

# Оглавление

Предисловие.....	3
<b>I. Теплопроводность и термоэлектрические явления..</b>	<b>6</b>
<b>1. Основные положения теплопроводности. Математическое моделирование тепловых процессов .....</b>	<b>7</b>
1.1. Явление теплопроводности.....	7
1.1.1. Температурное поле.....	7
1.1.2. Температурный градиент.....	8
1.1.3. Тепловой поток. Закон Фурье.....	9
1.1.4. Коэффициент теплопроводности.....	12
1.2. Математическое моделирование теплового процесса..	13
1.2.1. Общая идея моделирования.....	13
1.2.2. Вывод уравнения теплопроводности.....	15
1.2.3. Условия однозначности для процессов теплопроводности .....	17
1.3. Решение краевых задач для уравнения теплопроводности .....	19
1.3.1. Метод Фурье разделения переменных.....	19
1.3.2. Краевая задача остывания нагретых тел.....	20
1.3.3. Остывание тел правильной формы.....	22
<b>2. Термоэлектрические явления .....</b>	<b>26</b>
2.1. Эффект Зеебека.....	26
2.2. Эффект Пельтье .....	28
2.3. Эффект Томсона .....	31
2.3.1. Термоэлектродвижущая сила.....	31
2.3.2. Связь между коэффициентом эффекта Томсона $\sigma$ и законом изменения термоЭДС в зависимости от температуры.....	31
2.4. Измерение температур и тепловых потоков при помощи термопар .....	32
2.4.1. О термопарах.....	32
2.4.2. Измерение температур.....	34
2.4.3. Измерение тепловых потоков.....	36
2.5. Элементы Пельтье .....	36
<b>II. Калориметрические преобразователи и измерители СВЧ мощности.....</b>	<b>40</b>
<b>3. Калориметрические измерители мощности.....</b>	<b>42</b>

3.1. Калориметрические методы .....	43
3.1.1. Калориметры с переменной температурой .....	45
3.1.2. Калориметры с постоянной температурой .....	48
3.2. Компенсационный калориметр с охлаждающим термоэлементом. Устройство и принцип действия .....	50
3.3. Основные составляющие погрешности при измерении СВЧ мощности калориметром .....	56
3.4. Неэквивалентность замещения мощности СВЧ в калориметре .....	64
3.5. О расчете и оптимизации тепловой схемы калориметрического преобразователя .....	70
<b>4. Автоматическое регулирование в калориметрических ваттметрах. PID-алгоритм .....</b>	<b>79</b>
4.1. Основные звенья систем автоматического регулирования, их характеристики передачи и соединения .....	80
4.1.1. Идеальные звенья и их характеристики .....	80
4.1.2. Соединения звеньев .....	84
4.1.3. Реальные звенья .....	86
4.2. Применение ПИД алгоритмов в системах автоматического регулирования .....	87
4.3. Анализ работы калориметрического измерителя СВЧ мощности с охлаждающим термоэлементом и системой ПИД регулирования .....	93
4.3.1. Структурная схема и порядок работы калориметра ..	93
4.3.2. Определение коэффициента передачи калориметрической системы, охваченной обратной связью .....	96
4.4. О погрешности измерения СВЧ мощности калориметра с обратной связью .....	102
4.5. О динамическом режиме работы калориметра с обратной связью .....	104
<b>5. Калориметрические измерители мощности миллиметровых волн .....</b>	<b>107</b>
5.1. Измеритель мощности диапазона 78,33...118,1 ГГц .....	107
5.1.1. Функциональная схема микроваттметра .....	107
5.1.2. Конструкция калориметра .....	108
5.1.3. Принцип действия калориметра .....	108
5.1.4. Измерительный блок .....	109
5.1.5. Технические характеристики .....	111
5.2. Калориметрический микроваттметр диапазона 110...170 ГГц .....	112
<b>III. Боллометрические и термоэлектрические методы измерения СВЧ мощности .....</b>	<b>114</b>

<b>6. Приёмные преобразователи ваттметров малого уровня СВЧ мощности</b> .....	117
6.1. Определение основных характеристик ПП и датчиков	117
6.2. Требования к основным характеристикам ПП и датчиков .....	120
6.3. Датчики приемных преобразователей .....	123
6.4. Конструкции приемных преобразователей .....	128
6.4.1. Боллометрический ПП с нитяным датчиком .....	128
6.4.2. Боллометрический ПП с пленочными датчиками .....	129
6.4.3. Термисторные ПП .....	131
6.4.4. Термоэлектрические ПП .....	131
6.5. Об измерительной схеме для термоэлектрических ПП	135
6.6. Погрешности приемных преобразователей .....	137
<b>7. Согласование приёмных преобразователей</b> .....	138
7.1. Вставка с датчиком и ее согласование в прямоугольном волноводе .....	138
7.2. Согласование ПП посредством трансформатора на заниженном волноводе .....	150
7.3. Согласование ПП с помощью диэлектрического трансформатора .....	151
<b>8. Конструкции термоэлектрических приёмных преобразователей</b> .....	156
8.1. Термоэлектрический ПП с датчиком типа согласованной нагрузки .....	156
8.2. Нитяные термоэлектрические датчики .....	159
8.3. Распределение температурного поля в нитяной термопаре .....	161
8.4. Влияние на параметры термопар технологии их изготовления .....	168
8.5. Термоэлектрические приемные преобразователи резонансного типа .....	174
8.6. Приемные преобразователи СВЧ ваттметров малого уровня мощности для миллиметрового диапазона волн	180
8.7. Поглощающие пластины для ПП .....	183
8.8. Преобразователи, встраиваемые в генераторы стандартных сигналов .....	186
<b>9. Боллометрические и термисторные приёмные преобразователи</b> .....	194
9.1. Смесительные боллометрические приемные преобразователи .....	194
9.2. Измерение и индикация модулированной СВЧ мощности .....	198

9.3. Волноводные термисторные преобразователи . . . . .	200
9.4. Подвижные короткозамыкающие поршни приемных преобразователей . . . . .	205
9.4.1. Короткозамыкающие поршни дроссельного типа . . . . .	206
9.4.2. Короткозамыкающий поршень комбинированного типа . . . . .	207
9.4.3. Короткозамыкающий поршень с разжимающим клином . . . . .	208
9.4.4. V-образный короткозамыкающий поршень . . . . .	210
9.5. Приемные преобразователи на ферритовых болометрах . . . . .	211
9.5.1. Ферритовые болометры . . . . .	211
9.5.2. Ферритовые преобразователи для измерения СВЧ мощности . . . . .	214
9.5.3. Приемный преобразователь на феррит-термисторном датчике . . . . .	215
9.5.4. Ферритовые преобразователи на кроссумножении . . . . .	218
<b>10. Термоэлектрические и болометрические ваттметры</b>	<b>221</b>
10.1. Измерительные блоки термоэлектрических ваттметров	221
10.2. Термоэлектрические ваттметры поглощаемой мощности миллиметрового диапазона волн . . . . .	227
10.3. Измерительные блоки болометрических (термисторных) ваттметров . . . . .	229
10.4. Ваттметр поглощаемой мощности термисторный МЗ-22А . . . . .	232
10.5. О погрешностях болометрических и термисторных измерителей СВЧ мощности . . . . .	234
<b>11. Миллиметровые измерители мощности с диодными СВЧ преобразователями</b> . . . . .	<b>243</b>
11.1. Измеритель мощности М2-МВМ-118 . . . . .	243
11.2. Диодный преобразователь мощности на металлодиэлектрическом волноводе (МДВ) . . . . .	247
<b>IV. Метрологическое обеспечение измерителей СВЧ мощности</b> . . . . .	<b>250</b>
<b>12. Рабочие средства и эталоны мощности</b> . . . . .	<b>252</b>
12.1. Передача размеров физических величин и поверочные схемы . . . . .	252
12.2. Государственные эталоны и поверочные схемы . . . . .	254
12.3. Эталонный комплект. Компаратор проходящей мощности . . . . .	255
12.4. Анализ погрешности компаратора проходящей мощности . . . . .	256

12.5. Метрологическое обеспечение измерения мощности в миллиметровом диапазоне волн .....	259
12.5.1. Поверочная схема средств измерения мощности миллиметрового диапазона ЗАО «Elmika» .....	261
12.5.2. Исходные калориметрические ваттметры и компараторы .....	262
12.6. Создание эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5...178,6 ГГц на базе белорусских радиоизмерительных приборов .....	265
12.6.1. Структурная схема эталона .....	265
12.6.2. Описание элементов комплекса .....	269
12.6.3. Коррекция погрешностей измерений, вызванных несогласованием .....	275
<b>13. Измерительные приборы и комплексы для поверки и калибровки ваттметров миллиметрового диапазона .....</b>	<b>276</b>
13.1. Образцовые ваттметры проходного типа .....	276
13.1.1. Анализ работы калибратора мощности .....	277
13.1.2. Волноводные делители СВЧ мощности .....	279
13.2. Термисторные ваттметры миллиметрового диапазона волн М1-25, М1-25/1, М1-25/2 .....	287
13.3. Приборы Н7-1 для поверки ваттметров малой мощности в диапазоне частот 78,3...178,4 ГГц .....	292
13.3.1. Анализ работы прибора для поверки ваттметров ...	292
13.3.2. Термисторный преобразователь СВЧ мощности прибора Н7-1 .....	295
13.3.3. Об аттестации образцовых ваттметров .....	298
13.4. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в диапазоне частот 78,33...118,1 ГГц .....	298
13.4.1. Структурная схема измерительного комплекса .....	299
13.4.2. Калибровка ваттметра .....	306
13.4.3. Результаты калибровки ваттметра .....	307
<b>Приложения .....</b>	<b>309</b>
1. Основные тепловые физические величины .....	309
2. Единицы измерения температуры .....	311
3. Определение параметров батареи термопар для калориметрического измерителя мощности .....	312
4. Пояснение терминов, применяемых в книге .....	313
5. Условные обозначения физических величин и их размерность в системе МКСА (СИ) .....	315
6. Список сокращений .....	317
Литература .....	318