

# Экспериментальные методы СВЧ

## Лекторы:

Евгений Свечников  
Андрей Саянский



## Язык:

Русский

## Трудоемкость:

3 з.е.

## Форма контроля:

Экзамен

## Образовательная программа:

Беспроводные технологии (магистратура)  
1 семестр

## Пререквизиты:

Общая физика: электричество и магнетизм

Радиотехнические цепи и сигналы

Теория линейных электрических цепей (метод комплексных амплитуд, характеристики цепей в частотной и временной областях, цепи с распределенными параметрами)

Лекции (ак.час)*	Практические занятия (ак.час)	Лабораторные занятия (ак.час)
16		16
*1 академический час = 45 минутам		

Целью курса является формирование у студентов надежных ориентиров в области электрорадиоизмерений, позволяющих эффективно использовать современные методы и аппаратуру в физических экспериментах. Для этого в курсе предусмотрено изучение:

- основ метрологии (понятия, терминология, актуальные нормативные документы);
- специфики решения измерительных задач в разных частотных диапазонах, включая СВЧ;
- принципов действия и особенностей применения современных цифровых измерительных приборов (мультиметров, осциллографов, генераторов, анализаторов спектра и цепей);
- принципов натурального, полунатурного и цифрового моделирования и роли моделей в физическом эксперименте.

Курс сопровождается лабораторным практикумом, в процессе прохождения которого студенты приобретают навыки использования современных радиоизмерительных приборов для решения различных задач. Практикум включает в себя:

- работы базового цикла (выполняются всеми студентами): измерение параметров цепей на низких частотах (мультиметры и измерители RLC), осциллографические измерения, анализ спектров сигналов, векторный анализ цепей в широких частотных интервалах;
- работы специального цикла (состав работ формируется в зависимости от специализации обучения и выбора студентов); примером таких работ могут служить: измерение характеристик рассеяния тел в безэховой камере, измерение диаграмм направленности антенн методом ближнего поля, измерение комплексной диэлектрической проницаемости веществ на СВЧ, измерение характеристик шумоподобных сигналов.

Во всех работах используются современные модели приборов ведущих мировых производителей – **Rohde&Schwarz, Keysight, Anritsu, LeCroy** и др.

## Содержание курса

### 1 курс

#### Экспериментальные методы СВЧ

##### Структура курса

Разделы	Лекции (ак.ч.)	Лабы (ак.ч.)
<b>Часть 1. Общие вопросы измерений в радиофизическом эксперименте</b>		
<p><b>1.1.</b> Прогресс техники измерений за последние полвека, возможности цифровой аппаратуры, современная комплектация лабораторий радиотехнического профиля.</p> <p><b>1.2.</b> Радиофизический эксперимент: основные задачи, область частот, измеряемые величины.</p> <p><b>1.3.</b> Основные положения и понятия метрологии. Актуальные нормативные документы. Характеристики средств измерений, класс точности, классификация погрешностей измерений. Неопределенности типа А и В. Оценивание неопределенностей результатов прямых и косвенных измерений.</p> <p><b>1.4.</b> Представление результатов эксперимента: правила округления и записи результатов измерений, выбор масштабов шкал и единиц измерения на графиках.</p>	4	4
<b>Часть 2. Современные радиоизмерительные приборы</b>		
<p><b>2.1.</b> Мультиметры и измерители RLC. Возможности и ограничения использования цифровых мультиметров. Определение параметров схем замещения реальных элементов цепи с помощью RLC-метров.</p> <p><b>2.2.</b> Осциллографы. Главные характеристики цифровых осциллографов, определяющие пригодность прибора для конкретных измерений - полоса пропускания, граничная частота, разрядность АЦП. Входное сопротивление, использование щупов и режима «50 Ом». Возможности отображения, измерений параметров и математической обработки исследуемых сигналов по нескольким каналам.</p> <p><b>2.3.</b> Измерительные генераторы. Генераторы гармонических сигналов и генераторы сигналов специальной (произвольной) формы. Граничные частоты и максимальная выходная мощность. Регулируемые параметры выходного сигнала. Включение генераторов в измерительную схему.</p> <p><b>2.4.</b> Анализаторы спектра. Принципы последовательного и параллельного анализа спектра. Частотный диапазон и чувствительность. Структурная схема последовательного анализатора с двойным преобразованием частоты. Связь времени анализа с полосой пропускания и уровнем шумов. Возможности и примеры использования современных анализаторов спектра.</p> <p><b>2.5.</b> Анализаторы (параметров) цепей. Коэффициенты отражения и передачи как элементы матрицы рассеяния многополюсника. Принцип выделения падающих и отраженных волн с помощью направленных ответвителей и мостовых схем. Скалярные и векторные анализаторы цепей; частотный диапазон, динамический диапазон, количество портов. Типовая схема двухпортового векторного анализатора цепей и возможности его использования в эксперименте. Особенности портативных анализаторов цепей - приставок к компьютеру.</p>	4	4
<b>Часть 3 Отдельные виды измерений</b>		

<p><b>3.1.</b> Измерение электрофизических параметров материалов и веществ. Удельное электрическое сопротивление и проводимость: методы измерения и примеры использования данных. Комплексные (диэлектрическая и магнитная) проницаемости вещества. Принципиальная возможность экспериментального определения обеих комплексных величин по параметрам волновых процессов в линии передачи. Методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости на разных частотах: метод конденсатора (включая метод открытого конца коаксиальной линии), метод длинной линии и его разновидности, резонансные методы, метод общей глубинной точки. Используемая измерительная аппаратура. Практические примеры определения комплексной диэлектрической проницаемости в различных ситуациях.</p> <p><b>3.2.</b> Измерение характеристик антенн. Общие характеристики антенн и их физический смысл. Методы измерения комплексного входного сопротивления (импеданса) антенн и скалярных характеристик согласования. Использование для измерений векторных анализаторов цепей. Представление входных характеристик антенны на круговой диаграмме полных сопротивлений (диаграмма Вольперта - Смита). Классические методы измерения пространственных характеристик антенны – амплитудной, фазовой и поляризационной диаграмм направленности, коэффициента усиления; понятие ближней, дальней и промежуточной зон поля антенны и их роль в измерениях. Понятие антенного фактора и его связь с коэффициентом усиления. Измерения параметров антенн в безэховых камерах, основные характеристики камер. Коллиматорный метод и метод ближней зоны – требования к аппаратуре и особенности использования. Понятие о шумовых характеристиках антенн и их измерении.</p> <p><b>3.3.</b> Измерение параметров случайных процессов. Типы случайных процессов и сигналов. Измерение спектральной плотности мощности (интенсивности) случайного процесса с помощью анализатора спектра. Понятие о радиометрических измерениях и их значение в прикладных исследованиях (радиоастрономия, дистанционное зондирование земной поверхности, медицина). Использование шумоподобных сигналов для измерения амплитудно-частотных характеристик цепей.</p>	4	4
<p><b>Часть 4.</b> <b>Вопросы подготовки и реализации радиофизического эксперимента</b></p>		
<p><b>4.1.</b> Предварительная оценка ожидаемого результата и необходимой точности измерений.</p> <p><b>4.2.</b> Выбор метода измерений. Принцип соответствия метода измерений назначению результатов исследования. Преодоление ограничений, связанных с доступной аппаратурой.</p> <p><b>4.3.</b> Роль моделирования в экспериментальных исследованиях. Достаточность адекватности модели оригиналу только в отношении предмета исследования. Применение численного, натурального (масштабного) и полунатурного моделирования.</p> <p><b>4.4.</b> Тракты и элементы измерительной схемы: типы линий передачи и их особенности, потери в линиях передачи, выбор радиочастотных соединителей (разъемов) в зависимости от частоты и передаваемой мощности. Паразитные связи в измерительных схемах. Использование делителей мощности, направленных ответвителей, вентилей и циркуляторов.</p> <p><b>4.5.</b> Некоторые типичные ошибки экспериментаторов: завышенные или заниженные требования к точности измерений, избыточный частотный диапазон, малое значение отношения сигнал/шум при возможности его увеличения, пренебрежение антенным эффектом фидеров и др.</p>	4	4

#### Лабораторные работы:

- 1) Векторный анализ цепей
- 2) Волноводные измерения коэффициента отражения
- 3) Анализ сигналов в частотной области
- 4) Работа с анализатором сигналов

### Рекомендуемые ресурсы

1. Международный словарь по метрологии: основные понятия и соответствующие термины, <http://mathscinet.ru/slaev/records/images/SlaevChun02.pdf>
2. Данилин А. А., Лавренко Н. С. Измерения в радиоэлектронике: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2017. 408 с.
3. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения / Учеб. пособие для студентов ВУЗов, - М.: Издательский центр «Академия», 2005. - 304 с.
4. Данилин А.А., Москалец Д.О., Сосновский В.А. Приборы и техника радиоизмерений в вопросах и ответах: учеб.пособие. СПб.: зд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 124 с.
5. Метрология и электрические измерения: учебное пособие / Е. Д. Шабалдин [и др.]; под ред. Е. Д. Шабалдина. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2013. 320 с.
6. Rouaud, Mathieu: Probability, Statistics and Estimation ( Propagation of Uncertainties in Experimental Measurement, Short Edition) <https://www.incertitudes.fr/book.pdf>

### Политика оценивания

#### Оценочные средства дисциплины: лабораторные работы, экзамен.

В течение семестра студенты выполняют четыре лабораторные работы, которые оцениваются по сданным преподавателю отчетам.

В случае, если студент вовремя сдает все четыре отчета, то получает допуск к экзамену.

Экзамен проходит в устной форме, все вопросы к нему делятся на две группы - основные (по два вопроса в билете) и дополнительные.

Итоговая оценка формируется по пятибалльной шкале, где:

**Оценка 5 - «Отлично»** – обучающийся глубоко и прочно усвоил весь программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагает, не затрудняется с ответом при видоизменении задания, свободно справляется с задачами и практическими заданиями, правильно обосновывает принятые решения, умеет самостоятельно обобщать и излагать материал, не допуская ошибок.

**Оценка 4 - «Хорошо»** – обучающийся твердо знает программный материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, может правильно применять теоретические положения и владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических заданий.

**Оценка 3 - «Удовлетворительно»** – обучающийся усвоил только основной материал, но не знает отдельных деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушает последовательность в изложении программного материала и испытывает затруднения в выполнении практических заданий.

**Оценка 2 - «Неудовлетворительно»** – обучающийся не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с большими затруднениями выполняет практические задания, задачи.

## Тип самостоятельных заданий

Примеры основных вопросов на экзамене:

1. Какими документами регламентируются в РФ метод и средства измерения той или иной физической величины?
2. Понятия "погрешность" и "неопределенность" в современной метрологии.
3. Стандартная неопределенность типа А, стандартная неопределенность типа В, суммарная стандартная неопределенность, расширенная неопределенность.

Примеры дополнительных вопросов на экзамене:

1. Определить мощность, которую можно получить на выходе усилителя, если допустимая мощность на его входе равна 1 дБм, а коэффициент усиления равен 30 дБ.
2. Различие смысла английских терминов "accuracy" и "fidelity".
3. Что означает надпись на мультиметре "True RMS"?