

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Физический факультет  
Кафедра радиофизики

Козырев Е.В., Тенекеджи О.А.

Учебно-методический комплекс для подготовки бакалавров и  
магистров по направлению подготовки 011200 Физика  
(квалификация (степень) «бакалавр», «магистр»,  
профиль 3 «Радиофизика»)

Методические материалы (учебно-методический комплекс)

Новосибирск  
2012

Учебно-методический комплекс (УМК) содержит программы специальных дисциплин, изучаемых на третьем, четвертом курсах и в магистратуре; рекомендации по организации самостоятельной работы студентов, контролируемые и обучающие материалы. Данный УМК принят к обучению на выпускающей кафедре радиофизики ФФ НГУ и предназначен для студентов и преподавателей.

Информацию о программах обучения, аннотации, программы и задания всех дисциплин можно найти также на сервере кафедры: <http://www.inp.nsk.su/students/radio/courses.shtml>.

Составители:  
Козырев Е.В., Тенекеджи О.А.

Учебно-методический комплекс подготовлен в рамках реализации  
Программы развития НИУ - НГУ на 2009–2018 г.г.

© Новосибирский государственный  
университет, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Электродинамика сверхвысоких частот .....</b>	<b>5</b>
Программа курса лекций (3 курс, 5 сем, 36 ч, дифзачет).....	5
<b>Теория автоматического регулирования .....</b>	<b>9</b>
Программа курса лекций (3 курс, 5 сем, 36 ч, дифзачет).....	9
<b>Теория линейных электронных схем .....</b>	<b>14</b>
Программа курса лекций (3 курс, 6 сем, 48 ч, экзамен).....	14
<b>Излучение и распространение радиоволн .....</b>	<b>20</b>
Программа курса лекций (3 курс, 6 сем, 16 ч, экзамен).....	20
<b>ЭВМ .....</b>	<b>25</b>
Программа курса лекций (4 курс, 7 сем, 36 ч, экзамен).....	25
<b>Циклические ускорители .....</b>	<b>33</b>
Программа курса лекций (4 курс, 7 сем, 36 ч, экзамен).....	33
<b>Импульсная техника .....</b>	<b>37</b>
Программа курса лекций (4 курс, 7 сем, 36 ч, экзамен).....	37
<b>Практикум по электродинамике СВЧ .....</b>	<b>41</b>
Программа практикума (4 курс, 7 сем, 72 ч, дифзачет) .....	41
<b>Теория сигналов.....</b>	<b>50</b>
Программа курса лекций (4 курс, 8 сем, 32 ч, экзамен).....	50
<b>Статистическая радиофизика .....</b>	<b>54</b>
Программа курса лекций (4 курс, 8 сем, 32 ч, дифзачет).....	54
<b>Вычислительные методы в электродинамике .....</b>	<b>62</b>
Программа курса лекций	
(1 курс магистратуры, 1 сем, 36 ч, экзамен).....	62
<b>Программируемые логические устройства .....</b>	<b>69</b>
Программа курса лекций	
(1 курс магистратуры, 1 сем, 36 ч, дифзачет) .....	69
<b>Электронные приборы СВЧ .....</b>	<b>72</b>
Программа курса лекций	
(1 курс магистратуры, 1 сем, 36 ч, экзамен).....	72

<b>Квантовые приборы СВЧ.....</b>	<b>77</b>
Программа курса лекций (1 курс магистратуры, 2 сем, 32 ч, экзамен).....	77
<b>Диагностика пучков заряженных частиц.....</b>	<b>81</b>
Программа курса лекций (1 курс магистратуры, 1 сем, 36 ч, экзамен).....	81
<b>Прецизионные системы питания электрофизических установок .....</b>	<b>84</b>
Программа курса лекций (1 курс магистратуры, 2 сем, 32 ч, экзамен).....	84
<b>Теория колебаний.....</b>	<b>89</b>
Программа курса лекций (магистратура 1 курс, 2 сем, 32 ч, дифзачет).....	89
<b>Цифровые сигнальные процессоры .....</b>	<b>92</b>
Программа лабораторного практикума (1 курс магистратуры, 2 сем, 64 ч, дифзачет).....	92

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

### Программа курса лекций

(3 курс, 5 сем., 36 ч., диф.зачет)

*Старший преподаватель Тарнецкий Владимир Владимирович*

Дисциплина предназначена для обучения студентов-физиков основам теории электромагнитных процессов и техники электродинамических устройств СВЧ диапазона.

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. изучение основных сведений из теории электромагнитного поля;
2. изучение основных типов линий передач СВЧ мощности;
3. рассмотрение принципа действия, особенностей, основных параметров и свойств объемных резонаторов.
4. изучение распространения электромагнитных волн в гиротропной среде, применения невзаимных устройств.

### Структура и содержание дисциплины

#### Общие сведения из теории электромагнитного поля

1. Уравнения Максвелла. Граничные условия. Электромагнитная энергия. Единственность решения.
2. Скин-эффект. Граничные условия на поверхности идеального проводника. Приближенные граничные условия Леонтовича. Поверхностные токи.

#### Теория длинных линий

1. Классификация линий передачи.
2. ТЕМ волны в линиях передачи. Поле в поперечном сечении. Коаксиальная, двухпластинчатая, двухпроводная линии.
3. Телеграфное уравнение. Падающая и отраженная волны. Бегущая и стоячая волны. Трансформация сопротивлений и проводимостей. Эквивалентная схема отрезка линии передачи в виде четырехполюсника. Диаграмма Смита. Потери в линии.
4. Многопроводные ТЕМ-линии.

#### Волноводы

1. Распространение волн в волноводах. Уравнения для потенциальных функций. Волны E и H типов. Соотношения ортогональности.

2. Волны в прямоугольных волноводах. Картины силовых линий и токов в стенках для E и H волн. Круглый волновод. Волноводные типы волн в коаксиальной линии. Волноводы сложной формы.
3. Энергетические соотношения для волноводов. Мощность и плотность энергии в волноводе.
4. Фазовая и групповая скорости распространения волн в волноводе. Волны Бриллюэна.
5. Потери в волноводах. Затухание, вызванное потерями в стенках. Потери в среде, заполняющей волновод.
6. Волноводная линия передачи. Напряжение и ток в волноводе. Телеграфное уравнение для волноводов. Волновое сопротивление волноводов.
7. Оконечное устройство. Полное сопротивление, коэффициент отражения и энергетические характеристики оконечного устройства.
8. Сочленение нескольких волноводов. Матрицы полного сопротивления и полной проводимости. Матрица рассеяния и ее свойства. Частотные характеристики сочленений без потерь.
9. Неоднородности в волноводах. Скачкообразное изменение параметров вещества, заполняющего волновод. Диафрагмы в волноводе. Методы решения задач о неоднородностях в волноводе. Изменение сечения волновода. Согласование волноводов с помощью многоступенчатых переходов.
10. Возбуждение волноводов заданными токами и полями.

### **Резонаторы**

1. Свободные колебания резонаторов. Собственные значения и собственные функции. Ортогональность собственных функций.
2. Различные типы полых резонаторов. Резонаторы, образованные из линий передачи. Квазистационарные резонаторы.
3. Приближенные методы расчета полых резонаторов. Квазистационарный метод. Метод сшивания. Вариационный метод. Соотношение для возмущений.
4. Потери в резонаторах. Добротность. Потери в стенках резонатора и в среде, заполняющей резонатор. Внешняя и нагруженная добротности.
5. Вынужденные колебания резонаторов. Возбуждение резонатора заданными токами и полями. Характеристическое и шунтовое сопротивления.
6. Резонатор как элемент линии передачи. Эквивалентная схема резонатора, связанного с линией. Коэффициент связи. Полное сопротивление и коэффициент отражения.

### **Волны в гиротропных средах**

1. Феррит как гиротропная среда. Распространение плоских волн в гиротропной среде.
2. Эффект Фарадея. Явление не взаимности.

3. Применение ферритовых элементов в СВЧ технике: вентиль, циркулятор.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- иметь представление об особенностях преобразования входных сигналов нелинейными системами
- знать основные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений
- уметь рассчитывать основные параметры преобразованного нелинейной системой сигнала.

**Образцы вопросов для подготовки к экзамену.**

Билет N 1

1. Система уравнений Максвелла. Макроскопическая электродинамика.
2. Добротность резонатора.

Билет N 2

1. Распространение волн в волноводах, волны  $E$ - и  $H$ - типов.
2. Система уравнений Максвелла в симметричной форме. Магнитные токи. Лемма Лоренца.

Билет N 3

1. Телеграфное уравнение для длинной линии.
2. Единственность решения внутренней и внешней электродинамической задачи.

Билет N 4

1. Приближенные граничные условия Леонтовича.
2. Свободные колебания резонаторов, собственные значения и собственные функции.

Билет N 5

1. Трансформация сопротивлений и проводимостей в  $TEM$  линии.
2. Метод возмущений для приближенного расчета полых резонаторов.

Билет N 6

1. Теорема Пойнтинга.
2. Картины силовых линий в прямоугольном волноводе для волн  $H$ - типа.

Билет N 7

1. Способы согласования нагрузки в длинных линиях.

2. Картины силовых линий в прямоугольном волноводе для волн  $E$ -типа.

Билет N 8

1. Решение уравнений Максвелла. Векторный и скалярный потенциалы. Векторы Герца.
2. Картины силовых линий в круглом волноводе для волн  $H$ -типа.

Билет N 9

1. Электродинамическое подобие.
2. Картины силовых линий в круглом волноводе для волн  $E$ -типа.

Билет N 10

1. Диаграмма Смита.
2. Квазистационарное приближение.

Билет N 11

1. Напряжение, ток и мощность в  $TEM$  линии.
2. Метод частичных областей для приближенного расчета полых резонаторов..

Билет N 12

1. Многопроводные линии  $TEM$ .
2. Матрица рассеяния.

#### Литература

1. Карлинер М. М. Электродинамика СВЧ. Курс лекций. Новосибирск. Изд. НГУ. 2006.
2. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М.: Сов. радио, 1988.
3. Теория линий передач сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1951.
4. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966.
5. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

#### Дополнительная литература

1. Стретон Дж. Теория электромагнетизма. М.; Л.: ОГИЗ - Гостехиздат, 1948.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
3. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.
4. Левин П. Современная теория волноводов. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
5. Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн., М.: Высшая школа, 1992.

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

### Программа курса лекций

(3 курс, 5 сем., 36 ч., диф.зачет)

*Старший преподаватель Чупыра Андрей Геннадьевич*

Курс «Теория автоматического регулирования» имеет своей целью ознакомление с методами исследования устойчивости систем с обратной связью, методами построения кривых переходных процессов, методами оценки качества регулирования, получение практических навыков в исследовании простейших линейных и нелинейных систем автоматического регулирования.

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. Изучение основных понятий, используемых при анализе систем автоматического регулирования (функция веса, передаточная функция, логарифмическая частотная характеристика).
2. Изучение различных критериев устойчивости линейных и нелинейных систем автоматического регулирования.
3. Обучение методам нахождения кривых переходных процессов.

Обучение базовым методам, используемым при анализе систем автоматического регулирования (решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений, использование преобразования Лапласа).

### Структура и содержание дисциплины

1. Введение. О технике и следствиях её развития. Общие сведения об автоматических системах. Классификация систем по характеру внутренних динамических процессов. Программы регулирования.

2. Одномерная управляемая система с одной степенью свободы. Функция веса и передаточная функция. Частотная характеристика. Замкнутая управляемая система. Разомкнутая управляемая система. Воспроизведение преобразованного сигнала.

3. Динамические звенья. Амплитудно-фазовая частотная характеристика. АФХ и функция веса. Минимально-фазовые звенья. Логарифмическая частотная характеристика. Позиционные динамические звенья. Неустойчивые и неминимально-фазовые звенья.

4. Критерии устойчивости линейной системы. Критерий устойчивости Рауса-Гурвица. Критерий устойчивости Михайлова. Построение области устойчивости. D-разбиение.

5. Критерий устойчивости Найквиста [1]. Статическая система и система с астатизмом первого и второго порядка. Критерий устойчивости Найквиста в общем случае. Критерий устойчивости Найквиста [2]. Определение устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам.

6. Передаточные функции систем автоматического регулирования. Регулирование: пропорциональное, интегральное, изотропное, по производным. Соединения стационарных линейных систем. Многоконтурная система обратной связи. Многомерные системы регулирования. Устойчивость двухмерной системы с асимметричными связями.

7. Построение кривой переходного процесса. Непосредственное решение дифференциальных уравнений. Применение преобразования Лапласа. Реакция системы на произвольную функцию времени. Уравнение с переменными коэффициентами.

8. Оценка качества регулирования. Коэффициенты ошибок. Корневые методы оценки ошибок. Диаграмма Вышнеградского. Частотные критерии качества. Повышение точности систем автоматического регулирования. Комбинированное управление.

9. Нелинейные системы автоматического регулирования. Фазовая плоскость. Особые точки и фазовые портреты линейных систем. Особые точки и фазовые портреты нелинейных систем.

10. Переходные процессы и автоколебания релейной системы. Система со скользящим процессом. Система с логическим управлением. Учёт времени запаздывания. Системы с переменной структурой.

11. Метод припасовывания. Метод гармонической линеаризации. Алгебраический метод определения симметричных колебаний и устойчивости. Приближённый метод исследования устойчивости.

12. Частотный критерий устойчивости В.М. Попова.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Иметь представление об основных методах анализа систем автоматического регулирования
- Знать критерии устойчивости Рауса-Гурвица, Михайлова, Найквиста (для линейных систем) и критерий устойчивости Попова (для нелинейных систем)
- Уметь строить кривые переходных процессов, применять корректирующие звенья для достижения устойчивости систем, оценивать качество регулирования.

В течение семестра студентам предлагаются две письменные контрольные работы. Первая контрольная работа служит для проверки знаний по темам «Общие сведения об автоматических системах» и «Динамические звенья линейных систем», вторая контрольная работа по темам «Критерии устойчивости линейных систем» и «Передаточные функции линейных систем. Качество регулирования».

**Образцы задач, предлагаемые в контрольных работах.**

**Контрольная работа №1.**

**Задача 1.** Какое динамическое звено имеет функцию веса  $w(t) = 50 * (e^{-5t} - e^{-10t}) * 1(t)$  ?

**Задача 2.** Как изменятся постоянная времени  $T$  и коэффициент передачи  $K$  апериодического звена первого порядка, если его охватить отрицательной обратной связью с передаточной функцией  $W_{i\bar{n}}(p) = K_0 * p$  ?

**Задача 3.** Найти уравнение кривой, представляющей собой амплитудно-фазовую характеристику системы, имеющей передаточную функцию  $W(p) = K * (1 + T * p) / p^2$ . Построить амплитудно-фазовую характеристику для случая  $K = 100 \frac{1}{\text{мВ} \cdot \text{с}^2}$ ,  $T = 0,2$  сек.

**Задача 4.** Построить логарифмические амплитудную и фазовую характеристики системы с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{40}{1 + 0,12p + 0,002p^2}.$$

**Контрольная работа №2.**

**Задача 1.** Характеристическое уравнение системы имеет вид  $p^3 + p^2 + 2p + 1 = 0$ . Определить устойчивость системы.

**Задача 2.** Определить устойчивость замкнутой системы, если передаточная функция разомкнутой системы имеет вид  $W(p) = \frac{K}{p^2(1 + T * p)}$ ,

где  $K = 20 \frac{1}{\tilde{n}\hat{a}\hat{e}^2}$  - добротность системы по ускорению,  $E = 0,01$  сек - постоянная времени.

**Задача 3.** Передаточная функция разомкнутой следящей системы

имеет вид  $W(p) = \frac{K}{p(1 + T_1 * p)(1 + T_2 * p)}$ , где  $K = 20 \frac{1}{\tilde{n}\hat{a}\hat{e}}$ ,

$T_1 = 0,02 \cdot \tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ ,  $T_2 = 0,03 \cdot \tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ . На вход системы поступает гармоническое воздействие с амплитудой  $\Theta_{MAX} = 10^\circ$  и периодом  $T_K = 7 \cdot \tilde{n}\hat{a}\hat{e}$ . Определить амплитуду ошибку.

**Задача 4.** В системе стабилизации температуры печи в качестве чувствительного элемента используется терморезистор. При отключенной системе регулирования внешнее воздействие вызывает отклонение температуры от заданного значения  $\Delta T = 200^\circ C$ . Определить установившееся отклонение температуры, если используется система регулирования с передаточной функцией разомкнутой системы

$$W(p) = \frac{K}{(1 + T_1 * p)(1 + T_2 * p)}, \text{ где } K = 500$$

**Вопросы итогового дифференциального зачета** охватывают весь объем лекционного курса.

### Литература

1. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования, М., 1972.
2. Основы автоматического управления, Под редакцией В.С. Пугачёва, М., 1968.
3. *Ройтенберг Я. Н.* Автоматическое управление, М., 1971.
4. Математические основы теории автоматического регулирования, Под редакцией Б.К. Чемоданова, М., 1971.
5. *Попов Е. П.* Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления, М., 1979.

### Дополнительная литература

1. *Фельдбаум А. А., Бутковский А. Г.* Методы теории автоматического регулирования, М., 1971.
2. Иванов В. А., Фалдин Н. В., Теория оптимальных систем автоматического управления, М., 1981.
3. *Барковский В. В., Захаров В. Н., Шаталов А. С.* Методы синтеза систем управления, М., 1969.
4. *Топчев Ю. И., Цыпляков А. П.* Задачник по теории автоматического регулирования, М., 1977.

## ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

**Программа курса лекций**  
(3 курс, 6 сем., 48 ч., экзамен)

*Старший преподаватель Суханов Дмитрий Петрович*

Курс лекций «Теория линейных электронных схем» имеет своей целью освоение методов проектирования различного рода усилительных схем: широкополосных, узкополосных и постоянного тока. С этой же целью в курсе излагаются основы теории линейных пассивных цепей, входящих в состав усилителей и определяющих характеристики усилителей.

### Структура и содержание дисциплины

#### Введение

1. Усилители. Структурная схема. Коэффициент усиления. Частотные характеристики. Линейные и нелинейные искажения. Классификация усилителей по частотным характеристикам.
2. Транзисторы. Вольт-амперные характеристики. Эквивалентные схемы. Частотная зависимость параметров транзистора. Зависимость параметров эквивалентной схемы от режима. Типы транзисторов и их особенности.
3. Усилительный каскад. Составляющие тока и потенциала коллектора, эмиттера, базы. Мощность постоянной и переменной составляющих. Графический метод определения режима.
4. Каскад с общим эмиттером с емкостной связью. Эквивалентная схема. Работа каскада в области низких и высоких частот. Входные и выходные сопротивления, коэффициент усиления.
5. Каскад с общим коллектором (эмиттерный повторитель). Входные и выходные сопротивления, коэффициент усиления. Частотная характеристика.
6. Схема с общей базой и ее параметры. Каскад с эмиттерной связью. Каскадная схема. Выбор рабочей точки и способы ее стабилизации.
7. Усилители с обратной связью. Виды обратной связи. Влияние обратной связи на характеристики усилителей.
8. Устойчивость. Критерий устойчивости Найквиста. Паразитные обратные связи.

**Некоторые разделы теории цепей**

1. Преобразование Лапласа. Основные свойства преобразования Лапласа. Преобразование рациональной дроби.
2. Некоторые общие свойства цепей. Уравнения контурных токов и узловых потенциалов. Входное сопротивление (проводимость). Сопротивление (проводимость передачи). Функции линейных цепей и их свойства. Расположение нулей и полюсов. Свойства вещественной и мнимой частей функции цепи. Устойчивость и физическая осуществимость. Переходные процессы в линейных цепях. Операторный метод. Связь переходного процесса с частотной характеристикой. Интеграл Дюамеля.
3. Двухполюсные цепи. Сопротивление и проводимость двухполюсника. Минимально-активные и минимально-реактивные двухполюсники. Двухполюсники, состоящие из чисто реактивных элементов.
4. Четырехполюсники. Характеристические и рабочие параметры. Представление четырехполюсника в виде скрещенной цепи. Четырехполюсники минимального затухания и минимальной фазы. Четырехполюсники, состоящие из чисто реактивных элементов.
5. Связь между вещественной и мнимой частями функции цепи. Аналитические условия. Интеграл активного сопротивления и затухания. Интеграл реактивного сопротивления и фазы. Интегральная связь между вещественной и мнимой частями функции цепи, заданными во всем частотном диапазоне и заданными в разных диапазонах частот. Графо-аналитический метод построения фазочастотных характеристик по заданным амплитудно-частотным.

**Усилители**

1. Широкополосные и импульсные усилители. Каскады с коррекцией высших частот. Метод Брауде. Синтез цепей коррекции. Применение обратной связи. Многокаскадные усилители. Передача фронта и вершины импульса однокаскадными усилителями. Усиление фронта каскадом с индуктивной коррекцией. Усиление фронта многокаскадным усилителем с коррекцией. Усилители с распределенным усилением.
2. Избирательные усилители. Резонансные однокаскадные и многокаскадные усилители. Усилители с расстроенными контурами. Избирательные усилители с обратной связью.
3. Усилители постоянного тока. Гальваническая связь. Температурный и временной дрейф. Дифференциальные усилители постоянного тока.

Усилители постоянного тока с преобразованием. Комбинированные схемы усилителей постоянного тока. Классификация операционных усилителей.

4. Шумы в усилителях. Случайные процессы и их свойства. Спектральная плотность и автокорреляционная функция. Тепловые шумы, теорема Найквиста. Коэффициент шума усилителя. Источники шумов в усилителях. Шумы транзисторов.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- иметь представление о современных усилительных схемах;
- знать физические основы и явления, используемые в полупроводниковых элементах (транзисторы и микросхемы) применяемых в усилительных устройствах;
- уметь применять простейшие методы анализа и синтеза цепей с заданными характеристиками;
- иметь навыки расчетов простейших усилительных схем и уметь оптимизировать их параметры.

В середине учебного семестра проводится коллоквиум, охватывающий пройденные темы дисциплины.

Цель коллоквиума - закрепление качественного понимания материала и дополнительная дифференциальная оценка учебной работы студента на лекции. Полученная оценка учитывается в итоговой оценке за дисциплину в конце года. Вопросы в основном имеют оценочный, качественный характер. Например:

- Какие основные характеристики усилителей Вы знаете?
- Какие основные отличия в характеристиках усилительных каскадов с ОЭ и ОБ.
- Какие параметры транзистора влияют на его температурную зависимость?
- Какие виды обратной связи Вы знаете?

В конце учебного года студентам предлагаются курсовые работы по выбранной преподавателем одной или нескольким темам. Курсовые заслушиваются и разбираются на занятии со всеми студентами. Оценка за работу дифференциальная и также учитывается в итоговой оценке за дисциплину. Примеры заданий по теме «Аналоговые интегральные схемы»:

- Классификация ОУ.

- ОУ с обратной связью по напряжению.
- ОУ с обратной связью по току.
- Усилители с дифференциальными входом и выходом».
- Логарифмические усилители.
- Стабилизаторы напряжения и тока.

Экзаменационные вопросы охватывают весь объем лекционного курса. Вопросы в билетах соответствуют содержанию разделов программы:

Билет №1

Усилительный каскад с общим эмиттером. Работа каскада в области средних и низких частот.

Билет №2

Усилительный каскад с общим эмиттером. Работа каскада в области средних и высших частот.

Билет №3

Каскад с общим коллектором и его характеристики.

Каскад с общей базой. Каскад с эмиттерной связью и каскод.

Билет №4

Стабилизация режима транзисторного каскада. Выбор рабочей точки. Основные факторы, влияющие на ее нестабильность. Анализ различных схем стабилизации рабочей точки.

Билет №5

Усилители с обратной связью. Виды обратной связи. Влияние обратной связи на характеристики усилителей. Критерий устойчивости Найквиста.

Билет №6

Переходные процессы в линейных цепях. Переходная функция. Связь переходной функции с частотной характеристикой. Связь между вещественной и мнимой частями коэффициента передачи, вытекающая из принципа причинности. Интеграл Дюамеля.

Билет №7

Свойства двухполусных цепей. Энергетические функции двухполусниками выражение входного сопротивления (проводимости) через энергетические функции. Основные свойства функции входного сопротивления.

Билет №8

Двухполусники минимально-активного и минимально-реактивного типов.

Свойства двухполусников, составленных из чисто реактивных элементов. Влияние малых потерь

Билет №9

Четырехполосники. Основные параметры: Характеристическое сопротивление, характеристический коэффициент передачи, рабочий коэффициент передачи. Представление функции сопротивления передачи скрещенной цепью с постоянными характеристическим сопротивлением.

Билет №10

Четырехполосники минимального затухания и минимальной фазы. Фазовые звенья.

Билет №11

Связь между вещественной и мнимой частями функции цепи. Интеграл активного сопротивления и затухания. Интегральная связь между вещественной и мнимой частями функции цепи, заданными во всем диапазоне частот. Графоаналитический метод построения фазочастотной характеристики по заданной амплитудной характеристике.

Билет №12

Теория обратной связи. Петлевое усиление и глубина обратной связи. Диаграмма Найквиста. Критерий устойчивости Найквиста. Оптимальная частотная характеристика усилителя с ООС. Применение цепей фазовой коррекции.

Билет №13

Широкополосные усилители. Каскады с коррекцией высших частот. Синтез цепей Коррекции. Применение обратной связи. Многокаскадные усилители и их частотные характеристики.

Билет №14

Импульсные усилители. Передача фронта и вершины импульса однокаскадным и многокаскадным усилителями с емкостной связью. Усиление фронта каскадом с индуктивной коррекцией.

Билет №15

Избирательные усилители. Одно- и многокаскадные резонансные усилители. Усилители с расстроенными контурами.

Билет №16

Избирательные усилители с обратной связью. Цепь обратной связи с резонансным контуром. Двойной Т-фильтр. Схемы избирательных усилителей с обратной связью.

Билет №17

Переходные процессы в избирательных усилителях. Метод расчета переходного процесса в избирательных усилителях. Переходной процесс в усилителе с расстроенными каскадами.

Билет №18

Усилители постоянного тока. Межкаскадная связь. Температурный и временной фактор. Дифференциальные усилители постоянного тока.

#### Литература

1. Карлинер М.М. Линейные электронные схемы. Курс лекций. Новосибирск, 2010.
2. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1977.
3. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей, БХВ-Петербург, 2009;
4. Белейкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей, Изд. «Лань», 2009.
5. Эрглис К.Э., Степаненко И.П. Электронные усилители. М.: Наука, 1964.
6. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью, М.: Изд-во иностр. лит., 1948.

## ИЗЛУЧЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

**Программа курса лекций**  
(3 курс, 6 сем., 16 ч., экзамен)

*Доцент, к.т.н. Запругаев Игорь Александрович*

Дисциплина «Излучение и распространение радиоволн» предназначена для ознакомления студентов – физиков с основными особенностями формирования поля излучения различными излучающими системами (антеннами) и особенностями распространения радиоволн в различных материальных средах. Основной целью освоения дисциплины является ознакомление студентов с основными методами расчета параметров рассматриваемых открытых электродинамических систем

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса

1.2.1. Построение основных математических моделей открытых электродинамических систем

1.2.2. Ознакомление с основными методами расчета параметров рассматриваемых систем

1.2.3. Анализ физических процессов в рассматриваемых системах

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Основы теории излучения

Объемные электрические и магнитные источники электромагнитного поля. Электродинамические потенциалы. Принцип двойственности. Поверхностные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса-Кирхгофа. Обобщение формулы Кирхгофа для векторных полей с учетом источников.

#### 2. Элементарные излучатели

Элементарный электрический вибратор (диполь Герца). Элементарный магнитный вибратор. Элемент Гюйгенса. Щелевой вибратор.

#### 3. Системы элементарных излучателей

Простейшие совокупности элементарных излучателей. Симметричные вибраторы. Нагруженный вибратор. Цепочка синфазных излуча-

телей. Решетка синфазных вибраторов. Поле двух вибраторов. Рефлектор и директор.

#### **4. Характеристики излучателей**

Параметры передающих антенн и методы их расчета. Параметры электрического режима работы антенны. Сопротивление потерь. Частотная зависимость сопротивлений. Входное сопротивление антенны. Сопротивление настройки. Коэффициент направленного действия. Коэффициент полезного действия. Коэффициент усиления. Частотные характеристики и полоса пропускания антенн.

#### **5. Антенны длинных и средних радиоволн**

Особенности распространения длинных и средних радиоволн. Антенны Александерсена. П-образные длинноволновые антенны. Т- и Г-образные антенны средних и длинных волн. Антенные мачты средневолнового диапазона. Щелевые средневолновые антенны.

#### **6. Излучение коротких волн**

Особенности распространения коротких волн. Простые коротковолновые вибраторы настроенного и диапазонного типа. Сложные коротковолновые антенны настроенного и диапазонного типа. Ромбические коротковолновые антенны.

#### **7. Излучение ультракоротких волн**

Излучение волновода прямоугольного сечения. Рупорные антенны. Распределение фаз в раскрыве рупора. Направленные свойства секториальных рупоров. Коэффициент направленного действия пирамидального рупора. Коррекция фазы в раскрыве рупора. Линзовые антенны. Ускоряющие линзы.

#### **8. Общие вопросы распространения радиоволн**

Основные определения. Характер распространения радиоволн разных диапазонов. Распространение плоских радиоволн в полупроводящей среде. Неоднородные плоские волны.

#### **9. Распространение радиоволн в тропосфере**

Строение тропосферы. Тропосферная рефракция. Сверхрефракция. Рассеяние радиоволн в тропосфере.

## 11. Распространение радиоволн в ионосфере

Структура ионосферы. Распространение плоских волн в однородной изотропной ионизированной среде. Показатель преломления и поглощения. Распространение электромагнитных волн в неоднородной среде. Приближение геометрической оптики. Решение волнового уравнения для линейного слоя. Волны в однородной магнитоактивной плазме, продольное распространение, поперечное распространение. Нелинейные эффекты.

### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Иметь представление о физических процессах в открытых электродинамических системах
- Знать свойства и методы построения математических моделей основных типов рассматриваемых электродинамических систем
- Уметь использовать математические модели для расчета основных параметров электродинамических систем

### **Образцы тем коллоквиумов**

- а) Использование принципа Гюйгенса – Кирхгофа для расчета апертурных антенн
- б) Режимы работы линейных излучателей
- в) Частотные характеристики и полоса пропускания антенн
- г) Строение и параметры тропосферы и ионосферы. Показатели преломления этих сред
- д) Обыкновенная и необыкновенная волны в ионосфере

### **Вопросы для подготовки к экзамену**

Билет N 1

1. Электродинамические потенциалы. Поверхностные источники электромагнитного поля.
2. Строение тропосферы. Тропосферная рефракция. Сверхрефракция.

Билет N 2

3. Элементарные вибраторы. Элемент Гюйгенса.
4. Структура ионосферы. Распространение плоских волн в однородной изотропной ионизированной среде.

Билет N 3

5. Симметричные вибраторы. Нагруженный вибратор. Характеристики излучателя.
6. Структура поля радиоволны в месте приема. Влияние сферичности Земли. Дифракционная задача.

Билет N 4

7. Поле двух вибраторов. Директор и рефлектор.
8. Интерференционная формула. Квадратичная формула Введенского

Билет N 5

9. Цепочка синфазных излучателей. Антенные решетки.
10. Приближенные граничные условия Леонтовича. Объем пространства, существенный при распространении радиоволн.

Билет N 6

11. Излучение волновода прямоугольного сечения. Рупорные антенны.
12. Распространение радиоволны над неоднородной плоской поверхностью. Критерий Релея.

Билет N 7

13. Антенны бегущей волны. Сверхнаправленность. Диэлектрические антенны. Ромбические антенны.
14. Особенности распространения длинных радиоволн. Т- и Г-образные антенны длинных волн. Приемные антенны.

Билет N 8

15. Линзовые антенны. Ускоряющие линзы. Параболические антенны.
16. Особенности распространения средних радиоволн. Антенные мачты средневолнового диапазона. Приемные антенны.

Билет N 9

17. Принцип Гюйгенса-Кирхгофа. Обобщение формулы Кирхгофа для векторных полей с учетом источников.
18. Особенности распространения коротких волн. Простые коротковолновые вибраторы настроенного и диапазонного типа.

Билет N 10

19. Основы теории приема радиоволн. Характеристики приемных антенн.
20. Распространение плоских волн в однородной изотропной ионизированной среде. Показатель преломления и поглощения.

Билет N 11

21. Параметры передающих антенн. Входное сопротивление антенны. Частотные характеристики и полоса пропускания антенн.
22. Особенности распространения ультракоротких волн. Влияние Земли на диаграмму направленности линейного излучателя.

**Литература**

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.; Л.: Энергия, 1975.
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1965.

**Дополнительная литература**

1. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Связь, 1977.
2. Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974.
3. Красюк Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высш. шк., 1974.
4. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.; 1967.
5. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972.
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1972.

**Программное обеспечение и интернет-ресурсы**

Лабораторные работы по Электродинамике СВЧ:

1. [http://www.inp.nsk.su/students/radio/2008/lab\\_prakt.doc](http://www.inp.nsk.su/students/radio/2008/lab_prakt.doc)
2. <http://www.inp.nsk.su/students/radio/2005/nsu118.pdf>

## ЭВМ

### Программа курса лекций (4 курс, 7 сем., 36 ч., экзамен)

*Старший преподаватель Сергей Валерьевич Дубров*

Дисциплина «ЭВМ» предназначена для обучения студентов-физиков основным принципам построения и использования различных компьютерных архитектур.

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. изучение теоретических основ построения цифровых вычислительных машин;
2. сравнительное рассмотрение архитектур ЭВМ разных поколений;
3. понимание и изучение различных методов ввода-вывода данных в компьютерах, программные и аппаратные факторы, влияющие на производительность системы в целом;
4. понимание разрядности ЭВМ, ознакомление с тенденциями построения современных персональных компьютеров, высокопроизводительных систем;
5. обоснованный выбор и использование современных компьютерных архитектур.

### Структура и содержание дисциплины

1. Булева Алгебра. Основные аксиомы и теоремы. Карты Карно. Применение при проектировании и анализе работы ЭВМ.
2. Основные понятия в ЭВМ. Архитектура фон-Неймана, гарвардская архитектура. Центральный процессор, память, внешние устройства. Понятие шины. Методы адресации памяти (прямая, непосредственная, регистровая, индексная, косвенная).
3. Логическая организация памяти. Порядок младших/старших байт/бит в многобайтовых словах (little endian, big endian). Страничная, сегментная адресация. Кэш-память, варианты кэш памяти (сквозная запись, с обратной записью, инклюзивная, эксклюзивная). Расслоение физической памяти. Иерархия памяти в архитектуре машины (от регистров до лент).
4. Методы ввода-вывода данных. Программный канал, ввод-вывод по прерываниям, прямой доступ в память.
5. Однокристалльные микроЭВМ семейства Intel 8048. Архитектура процессора, организация памяти данных и команд, регистры. Доступ к

- внешним устройствам. Ограничения. Поколение микроЭВМ улучшенной архитектуры – Intel 8051. Расширение возможностей 8051 (объем памяти, битовая обработка, прерывания, скорость выполнения инструкций).
6. Семейство PDP-11 (LSI-11). История и роль для всей отрасли компьютерной индустрии. Основные особенности PDP-11 – регистры общего назначения, «ортогональная» система команд, стек в ОЗУ. Слово состояния процессора. Асинхронная шина (Unibus и Q-bus). Достоинства и недостатки по сравнению с синхронной шиной, циклы чтения/записи, циклы прерывания, прямого доступа в память. Методы преодоления ограниченного адресного пространства - архитектура диспетчера памяти старших моделей PDP-11 и LSI-11. Предельный объем физической памяти, максимально возможный объем программы. Арифметические команды для чисел формата с плавающей запятой.
  7. Семейство VAX. Супер-мини ЭВМ. Надёжные вычисления. Классический пример машины со сложным (CISC) набором команд. Организация физической, виртуальной памяти, прерываний, ввода-вывода. Поддержка арифметики с плавающей запятой. Единица производительности - VUP.
  8. Основные операционные системы семейств PDP-11 и LSI-11 (RT-11, RSX-11, TSX-11). Возможности, определяемые архитектурой ЭВМ (размер задач, количество пользователей, количество подключаемых периферийных устройств). Подкачка/выгрузка программ с диска/на диск в ОЗУ/из ОЗУ (swapping). Поддержка виртуальной памяти в RSX-11 – системе предшественнике VAX/VMS.
  9. Архитектура микроЭВМ на базе процессоров 8080/85/Z80. Строительные программируемые "кубики" фирмы Intel. Ограничения микроЭВМ на базе архитектуры 8080. Система команд, методы адресации. Методов адресации процессора 8080, дополнительные возможности процессора Z80.
  10. Архитектура процессора i8086/88 и ЭВМ на его основе (IBM PC). Регистры, ориентация на экономию памяти. Методы адресации. Шина IBM PC, прерывания, прямой доступ к памяти. Подключение внешних устройств. Диски, флоппи-диски, порт RS232, параллельный порт. Карта памяти. Системный BIOS, BIOS-ы периферийных устройств - назначение и организация. Арифметический сопроцессор i8087, сопряжение с центральным процессором. Очередь команд.

11. Дальнейшее развитие архитектуры 8086 - процессор 80286. Персональный компьютер на основе 80286 - IBM PC AT. Попытка прорваться через одноклобайтный барьер ОЗУ. Два режима работы: реальный, защищенный. Карта памяти для каждого из них. Неудачные решения, заложенные в архитектуру процессора - препятствие для построения надежно работающих операционных систем. Полезная ошибка при работе с сегментом с максимальным адресом. Развитие сегментного доступа к памяти - дескрипторные таблицы. Ограничения на объем сегментов.
12. Процессоры архитектуры 80386 и 80486. Три режима работы - реальный, защищенный, виртуальный 8086. Преодоление 16-ти разрядного барьера в размере сегментов, комбинация страничных и сегментных способов адресации. Кэш. Бремя совместимости со старыми моделями процессоров. Архитектурные преимущества при работе в системе MS DOS по сравнению с моделями 8086 и 80286. Использование преимуществ 32-х разрядной памяти. Плоская (flat) модель памяти. Многошинная структура современных PC. SCSI-интерфейс для подключения внешних устройств.
13. Многопроцессорные системы интеловской архитектуры, повышение производительности за счёт увеличения количества исполнительных устройств, вместо «лобового» повышения тактовой частоты. Многоуровневый кэш. Архитектура машин на базе процессоров Intel Core i7, i5, i3 и AMD Phenom.
14. Переход на 64-х разрядные архитектуры – когда прямо адресуемого ОЗУ объёмом в 4 Гбайта недостаточно. Эволюционный вариант – архитектура x64. Архитектура IA-64 Itanium (EPIC).
15. Последовательные шины (на примере PC) – стратегическое направление эволюции архитектур современных машин. Шины для подключения внешних устройств: USB, FireWire (IEEE-1394), eSATA. Внутренние шины: PCI-E, SATA, SAS.
16. Основные операционные системы для машин с архитектурой PC - Linux, Windows, Unix-подобные системы. Сетевая ОС Netware – пример ОС с невытесняющей многозадачностью.
17. Архитектура суперЭВМ. Классификация суперЭВМ (векторные, параллельные, SIMD, MIMD т.д.). CRAY, Cyber-205 CDC, роль и влияние на сектор высокопроизводительных машин. Система команд, методы адресации. Использование преимуществ параллельных архитектур (параллельные языки программирования).

18. Архитектура виртуальных машин. Виртуализация процессора, устройств ввода-вывода. Программная и аппаратная виртуализация. Гипервизор. Большая тройка – VMWare ESX (vSphere), Citrix XENServer, Microsoft Hyper-V.
19. Архитектура современных сверхпроизводительных суперЭВМ, проект GRID. «Народный» суперкомпьютер на базе GPU, проект CUDA от Nvidia.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости,  
промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать теоретические основы, используемые при построении современных компьютерных архитектур
- Уметь выбрать адекватное программно-аппаратное содержимое компьютера, для решения конкретной проблемы
- Владеть представлениями о современном состоянии компьютеров для научных и практических целей

Экзаменационные вопросы охватывают весь объем лекционного курса и соответствуют программе курса. Основные разделы программы перечислены ниже.

- Раздел – теоретические основы построения цифровых вычислительных машин.
- Раздел – методы ввода-вывода данных, организации памяти.
- Раздел – однокристалльные архитектуры.
- Раздел – массовые 16-ти разрядные архитектуры. Основные ОС.
- Раздел – микропроцессоры в сочетании с программируемой периферией.
- Раздел – 32-х разрядные архитектуры в миникомпьютерах. Виртуальная память.
- Раздел – эпоха x86 PC архитектур – от 16 к 64 разрядам.
- Раздел – последовательные шины – магистральное направление развития архитектуры.
- Раздел – современные ОС.
- Раздел – СуперЭВМ, история и современное состояние.
- Раздел – виртуальные машины, архитектура, возможности.

- Раздел – высокопроизводительные машины с использованием GPU.

**Образцы вопросов для подготовки к экзамену.**

- Организация ЭВМ на основе процессора Intel 8080 с отображением устройств ввода-вывода в адресное пространство ввода-вывода. Циклы чтения/записи памяти, чтения/записи внешних устройств. Шина 8080.
- МикроЭВМ семейства LSI-11 ("Электроника-60"). Шина Q-bus. Распределение памяти микро ЭВМ LSI-11/03. Циклы ввода, записи, ввод-пауза-вывод, прерывания, прямого доступа.
- МикроЭВМ семейства Intel 8048. Шина, подключение внешних устройств. Расширение внутреннего ПЗУ, возникающие проблемы. Организация прерывания. Циклы шины - чтения/записи данных, выборки команд.
- Шина компьютера IBM PC на основе процессора Intel 8088/86. Распределение памяти в IBM PC. Циклы чтения-записи памяти, чтения-записи внешних устройств, прерывания.
- Шина микроЭВМ семейства LSI-11/23 (73). Расширение адресного пространства. Циклы ввода, вывода, ввод-пауза-вывод, прерывания (приоритеты), прямого доступа. Распределение памяти.
- Основы архитектуры диспетчера памяти машин семейства PDP-11 (LSI-11). Страничная организация, предельно возможный объем ОЗУ. PAR (регистры адреса страницы), PDR (регистры описания страниц).
- Особенности архитектуры персональных ЭВМ на основе микропроцессоров семейства Intel 80386 и 80486. Организация верхних блоков памяти, преимущества страничной организации памяти, виртуальный режим в DOS. Шина, циклы ввода/вывода, конвейеризация шины.
- МикроЭВМ семейства Intel 8051. Шина, подключение внешних устройств, внешнего ОЗУ, ПЗУ. Циклы чтения-записи, выборки команд. Организация прерываний.
- Определение шины, классификация (по методу обмена, по рядности и т.д.)
- Как может быть организована виртуальная память на машинах семейства PDP-11 и PC с процессором Intel 80x86. Какие архитектурные особенности должны присутствовать в процессоре? Ка-

кие операционные системы с виртуальной памятью (необязательно для указанных типов процессоров) вы знаете?

- Какие особенности в архитектуре процессора Intel 80286 и ЭВМ на его основе не позволяют полноценно пользоваться преимуществами защищенного режима работы? Как эта проблема преодолевается в машинах IBM PC AT?
- Что такое SISD, SIMD и MIMD архитектуры? В чем преимущества и недостатки каждой из них? Что такое векторно-матричная ЭВМ? Для какого класса задач она лучше всего подходит? Архитектура ILLIAC-IV. "Ахиллесова пята" машин такого класса (аппаратная и программная части).
- Что такое векторно-конвейерная архитектура? Какие задачи лучше всего работают на машинах этого класса? Сформулируйте закон Амдаля о производительности векторных ЭВМ. Другие факторы, влияющие на производительность - стартовое время конвейера, зависимости по управлению и данным. Условные операторы внутри векторов.
- Основные особенности архитектуры суперкомпьютеров Cray-1,-2. Достоинства, узкие места. За счет чего достигалось преимущество перед формально более быстрыми машинами
- Семейства Cyber-205? "Зацепление" (цепочки) команд (векторный суперконвейер). Дальнейшее развитие концепции "зацепления" в Hitachi S-810.
- Иерархия памяти в машинах с классической архитектурой. Сравните основные элементы иерархии для CISC и RISC архитектур. Назовите несколько основных причин появления RISC архитектур.
- Определение разрядности ЭВМ. Внешняя и внутренняя разрядности. Определение архитектуры по Нейману, "минимальная" машина (один из вариантов).
- Архитектура супер-мини ЭВМ семейства VAX. Основные особенности, реализация виртуальной памяти в ОС VAX/VMS, система команд.
- Архитектура виртуальных машин. Виртуализация процессора, устройств ввода-вывода. Полная виртуализация. Аппаратная поддержка виртуализации в процессорах Intel (VT-X), AMD (AMD Virtualization). Гипервизор. Какое оборудование "видит" гостевая ОС в виртуальной машине?

- Архитектура современных суперЭВМ. Принципы построения, технологические основы. Компактные суперкомпьютеры на основе GPU, проект CUDA от Nvidia. Особенности архитектуры, позволяющие получить высокую производительность системы с небольшими затратами. Ограничения CUDA.

#### **Образцы заданий:**

- Дать определение функции XOR. Привести её в табличном представлении, в виде канонической суммы минтермов, канонического произведения макстермов. Обосновать возможность использования XOR для восстановления данных на примере технологии RAID-3(-4, 5).
- Объясните и обоснуйте основные причины повсеместного перехода на последовательные варианты интерфейсов вместо параллельных (IDE/PATA -> SATA, SCSI -> SAS, PCI -> PCI-E), с качественными и количественными оценками.
- Оцените (количественно) максимальную скорость (поток) передачи данных современного жёсткого (магнитного) диска. Дайте количественную оценку максимально возможному количеству операций ввода/вывода для жёсткого диска (IOPS). Приведите такие же расчёты для твердотельных (SSD) дисков.
- Оцените количественно (приблизительно) падение производительности машины, базирующейся на современном процессоре класса x86, в случае отключения в системе всех возможных видов кэш-памяти. Рассмотрите случаи для кэш-памяти с различной организацией (инклюзивной, эксклюзивной, табличной, ассоциативной, гибридной).

#### **Литература**

##### *Основная литература*

1. Принципы работы системы IBM/370. П/р Л.Д.Райкова. Москва, "Мир", 1975.
2. Компьютеры. Справочное руководство в трех томах. П/р Г.Хелмса. Т.1. Москва, "Мир", 1986.
3. Супер-ЭВМ. Аппаратная и программная реализация. П/р С.Фернбаха. Москва, "Радио и связь", 1991.
4. Р.Хокни, К.Джессхоуп. Параллельные ЭВМ. Архитектура, программирование и алгоритмы. Москва, "Радио и связь", 1986.
5. В.В.Сташин, А.В.Урусов, О.Ф.Молокогонцева. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. Москва,

- "Энергоатомиздат", 1990.
6. Мини- и микро ЭВМ семейства "Электроника". Производственное издание. Б.Л.Толстых и др. Москва, "радио и связь", 1987.
  7. М.Сингер. Мини-ЭВМ PDP-11: программирование на языке ассемблера и организация машины. Серия "Математическое обеспечение ЭВМ". Москва, "Мир", 1984.
  8. Центральный процессор М2. ТО и инструкция по эксплуатации. ЦНИИ "Электроника", 1982.
  9. С.П.Морс, Д.Д.Алберт. Архитектура микропроцессора 80286. Москва, "Радио и связь", 1990.
  10. В.Л.Григорьев. Архитектура микропроцессора 80486, в 4-х томах.
  11. П.М.Коуги. Архитектура конвейерных ЭВМ. Москва, "Радио и связь", 1985.
  12. Ч.Кэпс, Р.Стаффорд. VAX: программирование на языке ассемблера и архитектура. Москва, "Радио и связь", 1991.
  13. Э.Таненбаум. Многоуровневая организация ЭВМ. Москва, "Мир", 1979.
  14. Э.Таненбаум. Архитектура компьютера. 4-ое издание. "Питер", 2002.
  15. К.Хамахер, З.Вранешич, С.Заки. Организация ЭВМ. 5-ое издание. "ВНУ", "Питер", 2003.

#### *Дополнительная литература*

1. Э.Клингман. Проектирование специализированных микропроцессорных систем. Москва, "Мир", 1985.
2. Э.Клингман. Проектирование микропроцессорных систем. Москва, "Мир", 1983 (?).
3. Г.Майерс. Архитектура современных ЭВМ, в 2-х книгах. Москва, "Мир", 1985.
4. Ю-Чжень Лю, Г.Гибсон. Микропроцессоры семейства 8086/8088. Москва, "Радио и связь", 1987.

#### *Программное обеспечение и Интернет-ресурсы*

1. [http://www.nvidia.ru/object/cuda\\_learn\\_ru.html](http://www.nvidia.ru/object/cuda_learn_ru.html)
2. [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_home.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html)
3. <http://www.vmware.com/support/pubs/>
4. <http://www.xensource.com/>
5. <http://www.microsoft.com/windowsserver2008/en/us/hyperv-main.aspx>

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ

**Программа курса лекций**  
(4 курс, 7 сем., 36 ч., экзамен)

*Доцент Переведенцев Евгений Алексеевич*

Курс включает следующие разделы: принципы получения пучков ускоренных частиц; устойчивость поперечного движения частиц в циклических ускорителях; продольное движение частиц; синхротронное излучение, его характеристики и влияние на динамику циркулирующих электронов; методы охлаждения пучков ускоренных частиц; когерентные неустойчивости пучка, их диагностика и подавление; взаимодействие встречающихся сгустков; ограничение светимости в установках со встречными пучками; перспективы развития ускорительной техники.

### Структура и содержание дисциплины

1. Уравнения движения частиц в циклических ускорителях. Фокусировка в неоднородном магнитном поле.
2. Устойчивость поперечного движения частиц в циклических ускорителях. Бетатронные колебания. Матрица перехода. Слабая фокусировка.
3. Бетатронные колебания в периодических фокусирующих системах. Устойчивость решений уравнения Хилла, теорема Флоке. Огибающая бетатронных колебаний в жесткофокусирующем ускорителе.
4. Влияние возмущений ведущего поля в циклических магнитных структурах. Искажение равновесной орбиты. Запрещенные полосы бетатронных частот.
5. Замкнутая орбита для частиц с неравновесной энергией. Коэффициент удлинения орбит, удлинение периода обращения.
6. Продольное движение частиц, резонансное ускорение, автофазировка, уравнения синхротронных колебаний.
7. Синхротронное излучение, его характеристики и влияние на динамику циркулирующих электронов. Радиационное затухание колебаний.

8. Возбуждение колебаний вследствие квантовых флуктуаций синхротронного излучения. Установившиеся размеры пучка в электронном накопителе.
9. Анализ нелинейных возмущений осциллятора методом усреднения. Нерезонансные возмущения. Хроматизм и кубическая нелинейность бетатронных колебаний.
10. Внешний (простой) резонанс ангармонических колебаний. Амплитудно-частотная характеристика, фазовый портрет, области бетатронной автофазировки.
11. Параметрический резонанс, нелинейные резонансы. Амплитудно-частотная характеристика, фазовый портрет, области бетатронной автофазировки.
12. Взаимодействие встречающихся сгустков. Параметр пространственного заряда  $\xi$ .
13. Ограничение светимости встречных пучков “эффектами встречи”.
14. Эффекты, определяющие время жизни пучка в накопителе.
15. Методы инжекции. Методы охлаждения протонных пучков: электронное охлаждение, стохастическое охлаждение.
16. Влияние пространственного заряда на динамику интенсивного пучка. Когерентные неустойчивости пучка, их диагностика и подавление.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

**Задания**

1. Магнитная система электронного синхротрона Б-3М (2.5–250 МэВ) состоит из 4-х одинаковых 90-градусных секторных магнитов с радиусом поворота  $\rho = 100$  см, показатель спада  $n = 0.6$ , разделенных дрейфовыми промежутками длиной  $L = 40$  см. Найти бетатронные частоты  $\nu_x, \nu_z$ , огибающие  $w_x, w_z$  и формфакторы бетатронных колебаний  $\beta_{\max}/\beta_{\min}$ , адмиттансы  $A_x, A_z$  для апертуры  $\pm 3$  см, дисперсионную функцию  $\eta(s)$  и коэффициент удлинения орбит  $\sigma_p$ .

2. Какой силы тонкая квадрупольная линза, установленная в центре одного из прямолинейных промежутков Б-3М, потребуется для сдвига бетатронных частот на  $\Delta\nu = 0.2$  при энергии 5 МэВ ?
3. Оценить горизонтальное искажение орбиты в Б-3М при отклонении ведущего поля в одном из 4-х магнитов на 1% от проектного значения.
4. Найти синхротронную частоту и ширину ВЧ сепаратрисы в Б-3М при использовании ускоряющего напряжения  $U = 20$  кВ на 1-й гармонике частоты обращения. Каков максимально допустимый темп ускорения в этой машине?
5. Оценить радиационные потери  $W_0$ , времена радиационного затухания колебаний  $t_z$ ,  $t_x$ ,  $t_s$  и “установившиеся” размеры электронного пучка в магнитной системе Б-3М при энергии частиц 250 МэВ.
6. Исследовать хроматизм бетатронных частот в азимутально-симметричной магнитной системе с ведущим полем в медианной плоскости  $H_z(r) = H_0 (r_0/r)^n$ . Сравнить со случаем линейной фокусировки:  $dH_z/dr = \text{const}(r)$ .
7. Показать, что  $w(s) = (\beta_0 + s^2/\beta_0)^{1/2}$  является огибающей пучка прямолинейных траекторий с начальными условиями  $x_i = (\epsilon/\beta_0)^{1/2} \cos(\phi_i)$ ,  $x_i' = (\epsilon/\beta_0)^{1/2} \sin(\phi_i)$ . Пояснить смысл параметров  $\beta_0$  и  $\epsilon$ .
8. Исследовать вызванное эффектами встречи возмущение  $\beta$ -функции в месте встречи пучков в зависимости от близости к параметрическому резонансу, учитывая пространственный заряд встречного сгустка в линейном приближении (“эффект Фраскати”). Для параметров электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М (без змейки) найти  $\xi_x$ ,  $\xi_z$ ,  $\Delta\nu_x$ ,  $\Delta\nu_z$  и светимость на энергии 510 МэВ:  $\beta_z = 6$  см,  $\beta_x = 40$  см,  $\nu_z = 3.08$ ,  $\nu_x = 3.06$ ,  $f_0 = 16.7$  МГц,  $I_+ = I_- = 15$  мА.
9. В азимутально-симметричной магнитной структуре с радиусом орбиты  $r_0$  и показателем спада ведущего поля  $n$  установлена тонкая квадрупольная линза оптической силы  $P$ . Найти границы зон устойчивости бетатронных колебаний на плоскости переменных  $n-P$ .
10. Построить матрицу перехода для участка магнитной структуры по заданным значениям параметров Твисса на входе и выходе этого участка.
11. Найти приращение фазы бетатронных колебаний на участке магнитной структуры с известной матрицей перехода с начального на конечный

азимут и заданными значениями параметров Твисса на входе этого участка.

12. Вычислить декремент радиационного затухания горизонтальных бетатронных колебаний в магнитной системе типа FD при равной длине и одинаковом по величине градиенте фокусирующей и дефокусирующей секций.

#### Литература

1. А.Н. Лебедев, А.В.Шальнов. “Основы физики и техники ускорителей”, М., “Энергоатомиздат”, 1991.
2. Г. Брук. “Циклические ускорители заряженных частиц”, М., “Атомиздат”, 1970.
3. А.А. Коломенский, А.Н.Лебедев. “Теория циклических ускорителей”, М., “Физматгиз”, 1962.
4. M. Sands. “Physics of electron storage rings”, Preprint SLAC-121 (1970).
5. Дж. Ливингуд. “Принципы работы циклических ускорителей”, М., 1963.

## ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

**Программа курса лекций**  
(4 курс, 7 сем., 36 ч., экзамен)

*Старший преподаватель, Раценко Владимир Викторович*

В лекциях изложены основные понятия, используемые для описания процессов в импульсных цепях, методы анализа и обработки импульсных сигналов. Курс знакомит студентов с элементной базой, используемой в импульсной технике, приведены примеры использования элементов в схемах. Цель курса – дать студентам общее представление о современной импульсной технике и используемых в ней компонентах, научить производить правильные расчеты узлов электронных схем.

### Структура и содержание дисциплины

#### **1. Введение**

Виды импульсных сигналов, параметры импульсов. Области применения импульсных сигналов. Спектры импульсов.

#### **2. Преобразования импульсов в линейных электрических цепях**

Интегрирование и дифференцирование импульсных сигналов. Преобразование спектра. Схемотехника интегрирующих и дифференцирующих цепей. Фильтры для импульсных сигналов. Типы фильтров, их АЧХ и ФЧХ.

#### **3. Импульсные трансформаторы**

Устройство и принцип работы трансформатора. Закон Фарадея. Эквивалентная схема трансформатора. Эквивалентные параметры. Частотные свойства трансформатора. Пропускание фронта и вершины прямоугольного импульса. Материалы для магнитопроводов. Характеристики магнитопроводов. Примеры расчета импульсных трансформаторов. Трансформаторы тока.

#### **4. Системы с распределенными параметрами. Длинные линии**

Прохождение сигнала по длинной линии. Волновое сопротивление. Отражения при несогласованной нагрузке. Преобразования импульсов с применением коаксиальных кабелей. Кабельные трансформаторы.

Искусственные длинные линии. Формирователи импульсов на линиях с распределенными и сосредоточенными параметрами.

#### **5. Нелинейные преобразования импульсных сигналов**

Элементная база нелинейных схем: диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы. Операционные усилители. Схемы усилителей напряжения на ОУ. Операционные схемы на ОУ. Компараторы. Оптические передатчики и приемники.

#### **6. Импульсные ключи**

Ключи на биполярных, полевых транзисторах, IGBT, тиристоры. Сравнительный анализ ключей.

#### **7. Базовые элементы цифровых микросхем**

Диодно-транзисторная логика. ТТЛ. ЭСЛ. КМОП. Аналоговые ключи.

#### **8. Генераторы импульсных сигналов.**

Релаксационные генераторы на логических элементах. Генераторы одиночных импульсов. Релаксационный генератор на ОУ. Таймер 555.

#### **9. Импульсные источники питания. Широтно-импульсная модуляция.**

Применение ШИМ сигнала на примере ЦАП ПКС. Типы импульсных преобразователей. Преобразователь с трансформаторной развязкой. Методы ШИМ-стабилизации напряжения. Пример схемы: Блок питания ПК.

#### **10. Измерения импульсных сигналов**

Делители напряжения, частотная компенсация. Датчики тока: шунты и токовые трансформаторы. Компенсационный датчик тока на основе элемента Холла (LEM).

#### **11. Приборы для измерения импульсных сигналов**

Оциллографы на основе ЭЛТ. Низкочастотные и высокочастотные оциллографы. АЦП. Методы аналогово-цифрового преобразования.

#### **12. Электромагнитные помехи в электрических цепях.**

Магнитная и электростатическая помехи. Земляная петля. Защита от помех: применение гальванических развязок, экранов, синфазных трансформаторов.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать и понимать физические процессы, происходящие в импульсных цепях, знать принципы работы элементов импульсных схем.
- Уметь произвести анализ работы импульсного устройства и расчет элементов его схемы.
- Владеть представлением о современной элементной базе импульсных устройств.
- 

**Экзаменационные билеты:**

**Билет №1**

1. Виды импульсных сигналов. Параметры прямоугольного импульса
2. Нелинейные элементы. Полевой транзистор, IGBT.

**Билет №2**

1. Спектры импульсных сигналов.
2. Нелинейные элементы. IGBT, тиристор.

**Билет №3**

1. Интегрирование и дифференцирование импульсных сигналов. Преобразования спектра.
2. Операционные усилители. Схемы усилителей на ОУ.

**Билет №4**

1. Схемотехника интегрирующих и дифференцирующих цепей. Интегратор на ОУ.
2. Параметры больших и малых сигналов ОУ.

**Билет №5**

1. Фильтры импульсных сигналов. Типы фильтров. Их АЧХ и ФЧХ.
2. Операционные схемы на ОУ.

**Билет №6**

1. Импульсные трансформаторы: Закон Фарадея. Эквивалентная схема трансформатора.
2. Компараторы. ПОС в компараторе.

**Билет №7**

1. Рабочая полоса частот трансформатора.
2. Оптроны. Волоконная оптика.

**Билет №8**

1. Трансформаторы тока. Эквивалентная схема.
2. Логические элементы: ТТЛ, ЭСЛ логика.

**Билет №9**

1. Магнитные материалы, используемые в трансформаторах. Их параметры.
2. Логические элементы. КМОП логика, аналоговые ключи.

**Билет №10**

1. Факторы, влияющие на потери в трансформаторах.
2. Примеры генераторов на логических элементах.

**Билет №11**

1. Пример расчета силового трансформатора.
2. Интегральный таймер 555.

**Билет №12**

1. Пример расчета сигнального ВЧ трансформатора.
2. ЦАП-ПКС. Получение ШИМ-сигнала.

**Билет №13**

1. Длинные линии. Параметры длинной линии.
2. Типы ключевых преобразователей.

**Билет №14**

1. Отражения от длинных линий. Коэффициент отражения.
2. Делители напряжения. Компенсированный делитель.

**Билет №15**

1. Примеры применения длинных линий.
2. Измерители тока. Шунт, трансформатор тока, измеритель тока на датчике Холла (LEM).

**Билет №16**

1. Формирователь прямоугольных импульсов на длинной линии
2. АЦП интегрирующего типа.

**Билет №17**

1. Быстрые АЦП. Одно- и двухтактные АЦП.
2. Источники э/м помех и методы борьбы с ними.

**Литература**

1. *Ерофеев Ю. Н.* Импульсная техника. М. «Высшая школа» 1984.
2. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: «Мир» 1998.
3. *Степаненко И. П.* Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., Энергия 1973.
4. *Гутников В. С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л., Энергоатомиздат, 1988.
5. *Семенов Б. Ю.* Силовая электроника для любителей и профессионалов М., «Солон-Р» 2001.

## ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ СВЧ

### Программа практикума

(4 курс, 7 сем., 72 ч., диф.зачет)

*Доцент, к.т.н. Запрягаев Игорь Александрович*

*Ассистент Чернов Константин Николаевич*

«Практикум по электродинамике СВЧ» предназначен для практического знакомства студентов-физиков с основными СВЧ элементами широко используемые в СВЧ технике, с методами и спецификой проведения радиоизмерений на сверхвысоких частотах; для закрепления теоретических знаний полученных в ходе изучения курсов «Электродинамика сверхвысоких частот» и «Излучение и распространение радиоволн». Основной целью освоения дисциплины является: ознакомление с методами и спецификой проведения радиоизмерений на сверхвысоких частотах, практическое знакомство с основными СВЧ элементами, которые широко используются в СВЧ-технике, получение практических навыков работы с различными СВЧ приборами.

### Структура и содержание дисциплины

#### **1. Исследование ферритового циркулятора.**

Цель работы: Изучение работы ферритового циркулятора в качестве бесконтактного высокочастотного коммутатора и определение коэффициентов его матрицы рассеяния. Микроамперметр используется в качестве индикатора уровня мощности, регулируемой встроенным в генератор аттенуатором, что избавляет от необходимости калибровки детекторного диода.

#### **2. Исследование направленного ответвителя.**

Цель работы: Направленный ответвитель служит для ответвления незначительной части мощности, проходящей по линии передачи, при этом практически не вносит рассогласования в линию. Требуется определить основные параметры направленного ответвителя: переходное затухание и направленность на различных частотах с использованием прецизионного аттенуатора.

#### **3. Измерение мощности СВЧ.**

Цель работы: Ознакомление с различными способами измерения СВЧ мощности. Работа посвящается измерению мощности непрерывного сигнала и импульсно-модулированных сигналов различной формы.

**4. Измерение полных сопротивлений с помощью измерительной линии.**

Цель работы: Изучение работы измерительной линии, калибровка детектора измерительной линии. Измерение КСВН и фазы коэффициента отражения, определение полных сопротивлений с помощью диаграммы Смита для различных нагрузок.

**5. Измерение отражений от четырехполюсников.**

Цель работы: Измерение коэффициентов отражения от четырехполюсника. Исследуемым четырехполюсником служит волноводно-коаксиальный переход. Измерения проводятся методом Татаринова и методом Вайсфлоха.

**6. Измерение параметров волноводных диафрагм.**

Цель работы: Волноводный импедометр предназначен для измерения полных сопротивлений волноводных нагрузок. В данной работе исследуются волноводные диафрагмы: симметричная емкостная, симметричная индуктивная и резонансная. Результаты измерений сравниваются с расчетными.

**7. Измерение добротности резонатора.**

Цель работы: Исследование перестраиваемого цилиндрического резонатора. Расчет собственной добротности при нескольких положениях поршня. Измерение нагруженной добротности по величине полосы резонатора, для различных индуктивных петель связи, при нескольких положениях поршня.

**8. Измерение полей в объемном резонаторе методом малого возмущающего тела.**

Цель работы: Расчет структуры электромагнитных полей в объемном резонаторе, возбуждаемом на  $H_{011}$  моде колебаний, по двум направлениям: вдоль оси резонатора, поперек оси резонатора, методом малого возмущающего тела. В качестве возмущающих тел используются эбонитовый и дюралюминиевый шарики. Резонатор возбуждается частотно-модулируемым сигналом. На вход осциллографа, синхронизированного модулирующим напряжением, подается сигнал с детектора. Измерение резонансной частоты проводятся по шкале осциллографа градуированной по частоте.

**9. Рупорные и линзовые антенны.**

Цель работы: исследование диаграмм направленности рупорных и линзовых антенн. В данной работе снимаются диаграммы

направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и поляризационные диаграммы рупорных и линзовых антенн. Селективный усилитель служит в качестве индикатора уровня мощности, а прецизионный аттенуатор позволяет поддерживать постоянную мощность, поступающую на детекторный диод, что избавляет от необходимости калибровки детектора.

#### **10. Измерение добротности объемных резонаторов с помощью панорамного измерителя коэффициента передачи и КСВН.**

Цель работы: Панорамный измеритель позволяет измерять частотную зависимость: коэффициента передачи, если исследуемый объект, включен как четырехполосник; коэффициента отражения, если исследуемый объект, включен как двухполосник. В качестве исследуемого объекта используется цилиндрический резонатор с переходными волноводными фланцами и диафрагмами. По измеренному ослаблению и КСВН рассчитывается нагруженная и собственная добротности резонатора.

#### **11. Исследование видов волн в бипериодической ускоряющей структуре.**

Цель работы: Векторный анализатор цепей Network Analyzer #5230A PNA-L (Agilent Technologies) позволяет проводить измерения комплексных S-параметров исследуемого многополюсника. В качестве исследуемого объекта используется модель бипериодической ускоряющей структуры. Частотные измерения позволяют определить частоты, на которых происходит возбуждение стоячих волн в бипериодической ускоряющей структуре, а измерение сдвига фаз между соседними ячейками позволяет определить тип этой волны.

#### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать основные приемы и методы проведения радиоизмерений на сверхвысоких частотах
- Уметь на практике применять теоретические знания: правильно поставить задачу, выбрать соответствующую схему измерений, подобрать необходимое СВЧ оборудование и провести требуемые радиоизмерение

- Владеть представлением об принципе действия и физических процессах происходящих в СВЧ элементах и приборах, которые широко используются в СВЧ технике

**Перечень примерных контрольных вопросов и заданий для выполнения лабораторных работ**

*Исследование ферритового циркулятора*

1. Объяснить работу щелевого моста.
2. Описать работу ферритового циркулятора.
3. Какими параметрами характеризуется циркулятор?
4. Из чего складывается погрешность измерения недиагональных элементов матрицы рассеяния?
5. В чем заключена погрешность измерения диагональных элементов  $S$ -матрицы?
6. Какой физический эффект используется в ферритовых циркуляторах, в чем его суть?

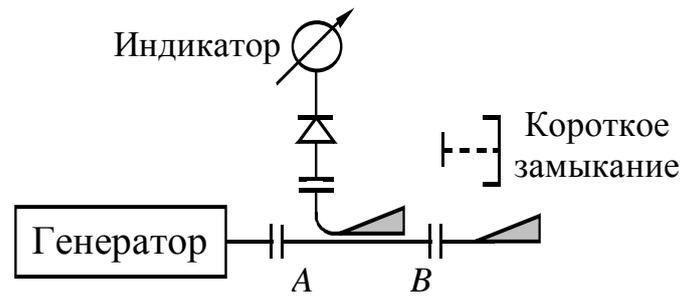
7. Обосновать формулу  $S_{m} = 20 \cdot \lg \left[ \frac{10^{\frac{P_2^* - P_1^*}{20}} - 1}{10^{\frac{P_2^* - P_1^*}{20}} + 1} \right]$  [дБ]. Как измерить

фазы коэффициентов матрицы рассеяния в данной работе?

*Исследование направленного ответвителя*

1. Какими параметрами характеризуется направленный ответвитель?
2. Объяснить работу направленного двухдырочного ответвителя со связью на узкой стенке.
3. Описать методику проведения измерений параметров направленного ответвителя.
4. Посмотреть в основной канал исследуемого направленного ответвителя и объяснить структурные особенности элементов связи.
5. Качественно объяснить, как будет меняться величина направленности  $\nu$  ответвителя с двумя отверстиями в общей узкой стенке при изменении расстояния между отверстиями от 0 до  $\lambda$ .
6. Качественно объяснить, как будет меняться величина переходного ослабления  $\xi$  ответвителя с двумя отверстиями в общей узкой стенке при изменении расстояния между отверстиями от 0 до  $\lambda$ .
7. Если направленный ответвитель применяется для определения согласования в тракте, а его направленность  $\nu \neq \infty$ , то какова погрешность измерения коэффициента отражения.

8. Из чего складывается погрешность измерения  $\nu$  и  $\xi$  по методике предложенной в выполняемой работе.
9. Можно ли пользуясь схемой, измерить направленность ответвления?



*Измерение мощности в диапазоне СВЧ*

1. Расскажите о классификации ваттметров:
  - а) по способу включения в передающий тракт,
  - б) по характеру измеряемой мощности,
  - в) по уровню средних измеряемых мощностей,
  - г) по виду используемых преобразователей.
2. Объясните работу калориметрического измерителя мощности.
3. Объясните работу термоэлектрического измерителя мощности.
4. Объясните работу болометрического измерителя мощности.
5. Что такое термистор? Его отличия от болометра?
6. Как работает самобалансирующаяся мостовая схема?
7. Почему термистор располагается в приемном преобразователе на расстоянии от  $\lambda/4$  короткозамкнутого конца?
8. В чем заключена основная погрешность измерения мощности калиброванной детекторной головкой?

*Измерение полных сопротивлений с помощью измерительной линии*

1. Изобразить структуру полей в прямоугольном волноводе при колебаниях  $H_{10}$ ,  $E_{11}$ ,  $H_{11}$ .
2. Написать формулы, по которым определяются критические длины волн в волноводе для  $E$  и  $H$ -волн.
3. Написать формулы, определяющие длину волны, фазовую скорость, групповую скорость в прямоугольном волноводе.
4. Дать понятие о волновом сопротивлении волновода.
5. Как возбудить волновод на заданном типе волны?

6. Для чего и как производится калибровка детектора в измерительной линии?
7. Указать на источники погрешности при измерении КСВН измерительной линией.
8. Устройство измерительной линии.
9. Объяснить назначение и использование диаграммы Смита.
10. Дать определение коэффициента отражения ( $\Gamma$ ) и связь его с КСВН.
11. Какова связь между величиной полного сопротивления и  $\Gamma$ ?

*Измерение отражений от четырехполюсников*

1. Какой основной тип волн, распространяющихся в коаксиальной линии?
2. В чем заключается суть методов Татаринова и Вайсфлоха для измерения КСВН четырехполюсников?
3. Какими параметрами характеризуются четырехполюсники?
4. Написать матрицу рассеяния взаимного четырехполюсника без потерь. Какова связь, между коэффициентами матрицы рассеяния таких четырехполюсников?
5. Каково расстояние в длинах волн между точками  $x_2'$ , и  $x_2''$  на рис. 9?
6. Указать источники погрешности измерения коэффициента отражения при выполнении работы.
7. Объяснить, что такое эквивалентная ширина щели.
8. Сравнить значения рабочей длины волны, измеренные тремя способами:
  - а) с использованием волномера генератора;
  - б) с использованием измерительной линии;
  - в) с использованием короткозамыкающего поршня.

*Измерение параметров волноводных диафрагм*

1. Индуктивная диафрагма, её принцип действия и эквивалентная схема. Реальная диафрагма обладает конечной толщиной, поэтому ее проводимость должна отличаться от рассчитанной по формуле  $B_L = -\frac{\Lambda}{b} \operatorname{ctg}^2 \left[ \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot b} \right]$  величины. Указать в какую сторону будет отличие и почему?

2. Ёмкостная диафрагма, её принцип действия и эквивалентная схема. Реальная диафрагма обладает конечной толщиной, поэтому ее проводимость должна отличаться от рассчитанной по формуле

$$B_c = \frac{4 \cdot a}{\Lambda} \ln \left[ \operatorname{cosec} \left( \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot a} \right) \right], \text{ величины. Указать в какую сторону будет от-}$$

личие и почему?

3. Резонансная диафрагма, ее принцип действия и эквивалентная схема.

4. Указать источники погрешностей при измерении полных сопротивлений импедометром; требования, предъявляемые к отдельным узлам импедометра, для уменьшения погрешностей.

5. Дать сравнительный анализ работы измерительной линии и импедометра.

6. Можно ли грубо измерить полное сопротивление нагрузки, пользуясь только одним фазометром?

7. Объяснить назначение и использование диаграммы Смита.

#### *Измерение добротности резонатора*

1. Дать определение собственной и нагруженной добротности резонатора.

2. Какие простейшие типы колебаний имеют место в цилиндрическом резонаторе? Структура их полей.

3. Записать выражение для собственных частот колебаний в цилиндрическом резонаторе для  $E$  и  $H$  видов колебаний.

4. Описать методику измерений добротности резонатора в данной работе и объяснить её достоинства и недостатки.

5. Какова эквивалентная схема резонатора вблизи резонансной частоты?

6. Указать источники погрешности определения добротности по методике данной работы.

7. Обосновать формулу  $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$ .

#### *Измерение полей в объемном резонаторе методом малого возмущающего тела*

1. Описать и объяснить методику измерения распределения полей в резонаторе, используемую в данной работе.

2. Каким образом можно измерить все компоненты напряженности электрического и магнитного полей в резонаторе?

3. Какие простейшие типы колебаний имеют место в цилиндрическом резонаторе; их структура?

4. Записать выражение для собственных частот колебаний в цилиндрическом резонаторе. Какими параметрами характеризуется объемный резонатор?

5. Как, пользуясь методом малых возмущений, определять характеристическое сопротивление резонатора?

6. Рассказать, как определить экспериментально диэлектрическую проницаемость пробного тела –  $\varepsilon$ , имея цилиндрический резонатор с колебаниями  $E_{010}$  (Объем пробного тела  $\Delta V \ll V$ ,  $V$  – объем резонатора; форма пробного тела – цилиндрическая).

#### *Рупорные и линзовые антенны*

1. Назовите основные параметры, характеризующие работу антенн.

2. Что такое поляризационная диаграмма антенны и её связь с эллипсом поляризации?

3. Объяснить работу ускоряющей линзы.

4. Каков характер фазовых и амплитудных искажений в раскрыве рупорной антенны, и какое влияние они оказывают на диаграмму направленности?

5. Из каких соображений выбирают оптимальные размеры рупора?

6. Из каких соображений выбирается оптимальный показатель преломления линзы?

7. Как должны быть ориентированы пластины линзы по отношению к плоскости поляризации поля  $E$ .

#### *Измерение добротности объемных резонаторов с помощью панорамного измерителя коэффициента передачи и КСВН*

1. Нарисовать картину электрического и магнитного поля в резонаторе для колебаний  $E_{110}$ .

2. Можно ли в исследуемом резонаторе возбудить  $H$ -колебания?

3. Влияет ли выбор той или иной диафрагмы на значение резонансной частоты? Ответ обоснуйте.

4. Как влияет использование индуктивных диафрагм на добротность резонатора?

5. Как влияет на добротность использование емкостных диафрагм?

6. То же самое – для резонансных диафрагм. Ответы обоснуйте с помощью эквивалентных схем.

7. Объясните с физической точки зрения, что такое критическая связь.

### Литература

1. Милованов О.С., Собенин Н.П., Техника сверхвысоких частот , 1980г
2. Лебедев И.В., Техника и приборы СВЧ , т. I, М. Высшая школа, 1970г
3. Микаэлян А.Л., Теория и применение ферритов на СВЧ, 1963г.
4. Марков Г.Г., Сазонов Д.М., Антенны , М.-Л., 1975г
5. Мирский Г.Я., Радиоэлектронные измерения, 1975г
6. Тишер Ф., Техника измерений на СВЧ, М. 1973г
7. Гинзтон Э.Л., Измерения на сантиметровых волнах
8. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров И.Р., Баймуратов Е.А., Измерение мощности на СВЧ
9. Дворяшин Б.В., Кузнецов Л.И., Радиотехнические измерения
10. Валитов Р.А., Сретинский В.Н. Радиоизмерения на СВЧ , 1958г
11. Фрадин А.Э., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенн , 1962г
12. Стариков В.Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий , М., 1972г
13. Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г., Электрорадиоизмерения, 1986
14. Калинин В.И., Герштейн Г.М., Введение в радиофизику , 1957г
15. Вайнштейн Л.А., Электромагнитные волны, 1970
16. Радиофизический практикум, Саратов, 1966г
17. Никольский В.В., Электродинамика и распространение радиоволн, 1973
18. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф., Специальные функции, Наука, 1977
19. Фрадин А.Э., Антенно-фидерные устройства, М., 1977.
20. Карлинер М.М., Электродинамика СВЧ, Новосибирск, 2006.

## ТЕОРИЯ СИГНАЛОВ

**Программа курса лекций**  
(4 курс, 8 сем., 32 ч., экзамен)

*Старший преподаватель, Сеньков Дмитрий Валентинович*

Дисциплина "Теория сигнала" предназначена для обучения студентов физиков основам анализа электромагнитных сигналов. Основной целью дисциплины является ознакомление с методами выделения полезного сигнала из выходной реакции радиотехнических систем при наличии помех.

- Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса
- 1.2.1 Ознакомление с основами теории представления сигналов
  - 1.2.2 Ознакомление с основами преобразования сигналов
  - 1.2.3 Ознакомление с основами теории фильтрации сигналов

### Структура и содержание дисциплины

#### **1. Сигналы. Основные понятия, определения, характеристики**

Предмет и структура курса, Понятие сигнала, модели и моделирование, физические модели, информация, формализованное представление сигнала. Классификация сигналов. Детерминированные и случайные сигналы. Параметры сигнала. Отображения сигналов. Задачи теории сигналов.

#### **2. Концепция линейного пространства**

Множества. Поле скаляров. Линейные пространства. Метрические пространства. Представление элементов векторного пространства со скалярным произведением. Модель физического пространства.

#### **3. Линейные пространства теории сигналов**

Линейные пространства сигналов. Пространства функционалов. Линейные преобразования. Линейные операторы, Пространство билинейных функционалов.

#### **4. Линейные представления сигналов**

Дискретные представления. Интегральные представления. Преобразования Лапласа. Преобразование Гильберта. Преобразование Меллина.

#### **5. Свойства линейных преобразований**

Свойства операторов преобразований Фурье. Примеры спектров простейших периодических сигналов. Оператор интегрального представления.

Формулы суммирования Пуассона, Спектральные плотности простейших сигналов.

#### **6. Сигналы с ограниченным спектром**

Теоремы отсчетов. Плоскость время-частота. Представление узкополосных сигналов. Модулированные колебания. Корреляционная функция аналитического сигнала. Полосовая фильтрация.

#### **7. Корреляционный анализ детерминированных сигналов**

Энергетические спектры сигналов. Корреляционные функции сигналов. Кросскорреляционная функция. Автокорреляционная функция.

#### **8. Линейные преобразования сигналов**

Блок-схемы линейных операторов. Интегральные уравнения. Дифференциальные уравнения. Функция Грина. Матрица перехода. Стационарные системы. Представление линейных операторов. Интегральные представления операторов. Спектральное представление операторов. Информационные системы. Преобразующие устройства. Динамические системы. Двухполосники. Импульсная реакция и переходная функция. Методы расчета импульсных реакций стационарных систем. Преобразования сигналов радиотехническими цепями. Четырехполосники. Задачи синтеза фильтров.

#### **9. Дискретная обработка сигналов**

Структурная схема цифровой обработки сигналов. Характеристики дискретных сигналов, Дискретное преобразование Фурье. Преобразование Гильберта действительной последовательности. Цифровые фильтры. Цифровые системы в пространстве состояний. Многополосники. Двухполосники. Дискретная матрица перехода. Характеристики цифровых преобразователей.

#### **10. Случайные сигналы**

Стохастические процессы. Стационарные процессы. Марковские процессы, Корреляционные характеристики случайных функций. Центральная предельная теорема. Модели случайных процессов. Белый шум. Модели случайных импульсных процессов. Обобщенный телеграфный сигнал. Кодированные сигналы.

#### **11. Преобразование случайных сигналов линейными системами**

Стохастические дифференциальные уравнения. Случайные воздействия с произвольным законом распределения. Воздействие белого шума на линейную систему. Идеальный фильтр.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

По окончании изучения указанной дисциплины студент должен

- иметь представление об особенностях постановки и решения задач фильтрации сигналов.
- знать основы теории представления и преобразования сигнала
- уметь решать задачи анализа и синтеза различных преобразующих сигнал радиотехнических устройств

**Примеры вопросов контрольной работы**

1. Сигналы с ограниченным спектром. Теорема Котельникова.
2. Вариационная задача без ограничений. Градиент линейного и квадратичного функционала
3. Спектр сигнала с угловой модуляцией.
4. Реализация однополосного АМ сигнала с помощью полосового фильтра.

**Образцы тем коллоквиума**

• **Линейные представления сигналов**

Дискретные представления. Обобщенные ряды Фурье. Спектры представления. Теорема проектирования. Полные ортонормальные системы. Неравенство Бесселя. Ошибка представления. Равенства Парсеваля. Примеры полных ортонормальных систем.

Интегральные представления как предельный переход от дискретного к непрерывному представлению. Интегральные преобразования Фурье. Формулы обращения Римана-Меллина. Преобразование Лапласа. Преобразование Гильберта. Аналитический сигнал. Преобразование Меллина.

• **Свойства линейных преобразований Фурье**

Спектры сигналов с измененными началами отсчетов значений и времени, произведения сигналов, свертки сигналов, смещение спектров сигналов, спектры продифференцированных и проинтегрированных сигналов, спектр сжатого во времени сигнала. Дуальные соотношения. Спектры сингулярных функций. Спектры унитарного импульса, меандра, унитарного треугольного импульса. Скорость убывания спектра. Спектр группы одинаковых и равноотстоящих импульсов. Теорема перемножения. Колоколообразный (гауссовский) импульс.

### **Литература**

1. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.

### **Дополнительная литература**

1. Васильев Д.В., Витель М.Р. и др. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1982. 528 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. шк., 1988. 448 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
4. Зюко А.Г. Элементы теории передачи информации. Киев: Техника, 1969. 300 с.

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ РАДИОФИЗИКА

### Программа курса лекций

(4 курс, 8 сем., 32 ч., диф.зачет)

*Старший преподаватель, к.ф.м.н. Шиховцев Игорь Владимирович*

Дисциплина «Статистическая радиофизика» имеет своей целью ознакомление студентов со случайными процессами, их моделями и методами описания применительно к задачам радиофизики, ознакомление с математическим аппаратом описания спектральных и корреляционных характеристик случайных процессов при преобразовании в типовых звеньях радиотехнических устройств, ознакомление с влиянием шумов на работу автоколебательных систем, анализом узкополосных случайных процессов, описанием приема сигналов в условиях шумов и знакомство с элементами теории информации.

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Предмет статистической радиофизики.

#### 2. Случайные процессы и методы их описания

Понятие случайного процесса. Функция и плотность распределения. Средние значения и моменты случайных величин. Корреляционная функция. Стационарные случайные процессы. Характеристическая функция. Разложение характеристической функции. Спектральная плотность. Теорема Винера – Хинчина. Белый шум. Эргодическое свойство случайных процессов. Дисперсия временного среднего. Выбор времени усреднения.

#### 3. Модели случайных процессов

Нормальные процессы: характеристическая функция и плотность распределения, центральная предельная теорема, свойства нормального случайного процесса, условная плотность нормального распределения, предсказание случайных процессов, распределение Релея. Марковские случайные процессы: уравнение Смолуховского, нормальные марковские случайные процессы, диффузионные процессы, уравнения Колмогорова, процессы с независимыми приращениями, белый шум и винеровский процесс. Дробовой шум: распределение Пуассона, пуассоновский поток дельта-импульсов, модель дробового шума, среднее значение и функция корреляции дробового шума, энергетический спектр дробового шума, формула Шоттки. Тепловой шум. Шумы приемных антенн. Фликер-шум.

#### 4. Преобразования случайных процессов в линейных системах

Основные соотношения из теории цепей. Линейная фильтрация. Интегральные характеристики линейного фильтра. Преобразование белого шума линейным фильтром. Нормализация случайного процесса. Корреляция шумов на выходе линейных систем. Вероятностная сходимость случайной функции. Условие непрерывности случайных процессов. Условия дифференцируемости случайных процессов. Свойства производной случайного процесса.

#### **5. Преобразования случайных процессов в нелинейных системах**

Корреляционная функция на выходе плавных нелинейностей. Двусторонний квадратичный детектор. Корреляционная функция на выходе кусочно-ломаных нелинейностей. Корреляционная функция на выходе предельного ограничителя. Корреляционная функция на выходе одностороннего линейного детектора. Корреляционная функция на выходе двустороннего линейного детектора. Энергетический спектр на выходе нелинейного элемента. Вероятность распределения на выходе нелинейного элемента: взаимнооднозначное преобразование, двусторонний квадратичный детектор, односторонний квадратичный детектор. Анализ работы автогенератора при наличии шума: уравнение генератора, решение уравнения методом линеаризации, характеристики фазы и амплитуды, спектральная плотность колебания.

#### **6. Узкополосные случайные процессы.**

Функция корреляции узкополосного случайного процесса. Аналитический сигнал. Корреляционная функция сопряженного процесса. Взаимная корреляция сопряженных процессов. Корреляционные свойства квадратурных составляющих. Распределение огибающей и фазы нормального узкополосного шума. Распределение огибающей смеси сигнала и узкополосного нормального шума. Распределение фазы смеси сигнала с шумом. Теорема Котельникова.

#### **7. Прием сигналов на фоне шумов.**

Оптимальный фильтр. Согласованный фильтр. Корреляционный прием. Отношение правдоподобия и обнаружение сигнала. Критерии обнаружения: критерии максимального правдоподобия и идеального наблюдателя, критерий Неймана – Пирсона.

#### **8. Элементы теории информации.**

Количественное определение информации. Средняя собственная и взаимная информация. Свойства средней собственной и взаимной информации. Пропускная способность канала. Теорема Шеннона о помехоустойчивом кодировании.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать природу случайных явлений в радиофизических системах и знать методы математического описания случайных процессов.
- Уметь определить основные статистические характеристики случайных процессов при решении конкретных задач.
- Владеть математическим аппаратом описания основных статистических характеристик случайных процессов.

***Образцы вопросов к коллоквиуму и письменным опросам  
(по темам)***

**1. Случайные процессы и методы их описания.**

1. Как связаны функция и плотность распределения случайного процесса?
2. Что такое центрирование случайного процесса?
3. Что такое момент  $n$ -го порядка для случайного процесса?
4. Написать выражение для корреляционной функции.
5. Какова связь характеристической функции и плотности распределения случайного процесса?
6. Сформулировать понятие и условие стационарности случайного процесса.
7. Формулы Винера — Хинчина для энергетического спектра. Как соотносятся интегральный масштаб корреляции и интегральная ширина энергетического спектра?
8. Как выбрать интервал усреднения для эргодических случайных процессов?

**2. Модели случайных процессов**

1. Какой процесс называют нормальным? Свойства нормального случайного процесса.
2. Как найти коэффициент корреляции с помощью диаграммы рассеяния?
3. Написать основное уравнение для марковских процессов.
4. Вид корреляционной функции нормальных марковских процессов.
5. Что такое винеровский процесс? Привести пример.
6. Как записать пуассоновский поток  $\delta$ -импульсов?
7. Какова связь дробового шума с «белым» шумом?
8. Что описывает формула Шоттки?
9. Что описывает формула Найквиста?

### **3. Преобразования случайных процессов в линейных системах**

1. Как изменяется спектр случайного процесса при линейной фильтрации? Что такое «окрашенный» шум?
2. Как можно использовать случайный процесс для измерения характеристик линейных систем? Сформулировать условие нормализации случайного процесса на выходе линейной системы.
3. Сформулировать необходимые и достаточные условия непрерывности (дифференцируемости) случайного процесса в среднеквадратическом смысле.
4. Как вычислить корреляционную функцию производной случайного процесса?
5. Как вычисляется дисперсия производной случайного процесса?

### **4. Преобразования случайных процессов в нелинейных системах**

1. Записать преобразование корреляционной функции на выходе нелинейного квадратичного детектора.
2. Что описывает формула Ван-Флека?
3. Как изменяется энергетический спектр случайного процесса при нелинейном преобразовании?
4. Записать закон распределения случайного процесса при взаимно однозначном нелинейном преобразовании.
5. Записать закон распределения случайного процесса при неоднозначном обратном нелинейном преобразовании.
6. Виды шумов в автогенераторе. Укороченные уравнения лампового генератора.
7. Характеристики фазы и амплитуды автогенератора, спектральная плотность колебания.

### **5. Узкополосные случайные процессы**

1. Что такое амплитуда и фаза случайного процесса?
2. Что такое аналитический случайный процесс?
3. Свойства взаимной корреляционной функции сопряженных по Гильберту процессов.
4. Закон распределения огибающей и фазы нормального узкополосного шума.
5. При каких значениях отношения сигнал - шум распределения амплитуды и фазы случайного процесса нормализуются?
6. Сформулировать теорему Котельникова для узкополосных случайных процессов.

**6. Прием сигналов в условиях шумов**

1. Что такое дисперсия ошибки воспроизведения при оптимальной фильтрации?
2. Что такое согласованная фильтрация?
3. Каковы искажения сигнала при корреляционном приеме?
4. Что такое отношение правдоподобия?
5. Какие типы ошибок возникают при принятии решений?
6. Сформулировать основные критерии обнаружения.

**7. Элементы теории информации**

1. Каковы единицы измерения информации?
2. Что такое энтропия сообщения?
3. Как соотносятся средняя собственная и взаимная информации?
4. Когда энтропия сообщения максимальна?
5. Что такое пропускная способность канала связи?
6. Сформулировать теорему Шеннона.

***Билеты***

**Билет №1**

1. Понятие случайного процесса. Функция и плотность распределения. Средние значения и моменты случайных величин.
2. Корреляционная функция на выходе плавных нелинейностей. Двусторонний квадратичный детектор.

**Билет №2**

1. Корреляционная функция.
2. Корреляционная функция на выходе кусочно-ломаных нелинейностей. Корреляционная функция на выходе предельного ограничителя. Корреляционная функция на выходе одностороннего линейного детектора.

**Билет №3**

1. Стационарные случайные процессы. Характеристическая функция. Разложение характеристической функции.
2. Корреляционная функция на выходе двустороннего линейного детектора.

**Билет №4**

1. Спектральная плотность. Формулы Винера – Хинчина.
2. Энергетический спектр на выходе нелинейного элемента.

**Билет №5**

1. Белый шум.
2. Вероятность распределения на выходе нелинейного элемента: взаимно-однозначное преобразование, двусторонний квадратичный детектор, односторонний квадратичный детектор.

Билет №6

1. Эргодическое свойство случайных процессов. Дисперсия временного среднего. Выбор времени усреднения.
2. Виды шумов в автогенераторе. Укороченные уравнения лампового генератора.

Билет №7

1. Характеристическая функция и плотность распределения нормального процесса, свойства нормального случайного процесса.
2. Характеристики фазы и амплитуды автогенератора, спектральная плотность колебания.

Билет №8

1. Условная плотность нормального распределения, предсказание случайных процессов.
2. Функция корреляции узкополосного случайного процесса.

Билет №9

1. Марковские случайные процессы. Уравнение Смолуховского.
2. Аналитический сигнал. Корреляционная функция сопряженного процесса.

Билет №10

1. Нормальные марковские случайные процессы.
2. Взаимная корреляция сопряженных процессов. Корреляционные свойства квадратурных составляющих.

Билет №11

1. Диффузионные процессы. Уравнения Колмогорова,
2. Распределение огибающей и фазы нормального узкополосного шума.

Билет №12

1. Процессы с независимыми приращениями. Белый шум и винеровский процесс.
2. Распределение огибающей смеси сигнала и узкополосного нормального шума. Распределение фазы смеси сигнала с шумом.

Билет №13

1. Пуассоновский поток дельта-импульсов, модель дробового шума.
2. Теорема Котельникова для узкополосных случайных процессов.

Билет №14

1. Среднее значение и функция корреляции дробового шума, энергетический спектр дробового шума, формула Шоттки.
2. Выделение сигнала из шумов оптимальным и согласованным фильтрами.

Билет №15

1. Тепловой шум. Шумы приемных антенн. Фликер-шум.
2. Корреляционный прием. Отношение правдоподобия и обнаружение сигнала.

Билет №16

1. Линейная фильтрация. Преобразование энергетического спектра линейным фильтром.
2. Критерии обнаружения: критерии максимального правдоподобия и идеального наблюдателя, критерий Неймана – Пирсона.

Билет №17

1. Интегральные характеристики линейного фильтра. Преобразование белого шума линейным фильтром. Нормализация случайного процесса.
2. Количественное определение информации. Средняя собственная и взаимная информация.

Билет №18

1. Корреляция шумов на выходе линейных систем.
2. Свойства средней собственной и взаимной информации.

Билет №19

1. Условие непрерывности случайных процессов. Условия дифференцируемости случайных процессов. Свойства производной случайного процесса.
2. Пропускная способность канала. Теорема Шеннона.

**Основная литература**

1. Якубов В.П. Статистическая радиофизика: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2006.
2. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. - М.: Радио и связь, 1982.-624 с.

3. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1976.
4. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. - М.: Наука, 1981.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио, 1969.
6. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем, М.: Радио и связь, 2004.
7. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г.б Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: Примеры и задачи. Учебное пособие для вузов, М.: Сов. радио, 1980.

#### **Дополнительная литература**

1. Бендат Дж., Пирсол А., Прикладной анализ случайных данных, М.: Мир, 1989.
2. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования, М.: «Вузовская книга», 2002.
3. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. М.: Мир, 1989.
4. Данверпорт В.Б., Рут В.Л., Введение в теорию случайных сигналов и шумов, М.: Изд. Иностранной литературы, 1960.
5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1983.
6. Венцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: ФМ, 1962. - 564 с.
7. Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Лекции по статистической радиофизике, часть 1, Учебное издание, Издательство Саратовского университета, 1992.

#### **Интернет-ресурсы**

1. Яневич Ю.М., Задачи приема сигналов и определения их параметров на фоне шумов, Лекции для студентов СПбГУ, [www.phys.spbu.ru](http://www.phys.spbu.ru).

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ****Программа курса лекций**

(1 курс магистратуры, 1 сем., 36 ч., экзамен)

*Доцент, к.ф.м.н. Тиунов Михаил Александрович*

Дисциплина имеет своей целью ознакомление с основами современных методов и программ расчета электродинамических систем, в том числе с новыми методами и программами компьютерного моделирования электродинамических систем, получение практических навыков в расчете электродинамических систем с использованием компьютеров.

Создание современных ускорителей заряженных частиц для фундаментальных исследований и прикладных целей, исследования явлений в физике плазмы, ионосфере, астрофизике и других областях науки немислимы без использования программ компьютерного моделирования электродинамических систем. Успех широкого использования компьютерного моделирования при разработке электродинамических систем связан как с бурным развитием компьютерной техники, так и с разработкой новых эффективных методов расчета таких систем.

**Структура и содержание дисциплины****1. Введение**

Краткое ознакомление с содержанием курса и основными современными дифференциальными и интегральными численными методами расчета электродинамических систем.

**2. Методы расчета электростатических и магнитостатических полей**

Общие свойства статических полей. Дифференциальная формулировка задачи расчета статических полей, граничные условия. Описание численных дифференциальных методов на примере их использования для расчета электронных пушек. Метод конечных разностей, метод конечных интегралов, метод конечных элементов.

Концепция вторичных источников, потенциал простого заряженного слоя. Граничные интегральные уравнения электростатики. Граничные интегральные уравнения линейной магнитостатики, причины их некорректности и способы регуляризации. Численное решение граничных интегральных уравнений с помощью метода коллокации. Повышение

точности расчетов с помощью кубической интерполяции решения, выделения особенностей ядра в узлах коллокации, а также выделения особенностей решения на острых кромках. Расчет нелинейных магнитных систем. Интегральный метод, формулировка и особенности. Метод конечных элементов с использованием двух скалярных потенциалов. Обзор наиболее распространенных программ расчета электростатических и магнитостатических систем.

### **3. Численный расчет ВЧ систем**

Уравнения Максвелла, их формулировка при расчете переходных и установившихся процессов в ВЧ системах. Граничные условия Леонтовича и реально используемые при расчетах ВЧ систем граничные условия на электродинамические поля. Численные методы расчета аксиально-симметричных мод в аксиально-симметричных резонаторах. Численные методы расчета аксиально-несимметричных мод в аксиально-симметричных резонаторах. Расчет критических частот волноводов и потерь в них. Численный расчет периодических ВЧ структур. Численный расчет возбуждения резонатора интенсивным пучком заряженных частиц. Наиболее распространенные программы расчета ВЧ систем, их вычислительные и физические основы и возможности.

### **4. Расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях**

Уравнения движения и уравнения траекторий. Схемы их численного интегрирования. Особенности интегрирования траекторий частиц в магнитном поле.

### **5. Численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц**

Численные методы решения уравнения Пуассона. Модель трубок тока и условия старта. Численный расчет электронных пушек. Численное моделирование транспортировки интенсивных пучков в длинных системах. Обзор и сравнительная характеристика существующих программ.

#### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать основные методы, алгоритмы и программы, используемые для расчета электродинамических полей и систем

- Уметь в конкретном случае выбрать программу для расчета простейших электродинамических систем
- Владеть представлением о современных численных методах и программах для расчета статических и ВЧ электромагнитных полей

Текущий контроль проводится путём приёма практических заданий по расчету простейших электро- и магнитостатических систем, а также электронных пушек.

#### Образцы практических заданий для допуска к экзамену

- Расчет различных простейших электростатических систем:

**Задание 1.** Рассчитать емкость тороида, радиус центральной линии тороида  $b$ , радиус сечения  $a$ ,  $b > a$ . Исследовать ее зависимость от отношения  $a/b$  в диапазоне  $0.1 < a/b < 1$ . Сравнить с аналитическим решением. Построить карту эквипотенциалей для отношений  $a/b = 0.1; 0.3; 0.99$ .

**Задание 2.** Рассчитать взаимную погонную емкость двух параллельных бесконечных цилиндрических проводников (радиусы проводников  $a = 1$  мм и  $b = 2$  мм, расстояние между их осями  $c = 3.1$  мм;  $3.5$  мм;  $4$  мм). Построить карты эквипотенциалей. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 3.** Рассчитать поле вокруг проводящего незаряженного шара радиуса  $a = 1$  мм, находящегося во внешнем однородном электрическом поле  $E = 10$  кВ/см. Вывести график распределения зарядов на поверхности шара. Построить карту эквипотенциалей. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 4.** Рассчитать емкость диска радиуса  $a = 10$  мм и толщиной  $b = 0.1$  мм;  $1$  мм;  $5$  мм. Вывести график распределения зарядов на поверхности диска. Построить карту эквипотенциалей. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 5.** Рассчитать добавку к емкости плоского конденсатора с зазором  $d = 10$  мм за счет выступа на одной из обкладок в виде полусферы радиуса  $R = 0.1$  мм;  $0.5$  мм;  $2$  мм. Построить карты эквипотенциалей вблизи выступа. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 6.** Рассчитать взаимную погонную емкость двух вложенных бесконечных цилиндрических проводников (радиусы проводников  $a = 10$  мм и  $b = 20$  мм, расстояние между их осями  $c = 1$  мм;  $5$  мм;  $9$  мм). Построить карты эквипотенциалей. Сравнить с аналитическим решением.

- Расчет различных простейших магнитоэлектрических систем:

**Задание 1.** Рассчитать индуктивность бесконечно тонкого соленоида, помещенного в магнитный экран, число витков соленоида  $N$ , длина соленоида  $H$  совпадает с аксиальным размером экрана, радиус соленоида  $R$  меньше радиального размера экрана. Исследовать зависимость индуктивности от магнитной проницаемости экрана и от отношения  $R/H$  в диапазоне  $0.1 < R/H < 1$ . Сравнить с аналитическим решением. Построить карту силовых линий магнитного поля соленоида для отношений  $R/H=0.1; 0.3; 1.0$ .

**Задание 2.** Рассчитать магнитное поле вне ферромагнитного шара с магнитной проницаемостью  $\mu$ , радиусом  $a$ , находящегося во внешнем однородном магнитном поле. Вывести график распределения магнитных зарядов на поверхности шара. Построить силовые линии магнитного поля. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 3.** Рассчитать магнитное поле внутри полого ферромагнитного шара с магнитной проницаемостью  $\mu$ , внутренним радиусом  $a$ , внешним радиусом  $b$ , находящегося во внешнем однородном магнитном поле. Построить силовые линии магнитного поля для отношений  $a/b=0.1; 0.3; 0.99$ . Сравнить с аналитическим решением.

- Нахождение формы электродов и расчет характеристик пучка в различных простейших электронных пушках Пирса:

**Задание 1.** Найти форму электродов и рассчитать аксиально-симметричную пушку Пирса с катодом в форме диска радиусом 10 мм и микропервееансом 1. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 2.** Найти форму электродов и рассчитать аксиально-симметричную пушку Пирса с катодом в форме диска радиусом 10 мм и зазором катод-анод 20 мм. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 3.** Найти форму электродов и рассчитать плоскую пушку Пирса с катодом в форме ленты шириной 10 мм и зазором катод-анод 20 мм. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 4.** Найти форму электродов и рассчитать аксиально-симметричную пушку Пирса с катодом в форме части вогнутой сферы радиусом кривизны 100мм с углом раствора  $20^\circ$  и микропервееансом 1. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 5.** Найти форму электродов и рассчитать аксиально-симметричную пушку Пирса с катодом в форме части вогнутой сферы радиусом кривизны 100мм с углом раствора  $30^\circ$  и зазором катод-анод 50 мм. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

**Задание 6.** Найти форму электродов и рассчитать аксиально-симметричную пушку Пирса с катодом в форме части вогнутой сферы радиусом кривизны 100мм с углом раствора  $40^\circ$  и микропервееансом 2. Построить эквипотенциали и осевое распределение электрического поля. Вывести траектории электронов в пушке и характеристики пучка на катоде и на выходе из пушки. Сравнить с аналитическим решением.

***Итоговый контроль. Образцы экзаменационных билетов.***

Итоговый контроль проводится путём приёма экзаменов. К экзамену допускаются только студенты, выполнившие заданные им практические задания. Экзаменационные вопросы охватывают весь объем лекционного курса.

- Раздел – Численные методы расчета электростатических и магнитостатических систем.
- Раздел – Численный расчет ВЧ систем.
- Раздел – Численный расчет траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях.
- Раздел - Численное моделирование стационарных интенсивных потоков заряженных частиц.

Образцы экзаменационных билетов:

**Билет №1.**

Вопрос 1. Основные методы решения задач электростатики. Дифференциальные методы и метод граничных интегральных уравнений. Их сравнение и особенности.

Вопрос 2. Метод конечных разностей.

**Билет №4.**

Вопрос 1. Метод конечных элементов для расчета собственных частот ВЧ-резонаторов. Поиск собственных частот и резонансного распределения полей.

Вопрос 2. Некорректность, возникающая при расчете задач линейной магнитостатики методом граничных интегральных уравнений и способ её преодоления.

**Билет №6.**

Вопрос 1. Расчет электронных пушек. Методы решения уравнения Пуассона. Модель пучка и условия старта.

Вопрос 2. Численное интегрирование уравнения движения заряженных частиц в электромагнитных полях.

**Билет №9.**

Вопрос 1. Расчет нелинейных магнитных систем. Интегральный метод, формулировка и особенности. Метод конечных элементов с использованием двух скалярных потенциалов.

Вопрос 2. Виды конечных элементов.

**Основная литература**

1. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975.
2. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. М.: Мир, 1984.
3. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. М.: Радио и связь, 1984.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
5. А. Лэнгдон, Б. Лозински. Управляемый термоядерный синтез. М.: Мир, 1980, с.354
6. Березин Ю.А., Вшивков В.А. Методы частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск: Наука, 1980.
7. Рошаль А.С. Моделирование электронных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
8. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Советское радио, 1966.

**Дополнительная литература**

9. Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM – интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. Препринт ИЯФ 89-159, Новосибирск, 1989, 67 с.

10. M.A. Tiunov. BEAM – 2D code package for simulation of high perveance beam dynamics in long systems. Preprint Budker INP 98-78, 1998.

11. в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

12. В.М.Fomel, М.А.Tiunov, V.P.Yakovlev, SAM - an Interactive Code for Evaluation of Electron Guns:  
<http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/oldwww/texts/p96-11.ps>

13. Тиунов М.А. Комплекс программ SAM – 2D электростатика, линейная магнитостатика, электронные и ионные пушки. Установка программы: \\GHOST\DATA\USER\SAM\SAM\_Installer\Setup.exe

14. Тиунов М.А., Тарнецкий В.В., Яковлев В.П. Комплекс программ SAM – 2D электростатика, линейная магнитостатика, электронные и ионные пушки. Руководство пользователя: \\GHOST\DATA\USER\SAM\SAM\_Installer\Data\Guides\SAM\_Guide.pdf

## ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

### Программа курса лекций

(1 курс магистратуры, 1 сем., 36 ч., диф.зачет)

*Рубан Александр Анатольевич*

Целью дисциплины является изучение и практическое применение методов автоматизированного проектирования узлов и средств вычислительной техники с использованием современной элементной базы - программируемых логических устройств. Курс знакомит с элементной базой цифровой электроники. Рассматриваются различные интегральные микросхемы, циклы разработки и системы проектирования БИС, ПЛИС.

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Введение

Элементная база цифровой электроники.  
Интегральные микросхемы (ИМС, IC). БИС.  
Специализированные (application specific) БИС.  
Цикл разработки ASIC.

#### 2. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, PLD)

Архитектура ПЛИС фирм ALTERA и XILINX.  
Коммутируемые матричные блоки (CLB)  
Реконфигурируемые модули памяти (EAB)  
Методы конфигурации – PPA, PPS, AS, PS.  
Конфигурационные EEPROM  
Конфигурирование в системе (ISP).  
System-on-chip (SoC)

#### 3. Цикл разработки проекта на ПЛИС.

Создание нового файла проекта. Шаблон (template)  
Выбор семейства ПЛИС  
Текстовый редактор  
Графический редактор  
Сигнальный редактор

#### 4. Языки описания аппаратуры VHDL и AHDL.

Числа, константы, символы  
Булевы выражения

- Логические операторы
- Арифметические операторы
- Реализация условной логики (операторы IF, CASE)
- Компараторы (операторы сравнения)
- Оператор FOR – GENERATE
- Оператор Truth Table
- Примитивы
- Порты
- Комбинационная логика
  - Узел (node)
  - Определение групп
  - Реализация условной логики (IF, CASE)
  - Значения по умолчанию
  - Реализация двунаправленных выводов
- Последовательная логика
  - Регистры
  - Счетчики
  - Цифровые автоматы (state machine)
- Реализация иерархического проекта
  - Макрофункции Altera
  - Пользовательские макрофункции
  - Импорт и экспорт цифровых автоматов.
- Управление синтезом
  - Примитивы LCELL и SOFT

## **5. Системы проектирования ПЛИС – MAX+PLUS и QUARTUS**

- Поддерживаемые устройства PLD (семейства)
- Средства описания проекта
  - Схемный ввод, поддержка языка AHDL, интерфейс с САПР третьих фирм, топологический редактор, иерархическая структура проекта, библиотека параметризуемых модулей
- Средства компиляции проекта
  - Логический синтез и трассировка, автоматическое обнаружение ошибок, поддержка мегафункций по программам MegaCore и AMPP

#### Средства верификации проекта

Временной анализ, функциональное и временное моделирование, анализ сигналов, возможность использования программ моделирования (симуляторов) третьих фирм

#### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате изучения дисциплины студент должен:

- Знать современные технические и программные средства автоматизации проектирования ЭВМ, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, PLD), основы цифровой схемотехники, основные архитектуры ПЛИС и приемы проектирования цифровых схем на основе различных архитектур ПЛИС,
- Владеть современной технологией проектирования средств вычислительной техники, языками описания аппаратного обеспечения, технологией отладки и решения схемотехнических задач.

#### **Практическое задание**

Разработать и моделировать каскадный цифровой фильтр (медианный + ФНЧ) на языке AHDL.

Проект должен иметь иерархическое строение:

- Каскадное включение фильтров +
- Макрофункция медианного фильтра
- Макрофункция ФНЧ.

Верификация проекта должна доказывать правильное функционирование фильтра при наличии на входе импульсного выброса и высокочастотного сигнала.

#### **Литература**

1. Programmable Logic Development System MAX+PLUS(R) Altera Corporation
2. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA: проектирование устройств обработки сигналов. М., ДОДЭКА, 2000.
3. Enhanced VHDL tutorial with applications. <http://www.aldec.com>
4. Enhanced Verilog HDL tutorial with applications. <http://www.aldec.com>

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

### Программа курса лекций

(1 курс магистратуры, 1 сем., 36 ч., экзамен)

*Доцент, к.т.н. Козырев Евгений Владимирович*

Курс лекций имеет своей целью ознакомление с физическими основами работы и принципами устройства различных электронных приборов СВЧ, в том числе с новыми методами генерации и усиления высокочастотной мощности, а также изучение основных характеристик, параметров и важнейших свойств, определяющих их применение для тех или иных исследований.

### Структура и содержание дисциплины

#### *Общие сведения об особенностях СВЧ электроники*

#### **Основные соотношения электроники**

Уравнения Максвелла, уравнения движения и непрерывности. Комплексная теорема Умова–Пойнтинга. Возбуждение объемных резонаторов и волноводов заданными токами свободных зарядов. Теорема Шокли–Рамо о наведенном токе. Пролетный коэффициент.

#### **Приборы О - типа**

*Общие положения для приборов О типа с кратковременным взаимодействием.* Модуляция электронного потока по скорости. Группировка модулированного электронного потока в свободном пространстве. Учет влияния объемного заряда на процесс группировки. Конвекционный ток. Использование резонаторов для преобразования энергии электронного пучка в СВЧ энергию.

*Пролетный клистрон.* Двухрезонаторный усилительный пролетный клистрон. Основные параметры пролетного клистрона. Клистрон в роли генератора. Многорезонаторные клистроны. Клистроны с распределенным взаимодействием.

*Отражательный клистрон.* Группировка электронов в однородном тормозящем поле. Конвекционный ток. Энергетические соотношения взаимодействия электронов с высокочастотным полем в отражательном клистроне. Электронный КПД и зоны генерации.

*СВЧ устройства с непрерывным взаимодействием типа О.* Группировка электронов немодулированного потока в переменном поле стоячей волны. Конвекционный ток. Мощность взаимодействия немодулирован-

ного электронного потока с переменным полем стоячей волны. Моноотрон. Группировка электронов в бегущей волне постоянной амплитуды. Замедляющие системы. Однородные и неоднородные замедляющие системы. Взаимодействие модулированного электронного потока с бегущей волной. Решение самосогласованной задачи взаимодействия электронов с полем замедляющей системы.

*Лампа бегущей волны - ЛБВО. Усилитель обратной волны – ЛОВО. Генераторы прямой и обратной волны.*

#### **Приборы М – типа**

*Магнетрон.* Основные типы колебаний в магнетроне. Статический режим работы цилиндрического магнетрона со сплошным анодом. Парабола критического режима. Многорезонаторный магнетрон. Свойства резонансной системы магнетронных генераторов. Динамический режим работы многорезонаторного магнетрона. Пороговая прямая. КПД магнетрона. Коаксиальный и обращенный магнетроны. Релятивистский магнетрон.

*ЛОВМ и ЛБВМ.* Принцип действия. Характеристики ЛБВМ и ЛОВМ. Усилители М–типа. Амплитроны. Дематроны.

#### **Гироприборы**

Колебания типа циклотронной частоты в магнетронных генераторах. Мазер на циклотронном резонансе. Гиротроны. Лазер на свободных электронах.

#### **Приборы с модуляцией пучка путем его круговой развертки**

Гирокон. Принцип работы гирокона. Магникон и его принцип работы.

#### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать физические основы и явления, используемые в тех или иных приборах СВЧ, особенности применения приборов для конкретных исследовательских и практических целей
- Уметь в конкретном случае выбрать электронный прибор адекватный решению данной проблемы
- Владеть представлением о современном состоянии высокочастотного приборостроения и применении СВЧ приборов для научных и практических целей

### Вопросы к билетам

1. Особенности приборов СВЧ.
2. Какие частоты относятся к СВЧ диапазону.
3. Характеристика приборов О и М типа.
4. Чем отличаются приборы с кратковременным взаимодействием от приборов с длительным взаимодействием.
5. Основной математический аппарат электроники СВЧ.
6. Наведенный ток и особенности его использования в теории электронных приборов. Учет пролетного эффекта.
7. Комплексная теорема Умова–Пойнтинга применительно к возбуждению объемных резонаторов на конкретных примерах.
8. Использование резонаторов и их эквивалентное представление в электронике СВЧ.
9. Линейная теория модуляции электронного потока по скорости. Группировка электронного потока в свободном пространстве.
10. Влияние объемного заряда на процесс группировки.
11. Двухрезонаторный усилительный пролетный клистрон.
12. Основные параметры пролетного клистрона: коэффициент усиления и способы его увеличения, КПД, нагрузочная характеристика.
13. Особенности работы клистрона в режиме генерации.
14. Клистрон – умножитель частоты, его особенности и эффективность.
15. Многорезонаторные клистроны и клистроны с распределенным взаимодействием.
16. Группировка электронов в отражательном клистроне. Электронный КПД и зоны генерации.
17. Монотрон. Группировка электронов немодулированного потока в переменном поле стоячей волны.
18. Однородные и неоднородные замедляющие системы.
19. Группировка электронов в бегущей волне.
20. Усилитель обратной волны – ЛОВО. Генераторы прямой и обратной волны типа О..
21. Статический режим работы цилиндрического магнетрона. Парабола критического режима.

22. Многорезонаторный магнетрон.
23. Динамический режим работы многорезонаторного магнетрона. Коаксиальный и обращенный магнетроны.
24. Принцип действия ЛОВМ и ЛБВМ. Характеристики ЛБВМ и ЛОВМ.
25. Принцип работы гиротронов.
26. Лазер на свободных электронах.
27. Гирокон. Принцип работы гирокона и его эффективность.
28. Магникон и его принцип работы.

#### **Литература**

1. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М: «Сов. Радио», 1973.
2. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М: «Гос. изд-во технико-теоретической литературы», 1956.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М: «Высшая школа», 1972. Т. 1, 2.
4. Козырев Е. В. Электронные приборы СВЧ: Учебное пособие / Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2010.  
<http://www.inp.nsk.su/students/radio/2010/L-1final.pdf>
5. Шевчик В. Н., Трубников Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М: «Советское радио», 1970.
6. Андрушко Л. М., Бурмистенко В. М. Электронные и квантовые приборы СВЧ. М: «Связь», 1974.
7. Березин В. М., Буряк В. С., Гутцайт Э. М. и др. Электронные приборы СВЧ. М: «Высшая школа», 1985.

#### **Дополнительная литература**

1. Горникер Э. И., Карлинер М. М., Козырев Е. В. и др. Гирокон. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979.
2. Калинин В. И., Герштейн Г. М. Введение в радиофизику. М: «Гос. изд-во технико-теоретической литературы», 1957.
3. Карлинер М. М., Козырев Е. В., Максимов А. Ю. и др. Приближенная теория магникона. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1987.
4. Федоров Н. Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. М: «Атомиздат», 1979.
5. T. Lee, "The Design and Performance of a 150 MW Klystron at S-Band", SLAC-Pub-3619, 1985 (A)

6. M.A. LaPointe, J. L. Hirshfield, E.V. Kozyrev, S.V. Shchelkunov, M.Y. Shmelyov, V.P. Yakovlev «Yale Ka-Band Facility for High-Gradient accelerator R&D: Status Report». In Proc. of the PAC 2007, Albuquerque, New Mexico, 25-29 Jun 2007, pp. 2463-2465.
7. LaPointe M.A., Hirshfield J.L., Kozyrev E.V., Nezhevenko O.A., Shchelkunov S.V., Yakovlev V.P. «34 GHz magnicon for a Ka-band test facility», Conference Digest of Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared and millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics (IRMMW – THz 2006), September 18-22, 2006, Shanghai?, China. - /Ed. by. S.C. Shen e. a./ - Piscataway: 2006, - p. 127.
8. Винокуров Н. А. Лазеры на свободных электронах:  
<http://accel.inp.nsk.su/index.php?dir=literature>

## КВАНТОВЫЕ ПРИБОРЫ СВЧ

### Программа курса лекций

(1 курс магистратуры, 2 сем., 32 ч., экзамен)

*Старший преподаватель Чернов Константин Николаевич*

Курс «Квантовые приборы СВЧ» имеет своей целью ознакомление с физическими основами работы и принципами устройства различных квантовых приборов СВЧ, в том числе с методами генерации, усиления и умножения частоты электромагнитных колебаний СВЧ и оптического диапазонов, а также изучение основных характеристик, параметров и важнейших свойств, определяющих их применение для тех или иных исследований.

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Основные физические понятия квантовой электроники

Энергетические уровни квантовых систем. Спонтанное и индуцированное излучения. Коэффициенты Эйнштейна. Отрицательная температура. Условия самовозбуждения квантового генератора. Поперечное сечение индуцированного излучения. Форма и ширина спектральной линии. Когерентность света. Характеристики когерентности электромагнитного излучения.

#### 2. Особенности характеристики квантовых приборов.

Добротность активной среды. Коэффициент усиления и полоса пропускания квантового усилителя. Режим стационарной амплитуды квантового генератора. Шумы схем с активным веществом.

#### 3. Электронный парамагнитный резонанс.

Метод электронного парамагнитного резонанса. Спин-спиновое и спин-решеточное взаимодействие. Магнитная восприимчивость. Экспериментальное наблюдение электронного парамагнитного резонанса. Влияние внутрискристаллического поля.

#### 4. Квантовые парамагнитные усилители радиодиапазона.

Создание инверсной населенности в трехуровневых и четырехуровневых системах. Кристаллы для парамагнитных усилителей. Квантовые парамагнитные усилители резонаторного типа. Парамагнитные усилители бегущей волны. Конструирование квантовых парамагнитных усилителей. Применение парамагнитных усилителей.

**5. Молекулярные генераторы.**

Пучковые квантовые генераторы радиодиапазона. Устройство молекулярного генератора на пучке молекул аммиака. Квантовый генератор на пучке атомов водорода. Квантовые стандарты частоты.

**6. Открытые резонаторы.**

Элементарная теория открытых резонаторов. Добротность и число возбуждаемых типов колебаний открытого резонатора. Открытые резонаторы с зеркалами различной формы. Внутренние типы колебаний и селекция типов колебаний.

**7. Оптические квантовые генераторы на основе диэлектриков.**

Активные среды для лазеров на ионных кристаллах и стеклах. Источники и системы накачки лазеров на ионных кристаллах и стеклах. Устройство оптического квантового генератора на рубине и его работа в режиме свободной генерации.

**8. Газовые оптические квантовые генераторы.**

Общая характеристика газовых лазеров. Особенности конструкции газовых лазеров. Газовый разряд. Процессы, приводящие к инверсии населенностей в плазме газового разряда. Газовый лазер на смеси He – Ne. Ионные лазеры. Лазер на углекислом газе.

**9. Полупроводниковые лазеры.**

Элементарные сведения о полупроводниках. Неравновесные состояния в полупроводнике. Излучательная рекомбинация при межзонных переходах. Инжекция носителей тока через *p-n*-переход. Инжекционный лазер на основе арсенида галлия. Лазеры с электронным возбуждением. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.

**10. Лазеры в системах связи**

Методы модуляции лазерного излучения. Прием оптического излучения. Методы демодуляции.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости,  
промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать физические основы и явления, используемые в тех или иных квантовых приборах, особенности применения приборов для конкретных исследовательских и практических целей
- Уметь в конкретном случае выбрать электронный прибор адекватный решению данной проблемы
- Владеть представлением о современном состоянии развития квантовых приборов для научных и практических целей

### Образцы вопросов для подготовки к экзамену.

#### Основные физические понятия квантовой электроники

1. Энергетические уровни атомов и молекул.
2. Населенности энергетических уровней при термодинамическом равновесии.
3. Переходы микрочастиц между энергетическими уровнями (спонтанные, вынужденные, релаксационные).
4. Получение состояния с инверсной населенностью уровней. Ширина и контур спектральной линии.

#### Характеристики квантовых приборов

1. Добротность активной среды.
2. Коэффициент усиления и полоса пропускания квантового усилителя.
3. Режимы стационарной амплитуды квантового генератора.
4. Шумы схем с активным веществом.

#### Квантовые приборы СВЧ диапазона

1. Электронный парамагнитный резонанс. Кристаллы для парамагнитных усилителей.
2. Создание инверсной населенности в трехуровневых и четырехуровневых системах.
3. Однорезонаторные квантовые парамагнитные усилители (отражательный, проходной резонаторы).
4. Типы резонаторов для парамагнитных усилителей.
5. Парамагнитные усилители бегущей волны.
6. Многорезонаторные парамагнитные усилители. Применение парамагнитных усилителей.

#### Квантовые стандарты частоты

1. Устройство и принцип действия молекулярного и атомного генераторов. Рабочее вещество.
2. Генератор на пучке атомов водорода.
3. Пассивные стандарты частоты (частотный дискриминатор на газовой ячейке, атомно-лучевой стандарт с цезиевым репером частоты).

#### Квантовые приборы оптического диапазона

1. Монохроматичность и когерентность излучения (временная, пространственная когерентности и т.д.).
2. Открытые резонаторы для приборов оптического диапазона.
3. Добротность открытого резонатора. Внутренние типы колебаний открытого резонатора с рабочим веществом.
4. Селекция типов колебаний в открытых резонаторах. Спектр излучения лазера.
5. Мощность излучения оптического квантового генератора.

6. Газовый лазер. Газоразрядные лазеры (общие замечания). Особенности конструкции газовых лазеров.
7. Гелий-неоновый лазер.
8. Ионные лазеры.
9. Лазер на углекислом газе (молекулярный лазер). Химические лазеры. Газовые лазеры с оптической накачкой.
10. Твердотельные лазеры (рубиновый лазер).
11. Режимы работы рубинового лазера (пиковый режим). Быстрое включение и выключение обратной связи в лазерах.

#### Полупроводниковые лазеры

1. Выбор материала для полупроводникового лазера. Уровни и квазиуровни Ферми. Инверсная населенность (отрицательная температура).
2. Инжекция носителей тока через p-n-переход. Инжекционный лазер на основе арсенида галлия.
3. Полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.

#### **Литература**

1. Пантел Р., Путхоф Г. Основы квантовой электроники. М.: Мир, 1972.
2. Страховский Г.М., Успенский А.В. Основы квантовой электроники. М.: Высш. шк., 1973.

#### **Дополнительная литература**

1. Файн В.М., Ханин Я.И. Квантовая радиофизика. М.: Сов. радио, 1977.
2. Ярив А. Квантовая электроника и нелинейная оптика. М.: Сов. радио, 1973.
3. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М.: Мир, 1981.
4. Мэйтлэнд А., Данн М. Введение в физику лазеров. М.: Наука, 1978.
5. Бертен Ф. Основы квантовой электроники. М.: 1971.
6. О'Ши Д., Коллен Р., Родс У. Лазерная техника. М.: Атомиздат, 1980.
7. Пратт В.К. Лазерные системы связи. М.: Связь, 1972.
8. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: Мир, 1981.
9. A.Apolonsky, L.Veisz, E.Fill et al, Hybrid dc-ac electron gun for fs-electron pulse generation. New Journal of Physics **9** (2007) 451.

## ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

### Программа курса лекций

(1 курс магистратуры, 1 сем., 36 ч., экзамен)

*Доцент, к.ф.м.н. Черепанов Владимир Петрович*

Курс лекций «Диагностика пучков заряженных частиц» имеет своей целью: знакомство с физическими основами функционирования и практическими конструкциями различных датчиков параметров пучков заряженных частиц, знакомство с методами получения информации о параметрах пучков, с методами обработки сигналов и с устройствами преобразования сигналов, знакомство с методами построения систем диагностики и управления параметрами пучков заряженных частиц.

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Введение

Уравнения Максвелла. Поля вблизи проводящей стенки. Поле плоской волны. Отражение плоской волны от проводящей стенки, диэлектрика, ферромагнетика. Волновое сопротивление вакуума. Расчёт волнового сопротивления линии. Предел пространственного и временного разрешения электромагнитных датчиков.

#### 2. Электростатические датчики

Классический электростатический датчик положения пучка. Мультипольные моменты заряда изображения. Заряды на  $X$ -электродах датчика. Некоторые конструкции электростатических датчиков положения: симметричная витая, технологичная. Методы формирования нормированного сигнала положения пучка. Классическая схема нормировки на базе усилителей с АРУ. Фазовый метод нормировки. Принцип работы фазового дискриминатора. Электростатический датчик в качестве датчика тока пучка.

#### 3. Методы детектирования сигналов

Диодный детектор синусоидального сигнала. Усреднение шумов. Преобразование частот и синхронное детектирование сигналов. Спектральный анализ. Измерение заряда сгруппированного пучка. Преобразование сигнала и шума. Режим детектирования на 2-й гармонике ВЧ. Оценка уровня шума в терминах заряда пучка. Другой метод восстановления постоянной составляющей.

#### **4. Полосковый и пуговичный датчики**

Полосковый и пуговичный датчики. Способ нормировки и линейность координатной сетки. Координатная сетка датчика положения и датчика квадрупольного момента пучка.

#### **5. Датчики тока изображения**

Теория датчика тока изображения для измерения положения пучка. Азимутальное распределение тока изображения в стенках идеально проводящей круглой цилиндрической камеры канала. Параметры пучка, определяемые по току изображения. Замена интегралов суммами. Оценка времени растекания тока изображения. Точное решение задачи о растекании тока изображения в рамках модели длинного датчика. Практический эффект растекания тока изображения. Датчики тока изображения на канале транспортировки пучков из накопителя ВЭПП-3 в накопитель ВЭПП-4М. Датчики тока изображения на каналах ВЭПП-2000. Широкополосный датчик тока пучка.

#### **6. Измерение параметров не сгруппированного пучка**

Датчик постоянного тока пучка. Измерение параметров пучка по его шумам. Продольные сигналы пучка. Измерение тока и разброса энергии. Поперечные сигналы пучка. Измерение хроматичности, поперечных размеров и среднего смещения пучка.

#### **Феррит на высоких частотах**

Понятие шунтирующего сопротивления. Добротность катушки индуктивности на феррите. Ферритовое кольцо с зазором. Поглощающее свойство ферритов.

#### **8. Длинные линии и трансформаторы**

Длинные линии. Трансформаторы на длинных линиях. Трансформатор без «индуктивности рассеивания». Мостовой трансформатор типа «длинная линия» и его упрощённые версии. Двойной балансный смеситель.

#### **9. Фильтры постоянного импеданса и дуальные цепи**

Фильтры постоянного импеданса. Дуальные ФПИ. ФПИ на отрезках линий. Симметричный ФПИ. Некоторые применения ФПИ и дуальных цепей. Согласование фидера. Многокаскадные ФПИ. Пример применения дуальной цепи. Формирование импульсных сигналов без постоянной составляющей.

#### **10. Адаптивная система управления протонным синхротроном**

Концепция системы управления. Сплайн-интерполирующий ЦАП. Согласование частоты ускоряющего напряжения с уровнем ведущего магнитного поля. Формирование частот ВЧ системы.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости,  
промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

Для текущего контроля успеваемости обучающимся предлагаются следующие темы для самостоятельных докладов:

- Уравнения Максвелла
- Поля вблизи проводящей стенки
- Отражение плоской волны от диэлектрика
- Электростатический датчик положения пучка
- Фазовый метод нормировки
- Измерение заряда сгруппированного пучка
- Методы детектирования сигналов
- Оценка времени растекания тока изображения
- Способы нормировки и линейность сетки
- Измерение тока пучка по шумам
- Трансформатор без индуктивности рассеивания
- Устройства постоянного импеданса
- Феррит на высоких частотах

**Литература**

1. *Мешков И. Н., Чириков Б. В.* Электромагнитное поле. Часть 1: Электричество и магнетизм. Новосибирск: Наука, 1987.
2. *Гольдин Л. Л., Кузьмин А. А.* О форме электродов, измеряющих смещение пучка заряженных частиц. ПТЭ, 1967, №2, с.27.
3. *Брук Г.* Циклические ускорители заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1970.
4. *Москалёв В. А., Сергеев В. И., Шестаков В. Г.* Измерение параметров пучков заряженных частиц // М., Изд-во МГУ, 1980.
5. *Ханзел Г.* Справочник по расчёту фильтров. М.: Советское радио, 1974.
6. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Мир, Т.2 .

*Курс лекций находится по адресам:*

1. [www.inp.nsk.su/students/radio/2007/BD5.doc](http://www.inp.nsk.su/students/radio/2007/BD5.doc).
2. [www.phys.nsu.ru/innovation/2007/Черепанов.pdf](http://www.phys.nsu.ru/innovation/2007/Черепанов.pdf)

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

### Программа курса лекций

(1 курс магистратуры, 2 сем., 32 ч., экзамен)

*Доцент, к.т.н. Беликов Олег Витальевич*

Дисциплина «Прецизионные системы питания электрофизических установок» предназначена для обучения студентов-физиков основным методам и навыкам разработки источников питания, применяющихся на современных электрофизических установках.

Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. Ознакомление с потребностями современных физических установок;
2. Изучения типов преобразователей электрической энергии для различных классов источников питания;
3. Формирование навыков расчёта электрических цепей источников питания;
4. Изучение принципов работы прецизионных измерителей, применяющихся в системах авторегулирования;
5. Рассмотрение современных решений в области автоматизации физических экспериментов.
6. Знакомство с элементами схемотехники современной элементной базы;
7. Ознакомление с примерами устройств современных систем питания электрофизических установок.

### Структура и содержание дисциплины

#### **Введение.**

Ускорители и накопители заряженных частиц: немного истории. Требования, предъявляемые к источникам питания магнитных элементов и электростатических систем. Системы высоковольтного питания ускорителей прямого действия. Системы питания ускорителей с изменяющимся во времени магнитным полем. Влияние источников питания на основные характеристики пучков заряженных частиц. Необходимость разработки специализированных систем питания и управления.

**1. Динамика поперечного движения пучка в циклическом ускорителе.**

**2. Классификация источников питания.**

**3. Высоковольтные источники напряжения.**

3.1 Трансформаторные преобразователи.

3.2 Механические преобразователи.

3.3 Схема удвоения.

3.4 Схема Кокрофта–Уолтона.

3.5 Симметричная схема каскадного генератора.

**4. Полупроводниковые компоненты источников питания.**

4.1 Диод, сапрессор, варистор. Параллельное и последовательное соединение диодов. Расчёт потерь.

4.2 Полевой МОП-транзистор (MOSFET). Расчёт потерь. Эффект Миллера. Параллельное включение полевых транзисторов. Драйверы управления полевыми транзисторами.

4.3 Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Временные диаграммы коммутационных процессов. Драйверы управления IGBT.

4.4 Тиристор. Запираемый тиристор. Симистор.

**5. Типы преобразователей.**

5.1 Электромашинные генераторы.

5.2 Неуправляемые выпрямители. Трёхфазный выпрямитель Ларионова. Двенадцатифазная схема выпрямления. Параллельное соединение выпрямительных мостов

5.3 Управляемый трёхфазный тиристорный выпрямитель.

5.4 Чопперные преобразователи: понижающий, повышающий, инвертирующий.

5.5 Коррекция коэффициента мощности.

5.6 Однотактные преобразователи: прямоходовый и обратногоходовый. Последовательность расчёта трансформатора.

5.7 Двухтактные преобразователи: полумостовой и мостовой.

**6. Элементы источников питания.**

6.1 Скин-эффект.

6.2 Эффект близости.

6.3 Расчёт LC – фильтра.

6.4 Магнитный усилитель.

6.5 Стабилизаторы тока.

6.6 Активные фильтры подавления пульсаций: параметрический стабилизатор, последовательный активный фильтр, параллельное подавление пульсаций.

6.7 Дифференциальные усилители.

6.8 Модуляционно – демодуляционный усилитель.

6.9 Оптический усилитель.

**7. Измерители тока.**

7.1 Шунты.

7.2 Датчики Холла: датчики прямого усиления и датчик компенсационного типа.

7.3 Магнитомодуляционный измеритель тока на 2-й гармонике.

**8. Измерители магнитного поля.**

8.1 Измерительная катушка.

8.2 Датчик Холла.

8.3 Магнитодиоды.

8.4 Магниторезисторы.

8.5 Магнетрон.

8.6 Ядерный магнитный резонанс.

**9. Примеры источников питания для ускорителей и накопителей заряженных частиц.**

10.1 Источники питания поворотных магнитов на примере ИСТ-1000.

10.2 Источники питания квадрупольных линз на примере ВЧ-300.

10.3 Источники питания слаботочных коррекций на примере УМ-6.

10.4 Источники подшунтирования магнитных элементов.

10.5 Модулятор клистрона 5045.

**10. Питание ускорителей прямого действия (ЭЛВ).**

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости,  
промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- Знать физические основы построения систем питания электрофизических установок
- Уметь в конкретном случае квалифицированно выбрать подходящий класс источников питания
- Владеть навыками расчёта нелинейных электрических цепей и устойчивости цепей авторегулирования с обратными связями.

**Темы для докладов**

1. Автоматизированные системы управления и контроля на сложных электрофизических комплексах. Система питания как часть комплекса. Единство подхода к управлению и контролю. Достоверность результатов измерений. Интерфейсы связи источников с компьютером (CANBUS, Ethernet, RS-232 , RS-485) – характеристики основных модулей. Современные тенденции управления.

2. Импульсные устройства ускорителей и накопителей и их питание. Импульсные элементы каналов транспортировки пучков. Формирование высоковольтных наносекундных импульсов. Системы питания импульсных электромагнитов, основные параметры, источники погрешностей. «Трансформатор Тесла». Требования на точность синхронизации.

3. Источник питания как система авторегулирования. Многоконтурные системы стабилизации. Использование параллельного канала. Качественный анализ устойчивости в линейном режиме.

Основные типы регуляторов. Статическая и динамическая ошибки регулирования. Пример системы стабилизации тока в активно-индуктивной нагрузке. Проблемы анализа переходных процессов: необходимость учета нелинейностей, большой диапазон постоянных времени.

3. Импульсные и “квазиимпульсные” системы питания ионных и атомарных источников. Функциональные схемы систем питания. Использование емкостных накопителей и формирующих линий. Зарядные устройства. Динаметрон.

**Экзаменационные вопросы** охватывают весь объем лекционного курса:

- Раздел – классификация источников питания.
- Раздел – полупроводниковые компоненты источников питания.
- Раздел – типы преобразователей.
- Раздел – измерители тока и магнитного поля.

**Основная литература**

1. *Комар Е.Г.* Ускорители заряженных частиц. М. Атомиздат, 1964г.
2. *Семёнов Б.Ю.* Силовая электроника от простого к сложному. М. Солон-пресс. 2006г.
3. *Рама Реди С.* Основы силовой электроники. М. Техносфера, 2006г.
4. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М. Чиженко. Киев. Техника, 1978г.
5. *Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.* Основы преобразовательной техники. М. Высш. шк., 1980г.
6. *Воробьев Г.А., Месяц Г.А.* Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М. Госатомиздат, 1963г.
7. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.

**Дополнительная литература.**

1. *Баклаков Б.А., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М.* и др. М. Прецизионный широкополосный измеритель постоянного тока до 10 кА. // Журнал ПТЭ №6, 1981г.
2. *Веремеенко В.Ф., Карпов Г.В.* Двухкаскадный прецизионный широкополосный трансформатор постоянного тока на 20кА. // Новосибирск. Препринт 87-119, ИЯФ СО АН СССН, 1987г.
3. *Беликов О.В., Беркаев Д.Е., Козак В.Р., Медведко А.С.* Усилители мощности УМ-6 и УМ-20 для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000. // Новосибирск. Препринт 2007-014, ИЯФ СО РАН, 2007г.
4. *Беликов О.В., Медведко А.С., Козак В.Р.* Источник подшунтирования электромагнитов для коррекции параметров пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц. // Новосибирск. Вестник НГУ. Серия: Физика. Том 4, выпуск 3, 2009г.
5. *Казарезов И.В., Серов А.Ф., Токарев Ю.Ф. и др.* Мощный импульсный источник на тиристорах для питания электрофизических установок. // Новосибирск. Препринт 84-12, ИЯФ СО АН СССР, 1984г.

## ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ

### Программа курса лекций

(магистратура 1 курс, 2 сем., 32 ч., диф.зачет)

*Старший преподаватель Тарнецкий Владимир Владимирович*

Дисциплина «Теория колебаний» предназначена для обучения студентов основам математического и физического моделирования нелинейных процессов в радиотехнических системах. Курс посвящен изучению основных моделей колебательно-волновых явлений и процессов, их приложение к конкретным физическим (техническим) ситуациям, и развитие общих методов исследования подобных явлений, независимо от их конкретной природы.

### Структура и содержание дисциплины

#### 1. Введение

Теория колебаний как методологическая дисциплина. Понятие динамической системы (ДС). Принципы идеализации ДС.

#### 2. Колебания в линейных системах

Принцип суперпозиции. Линейный осциллятор. Резонанс. Связанные осцилляторы. Нормальные координаты. Цепочки связанных осцилляторов. Линейные ускоряющие структуры.

#### 3. Теория устойчивости

Понятие устойчивости по Ляпунову. Уравнения возмущенного движения. Устойчивость равновесного состояния и периодического движения. Второй (прямой) метод Ляпунова. Функции Ляпунова. Теорема Ляпунова об устойчивости. Теорема Четаева о неустойчивости. Первый метод Ляпунова. Устойчивость линейных и нелинейных систем.

#### 4. Качественные методы теории колебаний

Фазовое пространство и фазовые траектории. Простые особые точки. Сепаратрисы. Типы движений в консервативных системах. Изохронность. Орбитальная устойчивость. Консервативная модель Вольтерра. Критерий Бендиксона. Индексы Пуанкаре. Предельные циклы на фазовой плоскости. Неавтономные системы. Синхронная многолистная фазовая плоскость. Методы построения фазовых траекторий.

## 5. Аналитические методы теории колебаний

Особенности аналитических методов. Метод малого параметра Пуанкаре. Нерезонансные вынужденные колебания. Задача Дюффинга. Модель Дюффинга и нелинейный резонанс. Собственные периодические колебания нелинейных систем. Вариационные методы. Асимптотические методы. Модель Ван-дер-Поля. Вращающаяся фазовая плоскость. Метод усреднения.

### **Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

По окончании изучения указанной дисциплины студент должен

- иметь представление об особенностях преобразования входных сигналов нелинейными системами .....
- знать основные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений
- уметь рассчитывать основные параметры преобразованного нелинейной системой сигнала.

### **Образцы тем коллоквиумов:**

- a) модель Лоттки-Вольтерра как пример консервативной нелинейной колебательной системы;
- b) применение модели связанных осцилляторов для расчета линейных ускоряющих структур, работающих на стоячей волне;
- c) синхронная многолистная фазовая плоскость, явление субгармонического резонанса.

### **Образцы заданий:**

1. Расчет параметров генератора разрывных колебаний на туннельном диоде.
2. Генератор Ван-дер-Поля. Исследовать зависимость формы автоколебаний от параметров системы.
3. Исследовать расстроичный механизм ограничений в нелинейном параметрическом осцилляторе.
4. Рассчитать и исследовать колебательный процесс в системе трех связанных осцилляторов со слабой квадратичной нелинейностью.
5. Исследовать эффект насыщения в системе двух связанных нелинейных осцилляторов лазера.

*Образцы вопросов для подготовки к дифференцированному зачету*

Билет 6

1. Исходная система уравнений колебательной системы с двумя степенями свободы. Вынужденные колебания с затуханием.
2. Существенно нелинейные вынужденные колебания. Собственные периодические колебания.

Билет 22

1. Применение качественных методов к исследованию неавтономных систем. Синхронная многолистная фазовая плоскость.
2. Метод точечных преобразований в исследовании автоколебательных систем на примере гармонического осциллятора с нелинейным затуханием.

Билет 30

1. Метод точечных преобразований в исследовании автоколебательных систем на примере кватронного генератора.
2. Коэффициенты распределения, связанности и связи в линейной колебательной системе

**Литература**

1. Мандельштам Л.И. Лекции по колебаниям. М.: Наука, 1972.
2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1964.
3. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. М.: Наука, 1964.
4. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
5. Фомель Б.М. Методы теории нелинейных колебаний. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1970.
6. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. М.: Наука, 1983.
7. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.

**Дополнительная литература**

1. Дж. Николис. Динамика иерархических систем. М.: Мир, 1989.
2. В. Вольтерра. Математическая теория борьбы за существование. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004.

## ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

**Программа лабораторного практикума**  
(1 курс магистратуры, 2 сем., 64 ч., диф.зачет)  
*Ассистент Кондауров Михаил Николаевич*

Дисциплина «Цифровые сигнальные процессоры (DSP)» предназначена для обучения студентов кафедры радиофизики использованию современных аппаратных средств для обработки потоков цифровых данных в реальном масштабе времени.

Основными целями освоения дисциплины являются:

1. ознакомление с областью применения и особенностями работы цифровых сигнальных процессоров;
2. получение знаний об аппаратной архитектуре сигнальных процессоров серии ADSP-21xx;
3. обучение практическим навыкам по реализациям алгоритмов обработки сигналов в реальном времени на процессоре ADSP-2189M фирмы Analog Device.

### Структура и содержание дисциплины

#### Вводный курс лекций

Определение DSP (ЦСП) и их роль в современных электронных технологиях; основные характеристики современных ЦСП; основные отличия ЦСП от микропроцессоров общего назначения; обработка сигналов в реальном времени на ЦСП; основные области применения DSP; архитектура ЦСП, особенности архитектуры ЦСП серии ADSP-21xx – память, вычислительные блоки, адресные генераторы, периферийные устройства, последовательные порты, таймер, хост-интерфейс, порт DMA; аппаратные средства разработки устройств на основе DSP; плата EZ-KIT lite; среда разработки VisualDSP фирмы Analog Devices.

#### Работа номер 1. Основные моменты работы в среде VisualDSP.

Аппаратура: компьютер IBM-PC, плата EZ-KIT lite.

Цель работы – обучение навыкам работы со средой разработки программ VisualDSP для DSP фирмы Analog Devices – создание проекта, файлы описания и библиотеки, работа с массивами данных, средства визуализации.

Результатом работы студента является написанная и отлаженная программа на языке “С”, позволяющая с помощью средств VisualDSP вывести на экран компьютера график какой-либо математической функции.

### **Работа номер 2. Основы архитектуры ADSP-21xx**

Аппаратура: компьютер IBM-PC, плата EZ-KIT lite.

Цель работы – обучение студента основам языка “ассемблер” для разработки программ для ЦСП ADSP-2189M – основные регистры и команды процессора, распределение памяти, таблица векторов прерываний, маскирование прерываний, флаги, циклы.

Задание 1. Разработка и отладка простейшей программы управления индикатором - светодиодом на плате EZ-KIT lite.

Задание 2. Разработка подпрограммы обработки аппаратного прерывания.

Задание 3. Работа с таймером – задать частоту прерываний таймера и мигать индикатором при каждом прерывании.

Задание 4. Совместная работа по прерываниям от таймера и от кнопки.

Результатом работы студента являются написанные и отлаженные программы на языке «ассемблер», которые демонстрируют владение студентом основами ассемблера и аппаратными средствами платы EZ-KIT lite.

### **Работа номер 3. Аудио кодек, основы АЦП и ЦАП.**

Аппаратура: компьютер IBM-PC, плата EZ-KIT lite, генератор, осциллограф.

Цель работы – дальнейшее изучение языка “ассемблер”, разработка программы обработки сигнала в реальном времени.

Практическая часть состоит в освоении студентом программирования для аудио кодека, находящегося в составе платы EZ-KIT lite.

Задание 1. Пересылка данных из АЦП в ЦАП.

Задание 2. Цифровая фильтрация сигналов. Перебор алгоритмов фильтрации по кнопке прерывания.

Во вводной части работы изложены основы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования сигналов.

В работе дается описание регистров и команд процессора, необходимых для выполнения данной работы.

Результатом работы студента являются написанные и отлаженные программы на языке «ассемблер», которые демонстрируют владение студен-

том основами ассемблера и аппаратными средствами платы EZ-KIT lite для работы с аудио кодеком.

**Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- иметь представление об основных отличиях цифровых сигнальных процессоров от микропроцессоров общего назначения и их области применения;
- знать особенности архитектуры ЦСП серии ADSP-21xx, аппаратные средства разработки устройств на основе DSP и среду разработки VisualDSP фирмы Analog Devices;
- уметь использовать плату ADSP-2189 EZ-KIT lite в качестве инструмента для управления и обработки цифровых потоков данных в лабораторной работе, написать и отладить программу на «ассемблере», реализующую алгоритм этой обработки.

Выполнение каждой лабораторной работы оценивается дифференциальным образом по пятибалльной шкале. Для этого необходимо правильно выполнить все задания тематических работ и ответить на соответствующие контрольные вопросы. Вопросы могут быть:

- общей направленности для понимания основ аппаратной аналого-цифровой части курса или цифровой обработки сигналов;
- связанные с определенным заданием лабораторной работы для улучшения навыков практической работы с ЦСП и средствами разработки программного обеспечения для них.

Например:

1. Какие могут быть способы вызова прерываний.
2. Как при этом будет выглядеть таблица прерываний и процедура обработки?
3. Как будет выглядеть таблица прерываний и процедура обработки для разных инструкций инструкции CALL или JUMP.
4. Зачем нужен бесконечный цикл в основной программе?
5. Почему надо запретить прерывания от таймера и что будет, если этого не сделать?
6. Сравните изображение входного сигнала с генератора и выходного сигнала на ЦАП при разных частотах. Объясните результат.
7. Покажите зависимость частоты мерцания светодиода от частоты генератора.

8. Какова процедура инициализации регистров при работе с кодеком.
9. Почему невозможно остановить программу командой «Halt»?

Общая дифференциальная оценка за дисциплину выводится по итогам выполнения практических занятий.

### Литература

1. *Кондауров М. Н., Суханов Д. П.* Цифровые сигнальные процессоры: Методическое пособие к практикуму. Новосибирск, 2010. (<http://www.inp.nsk.su/students/radio/lectures/Proc.pdf>).
2. Руководство пользователя по сигнальным процессорам семейства SHARC ADSP-2106x. Санкт-Петербург, 2002. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/SHARC\\_Manual.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/SHARC_Manual.pdf)).
3. Руководство пользователя по сигнальным микропроцессорам семейства ADSP-2100. Analog Devices. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ADSP\\_Guide/Manual.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ADSP_Guide/Manual.pdf))
4. *Комаров А. В.* Цифровые сигнальные процессоры / Обнинск, 2003. (<http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/Комаров.ЦСП.pdf>).
5. ADSP-2181\_EZ-Kit\_Lite. Справочник программиста. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ASM\\_Commands.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ASM_Commands.pdf)).
6. Семейство ADSP-2100. Руководство пользователя ассемблера. Санкт-Петербург, 2001 г. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/DSP\\_ASM.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/DSP_ASM.pdf)).
7. Семейство ADSP-2100. Руководство программирования на С. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/DSP\\_C.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/DSP_C.pdf)).
8. *Ден Кинг и др.* Аппаратура цифровых сигнальных процессоров. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/Введение\\_в\\_DSP.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/Введение_в_DSP.pdf)).
9. ADSP-2189\_EZ-Kit\_Lite. Evaluation System Manual. Analog Devices. ([http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ADSP-2181\\_EZ-Kit\\_Lite.pdf](http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/ADSP-2181_EZ-Kit_Lite.pdf)).
10. *Сотников А.* Введение в VisualDSP++ / «Компоненты и технологии», № 3, 2010. (<http://www.phys.nsu.ru/radio/DSP/Manuals/VisulaDSP.Введение.pdf>).