

А. И. Астайкин

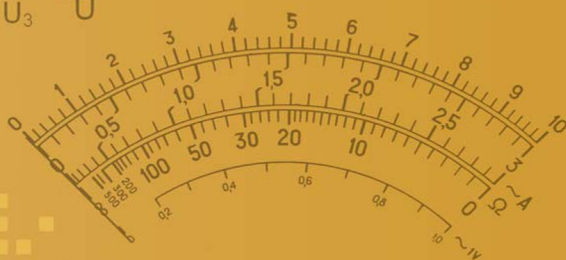
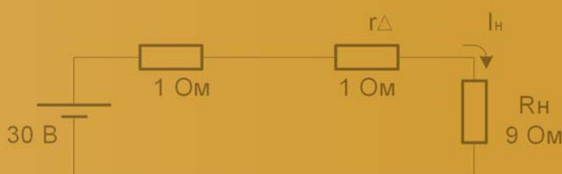
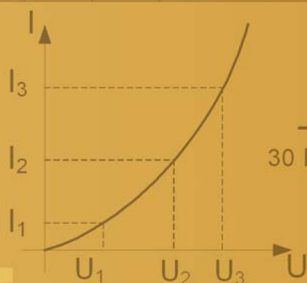
А. П. Помазков

Ю. П. Щербак

$$\begin{aligned} T_1 = 20^{\circ}\text{C}; & \rightarrow \begin{cases} R_{T1} = R_{20} \end{cases} \\ T_2 = 40^{\circ}\text{C}; & \rightarrow \begin{cases} R_{T2} = R_{20}[1 + \alpha(T_2 - 20) + \beta(T_2 - 20)^2] \end{cases} \\ T_3 = 60^{\circ}\text{C}; & \rightarrow \begin{cases} R_{T3} = R_{20}[1 + \alpha(T_3 - 40) + \beta(T_3 - 40)^2] \end{cases} \end{aligned}$$

Метрология и радиоизмерения

U	U ₁	U ₂
I	I ₁	I ₂



ФГУП

«Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ»

А. И. Астайкин, А. П. Помазков, Ю. П. Щербак

МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Под редакцией доктора технических наук, профессора,
заслуженного деятеля науки РФ А. И. Астайкина

Саров
2010

ББК 32.842я73

А–91

УДК 621.37

Астайкин А. И., Помазков А. П., Щербак Ю. П. Метрология и радиоизмерения. Учебное пособие. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010, 405 с.

ISBN 978-5-9515-0137-0

Целью учебного пособия является обучение читателя основам метрологии, методам и средствам радиоизмерений применительно к задачам разработки, производства и эксплуатации радиоаппаратуры. Рассмотрены общие принципы измерений, причины возникновения погрешностей и методы обработки результатов измерений. Описаны методы и устройства формирования измерительных сигналов, особенности исследований во временной и частотной областях, измерений характеристик случайных сигналов. Рассмотрены методы и средства измерений технических характеристик СВЧ-трактов, четырехполосников, резонаторов, антенн, параметров диэлектриков на СВЧ.

Учебное пособие отвечает требованиям образовательного стандарта по направлению подготовки «Радиотехника» и ориентировано на читателя, имеющего базовые знания в области электротехники и микроволновых устройств.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук В. А. Терехин, главный научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ; доктор физико-математических наук, профессор, декан радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. В. Якимов

ISBN 978-5-9515-0137-0

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010

Содержание

Список обозначений и сокращений	9
1. Предмет и задачи метрологии	12
1.1. Предмет метрология	12
1.2. Роль измерений в развитии науки и промышленности	12
1.3. Физические величины	21
1.4. Системы физических величин и их единиц	26
1.5. Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров	29
1.6. Измерение и его основные операции	32
2. Основные понятия теории погрешностей	40
2.1. Классификация погрешностей	43
2.2. Систематические погрешности	49
2.3. Случайные погрешности	54
2.3.1. Общие понятия	54
2.3.2. Основные законы распределения	57
2.3.3. Точечные оценки параметров законов распределения	59
2.3.4. Доверительный интервал (доверительные оценки)	61
3. Обработка результатов измерений	64
3.1. Однократные измерения	64
3.2. Многократные равноточные измерения	65
3.3. Косвенные измерения	68
3.4. Некоторые правила выполнения измерений и представления результатов	71
4. Методы и средства формирования измерительных сигналов	73
4.1. Измерительные сигналы	73
4.1.1. Классификация измерительных сигналов	73
4.1.2. Математические модели и параметры измерительных сигналов	74

4.2. Измерительные генераторы	77
4.3. Измерительные генераторы гармонических колебаний	80
4.3.1. Низкочастотные генераторы	80
4.3.2. Высокочастотные измерительные генераторы ..	85
4.3.3. Цифровые низкочастотные генераторы	89
4.3.4. Генераторы качающейся частоты	95
4.3.5. Синтезаторы частоты	97
4.4. Генераторы несинусоидальных сигналов	101
4.4.1. Измерительные импульсные генераторы	102
4.4.2. Генераторы сигналов специальной формы	105
4.4.3. Генераторы случайных сигналов	107
4.4.4. Генераторы псевдослучайных сигналов	112
4.5. Генераторы, управляемые микропроцессорами	115
5. Исследование колебаний во временной области	119
5.1. Электронный осциллограф	119
5.1.1. Назначение, принцип действия, классификация	119
5.1.2. Универсальный осциллограф (УО)	122
5.1.3. Основные характеристики каналов УО	127
5.1.4. Искажения осциллограмм	133
5.2. Двухканальные и двухлучевые осциллографы	134
5.3. Скоростные осциллографы	135
5.4. Стробоскопические осциллографы	136
5.5. Запоминающие осциллографы	141
5.5.1. Аналоговые запоминающие осциллографы	142
5.5.2. Цифровые запоминающие осциллографы	143
5.5.3. Вычислительные осциллографы	145
5.6. Уменьшение погрешности осциллографов методом калиброванных шкал	148
6. Исследование колебаний в частотной области	150
6.1. Общие сведения о представлении сигналов в частотной области	150
6.2. Аналоговые фильтровые анализаторы спектра	154
6.2.1. Метод фильтрации	155
6.2.2. Гетеродинные анализаторы спектра	

последовательного анализа	158
6.3. Дисперсионно-временные методы анализа спектров .	168
6.4. Цифровые анализаторы спектра	172
6.5. Измерение коэффициента гармоник	175
7. Методы измерения временных параметров сигналов	180
7.1. Измерение интервалов времени и периода повторения	182
7.1.1. Измерение интервалов времени цифровым методом дискретного счета	183
7.1.2. Измерение периода периодического сигнала . .	187
7.2. Измерение частоты	191
7.2.1. Измерение частоты методом дискретного счета	191
7.2.2. Аналоговые методы измерения частоты	195
7.2.3. Микропроцессорные числовые частотомеры . .	201
7.3. Измерение разности фаз	209
7.3.1. Фазовые соотношения при преобразовании частоты	210
7.3.2. Измерение разности фаз методом преобразования фазы в напряжение или ток . . .	213
7.3.3. Цифровые фазометры	215
7.3.4. Компенсационный метод измерения разности фаз	211
8. Измерение характеристик стационарных случайных процессов	228
8.1. Общие сведения о случайных процессах	228
8.2. Основные вероятностные характеристики ССП	230
8.3. Особенности измерений вероятностных характеристик	238
8.4. Оценки вероятностных характеристик	238
8.5. Измерение среднего значения СП	240
8.6. Измерение средней мощности СП	243
8.7. Измерение дисперсии СП	244
8.8. Измерение корреляционных функций	244
8.9. Анализ спектров случайных сигналов	247
8.10. Измерение законов распределения	250

8.11. Измерение плотности вероятности	255
9. Измерение характеристик СВЧ-трактов	
и четырехполюсников	259
9.1. Основные характеристики трактов	
и четырехполюсников	259
9.1.1. СВЧ-тракты как направляющие системы	259
9.1.2. Линии передачи в режиме стоячих	
и смешанных волн	261
9.1.3. Матрица рассеяния четырехполюсников	270
9.1.4. Перечень основных характеристик	
линий передачи	278
9.2. Измерения на измерительной линии	283
9.2.1. Устройство линии и ее калибровка	283
9.2.2. Измерение КСВ, модуля и фазы коэффициента	
отражения	285
9.2.3. Измерение затухания в линиях передачи	290
9.2.4. Измерение КСВ нагрузки	
через длинный фидер	291
9.2.5. Измерение коэффициента замедления	
замедляющих систем	293
9.2.6. Измерение волнового сопротивления	295
9.3. Измерения на автоматических измерителях	298
9.3.1. Принцип работы автоматических	
измерителей	298
9.3.2. Измерение коэффициента передачи	
и СВЧ-потерь в тракте	300
9.3.3. Измерение параметров замедляющих структур	
в режиме рассогласованного тракта	301
9.4. Измерение абсолютных значений напряженности	
электрического поля	304
9.5. Измерения параметров четырехполюсников	
и СВЧ-трактов во временной области	309
9.5.1. Время-импульсные измерения	309
9.5.2. Принципы импульсного зондирования	310
9.5.3. Рефлектограммы некоторых неоднородностей	
в СВЧ-трактах	312

9.5.4. Измерение импульсных характеристик четырехполюсников	314
10. Измерение параметров резонаторов	317
10.1. Виды полых резонаторов и их параметры	317
10.1.1. Типы резонаторов	317
10.1.2. Виды колебаний полых резонаторов	320
10.2. Измерение параметров полых резонаторов	328
10.2.1. Измерение с помощью измерительной линии	329
10.2.2. Осциллографические измерения	331
10.3. Измерение резонансной длины волны и частоты ...	333
10.4. Измерение добротности объемного резонатора ...	338
10.4.1. Определение добротности	338
10.4.2. Включение резонатора в измерительный тракт	339
10.4.3. Методы измерения добротности резонатора ..	341
11. Измерение параметров антенн	348
11.1. Основные параметры антенн	348
11.1.1. Классификация и состав параметров	348
11.1.2. Первичные параметры	351
11.1.3. Вторичные параметры	357
11.1.4. Параметры приемных антенн	361
11.2. Измерение входных параметров антенн	365
11.3. Измерение диаграмм направленности	366
11.3.1. Методы измерения ДН	366
11.3.2. Обработка ДН и расчет КНД	371
11.4. Измерение коэффициента усиления антенн	373
11.4.1. Метод измерения КУ двух одинаковых антенн	373
11.4.2. Измерение КУ методом замещения	375
11.5. Поляризационные измерения	376
12. Измерение параметров диэлектриков на СВЧ	379
12.1. Параметры диэлектриков	379
12.2. Методы измерения электродинамических параметров диэлектриков	381

12.2.1. Метод поверхностных волн	381
12.2.2. Метод запаздывающих импульсов (частотно-временной метод)	394
12.3. Волноводные методы измерения	400
12.3.1. Теоретические предпосылки	400
12.3.2. Экспериментальные методы	402
Список литературы	404

Возведя оба выражения в квадрат и вычтя из первого второе, получим

$$\varepsilon_r = n^2 - \chi^2;$$

$$\sigma = \frac{n\chi}{30\lambda_0}.$$

Полученные формулы являются рабочими для определения параметров диэлектрика ε_r и σ . Анализ этих формул показывает, что если бы были каким-то образом определены (например, измерены) величины n и χ , то по формулам можно легко определить параметры диэлектрика ε_r и σ . Используем для определения n и χ измеренные нами постоянную затухания α_0 и время задержки Δt .

Определение χ . Так как $\alpha = 2\pi\chi/\lambda_0$, то $\chi = \alpha\lambda_0/2\pi$. Откуда

$$\chi = \frac{\alpha_0\lambda_0}{17,4\pi l},$$

где l – длина ЛП с исследуемым диэлектриком в РК.

Определение ε_r и σ . По определению $v_{гр} = d\omega/d\beta$.

$$\begin{aligned} v_{гр} &= \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{1}{d\beta/d\omega} = \frac{c}{\frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\varepsilon_r + \sqrt{\omega\varepsilon_r^2 + \left(\frac{\omega^2\sigma}{\varepsilon_0} \right)^2}} \right)} = \\ &= \frac{c}{\frac{1}{2} \sqrt{\left(\varepsilon_r^2 + (60\lambda_0\sigma)^2 \right)}} = \frac{c}{n}. \end{aligned}$$

Таким образом

$$n = c/v_{гр}.$$

Подставляя n в формулу для времени задержки, после преобразования получим

$$n = \frac{c\Delta t}{l} + 1,$$

где $c\Delta t$ – измеренное время задержки; l – длина исследуемого диэлектрика; $c = 3 \cdot 10^3$ м/с.

Подставляя α и n в формулы для ε_r и σ , получим

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c\Delta t}{l} + 1 \right)^2 - \left(\frac{\alpha\lambda_0}{17,4\pi l} \right)^2;$$

$$\sigma = \frac{\alpha}{521\pi l} \left(\frac{c\Delta t}{l} + 1 \right).$$

12.3. Волноводные методы измерения

12.3.1. Теоретические предпосылки

Волноводные методы измерения параметров диэлектриков широко применяются в сантиметровом диапазоне волн.

Сущность волноводных методов состоит в том, что отрезок волновода заполняется исследуемым веществом. Измеряются фазовая скорость v_ϕ и длина волны λ_B в волноводе, по этим данным определяются относительная диэлектрическая проницаемость ε_r и $\operatorname{tg}\delta$ исследуемого образца (ИО). С помощью этих методов можно определять также параметры различных жидкостей, газов и плазмы.

Для теоретического обоснования волноводных методов рассмотрим, как связаны параметры ЭМВ, распространяющейся вдоль волновода, с параметрами заполняющего волновод вещества. Из теории волноводов известно, что постоянная распространения в волноводе любого типа волны определяется

$$\gamma^2 = k_0^2 \varepsilon_r - g^2,$$

где k_0 – волновое число в свободном пространстве, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; λ_0 – длина волны в свободном пространстве; g – поперечное волновое число, $g = 2\pi/\lambda_{кр}$; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны; $\gamma = \beta - j\alpha$; β – фазовая постоянная распространения (продольное волновое число), $\beta = 2\pi/\lambda_B$; λ_B – длина волны в волноводе; α – постоянная затухания в волноводе.

Диэлектрическая проницаемость ε_r , вообще говоря, комплексная, т. е. $\varepsilon_r = \varepsilon_r - j\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$, поэтому и постоянная затухания комплексная. Вследствие этого

$$\beta^2 - j2\alpha\beta - \alpha^2 = k_0^2 \varepsilon_r - jk_0^2 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta - g^2.$$

Разделив действительную и мнимую части, получим два действительных уравнения

$$\beta^2 - \alpha^2 = k_0^2 \varepsilon_r - g^2;$$

$$2\alpha\beta = k_0^2 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta.$$

Учитывая, что для незаполненного волновода $\operatorname{tg} \delta = 0$ и $\gamma^2 - \beta^2 = \gamma^2 - \beta^2 = (2\pi/\lambda_{\text{в.о}}) = k_0^2 - g^2$, получаем

$$\beta^2 - \alpha^2 = \left[(1 - \varepsilon_r) \left(\frac{\lambda_{\text{в.о}}}{\lambda_0} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{в.о}}} \right)^2;$$

$$\varepsilon_r = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в.о}}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}}} \right)^2 - \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \alpha,$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\lambda_{\text{в.о}}$ – длина волны в незаполненном волноводе; $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе с исследуемым материалом. Если волновод заполнен диэлектриком с малыми потерями, то $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ и $\alpha \ll \beta$, последним слагаемым можно пренебречь, и получаем

$$\varepsilon_r \simeq 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в.о}}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}}} \right)^2.$$

Зная ε_r и α , легко найдем $\operatorname{tg} \delta$ и удельную электропроводность (проводимость) σ

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2\alpha\beta}{\sigma \varepsilon_r};$$

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta.$$

Таким образом, для измерения параметров диэлектриков достаточно экспериментально найти длину волны $\lambda_{\text{в}}$ (или фазовую скорость $v_{\text{ф}}$) и постоянную затухания α ЭМВ в волноводе, заполненном диэлектриком.

12.3.2. Экспериментальные методы

Способ полного заполнения волновода диэлектриком. В волноводе прорезают продольную неизлучающую щель, превращая тем самым волноводную линию передачи в измерительную линию. Измерительную волноводную линию, полностью заполненную диэлектриком, подключают к генератору СВЧ; второй конец волноводной ИЛ закорачивают. Измеряют с помощью зонда непосредственно длину волны $\lambda_{\text{в}}$ (по расстоянию между соседними узлами поля), а постоянную затухания определяют по измеренному КСВ. Далее по формулам определяют ϵ_r и σ .

Способ частичного заполнения волновода диэлектриком. К сожалению, этот простой способ не всегда удается реализовать. Более удобным для практического применения оказывается способ заполнения отрезка короткозамкнутого волновода диэлектриком и последующего измерения входного сопротивления такого отрезка.

Как известно, входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ короткозамкнутого отрезка любой линии с потерями равно

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\text{оэ}} \operatorname{th} \gamma l,$$

где $Z_{\text{оэ}}$ – волновое сопротивление отрезка волновода, заполненного диэлектриком; $\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения ЭМВ в отрезке волновода; l – длина отрезка.

Учитывая, что волновое сопротивление волновода (заполненного или не заполненного диэлектриком) обратно пропорционально фазовой постоянной волны в волноводе, для нормированного входного сопротивления $z_{\text{вх}}^1$ можно записать

$$z_{\text{вх}}^1 = \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_0} = \frac{Z_{\text{оэ}}}{Z_0} \operatorname{th} \gamma l_0 = \frac{\beta_0}{\beta} \operatorname{th} \gamma l,$$

где Z_0 – волновое сопротивление незаполненного волновода; β_0 и β – фазовые постоянные распространения в незаполненном и заполненном волноводе.

Подставляя сюда $\gamma = \alpha + j\beta$, получим

$$z_{\text{вх}}^1 = \frac{\beta_0}{\beta} \operatorname{th}(\alpha + j\beta)l_0 = \frac{\beta_0}{\beta} \frac{\operatorname{th} \alpha l + j \operatorname{tg} \beta l}{1 + j \operatorname{th} \alpha l \operatorname{tg} \beta l}.$$

Это трансцендентное уравнение для определения α и β . Обычно имеют дело с диэлектриками с малыми потерями, так что практически можно положить $\text{th} \alpha l = \alpha l$, тогда можно записать

$$\begin{aligned} z_{\text{BX}}^1 &\approx \frac{\beta_0}{\beta} \frac{\alpha l + j \text{tg} \beta l}{1 + j \alpha l \text{tg} \beta l} = \frac{\beta_0}{\beta} \frac{(\alpha l + j \text{tg} \beta l)(1 - j \alpha l \text{tg} \beta l)}{1 + (\alpha l)^2 \text{tg}^2 \beta l} = \\ &= \frac{\beta_0}{\beta} \frac{\alpha l + \alpha l \text{tg}^2 \beta l + j \text{tg} \beta l - j (\alpha l)^2 \text{tg} \beta l}{1 + (\alpha l)^2 \text{tg}^2 \beta l} = \\ &= \frac{\beta_0}{\beta} \frac{\alpha l / \cos^2 \beta l + j \text{tg} \beta l - j (\alpha l)^2 \text{tg} \beta l}{1 + \text{tg}^2 \beta l (\alpha l)^2}. \end{aligned}$$

В последнем выражении ввиду малости αl ($\alpha l \ll 1$), пренебрегая всеми членами со степенями $(\alpha l)^2$, получаем

$$z_{\text{BX}}^1 \simeq \frac{\beta_0}{\beta} \left(\frac{\alpha l}{\cos^2 \beta l} + j \text{tg} \beta l \right).$$

Отсюда имеем

$$\text{Im } z_{\text{BX}}^1 = \frac{\beta_0}{\beta} \text{tg} \beta l = x_{\text{BX}}^1 = \frac{x_{\text{BX}}}{Z_0}.$$

Измеряется величина x_{BX}^1 . Теперь получаем

$$\frac{x_{\text{BX}}^1}{\beta_0} = \frac{\text{tg} \beta l}{\beta}.$$

Это трансцендентное уравнение, в котором известны x_{BX}^1 и $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$. Следовательно, можно найти β , так как известно l . По найденной β найдем длину волны в волноводе с заполненным диэлектриком, так как $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{B}}$, а затем и ε_r , так как $\lambda_{\text{B}} = \lambda_{\text{B},0}/\sqrt{\varepsilon_r}$, т. е.

$$\varepsilon_r \approx \left(\frac{\lambda_{\text{B},0}}{\lambda_{\text{B}}} \right)^2;$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta_0} \frac{R_{\text{BX}}^1 \cos^2 \beta l}{l}.$$

Список литературы

1. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерений. М.: Радио и связь, 1993.
2. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология. М.: Логос, 2001.
3. Зограф И. А., Новицкий П. Ф. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Кугуш В. Д. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и связь, 1985.
5. Мирский Г. Я.. Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1986.
6. Чернушенко А. М., Майбородин А. В. Измерение параметров электронных приборов дм- и см-диапазонов. М.: Радио и связь, 1986.
7. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975.
8. Астайкин А. И., Троцюк К. В., Ионова С. П., Профе В. Б. Теория и техника СВЧ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
9. Стариков В. Д. Методы измерений на СВЧ с применением измерительной линии. М.: Сов. радио, 1972.
10. Методы измерения характеристик антенн СВЧ/ Под ред. Н. М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985.
11. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия, 1972.
12. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991.

**Анатолий Иванович Астайкин,
Алексей Петрович Помазков,
Юрий Петрович Щербак**

Метрология и радиоизмерения

Учебное пособие

Редактор *Н. П. Мишкина*

Компьютерная подготовка оригинала-макета
Н. В. Мишкина

Подписано в печать 22.12.2009 Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 25,3 Уч.-изд. л. 23,5
Тираж 400 экз. Зак. тип. 1217-2009.

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл.