопросы для самоконтроля</i>	
<i>Задачи</i>	
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	203
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	205





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*С каждым годом все более возрастает интерес к весьма неожиданной и «красочной» картине явлений нелинейной физики<sup>4</sup>.*

### Основные итоги курса сводятся к следующему

1. *Нелинейные явления* в современной науке не исключение, а *закономерность*. Окружающий нас мир нелинеен, он описывается нелинейными уравнениями. Нелинейная физика гораздо богаче линейной физики явлениями, так как последняя представляет собой предел нелинейной физики.

Нелинейность – отрицание категории линейности. Нелинейность отвергает фундаментальный принцип суперпозиции, ничего не предлагая взамен. В этом смысле она не обладает конструктивизмом.

Сегодня мы еще очень мало знаем о многих удивительных явлениях нелинейного мира, еще меньше умеем их использовать.

2. В классической науке нелинейность представляла собой особую частную характеристику объектов.

В современной науке нелинейность – универсальное фундаментальное и главное свойство мира.

Представления о нелинейности мира созревали постепенно.

В *античный* и *средневековый* периоды элементы нелинейности появились в математике и отсутствовали в естествознании.

В течение *натурфилософского* периода (XVII–XVIII вв.) естествоиспытатели впервые столкнулись с нелинейностью. Для них это была частная сложность в решении задач.

В XIX в. (*классический* период) были осознаны отдельные необычные свойства нелинейных явлений, были проведены первые наблюдения, получены первые точные решения, разработаны приближенные методы анализа некоторых нелинейных задач в физике.

---

<sup>4</sup> Б. С. Кернер Автосолитоны. / Б. С. Кернер, В. В. Осипов. – М. : Наука. 1991, С. 9.

В первой половине XX в. (*новый период*) происходит накопление данных о нелинейных явлениях в различных науках. Разрабатываются приближенные методы их описания. Формируется нелинейный язык.

Нелинейность представляется *частной характеристикой* объектов.

Во второй половине XX – начале XXI вв. (*современный период*) интенсивно исследуются нелинейные явления в различных естественных науках, происходят революционные изменения в представлениях о нелинейности мира. Формируется *нелинейное мышление* и *нелинейное мировоззрение*. Обоснована *нелинейная парадигма*.

Становится понятным, что *нелинейность* – *универсальное фундаментальное* и *главное свойство мира*. Нелинейность управляет эволюцией мира.

3. Все многообразие причин возникновения нелинейности можно попытаться свести к двум случаям. В первом из них нелинейность является «врожденной», т. е. является следствием внутренних причин, которые отображаются нелинейными уравнениями, описывающими состояния системы.

Во втором случае нелинейность является «привнесенной». Сюда относятся неравновесные или открытые системы, системы со значительным энергосодержанием или энерговыделением, колебания со значительной амплитудой, сильные волны и т. п.

4. В радиофизике наибольший интерес представляет нелинейность *электродинамического типа*, связанная с распространением сильных электромагнитных волн в средах или же с описанием колебательных процессов с большой амплитудой.

5. *Солитон* – фундаментальное понятие в нелинейной физике, он играет такую же всеобъемлющую роль, как осциллятор в линейной физике.

6. Одним из важнейших достижений нелинейной физики является изучение *возможности возникновения хаоса* в простых нелинейных динамических системах.

Не менее удивительным фактом является *возможность самоорганизации*, возникновения порядка из хаоса.

Хаос и порядок – два предельных состояния нелинейной динамической системы. При изменении ее параметров они могут непрерывно трансформироваться друг в друга. *Не бывает ни абсолютного хаоса, ни абсолютного порядка*. Всякая реальная система пребывает в некотором промежуточном состоянии.

Деградация и самоорганизация – два возможных пути эволюции открытой системы.

7. Ряд нелинейных явлений широко используется на практике. В радиофизике и электронике их применяют для генерации и усиления колебаний и волн, для обработки и хранения информации, а также при разработке новых каналов связи.