

Флуктуации в физических системах. (доцент А.В.Степанов, 5 курс, 10 семестр)

1. Целью спецкурса является изучение основных методов измерения характеристик случайных процессов, выделения сигнала на фоне шума и анализа шумов измерительных систем, а также изучение основных физических моделей шумовых процессов в электрических системах.

2. Содержание спецкурса (лекции, 32 часа)

Введение. Причины случайного поведения физических систем. Основные понятия теории вероятности и случайных процессов. Статистический ансамбль, распределения вероятности. Стационарность случайных процессов. Основные характеристики шума. Гауссовские процессы, центральная предельная теорема, нормализации случайных процессов. Анализ флуктуаций методом Ланжевена.

Измерение характеристик шума. Усреднение по статистическому ансамблю и усреднение по времени. Э르고дическая гипотеза, статистические степени свободы. Оценки характеристик случайных процессов, смещение и состоятельность оценок. Свойства оценок среднего, дисперсии, корреляционной функции и спектральной плотности. Спектральные и временные окна измерительных процедур. Компромисс между спектральным разрешением и статистической точностью. Вейвлет анализ. Интерпретация оценок для шумов с низкочастотной расходимостью спектра, структурная функция, дисперсия Аллана. Анализ стационарности шума.

Измерение сигнала на фоне шума. Отношение сигнал/шум. Критерии обнаружения сигнала и выделения сигнала на фоне шума. Линейная фильтрация сигналов, медианные фильтры. Модуляционные измерения, синхронное детектирование. Корреляционные измерения и их точность, схема совпадений. Компенсация помехи, преимущества этого метода. Адаптивная компенсация и фильтрация. Стохастический резонанс, увеличение разрешающей способности измерений с помощью шума.

Шумы измерительных приборов. Основные виды электрических шумов. Эквивалентные шумовые схемы, формальные и реальные шумовые параметры. Оптимизация шумовых характеристик системы датчик – усилитель, динамический диапазон. Методы согласование датчика и усилителя, параллельное включение усилителей. Шум многокаскадных усилителей. Шумы биполярных и полевых усилителей. Коэффициенты передачи сигнала и шума. Минимальный шум усилителей. Шум в системах с обратной связью. Шумы при квантовании сигнала.

Равновесные флуктуации. Равновесное состояние системы, полное и частичное равновесие. Равновесный шум в электрических системах, некоррелированность шумовых токов и напряжений, формула Найквиста. Шумовая термометрия, «шумовое» охлаждение. Тепловой шум в устройствах с переключаемыми конденсаторами. Флуктуации температуры.

Импульсные шумы. Дробовые шумы вакуумных и полупроводниковых приборов, формулы Кэмпбелла. Шумы токораспределения и вторичной эмиссии. Шум электронных умножителей. Регистрация фототока, счет фотонов. Выбросы случайных процессов. Взрывной шум.

Избыточные шумы. Флуктуации параметров системы, флуктуации сопротивления в электрических системах. Токовая зависимость избыточного шума, модуляционный эффект. Равновесные флуктуации сопротивления, эксперименты Восса и Кларка. Равновесие в системах с флуктуирующими параметрами. Физические механизмы флуктуаций параметров. Флуктуаторы. Пространственное распределение флуктуаторов, зависимость шума от геометрии системы. Неравновесный избыточный шум.

Шум генерации-рекомбинации. Марковские уравнения для флуктуаций числа частиц в процессах рождения и уничтожения. Система в термостате, двухуровневая замкнутая система.

Системы с ограниченным и неограниченным числом частиц. Связь флуктуаций и среднего числа частиц. Термически активируемые процессы, температурная зависимость шума.

Шум 1/f. Универсальный характер шума. Формула Хоухе для фликкерных флуктуаций сопротивления. Низкочастотная граница спектра. Исследования равновесности, стационарности и линейности флуктуаций. Математические и физические модели шума 1/f. Флуктуации дефектов твердого тела, захват носителей ловушками. Модель с широким распределением времен релаксации для термически активируемых процессов. Измерение распределения энергий активации по температурной зависимости шума.

3. Литература

Основная

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука, 1981
2. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986
3. А. Ван дер Зил. Шумы при измерениях. – М.: Мир, 1979
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989

Дополнительная

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1966
6. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. – М.: Сов. радио, 1980
7. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. – М.: Атомиздат, 1980
8. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. – М.: Мир, 1982
9. Карлин С. Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971