Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи

Мак Ван Биен

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Шилин Александр Николаевич

Волгоград – 2024

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АРУ – автоматическая регулировка усиления

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

АЧТ – абсолютно черное тело

ИК – инфракрасный диапазон электромагнитных излучений

ИП – измерительный преобразователь

ИРП - интегрирующие развертывающие преобразователи

ИУ – измерительное устройство

КИ – коэффициента излучения

КПД – коэффициент полезного действия

ОПП – образцовый прямой преобразователь

ОЭП – оптико-электронный прибор

ОЭСИТ – оптико-электронная система измерения температуры

ПП – пирометрический преобразователь

ПСО – пирометр спектрального отношения

ПСИ –пирометр суммарного излучения

ПЧИ –пирометр частичного излучения

СВ – схема вычитания

УК – устройства контроля

ФД – фотодиод

ЭДС – электродвижущая сила

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ 12

1.1. Проблемы оптической пирометрии 12

1.1.1. Излучательная способность нагретого тела 12

1.1. 2. Неравновесное излучение 13

1.1.3. Постороннее излучение 15

1.1. 4. Неоднородность температуры 16

1.1.5. Требования к точности пирометров 17

1.1. 6. Завышение точности измерений пирометров 19

1.1. 7. Проверка точности пирометров независимым методом 20

1.1. 8. Особенности контроля технологических процессов 21

1.2. Бесконтактные приборы измерения температуры 22

1.2.1. Радиационные пирометры полного излучения 24

1.2.2. Яркостные пирометры частичного излучения 26

1.2.3. Пирометры спектрального отношения (цветовые) 29

1.2.4. Тепловизоры 31

1.2.5. Области применения пирометров и тепловизоров 33

1.3. Выводы по первой главе 36

2. РАДИАЦИОННЫЙ ПИРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ ИЗДЕЛИЙ 37

2.1. Физические основы радиационной пирометрии 37

2.2. Анализ погрешностей радиационного пирометра 44

2.3. Уравнения преобразования сигналов в ОЭП 49

2. 4. Определение спектрального коэффициента полезного действия 52

2.5. Выводы по второй главе 59

3. ЦИФРОВОЙ ПИРОМЕТР СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ 61

3.1. Анализ логометрических измерительных преобразователей 62

3.1.1. ИП с автоматической регулировкой усиления 62

3.1.2. Оптико-электронный однотактный интегрирующий ИП 64

3.2. Преобразователь отношения сигналов с двухтактным интегрированием 66

3.3. Определение параметров пирометра спектрального отношения 69

3.4. Параметрический синтез интегрирующего устройств контроля пирометра с двухтактным интегрированием 74
3.4.1. Способы линеаризации характеристик устройств контроля 74
3.4.2. Методы аппроксимации характеристик устройств контроля 75
3.4.3. Методы синтеза блоков динамической линеаризации 79
3.4.4. Синтез блока линеаризации первого порядка 80
3.5. Выводы по третьей главе 82
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 84
4.1. Блок-схема экспериментальной установки коэффициента излучения 84
4.2. Методика проведения эксперимента 87
4.3. Определение коэффициента излучения и температуры объекта энергетическим пирометром 87
4.4. Блок-схема пирометра спектрального отношения 90
4.5. Лабораторный стенд для исследования метода двухтактного интегрирования. 94
4.6. Выводы по четвёртой главе 96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 101
Приложение А Патент №216059 112
Приложение Б Акт внедрения в Университет Промышленной Технологии Co., Ltd. 113
Приложение В Акт внедрения в THD Co., Ltd. 114
Приложение Г Акт внедрения в Зуй Хаи Co., Ltd. 115

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В высокотемпературных технологических процессах, например, при производстве проката и труб или при производстве высокотемпературных крупногабаритных базовых деталей нефтегазового оборудования и атомных реакторов, одной из основных контролируемых величин является температура заготовки. Для контроля температуры изделий в технологических процессах в настоящее время широко используются оптико-электронные методы и средства (пирометры) [56]. Эти средства контроля используют бесконтактный метод измерения, что является их существенным преимуществом. Однако подобными методами производят измерения, основываясь только на потоке излучения нагретого объекта, т. е. косвенными методами. Значение потока излучения зависит не только от температуры объекта, но и от коэффициента излучения (КИ) [56], который, в свою очередь, зависит от температуры, длины волны, состояния поверхности и ее обработки. Исходя из этого, основным недостатком этих приборов является неопределенность коэффициента излучения поверхности материала, что ограничивает точность измерения температуры. Функциональные зависимости этого коэффициента излучения от температуры и длины волны определяются экспериментально и представлены в справочниках в форме графиков или таблиц. Причем графики зависимостей коэффициента от температуры и длины волны в справочниках представлены отдельно в двух координатных системах, что вызывает сложности их использования. При расчете преобразований сигнала в оптоэлектронном тракте пирометра используются спектральные характеристики элементов тракта: объектива, светофильтров, зеркал и фотоприемника, которые оказывают влияние на измеряемый поток излучения. Кроме того, спектральные характеристики элементов также заданы в справочниках в численной форме с некоторой погрешностью, и поэтому расчет преобразований сигнала может быть выполнен только численно, так же с некоторой погрешностью. Необходимо отметить, что промышленные

пирометры нормируются по инструментальной погрешности измерения, а именно – потока излучения. Инструментальная погрешность приводится в технических характеристиках пирометра и составляет единицы градусов температуры [56]. Коэффициент излучения задается ориентировочно в диапазоне значений 0,1 - 1, т. е. зона неопределенности составляет 0,9, что является источником методической погрешности, значительно превышающей нормированное значение погрешности. Поэтому на практике использование пирометра не позволяет измерять температуру с необходимой точностью, что может сказываться на качестве выпускаемой продукции.

Таким образом, основной проблемой в пирометрии является точный учет коэффициента излучения контролируемой детали [56]. Эта проблема существует с момента разработки и использования пирометров. История развития этих приборов в основном связана с разработкой технических средств обработки информации, которых разработано большое количество. Однако в большинстве случаев эти средства не обеспечивают точный учет коэффициента излучения контролируемой детали. Единственный метод, позволяющий уменьшить погрешность измерения – это метод спектральных отношений. Этот метод позволяет получить наибольший эффект при измерении температуры с постоянным коэффициентом излучения, т. е. серых тел. При реализации этого метода также разработано большое количество технических средств обработки информации, которые принципиально не решают проблему точного учета коэффициента излучения. Необходимо отметить, что в связи с развитием микропроцессорной техники проблем с разработкой устройств обработки информации не существует. По этой причине публикаций по пирометрии в настоящее время очень мало [56].

Из выше изложенного следует, что тема диссертационной работы актуальна.

Степень разработанности темы исследования. В решение проблем и задач теории и проектирования пирометрии и инфракрасной термографии внесли существенный вклад российские и зарубежные ученые.

Вопросам теории измерения температур в технике и промышленности посвящены труды Поскачея А. А., Линевега Ф., Госсорга Ж., Дроздова В.А. Сухарева В.И. и др.

Вопросам теории, расчета и конструирования оптических пирометрических преобразователей посвящены труды российских и зарубежных ученых Афанасьева А. В., Гордова А. Н., Поскачея А. А., Саяпиной В. И., Света Д. Я., Якушенкова Ю. Г., Госсорга Ж., Линевега Ф., Bendada A., Coppa P., Kimura M., Sabel T., Shimizu M., Sun X. B., William J. и других.

Вопросам инфракрасной термографии в строительных энергетических и машиностроительных объектов, методов тепловизионного контроля, методических погрешностей при тепловизионном контроле посвящены труды учёных Вавилова В. П., Нестерука Д. А., Фрунзе А. В. и др.

Цель работы: исследование и разработка оптико-электронных измерительных преобразователей температуры с улучшенными метрологическими характеристиками.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих оптико-электронных средств измерения температуры нагретых изделий металлургии и машиностроения в процессе их производства, выявить их недостатки и сформулировать задачи дальнейших исследований по их усовершенствованию.

2. Исследовать процесс образования погрешностей оптико-электронных измерительных преобразователей температуры и на основе результатов исследования разработать методики повышения их точности.

3. Исследовать существующие методы повышения точности измерительных средств и на основе их разработать функциональную блок-схему оптико-

электронного измерительного преобразователя температуры с улучшенными метрологическими характеристиками.

4. Разработать экспериментальную лабораторную установку для исследования метрологических характеристик предложенных измерительных преобразователей.

Предметом исследования является точность оптико-электронных преобразователей температуры информационно-измерительных систем.

Объектом исследования является информационно-измерительная система управления высокотемпературными технологическими процессами.

Методы и средства исследований. При выполнении исследований и решении поставленных в работе задач использовались методы математического, физического и цифрового моделирования, теории оптических и оптико-электронных систем, теории электрических цепей и автоматического управления, электроники и метрологии.

Достоверность результатов исследования основана на корректных теоретических построениях и строгих математических выводах, а также подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования внедрены на предприятиях Вьетнама: в Университете промышленной технологии Co., Ltd.; в THD Co., Ltd.; в Зуй Хаи Co., Ltd.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Метрологический анализ влияния коэффициента излучения на погрешность бесконтактного измерения.

2. Методика автоматической коррекции погрешности определения коэффициента излучения оптико-электронной системы.

3. Функциональная блок-схема пирометра для измерения отношения интегрирующим двухтактным АЦП.

4. Способ определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом.

Научная новизна диссертации заключается в том, что

1. На основе проведенных исследований влияния функций коэффициента излучения на погрешность измерения радиационного пирометра для некоторых металлов, выявлено, что использование среднего значения коэффициента излучения перед интегралом уравнения Планка вместо функции коэффициента излучения под интегралом потока излучения позволяет значительно упростить вычисление потока излучения реального тела.

2. На основе проведенного анализа преобразования информационного сигнала в оптоэлектронном тракте радиационного пирометра разработан способ получения функции коэффициента излучения от температуры по образцу материала, позволяющий исключить погрешность, обусловленную отличием материалов предварительной тарировки и измерения, а также спектральных характеристик пирометров при тарировке и измерении.

3. На основе анализа логометрических преобразователей, которые можно использовать в пирометрах спектрального отношения, обоснованно выбран аналого-цифровой преобразователь двухтактного интегрирования, который позволяет одним преобразователем реализовать функции двух аналого-цифровых преобразователей и цифрового вычислительного устройства. Нестабильность параметров АЦП не оказывает влияния на погрешность преобразования.

Теоретическая и практическая ценность работы.

1. Разработана методика аппроксимации частотных характеристик оптических и оптоэлектронных элементов пирометров с помощью трапецеидальной формы, для построения которой необходимо 4 координаты вместо 40-50 координат, что значительно сокращает время поиска

необходимых элементов и позволяет использовать математический аппарат и программы нечетких множеств.

2. Разработана экспериментальная установка для исследования погрешностей пирометра, которая подтвердила теоретические положения исследований и позволяет корректировать результаты проектирования других преобразователей.

3. На основе результатов исследований были разработаны два оптико-электронных преобразователя: радиационный и спектрального отношения, оригинальность которых подтверждена патентами на полезную модель.

Соответствие паспорту специальности. Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы» (технические науки) по пункту 1: «Научное обоснование перспективных информационно- измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышения эффективности существующих систем» и пункту 2: «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

Апробация работы. Основные положения и материалы осуждались на следующих научных конференциях: Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 2 (35), Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: XXVI г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г., XXVII г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г., XXVIII г. Волгоград, 23 октября по 06 ноября 2023 г., XV Международная конференция «Прикладная оптика-2022» в Санкт-Петербурге. (15–16 декабря 2022), LV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 сентября 2023 г.), Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.).

Личный вклад автора.

1. Проанализирована методика использования интегрального коэффициента излучения в энергетических пирометрах [56, 57] и разработана функциональная блок-схема оптико-электронного прибора для измерения температуры нагретых изделий [42, 43, 44, 45, 56].

2. Предложена блок-схема цифрового пирометра спектрального отношения [80, 81, 82, 89]. Предложено решение способа определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом [58, 59].

3. Доказан метод трапецеидальной аппроксимации, что позволяет повысить быстродействие вычислений коэффициента полезного действия приемника излучения [78, 79].

4. Предложен способа определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом [42, 43, 56].

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных журналах, сборниках трудов всероссийских, региональных конференций, научно-издательского центра «Актуальность. РФ». Из них 3 работы в журнале по списку ВАК РФ. Получен один патент на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 115 страницах основного текста, содержит 40 рисунков, 11 таблиц. В Списке используемой литературы – 106 наименований.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Проблемы оптической пирометрии

1.1.1. Излучательная способность нагретого тела

Излучательная способность (коэффициент излучения, называемый иногда «степень черноты») – это характеристика поверхности тела, которая определяет его способность излучать инфракрасную энергию. Она определяется как отношение энергии, излучаемой реальной поверхностью при определенной температуре, к энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Коэффициент излучения зависит от длины волны, температуры тела и свойств материала. Коэффициент излучения тем выше, чем короче длина волны. Кроме того, ошибка, вызванная неточным определением коэффициента излучения, будет пропорциональна эффективной длине волны. Излучательная способность тела может принимать значения в диапазоне от 0,1 до 1. Не точный выбор коэффициента излучения является основным источником погрешности при измерении температуры нагретого тела. Большое влияние на значение коэффициента излучения оказывают степень обработки материала и окисленность его поверхности. Так, например, для окисленной поверхности стали коэффициент излучения составляет около 0,85, а для полированной поверхности - 0,075. Коэффициент излучения определяется экспериментально, а функциональные зависимости коэффициента излучения приведены в справочниках [1, 2]. В справочных материалах обычно содержатся данные, полученные при определенных условиях. Например, для гладких поверхностей коэффициент излучения определяют по формуле $\varepsilon=1-R$, где R – коэффициент отражения от полупространства. Для тонких полупрозрачных пластин (толщиной 0,3–1 мм), широко применяемых в качестве подложек в микро - и оптоэлектронике, используется другое выражение [3]:

$$\varepsilon = 1 - R - T; \tag{1.1}$$

где T – коэффициент пропускания света – является функцией длины волны падающего света, толщины и температуры кристалла.

В пирометрии тонких (прозрачных или полупрозрачных) пленок и волокон возникают аналогичные проблемы. В некоторых случаях от шероховатой непрозрачной поверхности зеркального отражения нет, наблюдается только диффузное рассеяние в полусферу. В этом случае выражение для интенсивности излучения, падающего на пирометр, определяется выражением [3]:

$$\varepsilon = 1 - S, \tag{1.2}$$

где S – коэффициент рассеяния света.

Выбор коэффициента излучения участков с компонентами из разных материалов является сложной задачей. Например, поверхность интегральной схемы включает в себя легированные и нелегированные полупроводники, металлические проводники и диэлектрические изоляторы. При этом любая область, размер которой меньше длины волны теплового излучения, содержит множество таких компонентов. В научно-исследовательских работах с использованием новых объектов и необработанных материалов для достижения высокой точности температурных измерений необходимо проводить предварительные исследования эмиссионного излучения каждого образца. Эти исследования являются сложными и трудоемкими, поэтому методы оптического термометра в большинстве случаев непригодны для их проведения. В оптической пирометрии измерения интенсивности излучения обычно проводятся на одной (λ_1) или двух (λ_1 и λ_2) длинах волн [4 - 7].

1.1. 2. Неравновесное излучение

В оптической пирометрии, использующей одну или две длины волны, не проводится проверка гипотезы о непрерывности и тепловом характере спектра излучения исследуемого объекта. В плазменных технологиях и при пирометрии пламени и взрывов без такой проверки нельзя утверждать, что регистрируемое

излучение является равновесным и описывается формулой Планка. Измерение температуры в средах с химическими процессами представляет собой сложную задачу, обусловленную рядом факторов. Одним из них является неопределенность коэффициента излучения, который зависит от состава и свойств среды, а также от условий измерения. Другой проблемой является присутствие неравновесного излучения, возникающего в результате химических реакций и других процессов, протекающих в среде. Неравновесное излучение может вносить значительный вклад в измеряемый сигнал, что приводит к ошибкам в определении температуры. Одним из примеров неравновесного излучения является «суперконтинуум», который возникает при облучении прозрачных материалов фемтосекундными лазерными импульсами. Суперконтинуум представляет собой интенсивное свечение с непрерывным спектром, которое не связано с температурой среды. Например, при облучении плавленого кварца импульсом лазера $Ti:Al_2O_3$ (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс) непрерывный спектр наблюдается в интервале длин волн от 400 до 800 нм [8].

В радиационных технологиях температурные измерения затруднены из-за изменения излучательных свойств поверхности и возникновения неравновесного излучения при взаимодействии частиц с поверхностью. В обзорной статье [9] по дефектообразованию при ионной имплантации кремния раздел, посвященный температуре имплантации, содержит лишь ограниченное количество ссылок на литературу (всего три). В имплантере собственное свечение пучка ионов, извлеченных из плазмы и ускоренных электрическим полем до энергий 0,1–1 МэВ, наблюдается визуально. Монокристалл *Si*, облучаемый и нагреваемый ионным пучком до 700–800 К, в диапазоне спектра 3-5 мкм светится довольно слабо. До сих пор не измерена температура в ионных треках, возникающих в веществе при прохождении ионов с энергиями от сотен кэВ до сотен МэВ. Тепловое излучение полупроводниковых кристаллов (*Si, Ge*) обусловлено рассеянием свободных носителей заряда

(электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне). Мощное оптическое облучение полупрозрачного кристалла приводит к существенному увеличению концентрации свободных носителей по сравнению с равновесной концентрацией. В результате увеличения концентрации свободных носителей увеличивается и интенсивность теплового излучения. Это связано с тем, что количество рассеянных фотонов увеличивается, что приводит к увеличению мощности теплового излучения [10]. Таким образом, для множества объектов, которые подвергаются мощному оптическому облучению, получить достоверные данные о температуре методами пирометрии бывает трудно или невозможно.

1.1.3. Постороннее излучение

Одно- и двух волновые пирометрические методы являются простыми и эффективными методами измерения температуры. Однако они имеют один существенный недостаток: они не обладают свойством идентифицируемости сигнала. Это означает, что регистрируемый сигнал не содержит признаки, указывающих на его происхождение, и не позволяет выявить отклонения от нормальной измерительной процедуры. Пирометр регистрирует излучение в выбранном направлении, независимо от происхождения этого излучения. Пирометры измеряют интенсивность излучения в двух или трех заданных точках спектра. На основании этих измерений рассчитывается температура объекта. Однако если в области визирования пирометра присутствует излучение от других источников, например, от солнечного света, то это излучение может повлиять на результат измерения. В работе [11] описан измерительный абсурд, который может возникнуть при измерении температуры снега в солнечный день с помощью яркостного оптического пирометра на длине волны 650 нм. В этом случае прибор может показать температуру $T \geq 1500$ К. Влияние посторонней засветки фотоприемника может быть выявлено и устранено в единичных случаях [12]. В ряде случаев влияние постороннего излучения не может быть достоверно установлено, и регистрируемый сигнал

может быть не связан с температурой исследуемого объекта. Быстрые термические процессы (БТП) широко используются в микроэлектронике для нанесения покрытий, отжига дефектов и других операций. В этих процессах подложка нагревается до высоких температур (1100–1500 К) за короткое время (10–30 с). Измерение температуры подложки в БТП является важной задачей, поскольку от ее значения зависит качество получаемых изделий. Традиционные методы оптической пирометрии в данном случае неприменимы, поскольку оптическое излучение мощных газоразрядных ламп, используемых для нагрева подложки, значительно превышает излучение самой подложки. Здесь возникает сложная проблема разделения двух непрерывных спектров при их наложении.

1.1. 4. Неоднородность температуры

Пространственная неоднородность температуры объекта является серьезной проблемой оптических измерений. Она может наблюдаться как в области визирования, так и вдоль луча зрения. Такая особенность характерна для микроволнового воздействия на твердые диэлектрические материалы и жидкие растворы. Микроволны проникают в объем диэлектрика, поэтому температура поверхности обычно бывает существенно ниже температуры внутренней области. При этом распределение температуры может быть сложным и неравномерным [13]. Измерение температуры поверхности не является точным методом определения кинетики крупномасштабных физико-химических процессов. Это связано с тем, что регистрируемое тепловое излучение длин волн в прозрачной области объекта позволяет определить лишь среднюю температуру на луче зрения. При этом результат усреднения зависит от полосы спектра, в которой измеряется интенсивность излучения. Пространственная температурная неоднородность является характерной особенностью воздействия микроволн на неоднородные материалы. Она проявляется в виде тепловой нестабильности процесса нагрева. При локальном повышении температуры увеличивается микроволновое поглощение, что приводит к ускорению нагрева в этом месте. Это, в свою очередь, приводит к

дальнейшему увеличению поглощения и ускорению нагрева. Трудно определить взаимосвязь между измеренной средней температурой и температурой горячих точек в объеме и на поверхности объекта. Это связано с тем, что традиционные методы измерения температуры оптическими термометрами не всегда эффективны в микроволновых технологиях.

1.1.5. Требования к точности пирометров

Точность измерений температуры пирометрическими методами зависит от множества факторов, поэтому утверждение о том, что она является одинаково точной в любых условиях, а погрешность измерений всегда поддается надежной оценке, является неверным. Например, утверждение о том, что в сталелитейной промышленности требования к точности измерений температуры очень высоки и погрешность не должна превышать ±5 °C при температуре жидкого металла 1600–1800 °C [14], возможно, является верным, но без обоснования оно вызывает сомнение. Неясно, каким образом получено это значение погрешности, если оно было получено при работе с моделью абсолютно черного тела. Другое утверждение: «При горячей прокатке цветных металлов (температура движущихся слитков меди и ее сплавов 650–1000 ^{o}C) допустимая погрешность измерения температуры составляет 2%». В доменном производстве допустимая методическая погрешность измерений температуры составляет не более 1,5% [15]. При температуре плавления железа (1810 К) это соответствует абсолютной погрешности около 30 °C. В металлургической отрасли допустимые погрешности измерения температуры металлов варьируются в широких пределах, от нескольких градусов до нескольких десятков градусов. Эти различия не имеют очевидного обоснования, поскольку не ясны физические факторы, влияющие на точность измерения. Кроме того, высокие требования к точности измерения температуры металлов не кажутся реальными еще и потому, что температура металла контролируется в промышленных условиях лишь «в редких случаях» [16]. В работе [17] утверждается, что при нагреве кристалла до 1500 °C точность поддержания его

температуры составляет ±0,1 °С. Однако данное утверждение, приведенное без обоснований, выглядит неправдоподобным. Такая точность измерения может быть достигнута с использованием высокоточных термометров, которые являются дорогостоящими и сложными в эксплуатации. При выращивании кристаллов температура расплава и кристалла неодинакова. Температура расплава выше температуры кристалла, что приводит к пространственной неоднородности температуры. В разных точках кристалла и расплава температура может отличаться более чем на 0,1 °С. Например, в кремнии вблизи фронта кристаллизации из расплава измеренные градиенты температуры достигают 30–50 К/см [18]. В настоящее время систематические измерения температуры на фронте кристаллизации и вблизи него не проводятся. Для измерения температуры кристалла кремния яркостным пирометром в технологической установке с точностью ±2 *К* при температуре $T \approx 1300$ К необходимо знать излучательную способность кристалла с погрешностью не более ±2%, т. е. с точностью $\delta_\varepsilon \approx 0{,}01$. [19]. Особенно большое влияние на излучательную способность кремния оказывают прозрачные пленки. При их осаждении на поверхность монокристаллов кремния происходит изменение излучательной способности, которое может достигать 100–200 ^{o}С [20]. Это связано с тем, что пленки изменяют распределение оптической толщины в материале, что приводит к изменению поглощения и отражения излучения. Оптические свойства большинства материалов изучены недостаточно полно или не изучены совсем. Измерения в технологических установках часто осложняются рядом факторов, которые могут проявляться одновременно. При нанесении вакуумно-дуговых покрытий (TiN, TiAlN и др.) на поверхность стального инструмента важно поддерживать температуру детали в диапазоне 500–900 К, не допуская перегрева, что приводит к уменьшению твердости стали [21]. Под действием ионной бомбардировки из плазмы происходит неоднородный нагрев инструмента. В литературе по температурным измерениям данные по погрешностям измерения обычно приводятся без указания объектов и условий, для которых определялись

погрешности. Это затрудняет оценку точности измерений пирометром в реальных условиях. Например, всправочнике по термической обработке в машиностроении [22] указывается, что основная погрешность показаний пирометра не превышает ±1 % от верхнего предела измерения 2000 °С. В диапазоне температур выше 2000 °С основная погрешность составляет ±1,5 %.

Точность оптической пирометрии зависит от трех факторов: распространенности измерительного объекта, многократной воспроизводимости результатов измерений и изученности свойств и условий измерения. В метрологии, при измерении температуры объектов, которые хорошо изучены, возможно достижение пяти значащих цифр. Например, измерены температуры плавления серебра T_{Ag} = 1235,009 ± 0,044 К и золота T_{Au} = 1337,330 ± 0,049 К [23]. Для малоизученных объектов, о которых мало известно, точность измерений может быть значительно ниже, чем для хорошо изученных объектов. Знание свойств исследуемого объекта имеет решающее значение для получения надежных и точных результатов измерения. Измерительно-вычислительные ошибки, связанные с незнанием особенностей объекта и условий измерения, могут быть значительными и достигать десятков, сотен процентов, а в некоторых случаях даже порядков величины. Причины значительных расхождений приведены в работах разных авторов по измерению температуры плавления графита [21 – 27]. В работах по исследованию температуры плавления железа, сжатого в алмазных наковальнях до давлений 50–100 ГПа, наблюдаются расхождения 1000 К [28].

1.1. 6. Завышение точности измерений пирометров

Требования к точности при изготовлении полупроводниковых лазеров определяются физикой процесса эпитаксии. Например, изменение ростовой температуры приводит к изменению состава активной области и, как следствие, к изменению длины волны генерации лазера. Поэтому для поддержания ширины запрещенной зоны InGaAsP в пределах ±4 нм вблизи 1550 нм требуется поддержание температуры подложки с точностью ±1°С вблизи 800 °С [29, 30].

Выход за допустимые пределы параметров лазера сопровождается легко наблюдаемым изменением длины волны генерации. Для ряда других промышленных технологий не всегда понятно, почему необходима высокая точность поддержания температурного режима и к каким последствиям приводит выход за его пределы. Чтобы сформулировать обоснованные требования к точности поддержания режима, необходимо определить температурную зависимость параметра, который должен быть постоянным. В ряде случаев неизвестны точные количественные и качественные результаты нарушения температурного режима, поэтому требования к нему задаются произвольно, но всегда с большим запасом.

Можно сделать следующие предположения о необходимой точности измерений [31]:

– высокая точность измерений необходима в тех случаях, когда доказано, что в узком интервале температур происходят существенные изменения свойств вещества или процесса;

– в условиях отсутствия существенных изменений, достоверность которых подтверждена, высокая точность измерений не является необходимой (например, они наблюдаются лишь при больших вариациях температуры);

– в условиях неоднородности температуры объекта высокая точность измерения температуры нецелесообразна. Это связано с тем, что в таких условиях среднее значение температуры по области визирования с большим градиентом температуры, средняя температура в нестационарном процессе и температура в одной произвольной точке большого неоднородно нагретого объекта не отражают истинного значения температуры объекта.

1.1. 7. Проверка точности пирометров независимым методом

В экспериментальных и технологических установках данные температурных измерений редко подвергаются проверке другими методами, даже двумя датчиками одновременно. Например, результаты измерений двумя

пирометрами (полного излучения и спектрального отношения) в сложных условиях производства цемента (присутствие пыли и пламени) отличаются на 150–270 К при температуре около 2300 К [32]. В обширной литературе по оптической пирометрии встречаются единичные упоминания о применении дополнительных независимых методов. В качестве примера, в работе [33] совместно использовались методы пирометрии и дифракции быстрых электронов на кристаллической решетке. Постоянная решетки зависит от температуры, что позволяет использовать этот метод для ее измерения. В работе [34] одновременно с пирометрией железа измерялось чувствительное к температуре отношение интенсивностей стоксовой и антистоксовой линий рассеянного рентгеновского излучения с энергией 14 кэВ. В работе [35] для измерения температуры тепловых кремниевых микроизлучателей в области 800–1400 К одновременно использовались оптический и контактный методы. В работе [36] для измерения температуры наночастиц использовались методы пирометрии и дифракции рентгеновских лучей. В некоторых случаях для контроля результатов пирометрии используются дополнительные методы, которые являются сложными и трудоемкими. Они недоступны большинству лабораторий.

1.1. 8. Особенности контроля технологических процессов

Точность измерения температуры в технологических установках не всегда имеет решающее значение. В некоторых случаях важнее обеспечить точное поддержание температуры в течение длительного времени и сохранение температурного режима от одного включения к другому. Это связано с тем, что даже небольшое отклонение температуры от заданного значения может привести к нежелательным последствиям, таким как ухудшение качества продукции, снижение производительности или выход из строя оборудования. Например, при термической обработке металла необходимо поддерживать температуру в строго заданном диапазоне. Даже небольшое отклонение температуры может привести к перегреву или недогреву металла, что приведет

к снижению его механических свойств. В качестве примера можно привести технологический процесс производства основных базовых деталей аэрокосмической техники, нефтегазового и энергетического оборудования обечаек, представляющих собой оболочки вращения, Обечайки изготавливают из листового материала на валковых листогибочных машинах, а для уменьшения изгибающих усилий на заготовку ее предварительно нагревают до 1000 ^{o}C. Технологический процесс формообразования для придания детали цилиндрической формы должен проходит до 600 ^{o}C. Если температура детали ниже 600 ^{o}C, то происходит нарушение механических свойств материала, а если температура больше 1000 ^{o}C, то происходит интенсивное образование окалины, что нарушает качество выпускаемой продукции. В других случаях высокая точность измерения температуры необходима для контроля за протеканием технологического процесса. Например, при синтезе химических веществ необходимо точно контролировать температуру реакции, чтобы избежать побочных реакций или получения продукта с нежелательными свойствами.

1.2. Бесконтактные приборы измерения температуры

Температура нагретого тела может быть определена на основании измерения параметров его теплового излучения. Тепловое излучение представляет собой электромагнитные волны, длина которых зависит от температуры тела. Чем выше температура тела, тем больше энергии оно излучает, и тем короче длина волны излучения [37]. Видимый человеческим глазом диапазон спектра электромагнитного излучения, называемый светом, составляет лишь небольшую его часть. Его длина волны лежит в диапазоне от 0,40 до 0,75 мкм. Лучи с большей длиной волны, чем видимый свет относятся к инфракрасному участку спектра, который охватывает диапазон от 0,75 до 400 мкм. С увеличением длины волны инфракрасное излучение постепенно переходит в диапазон радиоволн. Лучи с меньшей длиной волны, чем видимый свет (менее 0,40 мкм), относятся к ультрафиолетовому участку спектра. Ультрафиолетовый спектр охватывает диапазон от 0,01 до 0,40 мкм. В области

температурных измерений используют в основном диапазон инфракрасных и видимых лучей [37].

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют пирометрами. Они позволяют измерять температуру в широком диапазоне от 100 до 6000 °С и выше. Одним из главных достоинств пирометров является отсутствие влияния измерителя на температурное поле измеряемого объекта. Это обусловлено тем, что пирометры не вступают в непосредственный контакт с объектом, а измеряют его тепловое излучение на расстоянии. Благодаря этому пирометры могут использоваться для измерения температуры опасных или горячих объектов, а также объектов, находящихся в труднодоступных местах.

Бесконтактные методы измерения температуры имеют ряд преимуществ перед контактными методами [37]:

1) неограниченный верхний температурный предел;
2) обеспечивают возможность измерения температуры на расстоянии;
3) не искажают температурное поле объекта измерения;
4) могут измерять температуру газовых потоков с высокой скоростью.

На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов [37]:

1) радиационный пирометр, который измеряет полную энергию излучения объекта, независимо от его спектрального состава.
2) яркостный пирометр, который измеряет энергию излучения объекта в видимом участке спектра;
3) пирометр спектрального отношения, который измеряет отношение энергии излучения объекта в двух или более фиксированных участках спектра.

В зависимости от метода измерения температуры и результаты измерения называются радиационная, яркостная и цветовая температуры.

Радиационной температурой реального тела $T_р$ называют температуру, при которой полная мощность АЧТ равна полной энергии излучения исследуемого тела при действительной температуре $T_д$.

Яркостной температурой реального тела $T_я$ называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения АЧТ равна яркости тела для заданной длины волны при действительной температуре $T_д$.

Цветовой температурой реального тела $T_ц$ называют температуру, при которой отношения плотностей потоков излучения АЧТ для двух длин волн λ_1 и λ_2 равно отношению плотностей потоков излучений реального тела для заданной длины волны при действительной температуре $T_д$.

1.2.1. Радиационные пирометры полного излучения

Принцип действия радиационных пирометров основан на измерении потока излучения нагретого тела, который по закону Стефана - Больцмана, функционально связан с температурой тела. Радиационные пирометры называют еще и энергетическими, поскольку они работают в широком спектральном диапазоне и используют максимальное значение потока излучения. Поэтому пирометры этого типа имеют высокую чувствительность. Спектральный диапазон пирометра определяется спектральными диапазонами приемника излучения, оптических и зеркальных элементов. Необходимо отметить, что математически довольно сложно выразить температуру тела через поток излучения, который измеряется преобразователем – приемником излучения. Поток излучения нагретого тела зависит не только от температуры, но от коэффициента излучательной способности поверхности тела, который зависит от температуры, длины волны, материала и состояния поверхности и ее обработки. Функциональные зависимости коэффициента излучательной способности приведены в виде графиков в справочниках, причем приводятся в двух координатной форме в виде семейства и в разных источниках зависимости не совпадают. Неточная информация о коэффициенте излучательной способности является основным источником погрешности радиационного

пирометра. Эти пирометры имеют высокую точность измерений и широко используются в различных областях промышленности, науки и техники. Обобщенная блочно-функциональная схема радиационного пирометра приведена на рис. 1.1. Пирометр состоит из следующих основных частей: оптической системы объектива *1*, окуляра *2*, диафрагмы *3*, приемника излучения *4*, светофильтра *5* и регистрирующего прибора *6* [37].

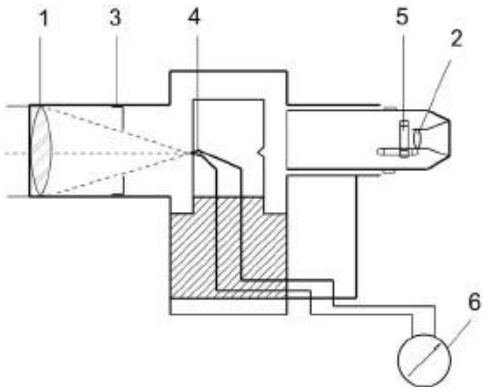


Рисунок 1.1. Обобщенная блочно-функциональная схема радиационного пирометра: 1 - объектив, 2 – окуляр; 3 – диафрагма; 4 – приемник излучения; 5 – светофильтр; 6 – регистрирующий прибор.

В настоящее время в качестве приемников излучения различные типы: вакуумные приборы (фотоэлементы и фотоумножители), полупроводниковые приборы (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.). Тип приемника излучения выбирается в зависимости от спектрального диапазона и метрологических характеристик. В качестве измерительных приборов применяют аналоговые милливольтметры, автоматические потенциометры и уравновешенные мосты, цифровые измерительные приборы. [37]. Материал линз объектива выбирается в зависимости от интервала измеряемых температур. Стекло из флюорита имеет низкую теплопроводность и высокий коэффициент преломления, что позволяет измерять низкие температуры, начиная с 100 °С. Кварцевое стекло имеет высокую термостойкость и прозрачность в широком диапазоне длин волн. Оно используется для измерения температур в диапазоне от 400 до 1500 °С. Оптическое стекло имеет высокую прозрачность и прочность. Оно используется для измерения температур от 950 °С и выше [37]. Таким образом, выбор материала линзы для оптического пирометра зависит от диапазона измеряемых температур и требований к точности измерений.

Зависимость действительной температуры $T_д$ тела от радиационной $T_р$, измеряемой пирометром, выражается зависимостью [37]:

$$T_д = T_р \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}, \tag{1.3}$$

где ε - коэффициент излучательной способности поверхности тела.

Допустимая погрешность технических промышленных пирометров при измерении температуры от 100 до 3500 °С возрастает с увеличением верхнего предела измерения. При температуре 1000 °С погрешность составляет ±12 °С, при температуре 2000 °С – ±20°С, а при температуре 3000 °С – ±35°С.

В формуле (1.3) используется усредненное значение коэффициента излучательной способности поверхности материала, что является источником погрешности. Точный учёт количества поступающей в приёмник лучистой энергии является сложной задачей, поскольку между теплоприёмником и окружающей средой происходит теплообмен. Это приводит к тому, что прибор может иметь дополнительные погрешности. Несмотря на эти недостатки, пирометры полного излучения широко применяют в производственной практике. Они могут быть установлены стационарно, позволяют использовать дистанционную передачу информации, автоматически записывать и регулировать температуру в технологических процессах. [37].

1.2.2. Яркостные пирометры частичного излучения

Яркостные или квазимонохроматические пирометры относятся к оптическим приборам, которые регистрируют температуру объекта визуальным методом в узком диапазоне длин волн (в видимом спектре). Принцип действия таких приборов основан на сравнении яркости излучения двух тел: измеряемого и эталонного. Наиболее распространенным прибором среди яркостных пирометров является пирометр с исчезающей нитью (рис. 1.2) [37].

Пирометр представляет собой корпус, в котором установлены с возможностью перемещения две телескопические трубки. В передней трубке

закреплен объектив 1, в плоскости изображения которого установлена лампа накаливания 2 с подковообразной нитью. В корпусе за объективом закреплен серый поглощающий светофильтр 2, предназначенный для управления пределами измерения. В задней трубке закреплен окуляр 4 с красным светофильтром *5*, пропускающим лучи только видимого спектрального диапазона. [37].

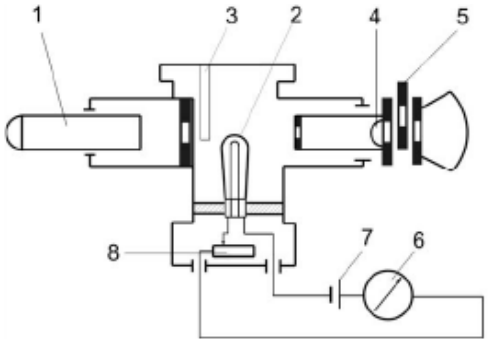


Рисунок 1.2. Обобщенная блочно-функциональная схема яркостного пирометра: 1 – объектив; 2 – лампа накаливания; 3 – поглощающий светофильтр; 4 –окуляр; 5 – красный светофильтр; 6 – миллиамперметр; 7 – источник тока; 8 – реостат

Электрическая цепь питания лампы 2 содержит миллиамперметр 6, источник тока *7* и реостат 8. Шкала миллиамперметра отградуирована в градусах измеряемой температуры. [37]. Возможность перемещения объектива и окуляра вдоль оси в телескопических трубках то позволяет получить резкое изображение раскаленного тела и нити лампы. Для подготовки оптической системы к измерению объектив наводится на тело и настраивается до получения четкого изображения тела и нити лампы (в виде резкой черной подковки). Затем включается источник тока и реостатом регулируется яркость нити до тех пор, пока средняя часть ее не сольется с изображением нагретого тела. В этот момент по шкале измерительного прибора регистрируется температура тела. Зависимость действительной температуры тела от яркостной, измеряемой пирометром, выражается следующей зависимостью [37]:

$$T_д = (\frac{1}{T_я} - \frac{\lambda}{C} In \frac{1}{\varepsilon_\lambda})^{-1}, \qquad (1.4)$$

где λ – длина волны монохроматического излучения; C – константа уравнения Вина; ε_λ – коэффициент излучательной способности для данной длины волны.

Точность измерения пирометра с исчезающей нитью обеспечивается стабильностью характеристик измерительного прибора и лампы. Основным источником погрешности пирометра является лампа с вольфрамовой нитью, яркость которой зависит от силы тока, протекающего через нее. При температуре выше 1400 °С вольфрамовая нить начинает распыляться, что приводит к изменению ее сопротивления, а также к образованию темного налета на стенках колбы. Эти изменения приводят к изменению яркостной характеристики лампы и, соответственно, к увеличению погрешности. Для повышения предела измерения пирометра с исчезающей нитью применяют серый светофильтр. Он поглощает энергию волн всех длин. Оптическая плотность серого светофильтра должна быть такой, чтобы при яркостной температуре излучателя выше 1400 °С нить лампы накаливания нагревалась до температуры не выше 1400 °С. В соответствии с изменением яркостной характеристики лампы миллиамперметр, используемый в пирометре с исчезающей нитью, снабжают двумя шкалами. Верхняя шкала предназначена для измерения температур от 800 до 1400 °С без серого светофильтра. Нижняя шкала предназначена для измерения температур выше 1300 °С с введенным серым светофильтром [37].

Пирометры с исчезающей нитью позволяют измерять температуру поверхности различных объектов в диапазоне в сравнительно узком диапазоне температур (от 800°С до 1400°С). Яркостные пирометры имеют сравнительно простую конструкцию и, соответственно, высокую надежность. Однако этим приборам присущи следующие недостатки:

1) Ограниченный диапазон измерения, что ограничивает область их применения;

2) Ограниченная точность измерения из-за нестабильности основных элементов проката, что не позволяет использовать эти пирометры в ответственных технологических процессах;

3) Невысокое быстродействие, что ограничивает в управлении высокоскоростными технологически процессами (прокатка и др.);

4) Выходная информация представлены в визуальной форме, что не позволяет использовать эти приборы в системах автоматизации технологических процессов.

1.2.3. Пирометры спектрального отношения (цветовые)

Основная погрешность оптико-электронных радиационных пирометров обусловлена отсутствием достоверной и полной информации о коэффициенте излучательной способности поверхности материала контролируемого тела. Информация о коэффициенте излучательной способности для различных материалов и состояния их поверхностей приведена в справочниках в виде графиков зависимости от длины волны и температуры. В настоящее время разработано большое количество вариантов технических реализаций пирометров, однако они не решают проблемы уменьшения методической составляющей погрешности, обусловленной влиянием нестабильности коэффициента излучательной способности. Основное преимущество пирометров спектрального отношения состоит в том, что принцип действия пирометров этого типа позволяет уменьшить влияние коэффициента излучения на погрешность измерения. В цветовых пирометрах осуществляется измерение спектральной плотности излучения при двух заранее выбранных длин волн, а затем определяется их отношение, значение которого зависит от температуры объекта. Таким образом, по значению этого отношения определяется температура объекта. Преимущество цветовых пирометров заключается в том, что на результат измерения не оказывают влияние изменения мультипликативных параметров обоих каналов, поскольку при вычислении отношения они сокращаются. Кроме того, если поверхность тела является серым, т.е. коэффициент излучения является постоянным, то он так же не оказывает влияния на точность измерения, поскольку коэффициент сокращается. Если коэффициент излучения не является постоянным, то на

спектральной характеристике можно выбрать участок с приблизительно постоянным значением, что позволит уменьшить погрешность измерения.

На рис. 1.3 приведена обобщенная блочно-функциональная схема пирометра спектрального отношения [37].

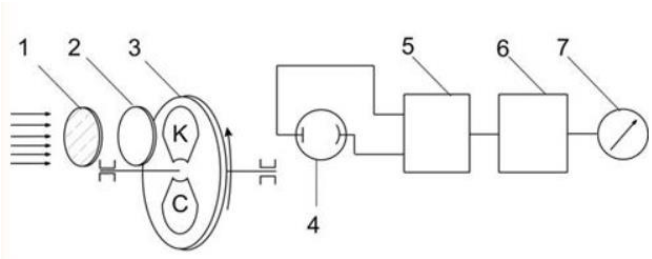


Рисунок 1.3. Обобщенная блочно-функциональная схема пирометра спектрального отношения: 1–защитное стекло; 2–объектив; 3–обтюратор; 4 – приемник излучения; 5 – электронный усилитель; 6 – логометрический преобразователь; 7–милливольтметр.

Измеряемое излучение поступает через защитное стекло *1*, объектив *2*, и обтюратор *3* на приемник *4*. Обтюратор представляет собой диск с двумя окнами, в которые вставлены светофильтры с различными полосами пропускания. При вращении обтюратора поочередно через разные светофильтры потоки излучения от нагретого тела поступают на приемник излучения *4*, затем на усилитель *5* и далее на логометрический преобразователь *6*, который определяет отношения сигналов, которое регистрируется милливольтметром *7*. Таким образом, на приемник излучения последовательно поступают сигналы от двух участков спектра.

Зависимость действительной температуры тела от цветовой, измеряемой пирометром, выражается зависимостью [37]:

$$T_д = \left(\frac{1}{T_ц} - \frac{In(\varepsilon_{\lambda 1} / \varepsilon_{\lambda 2})}{C(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \right)^{-1}, \qquad (1.5)$$

где $\varepsilon_{\lambda 1}$, $\varepsilon_{\lambda 2}$ – коэффициенты излучения для длин волн соответственно λ_1, λ_2; C – константа уравнения Вина.

Диапазон измерения пирометров составляет от 300 до 2800 °С, основная погрешность при измерении температуры физических тел не превышает ±1 % от верхнего диапазона измерений. В качестве недостатка спектрального пирометра в сравнении с другими пирометра можно отметить это сложность конструкции пирометра.

1.2.4. Тепловизоры

Тепловизоры – это оптико-электронные приборы, которые преобразуют изображение нагретого объекта в инфракрасном диапазоне спектра излучения в видимый человеком диапазон, что расширяет возможности человека в познании различных природных явлений. Необходимо отметить, что в наделенном человеку природой спектральном диапазоне минимальны помехи. А в инфракрасном диапазоне каждый объект с температурой, отличной от абсолютного нуля является источником излучения и поэтому видимый спектральный диапазон является наиболее рациональным. Тепловизоры позволяют получать изображения объектов, находящихся в полной для человека темноте.

Диапазон инфракрасного излучения делится на несколько поддиапазонов, каждый из которых применяется для определенных целей (табл.1.1.) [37].

Таблица 1.1. Диапазоны инфракрасного излучения

Длина волн (мкм)	Название поддиапазона
0.76 – 1.5	Ближнее инфракрасное излучение
1.5 – 5.5	Коротковолновое инфракрасное излучение
5.6 – 25	Длинноволновое инфракрасное излучение
25 – 100	Дальнее инфракрасное излучение

Принцип действия тепловизоров основан на преобразовании инфракрасного излучения, излучаемого объектом, в электрический сигнал который усиливается и обрабатывается с целью получения изображения объекта в видимом спектре. Видимое изображение теплового поля называется термограммой, которая используется для контроля и диагностики объекта.

Обобщенная блочно-функциональная схема тепловизора приведена на рис.1.4. [37].

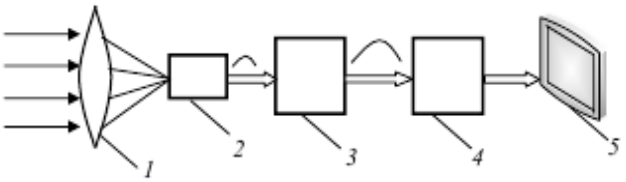


Рисунок 1.4. Обобщенная блочно-функциональная схема тепловизора:1 – объектив; 2 – приемник излучения; 3 – электронный усилитель; 4 – блок обработки информации; 5 – блок отображения информации.

Первоначально приборы для преобразования инфракрасных изображений выполнялись на базе электронно-оптических преобразователей, которые назывались приборами ночного видения. Эти приборы широко используются в военной технике. Приборы позволяли визуально регистрировать черно белое изображение объекта и поэтому не позволяли проводить диагностику объекта. Следующим этапом развития тепловизионных систем были сканирующие оптико-электронные приборы, которые содержали в своем составе приемник излучения, оптико-механическое сканирующее устройство и электронную схему обработки информации. Первые тепловизоры представляли собой сканирующие пирометры с последовательной обработкой информации. Назначение сканирующего устройства с приемником излучения это преобразование пространственного двух координатного изображения во временной электрический сигнал, который преобразуется в двух координатное черно-белое изображение. Необходимо отметить, что было разработано большое количество различных вариантов сканирующих устройств. Необходимо отметить, что приборы такого типа имеют высокую точность, поскольку используется один приемник излучения при преобразовании всего температурного поля. В качестве недостатка следует отметить это невысокое быстродействие, обусловленное последовательным преобразованием информации, и сложность конструкции. Кроме того, для уменьшения шумов приемника излучения в инфракрасной области прибор содержит устройство охлаждения. В качестве устройства охлаждения приемника излучения используется элемент Пельтье, представляющий собой полупроводниковую структуру, в которой при протекании электрического тока возникает перепад температур, что приводит к охлаждению одного из участков конструкции.

В настоящее время разработаны и выпускаются цифровые тепловизоры с многоэлементными (матричными) приемниками излучения, в которых осуществляется параллельная обработка информации (рис.1.4). Инфракрасное излучение проецируется объективом *1* на многоэлементный приемник излучения *2*, который совместно с усилителем *3* и микропроцессорным блоком обработки *4* преобразует температурное поле в цветное изображение, регистрируемое блоком отображения информации *5*, представляющий собой экран жидкокристаллического дисплея. Блок отображения информации имеет цветовую шкалу, в которой каждому значению сигнала соответствует определенный цвет. Кроме того в этих приборах для повышения отношения сигнал – шум использовалась система охлаждения фотоприемника. В настоящее время в тепловизорах используются полупроводниковые матрицы. Высокая чувствительность современных тепловизоров реализуется благодаря наличию высокочувствительных полупроводниковых приемников излучения из антимонида индия InSb, ртуть-кадмий-теллура Hg-Cd-Te и др.

1.2.5. Области применения пирометров и тепловизоров

Принцип действия тепловизоров на регистрации распределения температуры поверхности нагретого объекта. Тепловизоры позволяют по изображению температурного поля поверхности нагретого объекта позволяют осуществлять диагностику объекта. Для диагностики объектов необходима информация об относительном изменении температуры по поверхности объекта. Тепловизоры широко применяются в военной технике и различных отраслях промышленности, включая энергетику, металлургию, машиностроение, строительство и др., а также в медицине, биологии, экологии и сельском хозяйстве. Тепловизоры обладают большим диапазоном функциональных возможностей, которые зависят от области их применения. Необходимо отметить, что тепловизоры нецелесообразно применять для точного измерения температуры объектов, у которых участки поверхности выполнены из разных материалов с различной излучательной способностью.

Поскольку в этом случае невозможно ввести коррекцию на коэффициент излучения. В табл. 1.2. приведены некоторые области применения пирометров и тепловизиоров для диагностики технического состояния объектов [38].

Таблица 1.2. Области применения пирометров и тепловизоров

Области применения	Объекты контроля и выявляемые дефекты
Авиакосмическая	Контроль лопаток ГТД, композитов, соединений и защитных покрытий, теплового режима бортовых РЭА
Атомная энергетика	Тепловая дефектометрия ТВЭЛ, мониторинг энергокоммуникаций, контроль напряженного состояния металла, анализ пористости материалов
Автомобильная промышленность	Дефектоскопия упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения
Агрокомплекс	Мониторинг объектов агрокомплекса на предмет энергосбережения, дефектоскопия деталей сельхозтехники, контроль качества продуктов, контроль состояния овощей и зернохранилищ
Вентиляция и кондиционирование	Диагностика качества герметичности коммуникаций, контроль технического состояния воздушных компрессоров, вакуум-насосов
Водоснабжение, канализация, теплотрассы, и автодороги,	Картирование трубопроводов и дорог, обнаружение мест утечек и нарушений гидротеплоизоляционного покрытия теплотрасс, определение мест и степени активизации мерзлотных, эрозийных, оползневых и обводняющих процессов, диагностика балок и плит перекрытия мостов в статике и динамике
Железнодорожная отрасль	Обнаружение перегрева букс, дефектов контактных сетей, определение мест утечки тока в изоляторах, диагностика электрооборудования подвижного состава, рельсов, опор и пролетных строений мостов
Машиностроение	Контроль тепловых режимов работы машин, механизмов, дефектоскопия деталей, узлов; обнаружение и распознавание внутренних нарушений в материалах
Материаловедение	Тепловая диагностика напряженного состояния объектов, контроль конструкционных материалов

Металлургия	Контроль дефектов в металлопрокате и технического состояния крупных тепловыделяющих объектов (доменных, коксовых, цементных и др.) печей, котлов, воздуховодов, дымоходных труб и т.п. в процессе их эксплуатации, контроль толщины оболочек тепловых агрегатов, контроль температуры расплавов
Медицина, здравоохранение	Термодиагностика сосудистых заболеваний, онкологии, кожных болезней и др.
Микроэлектроника	Контроль пайки и сварки, устройств охлаждения, инфракрасная томография полупроводников и БИС
Нефтегазопроводы	Обнаружение утечек и экологический контроль охранных зон, диагностика состояния изоляционного покрытия и эффективности катодной защиты, герметичности швов, толщины стенок труб, контроль несанкционированных подключений, определение пространственного положения магистральных трубопроводов, а также выявление нарушений залегания трубопроводов в грунте, контроль координатной привязки трубопроводов и пересечений
Нефтехимия	Тепловой контроль реакторных колонн и энергоагрегатов, обнаружение утечек из продуктопроводов
Стройиндустрия, ЖКХ (энергоаудит)	Выявление дефектов в строительных объектах, определение коэффициента теплообмена наружных поверхностей и коэффициента теплопередачи и термического сопротивления в конкретных зонах; оценка энергоэффективности наружных ограждающих конструкций с определением зон сверхнормативных потерь и др.
Холодильные камеры и склады	Диагностика эффективности работы систем охлаждения оборудования, определение дефектных зон термоизоляции
Энергетика (энергонадзор), электромонтаж, электрическое хозяйство	Тепловой контроль турбин, дымовых труб, энергоагрегатов, элементов электротехнического оборудования, электропроводников, обнаружение дефектных контактов, соединений; определение мест утечек тока; обнаружение перегрузки кабелей и проводов
Экология	Обнаружение и оценка возможных разрушений инженерных сооружений, земляного полотна, путепроводов, мостов, тоннелей

1.3. Выводы по первой главе

1. Из анализа теоретических основ пирометрии следует, что пирометры измеряют поток излучения реального тела, а измерять температуру могут только абсолютно черного тела. Для того чтобы определить температуру реального тела, необходимо знать коэффициент излучательной способности материала, который зависит от температуры, длины волны, материала и состояния поверхности. Точно учесть этот коэффициент практически невозможно, и поэтому он задается и устанавливается ориентировочно. В паспорте пирометров обычно указывается инструментальная погрешность, т.е. погрешность измерения потока излучения, которая намного меньше погрешности измерения реального тела с учетом коэффициента излучения.

2. Из анализа оптико-электронных методов и средств измерения температуры следует, что существует большое количество разработок пирометров, но практически все они решают задачи обработки измерительной информации, но не учитывают влияния коэффициента излучения, за исключением пирометров спектрального отношения. Пирометры спектрального отношения позволяют получить минимальную погрешность серых тел, у которых коэффициент излучения имеет постоянное значение. Поэтому необходимо исследовать и разработать методы и средства измерения с минимальным влиянием на точность измерения коэффициента излучения.

3. Из схем обработки информации пирометров наибольшая проблема пирометров спектрального отношения, а именно логометрическая схема обработки информации. Поэтому необходимо исследовать и разработать цифровую схему обработки информации с минимальной инструментальной погрешностью.

2. РАДИАЦИОННЫЙ ПИРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ ИЗДЕЛИЙ

2.1. Физические основы радиационной пирометрии

Принцип действия пирометров основан на измерении потока излучения от нагретого объекта, который зависит от температуры объекта и от излучающей способности материала. Излучающая способность материала зависит в свою очередь от материала, температуры, длины волны потока излучения, состояния излучающей поверхности и степени ее окисления. Влияние этих факторов учитывается функцией коэффициента излучения от длины волны. В процессе измерения температуры сложно учесть эту зависимость, так как не существует точных аналитических выражений этих зависимостей. На практике используются экспериментальные зависимости коэффициента излучения, которые приведены в справочниках [39 - 41]. Отсутствие точной информации о значении коэффициента излучения поверхности изделия является источником методической погрешности. В технической документации в качестве метрологической характеристики - погрешности приводится только инструментальная погрешность, а именно погрешность измерения потока излучения. Коэффициент излучения поверхности материала при измерении задается ориентировочно. Необходимо отметить, что методическая составляющая по значению может значительно превышать инструментальную составляющую. В этих случаях у пользователей пирометров возникает вопрос о несоответствии реальных и паспортных метрологических характеристик. Поэтому для повышения точности пирометров необходимо при измерении более точно учитывать влияние функциональной зависимости коэффициента излучения. Для анализа методической составляющей погрешности предварительно приведем теоретические основы пирометрии [42, 43, 44, 45].

Зависимость функции спектральной плотности энергетической светимости АЧТ подчиняется закону Планка [39, 42, 43, 46, 47]

$$M_{\lambda}^{o}(\lambda,T) = c_1\lambda^{-5}\left(\exp(\frac{c_2}{\lambda T}-1\right)^{-1}, \qquad (2.1)$$

где T – температура абсолютно черного тела, K; $c_1 = 2\pi hc^2$; $c_2 = hc/k$; $h = 6,625.10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка; c = 2,98.10^{10} см/с – скорость света в вакууме; $k = 1,3805.10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана; c_1 = $3,74.10^{-12}$ Вт см^2; $c_2 = 1,438.10^4$ мкм град [42, 43, 44, 45].

Функция $M_{\lambda}^{o}(\lambda,T)$ достигает своего максимального значения при длине волны λ_m, которая связана с температурой излучающей поверхности выражением закона смещения Вина [40]

$$\lambda_m T = B = 2896 \text{ мкм град.} \qquad (2.2)$$

Из закона Вина и уравнения Планка определяется максимальное значение функции [42]:

$$M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T) = 1,315(10^{-3}T)^5. \qquad (2.3)$$

Все соотношения, представленные выше, справедливы для абсолютно черных тел (АЧТ). Выражение закона Планка для реального излучателя имеет следующий вид [42]:

$$M_{\lambda}(\lambda,T) = \varepsilon(\lambda,T)M_{\lambda}^{o}(\lambda,T). \qquad (2.4)$$

Коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda,T)$ зависит от материала, температуры, состояния излучающей поверхности и степени ее окисления [40].

Закон Стефана - Больцмана, получаемый интегрированием закона Планка по длине волны от нуля до бесконечности, определяет интегральную плотность потока излучения черного тела при температуре Т [39, 47]

$$R = \sigma.T^4, \qquad (2.5)$$

где R – плотность излучения, Вт/м^2; T – температура абсолютно черного тела, K; σ = $(5,6697 \pm 0,0029).10^{-12}$ Вт/(м^2·К^4) [42].

Для реальных тел закон Стефана-Больцмана неприменим, так как распределение плотности излучения по спектру у реальных тел и у абсолютно черного тела различны. Однако у большинства твердых тел с шероховатыми поверхностями, особенно у диэлектриков, полупроводников и окислов металлов, распределение энергии по спектру имеет такой же характер, как и у абсолютно черного тела. Такие тела называют серыми. Введение понятия «серого тела» расширяет возможности практического использования закона Стефана-Больцмана, который для серого излучателя имеет следующий вид [42]:

$$R = \varepsilon(T).\sigma.T^4. \tag{2.6}$$

Коэффициент излучения *ε(T)* является безразмерным и характеризует долю суммарного по спектру излучения данного материала от излучения абсолютно черного тела при той же температуре [42].

Из краткого анализа следует практический вопрос измерительной техники, а именно: повышение точности измерения пирометров. В этой задаче очевидным решением этого вопроса является учет реального коэффициента излучения. В источнике [48, 49, 50] приведены автоматические методы повышения точности измерительных устройств, и из анализа этих методов следует, что для более точного учета коэффициента излучения возможно использование двух методов: метода вспомогательных измерений и метода образцовых сигналов. Первоначально рассмотрим вспомогательное измерение, согласно которому к пирометру необходимо подключить через вычислительное устройство прибор для определения функций коэффициента излучения [51 - 55]. Перед измерением температуры предварительно определяется функция коэффициента излучения, а при измерении температуры по измеренному потоку излучения и известной функции излучения вычисляется поток излучения абсолютно черного тела и реальная температура объекта [42]. При обработке результатов экспериментальных исследований используются методы аппроксимации, поэтому проведем анализ погрешностей аппроксимации.

Анализ погрешностей аппроксимации проведем по функциональным зависимостям коэффициента излучения от длины волны [40, 42] (табл.2.1).

Таблица 2.1. Функции спектрального коэффициента ε_λматериалов от длин волн, при 293К

λ, мкм	Экспериментальные данные для различных материалов			
	Алюминий	Железо	Медь	Сталь углеродистая
0.3	0.081	-	0.67	0.5
0.4	0.083	-	0.5	0.45
0.5	0.089	0.44	0.4	0.42
0.6	0.098	0.43	0.2	0.39
0.7	0.111	0.42	0.03	0.38
0.8	0.14	0.39	0.02	0.37
0.9	0.111	0.37	0.02	0.36
1	0.068	0.36	0.02	0.35
2	0.03	0.22	0.018	0.22
3	0.026	0.16	0.016	0.16
4	0.024	0.11	0.014	0.12
5	0.023	0.08	0.012	0.1

Функциональные зависимости коэффициента излучения от длины волны могут быть получены по приведенным данным в таблице 1 с помощью существующих программ аппроксимации экспериментальных данных. Основной проблемой аппроксимации является обоснованный выбор аппроксимирующей функции, поскольку этот процесс не формализован [42].

Необходимо отметить, что известны выражения для аппроксимирования функций спектрального коэффициента излучения для различных металлов с полированной поверхностью в направлении нормали к поверхности металла [47]:

$$\varepsilon_{Теор}(\lambda) = 0,006\sqrt{\left[\rho\left[1+\alpha\left(T-293\right)\right]\frac{1}{\lambda}\right]^3} - 0,0667\rho\left[1+\alpha\left(T-293\right)\right]\frac{1}{\lambda} + 0,365\sqrt{\rho\left[1+\alpha\left(T-293\right)\right]\frac{1}{\lambda}}, \quad (2.7)$$

где $\varepsilon_{Теор}(\lambda)$ – коэффициента излучения по теории; ρ – удельное сопротивление металлов, Ом·см; α – коэффициент теплового изменения удельного сопротивления [42].

при $$\beta = \rho\left[1+\alpha\left(T-293\right)\right], \tag{2.8}$$

$$\varepsilon_{Теор}\left(\lambda\right) = 0,006\sqrt{\left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^3} - 0,0667\frac{\beta}{\lambda} + 0,365\sqrt{\frac{\beta}{\lambda}}\ . \tag{2.9}$$

Эти выражения позволяют получить функции спектрального КИ без предварительных измерений по постоянным величинам, приведенным в табл. 2.2 [40, 41, 42, 47].

Таблица 2.2. Величины удельных сопротивлений материалов ρ, Ом·см при 20°С и коэффициента теплового изменения удельного сопротивления α [42].

Материал	Удельное сопротивление металлов ρ, Ом·см, при 20°С	Коэффициент теплового изменения удельного сопротивления α
Алюминий	$2,82\cdot10^{-6}$	$3,6\cdot10^{-3}$
Железо	$9,8\cdot10^{-6}$	$5,0\cdot10^{-3}$
Медь	$1,72\cdot10^{-6}$	$4,0\cdot10^{-3}$
Легированная сталь	$1,50\cdot10^{-5}$	$1,5\cdot10^{-3}$

Если оптимальная функция имеет вид, аналогичный теоретической функции (2.9), то есть полином порядка $3/2$ с переменной β/λ [42]:

$$\varepsilon_{Опти}\left(\lambda\right) = a.\left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{3/2} + b.\frac{\beta}{\lambda} + c.\left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{1/2} + d. \tag{2.10}$$

При 293 К вместо числового выражения (2.8) получаем $\beta = \rho.C$ помощью программы *Gnuplot* и её функции *fit* на основе метода наименьших среднеквадратических отклонений получены коэффициенты *a, b, c, d* (табл. 2.3) [42].

Таблица 2.3. Коэффициенты оптимальной функции[42].

Материал	Коэффициенты функции излучения			
	a	b	c	d
Алюминий	-5.9935	-0.9164	1.3460	-0.0824
Железо	-5.5164	1.8723	1.6272	-0.1682
Медь	-185.3630	118.7600	-17.9848	0.7413
Сталь	2.7220	-4.6701	3.1013	-0.3223

Далее проведем анализ погрешностей аппроксимации двух методов: по выражениям аппроксимации каждого материала (2.10) и по обобщенным выражениям (2.7 – 2.9) [42].

Оценку погрешностей проведем по следующим выражениям. Разность между значением аппроксимированной функции и экспериментальным значением от длины волны [42]:

$$\Delta_i = \varepsilon(\lambda_i) - \varepsilon_i, \tag{2.11}$$

где ε_i – экспериментальные значения, $\varepsilon(\lambda_i)$ – значения аппроксимированной функции при λ_i [42].

Среднее значение отклонения во всем диапазоне [42]:

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i = \frac{1}{n}\Delta_{\Sigma}, \tag{2.12}$$

Среднее квадратическое отклонение во всем диапазоне длин волн [42]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2}, \tag{2.13}$$

Результаты вычислений приведены в таблице 2.4, графики зависимостей спектрального коэффициента излучения каждого материала от длины волны на рис. 2.1 а, б, в, г [42]:

Таблица 2.4. Значения отклонений и суммы квадратов отклонений[42]

Длина волны λ, мкм	Алюминий		Железо		Медь		Сталь	
	Δ_1	Δ_2	Δ_1	Δ_2	Δ_1	Δ_2	Δ_1	Δ_2
0.3	0.0248	-0.0096	-	-	-0.5863	0.0291	-0.2545	0.0429
0.4	0.0093	0.0152	-	-	-0.4271	-0.0343	-0.2334	0.0282
0.5	-0.0060	0.0163	-0.2910	0.0005	-0.3346	-0.0918	-0.2237	0.0251
0.6	-0.0219	0.0072	-0.2930	0.0011	-0.1401	0.0010	-0.2091	0.0325
0.7	-0.0404	-0.0086	-0.2925	-0.0062	0.0256	0.0962	-0.2113	0.0244
0.8	-0.0738	-0.0417	-0.2702	0.0041	0.0321	0.0531	-0.2112	0.0185
0.9	-0.0484	-0.0171	-0.2566	0.0044	0.0292	0.0149	-0.2096	0.0140
1	-0.0086	0.0214	-0.2521	-0.0046	0.0267	-0.0129	-0.2067	0.0107
2	0.0124	0.0245	-0.1424	0.0039	0.0153	-0.0711	-0.1163	0.0412
3	0.0088	0.0080	-0.0962	-0.0055	0.0113	-0.0361	-0.0745	0.0371
4	0.0062	-0.0034	-0.0545	0.0012	0.0096	0.0063	-0.0455	0.0314
5	0.0040	-0.0120	-0.0302	0.0011	0.0092	0.0455	-0.0331	0.0166
Δ_Σ	**-0.1336**	**0.0000**	**-1.9785**	**0.0000**	**-1.3291**	**0.0001**	**-2.0289**	**0.3226**
$\Delta_{ср}$	-0.0111	0.0000	-0.1979	0.0000	-0.1108	0.0000	-0.1691	0.0269
$\boldsymbol{\sigma}$	**0.0316**	**0.0191**	**0.2338**	**0.0040**	**0.2452**	**0.0534**	**0.1933**	**0.0300**

Δ_1 – отклонение значений экспериментальных данных от значений аппроксимированной по обобщенным уравнениям функции.

Δ_2 – отклонение значений экспериментальных данных от значений аппроксимированной по этим данным функции.

Δ_Σ– суммарное значение отклонений.

$\Delta_{ср}$ – среднее значение отклонений.

σ – среднее квадратическое отклонение экспериментальных данных от значений аппроксимированной функции.

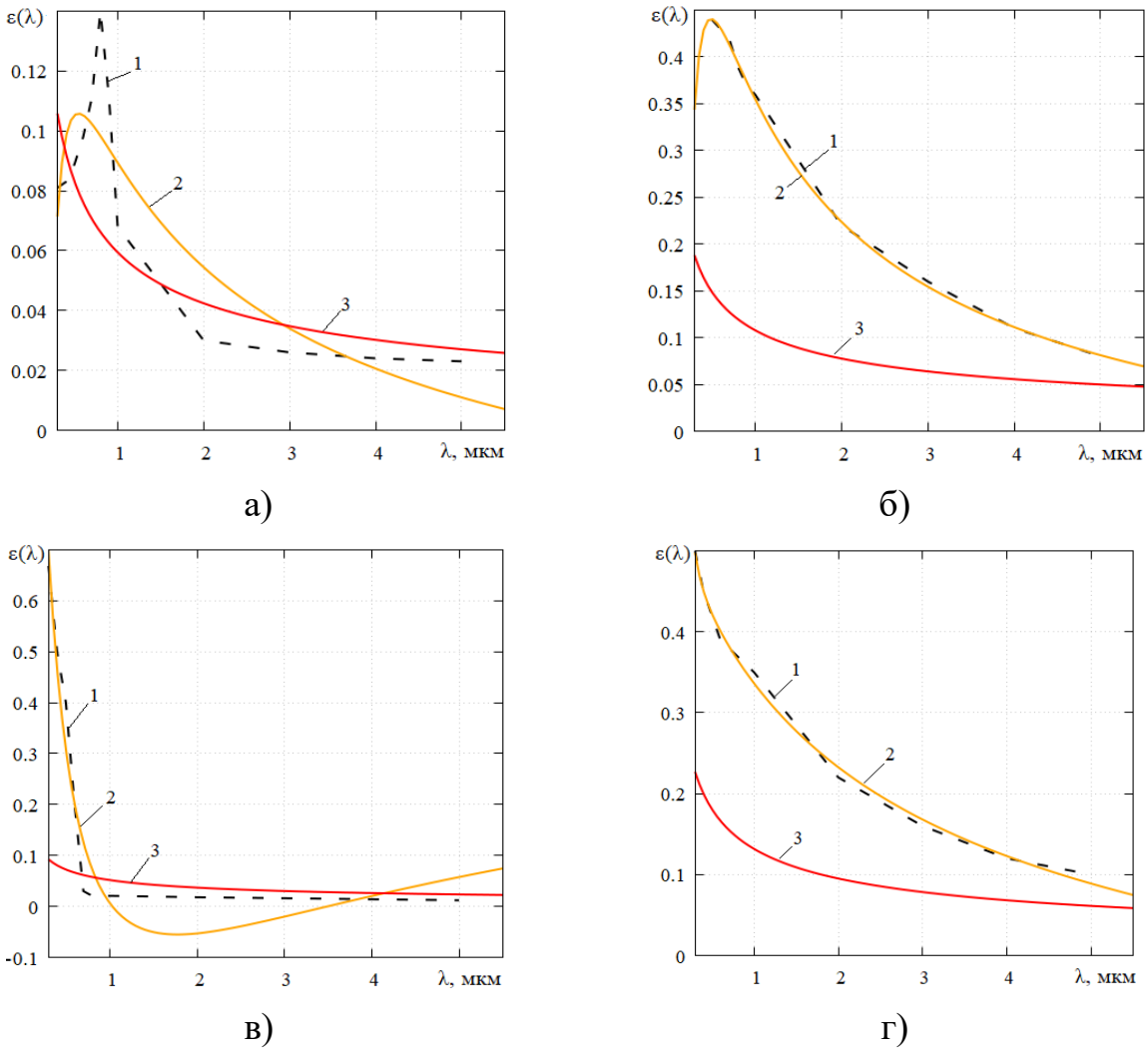


Рисунок 2.1. Графики зависимостей спектрального КИ каждого материала от длины волны: а – алюминий; б – железо; в – медь; г – сталь; 1 – экспериментальные значения; 2 – аппроксимированные; 3 – теоретические [42].

2.2. Анализ погрешностей радиационного пирометра

Для практических расчетов формула Планка является сложной, и поэтому при анализе спектральных характеристик ОЭП измерения температуры целесообразно использовать относительную (безразмерную) величину функции спектральной плотности энергетической светимости [39, 80]:

$$y(\lambda,T)=\frac{M_{\lambda}^{o}(\lambda,T)}{M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)}=142,32.x_{\lambda}^{-5}\left(e^{\frac{4,9651}{x_{\lambda}}}-1\right)^{-1}, \qquad (2.14)$$

где $x_{\lambda}=\frac{\lambda}{\lambda_m}=\frac{\lambda T}{c_2}\cdot\frac{1}{0,2014}=4,9651\frac{\lambda T}{c_2}$.

Из выражения (2.4) и (2.14) определяется для реального тела по выражению [56]:

$$M_{\lambda}(\lambda,T)=\varepsilon(\lambda,T)M_{\lambda}^{o}(\lambda,T)=\varepsilon(\lambda,T).y(\lambda,T).M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T); \qquad (2.15)$$

где – ε(λ, *T*) – экспериментальные данные; $M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)$ определяется согласно выражению (2.3); *y*(λ, *T*) определяется согласно выражению (2.14).

Поток излучения по точному КИ во всем диапазоне длин волн определяется выражением [56]:

$$R=\int_0^{\infty}M_{\lambda}(\lambda,T)d\lambda=\int_0^{\infty}\varepsilon(\lambda,T)M_{\lambda}^{o}(\lambda,T)d\lambda=M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)\int_0^{\infty}\varepsilon(\lambda,T).y(\lambda,T)d\lambda. \qquad (2.16)$$

Поток излучения в диапазоне λ_1 и λ_2 численным методом определяется с помощью выражения [56, 57, 58]:

$$R=M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varepsilon(\lambda,T).y(\lambda,T)d\lambda=M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)\sum_{i=1}^{N}\varepsilon(\lambda_i,T).y(\lambda_i,T).\Delta\lambda_i, \qquad (2.17)$$

где λ_i – шаг изменения значений λ, полученных из эксперимента.

Определение суммарной плотности излучения по среднему КИ

Средний КИ вычисляется с помощью выражения [56, 57, 58]:

$$\overline{\varepsilon}_{\lambda\,сред}(T)=\frac{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon(\lambda_i,T).\Delta_{\lambda_i}}{\lambda_n-\lambda_1}=\frac{\sum_{i=2}^{n}\frac{\varepsilon(\lambda_i)+\varepsilon(\lambda_{i-1})}{2}.\lambda_i-\lambda_{i-1}}{\lambda_n-\lambda_1}. \qquad (2.18)$$

Спектральная плотность излучения реального тела по выражению [56, 57, 58]

$$\overline{M_{\lambda}}(\lambda,T)=\overline{\varepsilon}_{\lambda\,сред}(T).y(\lambda,T).M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T). \qquad (2.19)$$

Поток излучения по среднему КИ (средняя суммарная плотность излучения) во всем диапазоне длин волн определяется по формуле [56]:

$$\overline{R}=\int_0^{\infty}\overline{M_{\lambda}}(\lambda,T)d\lambda=\int_0^{\infty}\overline{\varepsilon}_{\lambda\,сред}(T)M_{\lambda}^{o}(\lambda,T)d\lambda=\overline{\varepsilon}_{\lambda\,сред}(T).M_{\lambda m}^{o}(\lambda_m,T)\int_0^{\infty}y(\lambda,T)d\lambda. \qquad (2.20)$$

Поток излученияпо среднему КИ в диапазоне λ_1 и λ_2 определяется по формуле [56, 57, 58]:

$$\overline{R} = M^{o}_{\lambda m}(\lambda_m, T)\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{\varepsilon}_{\lambda\, сред}(T).y(\lambda, T)d\lambda = M^{o}_{\lambda m}(\lambda_m, T).\overline{\varepsilon}_{\lambda\, сред}(T)\sum_{i=1}^{N} y(\lambda_i, T).\Delta\lambda_i. \qquad (2.21)$$

Относительная погрешность [56]:

$$\delta(\%) = \frac{\left|R - \overline{R}\right|}{R}.100\% \qquad (2.22)$$

На примере для алюминия, железа, меди и никеля в диапазоне температур от 600 до 1000°С определим погрешности расчета потока излучения детали с использованием среднего коэффициента излучения. Согласно уравнению (2.2) выбираем диапазон длин волн λ_1=1,14 мкм и λ_2=3,5 мкм[56].

На рисунке 2.2 представлены спектральные зависимости коэффициента излучения ε_λ материалов: 1 – алюминий (*T*=805К); 2 – железо (*T*=1518К); 3 – медь (*T*=1242К); 4 – никель (*T*=1273К) – при заданных температурах в разных длинах волн (1 – 5 мкм) [39, 41, 56, 57, 58, 59].

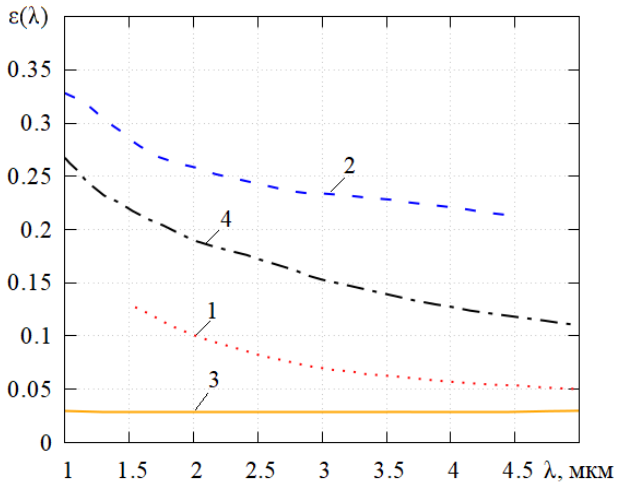


Рисунок2.2. Графики зависимостей спектрального коэффициента излучения материала от длины волны: 1 – алюминий; 2 – железо; 3 – медь; 4 – никель [56]

Средние коэффициенты излучения материалов согласно выражению (2.18) имеют следующие значения [56]:

$$\overline{\varepsilon_{сред}}_{Al} = 0,0861;\ \overline{\varepsilon_{сред}}_{Fe} = 0,2746;\ \overline{\varepsilon_{сред}}_{Cu} = 0,0288;\ \overline{\varepsilon_{сред}}_{Ni} = 0,1868.$$

Спектральные характеристики излучения материалов и АЧТ при заданных температурах в диапазоне длин волн (1 – 5 мкм), согласно выражениям (2.14) и (2.18), имеют следующие функции (рис. 2.3) [56, 57, 58]:

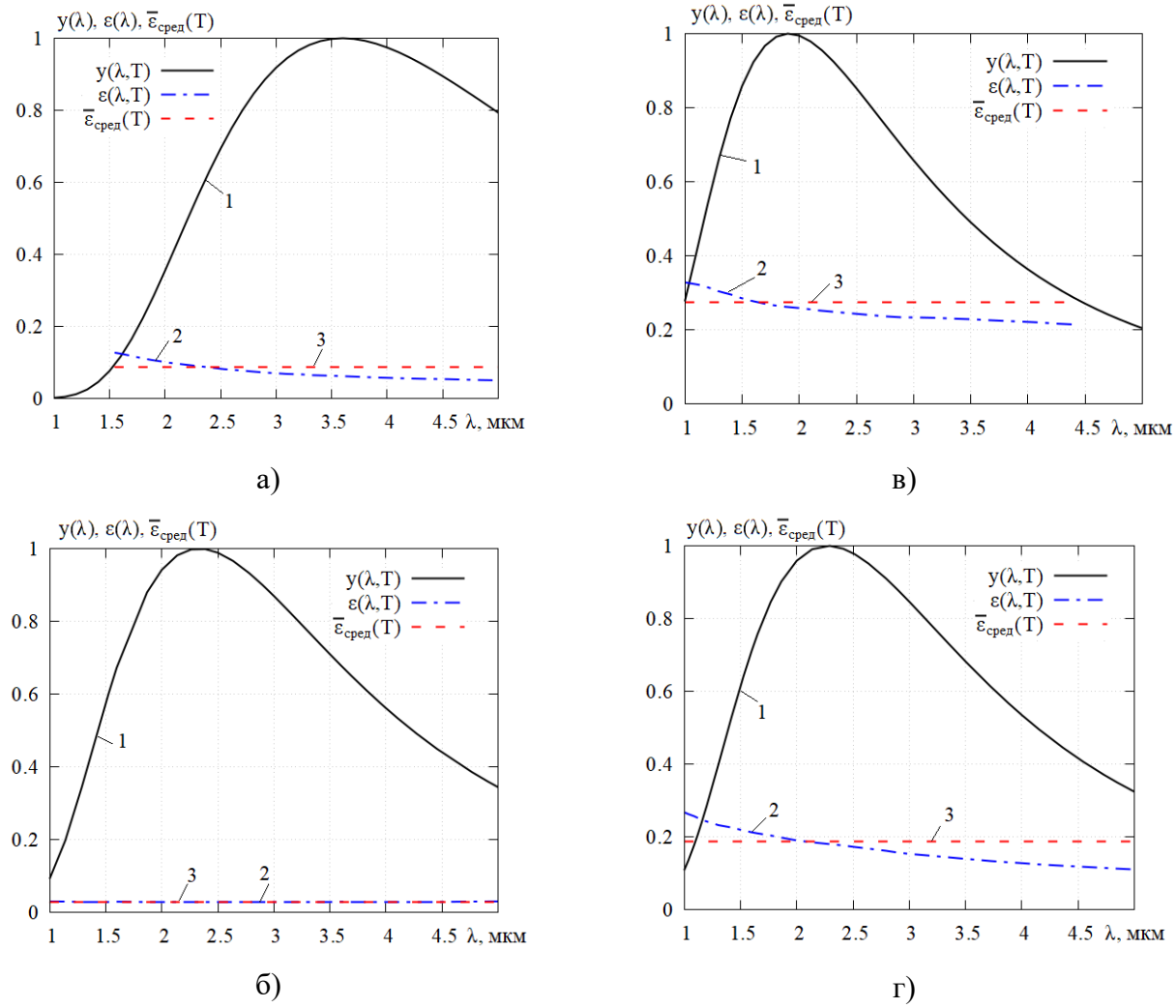


Рисунок 2.3. Спектральные характеристики АЧТ коэффициентов излучения материалов при заданных температурах: а – алюминий (T=805 К); б – железо (T=1518 К); в – медь (T=1242 К); г – никель (T=1273 К); 1 – АЧТ; 2 – спектральный КИ; 3 – средний спектральный КИ [56].

Результаты расчета потоков излучения по точному (R) и среднему($\bar{R}$) КИ по выражениям (2.17), (2.21) и (2.22) [56, 57, 58] в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 материалов при заданных температурах представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Потоки излучения по точному и среднему коэффициенту излучения материалов в диапазоне λ_1 и λ_2 при заданных температурах [56, 57, 58]

Материал	T, K	λ_m, мкм	$M^o_{\lambda m}(\lambda_m, T)$	R, Вт/см^2	$\bar{R}$, Вт/см^2	δ(%)
Алюминий	805	3,60	0,44	0,043	0,048	10,84
Железо	1518	1,91	10,6	5,252	5,597	6,57
Медь	1224	2,33	3,98	0,2127	0,2134	0,31
Никель	1273	2,27	4,40	1,279	1,260	1,46

Полученные результаты расчета потока излучения с использованием среднего коэффициента излучения ($\bar{R}$) показывают, что при заданных

температурах и в диапазоне длины волны от 1,14 мкм до 3,5 мкм в сравнении с точным потоком излучения (R) относительная погрешность составляет 0,31 – 10,84% и поэтому может быть использована для практических расчетов. Так значительно проще выполнять расчет, чем с помощью формулы (2.17) и точнее, чем при ориентировочном задании («вслепую») [56, 57, 58].

Поток излучения от нагретого объекта преобразуется фотоприемником в электрический сигнал [56, 60]:

$$U_{\Phi} = \frac{q}{4}\left(\frac{D_{BX}}{f}\right)^2 \frac{s_{\lambda\max} R_H R_i R_{yc}}{\left(R_H + R_i\right)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda)\varepsilon(\lambda,T)\tau(\lambda)M_{\lambda}^{0}(\lambda,T)d\lambda, \qquad (2.23)$$

где q – площадь диафрагмы; $D_{\text{вх}}$ – диаметр входного зрачка; f – фокусное расстояние объектива [56]; τ(λ) – коэффициент пропускания оптики; $M_{\lambda}^{0}(\lambda, \text{T})$– спектральная плотность энергетической светимости изделия; R_i – внутреннее сопротивление фотоприемника; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; $K_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления усилителя фототока; $S_{\lambda\max}$ – максимальная спектральная чувствительность фотоприемника; $s(\lambda) = \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda\max}}$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника; S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника [56, 61].

Из приведенного математического выражения (2.23) следует, что на точность преобразования оптического сигнала в пирометре оказывают влияние не только спектральные характеристики коэффициента излучения, но и спектральные характеристики оптических материалов и фотоприемника [56, 62, 63]. Все спектральные характеристики представлены в справочниках в виде графиков или таблиц, и поэтому аналитически рассчитать точно преобразование сигнала по формуле (2.23) невозможно, что ограничивает точность измерения температуры. Поэтому для повышения точности измерения в пирометре необходимо использовать дополнительный канал определения функциональных зависимостей КИ нагретого объекта от температуры $\overline{\varepsilon_{\lambda\,сред}}(T)$ [56].

Для решения этой задачи предложен способ, который позволяет оперативно и с более высокой точностью измерять температуру объекта. При реализации этого способа отпадает необходимость поиска информации о коэффициенте излучения объекта и спектральных характеристиках оптических элементов и приемника излучения [56].

2.3. Уравнения преобразования сигналов в ОЭП

Спектральные коэффициенты ε(λ, T), τ(λ) и s(λ) задаются в виде таблиц и графиков, и по этой причине использовать аналитическое уравнение (2.23) в расчетах практически невозможно. Поэтому для вычисления напряжения (2.23) используются численные методы [64 – 72].

Если фоторезистор (ФР) имеет толщину фоточувствительного элемента *H*, длину *l* и ширину *d*, то суммарный ток через него при приложении внешнего напряжения определяется выражением [64]:

$$I = GV_n = \sigma_0 \frac{dH}{l} V_n + \Delta\sigma \frac{dH}{l} V_n = I_T + I_\Phi, \qquad (2.24)$$

где I – суммарный ток через ФР; G – общая проводимость ФР, Ом$^{-1}$; $I_т$ – темновой ток ФР; I_ϕ – фототок ФР, А; $\Delta\sigma$ – приращение удельной проводимости ФР при освещении, Ом$^{-1}$.см$^{-1}$; σ_0 – собственная темновая удельная проводимость ФР, Ом$^{-1}$.см$^{-1}$; V_n – напряжение питания;

Темновой ток ФР зависит от свойств материала фоточувствительного элемента ФР. Он определяет уровень его собственных шумов, а следовательно, его пороговый поток и обнаружительную способность, поэтому его стремятся уменьшить за счет уменьшения d или H или σ_0 при охлаждении. Фототок короткого замыкания в установившемся режиме для собственного полупроводника определяется следующим выражением [64, 69, 70, 71, 72]:

$$I_\Phi = \frac{e}{hc}\{\alpha(\lambda)\eta(\lambda)\lambda\}\left[\tau(u_e + u_h)\right]\frac{H}{l^2}\Phi_{e,\lambda}V_n, \qquad (2.25)$$

где e = 1,6.10^{-19}А.с – заряд электрона; u_e и u_h – подвижности электронов и дырок, см^2/(В.с); h – толщина пластинки полупроводника ПОИ; с – скорость

распространения электромагнитных колебаний; $\eta(\lambda)$ – квантовый выход полупроводника, фотон$^{-1}$; $\alpha(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения, см$^{-1}$; $\Phi_{e,\lambda}$ – спектральная плотность потока излучения.

Откуда монохроматическая токовая чувствительность ФР на основе собственной проводимости [64, 69, 70, 71, 72]:

$$S_{I,\lambda} = \frac{I_\Phi}{\Phi_{e,\lambda}} = \frac{e}{hc}\{\alpha(\lambda)\eta(\lambda)\lambda\}\left[\tau(u_e + u_h)\right]\frac{H}{l^2}V_n. \tag{2.26}$$

В выражениях (2.25) и (2.26) фигурные скобки содержат параметры, определяющие монохроматическую чувствительность ФР, а квадратные – физические параметры полупроводника. Из выражений видно, что фототок и монохроматическая чувствительность ФР пропорциональны толщине H и обратно пропорциональны квадрату его длины l^2. Данное выражение справедливо при малом монохроматическом потоке, когда генерированные излучением электронны равно равновесная концентрация электрона ($\Delta n = n_0$) и приращение удельной проводимости ФР пропорциально $\Phi_{e,\lambda}$.

Критерии совместимости позволяют выбирать элементы с совместимыми характеристиками. В качестве основного критерия совместимости оптических элементов системы целесообразно использовать спектральный коэффициент полезного действия (КПД) χ преобразователя [73], определяющий какая часть из общего интегрального потока излучения может быть использована или преобразована [64, 74, 75]:

$$\chi = \frac{\int_0^\infty s(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_0^\infty s(\lambda)\varphi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{e\lambda}d\lambda}, \tag{2.27}$$

где $\Phi_{e\lambda m}$ – максимальная спектральная плотность входного потока излучения; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – спектральное распределение спектральной плотности входного потока излучения; $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda m}$ – относительное распределение спектральной плотности входного потока излучения.

Работоспособность преобразователя определяется данным критерием.

Выбор объектива и фотоприемника в оптической системе является важным фактором, влияющим на ее эффективность. При этом необходимо учитывать максимальный спектральный КПД χ, который определяется коэффициентом пропускания объектива τ(λ) и спектральным КПД фотоприемника χ(λ) [75]:

$$\chi = \frac{\int_0^\infty s(\lambda)\tau(\lambda)y(\lambda,T)d\lambda}{\int_0^\infty \tau(\lambda)y(\lambda,T)d\lambda} = \frac{\int_0^\infty s(\lambda)y_1(\lambda,T)d\lambda}{\int_0^\infty y_1(\lambda,T)d\lambda}, \qquad (2.28)$$

где $y_1(\lambda,T)=\tau(\lambda)y(\lambda,T)$ – безразмерная величина, характеризующая распределение энергии по длинам волн в излучении, испускаемом оптическим элементом, называется спектральной плотностью энергетической светимости.

Абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника S_λ зависит от двух факторов: материала чувствительного слоя и конкретного экземпляра. Относительная спектральная чувствительность, напротив, зависит только от материала чувствительного слоя и является общей для всех фотоприемников, изготовленных из этого материала [73]. В связи с этим относительную спектральную чувствительность удобно использовать на первом этапе выбора фотоприемника.

При температурах T_1 = 873 К и T_2 =1273 К длины волн, соответствующие максимальным значениям функций, равны [61, 80]:

$$\lambda_{1макс} = \frac{2896}{T_1} = 3,32\ мкм;$$

$$\lambda_{2макс} = \frac{2896}{T_2} = 2,28\ мкм$$

Для нагретого изделия при некоторой температуре практически весь спектр излучения находится в диапазоне от $0,5\lambda_{2max}$ до $3\lambda_{1max}$. На основании этого определяется спектральный диапазон измерительного преобразователя: $\lambda_{min} = 0,5\lambda_{2max}$ = 1,14 мкм; $\lambda_{min} = 3\lambda_{1max}$ = 9,96 мкм [61, 80].

2. 4. Определение спектрального коэффициента полезного действия

Зависимость спектральной плотности излучения в относительных единицах для заданных температур [39, 76]. Для реализации морфологического синтеза была разработана база данных, содержащая информацию об оптических материалах, источниках излучения и фотоприемниках [77]. По относительной спектральной чувствительности фоторезистора ФСА (PbS), монокристалла из InSb, Ge:Hg при 30К [64, 74] и спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: T_1=1273 К; 2 – T_2 = 873 К; 3 – T_3 = 773 К; 4 – T_4 = 573 К; 5 – T_5 = 373 К, построены графики, определяющие КПД пропускаемого силикатного материала [75] на рисунке 2.4 [78, 79].

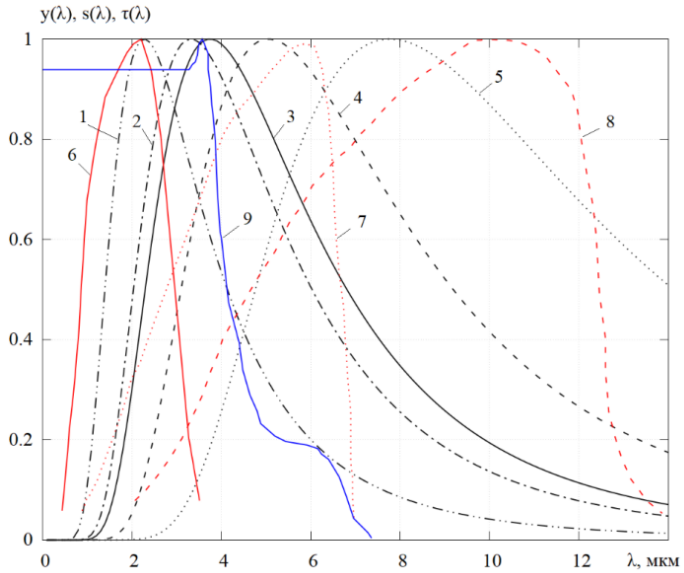


Рисунок 2.4. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: 1 – T_1 = 1273 К; 2 – T_2 = 873 К; 3 – T_3 = 773 К; 4 – T_4 = 573 К; 5 – T_5 = 373 К, относительный спектральной чувствительности фоторезистора: 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg и 9 – силикат.

Из выражения (2.28) и спектральных характеристик на рисунке 2.4 с помощью компьютерной программы определяем КПД приемников излучения, пропускающих оптический материал (силикатное стекло) согласно таб. 2.6 и изображающий кривые зависимости КПД приемников от изменения температуры на рисунке 2.5. [78].

Таблица 2.6. Определение точности КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	фоторезисторы s(λ)	$\chi_{точн}(\%)$				
		1273К	873К	773 К	573 К	373 К
1	PbS	58,275	37,447	30,403	15,183	2,892
2	InSb	48,642	61,075	64,803	73,139	81,037
3	Ge:Hg	16,970	26,219	29,537	38,538	53,431

С помощью компьютерных программ и программы Gnuplot строится график, изображающий кривые зависимости КПД приемников по формуле (2.28) от изменения температуры на рис. 2.5.

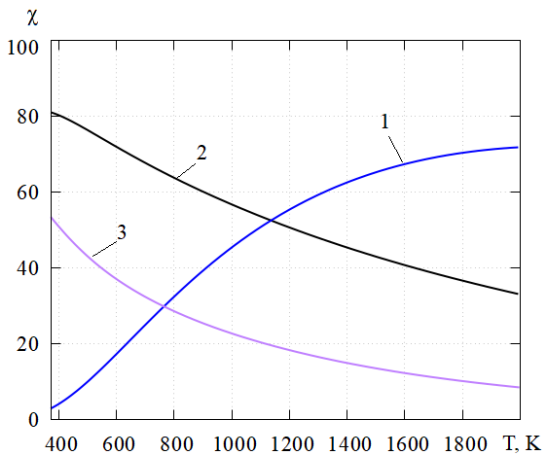
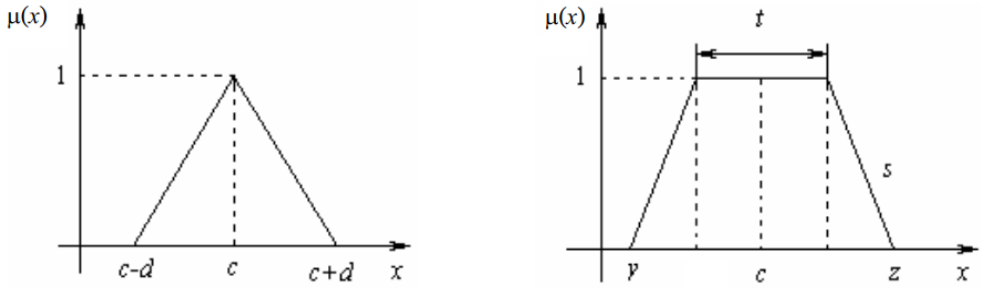


Рисунок 2.5. Кривые зависимости КПД приемников от изменения температуры: 1 – PbS; 2 – InSb; 3 – Ge:Hg

Необходимо отметить, что для вычисления КПД необходимы спектральные характеристики оптических и оптико-электронных элементов оптико-электронного прибора. Все спектральные относительные характеристики определяются экспериментально, имеют сложную форму и представлены в виде графиков в справочниках. Поэтому расчеты КПД могут быть выполнены только с помощью численных методов. Для реализации этих методов необходима оцифровка большого количества характеристик, а при морфологическом синтезе осуществляется перебор большого количества элементов, что требует очень большого объема вычислений. Решение этой проблемы возможно при аппроксимации спектральных характеристик трапецеидальной формой, для построения которой необходимо четыре координаты, а для узких характеристик возможна аппроксимация треугольной формой с тремя координатами. Математические операции с такими функциями

используются в теории нечеткой логики. Для выполнения этих операций разработаны пакеты программ, что позволяет значительно сократить время перебора вариантов с учетом совместимости элементов по оптическому КПД. Причем координаты этой функции могут быть выбраны так, что площадь под трапецеидальной функцией равна площади под аппроксимируемой функцией. В статье [61] (рис. 2.6) приведена симметричная трапецеидальная функция принадлежности, которая описывается зависимостью:

$$\mu_{A^{(i)}}(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{для } x > z \text{ или } x < y \\ 1 & \text{для } c - \frac{1}{2} \le x \le c + \frac{1}{2} \\ s(z-y) & \text{для } y \le x \le c - \frac{1}{2} \\ s(z-x) & \text{для } c + \frac{1}{2} \le x \le z \end{cases} \tag{2.29}$$



а) *б)*

Рисунок 2.6. Функции принадлежности нечетких множеств: а – треугольная; б – трапецеидальнаяфункция

Определение координат точек трапеции ABCD при изменении температуры

Чтобы ускорить расчеты, мы упрощаем обработку спектральных плотностей излучения АЧТ, используя аппроксимации трапециевидной по изменению температуры, которые приводят спектральные плотности излучения АЧТ к простому интуитивному приближению с небольшой ошибкой.

Положения четырех точек A, B, C, D показаны на рисунке 2.7.

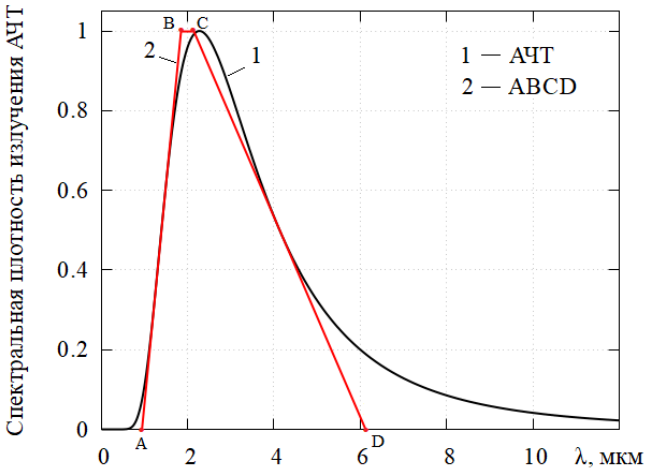


Рисунок 2.7. График спектральной плотности излучения АЧТ по методу трапециевидной аппроксимации

Приблизительная спектральная плотность излучения АЧТ трапецией ABCD:

– Прямая AB касается спектральнойхарактеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda<\lambda max} = 0.5$ и $y = 0$ и $y = 1$ соответственно.
– Прямая CD касается спектральной характеристики плотности излучения АЧТ на пересечении $y_{\lambda>\lambda max} = 0.5$ и $y = 1$ и $y = 0$ соответственно.

При изменении температуры T изменится спектральная плотность излучения АЧТ, а также изменится положение 4-х вершин трапеции. Изучим изменение координат этих 4-х точек на λ-оси при измененииитемпературы T от 373 К до 11273 К. Широкая амплитуда температуры помогает уменьшить погрешность при обработке данных на следующем шаге для нахождения функций зависимости λ_A, λ_B, λ_C, λ_D от температуры T.

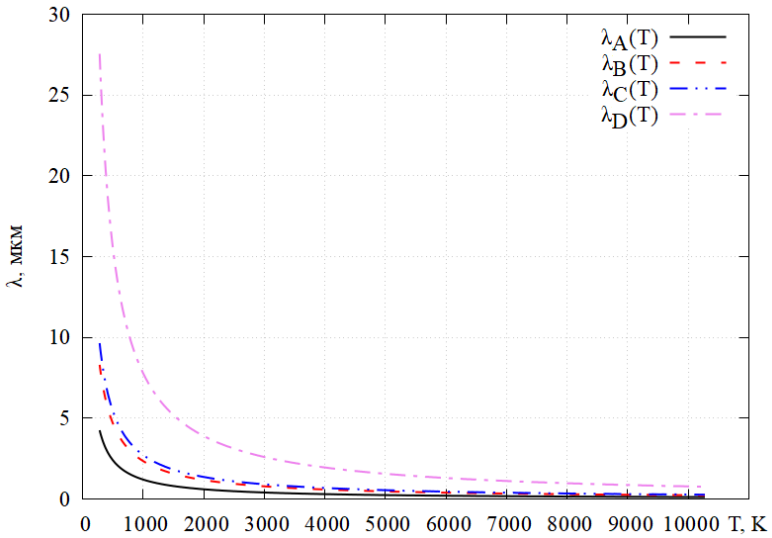


Рисунок 2.8. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ в зависимости от температуры

Из графика на рисунке 2.8 предположим, что функции зависимости λ_A, λ_B, λ_C, λ_D от температуры T имеет тот же вид, что и выражение закона смещения Вина, то есть:

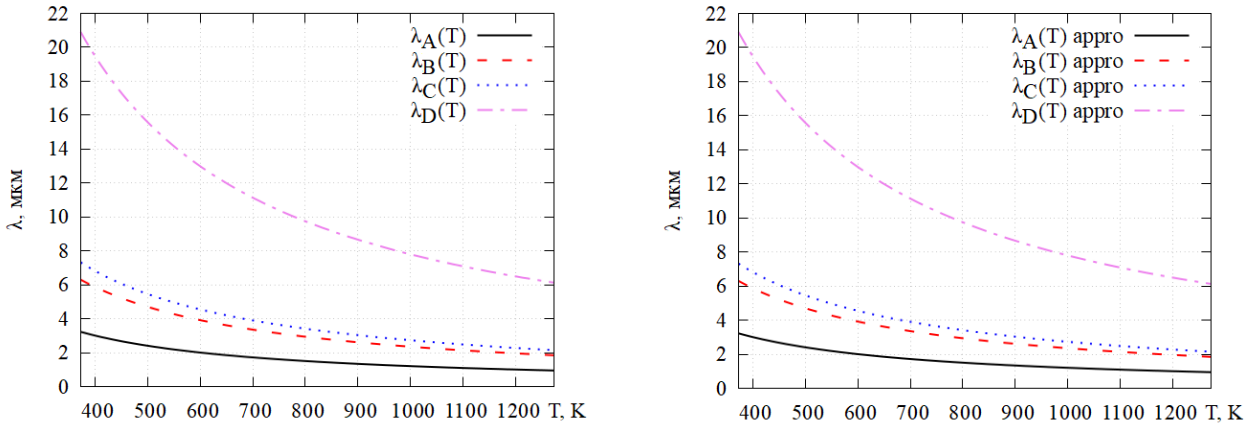
$$\lambda_A(T)=\alpha(T)^{-1} \qquad \lambda_B(T)=\beta(T)^{-1}$$
$$\lambda_C(T)=\gamma(T)^{-1} \qquad \lambda_D(T)=\rho(T)^{-1} \tag{2.30}$$

где α, β, γ, ρ – коэффициенты; T – температур.

С помощью программы *Gnuplot* и её функции *fit* получены коэффициенты: α = 1202.89, β = 2349.25, γ = 2729.07, ρ = 7795.66, то есть:

$$\lambda_A(T)=1202.89(T)^{-1} \qquad \lambda_B(T)=2349.25(T)^{-1}$$
$$\lambda_C(T)=2729.07(T)^{-1} \qquad \lambda_D(T)=7795.66(T)^{-1} \tag{2.31}$$

В диапазоне температур от 373 К до 1273 К аппроксимация дает хорошие результаты с очень низкой погрешностью.



а) б)

Рисунок 2.9. Графики функций $\lambda_A(T)$, $\lambda_B(T)$, $\lambda_C(T)$, $\lambda_D(T)$ и их аппроксимации в диапазоне температур от 373 К до 1273 К

С помощью языка программирования Dev-C++ получаем результирующий набор точек λ_A, λ_B, λ_C, λ_D при значениях температур T_1=1273 К; T_2=873 К; T_3=773 К; T_4=573 К; T_5=373 К приведены в табл. 2.7

Таблица 2.7. Результирующий набор точек λ_A, λ_B, λ_C, λ_D при заданных значениях температуры

T / коэффициент	T_1 1273К	T_2 873К	T_3 773К	T_4 573К	T_5 373К
λ_A, мкм	0,94	1,38	1,56	2,10	3,22
λ_B, мкм	1,85	2,69	3,04	4,10	6,30
λ_C, мкм	2,14	3,13	3,53	4,76	7,32
λ_D, мкм	6,12	8,93	10,08	13,61	20,90

Из таблицы 2.7 можно построить графики спектральной плотности АЧТ, относительный спектральной чувствительности фоторезистора и силикатный оптический материал по методу трапециевидной аппроксимации, представленному на рисунке 2.10.[78, 79].

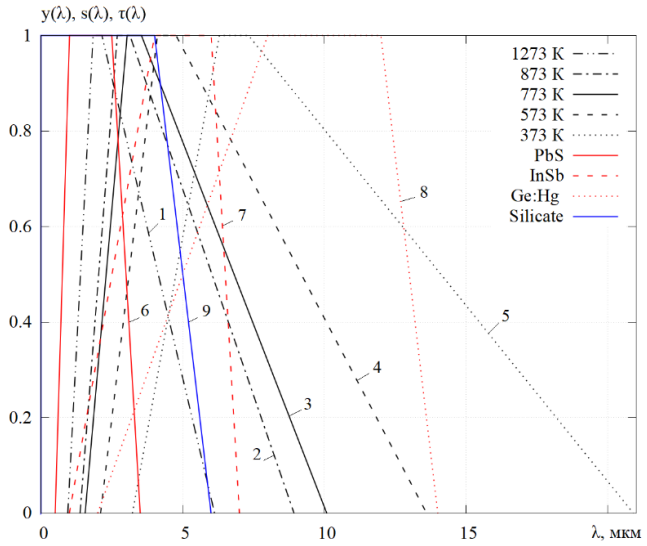


Рисунок 2.10. Графики спектральной плотности излучения для АЧТ в относительных единицах при температурах: 1 – T_1=1273 К; 2 – T_2=873 К; 3 – T_3=773 К; 4 – T_4=573 К; 5 – T_5=373 К, 6 – PbS, 7 – InSb, 8 – Ge:Hg и 9 – силикат

Например, на рисунке 2.11 приведены приближенные спектральные характеристики фотоприемников – InSb с силикатным оптическим материалом и АЧТ при 1273К. Коэффициент полезного действия (КПД) χ определяется как отношение площадей под кривыми 4 и 1 – $\chi = (S_4 / S_1)$ [61].

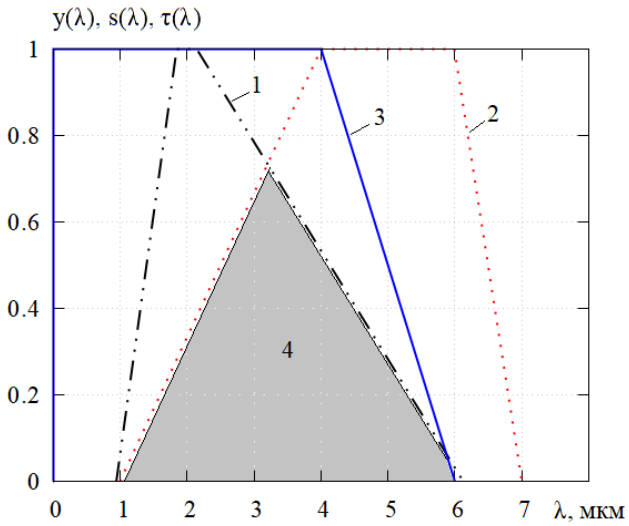


Рисунок 2.11.Графики спектральной плотности излучения для АЧТ при температуре: 1 – 1273 К, приемник: 2 – InSb, пропускающий оптический материал:3 – силикатный оптический материал

В данном случае кривые 4 и 1 представляют собой графики зависимостей двух величин: x и y. Для вычисления площади под кривой 4 используется теория нечетких множеств. В соответствии с этой теорией, площадь под кривой 4 определяется как логическое произведение множеств площадей под всеми трапецеидальными характеристиками. Этот способ вычисления позволяет вычислить площадь под кривой 4 с использованием всего нескольких точек. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они позволяют повысить быстродействие вычислений КПД. При этом, погрешность, возникающая при использовании теории нечетких множеств, не оказывает практического влияния на выбор варианта совместимости. КПД приемников излучения с пропускаемым оптическим материалом по методу трапециевидной аппроксимации согласно таб. 2.8.[78].

Таблица 2.8. Определение приближения КПД фотоприемников с пропускающим оптическим материалом для АЧТ в относительных единицах при температурах

Тип прибора	фоторезисторы s(λ)	$\chi_{приб}(\%)$				
		1273К	873К	773 К	573 К	373 К
1	PbS	64,75	26,9	18,78	6,02	0,10
2	InSb	76,8	67,5	60,45	35,05	9,10
3	Ge:Hg	34,78	18,40	18,40	18,40	8,90

Абсолютная погрешность:

$$\Delta = \left| \chi_{приб} - \chi_{точн} \right|, \qquad (2.32)$$

где $\chi_{приб}$– коэффициент полезного действия приближения; $\chi_{точн}$ – коэффициент полезного действия точности.

Относительная погрешность:

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{\chi_{точн}}.100\% = \frac{\left|\chi_{приб} - \chi_{точн}\right|}{\chi_{точн}}.100\% \qquad (2.33)$$

Результаты расчета абсолютной погрешности и относительной погрешности приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при заданных значениях температуры по формуле (2.32), (2.33) приведены в табл. 2.9. [78].

Таблица 2.9. Абсолютная и относительная погрешность приемников с пропускаемым оптическим материалом АЧТ при заданных значениях температуры

Фоторезисторы $s(\lambda)$ / T	PbS		InSb		Ge:Hg	
	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)	Δ(%)	δ(%)
1273К	6,48	11,11	28,16	57,89	17,81	104,95
873К	10,55	28,17	6,43	10,52	7,82	29,82
773К	11,62	38,23	4,35	6,72	11,14	37,71
573К	9,16	60,35	38,09	52,08	20,14	52,25
373К	2,79	96,54	71,94	88,77	44,53	83,34

Из вышеприведенных расчетов и анализа видно, что у приемника излучения с одним и тем же оптическим материалом, соответствующим разным фотоприемникам (ФСА – PbS, InSbи Ge:Hg), КПД будут меняться.Метод трапециевидной аппроксимации увеличит скорость обработки, поскольку нужно определить только 4 вершины трапеции [78, 79].

2.5. Выводы по второй главе

1. Из проведенного исследования следует, что относительная погрешность расчета потока излучения нагретого тела при использовании среднего коэффициента излучения в диапазоне длины волны от 1,14 мкм до 3,5 мкм в сравнении с точным расчетом потока излучения составляет 0,31 – 10,84%, а приведение реального объекта к псевдосерому объекту позволяет

значительно упростить расчет, поскольку под интегралом остается только аналитическая функция Планка.

2.На основе предложенной методики определения интегрального коэффициента излучения по образцу материала разработан энергетический пирометр, экспериментальное исследования выявило, что погрешность для железа составила 1%, а погрешность определения температуры с помощью табличных данных составляет 6,57%. Кроме того, в этом случае отпадает необходимость учитывать спектральные характеристики оптики и приемника излучения [56].

3. Аппроксимация спектральных характеристик оптических и оптико-электронных элементов трапецеидальными характеристиками, позволяет использовать математический аппарат нечеткой логики и значительно ускорить расчет оптического КПД и соответственно проектирование с помощью морфологического синтеза оптико-электронных приборов.

3. ЦИФРОВОЙ ПИРОМЕТР СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

В настоящее время в пирометрии наибольшее распространения получили радиационные пирометры, которые обладают следующими достоинствами: сравнительная простота конструкции; более высокая, чем у пирометров спектрального отношения (ПСО), чувствительность. Недостатки радиационных пирометров – это зависимость результатов измерения от расстояния до измеряемого объекта, формы объекта, запыленности и загазованности промежуточной среды, наличия защитных стекол и боковых засветок. Однако основным недостатком таких пирометров является зависимость результатов измерения от коэффициента излучательной способности объекта, который зависит от материала, состояния поверхности, температуры и длины волны. Очевидно, что для измерения температуры объекта необходимо точное значение этого коэффициента. Информация о коэффициенте излучательной способности содержится в справочниках и имеет усредненный характер, не учитывая особенности конкретного объекта и технические характеристики пирометра. В существующих конструкциях радиационных пирометров значение коэффициента устанавливается ручным органом управления в диапазоне 0,1 – 1, а поскольку значение коэффициента устанавливается неточно, то это является основным источником погрешности измерения [80, 81, 82].

Пирометры спектрального отношения определяют температуру по отношению сигналов от двух приемников, работающих на разных длинах волн. Такой принцип измерения температуры позволяет исключить влияние факторов, имеющих только мультипликативный характер, т.е. ослабляющих сигналы двух каналов в одинаковое число раз. Это следующие факторы: изменение расстояния до объекта, наличие защитных стекол, изменение чувствительности фотоприемников и коэффициента усиления усилителя в схемах с оптическим коммутатором и одноканальным оптико-электронным трактом. Необходимо отметить, что пирометры спектрального отношения позволяют уменьшить влияния коэффициента излучательной способности

материала на погрешность измерения температуры, а для серого тела, имеющего постоянный коэффициент излучения, полностью исключить влияние коэффициента на погрешность измерения. Недостаток пирометров спектрального отношения – это сложность конструкции и настройки, а следовательно, и их стоимость [80, 81, 82, 83].

При проектировании пирометров спектрального отношения возникает задача технической реализации операции деления информационных сигналов. Операция определения отношения двух сигналов может быть выполнена с помощью известных электронных устройств: полупроводниковых элементов с логарифмическими характеристиками [46]; блока АРУ, стабилизирующего одну последовательность чередующихся по амплитуде импульсов [46]; интегрирующих развертывающих преобразователей (одно и двухтактных) [84, 85]. Использование электронных устройств с логарифмическими характеристиками для определения отношения сигналов не позволяет получить необходимой точности из-за температурной нестабильности характеристик полупроводниковых элементов. Использование блока АРУ широко используется при передаче и обработке информационных сигналов с фазовой и времяимпульсной модуляцией. Этот метод позволяет стабилизировать амплитуду сигнала, которая на входе устройства может изменяться в широком диапазоне и обеспечивать работоспособность измерительного преобразователя (ИП) [80, 81, 82]. При проектировании логометрических измерительных преобразователей применение обобщенных структурных схем позволяет упростить и ускорить процесс проектирования, повысить качество и надежность изделий [83, 84, 85, 86, 87].

3.1. Анализ логометрических измерительных преобразователей

3.1.1. ИП с автоматической регулировкой усиления

В пирометрах спектрального отношения одной из основных операций являются устройства для определения отношения сигналов. В одноканальных схемах обработки информации спектральных пирометров выполняется коммутация оптических сигналов с двух участков спектра излучения нагретой

детали. Коммутация преобразует два потока излучения Φ_1 и Φ_2 в чередующуюся последовательность оптических импульсов. Для измерения температуры детали спектральным методом отношения необходимо определять отношения амплитуд последовательности импульсов [46]. В линейных системах обработки информации операцию отношения оптических сигналов заменить определением отношения электрических сигналов. Поскольку в линейных системах соотношения между амплитудами чередующейся последовательности импульсов остаются постоянными, то отношения амплитуд импульсов можно определить по амплитуде, соответствующей одному участку спектра, введя стабилизацию амплитуды, соответствующей другому участка спектра. На рис. 3.1 представлена структурная схема преобразователя (а) со стабилизацией одного измерительного канала и времяимпульсная диаграмма (б) его работы [88]. Поток излучения нагретого изделия поступает на оптический коммутатор *1*, который с помощью светофильтров преобразует общий поток излучения в чередующуюся последовательность оптических импульсов, соответствующих двум участка спектра. Коммутатор *1* управляется генератором *2*. Последовательность оптических импульсов преобразуется приемником излучения *3* в электрический сигнал и усиливается усилителем *4*. Коммутатор *5*, периодически для импульсов, соответствующих первому потоку, подключает фильтр низкой частоты *6* с блоком автоматической регулировки усиления (АРУ) *7*. Блок АРУ за счет изменения чувствительности приемника излучения или коэффициент усиления усилителя фототока осуществляет стабилизацию амплитуды импульсов U_{m1}, соответствующих потоку Φ_1. Тогда отношение сигналов может быть определено по амплитуде другого импульса U_{m2}, а именно, поскольку $U_{m2}/U_{m1}=K$, то при U_{m1}=const, $K=cU_{m2}$. Фильтр низкой частоты *8*, управляемый коммутатором, осуществляет преобразование значения отношения коэффициентов амплитуд двух сигналов ($K=U_{m2}/U_{m1}$) в постоянный сигнал.

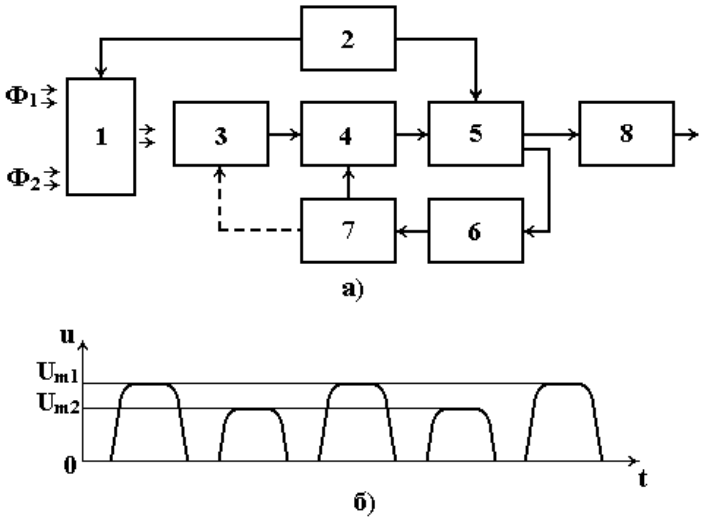


Рисунок 3.1. Обобщенная блочно-функциональная схема спектрального пирометра с блоком АРУ (а) и времяимпульсная диаграмма (б) его работы

Преобразователь обладает широким динамическим диапазоном, что является его преимуществом. Однако его недостатком является то, что результат измерения представлен в аналоговой форме [88].

3.1.2. Оптико-электронный однотактный интегрирующий ИП

Интегрирующие развертывающие преобразователи (ИРП) широко используются в измерительной технике для преобразования постоянного напряжения во времяимпульсной сигнал. Интегрирующий преобразователь содержит интегратор, преобразующий постоянное измеряемое напряжение в линейно изменяющееся напряжение, источник опорного напряжения и компаратор. Принцип действия основан на сравнении с помощь компаратора линейно изменяющего и постоянного напряжений во времяимпульсный сигнал. Интегратор позволяет увеличить отношение сигнал/шум. Поэтому этот вариант преобразователя имеет преимущество в сравнении с вариантом, в котором на вход интегратора подается напряжение с опорного источника. [85]. Этот преобразователь можно использовать как логометрическое устройство в спектральном пирометре. Пример использования приведен на рис. 3.2 изображена обобщенная блочно-функциональная схема (а) логометрического преобразователя с времяимпульсной диаграммой (б). Первый поток излучения

Φ_1 поступает на приемник излучения *1*, соединенный с усилителем *2*, электрический сигнал с которого поступает на управляемый генератором *3* интегратор *4*. Второй поток излучения Φ_2 преобразуется приемником излучения *5* и усиливается усилителем *6*. Сигналы с интегратора u_4 и усилителя u_6 поступают на сравнивающее устройство *7*, которое в момент равенства сигналов переключает триггер *8*. В начале каждого цикла преобразования, длительность которого равна T_0, триггер устанавливается в исходное состояние генератором *3* [88].

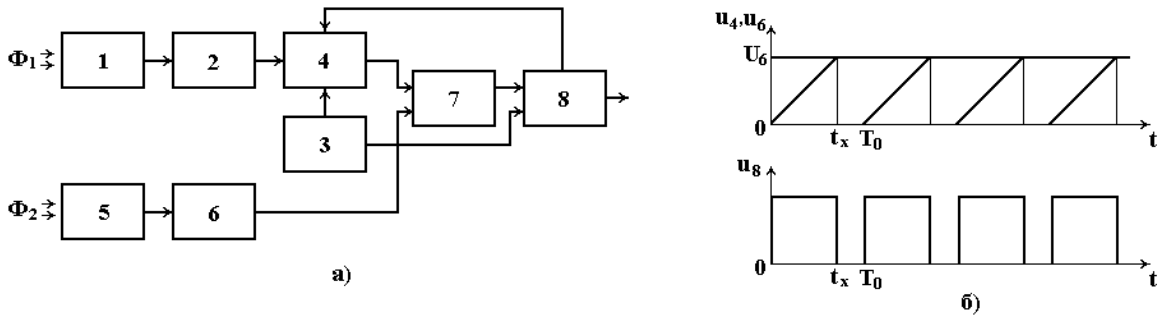


Рисунок 3.2. Обобщенная блочно-функциональная схема спектрального пирометра (а) и диаграмма его работы (б)

В течение интервала t_x напряжение на выходе интегратора определяется зависимостью [88]:

$$U_4 = \frac{1}{\tau}\int_0^{t_x} U_2 dt\,, \tag{3.1}$$

где τ - постоянная времени интегратора.

При равенстве напряжений на элементе *7* длительность импульса на выходе триггера определяется соотношением [88]:

$$t_x = \tau U_4 / U_6\,. \tag{3.2}$$

Результат измерения отношения интегрирующим преобразователем может быть преобразован в цифровой код путем подсчета импульсов генератора тактовой частоты за время интегрирования.

Погрешность рассмотренного логометрического преобразователя определяется нестабильностью постоянной времени, погрешностью от

нелинейности выходного напряжения интегратора и дрейфом порога срабатывания сравнивающего устройства [88].

Наиболее совершенными логометрическими преобразователями являются интегрирующие развертывающие преобразователи с двухтактным интегрированием [85]. В преобразователях с двухтактным интегрированием отклонение постоянной времени приводит к пропорциональному отклонению выходного напряжения, а отклонение тактовой частоты приводит к пропорциональному отклонению выходного напряжения и времени интегрирования. Однако, поскольку выходное напряжение пропорционально измеряемой величине, то оба этих отклонения компенсируются друг другом. Кроме того, эти преобразователи обладают большими функциональными возможностями, а именно, позволяют выполнять математические операции с информационными сигналами за счет использования нелинейной развертывающей функции.

3.2. Преобразователь отношения сигналов с двухтактным интегрированием

На рис. 3.3 изображена функциональная блок-схема пирометра [80, 89, 91].

Пирометр представляет собой объектив *1*, в плоскости изображения которого установлен составной светофильтр, состоящий из двух светофильтров *2* и *3* с различными спектральными полосами пропускания. За светофильтрами *2* и *3* установлен двухэлементный фотоприемник *4*, таким образом, чтобы каждый элемент фотоприемника находился напротив только одного светофильтра. Выходы фотоприемника подключены к входу аналого-цифрового развертывающего преобразователя (АЦП) с двухтактным интегрированием *5*, который выполняет функцию цифрового логометрического преобразователя [84], а именно определяет отношение двух сигналов с двух разных участков спектра нагретой детали. На схеме (рис. 3.3) приняты следующие обозначения: *6* – блок усиления и перемножения; 7 – блок усиления и перемножения; *8* – формирователь весовой функции первого измерительного канала; *9* – формирователь весовой функции второго измерительного канала; *10*

– интегратор; *11* – устройство сравнения; *12* – блок управления; *13* – устройство задания порогового уровня устройства сравнения; *14* – блок цифрового выходного сигнала. Элемент фотоприемника, соответствующий первой длине волны пирометра, подключен на вход блока *6*, который является измерительным входом АЦП сигнала U_{x1}, а, на вход блока *7*, который предназначен для источника опорного напряжения U_0, подключен элемент фотоприемника, соответствующий второй длине волны U_{x2}. К блоку *6* подключен формирователь весовой функции первого измерительного канала 8, а к блоку *7* подключен формирователь весовой функции второго измерительного канала *9*. Выходы блоков *6* и *7* через сумматор подключены к интегратору *10*, выход которого подключен к первому входу устройства сравнения *11*, выход которого соединен с блоком управления *12*. Первый выход блока *12* подключен через устройство задания порогового уровня *13* ко второму входу устройства сравнения *11*, второй выход блока *12* подключен к формирователю *8*, а третий выход – к формирователю *9*. Выход формирователя *9* с блоком цифрового выходного сигнала *14*.

Работает пирометр следующим образом. В рамках функциональной блок-схемы пирометра (рис. 3.3) могут быть реализованы известные алгоритмы уравновешивающего интегрирующего развертывающего преобразователя [80, 84, 89]. Весовая функция $g_{x1}(t)$ блока *6* определяет динамические свойства ИРП, а весовая функция $g_{x2}(t)$ блока *7* определяет вид выходной величины ИРП и создает удобства математического описания процессов ИР-преобразования. Весовая функция $g_{x1}(t)$ в общем случае может принимать произвольные значения для реализации нелинейных функций преобразования, а весовая функция $g_{x2}(t)$, как правило, принимает значения +1, 0 и -1. Идеализированное уравнение преобразования интегратором *10* имеет вид [80, 84, 89]:

$$R(t_k) - R(t_н) = \frac{1}{\tau_1} \int_{t_н}^{t_н+T_1} g_{x1}(t) u_{x1}(t) dt + \frac{1}{\tau_2} \int_{t_н+T_1}^{t_к} g_{x2}(t) u_{x2} dt = 0, \qquad (3.3)$$

где τ_1 и τ_2 – постоянные времени интегратора по двум входам преобразований, $t_н$ и $t_к$ координаты начала и конца преобразования. Из уравнения (3.3) следует характеристика аналого-цифрового преобразования ИРП [91]:

$$-\int_{t_н}^{t_н+T_1} g_0(t)dt = \frac{\tau_2}{\tau_1 U_{x2}} \int_{t_н+T_1}^{t_к} g_x(t)U_{x1}(t)dt, \qquad (3.4)$$

С учетом конкретно воспроизводимых в данном случае весовых функций $g_x(t)$ и $g_0(t)$, а именно с постоянными значениями, из уравнения (3.4) следует выражение длительности импульса ΔT, которое которая определяется отношением напряжений двух измерительных каналов фотоприемника 4 [80, 84, 89]:

$$\Delta T = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{U_{x1}}{U_{x2}} T_1, \qquad (3.5)$$

где U_{x1} и U_{x2} – средние значения напряжений за интервал времени; T_1 – значение входного напряжения.

Интервал времени T_1 первого такта имеет постоянное значение, и в это время к входу интегратора подключен первый измерительный канал с напряжением U_{x1}. Интервал времени ΔT второго такта интегрирования определяется при подаче к входу интегратора напряжения со второго измерительного канала с напряжением U_{x1}. Момент окончания второго такта определяется устройством сравнения выходного напряжения интегратора *11* при равенстве нулю сигнала с интегратора *10*. Необходимо отметить, что сигналы интегратора двух тактов имеют противоположные знаки скоростей. При преобразовании промежутков времени T_1 и ΔT блоком *14* в цифру методом заполнения тактовыми импульсами с длительностью T_0 и равенстве постоянных времени получено выражение [89]:

$$N_2 = \frac{U_{x1}}{U_{x2}} N_1, \qquad (3.6)$$

С помощью блоков управления *12* и задания порогового значения *13* может осуществляться алгоритм работы с преобразованием выходного сигнала в частоту, которая так же сравнительно просто преобразуется в цифру [89].

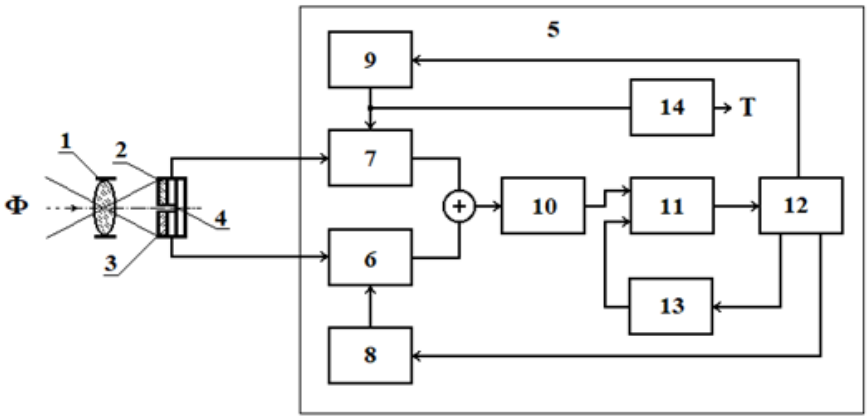


Рисунок 3.3. функциональная блок-схема пирометра [89].

При такой реализации цифровой ПСО в сравнении с известной схемой реализации выполняет три функции, а именно функции двух аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для каждого канала и цифрового логометрического преобразователя блока, а реализация нелинейной статической характеристики может быть реализована с помощью выбора весовой функции [80, 89].

Кроме того, такой цифровой ПСО имеет хорошую защиту от сетевой помехи и позволяет значительно уменьшить влияние на погрешность измерения факторов, имеющих мультипликативный характер [80, 89]. По этой причине АЦП двухтактного интегрирования рекомендуются для использования в промышленных информационно-измерительных и управляющих системах [80].

3.3. Определение параметров пирометра спектрального отношения

Одной из проблем проектирования ПСО является выбор длин волн светофильтров и приемников излучения с необходимыми спектральными характеристиками для заданного диапазона измеряемых температур. Очевидно, что методическая погрешность пирометра спектрального отношения зависит от отношения коэффициентов излучательной способности $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ материала для двух участков спектральной плотности энергетической светимости. Длины волн светофильтров необходимо выбирать так, чтобы отношение коэффициентов

излучательной способности $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ было близко к единице. Коэффициент излучения объекта $\varepsilon_т$ зависит от его температуры, длины волны, материала, характера обработки поверхности, а также и степени окисления. Функциональные зависимости от этих факторов получают из проведенных экспериментальных исследований, которые приводятся в справочниках. Рассмотрим методику выбора длин волн на конкретных примерах, информацией о зависимостях КИ воспользуемся из справочника [39, 80, 89].

На рис. 3.4 изображены графики относительной функции спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела (АЧТ) при температуре *T*=363К по формуле (2.14) и зависимостей спектральных КИ от длины волны для некоторых материалов [39, 80, 81, 82].

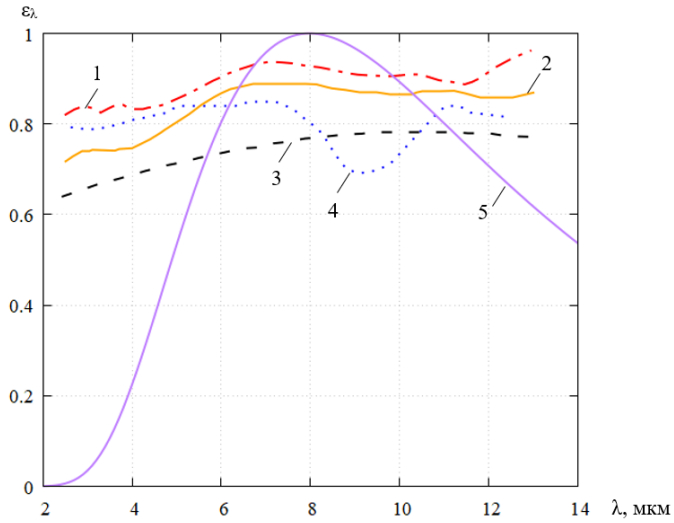


Рисунок 3.4. Графики относительной функции спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при температуре *T*=363К и зависимостей спектральных коэффициентов излучения от длины волны для материалов: 1 – глина; 2 – грунт из песка, глины и известняка; 3 – мелкая галька; 4 – полированное оргстекло; 5 – АЧТ [80, 81, 82].

По значениям зависимостей спектральных характеристик вычислены отношения коэффициентов излучения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ от длины волны (рис. 3.5) [80]. Коэффициент излучения первого канала ε_1 задавался во всем диапазоне длин волн, а коэффициент излучения второго канала ε_2 задавался дискретно для длин волн λ: 2,62; 4,21; 6,31; 7,78 [80]. Соответственно графики отношений коэффициентов (рис. 3.5, *а*), *б*), *в*), *г*).) начинаются с длин волн: 2,62; 4,21; 6,31; 7,78. Для выбора длин волн светофильтров для заданного материала из семейства графиков выбирается график, на котором значение $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ близко к единице, а затем определяются значения длин волн λ_1 и λ_2 [80, 81, 82].

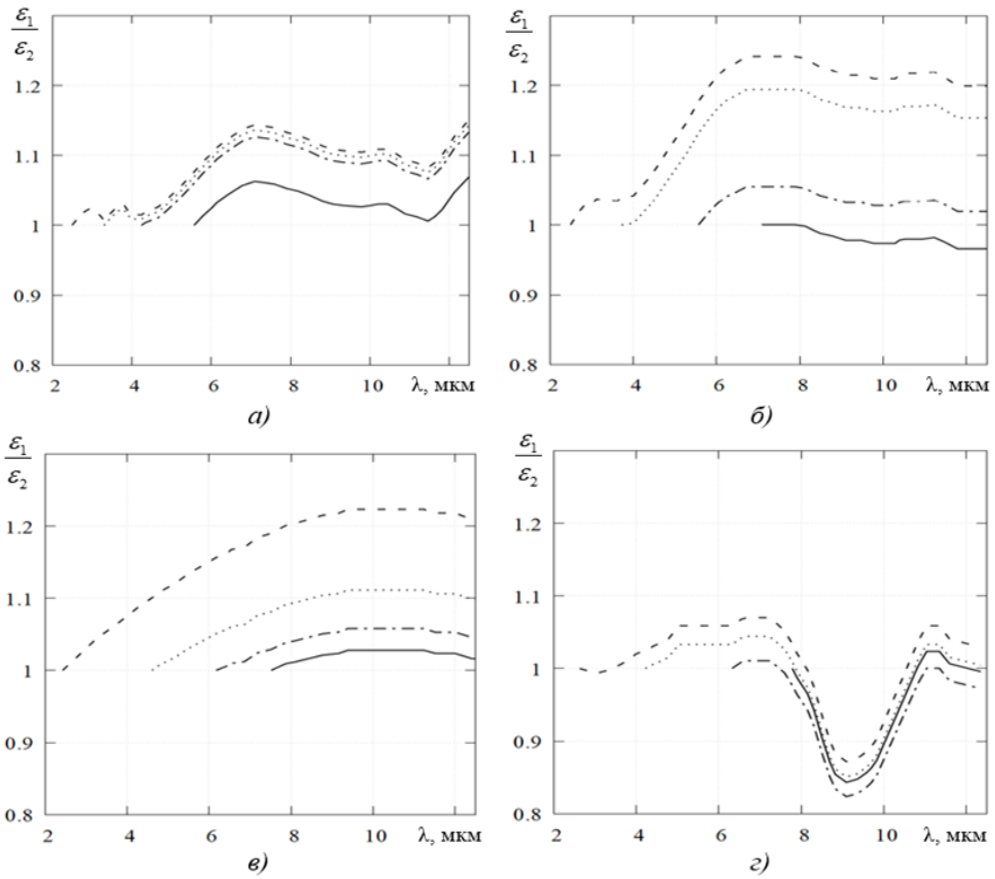


Рисунок 3.5. Значение зависимости спектральных характеристик: вычислены отношения коэффициентов излучения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ от длины волны : а – глина; б – грунт из песка, глины и известняка; в – мелкая галька; г – полированное оргстекло [80, 82]

Пирометрия спектрального отношения. Цветовая пирометрия – это метод измерения температуры объекта по отношению интенсивностей излучения черного тела на двух длинах волн (λ_1 и λ_2). При этом число неизвестных всегда больше числа измеренных величин. Метод основан на законе Планка, который утверждает, что интенсивность излучения черного тела зависит от температуры и длины волны. Рисунок 3.6 показывает зависимость интенсивности излучения черного тела от температуры и длины волны. Из рисунка видно, что интенсивность излучения увеличивается с увеличением температуры и уменьшается с увеличением длины волны. Для определения температуры нечерного тела необходимо, чтобы количество измеренных величин было равно количеству неизвестных величин. Количество неизвестных величин уменьшается, если известно отношение двух коэффициентов излучения $\varepsilon_1/\varepsilon_2=\varepsilon(\lambda_1)/\varepsilon(\lambda_2)$. Однако всегда необходимо принять дополнительное

условие, связывающее неизвестные коэффициенты излучения на этих длинах волн. Введение дополнительного условия позволяет получить систему из двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными величинами (T и ε_1). Решение этой системы позволяет найти температуру T. Например, обычным является условие $\varepsilon_1 = k.\varepsilon_2$, где k считается известным и может принимать любое значение (в том числе k = 1). В области Вина соотношение между цветовой ($T_ц$) и действительной (T) температурами объекта определяется выражением [3]:

$$T = \left[\frac{1}{T_ц} + \frac{1}{C_2} \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right]^{-1}, \qquad (3.7)$$

где T – действительная температура, К; $T_ц$ – цветовая температура, К; C_2 =14388 мкм.К; λ_1, λ_2 – двух длинах волн, мкм; ε_1, ε_2 – значения коэффициента излучения.

Рассмотрим пример анализа погрешностей для технологического процесса формообразования детали с рабочим диапазоном температур в диапазоне 600…1000°С, что соответствует абсолютным температурам T_1 = 873 К; T_2 = 1273 К, при этих температурах на длинах волн $\lambda_{1m} = 2896/T_1 = 3{,}32$ *мкм;* $\lambda_{2m} = 2896/T_2 = 2{,}28$ *мкм* значения функций спектральной плотности энергетической светимости имеют максимальные значения [80]:

$$M^o_{\lambda 1m}(\lambda_{1m}, T) = 0.665 \text{ Вт/(см}^2\text{.мкм)}; \quad M^o_{\lambda 2m}(\lambda_{2m}, T) = 4.4 \text{ Вт/(см}^2\text{.мкм)}.$$

Отношение интенсивностей $M^o_{\lambda 1}(\lambda_1, T) / M^o_{\lambda 2}(\lambda_2, T)$ на двух длинах волн монотонно уменьшается с увеличением температуры [3]. Процедура определения температуры методом цветовой пирометрии заключается в измерении интенсивностей I_1 и I_2 на двух длинах волн, проведении коррекции отношения $M^o_{\lambda 1}(\lambda_1, T) / M^o_{\lambda 2}(\lambda_2, T)$ с помощью вычисленного или измеренного отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и нахождении температуры для планковской функции с той же самой величиной $Z = M^o_{\lambda 1}(\lambda_1, T).\varepsilon_1 / M^o_{\lambda 2}(\lambda_2, T).\varepsilon_2$, которая характеризует отношение интенсивностей излучения черного тела на выбранных длинах волн [3].

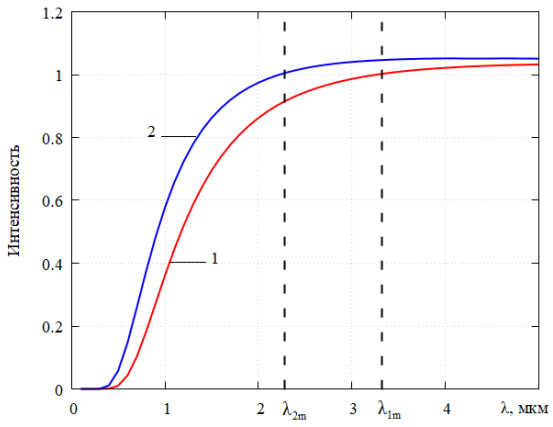


Рисунок 3.6. Интенсивности излучения при температурах черного тела: T_1 = 873 К(1); T_2 = 1273К(2), при этих температурахна длинах волн λ_{1m} = 3,32 мкм; λ_{2m}=2,28 мкм [3].

На рисунке 3.7 представлена зависимость искомой температуры объекта от величины Z для длин волн λ_1 = 530 нм и λ_2 = 650 нм. Излучательная способность объекта учитывалась на двух длинах волн. Исследование проводилось при условии, что отношение постоянной Больцмана к длине волны объекта значительно больше единицы $C_2/\lambda T >> 1$ [3]:

$$T = C_2 \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)/\lambda_1\lambda_2}{\ln\left[Z(\lambda_2/\lambda_1)^5\right]}. \qquad (3.8)$$

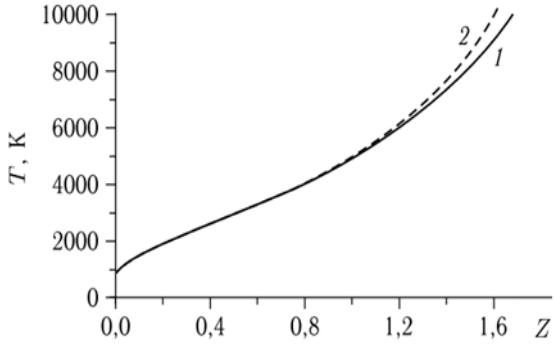


Рисунок 3.7. Зависимость температуры от отношения действительных интенсивностей Z исследована в работе [3]: 1 – модель Планка; 2 – модель Вина

При не слишком высоких температурах (при T< 300 К) спектральная плотность излучения АЧТ, полученная на основе приближения Вина (кривая 2), совпадает со спектральной плотностью излучения АЧТ, вычисленной с использованием точного выражения Планка (кривая 1). В отличие от приближения Вина, точное выражение (формула Планка) не позволяет явным образом выразить искомую цветовую температуру T. Поэтому для её вычисления необходимо использовать метод прогонки. Этот метод заключается в последовательном приближении значения температуры к оптимальному,

которое достигается при наилучшем совпадении правой (вычисляемой) и левой (измеряемой экспериментально) частей уравнения [3]:

$$\frac{M^{o}_{\lambda 2}(\lambda_2,T).\varepsilon_1}{M^{o}_{\lambda 1}(\lambda_1,T).\varepsilon_2}=\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^5\frac{\exp\left(C_2/\lambda_1 T\right)-1}{\exp\left(C_2/\lambda_2 T\right)-1}, \tag{3.9}$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}=\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^5\frac{M^{o}_{\lambda 1}(\lambda_1,T)}{M^{o}_{\lambda 2}(\lambda_2,T)}\frac{\exp\left(C_2/\lambda_1 T\right)-1}{\exp\left(C_2/\lambda_2 T\right)-1}=1. \tag{3.10}$$

Для точного вычисления цветовой температуры необходимо знать отношение $\varepsilon_2/\varepsilon_1$. Это отношение можно определить экспериментально или рассчитать по известным значениям коэффициентов отражения света источника для различных длин волн.

Выводы: Цифровой пирометр спектрального отношения, разработанный на основе принципа двухтактного интегрирования, выполняет функции трех основных блоков: двух АЦП и логометрического преобразователя; имеет хорошую защиту от сетевых помех, улучшенные метрологические характеристики за счет уменьшения влияния на погрешность измерения факторов, имеющих мультипликативный характер. Такие АЦП характеризуются высокой точностью преобразования. Кроме того, АЦП двухтактного интегрирования в сравнении с другими типами АЦП обладают сравнительно низкой ценой [80].

3.4. Параметрический синтез интегрирующего устройств контроля пирометра с двухтактным интегрированием

3.4.1. Способы линеаризации характеристик устройств контроля

Оптико-электронные устройства контроля (УК) с двухтактным интегрированием [86], обладающие повышенной помехоустойчивостью и минимальной чувствительностью к изменению их параметров, в большинстве случаев имеют нелинейную градуировочную (статическую) характеристику [90]. Причиной нелинейности характеристик контрольных устройств являются нелинейные уравнения преобразования физических величин в измерительных

преобразователях [91]. Для повышения точности измерения и технологичности производства устройств контроля необходима линеаризация их характеристик. Довольно часто в измерительной технике в качестве элементов линеаризации используются диодно-резистивные цепи и транзисторы [92]. Основным недостатком этих полупроводниковых элементов является зависимость их параметров от температуры [91, 93].

Интегрирующие развертывающие преобразователи (ИРП) [85] – это устройства, которые выполняют функциональное преобразование измерительных сигналов с помощью задаваемых (синтезируемых) весовых функций. Техническая реализация ИРП с синтезированными весовыми функциями является сложной задачей, поскольку блоки для формирования весовых функций являются более сложными, чем ИРП. При некоторых способах функционального преобразования к интегратору ИРП может подключаться цифровой фильтр. Кроме того, ИРП с устройствами формирования весовых функций не могут быть использованы для измерения отношений входных сигналов, поскольку один из входов ИРП соединен с блоком формирования. Для повышения точности измерений оптико-электронных устройств контроля с двухтактным интегрированием необходимо разработать способы линеаризации статических характеристик устройств и методы синтеза их технических реализаций [90, 94 – 100].

3.4.2. Методы аппроксимации характеристик устройств контроля

Исходной информацией для синтеза блоков линеаризации является уравнение градуировочной характеристики устройства контроля [91]. Довольно часто характеристика, то есть функциональная связь между входными и выходными переменными устройства контроля представляется в виде таблицы экспериментальных данных [90]. Однако для параметрического синтеза УК в качестве исходной информации необходима аналитическая зависимость между переменными, которая позволяет рассчитывать значения функции в промежуточных точках, не содержащихся в исходных данных. Поэтому при

синтезе УК возникает необходимость аппроксимация табличной формы представления функциональной зависимости аналитической функцией, причем достаточно простого вида.

Задача определения параметров аппроксимирующей функции $y=f(x)$ сводится к некоторой минимизации отклонений значений этой функции от табличных значений. На практике в основном используется метод наименьших квадратов, в котором параметры функции $f(x)$ определяется из условия минимизации суммы квадратов отклонений [90, 101]

$$S = \sum_{i=0}^{m} [y_i - f(x_i)]^2 . \tag{3.11}$$

В теории вероятностей доказано, что если отклонения подчиняются нормальному закону распределения, то значения параметров аппроксимирующей функции *f(x)*, полученные с помощью данного метода, имеют наибольшую вероятность.

Метод наименьших квадратов (МНК) является одним из наиболее широко используемых методов аппроксимации экспериментальных данных. Он основан на минимизации суммы квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции от экспериментальных данных. Он состоит из двух этапов: выбора аппроксимирующей функции и определения параметров этой функции. Первый этап является наиболее творческим и выполняется исследователем, а второй этап полностью формализован и может выполняться с помощью компьютера.

В работе [90, 101] предложен обобщённый полином аппроксимирующей функции вида:

$$f(x) = a_1\varphi_1(x) + a_2\varphi_2(x) + \ldots + a_n\varphi_n(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i\varphi_i(x) . \tag{3.12}$$

В прикладных задачах аппроксимации наиболее часто используются следующие функции:

степенной полином [90]:

$$P_n(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots a_n x^n = \sum_{i=0}^{n} a_i x^i \; ; \tag{3.13}$$

экспоненциальный полином [90]:

$$P_n(x) = a_0 + a_1 e^x + a_2 e^{2x} + \ldots a_n e^{nx} = \sum_{i=0}^{n} a_i e^{ix} \; ; \tag{3.14}$$

тригонометрический полином [90]:

$$P_n(x) = a_0 + \sum_{k=0}^{n} (a_k \cos kx + b_k \sin kx). \tag{3.15}$$

Коэффициенты α_i полиномов [85, 87, 90, 91, 101, 102] вычисляются с помощью широко используемых на практике компьютерных программ.

Если вид аппроксимирующей функции не известен из физических процессов, то ее выбор производится либо на основе физических соображений, либо на основе экспериментальных данных. В случае, когда экспериментальные данные содержат большую погрешность измерения или когда не требуется высокая точность воспроизведения значений функции *y=f(x),* то можно ограничиться простейшим видом аппроксимирующей функции, содержащим всего два параметра. Наиболее часто встречающимися примерами таких функций являются следующие [90, 91]:

$$y = ax + b; y = ax^n; y = ae^x; y = a \ln x + b. \tag{3.16}$$

Кусочно-линейная аппроксимация с помощью функции $y = ax+b$ позволяет свести нелинейные задачи к сравнительно простым – линейным, теоретический аппарат решения которых разработан достаточно полно [90, 91].

Степенная функция $y=ax^n$ используется для аппроксимации вольтамперных характеристик различных электронных элементов и характеристик пирометров спектрального отношения [90, 91]. Например, в ограниченном интервале температур характеристика пирометра спектрального отношения имеет выражение [103]:

$$U_{\Phi 2} = U_{\Phi 1} \frac{b_1}{b_2} \Theta^{n_1 - n_2} = B\Theta^n, \tag{3.17}$$

где $U_{\Phi 1}$ – выходное напряжение первого канала, которое стабилизируется блоком АРУ; $U_{\Phi 2}$ – выходное напряжение второго канала, которое является выходным напряжением пирометра [91].

$$n_i = \frac{\ln(\Phi_{\Theta 1} / \Phi_{\Theta 2})}{\ln(\Theta_1 / \Theta_2)}; \; b_i = \frac{\Phi_{\Theta 1}}{\Theta_1^{ni}}; \tag{3.18}$$

где $\Phi_{\Theta 1}$ и $\Phi_{\Theta 2}$ – значения потоков излучения крайних температур диапазона для каждого оптического канала.

Степенная функция $y=ax^n$ обладает следующим свойствоммонотонности.

$$\frac{dy / dx}{y / x} = n. \tag{3.19}$$

Свойство степенной функции оставаться постоянной при малых изменениях аргумента может быть использовано при выборе аппроксимирующей функции. В частности, если для всего диапазона экспериментальных данных численное значение функции отличается от некоторого постоянного значения не более чем на заданную погрешность, то такую функцию можно аппроксимировать степенной функцией. Если функция $y=f(x)$ является вольт-амперной характеристикой электронного элемента, то эти отношения имеют физический смысл: $y/x=R_{CT}$ – статическое и $\Delta y/\Delta x=R_{ДИН}$ – динамическое сопротивления [91].

$$\frac{\Delta y_i / \Delta x_i}{y_i / x_i} \approx n_i, \tag{3.20}$$

Экспоненциальная функция $y=ae^{-x}$ может быть легко реализована в электрических развертывающих устройствах с помощью RC – цепи. Для выбора аппроксимирующей функции можно воспользоваться следующим свойством экспоненциальной функции [91]:

$$\frac{dy/dx}{y} = -1, \tag{3.21}$$

то есть модуль скорости изменения функции равен самой функции.

После нахождения аналитической зависимости статической характеристики исследуемого объекта необходимо выбрать способ линеаризации и метод параметрического синтеза технической реализации.

3.4.3. Методы синтеза блоков динамической линеаризации

В развертывающих измерительных преобразователях (ИРП) измеряемая физическая величина преобразуется во временной сигнал. Для линеаризации функциональной зависимости ИРП целесообразно использовать переходные процессы в электрических цепях с RLC – элементами. В настоящее время разработан достаточно полно математический аппарат [104, 105] синтеза электрических цепей по заданным передаточным или переходным функциям. Это позволяет подобрать нелинейную функцию развертки преобразователя, при которой статическая характеристика устройства контроля будет практически линейной. Для линеаризации характеристики ИРП необходимо, чтобы функция развертки совпадала с градуировочной характеристикой.

Нелинейная развертка, реализуемая с помощью сравнительно несложных RLC – элементов, позволяет линеаризовать статическую характеристику усилителя постоянного тока (УК). Наиболее простой способ реализовать экспоненциальную временную функцию с помощью электрических цепей. Необходимо отметить, что если задана статическая характеристика преобразователя, то с помощью временной развертки она может быть преобразована во временную зависимость [90, 91].

3.4.4. Синтез блока линеаризации первого порядка

В работе [87] описана методика аппроксимации пирометра с двухтактным интегрированием. Методика основана на использовании экспоненциальной функции развертки, реализуемой с помощью апериодического звена первого порядка. Для получения экспоненциальной функции развертки к интегратору преобразователя необходимо подключить дополнительный резистор $R_Д$ (рис. 3.8) [90]. Для определения параметров преобразователя определим функциональную связь между его входными и выходными сигналами. Напряжение на выходе операционного усилителя в конце первого такта определяется с помощью выражения [90]:

$$U_1 = -\frac{R_Д}{R_И} U_X \left(1 - e^{pT_1}\right), \tag{3.22}$$

где $p = \dfrac{-1}{R_Д C_И}$

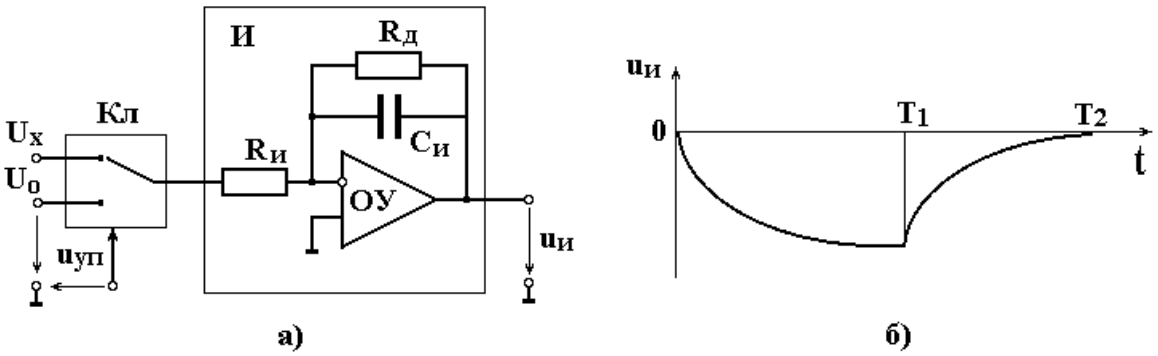


Рисунок 3.8. Схема развертывающего устройства (а)и временная диаграмма (б) его работы

В конце второго такта напряжение на выходе операционного усилителя (ОУ) равно нулю. При этом напряжения на входах ОУ (U_X и U_O) имеют различную полярность [90]:

$$U_2 = \frac{R_Д}{R_И} U_O \left[1 - \left(1 + \frac{U_X}{U_O}\left(1 - e^{pT_1}\right)\right) e^{pT_2}\right] = 0. \tag{3.23}$$

Из выражения (3.23) определим промежуток времени T_2, по величине которого определяется отношение напряжений [90]:

$$T_2 = R_Д C_И \ln\left[1 + \frac{U_X}{U_O}\left(1 - e^{pT_1}\right)\right]. \quad (3.24)$$

Введя обозначения алгебраических выражений $K = U_X / U_O$ и $M = 1 - e^{pT_1}$, получим уравнение (3.25) в более компактной форме [90]:

$$T_2 = R_Д C_И \ln\left(1 + K \cdot M\right). \quad (3.25)$$

Количество импульсов, регистрируемых индикатором, определяется как $N_2 = f_T T_2$ [90]:

$$N_2 = f_T R_Д C_И \ln\left(1 + K \cdot M\right) = f_T R_Д C_И \left(\ln\left(M\right) + \ln\left(1/M + K\right)\right) \quad (3.26)$$

Количество импульсов в первом такте равно 10^3, а длительность первого такта равно $T_1 = 10^3/f_T$ [90].

Если коэффициент отношений входных напряжений характеризуется нелинейной зависимостью от температуры и описывается выражением [90]:

$$K = -A + B \cdot e^{-a\Theta}, \quad (3.27)$$

где Θ – температура изделия; A, B, a – постоянные параметры.

Выполнив подстановку выражения (3.27) в уравнение (3.26), получим выражение [90]:

$$N_2 = f_T R_Д C_И \left[\ln\left(M\right) + \ln\left(1/M - A + B \cdot e^{-a\Theta}\right)\right], \quad (3.28)$$

Выбрав параметр A из условия $1/M = A$, получим линейную зависимость показаний преобразователя от температуры [90]:

$$N_2 = f_T R_Д C_И \left(\ln\left(M\right) + \ln\left(B\right) - a\Theta\right). \quad (3.29)$$

Необходимо отметить, что именно отрицательное смещение $-A$ функции K позволяет получить линейную зависимость (3.28).

Введя обозначения алгебраических выражений [90]:

$$D = f_T R_Д C_И \left(\ln(M) + \ln(B)\right) \text{ и } E = f_T a R_Д C_И, \qquad (3.30)$$

получим более компактное выражение уравнения [90]:

$$N_2 = D - E \cdot \Theta. \qquad (3.31)$$

Задание необходимых параметров D и E обеспечивается за счет выбора величин $R_Д$ и B [90].

Для оценки погрешности аппроксимации с помощью предложенной методики были проведены экспериментальные исследования характеристики преобразования АЦП КР572ПВ2 с параметрами: $R_Д$=476кОм; $C_И$=0,21мкФ; $R_И$=229кОм; $f_т$=10725Гц [90]. Из сравнения экспериментальных (1) и теоретических (2) характеристик и погрешности (3), представленных на графике, следует, что погрешность реализации заданной функции удовлетворяет требованиям инженерной практики [90].

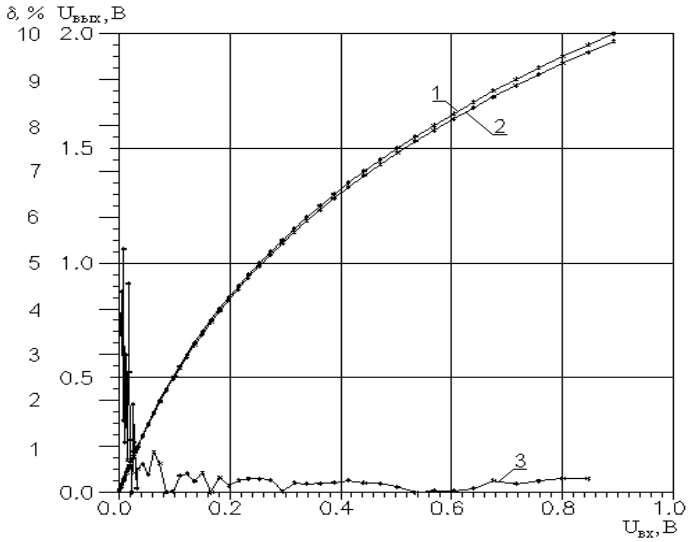


Рисунок 3.9. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) характеристики преобразователя и относительная погрешность (3) аппроксимации

3.5. Выводы по третьей главе

1. Цифровой пирометр спектрального отношения, разработанный на основе принципа двухтактного интегрирования, выполняет функции трех основных блоков: двух АЦП и логометрического преобразователя; имеет хорошую защиту от сетевых помех,что позволяет улучшить его метрологические характеристики, поскольку сокращено число АЦП с трех до одного и влияние сетевых помех [80].

2. Поскольку принцип двухтактного интегрирования обладает свойствами инвариантности к изменению параметров основных элементов АЦП, погрешности которых имеют мультипликативный характер, что снижает требования к выбору элементов и соответственно стоимость готового изделия. Такие АЦП имеют высокую точность преобразования и сравнительно низкую цену.

3. Цифровой пирометр спектрального отношения при некоторой модернизации позволяет выполнять дополнительную функцию - линеаризацию статической характеристики пирометра за счет введения нелинейной развертки, параметры которой вычисляются по приведенной методике. Таким образом, цифровой пирометр спектрального отношения обладает широкими функциональными возможностями.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Блок-схема экспериментальной установки коэффициента излучения

Эксперимент по исследованию методической погрешности, обусловленной коэффициентом излучения материала изделия, основан на сравнении результатов измерения двух методов оптико-электронного и контактного (образцового). Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рисунке 4.1. Установка состоит из следующих основных элементов:

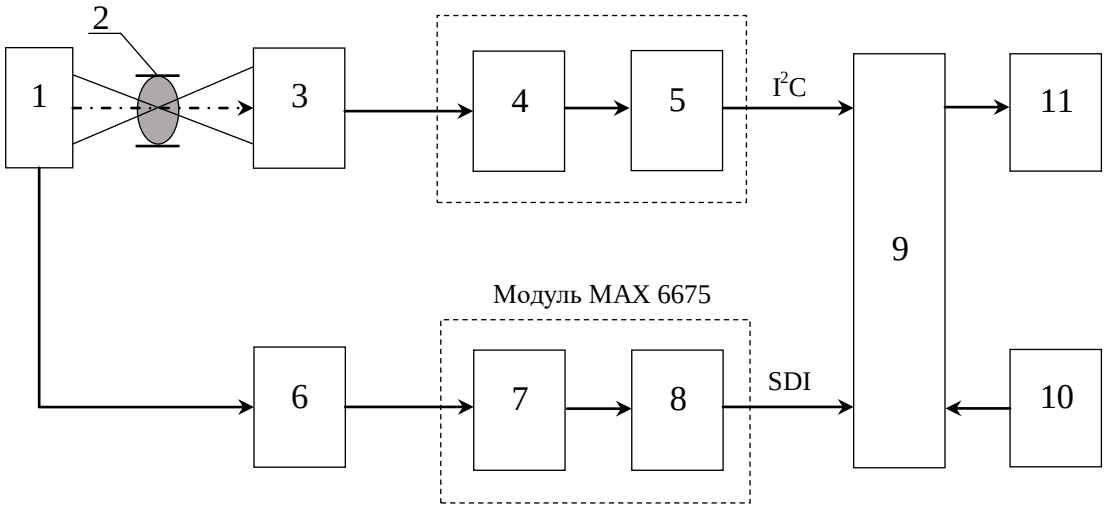


Рисунок 4.1. Блок-схема экспериментальной установки

Здесь приведены обозначения: *1* – измеряемый объект, *2* – объектив, *3* – приемник излучения фотодиод ФД-10ГА, *4* – усилитель 1, *5* – АЦП 1 (ADS1000), *6* – термопара К-типа, *7* – усилитель, *8* – АЦП 2 (MAX 6675), *9* – микрокомпьютер Raspberry Pi 3 (ЭВМ), *10* – клавиатура, *11* – монитор.

На рисунке 4.2 представлена принципиальная схема функциональных блоков *3, 4, 5, 6, 7, 8,* на рисунке 4.3 печатная схема и на рисунке 4.4. фотография конструкции пирометра.

Фотографии пирометра и нагревательной печи для испытуемого материала приведены на рисунке 4.5 (а,б), модуля преобразователя термопары на MAX6675 на рисунке 4.6, а микрокомпьютера Raspberry Pi 3 B+ на рис. 4.7.

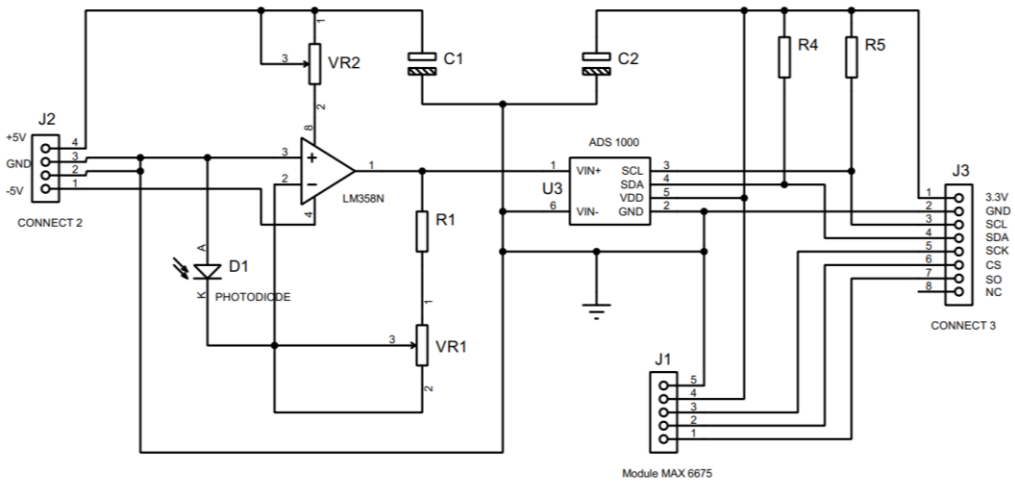


Рисунок 4.2.Принципиальная схема пирометра

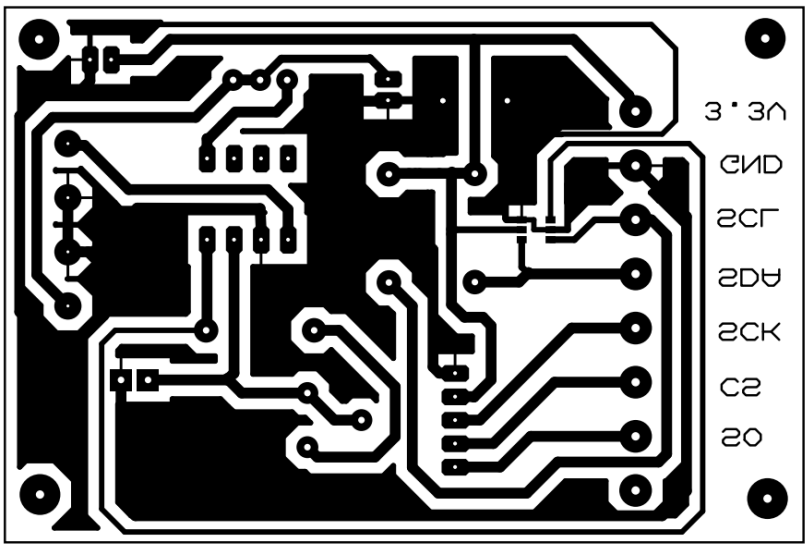


Рисунок 4.3.Печатная схема пирометра

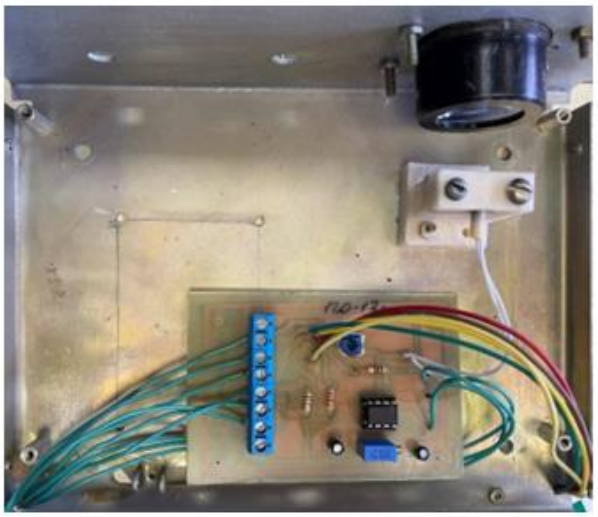


Рисунок 4.4.Фотография конструкции пирометра

а) б)

Рисунок 4.5. Фотографии пирометра (а) и нагревательной печи (б)

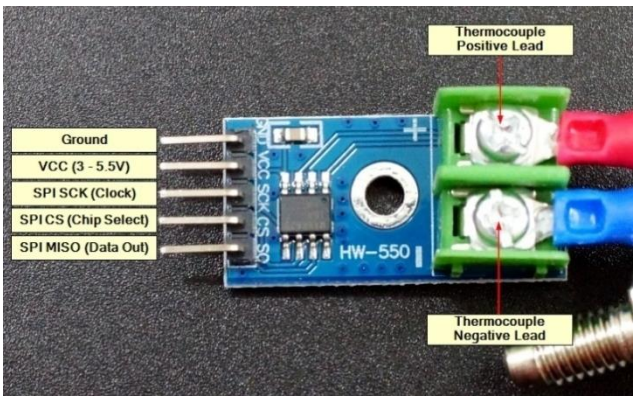


Рисунок 4.6. Модуль преобразователя термопары на MAX6675

Рисунок 4.7. Микрокомпьютер Raspberry Pi 3 B+

Фотография экспериментальной установки для исследования погрешности пирометра приведена на рисунке 4.8.

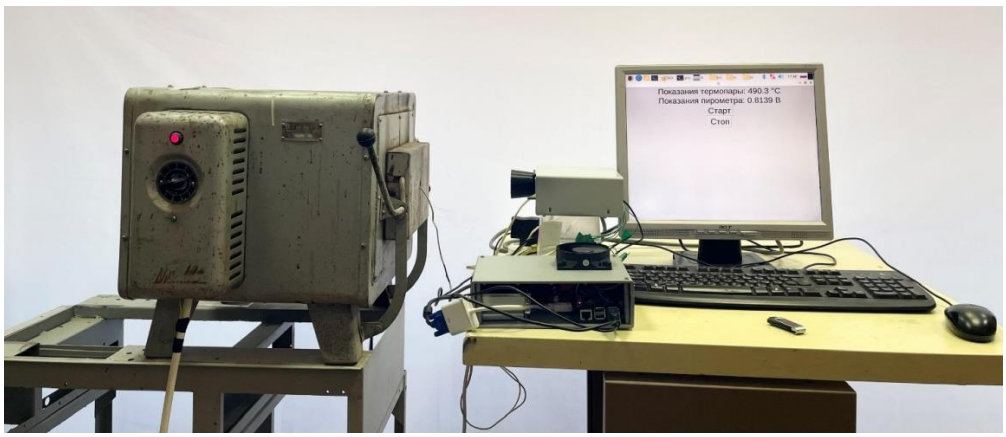


Рисунок 4.8. Фотография экспериментальной установки

4.2. Методика проведения эксперимента

В процессе экспериментального исследования деталь нагревается в печи до максимального значения диапазона. В процессе нагрева результаты измерения с двух каналов регистрируются в компьютере, который определяет функциональную зависимость показания пирометра от температуры детали, регистрируемой термопарой. По функциональной зависимости определяется градуировочная характеристика пирометра и функциональная зависимость коэффициента излучения от температуры. Эксперимент можно также проводить при остывании детали, снимая показания пирометра через определенные интервалы температуры, регистрируемой термопарой. Необходимо отметить, что по этой методике коэффициент излучения определяется с максимальной точностью, поскольку исключено влияние различных внешних факторов.

4.3. Определение коэффициента излучения и температуры объекта энергетическим пирометром

На основе предложенного способа реализован энергетический пирометр (рис. 4.9) [56, 57, 58, 59, 89]. Оптико-электронное устройство для определения коэффициента излучения и температуры объекта содержит пирометр *1*, с помощью которого регистрируются температура образца и объекта. На основании *2* с пирометром *1* установлен нагревательный элемент *3*, который осуществляет нагрев, закрепленного на нем эталонного образца *4*.

Нагревательный элемент *3* с эталонным образцом *4* закреплен на основании *2* с помощью поворотного механизма *5*. Перед измерением пирометр 1 устанавливается так, чтобы оптическая ось пирометра совпадала с измеряемой зоной поверхности объекта *6*. Пирометр *1* и регистратор температуры образца *4* – термопара *7* подключены к входу ЭВМ *8*, которая обеспечивает регистрацию функциональной зависимости показаний пирометра и температуры, регистрируемой термопарой. К выходу ЭВМ *8* подключен регулятор температуры *9*, с помощью которого устанавливается температура нагревательного элемента *3* с образцом *4*. При работе устройства нагревательный элемент *3* с эталонным образцом *4* с помощью механизма *5* устанавливается так, чтобы поверхность эталонного образца была перпендикулярна оптической оси пирометра. Затем с помощью регулятора температуры *9* осуществляется нагрев элемента *3* с образцом *4* до заданной с помощью ЭВМ *8* температуры. Стабилизация температуры осуществляется контуром обратной связи: термопарой *7*, ЭВМ *8*, регулятором *9* и нагревательным элементом *3*. Пирометр *1* регистрирует температуру образца *4* в ЭВМ. Далее выполняется операция для других температур в заданном диапазоне температур. По измеренным данным с помощью ЭВМ *8* определяется функциональная зависимость показаний пирометра от температуры образца, измеряемой термопарой *7*. После тарировки пирометра элемент *3* с образцом *4* поворачивается, так чтобы поток излучения от объекта 6 поступал на пирометр. Затем с помощью обратной зависимости определяется температура объекта [56, 57, 58, 59, 89].

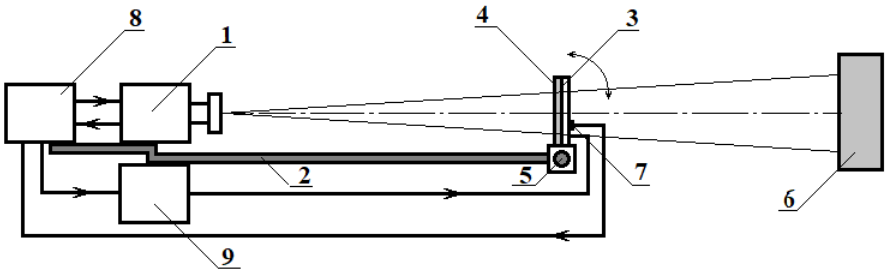


Рисунок 4.9. Оптико-электронное устройство для определения коэффициента излучения и температуры объекта [56, 57, 58, 59]

С помощью оптико-электронного устройства (рис. 4.9) был получен тарировочный график (рис 4.10), с помощью которого по выходному сигналу пирометра определяется температура детали. При использовании промышленного пирометра, выходным сигналом которого является температура, возможно определение коэффициента излучения. В этом случае на пирометре устанавливается коэффициент излучения равный 1 [56, 57, 58, 59].

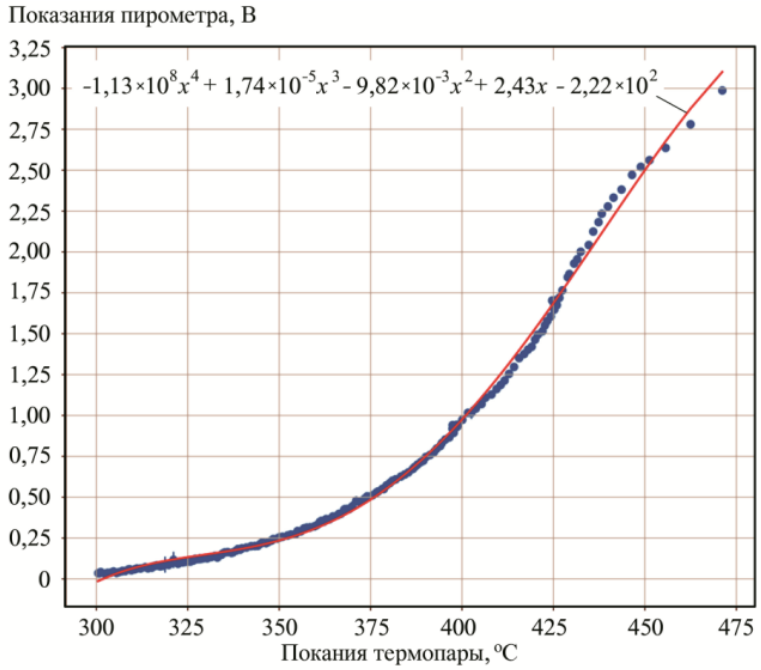
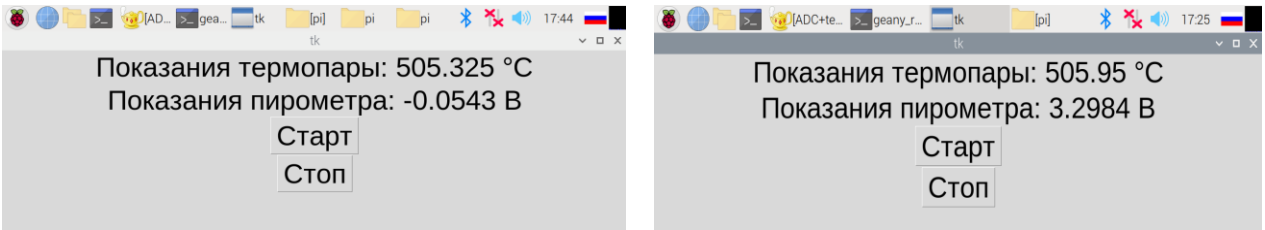


Рисунок 4.10. Тарировочный график оптико-электронного устройства для определения коэффициента излучения и температуры объекта: синие кружки – экспериментальная зависимость; красная линия – аппроксимированная функция [56, 57, 58, 59]

На рис. 4.11 изображено окно программы для измерения температуры объекта.



а) б)

Рисунок 4.11. Окно программы для измерения температуры объекта

На основе предложенной методики определения интегрального коэффициента излучения по образцу материала разработан энергетический пирометр. В результате экспериментального исследования погрешности

измерения этого пирометра выявлено, что погрешность для железа составила 1%, а погрешность определения температуры с помощью табличных данных составляет 6,57% (табл. 2.5) [56, 57, 58]. Таким образом, разработанный радиационный пирометр на основе предложенного метода позволяет повысить точность измерения температуры объекта. Необходимо отметить, что в этом случае отпадает необходимость учитывать спектральные характеристики оптики и приемника излучения. Поскольку эти характеристики учтены в интегральном коэффициенте излучения. Кроме того, в этом устройстве компенсируются нелинейности в электронной схеме обработки информации. Недостатком прибора является подбор образцового материала, идентичного материалу исследуемого образца. Однако, на промышленных предприятиях с больших объемом выпускаемой продукции используется практически один материал, что уменьшает погрешность из-за различия коэффициента излучения материала разных деталей в партии. Оптико-электронное устройство, реализуемое предлагаемый способ, позволяет оперативно и с более высокой точностью измерять температуру крупногабаритных оболочек вращения в машиностроении, проката и труб в металлургии, а так же нагретых изделий в других отраслях промышленности [56, 57, 58, 59].

4.4. Блок-схема пирометра спектрального отношения

Пирометр спектрального отношения на использовании в качестве схемы обработки информации структурную схему АЦП двухтактного интегрирования[93, 106]. АЦП состоит (рис. 4.12) из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть содержит электронные ключи *S1* – *S9*; буферный усилитель *DA1*, операционный усилитель *DA2* – интегратор, а также компаратор DA3. Цифровая часть содержит генератор *G1*, логическое устройство *DD1*, счетчик импульсов *CT*, регистр памяти *RG* с выходным дешифратором *DC* [93, 106].

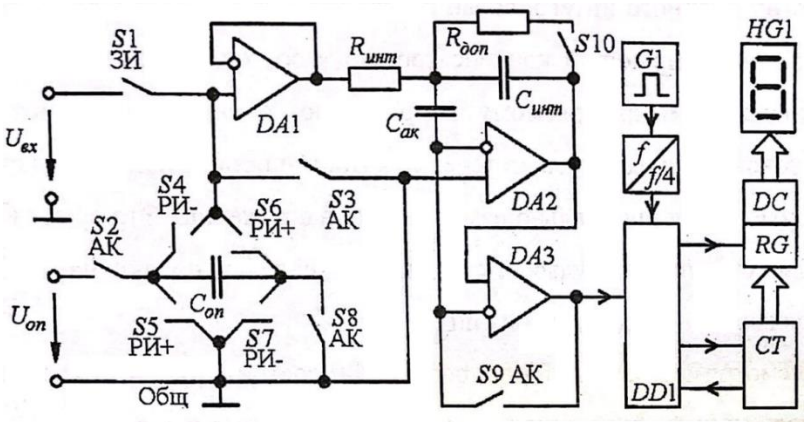


Рис. 4.12. Структура АЦП двойного интегрирования [93, 106]

На входы АЦП подают измеряемое $U_{вх}$ и опорное $U_{оп}$ напряжения. Цикл измерения (рис. 4.13) состоит из двух этапов интегрирования сигнала: (t_1–t_2) – зарядки интегрирующего конденсатора (ЗИ) и (t_2–t_3) – разрядки интегрирующего конденсатора (РИ), а также этапа автоматической коррекции нуля (АК). Каждому этапу соответствует определенная коммутация элементов преобразователя, выполняемая ключами *S1* – *S9* на транзисторах структуры МОП. На рис. 4.12 надписи у ключей обозначают этап, в течение которого «контакты» замкнуты. Длительность каждого этапа пропорциональна периоду тактовой частоты, которая определяется выражением $f_T = f/4$, где f – частота генератора *G1* [93, 106].

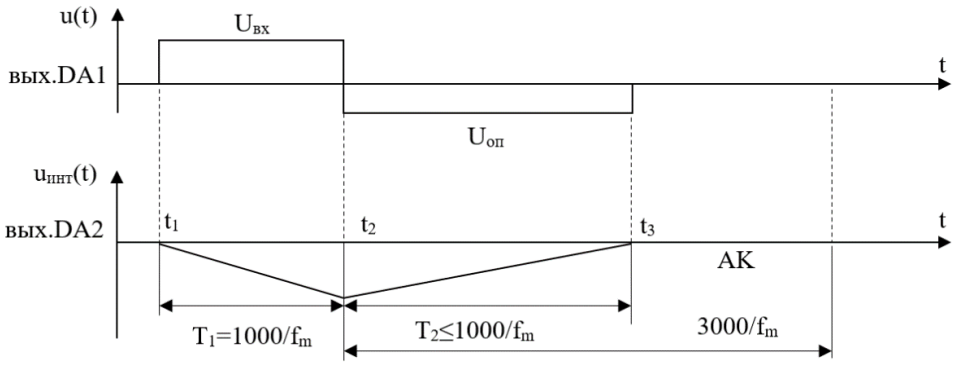


Рис. 4.13. Временна диаграмма работы АЦП двойного интегрирования

В течение первого этапа (t_1–t_2) (см. рис. 4.13), длящегося 1000 (для данной работы) периодов тактовой частоты, входной сигнал через ключ *S1* и буферный усилитель *DA1* поступает на вход интегратора *DA2*. В течение этого этапа на

конденсаторе $C_{инт}$ осуществляется накопление заряда с постоянной скоростью, пропорциональной входному сигналу (рис. 4.13) [93, 106].

Предположим, что к моменту времени t_1 заряд на конденсаторах $C_{инт}$ и $C_{ак}$ и напряжение смещения нуля ОУ *DA1 – DA3* равны нулю ($C_{ак}$ – запоминающий конденсатор узла автоматической коррекции «нуля»). Пусть также конденсатор $C_{оп}$ уже заряжен от источника опорного напряжения до $U_{оп}$. Во время первого этапа (t_1–t_2) компаратор *DA3* определяет знак входного напряжения по знаку напряжения на выходе интегратора *DA2*. Чувствительность компаратора *DA3* такова, что он правильно определяет полярность входного сигнала, даже если сигнал существенно меньше единицы отсчета [93, 106].

Напряжение на выходе интегратора в момент времени t_2определяется выражением [106]:

$$U_{инт} = -\frac{1}{\tau}\int_{t_1}^{t_2} U_{вх}\,dt \qquad (4.1)$$

где $\tau = P_{инт}C_{инт}$ – постоянная времени интегратора.

При работе АЦП на втором этапе (t_2–t_3) входной сигнал на интегратор *DA2* не поступает (см. рис. 4.12). К его входу выключатели *S5, S6* (если $U_{вх}$>0) или *S4, S7* (если $U_{вх}$<0) присоединяют заряженный до опорного напряжен $C_{оп}$, причем в такой полярности (этим и обусловлен выбор той или иной пары выключателей), при которой происходит разрядка конденсатора $C_{инт}$[106].

Разрядка длится до тех пор, пока конденсатор $C_{инт}$ не разрядится полностью, т. е. напряжение на выходе ОУ *DA2* не станет разным нулю. В этот момент срабатывает компаратор *DA3*, завершая этап T_2 [106].

$$U_{инт} = -\frac{1}{\tau}\int_{t_1}^{t_2} U_{вх}\,dt + \frac{1}{\tau}\int_{t_2}^{t_3} U_{оп}\,dt = 0, \qquad (4.2)$$

откуда

$$\frac{U_{вх}(t_2 - t_1)}{\tau} = \frac{U_{оп}(t_3 - t_2)}{\tau}, \text{или} U_{вх}T_1 = U_{оп}T_2 \qquad (4.3)$$

Время разрядки конденсатора $C_{инт}$ выраженное числом периодов тактовых импульсов, и есть результат измерения, зарегистрированный в счетчике *CT* [106]:

$$N = f_T T_2 = f_T T_1 \frac{U_{вх}}{U_{оп}} = f_T \frac{1000}{f_T} \frac{U_{вх}}{U_{оп}} = \frac{1000 U_{вх}}{U_{оп}}. \quad (4.4)$$

Состояние счетчика переписывается в регистр *RG*, а затем преобразуется в сигналы семиэлементного кода, которые поступают на индикатор *HG1* [106].

Как следует из выражений (4.3) (4.4) на результат измерения не оказывают влияние частота тактирования и постоянная времени интегратора, а соответственно параметры элементов. Это является преимуществом АЦП двухтактного интегрирования [106].

На рис. 4.14 проиллюстрирована инвариантность результата измерения к изменению постоянной времени τ интегратора (рис. 4.14, а) и частоты тактового генератора f (рис. 4.14, б) [106].

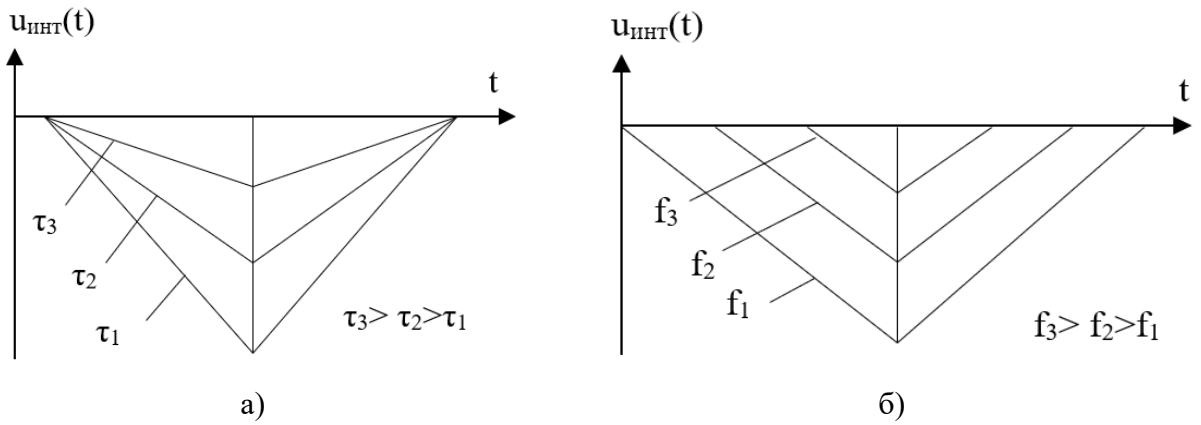


Рис. 4.14. Диаграммы работы АЦП при различных параметрах τ и *f*

Этап автокоррекции начинается с прекращения работы счетчика *CT*, когда логическое устройство DD1 «замыкает контакты» выключателей *S2, S3* и *S9*. В результате усилители *DA2* и *DA3* оказываются охваченными отрицательной обратной связью с коэффициентом, равным 1, вследствие чего их суммарный коэффициент усиления становится равным единице. На нижней (по схеме) обкладке конденсатора $C_{ак}$ устанавливается напряжение, равное сумме напряжения смещения усилителя *DA2* и приведенного напряжения

смещения усилителя *DA3*. На верхней же обкладке этого конденсатора будет присутствовать напряжение смещения усилителя *DA1*. Таким образом, на конденсаторе $C_{ак}$ на этапе автокоррекции запоминается напряжение ошибки, обусловленное смещениями всех трех ОУ (*DA1* – *DA3*). В последующих двух этапах интегрирования (t_1–t_2) и (t_2–t_3) ключ *S9* размыкается и напряжение на $C_{ак}$ вычитается из входного сигнала ОУ *DA2*. Таким способом удается уменьшить суммарное напряжение смещения АЦП до значения, не превосходящего 10 мкВ (для данной работы). На этапе автокоррекции осуществляется также заряд конденсатора $C_{оп}$ опорным напряжением [106].

*Особенности функционирования АЦП***.** Основным устройством пирометра спектрального отношения является микросхема АЦП серии 7106 (российский аналог 57ПВ5), выполняющая также функции управления жидкокристаллическим индикатором. Некоторые особенности работы микросхемы [106].

Пределы входного напряжения устройства зависят от опорного напряжения $U_{оп}$ и определяются соотношением $U_{вх\ мах} = \pm 1{,}999.U_{оп}$. Рекомендуемы значения $U_{оп}$ – это 1 В или 0,1 В. В первом случае диапазон входных сигналов будет ±1,999 В, а во втором 0,1999 В [106].

Признак напряжения $U_{вх}$, противоположном указанному на рис. 41, н индикаторе HG1 индицируется знак «минус». При перегрузке, когда $U_{вх}>1{,}999.U_{оп}$, на индикаторе остается лишь цифра 1 в старшем разряде и знак «минус» (для отрицательного напряжения) [106].

4.5. Лабораторный стенд для исследования метода двухтактного интегрирования.

Для исследования функциональных возможностей и анализа погрешностей был разработан лабораторный стенд, который содержит следующие блоки: блок питания, АЦП, источники входного и опорного напряжений, генератор тактовых импульсов, электронные ключи для

изменения постоянной времени интегратора, устройство синхронизации для устойчивого наблюдения сигналов на осциллографе, жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) [106].

Расположение органов управления и гнезд на передней панели лабораторного стенда приведено на рис. 4.15[106].

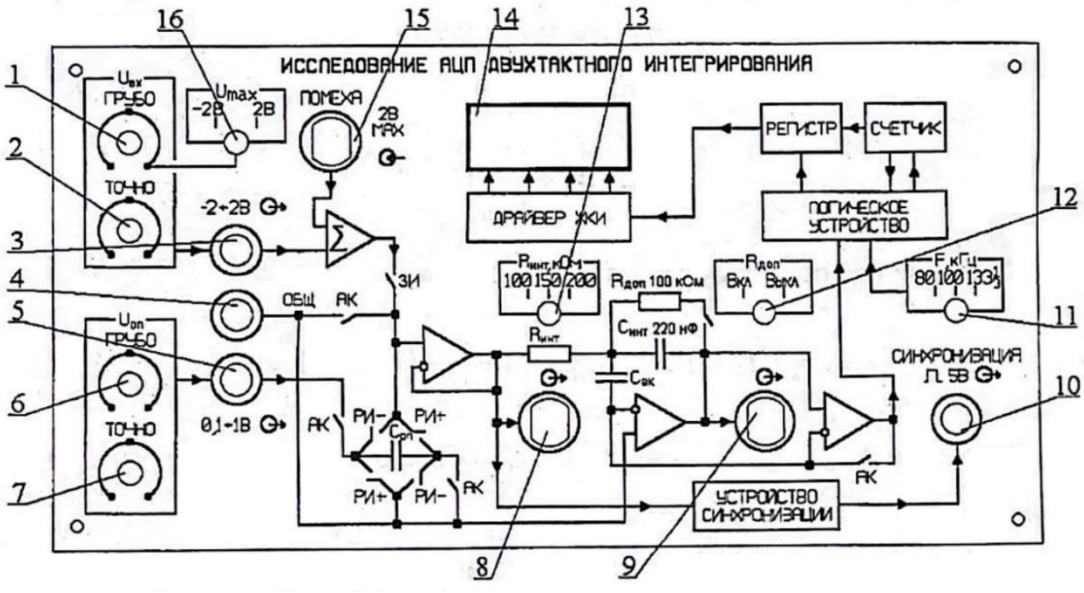


Рис. 4.15. Рабочая панель лабораторного стенда

Назначение органов управления и гнезд стенда [93]: *1* – ручка грубой регулировки входного напряжения; *2* – ручка плавной регулировки входного напряжения; *3* – гнездо для измерения входного напряжения; *4* – гнездо общего провода; *5* – гнездо для измерения опорного напряжения; *6* – ручка грубой регулировки опорного напряжения; *7* – ручка плавной регулировки опорного напряжения; *8* – гнездо для контроля входного напряжения интегратора; *9* – гнездо для контроля напряжения на выходе интегратора; *10* – гнездо выхода синхронизирующих импульсов; *11* – переключатель частоты генератора *G1* (см. рис. 4.1); *12* – переключатель для включения/отключения резистора $R_{доп}$ (рис. 4.1, ключ *S10*); *13* – переключатель сопротивления резистора $R_{инт}$; *14* – жидкокристаллический индикатор (рис. 4.12, *HG1*); *15* – гнездо для подачи сигнала имитирующего помеху; *16* – переключатель полярности входного напряжения [106].

На рис. 4.16 изображен внешний вид лабораторного стенда [93].

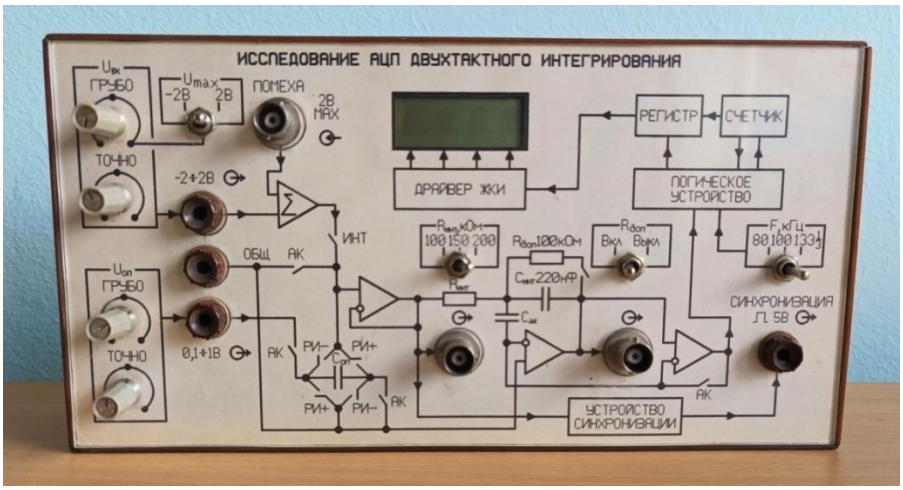


Рис. 4.16. Внешний вид лабораторного стенда

С помощью лабораторного стенда был проведен анализ влияния погрешностей преобразования основных элементов преобразователя с двухтактным интегрированием и внешних помех. Основными погрешностями цифровых измерительных преобразователей являются погрешности временной дискретизации и квантования по уровню, однако величины этих погрешностей очень малы. Так, например, погрешность дискретизации определяется частотой генератора тактовых импульсов и составляет доли одного процента, а погрешность квантования по уровню определяется погрешностью округления младшего разряда результата измерения и также составляет доли одного процента. Поэтому, по этой причине эти составляющие погрешности для пирометрии можно не учитывать. Как было приведено выше, на результат измерения не оказывают влияние частота тактирования и постоянная времени интегратора. Из оставшихся элементов преобразователя, которые имеют погрешности преобразования это ключи. Экспериментально была исследована полная погрешность с учетом влияния сетевой помехи, которая составила менее 0,5% [93, 106].

4.6. Выводы по четвёртой главе

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические исследования, что градуировка радиационного пирометра по эталонному образцу, идентичному измеряемому объекту, и использование

одного пирометра для градуировки и измерения позволяет значительно повысить точность измерения, а именно погрешность составляет менее 1% [83].

2. Из исследования влияния погрешностей преобразования основных элементов преобразователя с двухтактным интегрированием и внешних помех на точность определения отношения двух сигналов следует, что погрешность эта минимальна и составляет менее 0,5%, что вполне удовлетворяет пирометрии высокотемпературных процессов.

3. Проведенные исследования показывают, что использование преобразователя с двухтактным интегрированием на базе промышленного АЦП позволяет значительно упростить и повысить точность обработки информации в информационно-измерительной технике, особенно при логометрических операциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ теоретических основ пирометрии, из которого следует, что основная погрешность пирометра – методическая – определяется нестабильностью коэффициента излучательной способности материала, который зависит от температуры, длины волны, материала и состояния поверхности. Точное значение коэффициента излучения практически невозможно определить. На основании анализа была сформулирована цель исследования, а именно: исследовать и разработать методы и средства измерения температуры с минимальным влиянием на точность измерения нестабильности коэффициента излучения.

2. Из проведенного анализа устройств и схем оптико-электронных приборов измерения температуры следует, что существует большое количество разработок пирометров, но практически все они решают задачи аналоговой обработки информации. Аналоговые измерительные устройства являются источником инструментальной погрешности. Поэтому на основе анализа сформулирована цель работы: исследовать и разработать цифровую схему обработки информации с минимальной инструментальной погрешностью.

3. Из проведенного исследования следует, что относительная погрешность расчета потока излучения нагретого тела при использовании среднего КИ в диапазоне длины волны от 1,14мкм до 3,5мкм в сравнении с точным расчетом потока излучения составляет 0,31 – 10,84%, а приведение реального объекта к псевдосерому объекту позволяет значительно упростить расчет, поскольку под интегралом остается только аналитическая функция Планка.

4. На основе предложенной методики определения интегрального коэффициента излучения по образцу материала разработан энергетический пирометр. Экспериментальное исследования выявило, что погрешность для железа составила 1%, а погрешность определения температуры с помощью табличных данных составляет 6,57%. Кроме того, в этом случае отпадает

необходимость учитывать спектральные характеристики оптики и приемника излучения [56].

5. Использование аппроксимации спектральных характеристик оптических и оптико-электронных элементов трапецеидальными характеристиками, позволяет использовать математический аппарат нечеткой логики и значительно ускорить расчет оптического КПД и, соответственно, проектирование с помощью морфологического синтеза оптико-электронных приборов.

6. Цифровой пирометр спектрального отношения, разработанный на основе принципа двухтактного интегрирования, выполняет функции трех основных блоков: двух АЦП и логометрического преобразователя; имеет хорошую защиту от сетевых помех, что позволяет улучшить его метрологические характеристики, поскольку сокращено число АЦП с трех до одного, и значительно повысить отношение сигнал/шум [80].

7. Поскольку принцип двухтактного интегрирования обладает свойствами инвариантности к изменению параметров основных элементов АЦП, погрешности которых имеют мультипликативный характер, что снижает требования к выбору элементов и соответственно стоимость готового изделия. Такие АЦП имеют высокую точность преобразования и сравнительно низкую цену.

8. Цифровой пирометр спектрального отношения при некоторой модернизации позволяет выполнять дополнительную функцию – линеаризацию статической характеристики пирометра за счет введения нелинейной развертки, параметры которой вычисляются по приведенной методике. Таким образом, цифровой пирометр спектрального отношения обладает широкими функциональными возможностями.

9. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы о том, что градуировка радиационного пирометра по

эталонному образцу, идентичному измеряемому объекту, и использование одного пирометра для градуировки и измерения позволяет значительно повысить точность измерения, при этом погрешность составляет менее 1% [83].

10. Из исследования влияния погрешностей основных элементов преобразователя с двухтактным интегрированием и внешних помех на точность определения отношения двух сигналов следует, что эта погрешность минимальна и составляет менее 0,5 %, что вполне удовлетворяет пирометрии высокотемпературных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латыев Л. Н., Петров В. А., Чеховской В. Я., Шестаков Е. И. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974.
2. Инфракрасная термография. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 766.
3. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. - М.: Физматлит, 2012. - 248с. – ISBN: 978-5-9221-1385-4.
4. Zhang Z. M., Mashin G. Overview of Radiation Thermometry // Radiometric temperature measurements. I. Fundamentals / Ed. by Z. M. Zhang, B. K. Tsai, G. Mashin. Experimental Methods in the Physical Sciences. V. 42. — Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 14.
5. Hollandt J., Hartmann J., Struß O., Gartner R. ¨ Industrial Applications of Radiation Thermometry // Radiometric temperature measurements. II. Applications / Ed. by Z. M. Zhang, B. K. Tsai, G. Mashin. Experimental Methods in the Physical Sciences. V. 43. — Amsterdam: Elsevier, 2010. P. 15.
6. Температурные измерения. Справочник / Под ред. О. А. Геращенко. – Киев: Наукова думка, 1989. С. 447.
7. Childs P. R. N., Greenwood J. R., Long C. A. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71, № 8. P. 2959.
8. Schaffer C. B. Interaction of femtosecond laser pulses with transparent materials. PhD Thesis. Harvard Univ, 2001.
9. Челядинский А. Р., Комаров Ф. Ф. // УФН. 2003. Т. 173, № 8. С. 813.
10. Chen G., Borca-Tasciuc T., Fair R. B. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82, № 2. P. 830.
11. Ранцевич В. Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения. - Минск: Наука и техника, 1989.
12. Царькова О. Г. // Тр. ИОФАН. Т. 60. — М.: Наука, 2004. С. 30.

13. Microwave Processing of Materials. – Washington, D. C.: Nat. Acad. Press, 1994.
14. Дукарский С. М. Термометрия продуктов доменной плавки. — М.: Металлургия, 1976 (ссылка из: Температурные измерения. Справочник / Под ред. О. А. Геращенко. — Киев: Наукова думка, 1989. С. 377.
15. Температурные измерения. Справочник / Под ред. О. А. Геращенко. - Киев: Наукова думка, 1989. С. 447.
16. Беленький А. М., Бердышев В. Ф. // Тез. I Всеросс. конф. «Температура-2001». — Подольск, 2001. С. 15.
17. Таиров Ю. М., Цветков В. Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. Учебник для вузов. — СПб.: Изд. «Лань», 2002. С. 135.
18. Huang X., Taishi T., Wang T., Hoshikawa K. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 229. P. 6.
19. Zhou Y. H., Shen Y. J., Zhang Z. M. et al. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2002. V. 45. P. 1945.
20. Anderson R. L. // Proc.SPIE. 1990. V. 1392. P. 437.
21. Андреев А. А., Саблев Л. Л., Григорьев С. Н. Вакуумно-плазменные покрытия. Харьков: НТЦ ХФТИ, 2010. С. 315.
22. Термическая обработка в машиностроении. Справочник / Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. — М.: Машиностроение, 1980. С. 438.
23. Fox N. P., Martin J. E., Nettelson D. H. // Metrologia. 1991. V. 28, № 5. P. 357.
24. Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Костановский А. В. // УФН. 2002. Т. 172, № 8. С. 931.
25. Савватимский А. И. // УФН. 2003. Т. 173, № 12. С. 1371.
26. Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Костановский А. В. // УФН. 2003. Т. 173, № 12. С. 1380.
27. Savvatimskiy A. I. // Carbon. 2005. V. 43. P. 1115.

28. Benedetti L. R., Guignot N., Farber D. L. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101, № 1. 013109.
29. Lum R. M., McDonald M. L., Mack E. M. et al. // J. Electron Mater. 1995. V. 24, № 11. P. 1577.
30. Hoffman R. W., Ramer J., Li S. M. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. Pt.1. V. 41, № 2B. P. 996.
31. Шилин А.Н. Автоматизация проектирования развертывающих измерительных преобразователей / А.Н. Шилин, А.В. Емельянов // Приборы. - 2004. - №4. - С. 22-26.
32. Олейник Б. Н., Лаздина С. И., Лаздин В. П., Жагулло О. М. Приборы и методы температурных измерений. — М.: Изд. стандартов, 1987. С. 281.
33. Александров С. Е., Гаврилов Г. А., Капралов А. А. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74, № 1. С. 123.
34. Lin J.-F., Sturhahn W., Zhao J. et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L14611.
35. Shpak M., Sainiemi L., Ojanen M. et al. // Appl. Opt. 2010. V. 49, № 9. P. 1489.
36. Плясова Л. М., Аверьянов В. В., Паукштис Е. А. и др. // Кинетика и катализ. 2005. Т. 46, № 2. С. 302.
37. Чистофорова, Н.В. Технические измерения и приборы. Часть 1. Измерение теплоэнергетических параметров: Учебное пособие для студентов дневной и заочной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств»/ Н.В. Чистофорова, А.Г.Колмогоров. – Ангарск, АГТА, 2008. – 200 с.
38. Салихов, З.Г. Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического примене- Монография / З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев, ния: А.П. Щетинин, Т.Е. Троицкий-Марков и Е.В. Абрамова, М.: Ид МИСиС, 2008, - 476 с.
39. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.

40. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: справочник /под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.:Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
41. Лыков А. В. Тепломассообмен: справочник. М.:Энергия, 1978. 480 с.
42. Шилин А.Н. Оптико-электронный прибор для измерения температуры нагретых изделий / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, Кузнецова Н. С // Контроль. Диагностика. - 2021. - Т. 24, № 8. - С. 36-42.
43. Мак, Б.В. Пирометр для измерения температуры нагретых деталей / Б.В. Мак // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 184-185.
44. Мак, Б.В. Оптико-электронный прибор для измерения коэффициента излучения и температуры контролируемого объекта / Б.В. Мак // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. - 2021. - № 2 (35). - С. 48-53.
45. Шилин, А.Н. Радиационный пирометр для измерения коэффициента излучения и температуры нагретых деталей / А.Н. Шилин, Б.В. Мак // Прикладная оптика – 2022 : сб. тез. XV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 15-16 декабря 2022 г.) / НПО «Гос. оптический институт им. С. И. Вавилова», Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН [и др.]. - Санкт-Петербург, 2023. - С. 204.
46. Поскачей А. А., Чубаров Е. П. Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
47. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. — М.: Мир, 1988. — 416 с, ил.
48. Гарелина, С.А. Анализ энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения / С.А. Гарелина, К.П. Латышенко, А.В. Фрунзе // Сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции. г. Железногорск, 2017 г. - - С. 78 -81.

49. Гарелина, С.А. Обзор и анализ погрешностей пирометров / С.А. Гарелина, К.П. Латышенко, А.В. Фрунзе // Сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции. г. Железногорск, 2017 г. -- С. 74 -77.
50. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 200 с.
51. Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В., Есенжолов У.С., Калиаскаров Н.Б. «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики» https://www.energyret.ru/jour, [Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя для сельских районов], Т.22, №5, 2020.
52. N. Boone, C. Zhu, C. Smith, I. Todd, and J. R. Willmott, “Thermal near infrared monitoring system for electron beam melting with emissivity tracking,” Addit. Manuf. 22, 601–605 (2018).
53. Xue-yan Han,Ke-wei Huan,Shan-ju Sheng, “Performance evaluation and optimization design of photoelectric pyrometer detection optical system” Defence Technology, Volume 16, Issue 2, April 2020, Pages 401-407.
54. Matthew J. Hobbs, Chengxi Zhu, Matthew P. Grainger, Chee Hing Tan, and Jon R. Willmott, "Quantitative traceable temperature measurement using novel thermal imaging camera," Opt. Express 26, 24904-24916 (2018).
55. Fu, Y.; Cao, J.C.; Yamanouchi, K.; Xu, H.L. Air-laser-based standoff coherent Raman spectrometer. Ultrafast Sci. 2022, 2022, 9867028.
56. Шилин А. Н., Мак Б. В., Коптелова И. А. Анализ методики использования интегрального коэффициента излучения в энергетических пирометрах // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 9. С.42-48.
57. Мак, Б.В. Анализ методики использования интегрального коэффициента излучения в радиационных пирометрах / Б.В. Мак // AdvancesinScienceandTechnology : сб. ст. LV междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 сентября 2023 г.) / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». - Москва, 2023. - С. 43-45.

58. Нгуен, В.Н. Оптико-электронная система определяет коэффициент излучения и температуру нагретых изделий / В.Н. Нгуен, Б.В. Мак, Т.А.Н. Ха // Инновационное развитие: ключевые проблемы и направления их решения : сб. ст. по итогам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.) / отв. ред.: А. А. Сукиасян ; Агентство международных исследований. - Стерлитамак, 2023. - С. 80-83.
59. Мак, Б.В. Способ определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом / Б.В. Мак, Д.А. Зиновьев // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября - 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 165-166.
60. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 175 с.
61. Коптелова, И.А. Использование уравнений совместимости элементов в методике морфологического синтеза оптико-электронных приборов / А. Н. Шилин, И. А. Коптелова, М. В. Гиркин // Изв. ВолгГТУ. Серия "Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь". Вып. 3 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2009. - № 3. - С. 64-69.
62. Гарелина С. А., Латышенко К. П., Фрунзе А. В. Обзор и анализ погрешностей пирометров // Сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции. г. Железногорск, 2017 г. – С. 74 – 77.
63. Русин С. П., Определение температуры непрозрачных материалов по спектру теплового излучения: Компьютерное моделирование. М.: ЛЕНАНД, 2021. – 160 с.
64. Ишанин. Г. Г., Челибанов В. П. Приемники оптического излучения: Учебник / Под ред. профессора В. В. Коротаева. - СПб.: Изд-во «Лань», 2021. - 304 с. : ил.

65. Vangaever S, Reyniers PA, Symoens SH, Ristic ND, Djokic MR, Van Geem KM, Marin GB, Pyrometer-based control of a steam cracking furnace, Chemical Engineering Research and Design (2019), doi: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.02
66. Akamine S. Development of thermal insulating material with low emissivity and high-temperature stability. Int J Appl Ceram Technol. 2019;00:1–9. https://doi.org/10.1111/ijac.13369
67. Xiao, Y., Wan, C., Shahsafi, A., Salman, J., Yu, Z., Wambold, R., … Kats, M. A. (2020). Precision Measurements of Temperature-Dependent and Nonequilibrium Thermal Emitters. Laser & Photonics Reviews, 1900443. doi:10.1002/lpor.201900443
68. Захаренко В. А., Веприкова Я. Р., Кропачев Д. Ю. Пирометр для измерения температуры расплавов // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 114–118. DOI: 10.25206/1813- 8225-2018-160-114-118.
69. Пронин В.В. Низкотемпературные миры для настройки тепловизионных систем. // Оптический журнал. – 2021. – Т.88. – № 7. – С.65-69
70. Pavlov N.I., Rezunkov Yu.A. Influence of laser interference on the detection capabilities of an infrared optoelectronic surveillance system. // Journ. Opt. Technol. - 2021. - V.88. - № 1. - P.25-29
71. Павлов Н.И., Резунков Ю.А. Влияние лазерной помехи на обнаружительные возможности инфракрасной оптико-электронной системы наблюдения. // Оптический журнал. - 2021. - Т. 88. - № 1. - С.37-43
72. Вензель В.И., Семенов А.А., Мигель Л.И. Установка для контроля оптической однородности материалов для инфракрасной области спектра. // Контенант. – 2021. – Т.3. – № 2. – С.12-25 (электронный научно-техн.журнал: contenant.ru)
73. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
74. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения / Учебное пособие для вузов – СПб: Папирус, 2003. – 527 с.

75. Коптелова, И.А. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / А. Н. Шилин, И. А. Коптелова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2003. - № 3. - С. 51-61.
76. Долматов, А. В. Методы контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза (обзор) // Вестник Югорского государственного университета, 2020 г. Выпуск 2 (57). С. 7–18, DOI: 10.17816/byusu20200207-18.
77. Ишанин Г.Г. Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов/Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Полыциков. — СПб.: Политехника, 1991.— 240 с.: ил. - ISBN 5-7325-0164-9.
78. Нгуен, В.Н. Повышение быстродействия вычислений коэффициента полезного действия приемника излучения методом трапециевидной аппроксимации / В.Н. Нгуен, Б.В. Мак, Т.А.Н. Ха // Инновационное развитие: ключевые проблемы и направления их решения : сб. ст. по итогам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.) / отв. ред.: А. А. Сукиасян ; Агентство международных исследований. - Стерлитамак, 2023. - С. 77-80.
79. Мак, Б.В. Определение коэффициента полезного действия приемники методом трапециевидной аппроксимации / Б.В. Мак // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября - 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 171-172.
80. Шилин А.Н. Цифровой пирометр спектрального отношения / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, И.А. Коптелова // Контроль. Диагностика. - 2022. - Т. 25, № 3. - С. 52-57.
81. Мак, Б.В. Цифровой пирометр спектрального отношения для измерения температуры нагретых деталей / Б.В. Мак // XXVII Региональная

конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 230-231.

82. Мак, Б.В. Цифровой пирометр спектрального отношения для измерения температуры твердых материалов / Б.В. Мак // AdvancesinScienceandTechnology : сб. ст. LV междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 сентября 2023 г.) / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». - Москва, 2023. - С. 41-42.

83. Шилин, А.Н. Оптико-электронные системы контроля геометрических параметров оболочек вращения в процессе их формообразования: автореферат дис. ... доктора техн. наук : 05.11.07/ Шилин Александр Николаевич. – Санкт-Петербург, 2003. – 48 с.

84. Масюренко Ю.А. Логометрические преобразователи с автоматической коррекцией погрешностей. - М.:Энергоатомиздат, 1983. - 88 с.

85. Шахов Э.К., Михотин В.Д. Интегрирующие преобразователи напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 144 с.

86. Шилин А.Н. Проектирование оптико-электронных устройств контроля с двухтактным интегрированием // Контроль. Диагностика. – 2000. -№ 7. – С. 8-13.

87. Шилин А.Н. Проектирование адаптивных оптико-электронных устройств контроля процессов формообразования крупногабаритных нагретых деталей // Контроль. Диагностика. – 2001. -№ 7. – С. 14-20.

88. Гонжал, М.И. Фотометрические измерительные преобразователи с улучшенными метрологическими характеристиками: дис. ...канд. техн. наук: 05.11.16 / Гонжал Михаил Игоревич. – Волгоград, 2008. – 164 с.

89. П. м. 216059 Российская Федерация, МПК G01J 5/08 Цифровой пирометр спектрального отношения / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, И.А. Коптелова, Р.Г. Атаманюк; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2023.

90. Шилин, А.Н. Оптико-электронные системы контроля геометрических параметров оболочек вращения в процессе их формообразования: дис.

...доктора техн. наук : 05.11.07 / Шилин, Александр Николаевич. – Волгоград, 2003. – 437 с.

91. Емельянов, А.В. Синтез развертывающих преобразователей оптико-электронных измерительных систем: дис. ...канд. техн. наук: 05.11.16 / Емельянов Алексей Викторович. – Волгоград, 2005. – 178 с.

92. Миронов Э. Г. Метрология и технические измерения: учеб. пособие / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – МКНОРУС, 2016. – 422с. ISBN 978-5-406-04843-6.

93. Исследование АЦП двухтактного интегрирования: Методические указания к лабораторной работе/ Емельянов А.В., Шилин А.Н.: Метод. Указ. / ВолгГТУ – Волгоград, 2003. – 22 с.

94. Меркулов Ю.Ю., Добряков Б.Н., Солк С.В., Сильников Н.М. (АО "НПО Спецматериалов"). Зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол класса защиты 3хл от времени эксплуатации в ближайшем инфракрасном диапазоне. // Вопросы оборонной техники. Сер.16. – 2022. – Вып.1-2 (157-158). – С.133-138

95. Sirazetdinov V.S., Dmitriev I.Yu., Linsky P.M., Nikitin N.V. Increasing the measurement accuracy for wave aberrations of an optical system optical using the intensity distribution of a focused light beam // Journ. Opt. Technol. – 2022. – V.89. – № 4. – P.197-204

96. Фрунзе, А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения / А.В. Фрунзе // Фотоника – 2009. – № 4 – С. 32 – 37.

97. Латышенко, К. И. Измерение температуры пирометрами: учебное пособие / К. И. Латышенко, А. В. Фрунзе. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. 248 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-0880-6

98. Wang W, Lin J, Zhong W, Zhang B, Xu C and Ding H 2018 Analysis of infrared temperature measurement for flu gas shielding metal surface using source multi-flux method Thermal science 22 313-321

99. Mendeleev V, Petrov V, Yashin A, Vangonen A and Taganov O 2020 Application of a pyrometer and standard sample to determine the surface temperature of materials under study Measurement Techniques 12 1029-34
100. Бойко Е.А., Загородний И.В., «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики»https://www.energyret.ru/jour, – [Комплексное исследование интенсивностишлакования поверхностей нагрева котлоагрегата при сжиганиинепроектныхтоплив], Т.22, № 6, 2020.
101. Ахиезер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. - М.: Наука, 1965. - 407с.
102. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
103. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. -М.: Металлургия, 1978. -200 с.
104. Бессонов А.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. -М.: Высшая школа, 1978. - 528 с.
105. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1976. - 208 с.
106. Шилин А. Н., Заярный В. П., Емельянов А. В., Черных Д. А. Приборы и устройства измерения электрических и магнитных вели- чин : учеб. пособие / А. Н. Шилин, В. П. Заярный, А. В. Емельянов, Д. А. Черных. - Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. - 104с. ISBN 978-5-9948-0497-1

Приложение А

Патент №216059

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 216059

Цифровой пирометр спектрального отношения

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волгоградский государственный технический университет" (ВолгГТУ) (RU)***

Авторы: ***Шилин Александр Николаевич (RU), Мак Ван Биен (RU), Коптелова Ирина Александровна (RU), Атаманюк Рамез Ганиевич (RU)***

Заявка № **2022117482**

Приоритет полезной модели **28 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **16 января 2023 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **28 июня 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение Б

КОМПАНИЯ С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕСТВЕННОСТЮ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
(University of Industrial Technology Limited Liability Company)

Адрес: Комната 303, 3-й этаж, главный офис Технологического и промышленного университета, округ Тич Луонг, город Тай Нгуен, провинция Тай Нгуен, Вьетнам
(Address: Room 303, 3rd floor, Headquarters of Industrial Technology University, Tich Luong Ward, Thai Nguyen City, Thai Nguyen Province, Vietnam)
Тел./Tel.: (+84) 280-384-70-14; Факс / Fax: 02803847014; Налоговый кодекс: 4600351529

«10» мая 2023 г.

АКТ

О внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы

Мак Ван Биена

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования Мак Ван Биена «Оптико-электронная система контроля температуры твердых материалов с автоматической коррекцией методической погрешности» были применены к компание Университет Промышленной Технологии Co., Ltd. для контроля температуры твердых материалов при механической обработке, производство металлоконструкций, металлообработке и металлическое покрытие, в цепочке многопереходной механической обработки, которые способствуют более точному проектированию маршрута обработки детали. Полученные результаты вполне адекватны для практического использования предложенных подходов.

Директор _____ Дао Танх

CÔNG TY TNHH ĐẠI HỌC KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP

GIÁM ĐỐC
Đào Thanh

Приложение В

THD

КОМПАНИЯ С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕСТВЕННОСТЮ THD МЕХАНИЧЕСКИЙ ХОАНГ ВЫОНГ
(THD Mechanical Hoang Vuong Limited Liability Company)

Адрес: Деревня Сон Тиен, коммуна Куйет Тханг, город Тай Нгуен, провинция Тай Нгуен, Вьетнам
(Address: Son Tien Hamlet, Quyet Thang Commune, Thai Nguyen City, Thai Nguyen Province, Vietnam)
Тел./Tel.: (+84) 983846806; Налоговый кодекс / Tax code: 4601598092

«20» апреля 2023 г.

АКТ

О внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы Мак Ван Биена

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования Мак Ван Биена «Оптико-электронная система контроля температуры твердых материалов с автоматической коррекцией методической погрешности» были применены к компание THD Co., Ltd. для контроля температуры твердых материалов при механической обработке, производстве шариков и шестерен, металлообработке и металлическое покрытие, в цепочке многопереходной механической обработки, которые способствуют более точному проектированию маршрута обработки детали. Полученные результаты вполне адекватны для практического использования предложенных подходов.

Директор Хоанг Ван Чыонг

CÔNG TY TNHH THD CƠ KHÍ HOÀNG VƯƠNG

GIÁM ĐỐC
Hoàng Văn Chương

Приложение Г

DH

КОМПАНИЯ С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕСТВЕННОСТЮ
МЕХАНИЧЕСКИЙ И ТОРГОВЫЙ ЗУЙ ХАИ
(Duy Hai Mechanical and Trading Limited Liability Company)
Адрес: Группа 13, округ Тан Лап, город Тай Нгуен, провинция Тай Нгуен, Вьетнам
(Address: Group 13, Tan Lap Ward, Thai Nguyen City, Thai Nguyen Province, Vietnam)
Тел./Tel.: (+84) 98 219 3588; Налоговый кодекс / Tax code: 4601599924

«10» июня 2023 г.

АКТ

О внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы

Мак Ван Биена

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования Мак Ван Биена «Оптико-электронная система контроля температуры твердых материалов с автоматической коррекцией методической погрешности» были применены к компание Зуй Хаи Co., Ltd. для контроля температуры твердых материалов при механической обработке, ковка, штамповка, прессование и прокат металла; плавка металлического порошка, металлообработке и металлическое покрытие, которые способствуют более точному проектированию маршрута обработки детали. Полученные результаты вполне адекватны для практического использования предложенных подходов.

Директор _____ Лыу Куанг Туйен

CÔNG TY TNHH CƠ KHÍ VÀ THƯƠNG MẠI DUY HẢI
M.S.D.N: 4601599924 TP. THÁI NGUYÊN T. THÁI NGUYÊN

GIÁM ĐỐC
Lưu Quang Tuyến