

Федеральное агентство по образованию  
САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

Кафедра радиофизики и  
нелинейной динамики

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

по дисциплине **СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАДИОФИЗИКА**

для магистров, обучающихся по программе **510419 – «Радиофизика»**

направления **510400 – «Физика»**,

реализуемой на **физическом факультете**

Саратов, 2007 год

Рабочая программа составлена в соответствии с Государственным стандартом высшего профессионального образования по направлению 510400 – «ФИЗИКА» (номер государственной регистрации 177 ен/маг от 17.03.2000 г.)

ОДОБРЕНО:

Председатель учебно-методической комиссии физического факультета, профессор

\_\_\_\_\_ В.Л.Дербов

\_\_\_\_\_ 2007 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебно-методической работе, профессор

\_\_\_\_\_ Е.Г. Елина

\_\_\_\_\_ 2007 г.

СОГЛАСОВАНО:

Декан физического факультета, профессор \_\_\_\_\_

Д.А. Зимняков

Заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики физического факультета, профессор \_\_\_\_\_

В.С. Анищенко

Вил учебной	Бюджет времени по формам обучения, час				
	очная		очно-заочная	заочная	
	полная программа	ускоренные сроки		полная программа	ускоренные сроки
Аудиторные занятия,	54	--	--	--	--
в том числе: - лекции - лабораторные (практические) – семинарские	54	--	--	--	--
Самостоятельная работа студентов	26	--	--	--	--
Зачеты, +/-	--	--	--	--	--
Экзамены, +/-	+	--	--	--	--
Контрольные работы,	--	--	--	--	--
Курсовая работа, + /-	--	--	--	--	-

Авторы:

заведующий кафедры радиофизики и нелинейной динамики, профессор профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики

В.С. Анищенко

Т.Е. Вадивасова

**Раздел**

**І.Организационно – методическое содержание**

Курс «Статистическая радиопизика» читается студентам кафедры радиопизики и нелинейной динамики, обучающимся по магистерской программе 510419 – «Радиопизика» направления 510400 – «Физика» в 9-ом учебном семестре.

Он включает 54 часа лекционных и 26 часов самостоятельной работы.

Цель курса состоит в ознакомлении со стохастическими задачами и методами описания стохастических процессов в естественных науках вообще, и применительно к задачам радиопизики, в частности.

В процессе самостоятельной работы студенты приобретают практические навыки решения задач по различным разделам курса и более детально знакомятся с некоторыми теоретическими вопросами. В результате изучения данного курса студенты должны иметь представление о природе случайных явлений в радиопизических системах, знать методы математического описания случайных процессов и полей и уметь определить их основные статистические характеристики случайного при решении конкретной задачи.

## Раздел 2. Тематический план учебной дисциплины

1	2	Бюджет учебного времени					8
		3	в том числе			7	
			4	лабора- торные и прак- тические	Семи- нарские занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Очная полная программа</b>							
	Введение	1	1				
1.	Основы теории случайных процессов	21	15			6	
2.	Преобразование случайных процессов детерминированными системами	10	6			4	

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

3.	Марковские процессы и стохастические дифференциальные уравнения	14	10			4	
4.	Флуктуации в автогенераторе	12	8			4	
5.	Источники шума в радиоустройствах	10	6			4	
6.	Случайные поля и случайные волны	12	8			4	
Итого		80	54			26	ЭКЗАМЕН

### Раздел 3. Содержание учебной дисциплины

**Введение.** Динамические и статистические закономерности. Причины случайного характера процессов в природе и технике. Источники шума в радиоустройствах и его роль.

#### **Тема 1. Основы теории случайных процессов**

**1.1.** Основные понятия теории случайных процессов.

**1.2.** Статистические характеристики случайного процесса.

Многомерная плотность вероятности, функция распределения, характеристическая функция случайного процесса. Моментные функции случайных процессов.

Пример на определение основных статистических характеристик заданного случайного процесса.

**1.3.** Стационарные случайные процессы.

**1.4.** Характеристики совокупности случайных процессов.

**1.5.** Нормальные случайные процессы. Свойства нормальных случайных процессов.

**1.6.** Вероятностная сходимости случайной последовательности.

Непрерывность, дифференцируемость, интеграл для случайного процесса.

**1.7.** Усреднение по времени. Эргодические случайные процессы.

Примеры на анализ эргодичности относительно отдельных моментных функций.

**1.8.** Спектральное представление случайных процессов. Спектральная плотность мощности стационарного случайного процесса. Теорема Винера -- Хинчина. Ширина энергетического спектра. Белый шум. Спектральное представление нестационарных случайных процессов.

Пример: спектральная плотность мощности стационарного случайного процесса с экспоненциально спадающей корреляционной функцией.

**1.9.** Узкополосный случайный процесс. Огибающая и фаза стационарного случайного процесса, квадратурные составляющие.  
*Примечание:* Разделы данной темы сопровождается самостоятельным решением задач.

## **Тема 2. Преобразование случайных процессов детерминированными системами**

**2.1.** Функциональное преобразование случайных процессов. Преобразование закона распределения случайного процесса. Функциональное преобразование совокупности случайных процессов.  
Пример: амплитудное детектирование шума.

**2.2.** Преобразование случайных процессов линейными инерционными системами. Преобразование основных моментных функций и спектральной плотности мощности. Преобразование закона распределения. Эффект нормализации процесса на выходе фильтра.  
Пример: преобразование случайного процесса дифференцирующей цепочкой.

**2.3.** Линейная фильтрация шума. Обнаружение регулярного сигнала на фоне шума. Оптимизация фильтра по критерию максимума пикового отношения «сигнал/шум». выделение случайного сигнала из шума. Оптимизация фильтра по критерию минимума искажений. Уравнение Винера -- Хопфа.  
Пример: идеальный винеровский фильтр в случае суммы статистически независимых сигнала и шума.

*Примечание:* Разделы данной темы сопровождаются самостоятельным решением задач.

## **Тема 3. Марковские процессы и стохастические дифференциальные уравнения**

**3.1.** Основные понятия теории марковских процессов. Уравнение Чепмена - Колмогорова.

**3.2.** Марковские цепи и их свойства.

**3.3.** Дискретные марковские процессы и их свойства. Управляющее уравнение. Одношаговые процессы. Случайные блуждания с непрерывным временем.

Примеры: пуассоновский процесс, случайный телеграфный сигнал.

**3.4.** Диффузионные процессы, уравнение Фоккера – Планка -- Колмогорова. Стационарное решение уравнения Фоккера – Планка-- Колмогорова.

**3.5.** Винеровский процесс.

**3.6.** Стохастические дифференциальные уравнения (СДУ). Стохастические интегралы Ито и Стратоновича. Связь коэффициентов сноса и диффузии с правыми частями СДУ.

Пример: процесс Орнштейна -- Уленбека.

*Примечание:* Большинство разделов данной темы курса сопровождается самостоятельным решением задач.

## **Тема 4. Флуктуации в автогенераторе**

4.1. Роль флуктуаций в автоколебательных системах. СДУ простейшего автогенератора.

4.2. Распределение амплитуды и фазы колебаний.

4.3. Корреляционная функция и спектр автоколебаний в присутствии шума. Естественная ширина спектральной линии.

4.4. Синхронизация колебаний в автогенераторе с шумом.

### **Тема 5. Источники шума в радиоустройствах**

5.1. Естественные и технические источники шума в радиоустройствах, их природа и статистические характеристики. Тепловой шум активного сопротивления. Теорема Найквиста.

Пример: влияние торцевой паразитной ёмкости сопротивления на характеристики теплового шума.

5.2. Дробовой шум. Формула Шоттки. Влияние пространственного заряда на характеристики дробового шума.

5.3. Другие источники шума: наведённый шум, шум токоперехвата, шум генерации – рекомбинации, фликкер-шум.

5.4. Эквивалентные шумовые схемы двухполюсников и четырёхполюсников. Коэффициент шума линейного четырёхполюсника и связанные с ним характеристики. Методы измерения коэффициента шума.

Пример: коэффициент шума супергетеродинного СВЧ приёмника.

Примечание: Некоторые разделы данной темы сопровождаются самостоятельным решением задач

### **Тема 6. Случайные поля и случайные волны**

6.1. Понятие случайного поля. Характеристики случайных полей. Однородные и изотропные случайные поля. Пространственная корреляция и пространственный спектр. Случайные волны в неограниченной однородной среде. Стохастические волновые уравнения.

6.2. Дифракция случайных волн. Дифракционное изменение радиуса корреляции. Теорема Ван Циттерта-Цернике. Дифракция на отверстиях.

6.3. Дифракция регулярной волны на случайном экране. Фазовый экран. Решение общей задачи по методу Релея.

6.4. Рассеяние электромагнитных волн в статистически неоднородных средах. Релеевское рассеяние, интенсивность и корреляционная функция рассеянной волны. Коэффициент рассеяния.

Пример: Неоднородность с изотропной гауссовой корреляционной функцией.

6.5. Случайные волны в нелинейных средах. Самофокусировка и самомодуляция волн в среде с кубической нелинейностью.

**Виды самостоятельной работы:** проработка лекционного курса, чтение дополнительной литературы, самостоятельное решение задач и выполнение практических работ по курсу.

## **Раздел 4. Перечень основной и дополнительной литературы**

## **I. Литература по статистической радиофизике**

### **Основная литература**

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть I Случайные процессы. -- М.: Наука, 1976.
2. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II Случайные поля. -- М.: Наука, 1978.
3. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. -- М.: Наука, 1981.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. -- М.: Радио и связь, 1989.
5. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. --М.: Радио и связь, 2004.
6. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. В 4х томах. Т.1. Случайные величины и процессы. М.: Радио и связь, 2003; Т.2. Линейные и нелинейные преобразования. М.: Радио и связь, 2004; Т.3. Оптимальная фильтрация, экстраполяция и моделирование. М.: Радио и связь, 2004;
7. Жалуд В., Кулешов В. Шумы в полупроводниковых устройствах. -- М.: Сов. радио, 1977.
8. Анищенко В.С. Введение в статистическую радиофизику. -- Саратов: Изд-во Сарат. ун-та. Часть 1, 1979. Часть 2, 1983.
9. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е. Лекции по статистической радиофизике. -- Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1992. Часть 1.
10. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Нейман А.Б., Стрелкова Г.И., Шиманский- Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах -- Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

### **Дополнительная литература**

11. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. -- М.: Сов. радио, 1961.
12. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. -- М.: Наука, 1968.
13. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. -- М.: Сов. радио, 1977.
14. Ван дер Зил А. Шум: Источники, описание, измерение. -- М.: Сов. радио, 1973.
15. Букенгем М. Шумы в электронных приборах и системах. -- М.: Мир, 1986.
16. Гардинер К.В. Стохастические модели в естественных науках. -- М.: Мир, 1986.
17. Хорстхемке В, Лефевр Р. Индуцированные шумом переходы. -- М.: Мир, 1987.
18. Ван Кампен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии. -- М.: Высшая школа, 1990.

19. Хованова Н.А., Хованов И.А. Методы анализа временных рядов. -- Саратов: Изд-во Гос УНЦ ``Колледж'', 2001.

## Раздел 5. Перечень средств обучения

Оптический проектор

Электронный проектор

Компьютеры

Имеется презентация часто материала курса на электронных носителях.

## Раздел 6. Вопросы к курсу

1. Охарактеризовать роль случайных факторов в радиоустройствах. Дать определение случайного процесса. Какие виды случайных процессов можно выделить?
2. Дать определение многомерной плотности вероятности случайного процесса и перечислить ее основные свойства. Дать определение функции распределения и характеристической функции. Когда случайный процесс считается полностью заданным?
3. Что называется моментными функциями случайного процесса? Рассмотреть основные начальные и центральные моментные функции.
4. Перечислить основные свойства корреляционной функции случайного процесса. Какие случайные процессы называются процессами с перемешиванием? Дать определение времени корреляции.
5. Дать определение стационарности случайного процесса в узком (строгом) и широком смысле.
6. Рассмотреть основные статистические характеристики совокупности случайных процессов
7. Что такое нормальный случайный процесс и каковы его свойства?
8. Рассмотреть основные типы вероятностной сходимости случайной последовательности. Дать определения непрерывности, дифференцируемости и интегрируемости случайного процесса в каком-либо вероятностном смысле. Сформулировать необходимые и достаточные условия непрерывности, дифференцируемости и интегрируемости в среднеквадратическом смысле для случайного процесса с ограниченным средним квадратом.
9. Что означает усреднение по времени? Дать определение эргодичности случайного процесса относительно отдельных моментных функций, эргодичности первого, второго, и т.д. порядков. Каков смысл строгой эргодичности случайного процесса?
10. Что понимается под спектральным представлением случайного процесса в общем случае? Дать определение спектральной плотности энергии для случайного процесса с конечной энергией и спектральной плотности мощности для стационарного случайного процесса. Сформулировать теорему Винера – Хинчина. Перечислить основные свойства спектральной плотности мощности вещественного стационарного случайного процесса.

11. Дать определение эффективной ширины спектра стационарного случайного процесса и ширины спектра на уровне половинной мощности. Как связаны ширина спектра и время корреляции стационарного случайного процесса?
12. Что называется белым шумом? Какие случайные процессы называются узкополосными? Дать определение огибающей и фазы и квадратурных составляющих стационарного случайного процесса. В чем состоит удобство применения этих характеристик в случае узкополосного процесса?
13. Найти моментные функции и плотность вероятности случайного процесса на выходе безынерционного (функционального) преобразователя с заданными параметрами, если известна плотность вероятности входного случайного процесса и характеристика преобразователя.
15. Найти совместную плотность вероятности совокупности  $N$  случайных процессов на выходе функционального преобразователя, на вход которого поступают  $N$  случайных процессов, совместная плотность вероятности которых известна.
16. Найти плотность вероятности случайного процесса на выходе функционального преобразователя, преобразующего  $N$  входных случайных процессов, совместная плотность вероятности которых известна, в один выходной процесс.
17. Рассмотреть преобразование основных моментных функций и спектральной плотности мощности случайного процесса линейной инерционной системой с заданными параметрами.
18. Рассмотреть преобразование основных моментных функций и спектральной плотности мощности при дифференцировании случайного процесса.
19. Охарактеризовать задачу отыскания плотности вероятности случайного процесса на выходе линейной инерционной системы. Рассмотреть эффект нормализации процесса на выходе фильтра.
20. Охарактеризовать задачи линейной фильтрации шума. Рассмотреть задачу обнаружения регулярного сигнала на фоне шума. Найти коэффициент передачи фильтра, оптимального по критерию максимума пикового отношения «сигнал/шум» на выходе. Какой фильтр называется согласованным? Что собой представляет импульсная характеристика согласованного фильтра?
21. Рассмотреть задачу выделения случайного сигнала из шума. Что представляет собой оптимизация фильтра по критерию минимума искажений? Вывести уравнение Винера -- Хопфа. Что такое идеальный винеровский фильтр и каковы его свойства?
22. Дать определение  $k$ -связанного и односвязанного (простейшего) марковского процесса. Рассмотреть односвязанный марковский процесс, плотность вероятности перехода, основные свойства марковского процесса. Вывести уравнение Чепмена - Колмогорова.

23. Дать определение марковской цепи, записать уравнение Маркова. Что представляет собой стохастическая матрица простой конечной однородной марковской цепи?

Рассмотреть задачу отыскания стационарных (финитных) вероятностей состояний простой конечной однородной марковской цепи.

24. Рассмотреть дискретные марковские процессы и их свойства. Вывести управляющее уравнение дискретного марковского процесса. Дать определение одношагового процесса и записать для него управляющее уравнение. Рассмотреть частный случай одношагового процесса - случайные блуждания с непрерывным временем. Рассмотреть примеры случайных блужданий: пуассоновский процесс, случайный телеграфный сигнал.

25. Дать определение диффузионного процесса. Пояснить смысл коэффициентов сноса и диффузии и охарактеризовать основные свойства диффузионных процессов. Вывести уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова для плотности вероятности перехода и для безусловной (одномерной) плотности вероятности диффузионного процесса. Ввести понятие потока вероятности и записать уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова в виде уравнения непрерывности. Пояснить его смысл.

26. Получить стационарное решение уравнения Фоккера – Планка-- Колмогорова.

27. Обобщить определение диффузионного процесса на случай векторного случайного процесса. Записать уравнение Фоккера – Планка - Колмогорова для векторного процесса.

28. Дать определение винеровского процесса и получить его основные характеристики. Что представляет собой метод Ланжевена? Дать определение стохастического дифференциального уравнения (СДУ). Рассмотреть СДУ первого порядка с белым гауссовским источником шума. Что такое стохастический интеграл и каковы его особенности? Дать определение стохастических интегралов Ито, Стратоновича и обобщенного стохастического интеграла. Охарактеризовать свойства интегралов Ито и Стратоновича. Дать определение СДУ Ито, Стратоновича и обобщенного СДУ. Сформулировать теорему о марковском характере решения обобщенного СДУ.

30. Показать диффузионный характер решения обобщенного СДУ. Найти, как связаны коэффициенты сноса и диффузии с видом СДУ. Что такое «ложный снос»?

31. Что представляет собой процесс Орнштейна – Уленбека и каковы его основные характеристики?

32. Записать выражения для компонент вектора сноса и элементов матрицы диффузии векторного случайного процесса, задаваемого системой СДУ первого порядка.

33. Охарактеризовать роль флуктуаций в автоколебательных системах. Получить СДУ простейшего автогенератора. Записать стохастические дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы автогенератора и пояснить основные этапы их получения.

34. Получить стационарную плотность вероятности амплитуды колебаний в

- автогенераторе с шумом. Рассмотреть распределение флуктуаций амплитуды для случая слабого шума и развитой генерации.
35. Определить статистические характеристики фазы колебаний в автогенераторе с шумом для случая слабого шума и развитой генерации. Получить стационарное распределение фазы, приведенной к интервалу  $[-\pi; \pi]$ .
36. Получить выражения для корреляционной функции и спектральной плотности мощности колебаний в автогенераторе при условии слабого шумового воздействия и развитой генерации. Дать определение естественной ширины спектральной линии автогенератора.
37. Рассмотреть, как влияет шум в автогенераторе на эффект синхронизации автоколебаний.
38. Охарактеризовать естественные и технические источники шума радиоустройств, их природу и свойства.
39. Объяснить природу теплового шума активного сопротивления. Получить выражения для спектральной плотности мощности э.д.с. теплового шума, дисперсии э.д.с. теплового шума, дисперсии шумового тока и средней шумовой мощности, выделяемой на согласованной нагрузке в ограниченной полосе частот. Сформулировать теорему Найквиста.
40. Обобщить выражения для спектральной плотности мощности э.д.с. теплового шума, дисперсии э.д.с. теплового шума и дисперсии шумового тока в ограниченной полосе частот на случай двухполюсника с комплексным импедансом.
41. Объяснить природу дробового шума на классическом примере плоского вакуумного диода с термокатодом. Вывести формулу Шоттки для простого дробового тока. Как влияет пространственный заряд на характеристики дробового шума?
42. Охарактеризовать наиболее распространенные источники шума в радиоустройствах (помимо теплового и дробового шума).
43. Дать определение основных шумовых характеристик двухполюсников и четырёхполюсников.
44. Дать определение случайного поля. Перечислить основные статистические характеристики случайных полей. Дать определение однородного и изотропного случайного поля. Рассмотреть спектральное представление случайного поля.
45. Задать характеристики случайных волн в неограниченной однородной среде. Записать стохастические волновые уравнения.
46. Каковы особенности дифракции случайных волн на детерминированных объектах? Сформулировать теорему Ван Циттерта-Цернике. Записать выражение для коэффициента корреляции при дифракции на малом отверстии.
47. Рассмотреть дифракцию регулярной волны на случайном фазовом экране. Объяснить эффект появления максимумов флуктуаций интенсивности поля за экраном.
48. Записать уравнение распространения волны в случайно-неоднородной среде. Получить выражение для корреляционной функции рассеянной

плоской волны (в борновском приближении). Рассмотреть пространственное распределение средней интенсивности поля волны.

49. Объяснить эффекты самофокусировки и самомодуляции случайной волн в нелинейной среде.