

Данилин А.А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Особенности преподавания дисциплины «Измерения на СВЧ» для студентов радиотехнических специальностей

Представлены результаты многолетнего преподавания дисциплины «Измерения на СВЧ» в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» на факультете радиотехники и телекоммуникаций. Рассмотрены особенности дисциплины, ее связь с общим курсом радиоизмерений, анализируются пути развития дисциплины.

Ключевые слова: Микроволновые измерения, СВЧ техника, измерительные приборы СВЧ, программа дисциплины «Измерения на СВЧ».

В вузовских программах обучения студентов по направлениям «Радиотехника», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и аналогичных им значительную роль играют дисциплины, связанные с измерениями и измерительной техникой. Специфика измерительной подготовки студентов в области радиоэлектроники – большое количество измеряемых величин и параметров, широкий диапазон частот и сложная форма измеряемых сигналов, большой динамический диапазон измеряемых величин и пр. Это заставляет, наряду с традиционными частями курсов, связанных с метрологией, анализом погрешностей и стандартизацией, и сертификацией разрабатываемых устройств, вводить большое количество разделов по самым современным методам и средствам радиоизмерений – осциллографам, анализаторам спектра, измерителями параметров радиосигналов, логическим анализаторам цифровых устройств и пр. Весь объем информации по радиоизмерениям невозможно уложить в один курс, который, к тому же, обычно читается на ранней ступени образования в составе общетехнических дисциплин. Поэтому в ряде вузов образовательный процесс по радиоизмерениям обычно делится на две части. В первой части рассматриваются вопросы метрологии, стандартизации и сертификации, простейшие методы и средства электроизмерений. Вторая часть измерительной подготовки – собственно радиоизмерительная техника – изучается позже – после основных радиотехнических и схмотехнических курсов, а также после изучения основ цифровой и микропроцессорной техники. В ЛЭТИ этот курс имеет название «Приборы и техника радиоизмерений» и читается без малого 30 лет. В нем изучаются основные методы радиоизмерений, современная радиоизмерительная техника, используемая, в частности, в лабораториях факультета радиотехники и телекоммуникаций. Затрагиваются также и отдельные вопросы измерений в цифровых и телекоммуникационных системах. Однако вопросы СВЧ измерений из-за их специфичности и сложности обычно остаются неохваченными. Это приводит к необходимости вводить специальную дисциплину «Измерения на СВЧ», который читается студентам, специализирующимся в области антенн и устройств СВЧ.

Примерная структура дисциплины «Измерения на СВЧ» представлена на рис.1. Она включает две части, посвященные изучению методов измерения параметров устройств

СВЧ и измерению параметров сигналов СВЧ.

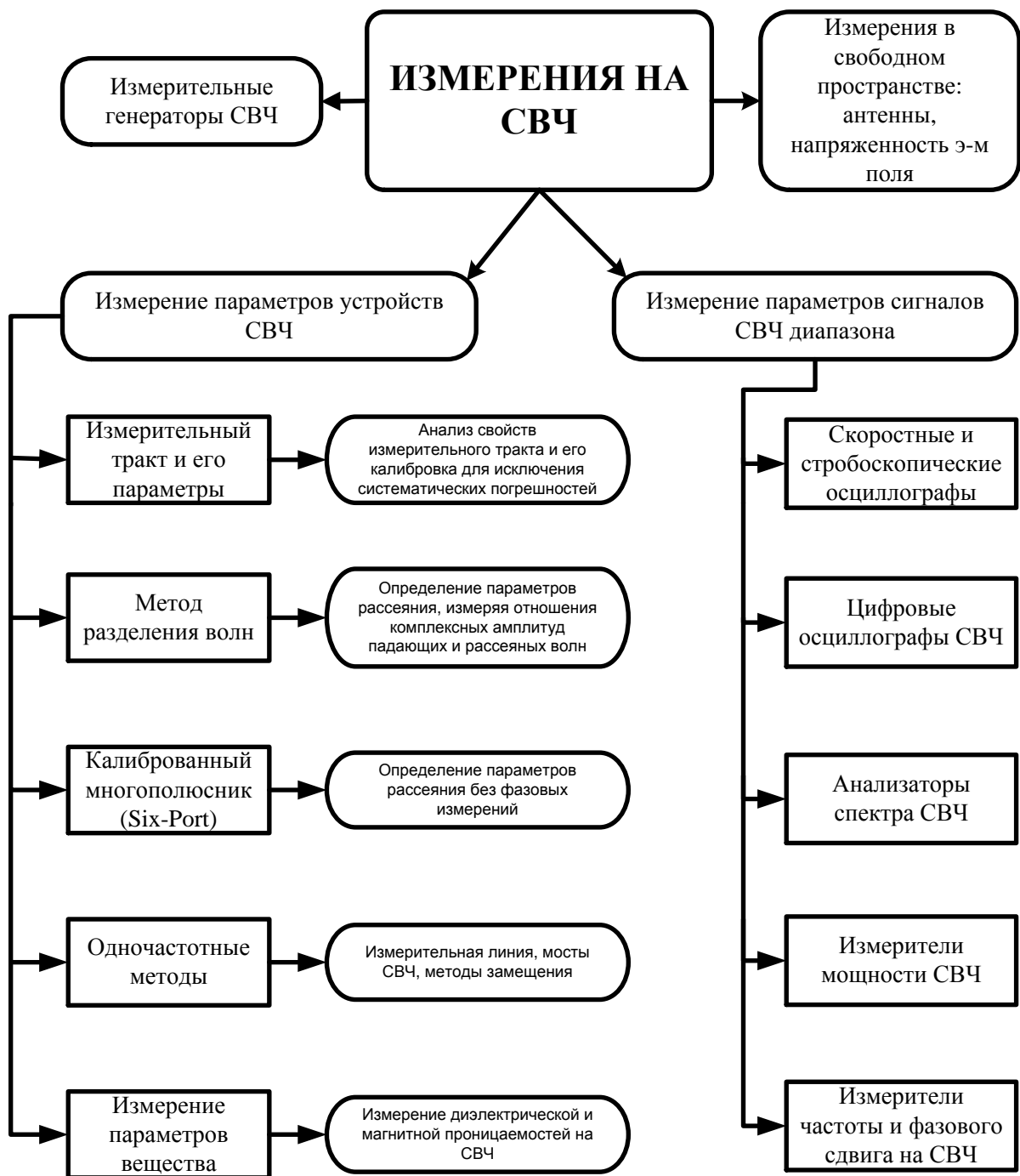


Рис. 1. Структура дисциплины «Измерения на СВЧ».

Вторая часть тесно связана с материалом, изучаемым в курсе радиоизмерений, поэтому она отодвинута на второй план (вместе с разделом «Измерительные генераторы СВЧ»). Вопросы измерений СВЧ сигналов в свободном пространстве (измерение напряженности электромагнитного поля, исследование антенных устройств и пр.) выделены в особый раздел, который было бы логично изучать в дисциплине «Антенны СВЧ» или ей аналогичную.

Остановимся на главной части курса – измерение параметров СВЧ устройств. Базой измерений СВЧ устройств являются принципы построения измерительного тракта

СВЧ и особенности выбора и настройки его компонентов. Измерительный тракт включает в себя отрезки соединительных линий (коаксиальных и волноводных), делители и сумматоры мощности, направленные ответвители и мосты, невзаимные устройства и коммутаторы измерительных сигналов. Все эти элементы взаимодействуют между собой, образуя сложное многопортовое СВЧ устройство. Его анализ позволяет рассчитать и исключить ряд систематических погрешностей измерений, поэтому в этом разделе курса необходимо напомнить и углубить знания студентов в области матричного анализа СВЧ цепей и изучить метод направленных графов как наиболее удобный способ расчет измерительных трактов и иллюстрации их работы.

Основной метод измерений параметров СВЧ устройств – метод разделения волн. Он используется в подавляющем большинстве стандартных анализаторов цепей СВЧ. Суть метода - выделение сигналов падающей и рассеянных волн и измерение отношения их комплексных амплитуд (векторные анализаторы цепей) или отношения модулей (скалярные измерители КСВ и ослабления). Особое внимание в курсе занимают методы исключения систематических погрешностей измерительного тракта на основе предварительной калибровки анализатора по набору эталонных узлов СВЧ тракта. Тщательность калибровки обеспечивает высокую точность современных автоматизированных анализаторов цепей СВЧ.

В программе дисциплины предусмотрены разделы, посвященные методу калиброванного многополюсника (Six-Port), традиционным одночастотным методикам измерения параметров СВЧ устройств (измерительные линии, мостовые методы и методы замещения). Отдельную группу измерений представляют собой методы измерения параметров вещества в СВЧ диапазоне. Они основаны на стандартных методах измерения коэффициентов передачи и отражения, но имеют определённую специфику введения исследуемого объекта (образец диэлектрика, магнетика) в измерительный тракт.

Вторая часть дисциплины, по сути, является расширением традиционных разделов курса радиоизмерения на диапазон СВЧ. Наиболее важным является раздел, посвященный современным широкополосным измерителям мощности СВЧ диапазона, которые достаточно объемно представлены в каталогах ведущих приборостроительных фирм. Также особо стоят сугубо СВЧ приборы – скоростные и стробоскопические осциллограф, доля которых в настоящее время существенно сократилась в связи с увеличением быстродействия цифровых осциллографов. Методы исследования спектров и измерения частоты и фазовых сдвигов особой спецификой не имеют, поскольку они решают свои задачи путем преобразования частот радиосигналов из диапазона СВЧ в диапазон традиционных НЧ и ВЧ измерений.

Основные разделы курса изучаются в лаборатории «Измерения на СВЧ» кафедры ТОР ЛЭТИ. Лабораторные работы включают исследование различных СВЧ устройств с помощью изучаемых измерительных приборов. Так, смеситель студенты исследуют с помощью генераторов СВЧ фирмы Keysight Technologies с цифровой перестройкой по частоте и уровню, а также анализатора спектра СВЧ диапазона фирмы Goodwill. Генератор СВЧ, управляемый напряжением, исследуется с помощью анализатора спектра и электронного частотомера СВЧ диапазона. Два автоматизированных анализатора цепей СВЧ фирмы Agilent E5062 позволяют проводить измерение параметров нескольких СВЧ устройств – pin-диодного коммутатора, 4 типов СВЧ фильтров, коаксиальных резонаторов высокой добротности и циркулятора. Комплект СВЧ измерительных приборов и программного обеспечения фирмы Mini-Circuits позволил реализовать лабораторную установку – скалярный измеритель АЧХ – в виде виртуального прибора, управляемого с компьютера через USB интерфейс. В этой работе студенты знакомятся с современным цифровым синтезатором и USB-измерителем мощности СВЧ диапазона.

К сожалению, в настоящее время довольно мало русскоязычной литературы по вопросам измерений на СВЧ. Отметим работы автора ([1], [2], учебное пособие по курсу радиоизмерений [3]). Некоторые разделы курса можно изучать по учебнику СВЧ электроники [4], а также по фундаментальной монографии [5], (которая выпущена малым тиражом и студентам недоступна). Более специализированные работы по радиоизмерительной технике (например, [6]-[8]) носят скорее справочный характер и для учебного процесса не совсем пригодны

Библиографический список

1. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с
2. Данилин А.А. , Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие /Под. ред. А.А. Данилина - СПб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
3. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения / Учеб. пособие для студентов ВУЗов, - М: Издательский центр «Академия», 2005. - 304с
4. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Микроволновая электроника: Учебник/ Под ред. А.Д. Григорьева. - СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 496с
5. Андронов Е.В., Глазов Г.Н. Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т. 1. Методы измерений на СВЧ/ - Томск: 2010.-804с.
6. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная база./ Под. ред. А.М.Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006.-208 с.
7. Афонский А. А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. – М.: СОЛОН_ПРЕСС, 2007.- 544с
8. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. - М.: ДМК Пресс, 2009. -384 с.