

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

*60-летию Военной академии
Воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза
Г.К. Жукова посвящается*

МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

Допущено ВУНЦ ВВС ВВА в качестве учебника для обучения курсантов военных учебных центров, обучающихся по укрупненной группе подготовки специалистов 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи»; 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»; 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы», рег. номер 015 от 08.11.2016 г.

Под общей редакцией доктора технических наук
Д.С. Викторова

Красноярск
СФУ
2016

УДК 621.396.96:006.91(07)
ББК 30.10я73
М546

Авторы:

И.В. Лютиков, А.Н. Фомин, В.А. Леусенко,
Д.С. Викторов, А.А. Филонов, Л.И. Лященко, В.А. Копылов

М546 **Метрология и радиоизмерения** : учебник / И.В. Лютиков, А.Н. Фомин, В.А. Леусенко [и др.] ; под общ. ред. Д.С. Викторова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 508 с.
ISBN 978-5-7638-3477-2

В учебнике изложены основы теории погрешностей, методы измерения радиотехнических величин, принципы построения и правила применения наиболее распространенных радиоизмерительных средств измерений.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по укрупненной группе подготовки специалистов 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи»; 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»; 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы», а также может быть полезен инженерно-техническому составу, интересующемуся методами и средствами измерений.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.396.96:006.91(07)
ББК 30.10я73

ISBN 978-5-7638-3477-2

© Сибирский федеральный
университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ.....	4
Глава 1. Основы обеспечения единства измерений	4
1.1. История развития метрологии	4
1.2. Роль отечественных учёных в развитии метрологии	9
1.3. Понятие об измерении.....	13
1.4. Связь измерений с познанием окружающего объективного мира ...	15
1.5. Определение измерения	20
1.6. Роль измерений в науке и технике	26
1.7. Понятие метрологического обеспечения	30
1.8. Система обеспечения единства измерений	31
1.9. Структура и функции государственной метрологической службы и метрологических служб организаций.....	37
1.10. Государственная поверочная служба.....	41
1.11. Средства измерений. Классификация средств измерений.....	44
1.12. Обобщённая классификация радиоизмерительных приборов. Система обозначений радиоизмерительных приборов.....	50
1.13. Общие характеристики измерительных приборов	57
1.14. Проблемы радиоизмерительной техники	65
Контрольные вопросы	70
Глава 2. Основы теории погрешностей.....	71
2.1. Погрешности измерений	71
2.1.1. Понятие погрешности измерений	71
2.1.2. Классификация погрешностей	72
2.2. Статистическая теория погрешностей измерения.....	79
2.2.1. Методы описания погрешностей. Законы распределения.....	79
2.2.1.1. Нормальный закон распределения.....	80
2.2.1.2. Равномерный закон распределения	83
2.2.1.3. Распределение Стьюдента	84
2.2.2. Среднеквадратичная погрешность	85
2.2.3. Среднеквадратические погрешности среднеарифметического значения результата измерения	86
2.2.4. Оценка, соответствующая центру рассеяния	86
2.2.5. Медианная оценка.....	88
2.2.6. Эффективные оценки истинного значения измеряемой величины для различных законов распределения погрешности	89

2.2.6.1. Оценка истинного значения измеряемой величины при нормальном законе распределения погрешностей	89
2.2.6.2. Эффективная оценка истинного значения измеряемой величины при распределениях, отличающихся от нормального	94
2.2.7. Оценка среднеквадратической погрешности	95
2.2.8. Доверительная погрешность	98
2.2.9. Оценка погрешности при малом числе измерений	101
2.2.10. Обнаружение промахов	102
2.2.11. Критерий Романовского	106
2.2.12. Статистическая обработка результатов многократных измерений	106
2.2.13. Обработка неравноточных измерений	107
2.2.13.1. Проверка гипотезы о неравноточности результатов наблюдений	108
2.2.13.2. Анализ однородности средних арифметических значений	108
2.2.13.3. Проверка однородности дисперсий	109
2.2.13.4. Определение доверительного интервала оценок среднеквадратического отклонения	113
2.2.14. Определение законов распределения. Критерии согласия ...	114
2.2.14.1. Критерий Пирсона	114
2.2.14.2. Проверка нормальности распределения по составному критерию \bar{d}	119
2.2.14.3. Критерий Колмогорова	121
2.2.15. Погрешности косвенных измерений	123
2.2.15.1. Систематические погрешности косвенных измерений	123
2.2.15.2. Систематические погрешности косвенных измерений	124
2.2.15.3. Суммирование составляющих погрешности измерения	127
2.2.16. Вычисление погрешности косвенных измерений методом статистического моделирования	130
2.3. Представление результатов измерений по ГОСТ 8011–72	132
Контрольные вопросы	137
РАЗДЕЛ 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА	138
Глава 3. Электромеханические измерительные преобразователи.	
Принципы построения	138
3.1. Общие сведения об электромеханических преобразователях	138

3.2. Магнитоэлектрические измерительные преобразователи. Области применения.....	142
3.3. Электромагнитные измерительные преобразователи. Области применения.....	146
3.4. Электродинамические измерительные преобразователи. Области применения.....	148
3.5. Электростатические измерительные преобразователи. Области применения.....	150
3.6. Логометрические преобразователи	154
3.7. Расширение пределов измерения тока и напряжения	155
3.8. Метрологические характеристики электромеханических преобразователей	159
Контрольные вопросы	162
Глава 4. Измерение напряжений	163
4.1. Значения измеряемых напряжений: амплитудное, среднее, среднеквадратическое, средневыпрямленное	163
4.2. Стрелочные вольтметры.....	164
4.2.1. Классификация, структурная схема. Основные узлы	164
4.2.2. Преобразователи электронных вольтметров	167
4.2.2.1. Пиковый детектор.....	167
4.2.2.2. Детектор средневыпрямленного значения	170
4.2.2.3. Квадратичный детектор	172
4.2.3. Термоэлектрические преобразователи	173
4.2.4. Усилители	175
4.2.5. Зависимость показаний вольтметров от формы измеряемого напряжения	178
4.2.6. Погрешности стрелочных вольтметров на низких и высоких частотах	180
4.3. Цифровые вольтметры	183
4.3.1. Классификация цифровых вольтметров постоянного напряжения	183
4.3.2. Цифровые вольтметры с временным преобразованием	184
4.3.3. Интегрирующие цифровые вольтметры	189
4.3.4. Цифровые вольтметры с частотным преобразованием.....	192
4.3.5. Принципы построения цифровых вольтметров с весовым усреднением.....	194
4.3.6. Цифровые вольтметры уравнивающего преобразования	200
4.4. Особенности цифровых вольтметров переменного напряжения	203
4.5. Погрешности цифровых вольтметров	206
Контрольные вопросы	209

Глава 5. Измерение временных интервалов	210
5.1. Общие сведения об измерении временных интервалов.....	210
5.2. Цифровое измерение временных интервалов	211
5.2.1. Структурная схема цифрового измерителя временных интервалов	211
5.2.2. Погрешности цифрового метода измерения временных интервалов	213
5.2.3. Методы уменьшения погрешности дискретности.....	216
5.2.3.1. Метод статистического усреднения.....	217
5.2.3.2. Метод корреляционного усреднения.....	218
5.2.3.3. Метод рандомизации	219
5.3. Метод задержанных совпадений.....	223
5.4. Метод преобразования время – амплитуда	224
5.5. Метод преобразования масштаба времени	226
5.6. Нониусный метод измерения временных интервалов	227
Контрольные вопросы	229
Глава 6. Измерение частоты.....	231
6.1. Определение мгновенной и средней частоты	231
6.2. Классификация методов измерения частоты	232
6.2.1. Метод заряда – разряда ёмкости.....	232
6.2.2. Резонансный метод	234
6.2.3. Метод нулевых биений.....	237
6.2.4. Методы сравнения.....	240
6.2.4.1. Гетеродинный метод измерения частоты.....	240
6.2.4.2. Осциллографические методы измерения частоты сигналов.....	242
6.2.5. Оптимальный алгоритм цифрового измерения частоты.....	244
6.2.6. Метод дискретного счёта (цифровое измерение частоты)	244
6.2.7. Структурная схема частотомера. Погрешности измерения. Возможности цифрового частотомера	245
6.2.8. Новые идеи повышения точности цифрового измерения частоты.....	253
6.2.9. Измерение нестабильности частоты	255
6.2.10. Особенности применения микропроцессоров в цифровых измерителях частоты	257
Контрольные вопросы	266
Глава 7. Измерение фазового сдвига.....	267
7.1. Общие сведения об измерении фазового сдвига	267
7.2. Классификация методов измерения фазового сдвига.....	268
7.3. Аналоговые фазометры	268

7.3.1. Обобщённая структурная схема аналогового фазометра	268
7.3.2. Осциллографические методы измерения фазы.....	270
7.3.3. Компенсационные фазометры	274
7.3.4. Стрелочные фазометры	276
7.4. Цифровые фазометры	278
7.4.1. Общие сведения о цифровых фазометрах	278
7.4.2. Цифровые фазометры с преобразованием фазовый сдвиг – напряжение.....	279
7.4.3. Цифровые фазометры компенсационные	280
7.4.4. Ортогональные цифровые фазометры	283
7.5. Фазометры с преобразованием частоты	286
7.5.1. Гетеродинные фазометры.....	286
7.5.2. Стробоскопические фазометры	287
7.6. Особенности применения микропроцессоров в цифровых фазометрах	288
7.7. Характеристики современных фазометров	290
Контрольные вопросы	294
Глава 8. Измерение спектров.....	295
8.1. Общие сведения об измерении спектра.....	295
8.2. Методы измерения спектров.....	296
8.3. Структурные схемы анализаторов	298
8.3.1. Анализаторы спектра параллельного действия	298
8.3.2. Анализаторы спектра последовательного действия.....	300
8.3.3. Цифровые анализаторы спектра	304
8.4. Основные характеристики анализаторов	306
Контрольные вопросы	311
Глава 9. Электронно-лучевые осциллографы	312
9.1. Назначение и классификация электронно-лучевых осциллографов. Области применения.....	312
9.2. Обобщённая структурная схема осциллографа	314
9.3. Виды развёрток. Параметры развёртывающих напряжений.....	318
9.3.1. Линейная непрерывная развёртка	318
9.3.2. Линейная ждущая развёртка	319
9.3.3. Синусоидальная развёртка	321
9.3.4. Круговая развёртка.....	322
9.3.5. Спиральная развёртка	323
9.4. Многоканальные и многолучевые осциллографы.....	324
9.5. Особенности построения осциллографов для наблюдения наносекундных импульсов и сигналов диапазона СВЧ.....	326
9.6. Скоростные осциллографы	327

9.7. Стробоскопические осциллографы	330
9.8. Цифровые запоминающие осциллографы	333
9.9. Характеристики современных осциллографов	336
Контрольные вопросы	346
Глава 10. Измерение параметров модулированных сигналов	348
10.1. Параметры модулированных сигналов	348
10.2. Методы измерения коэффициента амплитудной модуляции	351
10.3. Методы измерения девиации частоты	357
Контрольные вопросы	360
Глава 11. Измерительные генераторы	361
11.1. Назначение, классификация, основные требования	361
11.2. Генераторы низких частот	363
11.2.1. Назначение генераторов низкочастотных	363
11.2.2. Метрологические параметры генераторов измерительных низкочастотных	363
11.2.3. Классы точности генераторов	364
11.2.4. Разновидности генераторов измерительных низкочастотных	365
11.2.4.1. RC-генераторы	365
11.2.4.2. Генераторы на биениях	371
11.2.4.3. Генераторы с диапазонно-кварцевой стабилизацией	372
11.3. Генераторы инфранизких частот	373
11.4. Генераторы высоких частот	375
11.4.1. Назначение генераторов высокочастотных	375
11.4.2. Группы генераторов высокочастотных	375
11.4.3. Параметры генераторов высокочастотных	376
11.4.4. Классы точности генераторов высокочастотных	376
11.4.5. Генераторы радиовещательного диапазона	377
11.4.6. Генераторы метрового и дециметрового диапазонов	383
11.4.7. Генераторы СВЧ-диапазона	385
11.4.8. Генераторы сигналов высокочастотные цифровые	390
11.5. Шумовые генераторы	401
11.5.1. Общие сведения о шумовых генераторах	401
11.5.2. Источники теплового шума	402
11.6. Синтезаторы частоты	406
11.6.1. Классификация синтезаторов частот сигналов	406
11.6.2. Способ синтеза частот	407
11.6.3. Структурное построение синтезаторов частоты	408
Контрольные вопросы	411

Глава 12. Измерение нелинейных искажений	413
12.1. Общие сведения о нелинейных искажениях сигналов.....	413
12.2. Структурная схема измерителя нелинейных искажений.....	414
12.3. Измерение коэффициента гармоник	418
12.3.1. Измерение коэффициента гармоник низкочастотных трактов.....	418
12.3.2. Измерение коэффициента гармоник модулированных колебаний	420
Контрольные вопросы	423
Глава 13. Измерение параметров цепей	425
13.1. Параметры цепей с сосредоточенными постоянными.....	425
13.2. Метод вольтметра и амперметра	428
13.2.1. Измерение активных сопротивлений методом вольтметра-амперметра	428
13.2.2. Измерение ёмкости методом вольтметра-амперметра.....	430
13.2.3. Измерение индуктивности методом вольтметра-амперметра	432
13.3. Резонансный метод измерения индуктивности, ёмкости	433
13.4. Резонансные схемы измерения параметров цепей	435
13.5. Измерители добротности	438
13.6. Мостовые методы измерения индуктивности, ёмкости, сопротивления резисторов.....	439
13.6.1. Измерение параметров цепей мостовым методом на постоянном токе	439
13.6.2. Измерение параметров цепей мостовым методом на переменном токе.....	444
Контрольные вопросы	449
Глава 14. Измерение мощности.....	451
14.1. Общие сведения об измерении мощности.....	451
14.2. Измерение мощности на звуковых и высоких частотах	452
14.3. Измерение мощности на промышленных частотах	454
14.4. Электродинамические ваттметры	455
14.5. Метод, основанный на эффекте Холла	456
14.6. Измерение мощности в диапазоне СВЧ	458
14.7. Калориметрический метод	461
14.8. Метод терморезистора, болометры, термисторы	463
14.9. Мостовые методы измерения мощности	465
14.10. Термоэлектрический метод измерения мощности СВЧ-сигналов.....	467
14.11. Измерение проходящей мощности.....	469

14.11.1. Метод поглощающей стенки	470
14.11.2. Зондовый метод.....	470
14.11.3. Пондеромоторный метод.....	471
14.11.4. Метод направленных ответвителей	472
14.12. Измерение весьма малой мощности. Радиометры.....	474
Контрольные вопросы	478
Глава 15. Измерение характеристик случайных процессов	479
15.1. Общие понятия	479
15.2. Выводы эргодической теоремы	483
15.3. Измерение среднего значения	485
15.4. Измерение дисперсии и мощности случайных процессов	488
15.5. Измерение авто- и взаимокорреляционных функций	489
15.6. Измерение энергетических спектров случайных процессов.....	490
15.7. Измерение законов распределения: плотности и функции распределения вероятностей	491
Контрольные вопросы	494
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	495
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	498