

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского  
отделения Российской академии наук и Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования Национальный  
исследовательский Томский государственный университет

На правах рукописи



Выборнов Павел Викторович

**НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  ДЛЯ ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы  
и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д. ф.-м. н., Андреев Ю. М.

Томск - 2017

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Обзор неохлаждаемых металлических болометров</b> .....	9
1.1. История тепловых приемников излучения.....	11
1.2. Характеристики неохлаждаемых металлических болометров.....	13
1.3. Конструкции и области применения неохлаждаемых болометров .....	16
<b>Глава 2. Научно-техническое обоснование выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров.....</b>	<b>21</b>
2.1. Методика оценки эффективности неохлаждаемых болометров на основе металлов и их сплавов.....	22
2.2. Сравнительные исследования характеристик металлических резистивных элементов .....	29
2.3. Разработка и исследование неохлаждаемых болометров на основе Ni, Ti и сплава $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ .....	49
<b>Глава 3. Теоретические и экспериментальные исследования неохлаждаемых металлических болометров в составе оптико-электронных приборов.....</b>	<b>63</b>
3.1. Измеритель средней мощности оптического излучения .....	64
3.2. Оптический абсорбционный газоанализатор .....	71
3.3. Измеритель суммарной солнечной радиации .....	75
<b>Глава 4. Разработка специализированной системы управления на базе микроконтроллера</b> .....	<b>83</b>
4.1. Общая характеристика микроконтроллеров .....	83
4.2. Задачи системы управления и выбор микроконтроллера.....	86
4.3. Разработка программного обеспечения микроконтроллера.....	96
4.4. Разработка программного обеспечения для ЭВМ .....	108
<b>Заключение</b> .....	<b>118</b>
<b>Список используемой литературы</b> .....	<b>121</b>
<b>Приложение А</b> .....	<b>131</b>
<b>Приложение Б</b> .....	<b>132</b>

## Введение

### **Актуальность работы.**

Неохлаждаемыми детекторами длинноволновой области спектра преимущественно являются тепловые приемники излучения. Наибольшее распространение из них, в силу высокой чувствительности, получили полупроводниковые болометры. Вместе с тем, разработка недорогих приемников излучения с высокими эксплуатационными характеристиками для применения в опорных каналах систем прикладной оптики и устройствах рутинного применения представляет большой практический интерес. На роль таких детекторов могут претендовать неохлаждаемые металлические болометры, при условии разработки новых технических решений увеличения их чувствительности. В отличие от полупроводниковых, металлические болометры характеризуются высокой технологичностью, низким уровнем шумов, простотой конструкции и невысокими производственными затратами. Их активные элементы имеют высокие физико-химические свойства, демонстрируют высокую стабильность параметров и лучевую стойкость, способны работать в условиях высоких (до сотен градусов Цельсия) температур, а быстродействие может составлять единицы наносекунд. Ключевые характеристики неохлаждаемых металлических болометров определяются свойствами используемого металла, размером и конструкцией резистивного элемента. Количество технологически применимых металлов ограничено, а их свойства предопределены природой, что, казалось бы, облегчает выбор оптимальных материалов резистивных элементов. На сегодняшний день критерием такого выбора считается высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) металла и низкая теплопроводность элемента в целом. В то же время результаты научных работ показывают, что значения теплопроводности металлических резистивных элементов различной конструкции, полученные экспериментально, могуткратно отличаться от расчетных данных с использованием справочных источников.

Поэтому провести модельную оценку эффективности неохлаждаемых болометров на основе того или иного металла, согласно существующим методикам, крайне затруднительно. Тем не менее, вопрос выбора эффективных материалов резистивных элементов, к числу которых относят Ti, Pt, Nb и Ni, считается решенным.

В настоящее время улучшение ключевых характеристик неохлаждаемых металлических болометров осуществляется, в основном, за счет уменьшения размера и толщины резистивных элементов и оптимизации их конструктивного исполнения. Данный подход не только увеличивает производственные затраты, но и практически достиг физических и технологических пределов. Поэтому разработка новых способов дальнейшего повышения чувствительности неохлаждаемых болометров на основе металлов является актуальной задачей, реализация которой позволит увеличить их конкурентные преимущества перед аналогами на основе полупроводниковых материалов.

**Цели и задачи диссертационной работы.** Цель работы заключается в разработке нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров и оценки возможности их использования в составе оптико-электронных измерительных систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзорный анализ неохлаждаемых металлических болометров.
2. Оценка эффективности использования металлов и их сплавов в качестве материалов резистивных элементов неохлаждаемых болометров.
3. Разработка и экспериментальное исследование макетов неохлаждаемых болометров с резистивными элементами из металлов и их сплавов.
4. Проведение модельных и экспериментальных исследований по оценке возможности применения неохлаждаемых металлических болометров в составе измерителей средней мощности излучения, оптических абсорбционных газоанализаторов и актинометрических приборов.
5. Разработка системы автоматизации процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров с оперативной сменой временных параметров сбора данных.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложен новый критерий выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения их пороговых чувствительностей.
2. Разработана новая методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из разных металлов.
3. Предложено и экспериментально проверено новое техническое решение увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров путем использования сплава никелида титана в качестве материала резистивных элементов.
4. Предложен способ измерения мощности лазерного излучения неохлаждаемым болометром на основе сплавов никелида титана и показана практическая возможность его реализации (Патент РФ № 2345334).
5. Показана возможность создания анализатора фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере с использованием в качестве УФ детектора потенциального болометра из сплава  $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$  (Патент РФ № 2421709).
6. Предложен актинометрический приемник болометрического типа и создан макет пиранометра на его основе, обладающий лучшими техническими параметрами в сравнении с аналогичным прибором, рекомендованным службой Росгидромет (Патент РФ № 2469282).
7. Разработаны и реализованы в виде программного обеспечения алгоритмы работы системы управления, осуществляющей автоматизацию процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров (Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ РФ № 2007610893, № 2007610894 и № 2007611346).

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм оценки эффективности неохлаждаемых металлических болометров, который может быть использован для выбора материалов резистивных элементов с целью создания на их основе болометров нового поколения.

2. Разработан макет неохлаждаемого болометра на основе сплава  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  с минимальной пороговой чувствительностью  $175 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$  на частоте модуляции регистрируемого излучения 1 Гц и приемной апертурой  $1,6 \text{ мм}^2$ , который может быть использован в качестве простого и недорогого широкополосного приемника излучения в составе оптико-электронных приборов различного назначения.
3. Разработана автоматизированная система управления, которая может быть использована в устройствах различного назначения для последовательного управления и контроля отдельными электронными узлами с возможностью оперативной смены их временных параметров и режимов работы.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из разных металлов и их сплавов, основанная на сопоставлении температурного коэффициента сопротивления, удельной теплоемкости, удельного электросопротивления и плотности материалов резистивных элементов при равенстве их размеров и коэффициентов поглощения, токов смещения и температуры окружающей среды, позволяющая провести выбор наиболее эффективного материала.
2. Использование  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  в качестве материала резистивного элемента неохлаждаемого болометра сопротивлением менее 10 Ом в сравнении с самыми эффективными металлами Zr и Ti позволяет увеличить чувствительность в 2,1 и 2,4 раза соответственно, при прочих равных условиях за счет наилучшей совокупности электрофизических характеристик сплава.
3. Макет пиранометра на основе неохлаждаемого  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  болометра, позволяющий уменьшить предел обнаружения и время измерения суммарной солнечной радиации в 5 раз, в сравнении с аналогичными характеристиками пиранометра СРМ-11, рекомендованного службой Росгидромет.

Все защищаемые положения соответствуют п. 2 в части п. 6 паспорта специальности 05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались теоретические, экспериментальные и сравнительные методы исследования, применялась статистическая обработка прямых и косвенных измерений.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается использованием апробированных исследовательских процедур, хорошим согласованием теоретических оценок с результатами экспериментов и положительными заключениями экспертиз о патентоспособности предложенных научных идей и их технических решений.

**Личный вклад.** Личный вклад автора заключается в разработке методики оценки эффективности неохлаждаемых металлических болометров и нового технического решения увеличения их чувствительности. Автором проведены экспериментальные исследования разработанных болометров и оценка возможности их использования в составе измерителя мощности оптического излучения, пиранометре и анализаторе паров ртути в открытой атмосфере, самостоятельно обработаны результаты измерений. Автор также участвовал в постановке цели и задачи исследования, интерпретации полученных данных и формулировании выводов совместно с научным руководителем. Совместно с В. Я. Ерофеевым изготовлены резистивные элементы, со студентом ТУСУР Терликбаевым Р. А. разработано системное программное обеспечение.

**Реализация и внедрение результатов исследований.** Результаты работы использованы при разработке и создании спектрометра среднего ИК и терагерцового диапазона, входящего в состав лазерного исследовательского стенда лаборатории новых материалов и перспективных технологий Сибирского физико-технического института им. акад. В. Д. Кузнецова, в рамках государственного контракта ВИУ 8.1.51.2015 «Разработка комплексной системы определения состава и свойств различных объектов и сред» (2015-2016).

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы рассматривались на международных и всероссийских научных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2005» (Томск, 2005); Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2009); IV Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение,

технологии и экология в 3-м тысячелетии» (Томск, 2009); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2010» (Томск, 2010; получен диплом I степени за лучший доклад на секции «Информационно-измерительные приборы и устройства»); II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2011); X International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2011); VIII Всероссийский симпозиум «Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012» (Томск, 2012); XI International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2013); XII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2015).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы 2 статьи в российских журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в зарубежных журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science, 9 работ в сборниках трудов научных конференций российского и международного уровня, получены 3 патента РФ на изобретение, 3 авторских свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и 2 приложений. Работа изложена на 132 страницах, включает 20 таблиц, 42 рисунка и список библиографических источников из 105 наименований.

## **Глава 1. Обзор неохлаждаемых металлических болометров**

На сегодняшний день существуют различные типы болометров. Они отличаются материалом резистивного элемента (металл или полупроводник) и работают как при температуре окружающей среды, так и в условиях охлаждения, вплоть до температур сверхпроводимости [1]. Для болометров, работающих при низких и сверхнизких температурах, в том числе металлических, характерны предельные низкие уровни пороговой чувствительности и шумов, высокое быстродействие, а также сложное конструктивное исполнение и дороговизна [2, 3]. Их используют преимущественно для детектирования космического излучения и научных исследований. Неохлаждаемые болометры получили большее распространение и применяются, в основном, для решения задач гражданского и специального назначения, таких как детектирование скрытых объектов и опасных веществ, мониторинг атмосферы, тепловидение с повышенным температурным контрастом и др. [4]. Преимущественно их используют в ИК и терагерцовой области спектра.

Длинноволновый диапазон оптического излучения является уникальной спектральной областью. В среднем ИК диапазоне расположены основные окна прозрачности атмосферы (3-5 мкм, 8-12 мкм и др.), имеются изолированные линии и хорошо разрешенные структуры в спектрах поглощения атмосферных и загрязняющих газов, а также паров токсичных веществ. В этом диапазоне работает большое количество коммерческих источников излучения с широким набором выходных характеристик. Кроме того, в отличие от более коротковолнового, излучение среднего ИК диапазона в меньшей степени подвержено ослаблению атмосферными аэрозолями естественного и искусственного происхождения через рассеяние. Это обстоятельство даёт возможность определения содержания газового состава атмосферы и выявления экологически опасных ситуаций, в том числе дистанционными способами. В последнее время интенсивно осваивается дальняя ИК область спектра 30-1000

мкм (0,33-10 ТГц), представляющая особый интерес в силу высокой проникающей способности в непроводящие среды и неполярные жидкости, безопасности для живой природы из-за малой энергии квантов излучения и наличия хорошо спектрально разрешенных вращательных спектров поглощения газов и паров. Эти особенности, в частности, дают возможность изучения биологических объектов *in vivo*, производить поиск опасных скрытых в одежде пластмассовых и деревянных упаковках веществ и предметов. Относительно небольшая длина волны дальнего ИК излучения способствует разработке систем изображения с высоким пространственным разрешением, в сравнении с системами радарного типа. В связи с этим спектроскопия в дальнем ИК диапазоне становится важным инструментом исследований в области молекулярной биологии, электрофизики и медицины. Большие успехи, достигнутые в создании источников дальнего ИК излучения различными методами, способствуют созданию соответствующих прикладных устройств. Вместе с тем прогресс в создании детекторов дальнего ИК излучения остается менее значимым и с точки зрения фундаментальных исследований и прикладных применений представляет большой интерес. В последнее время развитие неохлаждаемых и охлаждаемых до криогенных температур детекторов этого диапазона с предельно низким порогом регистрируемых сигналов идет с большим успехом. По сравнению с этим создание высокотехнологичных неохлаждаемых детекторов с высокими эксплуатационными характеристиками и низкими производственными затратами для применения в опорных каналах оптических и оптико-электронных приборов и систем прикладной спектроскопии и устройствах рутинного применения идет менее успешно. При этом современными неохлаждаемыми детекторами длинноволнового диапазона, за исключением пороговых, являются, главным образом, тепловые приемники на основе полупроводниковых или металлических чувствительных элементов.

## 1.1. История тепловых приемников излучения

История создания тепловых приемников, к которым относятся болометры, берет свое начало с открытия ИК излучения Уильямом Гершелем в 1800 году [5]. В течение последующих трех десятилетий было установлено, что ИК излучение подчиняется простейшим законам оптики. Медленные темпы исследования данной области спектра были вызваны отсутствием чувствительных детекторов с высоким разрешением, эксперименты проводились с помощью обычных термометров. В 1821 году Томасом Зеебаком было обнаружено, что в замкнутой цепи из двух последовательно соединенных разнородных проводников, при разности температур их точки контакта и выводов, протекает небольшой электрический ток. опыты Зеебека сводились к следующему: он использовал два разнородных материала в виде проволоки или стержней из висмута или сурьмы и меди, приводил их в контакт и нагревал с одной стороны. В результате Зеебек наблюдал возникновение магнитного поля, которое фиксировалось по отклонению магнитной стрелки. Из этого опыта Зеебек сделал вывод, что «разность температур в местах соприкосновения металлической цепи является источником освобождающегося магнетизма, причиной магнитных действий». При этом величина и направление действия на магнитную стрелку зависели от степени нагрева и от материала, из которого был сделан исследуемый контур. Зеебек назвал этот эффект термомагнетизмом. В 1823 г. Ханс Кристиан Эрстед на заседании Французской академии наук сделал доклад, начиная его словами «Я имею честь продемонстрировать ассамблее замечательные опыты, благодаря которым Зеебек доказал, что можно получить электрический ток в цепи, сформированной исключительно из твердых проводников, нарушая только равновесие температуры». Эрстед еще в 1820 году обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку и положил начало новому разделу физики – электромагнетизму. Поэтому он сразу же показал, что явление, обнаруженное Зеебеком, имеет не магнитную, а электрическую природу, и заключается в возникновении электрического тока в замкнутом контуре из

неоднородных проводящих материалов, когда места контактов имеют разные температуры. Отсюда следовало предложенное Эрстедом другое, более точное название эффекта – термоэлектричество, которое и закрепилось в физике. Данный эффект послужил основой создания физиками Жан-Батистом Фурье и Хансом Кристианом Эрстедом первой термоэлектрической батареи – первого полноценного теплового приемника ИК излучения. В последующем физиками Леопольдом Нобели и Мачедонио Меллони были существенно улучшены характеристики и конструкции подобных батарей.

Первый болометр был разработан в 1878 году родоначальником этого вида тепловых приемников излучения профессором Сэмюэлем Пирпонтотом Лэнгли на основе двух тонких пленок из платины. Пленки были включены в разные плечи измерительного моста Уитстона. Один из элементов облучался потоком излучения, а второй являлся компенсационным – для компенсации изменения температуры внешней среды. Мощность излучения была пропорциональна разности напряжений сбалансированного и разбалансированного моста. В итоге разработанный болометр показал лучшую чувствительность по сравнению с действующими на тот момент времени термоэлектрическими батареями. Впоследствии профессор Лэнгли улучшил чувствительность болометра, используя пленки из железа [6]. Совершенствование конструкции и характеристик позволило металлическим болометрам на протяжении трех последующих десятилетий оставаться одними из эффективных приемников излучения. Дальнейшие исследования в области регистрации оптического излучения, особенно в период освоения полупроводниковой микроэлектроники во второй половине XX века, который сопровождался интенсивным синтезом новых материалов, способствовали появлению фотоприемников, в том числе работающих при отрицательных температурах, с лучшими показателями пороговой чувствительности и быстродействия. Это предопределило существенное снижение интереса к неохлаждаемым болометрам на основе металлов. Тем не менее, исследование болометров продолжается, поскольку они

характеризуются рядом конкурентных преимуществ относительно других типов неохлаждаемых детекторов: высокой технологичностью, простой конструкцией и низкой стоимостью, высокой стабильностью параметров и лучевой стойкостью, относительно низким уровнем шумов и способностью работать в условиях высоких температур до сотен градусов Цельсия.

## **1.2. Характеристики неохлаждаемых металлических болометров**

Неохлаждаемые металлические болометры относят к широкополосным приемникам излучения с равномерной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 1 мкм до 3 мм, руководствуясь тем, что их резистивные элементы для более эффективного поглощения излучения обычно покрываются слоем платиновой, палладиевой или золотой черни [7]. Этот факт качественно отличает болометры от остальных приемников излучения заявленного диапазона частот. Тем не менее, при обобщении результатов многих исследователей было показано [8], что спектральная чувствительность различных модификаций болометров отличается, а эффективный спектральный диапазон работы неохлаждаемых металлических болометров, главным образом, определяется формой и размерами приемной площадки резистивных элементов и их конструкцией в целом.

Ключевыми характеристиками любых фотоприемников являются пороговая чувствительность (обнаружительная способность) и быстродействие, которое определяется постоянной времени нарастания  $\tau_r$  и спада  $\tau_f$  отклика приемника при регистрации модулированного излучения. Пороговой чувствительностью называется минимальный поток излучения, вызывающий изменение падения напряжения на болометре, равное среднеквадратичному значению напряжения его шумов. Она зависит от частоты модуляции излучения и, как правило, приводится к определенной полосе частот шумового напряжения болометра. Фотоприемники разных типов отличаются по составу и структуре чувствительных элементов, а также их габаритными размерами. Поэтому для

удобства сравнения пороговых чувствительностей различных приемников используют обобщенный параметр, называемый обнаружительной способностью, которая определяется как обратная величина минимальному потоку излучения, отнесенная к единице эффективной площади чувствительного элемента приемника.

На сегодняшний день предельные пороговые чувствительности неохлаждаемых металлических болометров достигли нескольких  $\text{пВт}/\text{Гц}^{1/2}$  с резистивными элементами толщиной несколько нанометров и приемной площадкой  $10\text{-}1000 \text{ мкм}^2$ . К примеру, пороговая чувствительность болометра, изготовленного на базе платинового элемента с габаритными размерами  $50 \text{ мкм} \times 50 \text{ мкм} \times 7 \text{ нм}$ , приведенная к единичной полосе на частоте  $\sim 6 \text{ кГц}$ , составила  $5,2 \text{ пВт}/\text{Гц}^{1/2}$  при питании постоянным током  $0,2 \text{ мА}$  [9]. В качестве подложки использовался оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Обнаружительная способность болометра составила  $\sim 10^9 \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ , а его постоянная времени –  $0,6 \text{ мс}$ . В работе [10] представлен болометр на основе никелевого резистивного элемента с площадью приемной площадки  $0,3 \times 6 \text{ мкм}^2$  и толщиной  $25 \text{ нм}$ . Элемент расположен на кремниевой ( $\text{SiO}_2$ ) подложке. Пороговая чувствительность болометра составила менее  $10 \text{ пВт}/\text{Гц}^{1/2}$  для модулированного излучения частотой  $15 - 30 \text{ кГц}$  при питании постоянным током  $0,6 \text{ мА}$ . Обнаружительная способность болометра составила  $\sim 1,5 \cdot 10^7 \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ , а его постоянная времени  $\sim 10 \text{ нс}$ .

Для неохлаждаемых металлических болометров, как правило,  $\tau_r = \tau_f$  и зависит, в основном, от массогабаритных показателей резистивного элемента (толщины), его конструкции (электродов, рабочей среды, тепловых характеристик материала подложки и т.д.) и режима работы. Значение постоянной времени неохлаждаемых металлических болометров варьируются от сотен мс до единиц нс. Наибольший практический интерес представляют болометры с наилучшим быстродействием. Например, неохлаждаемый болометр на основе алюминиевой фольги толщиной  $0,5 - 1 \text{ мкм}$ , находящейся в свободном состоянии воздушной атмосферы, обладал постоянной времени  $300 \text{ нс}$  [11]. Он применялся для

измерения энергетических характеристик ультрамягкого рентгеновского излучения в режиме импульсного питания током 10 А, при этом падение напряжения на нем изменялось в диапазоне 0,3 – 3 В и фиксировалось осциллографом без использования схемы усиления. В работе [12] характеристики рентгеновского излучения измерялись с помощью болометров на основе никелевого резистивного элемента, размерами 2 мм × 13 мм и толщиной 1 мкм. В режиме импульсного питания током до 40 А его постоянная времени составляла ~ 1 нс. Неохлаждаемыми металлическими болометрами, работающими на постоянном токе, также показано высокое быстродействие. Например, болометр на базе пленки из висмута толщиной 40 нм (приемная площадка 0,5 мм<sup>2</sup>), осажденной на полупроводниковую (оксид бериллия) подложку с высокой теплопроводностью, обладал постоянной времени 2 нс [13]. Его вольт-ваттная и пороговая чувствительность составляла 22 мВ/Вт и 50 нВт/Гц<sup>1/2</sup> соответственно. При этом ток питания болометра был выбран из соображений ограничения шумовых характеристик только Джонсоновской составляющей [14]. В работе [15] описан неохлаждаемый микроболометр на основе титанового резистивного элемента толщиной 70 нм, размерами приемной площадки 10 мкм × 3 мкм и расположенного на кремниевой подложке. Вольт-ваттная и пороговая чувствительность микроболометра составляла 779 мВ/Вт и 10,2 нВт/Гц<sup>1/2</sup> соответственно, а постоянная времени была равна 4 мкс.

Таким образом, анализ литературных данных показал, что следствием достижения неохлаждаемыми металлическими болометрами постоянной времени от единиц наносекунд до единиц микросекунд является либо ограничение их пороговой чувствительности, либо работа в импульсном режиме высоких (относительно габаритов их резистивных элементов) токов питания. В то же время достижение предельных пороговых чувствительностей неохлаждаемых металлических болометров требует уменьшения размера и толщины резистивных элементов, что имеет свой физический предел и приводит к усложнению и удорожанию производства болометров. Поэтому для последующего улучшения

ключевых характеристик неохлаждаемых металлических болометров необходимо применение новых методов и подходов, что позволит реализовать их конкурентные преимущества перед другими видами фотоприемников в составе различных оптико-электронных измерительных систем.

### **1.3. Конструкции и области применения неохлаждаемых болометров**

Первоначально болометры использовались в составе спектральных приборов, с помощью которых проводились исследования по изучению спектрального состава солнечного излучения и его влияния на атмосферу Земли. Конструктивно они представляли собой тонкие металлические пленки шириной 0,05 мм и толщиной 1 – 10 мкм, покрытые сажей от камфорного дыма. С дальнейшим совершенствованием характеристик и конструкций болометров расширялась область их применения [16]. На сегодняшний день неохлаждаемые металлические болометры, главным образом, применяются в качестве планарных интегральных антенн, как единичного, так и матричного исполнения, работающих преимущественно в ИК и терагерцовой области спектра [17] с возможностью настройки на заданную полосу частот [18]. В то же время достижения современной нанооптики и плазмоники вызвали значительный интерес к проектированию интегральных антенн оптического диапазона [19]. Для данных антенн характерны размеры порядка сотен нм, что требует соблюдения технологических норм погрешности их изготовления не хуже 10 нм. Тем не менее, разработка оптических антенных структур открывает возможность создания новых оптико-электронных приборов.

Современные болометры матричного исполнения по объему производства превосходят остальные матричные ИК приемники. Наиболее распространенными в настоящее время материалами резистивных элементов неохлаждаемых болометров являются: оксид ванадия ( $\text{VO}_x$ ); монокристаллические соединения на основе кремния (a-Si, SiC, SiGe и др.); металлы Ti, Nb, Ni, Pt, Al. На рисунке 1.1

представлены примеры неохлаждаемых металлических болометров в виде интегральных антенн.

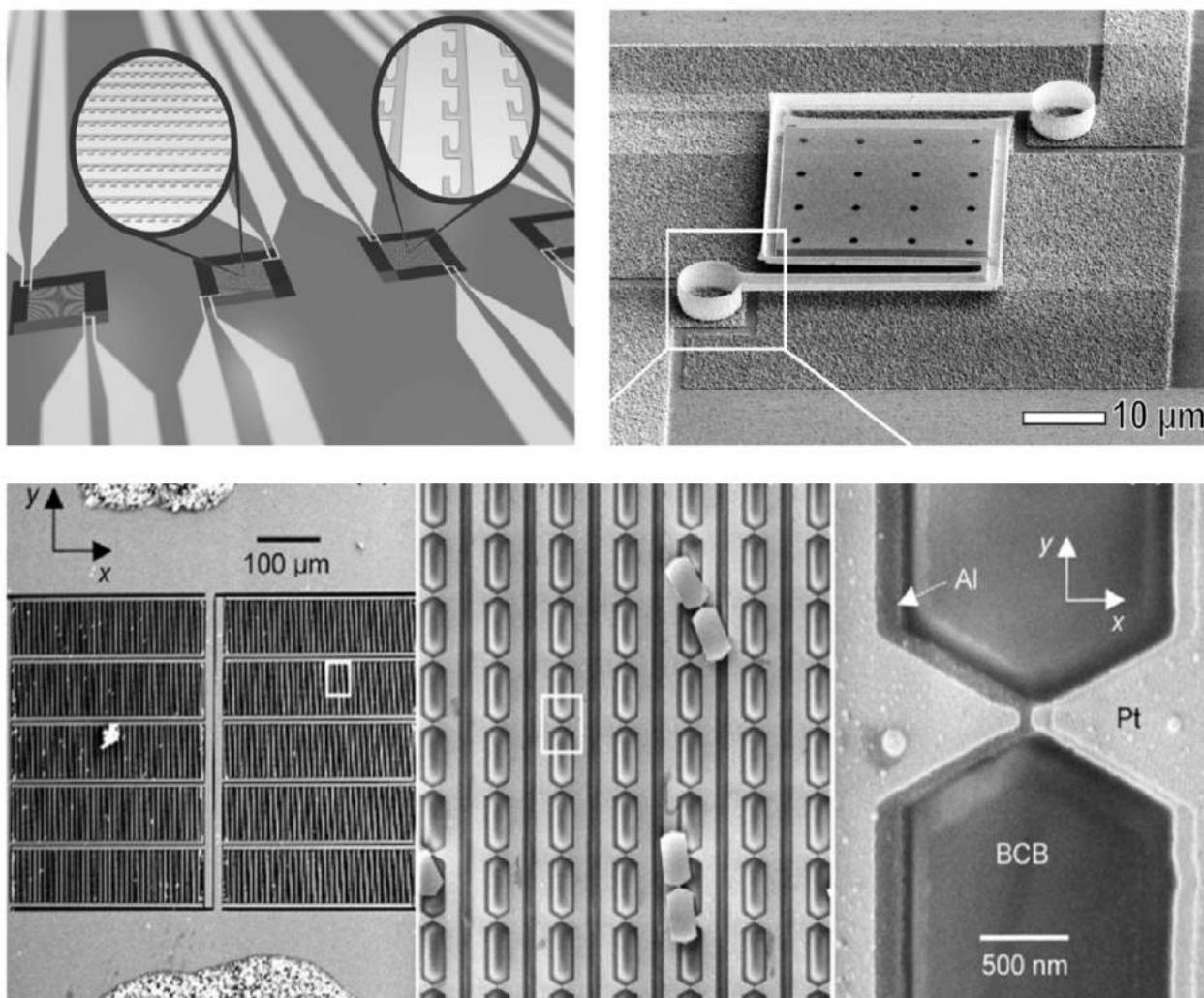


Рисунок 1.1 – Примеры неохлаждаемых металлических микроболометров в виде интегральных антенн единичного и матричного исполнения

Основной научно-технической задачей по совершенствованию матричных приемников является увеличение плотности компоновки пикселей матриц, поскольку это является более значимой составляющей в увеличении дальности обнаружения систем формирования изображения, чем снижение пороговой чувствительности отдельного пикселя [20]. Наряду с этим, решаются задачи по увеличению быстродействия матриц, создания возможности оперативной перестройки их рабочей полосы частот и снижения стоимости. На сегодняшний день разрешение матричных болометров превышает формат Full HD.

Матричные неохлаждаемые болометры нашли широкое применение в разных областях науки и техники [21, 22], примеры которых приведены в таблице 1.1. Высокая доля рынка приборов на основе матричных неохлаждаемых болометров с резистивными элементами из VOx, которая в настоящее время составляет более 70 %, обусловлена приемлемыми для многих применений ключевыми характеристиками, хорошо отработанной технологией их изготовления и выгодными производственными затратами. Вместе с тем, согласно прогнозам экспертов, эта ситуация может кардинально измениться с совершенствованием технологий производства болометров на основе a-Si, нацеленным на снижение их пороговой чувствительности и себестоимости. Коммерческий выпуск неохлаждаемых болометров на основе металлов относительно VOx остается ограниченным на уровне нескольких процентов, прежде всего за счет того, что они уступают полупроводниковым болометрам в совокупности ключевых параметров (пороговой чувствительности и быстродействия), несмотря на применение для их разработки и производства передовых технологий. Следует также отметить, что на сегодняшний день в литературе отсутствуют научно-технические решения по существенному (на порядок и более) улучшению характеристик неохлаждаемых металлических болометров, которые являются более простыми и менее затратными в производстве, чем VOx болометры.

Таблица 1.1

## Области применения неохлаждаемых болометров

Сфера применения	Назначение приборов на основе матричных неохлаждаемых микроболометров
В медицине	<p>Раннее обнаружение рака и его идентификация</p> <p>Обнаружение оптимального места ампутации конечностей</p> <p>Определение местонахождения плаценты</p> <p>Мониторинг заживления ранений</p> <p>Обнаружение начальных стадий инфекций без удаления перевязочных материалов</p>

Сфера применения	Назначение приборов на основе матричных неохлаждаемых микроболометров
В науке	<p>Совершенствование технологий ведения сельского хозяйства</p> <p>Изучение теплопередачи в растениях</p> <p>Мониторинг стрессовых состояний сельскохозяйственных культур</p> <p>Ночные наблюдения за дикой природой</p> <p>Исследование вулканов</p> <p>Обнаружение различных фальсификаций</p> <p>Дистанционное зондирование метеорологических условий</p> <p>Измерение теплового баланса Земли</p> <p>Обнаружение турбулентности чистой атмосферы</p> <p>Определение и исследование источников загрязнения воды</p> <p>Контроль выработки ресурсов искусственных спутников Земли</p> <p>Изучение морских льдов и разведка ледовых расщелин</p> <p>Мониторинг и картография течения Гольфстрим</p>
Для военных и спасательных операций	<p>Обнаружение людей и сооружений в ночных условиях</p> <p>Обнаружение подземных объектов и коммуникаций</p> <p>Обнаружение подводных объектов</p> <p>Наведение ракет</p> <p>Обнаружение дефектов конструкций</p> <p>Обнаружение местоположения людей, скрытых строительными конструкциями (жертвы землетрясения и т.д.)</p> <p>Обнаружение лесных пожаров</p> <p>Пожаротушение и эвакуация в условиях задымления</p>

На производстве	Видеонаблюдение Контроль процессов производства Неразрушающий контроль объектов Обнаружение скрытых конструкций и коммуникаций Обнаружение источников ИК и терагерцового излучения Обнаружение больных сельскохозяйственных культур и насаждений Температурный контроль электрических узлов и механический деталей Анализ органических соединений и газов Обнаружение разлива нефти и нефтепродуктов, а также утечек газа
-----------------	---

Отсутствие подхода к кардинальному совершенствованию неохлаждаемых металлических болометров, обладающего рядом конкурентных преимуществ относительно полупроводниковых приемников, трудно ожидать повышения к ним научного и, как следствие, практического интереса. Таким образом, исследование и разработка новых технических решений по улучшению ключевых характеристик данного типа тепловых приемников излучения является актуальной научно-технической задачей.

## **Глава 2. Научно-техническое обоснование выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров**

Считается, что пороговая чувствительность неохлаждаемых болометров главным образом определяется величиной ТКС материала и размерами резистивного элемента [1]. ТКС большинства металлов является величиной одного порядка и составляет  $(2 - 5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Поэтому в настоящее время основной исследовательский потенциал направлен на совершенствование технологий изготовления тонких металлических резистивных элементов и изучение влияния их конструкции на ключевые характеристики болометров. Улучшение пороговой чувствительности неохлаждаемых металлических болометров за счет уменьшения размеров и толщины их резистивных элементов практически достигло предела своих возможностей. При этом они на порядок уступают полупроводниковым болометрам, работающим при комнатных температурах, в предельной обнаружительной способности. Тем не менее, научный интерес к неохлаждаемым металлическим болометрам на сегодняшний день значительно снижен на фоне продолжающегося совершенствования ключевых характеристик полупроводниковых болометров, которое направлено на исследование и разработку новых материалов резистивных элементов. При этом использование металлических сплавов в качестве резистивных элементов неохлаждаемых болометров не предпринималось, ввиду того, что они характеризуются на порядок меньшим (или очень близким к нулю) ТКС по сравнению с металлами. Таким образом, металлические сплавы не причисляют к перспективным материалам для неохлаждаемых болометров [23]. Эта точка зрения также подтверждается отсутствием научных работ, посвященных исследованию и разработке неохлаждаемых болометров с резистивными элементами на основе металлических сплавов.

## 2.1. Методика оценки эффективности неохлаждаемых болометров на основе металлов и их сплавов

Исследования сплавов никелида титана (TiNi) вызвали интерес к возможности их применения в совершенно новых направлениях науки и техники, включая тепловые приемники излучения [24-26]. Это потребовало проведение анализа научных работ по неохлаждаемым металлическим болометрам, который выявил неоднозначность некоторых аспектов действующей теории, что указало на необходимость их уточнения и разработки новой методики оценки эффективности подобных детекторов. Предложенная методика была основана на сравнении пороговой чувствительности болометров, которая определяется выражением [1, 27]:

$$NEP = \frac{V_n}{R_v}, \quad (2.1)$$

где  $V_n$  – суммарное среднеквадратическое напряжение шумов в заданной шумовой полосе [В];  $R_v$  – вольт-ваттная чувствительность болометра [В/Вт].

Согласно [27 – 30],  $V_n$  определяется по формуле:

$$V_n = \sqrt{V_J^2 + V_{th}^2 + V_{1/f}^2 + V_{iamp}^2}, \quad (2.2)$$

где  $V_{iamp}$  – напряжение шума на входе первичного усилительного каскада [В];  $V_J$ ,  $V_{th}$  и  $V_{1/f}$  – напряжения Джонсоновского шума, дробового шума фоновой теплопроводности и  $1/f$  шума (фликкер-шума) болометра, соответственно [В].

Напряжения шумов болометра определяются следующими выражениями:

$$V_J = \sqrt{4kT_c R_c \Delta f}, \quad (2.3)$$

$$V_{th} = R_v \sqrt{4kT_c^2 G \Delta f}, \quad (2.4)$$

$$V_{1/f} = K_{1/f} I R_c \sqrt{\Delta f / f^\gamma}, \quad (2.5)$$

где:

–  $k$  – постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

- $T_c$  – рабочая температура болометра [K];
- $R_c$  – сопротивление резистивного элемента при рабочей температуре [Ом];
- $G$  – теплопроводность элемента [Вт/К];
- $\Delta f$  – шумовая полоса частот [Гц];
- $I$  – рабочий ток болометра (ток смещения) [А];
- $f$  – рабочая частота [Гц].

В области низких частот основной составляющей шума болометра является фликкер-шум. Коэффициенты  $K_{If}$  и  $\gamma$  из выражения (2.5) зависят от многих параметров, поэтому количественная оценка  $V_{If}$  является сложной аналитической задачей [31 – 33]. При этом для частот свыше нескольких сотен Гц, главной составляющей белого шума болометра является напряжение Джонсоновских шумов ( $V_J \gg V_{th}$ ) [29, 30, 33].

Вольт-ваттная чувствительность болометра согласно [34] рассчитывается по формуле:

$$R_v = \frac{I \Delta R}{P + \delta P}, \quad (2.6)$$

где:

- $\Delta R$  – изменение сопротивления резистивного элемента [Ом];
- $P$  и  $\delta P$  – мощность регистрируемого излучения и собственного разогрева резистивных элементов, соответственно [Вт].

Для металлических болометров  $\delta P$  может достигать единиц процентов от  $P$ . На сегодняшний день известно о двух способах компенсации  $\delta P$  [35, 36]. Изменение сопротивления элемента определяется выражением:

$$\Delta R = R_c \alpha \Delta T, \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – ТКС материала элемента,  $K^{-1}$ ;  $\Delta T$  – изменение его температуры, К. Повышение температуры элемента под воздействием регистрируемого излучения определяется как [37]:

$$\Delta T = \frac{\eta P}{G} = \frac{\eta P \tau}{H}, \quad (2.8)$$

где:

- $G$  – теплопроводность болометра [Вт/К];
- $H$  – теплоемкость болометра [Дж/К];
- $\tau$  – его постоянная времени отклика [с];
- $\eta$  – нормированный коэффициент поглощения излучения.

В итоге, вольт-ваттную чувствительность болометра оценивают согласно:

$$R_v = \eta IR \cdot \frac{\alpha}{G}. \quad (2.9)$$

Из выражения (2.9) следует принятое условие сравнения эффективности болометров и критерий выбора материала их резистивных элементов. Вместе с тем, на основании литературных данных установлено, что оценка теплопроводности болометров, в том числе тривиальных конструкций, где резистивный элемент представляет собой плоскую металлическую пленку простой формы, закрепленную на электродах или плоской подложке [38], является сложной аналитической задачей [34, 39, 40]. При этом проводимые модельные расчеты теплопроводности тонких металлических резистивных элементов согласно известному выражению для объемных образцов [41, 42]:

$$G = \chi \frac{hw}{l}, \quad (2.10)$$

где  $l$ ,  $h$  и  $w$  – длина, ширина и толщина элемента [м];  $\chi$  – коэффициент теплопроводности материала элемента [Вт/м·К] в целом не соответствуют практическим результатам. Вероятнее всего это связано с отличием  $\chi$  элементов от справочных данных, что ограничивает оценку  $NEP$  болометров и указывает на необъективность использования  $G$  в качестве критерия выбора материала их резистивных элементов. Одним из условий сравнения пороговых чувствительностей болометров из разных металлов принято считать равенство их сопротивлений [10, 30]. Однако в этом случае, исходя из выражения для сопротивления, толщина резистивных элементов на основе низкоомных металлов будет на порядки меньше чем толщина резистивных элементов из высокоомных металлов (при одинаковых размерах приемной площадки  $h = l$ ). Следовательно,

исходя из действующей теории, подтвержденной практическими результатами, болометры на базе резистивных элементов наименьшей толщины, то есть обладающие на порядки более низкой теплоемкостью (теплопроводностью), будут иметь заведомо лучшую пороговую чувствительность. Поэтому равенство  $R$  неохлаждаемых металлических болометров нельзя отнести к адекватному условию сравнения их эффективности. Вместе с тем, металлические резистивные элементы имеют близкие предельные толщины. Следовательно, для болометров с одинаковыми металлическими резистивными элементами предельных толщин, обладающих разным удельным электросопротивлением, невозможно создать условие равенства их сопротивления.

Наряду с вышеизложенным было установлено, что модельные оценки теплоёмкости резистивного элемента разных конструкций:

$$H = c\rho lhw, \quad (2.11)$$

где  $\rho$  и  $c$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>] и удельная теплоемкость [Дж/кг·К] его материала, соответственно, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Воспользовавшись известным выражением для сопротивления и зависимостью:

$$H = G \cdot \tau, \quad (2.12)$$

выражение вольт-ваттной чувствительности болометра примет следующий вид:

$$R_v = \frac{\eta I}{h^2 w^2} \cdot \frac{\alpha \rho_c \tau}{c \rho}, \quad (2.13)$$

где  $\rho_c$  – удельное электросопротивление материала элемента при рабочей температуре [Ом·м]. Таким образом, при сравнении чувствительности двух болометров из разных металлов наиболее целесообразно исходить из условий равенства совокупности параметров: размеров резистивных элементов, тока смещения, коэффициента поглощения и температуры окружающей среды. Это также справедливо, поскольку только в этом случае сравнение сводится к оценке полного набора электрофизических свойств материалов резистивных элементов, влияющих на чувствительность болометра. В итоге:

$$\frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} = \left( \frac{\alpha_1 \rho_{c1} \tau_1}{c_1 \rho_1} \right) \cdot \left( \frac{c_2 \rho_2}{\alpha_2 \rho_{c2} \tau_2} \right) \cdot \sqrt{\frac{V_{(J)2}^2 + V_{(1/f)2}^2 + V_{iamp}^2}{V_{(J)1}^2 + V_{(1/f)1}^2 + V_{iamp}^2}}. \quad (2.14)$$

Известно, что напряжение фликкер-шума неохлаждаемых болометров, изготовленных из одинакового металла, зависит в основном от размеров резистивных элементов и тока смещения [43]. Зависимость напряжения 1/f шума неохлаждаемых болометров от материала элемента является слабо изученной и требует отдельных экспериментальных исследований. Тем не менее, уменьшение тока смещения является одним из эффективных способов снижения напряжения фликкер-шумов болометров до уровня напряжения Джонсоновских шумов и ниже [44]. Однако в этом случае следует учитывать изменение пороговой чувствительности болометра, поскольку его вольт-ваттная чувствительность прямо пропорциональна току смещения (2.13). Вместе с тем известно, что шумовые характеристики усилителей описываются спектральной плотностью входного шумового напряжения и тока, которая характеризуется частотной областью 1/f и белого шума. Для многих операционных усилителей граничная частота  $f_c$  этих областей лежит в пределах 100 – 500 Гц. Таким образом, анализ частотной зависимости шумовых характеристик неохлаждаемых металлических болометров показал следующее:

– Наиболее эффективным, с точки зрения минимального уровня шумов, является частотный диапазон работы болометра свыше нескольких сотен Гц, где основным источником шума оказывается  $V_J$ , либо белый шум усилительного каскада. В этом случае постоянная времени болометра должна быть менее 1 мс в силу частотной зависимости его вольт-ваттной чувствительности:

$$R_V(f) = \frac{R_V}{\sqrt{1 + (2\pi\tau f)^2}}; \quad (2.15)$$

– Для минимизации суммарного значения фликкер-шума усилительного каскада и болометра, работающего на частотах ниже  $f_c$  по причине малого быстродействия, следует определить оптимальную величину тока смещения приемника, что требует проведения серьезных систематических исследований по

установлению закономерности влияния  $I$  на  $V_{If}$  неохлаждаемых металлических болометров.

Наименьшим входным шумовым напряжением обладают такие операционные усилители как LME49990 (Texas Instruments, США), ADA4898 (Analog Devices, США) и др. Для них  $V_{iamp}$  составляет 0,9 нВ в единичной полосе на частотах свыше 200 Гц. На рисунке 2.1 представлена зависимость напряжения Джонсоновских шумов болометров с резистивными элементами квадратной формы от их сопротивления и толщины при  $\Delta f = 1$  Гц для нескольких значений  $\rho_0$ , полученная на основании выражения:

$$V_J(R) = \sqrt{4kT_c R_c \Delta f}, \quad (2.16)$$

$$V_J(w) = \sqrt{4kT_c \rho_c w \Delta f}. \quad (2.17)$$

Кривые  $V_J(R)$  и  $V_J(w)$  представлены для рабочих температур  $T_c$  300 и 400 К.

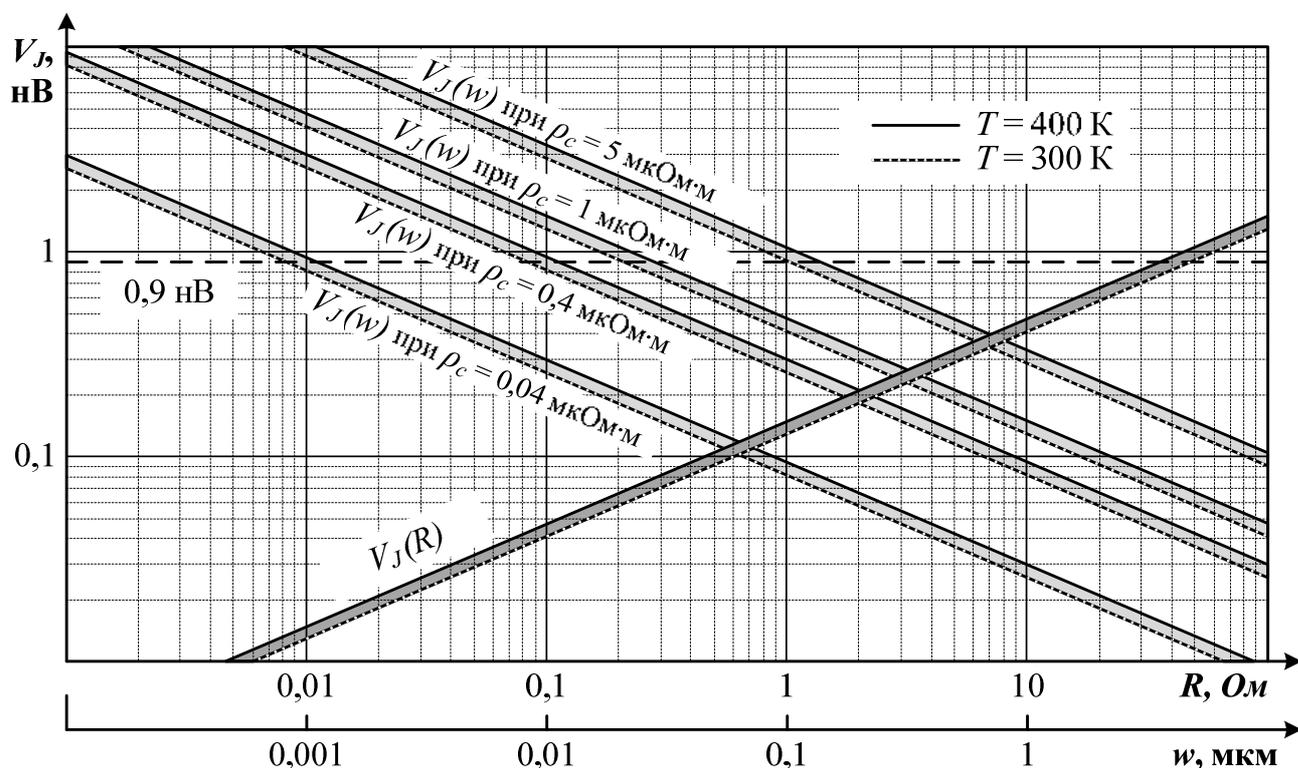


Рисунок 2.1 – Зависимость напряжения Джонсоновских шумов в единичной полосе частот для элемента с квадратной формой приемной площадки от  $R_c$  и  $w$

Как видно,  $V_J$  болометра будет сопоставимо с  $V_{iamp} = 0,9$  нВ при сопротивлении его резистивного элемента  $R_c = (30 - 40)$  Ом (в зависимости от  $T_c$ ) [45]. В этом случае  $V_n = 1,41 \cdot V_J = 1,41 \cdot V_{iamp}$ . Для резистивных элементов с сопротивлением менее 10 Ом и толщиной более 0,2 мкм, из металлов с  $\rho_0 \leq 2$  мкОм·м,  $V_n = V_{iamp}$ . При условии  $10 \text{ Ом} \leq R_c \leq 1 \text{ кОм}$   $V_n \approx (V_J^2 + V_{amp}^2)^{1/2}$ , а свыше 1 кОм –  $V_n = V_J$ . Сопротивлением больше 10 Ом обладают элементы толщиной менее 0,2 мкм на основе металлов с  $\rho_0 \leq 2$  мкОм·м. Зависимость сопротивления резистивных элементов наиболее оптимальной с точки зрения ключевых характеристик болометров (квадратной) формы от их толщины для некоторых значений удельного электросопротивления металлов представлена на рисунке 2.2.

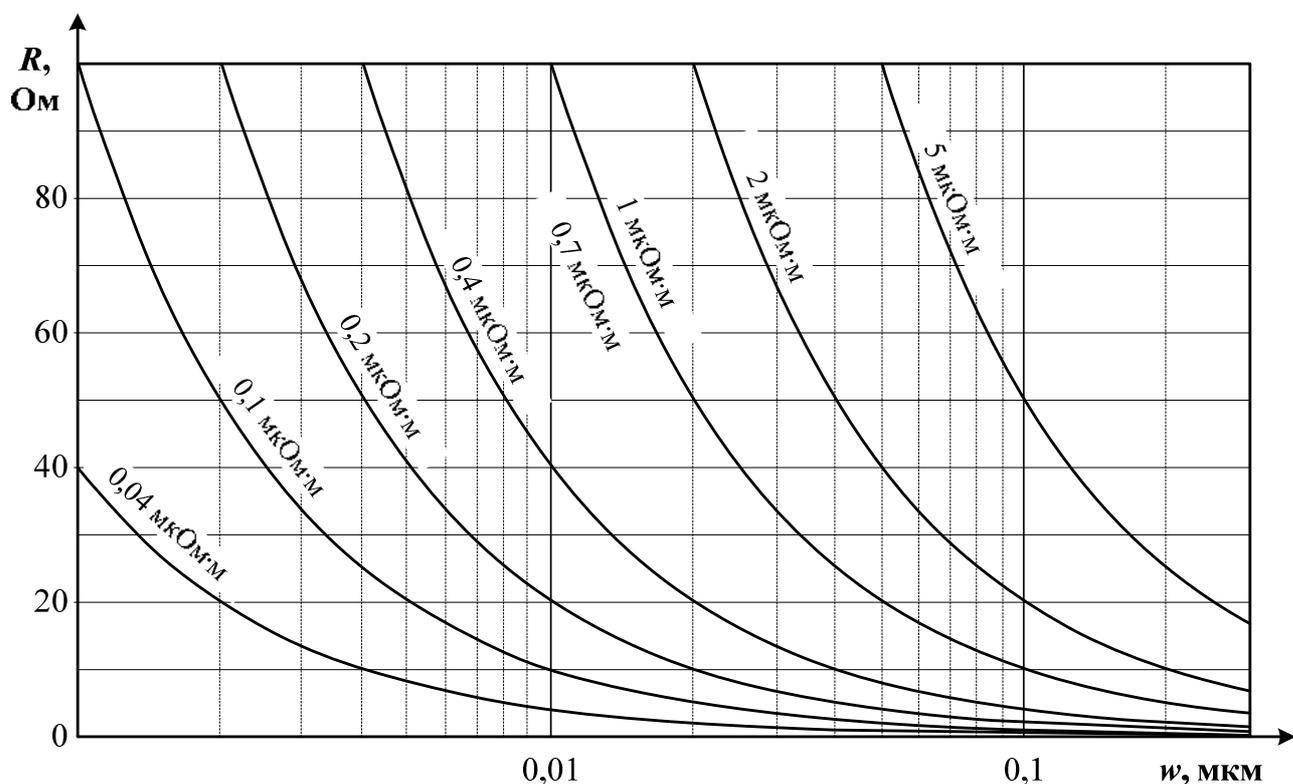


Рисунок 2.2 – Зависимость сопротивления пленки квадратной формы от её толщины для некоторых значений  $\rho_0$

Из вышеизложенного следует, что утончение резистивных элементов ведет к уменьшению их теплоемкости, а также к увеличению их чувствительности и быстродействия. Для элементов на основе металлов, обладающих малым удельным электросопротивлением, характерно меньшее напряжение

Джонсоновских шумов, рабочая температура и вольт-ваттная чувствительность. Однако в этом случае следует учитывать тот факт, что для резистивных элементов субмикронной толщины характерны отличия электрофизических свойств их материалов от справочных данных для объемных образцов, которое достигает кратных значений. В частности, при изготовлении элементов из ниобия (Nb) толщиной несколько десятков нанометров его ТКС уменьшается в 2-3 раза, а удельное электросопротивление приблизительно во столько же раз увеличивается [30, 33, 46]. Таким образом, для адекватного сравнения пороговых чувствительностей болометров с резистивными элементами из разных металлов субмикронной толщины необходимо проведение детальных исследований по установлению физических и технологических факторов влияющих на совокупность электрофизических свойств их материала.

Постоянная времени отклика болометра определяется теплоемкостью материала резистивного элемента и теплопроводностью его конструкции (2.12). Однако аналитический расчет  $\tau$  затруднен в связи со сложностью оценки  $G$ . Поэтому необходимо проведение предварительных исследований по установлению различия постоянной времени резистивных элементов из разных металлов близких размеров и толщины.

## **2.2. Сравнительные исследования характеристик металлических резистивных элементов**

Возможность использования сплавов на основе TiNi в качестве резистивных элементов неохлаждаемых болометров была обусловлена тем, что они демонстрируют высокую реакцию на незначительные изменения температуры при практических испытаниях их механических свойств [47, 48]. TiNi сплавы хорошо известны, благодаря своему свойству совершать работу, при прохождении из однофазного низкотемпературного (высокотемпературного) состояния в двухфазную область (эффект памяти формы) под воздействием на них источника тепла [48]. Температурные зависимости сопротивления таких

сплавов, показанные на рисунке 2.3 (соотношение компонентов указано в атомных процентах), имеют большое разнообразие: по величине гистерезиса, по углу наклона, по вытянутости, по плавности и релейности и т.д. [49]. Характер зависимости  $R(T)$ , а также электрофизические свойства, определяются составом сплава и его термомеханической предысторией [50].

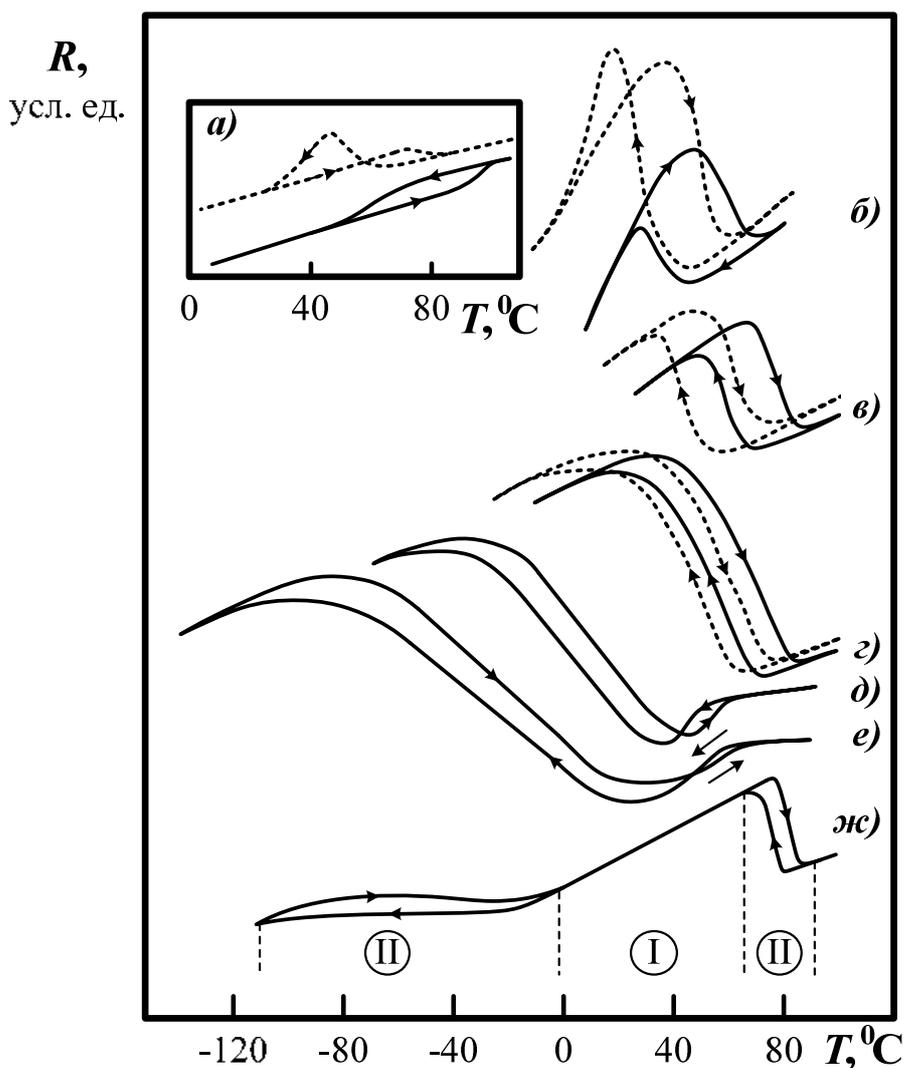


Рисунок 2.3 – Зависимость сопротивления сплавов от температуры, где I – однофазная низкотемпературная область, II – двухфазная область: а)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{49}\text{Cu}_1$ ; б)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{46}\text{Cu}_4$ ; в)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{44}\text{Cu}_6$ ; г)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{42}\text{Cu}_8$ ; д)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{41}\text{Cu}_9$ ; е)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{39}\text{Cu}_{11}$ ; ж)  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cu}_{28}$

В области значений температур I (рисунок 2.3) сплавы TiNi имеют характер, свойственный обычным металлам. Вблизи точки мартенситного перехода (переход из области I в область II) наблюдается эффект потери устойчивости

кристаллической решетки таких сплавов, то есть изменение уровня силы межатомного взаимодействия, что влечет за собой нелинейное изменение некоторых электрофизических характеристик материала, а  $\text{TKC} \rightarrow 0$ . В этом случае вольт-ваттная чувствительность потенциального TiNi болометра будет нестабильной, либо близка к нулю. Поэтому его работа возможна только на линейных участках области I и II температурной зависимости сопротивления сплава.

Для сравнительных исследований были отобраны сплавы TiNi различных составов, потенциально обладающие необходимой совокупностью параметров:  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ ,  $\text{Ti}_{49}\text{Ni}_{51}$ ,  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$ ,  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{40}\text{Cu}_9\text{W}_1$ ,  $\text{Ti}_{49}\text{Ni}_{47}\text{Mo}_4$ ,  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{41}\text{Cu}_9$ ,  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$  и измерены их температурные зависимости сопротивления с помощью экспериментальной установки, схема которой показана на рисунке 2.4.

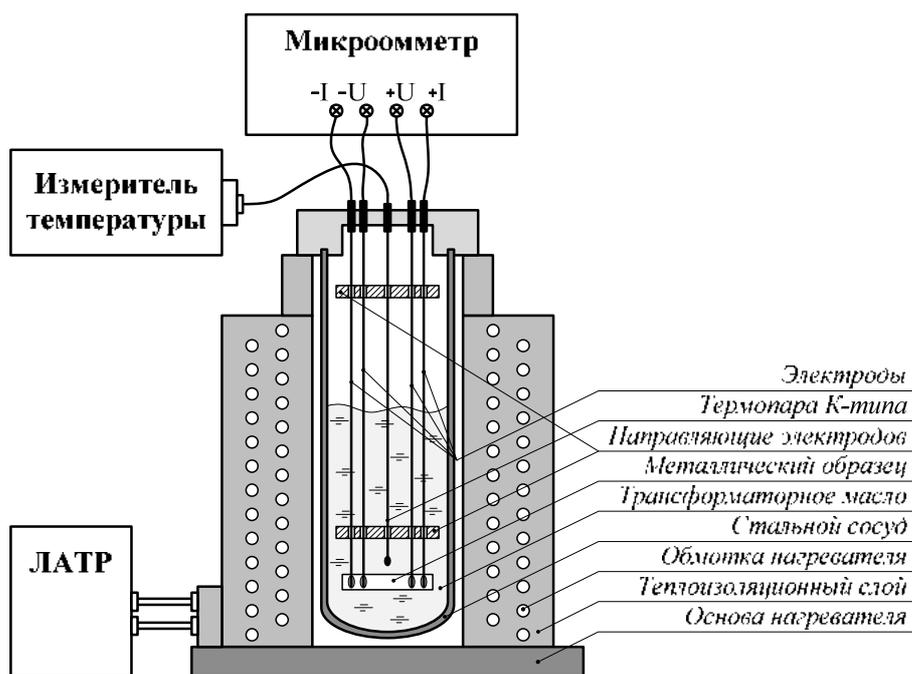


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки по измерению температурной зависимости электросопротивления сплавов на основе TiNi

Образцы сплавов представляли собой пластины толщиной 0,5 мм, прошедшие стандартные стадии термомеханической обработки слитков. В первую очередь были определены ТКС выбранных составов. Также были проанализированы свойства всех сплавов из базы данных MatWeb.

Методика измерений заключалась в следующем. В центральную полость нагревателя цилиндрической формы помещался стальной сосуд, наполненный трансформаторным маслом. Образец сплава с припаянными к нему никелевыми электродами опускался в сосуд на фиксированную глубину до полного погружения в масло. Электроды подключались к миллиомметру Е6-25 (All-Bright Technology, Тайвань), которым регистрировалось сопротивление образца с базовой погрешностью  $\pm 0,03$  %. Вблизи образца размещался измерительный спай термопары К-типа и цифровым термометром Center-302 (Center Technology, Тайвань) измерялась температура масла с погрешностью  $\pm 0,2$  °С. Перед проведением измерений Center-302 прошел калибровку прецизионным измерителем температуры МИТ 2.05М. Питание нагревателя осуществлялось от промышленной сети через автотрансформатор TDGC2-1В (Solby, Россия). Скорость нагрева образца выставлялась напряжением вторичной обмотки TDGC2-1В и составляла 0,25 °С/мин. Измерение температурной зависимости сопротивления образцов осуществлялось в диапазоне 20 – 70 °С. ТКС (представленные в таблице 2.1) выбранных TiNi сплавов были рассчитаны с помощью выражения:

$$\alpha = \frac{R_b - R_s}{R_s (T_b - T_s)}, \quad (2.18)$$

где  $R_s$ ,  $R_b$ ,  $T_s$  и  $T_b$  – начальные и конечные значения сопротивления и температуры образца соответственно. Согласно методике, описанной в ГОСТ Р8.736–2011 и [51], была определена погрешность измерения ТКС: для TiNi образцов  $\Delta\alpha = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ; для Ni образца  $\Delta\alpha = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Коэффициент Стьюдента для  $\Delta\alpha$  со степенью свободы 3 и при доверительной вероятности 0,95 составлял 3,2.

Таблица 2.1

ТКС Ni и некоторых сплавов на основе TiNi

ТКС/ сплав	Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub>	Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>40</sub> Cu <sub>9</sub> W <sub>1</sub>	Ti <sub>49</sub> Ni <sub>47</sub> Mo <sub>4</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>41</sub> Cu <sub>9</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub>	Ni
$\alpha$ , $10^{-3} \text{ K}^{-1}$	0,4	3,2	0,4	0,8	1,2	1,6	7,2

Для проведения последующих исследований были отобраны сплавы с наибольшими значениями ТКС. В качестве сравнительного материала выбран Ni, так как он обладает одним из самых высоких ТКС среди металлов. В итоге были изготовлены резистивные элементы из Ni,  $Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$  и  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  [52]. Они выполнены путем многократного проката заготовок с промежуточным отжигом и последующим растворением в кислоте. Дальнейшее утончение проводилось с помощью наждачной бумаги (маркировка M20/H-1). После получения образцов близкой толщины и размеров, на одну из их сторон с помощью пайки крепились два медных провода диаметром 100 мкм, согнутых под углом 90 градусов. Каждый провод припаивался на край элемента согнутой частью, как показано на рисунке 2.5, и имел два вывода, один из которых являлся токовым электродом, а другой – потенциальным. Усредненные геометрические размеры элементов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Размеры резистивных элементов

Размер элемента	Материал элемента		
	Ni	$Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$	$Ti_{50.5}Ni_{49.5}$
$L$ , мм	2,08	2,3	2,05
$l$ , мм	1,15	0,75	0,65
$h$ , мм	1,38	1,25	1,2
$w$ , мкм	38	45	47

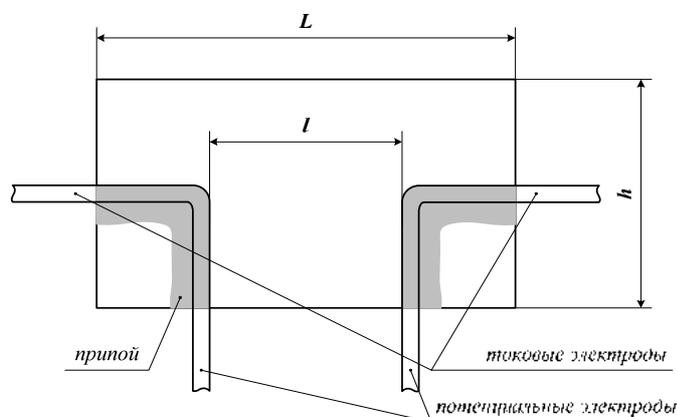


Рисунок 2.5– Схема крепления электродов к резистивному элементу и обозначение его линейных размеров

Линейные размеры элементов  $L$ ,  $l$ , и  $h$  измерялись микроскопом Axio Lab.A1 (Carl Zeiss, Германия) с погрешностью  $\pm 5$  мкм. Толщина  $w$  определена микрометром Digimatic серии 293-240 (Mitutoyo, Япония) с погрешностью  $\pm 1$  мкм. Температурная зависимость сопротивления элементов получена с помощью экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 2.6.

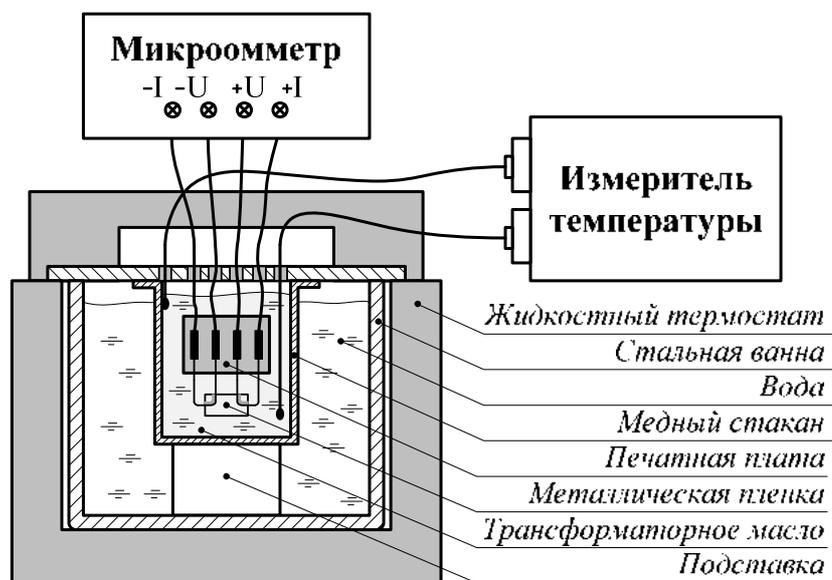


Рисунок 2.6 – Схема экспериментальной установки измерения температурной зависимости электросопротивления металлических пленок

Установка состояла из жидкостного термостата Haake DC-30 (Thermo Electron Corporation, США) со стабильностью поддержания температуры  $\pm 0,1$  °С и миллиомметра Е6-25. В стальную ванну термостата, наполненную водой, помещался медный стакан с трансформаторным маслом. Электроды исследуемых резистивных элементов во избежание их деформации в ходе эксперимента припаивались к печатной плате, которая затем полностью погружалась в масло. Плата фиксировалась в свободном положении и удерживалась проводами, соединенными с микроомметром. Температура термостата выставлялась дискретно в диапазоне 15 – 85 °С с шагом 10 °С. Двухканальным прецизионным измерителем МИТ 2.05М с Pt10 датчиками дополнительно контролировалась температура стакана и трансформаторного масла. Температурная зависимость сопротивления элементов представлена на рисунке 2.7.

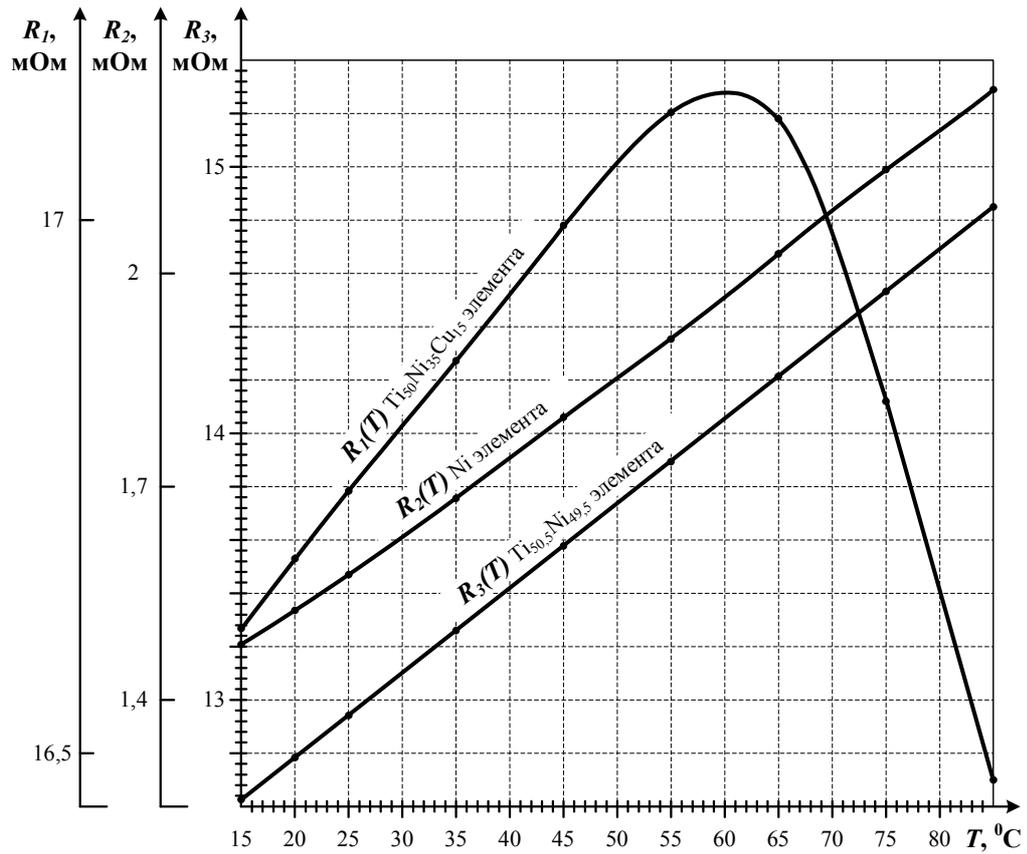


Рисунок 2.7 – Зависимость электросопротивления  $\text{Ni}$ ,  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$  и  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$  элементов от температуры

Результаты расчета ТКС согласно (2.18) представлены в таблице 2.3, для  $\text{Ni}$  и  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$  элементов в диапазоне  $20 - 70$   $^{\circ}\text{C}$ , для  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$  элемента в интервалах  $20 - 50$   $^{\circ}\text{C}$  (низкотемпературная однофазная область – I) и  $70 - 85$   $^{\circ}\text{C}$  (двухфазная область – II).

Таблица 2.3

ТКС исследованных элементов

Параметр	Материал элементов			
	$\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$	$\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$ (I)	$\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$ (II)	$\text{Ni}$
$\alpha, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$2,49 \pm 0,06$	$0,74 \pm 0,10$	$2,1 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,4$

Как видно, ТКС элементов из  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$  и  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$  (в области I) оказались меньше от ранее полученных значений для заготовки как минимум в 1,22 и 1,85 раза соответственно. Предположительно, подобная разница могла быть вызвана

методикой получения резистивных элементов микронной толщины. В подтверждение этой гипотезы был изготовлен элемент исключительно механической шлифовкой  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$  заготовки с малым прижимным усилием. Габаритные размеры полученного резистивного элемента составили:  $L = 2$  мм;  $l = 0,7$  мм;  $h = 1,35$  мм;  $w = 43$  мкм. Его ТКС согласно (2.18) определен в диапазоне  $20 - 70$  °С как  $(3,22 \pm 0,07) 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и соответствовал значению в таблице 2.1.

Удельное электросопротивление материала элементов при  $T_0 = 20$  °С и погрешность его измерения вычислены по формулам:

$$\rho_0 = \frac{R_0 hw}{l}, \quad (2.19)$$

где  $R_0$  – сопротивление элементов при  $T_0 = 20$  °С. Результаты расчета представлены в таблице 2.4. Удельное электросопротивление сплавов на основе  $\text{TiNi}$ , согласно [53], для температуры  $20$  °С варьируются в диапазоне  $0,5 - 1,4$  мкОм·м. Как видно,  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$  является высокоомным составом из ряда  $\text{TiNi}$  сплавов, а его  $\rho_0$  не претерпевает изменений при выбранных способах термомеханической обработки элементов микронной толщины.

Таблица 2.4

Удельное электросопротивление материала элементов при  $T_0$ 

Параметр	Материал элементов			
	1- $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$	2- $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$	$\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$	Ni
$\rho_0$ , мкОм·м	$1,11 \pm 0,03$	$1,09 \pm 0,03$	$1,25 \pm 0,03$	$0,069 \pm 0,002$

Измерение теплоемкости и постоянной времени элементов проводилось с помощью экспериментальной установки, представленной на рисунке 2.8. В состав установки входили: источник питания NY3003D-2 (Mastech, КНДР); осциллограф WaveJet 322 (LeCroy, США); амперметр А на базе мультиметра U1251B (Agilent Technologies, США) с погрешностью измерения силы тока  $\pm 0,4$  %; вольтметр V на базе мультиметра UT71C (Uni-Trend Technology, КНДР) с погрешностью измерений постоянного напряжения  $\pm 0,04$  %.

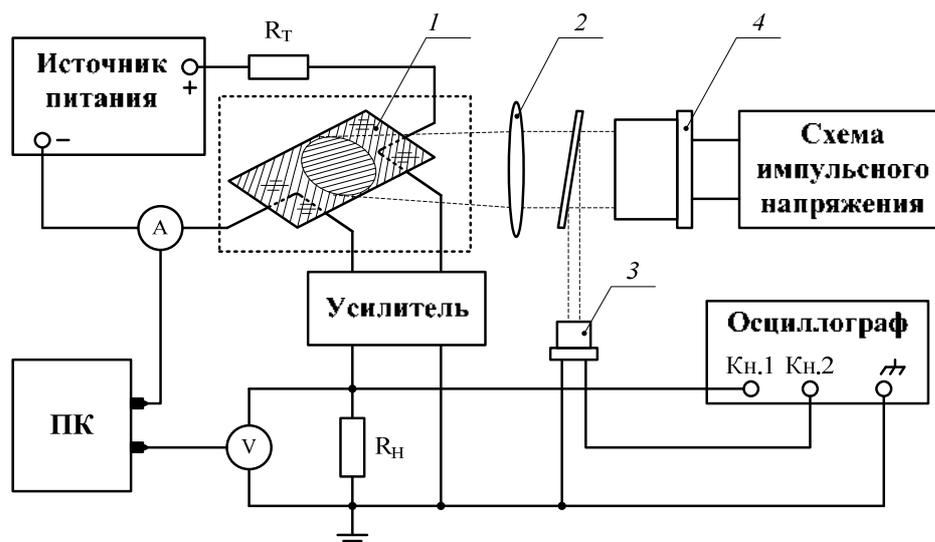


Рисунок 2.8 – Схема экспериментальной установки измерения теплоемкости и постоянной времени резистивных элементов: 1) исследуемый элемент; 2) форсирующая линза; 3) фотодиод; 4) лазерный диод

Методика эксперимента заключалась в следующем. На свободную от электродов сторону резистивных элементов был нанесен идентичный слой черных гелевых чернил. Измерение мощности отраженного излучения от поверхности элементов показало, что нормированный коэффициент поглощения оптического излучения нанесенного слоя, полученный для всех элементов, был очень близок и равен  $0,43 \pm 0,02$ . Электроды Ni, 1-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>, 2-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub> и Ti<sub>50</sub>Ni<sub>35</sub>Cu<sub>15</sub> элементов припаивались к печатным платам, закрепленным на дне защитного корпуса. Лазерный диод ML101J21 (Mitsubishi Electric Corporation) с оптическими элементами крепился на крышке корпуса с возможностью горизонтального смещения в любом направлении. Падение напряжения на элементе усиливалось и регистрировалось вольтметром. Запись данных вольтметра и амперметра со скоростью одно измерение в секунду осуществлялось с помощью ПК по средствам интерфейса USB. Временная зависимость изменения напряжения элементов и мощности лазерного диода фиксировалась осциллографом в режиме самописца. Принципиальная схема усилителя показана на рисунке 2.9. Коэффициент усиления  $DI$  при работе с резистивным элементом

из Ni составлял  $98,8 \pm 0,2$ ; из  $1\text{-Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$  и  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{35}\text{Cu}_{15}$  –  $19,31 \pm 0,04$ , из  $2\text{-Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$  –  $18,72 \pm 0,04$ .

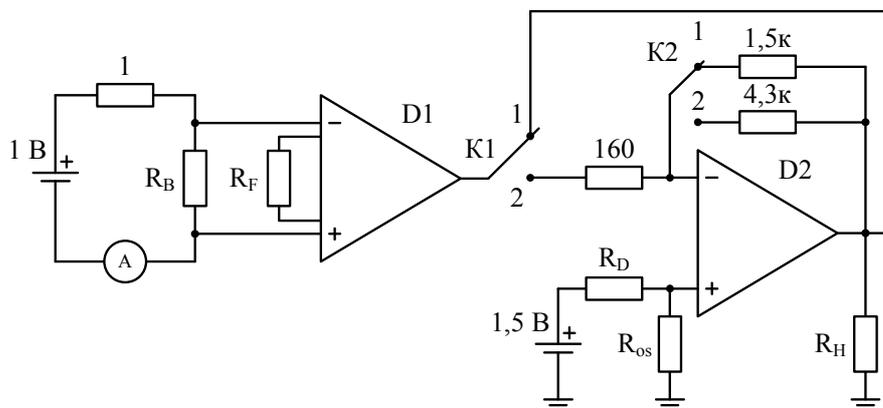


Рисунок 2.9 – Принципиальная электрическая схема усилителя:  $D1$  – инструментальный усилитель INA128 (Texas Instruments, США);  $D2$  – операционный усилитель LMH6626 (Texas Instruments, США);  $R_B$  – сопротивление исследуемого элемента;  $R_F$  – сопротивление усиления;  $R_D$  и  $R_{os}$  – сопротивления делителя напряжения;  $R_L$  – сопротивление нагрузки;  $K1$  и  $K2$  - переключатели

Первоначально переключатель  $K1$  устанавливался в положение  $1$ . На выходе источника питания выставлялось напряжение  $1$  В. Ток, протекающий через исследуемый резистивный элемент, с учетом сопротивления ограничительного резистора  $R_T = 1$  Ом составлял  $1$  А и регистрировался амперметром. После прогрева элемента и стабилизации его сопротивления, запускался лазерный диод с длиной волны излучения  $650$  нм. Питание лазера осуществлялось в периодическом режиме прямоугольными импульсами с длительностью  $10$  секунд и скважностью  $2$ . Сбор экспериментальных данных осуществлялся в течение  $20$  полных периодов работы лазера. Мощность лазера регистрировалась тепловым приемником 818P-001-12 (Newport Corporation, США) до и после каждого цикла измерений с максимальной погрешностью  $\pm 0,5$  %. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 2.5, где  $V_s$  – усредненное значение падения напряжения на элементе в начале воздействия лазерного излучения,  $V_f$  – усредненное значение падения напряжения на элементе под воздействием лазерного излучения,  $I$  – усредненное значение тока смещения

элементов. Погрешность прямых многократных и косвенных измерений определена согласно ГОСТ Р8.736–2011 и [51]. Коэффициент Стьюдента для измеряемых величин со степенью свободы 18 и при доверительной вероятности 0,99 составлял 2,9.

Для измерения постоянной времени резистивных элементов переключатель *K1* устанавливался в положение 2. На положительном входе *D2* выставлялось напряжение смещения  $U_{os} \approx 4 - 5$  мВ, что требовало подбора индивидуального делителя  $R_D$  и  $R_{os}$  для каждого элемента. Изменение падения напряжения на элементах после включения лазера в течение 10 полных периодов его работы регистрировалось осциллографом в режиме самописца с шагом 5 мс. Время нарастания и спада оптических импульсов было измерено с помощью фотодиода ВРW24R (Vishay Intertechnology, США) и составляло менее 20 мкс. Коэффициент усиления *D2* при исследовании резистивного элемента из  $Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$  был равен  $27,31 \pm 0,05$ , в остальных экспериментах –  $9,97 \pm 0,02$ . Результаты расчета  $\tau$  представлены в таблице 2.6, а на рисунках 2.10 – 2.13 приведена временная зависимость падения напряжения на элементах в начале воздействия лазерного излучения. Данные по элементу из  $Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$  при  $P_{rad} = 58$  мВт отсутствуют, поскольку в этом случае, при нагреве, сплав испытывает фазовый переход.

Таблица 2.5

## Экспериментальные данные

Параметр		Материал элемента			
		1- $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$	2- $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$	$Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$	Ni
28 мВт	$I$ , А	$1,061 \pm 0,005$	$1,057 \pm 0,005$	$1,057 \pm 0,005$	$1,059 \pm 0,005$
	$V_s$ , мВ	$270,1 \pm 0,2$	$275,3 \pm 0,2$	$342,7 \pm 0,2$	$158,7 \pm 0,1$
	$V_f$ , мВ	$278,2 \pm 0,2$	$291,6 \pm 0,2$	$345,4 \pm 0,2$	$167,9 \pm 0,1$
58 мВт	$I$ , А	$1,062 \pm 0,005$	$1,058 \pm 0,005$	—	$1,061 \pm 0,005$
	$V_s$ , мВ	$270,7 \pm 0,2$	$275,8 \pm 0,2$	—	$159,30 \pm 0,14$
	$V_f$ , мВ	$287,0 \pm 0,2$	$309,9 \pm 0,2$	—	$181,30 \pm 0,14$

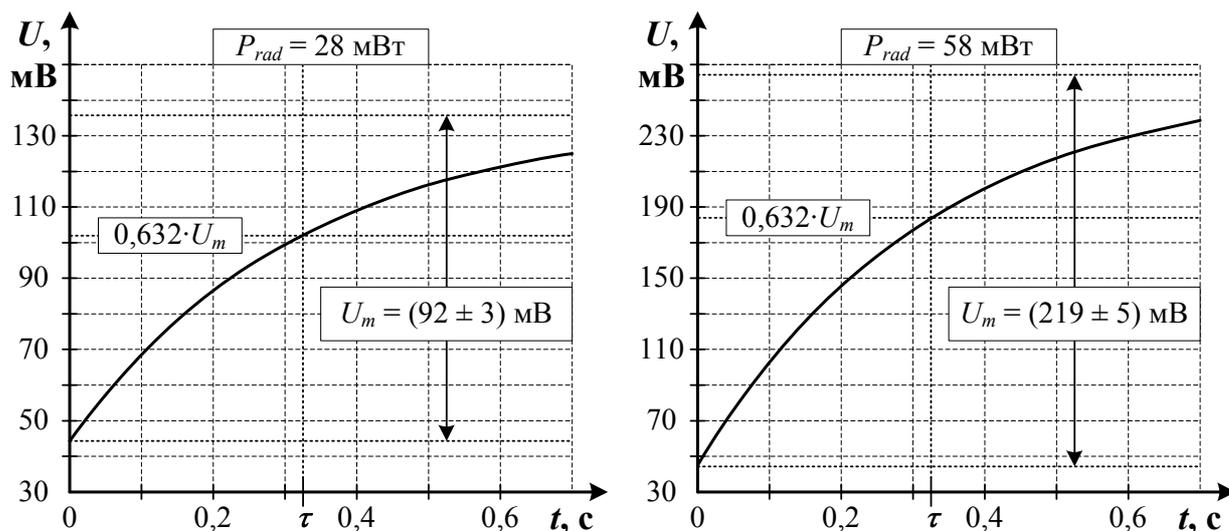
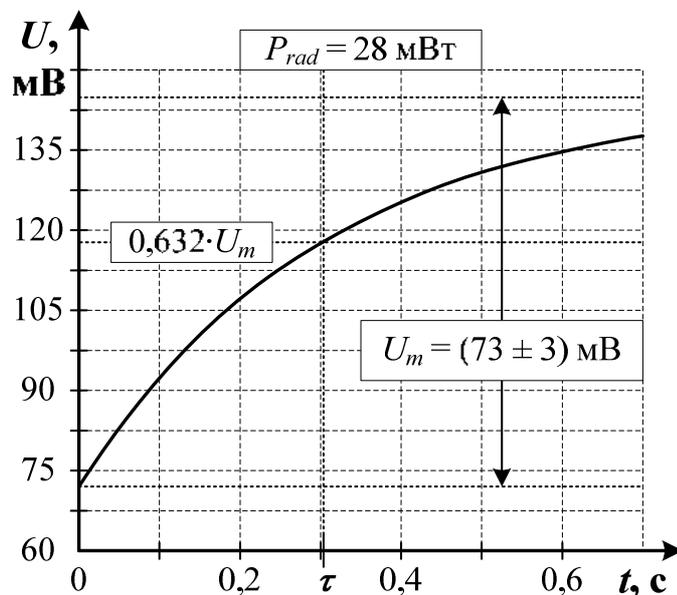


Рисунок 2.10 – Временная зависимость падения напряжения на Ni-элементе

Таблица 2.6

## Постоянные времени отклика резистивных элементов

Параметр	Материал элемента			
	1-Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>	2-Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub>	Ni
$\tau, \text{ с}$	$0,33 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,02$	$0,31 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,02$

Рисунок 2.11 – Временная зависимость падения напряжения на Ti<sub>50</sub>Ni<sub>35</sub>Cu<sub>15</sub>-элементе

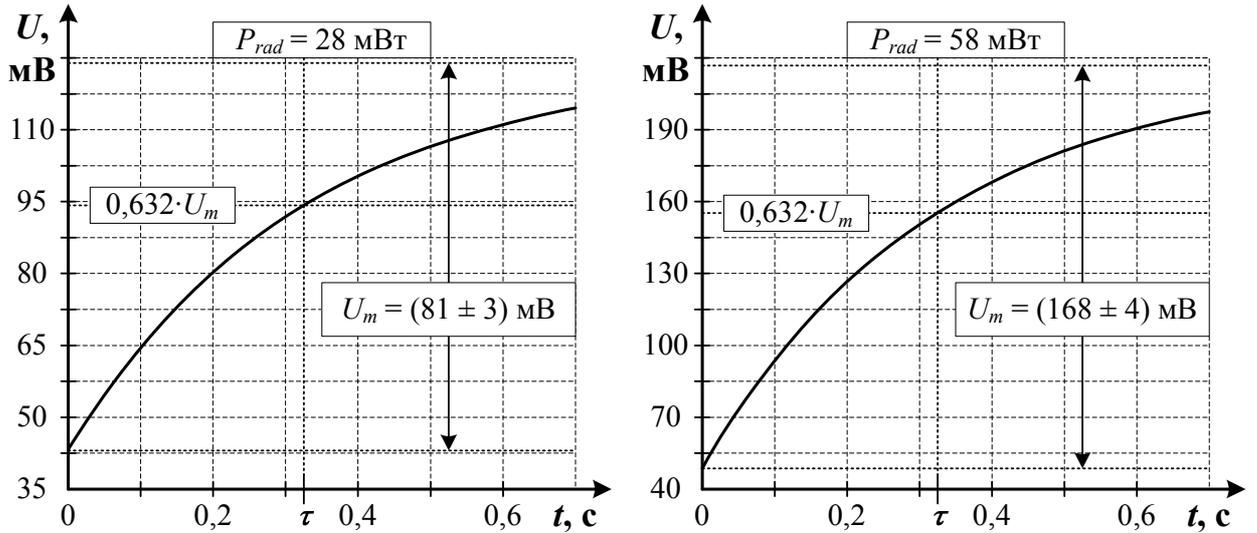


Рисунок 2.12 – Временная зависимость падения напряжения на 1-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>-элементе

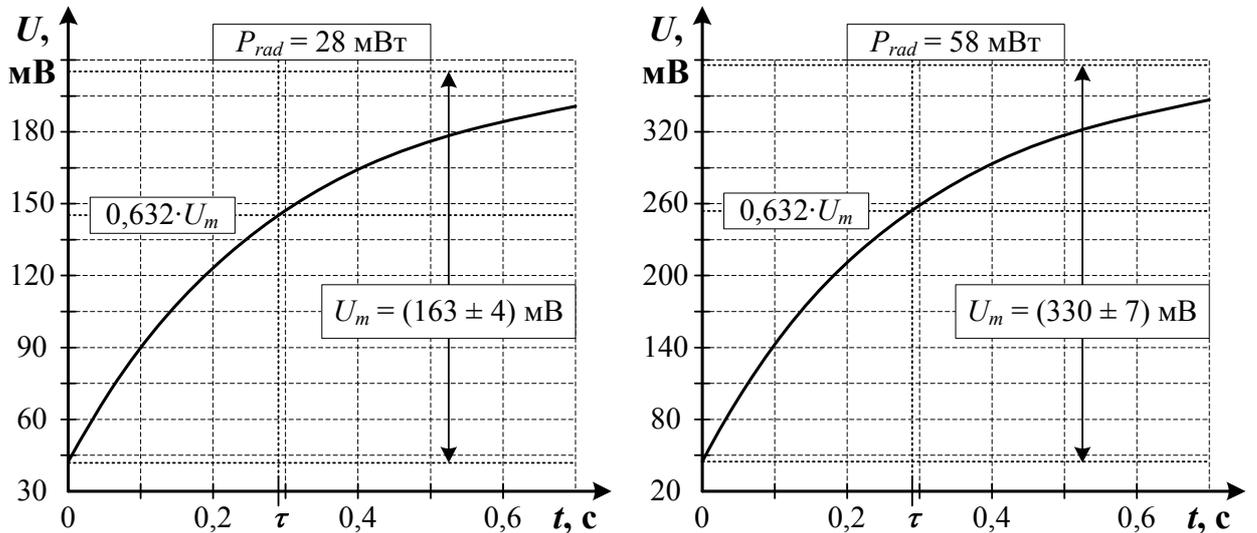


Рисунок 2.13 – Временная зависимость падения напряжения на 2-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>-элементе

Расчет теплоемкости материала резистивного элемента и теплопроводности его конструкции в целом был проведен на основании результатов оценки вольт-ваттной чувствительности по формуле:

$$R_v = \frac{(V_f - V_s)}{k_{yc} \cdot P_{rad} + I(V_f - V_s)}, \quad (2.20)$$

где  $k_{yc}$  – суммарный коэффициент усиления схемы;  $I \cdot (V_f - V_s) / k_{yc} = \delta P$  – мощность собственного разогрева болометра [Вт].

В таблице 2.7 представлены результаты оценки  $H$  и  $G$ :

$$H = \frac{\eta I \alpha R_c \tau}{R_V}, \quad (2.21)$$

$$G = \frac{\eta I \alpha R_c}{R_V}. \quad (2.22)$$

Таблица 2.7

Вольт-ваттная чувствительность, теплоемкость материала и теплопроводность резистивного элемента

Параметры		Материал элемента			
		1-Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>	2-Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub>	Ni
28 мВт	$R_V$ , мВ/Вт	14,6 ± 0,6	30,0 ± 0,8	4,9 ± 0,5	3,3 ± 0,1
58 мВт	$R_V$ , мВ/Вт	14,8 ± 0,4	30,3 ± 0,8	—	3,8 ± 0,1
$H$ , 10 <sup>-4</sup> Дж/К		3,3 ± 0,2	1,94 ± 0,14	3,5 ± 0,8	4,4 ± 0,4
$G$ , 10 <sup>-3</sup> Вт/К		1,01 ± 0,05	0,67 ± 0,03	1,2 ± 0,2	1,4 ± 0,1

Удельная теплоемкость материала резистивного элемента вычислена по формуле:

$$c = \frac{H}{\rho L h w}, \quad (2.23)$$

а результаты расчета приведены в таблице 2.8. Плотность TiNi сплавов и Ni согласно [53 – 55] равны 6,45 г/см<sup>3</sup> и 8,9 г/см<sup>3</sup> соответственно. Как видно, удельная теплоемкость Ni соответствует справочным данным [55], а удельная теплоемкость 1-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub> и 2-Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>, полученных двумя разными способами термомеханической обработки одного и того же сплава, отличаются минимум в 1,47 раза.

Удельная теплоемкость материала элементов

Параметр	Материал			
	1-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	2-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub>	Ni
<i>c</i> , Дж/кг·К	440 ± 30	260 ± 20	400 ± 100	450 ± 40

Дополнительно проведенные исследования показали, что роль электродов резистивных элементов в исследуемых тепловых процессах пренебрежимо мала. Также на это указывает то, что удельная теплоемкость материалов элементов, полученная на основании практических данных, в целом соответствует справочным данным (для сплавов на основе TiNi *c* находится в диапазоне 400 – 500 Дж/кг·К) [53]. При этом меньшее значение *c*, полученное для сплава 2-Ti<sub>50.5</sub>Ni<sub>49.5</sub>, показывает потенциал подобных сплавов к её уменьшению. Основываясь на результатах исследования резистивных элементов, имеющих близкие геометрические размеры и идентичную конструкцию в условиях прохождения через них одинакового тока смещения, а также основываясь на экспериментальных результатах сторонних исследователей, можно заключить следующее:

- теплопроводность Ni элемента толщиной 38 мкм отличается от теоретических расчетов, проведенным согласно (2.10), более чем в 2,5 раза;
- теплопроводность элементов на основе TiNi толщиной 40 мкм отличается от теоретических расчетов с использованием коэффициентов теплопроводности из научных работ более чем на 80 %;
- постоянная времени отклика резистивных элементов из металлов и металлических сплавов, когда подложка является эффективным теплоизолятором, главным образом определяется их размерами и конструкцией.

Таким образом, используя данные материалов с максимально отличающимися *G* и *H*, можно принять верным равенство  $\tau_1/\tau_2 = 1 \pm 11,3\%$  для выражения (2.14). Далее требуется провести сравнение *T<sub>c</sub>*, *R<sub>c</sub>* и *R<sub>0</sub>* резистивных

элементов при  $T_0 = 293$  К, значения которых приведены таблице 2.9 и получены согласно следующим выражениям:

$$T_c = T_0 + \frac{I^2 R_0}{G}, \quad (2.24)$$

$$R_c = R_0 \left( 1 + \alpha \frac{I^2 R_0}{G} \right), \quad (2.25)$$

Таблица 2.9

Результаты расчета  $T_c$ ,  $R_c$  и  $R_0$  исследованных резистивных элементов

Параметр	Материал элемента			
	1-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	2-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub>	Ni
$R_0, 10^{-3}$ Ом	12,78 ± 0,02	13,08 ± 0,02	16,68 ± 0,02	1,53 ± 0,02
$R_c, 10^{-3}$ Ом	13,23 ± 0,03	14,00 ± 0,06	16,88 ± 0,05	1,54 ± 0,02
$\rho_c / \rho_0$	1,036 ± 0,003	1,070 ± 0,005	1,012 ± 0,003	1,01 ± 0,01
$T_c, К$	307,3 ± 0,7	315 ± 1	309,2 ± 0,7	294,2 ± 0,1
$T_c / T_0$	1,049 ± 0,003	1,075 ± 0,004	1,060 ± 0,010	1,004 ± 0,001

При сравнении материалов резистивных элементов неохлаждаемых болометров необходимо учитывать, что элементы из металла с высоким  $\rho_0$  обладают большим напряжением Джонсоновских шумов за счет большего нагрева и сопротивления  $R_0$  по сравнению с элементами из металла с низким  $\rho_0$  при равных геометрических размерах, одинаковых рабочих токах и конструкции. Поэтому, основываясь на полученных данных для элементов, удельные сопротивления которых отличаются более чем на порядок, можно принять верным равенство  $\rho_{c1}/\rho_{c2} = (\rho_{01}/\rho_{02}) + 7,5 \%$  и  $T_{c1}/T_{c2} = (T_{01}/T_{02}) + 7,9 \%$  при условии, что  $\rho_{01} > \rho_{02}$ . Таким образом, выражение (2.14) для установленных граничных условий преобладания  $V_J$  или  $V_{iamp}$  примет следующий вид:

$$\frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} = N = (0,89 \dots 1,19) \cdot \left( \frac{\rho_{01} \alpha_1}{c_1 \rho_1} \right) \cdot \left( \frac{c_2 \rho_2}{\rho_{02} \alpha_2} \right)$$

для  $R_0 < 10 \text{ Ом}$  и  $w > 0,2 \text{ мкм}$  ,

(2.26)

$$N > \frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} \geq (0,89 \dots 1,27) \cdot \left( \frac{\sqrt{\rho_{01}} \alpha_1}{c_1 \rho_1} \right) \cdot \left( \frac{c_2 \rho_2}{\sqrt{\rho_{02}} \alpha_2} \right)$$

для  $R_0 > 10 \text{ Ом}$  и  $w < 0,2 \text{ мкм}$  .

(2.27)

Из (2.26) и (2.27) следует принципиально важный вывод о том, что для создания высокочувствительных неохлаждаемых металлических болометров материал резистивного элемента должен обладать лучшей совокупностью ряда электрофизических свойств. А именно, характеризоваться не только высоким ТКС [23, 56], как это принято, но и высоким значением удельного электросопротивления [23], минимальной удельной теплоемкостью [57, 58] и плотностью.

В итоге, по результатам оценки согласно выражению (2.26) было установлено, что сплав  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  в сравнении со всеми технологическими применимыми металлами обладает наилучшей совокупностью свойств, требуемой для создания высокочувствительных неохлаждаемых болометров [59]. В таблице 2.10 приведен необходимый для оценок ряд электрофизических характеристик технологически применимых металлов и некоторых металлических сплавов из [60, 61], а также результаты расчета отношения пороговых чувствительностей болометров на их основе согласно выражению (2.26), где основным материалом является  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  сплав. Отметим, что для проведения объективной оценки согласно выражению (2.27), необходимы детальные исследования по выявлению факторов влияющих на ряд свойств материала резистивных элементов субмикронной толщины. Тем не менее, расчеты согласно (2.27) на основании известных литературных данных также подтверждают, что сплавы на основе  $TiNi$  находятся в числе наиболее перспективных материалов для неохлаждаемых болометров.

## Электrofизические характеристики металлов и некоторых сплавов.

Результаты расчета  $NEP_{metal} / NEP_{Ti50.5Ni49.5}$ 

Материал	Параметр				$\frac{NEP_{metal}}{NEP_{Ti50.5Ni49.5}}$
	$\alpha, 10^{-3} K^{-1}$	$\rho, г/см^3$	$\rho_0, мкОм \cdot м$	$c, Дж/кг \cdot K$	
Металлические сплавы					
2-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	3,22	6,45	1,09	259	1
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub> (II)	2,1	6,45	1,25	419	2,2
1-Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	2,49	6,45	1,11	441	2,2
Ni <sub>48</sub> Fe <sub>52</sub>	3,6	8,18	0,48	502	5
Ni <sub>50</sub> Fe <sub>50</sub>	3,5	8,25	0,43	481	5,6
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>35</sub> Cu <sub>15</sub> (I)	0,74	6,45	1,25	419	7
Ni <sub>52</sub> Fe <sub>48</sub>	3,3	8,2	0,37	500	7,1
Ni <sub>36</sub> Fe <sub>64</sub>	1,1	8,05	0,82	515	10
Ni <sub>70</sub> Fe <sub>30</sub>	3,5	8,45	0,21	520	13
Ni <sub>96</sub> Mn <sub>2</sub> Al <sub>2</sub>	1,89	8,6	0,29	523	17
Ni <sub>35</sub> Cr <sub>20</sub> Fe <sub>45</sub>	0,4	7,94	1,01	460	19
Металлы					
Zr (цирконий)	4,4	6,5	0,4	285	2,2
Ti (титан)	3,5	4,5	0,54	528	2,6
Hf (гафний)	4,4	13,3	0,35	144	2,7
Pb (свинец)	4,2	11,4	0,2	129	3,7
V (ванадий)	3,9	6,1	0,248	502	6,7
Re (рений)	4,5	21	0,19	138	7,1
Sn (олово)	4,6	7,3	0,115	256	7,4
Cr (хром)	5,9	7,2	0,13	461	9
Mn (марганец)	0,4	7,4	1,44	448	12

Та (тантал)	3,5	16,6	0,125	153	12
Fe (железо)	6,5	7,9	0,09	440	12
Nb (ниобий)	2,6	8,6	0,151	272	13
Cd (кадмий)	4,3	8,6	0,077	230	13
Pt (платина)	3,9	21,5	0,106	134	14
Pd (палладий)	4,2	12	0,1	247	14
Ni (никель)	7,2	8,9	0,069	452	16
Co (кобальт)	6,6	8,8	0,062	440	19
Mg (магний)	4,3	1,74	0,046	1025	19
Os (осмий)	4,1	22,5	0,08	131	19
W (вольфрам)	4,8	19,3	0,057	134	20
Ru (рутений)	4,1	12,3	0,072	243	20
Mo (молибден)	4,35	10,2	0,057	255	22
Zn (цинк)	4,2	7,1	0,059	389	23
Ir (иридий)	4,5	22,7	0,047	135	31
Rh (родий)	4,4	12,4	0,043	243	33
Al (алюминий)	4,5	2,7	0,027	900	43
Au (золото)	4	19,3	0,022	128	59
Ag (серебро)	4,1	10,5	0,016	234	78
Cu (медь)	4,3	8,9	0,017	385	99

Под технологически применимыми металлами подразумеваются материалы, за исключением:

- радиоактивных, как Th (торий), Tc (технеций), U (уран) и Po (полоний);
- токсичных, как Be (бериллий) или Tl (таллий);
- химически активных, как Ba (барий); Ca (кальций), Sr (стронций) и лантаноиды;

- хрупких полуметаллов, как Sb (сурьма) и Bi (висмут);
- металлов с температурой плавления ниже 200 °С, как Rb (рубидий), Na (натрий), Li (литий), K (калий), In (индий), Ga (галлий) и Cs (цезий).

Стоит отметить, что Bi применялся в качестве резистивных элементов тепловых приемников, в том числе в составе соединений [62 – 65]. Согласно экспериментальным данным тонкие пленки из Bi имеют дрейф удельного электросопротивления относительно времени в стабильных термодинамических условиях [63, 66]. Поэтому, в случае использования Bi, для коррекции данных необходимо применение дополнительных технических и/или программных решений.

Электрофизические характеристики приведенных в таблице 2.10 Ni-Fe сплавов взяты из базы данных материалов MatWeb. Согласно анализу, в том числе баз данных Total Materia, MatNavi, Matdat, для тепловых приемников могут представлять интерес некоторые высокоомные (до 2 мкОм·м) никелевые и титановые сплавы, а также стали. Однако трудность выбора оптимального материала резистивного элемента для неохлаждаемых болометров согласно выражению (2.26) и (2.27) из всей номенклатуры известных металлических сплавов заключается в отсутствии информации о необходимой совокупности параметров для большинства составов. Вместе с тем, как видно из результатов оценки, болометр сопротивлением менее 10 Ом на основе сплава  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  потенциально имеет более чем 2-х кратное превосходство в пороговой чувствительности по сравнению со всеми технологически применимыми металлами и некоторыми сплавами.

Проведенные исследования резистивных элементов позволили:

- определить электрофизические характеристики выбранных TiNi сплавов;
- получить данные, необходимые для дальнейшей разработки научно-технического обоснования выбора оптимального материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров;

- выявить недостатки используемых электрических схем, экспериментальных установок и методик измерения.

### **2.3. Разработка и исследование неохлаждаемых болометров**

#### **на основе Ni, Ti и сплава $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$**

Для сравнительных исследований были изготовлены макеты Ni-, Ti- и  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болометров. Выбор Ti обусловлен тем, что его относят к наиболее эффективным материалам неохлаждаемых болометров и, следовательно, является широко используемым для изготовления резистивных элементов. При разработке и исследовании болометров были учтены следующие недостатки, выявленные в ходе проведенных экспериментов:

- геометрические размеры резистивных элементов из разных металлов должны быть идентичными, а электродные области минимальными;
- для измерения падения напряжения на резистивных элементах необходима схема на базе прецизионного маломощного усилителя;
- при определении постоянной времени болометров вместо осциллографа с 8-и битной вертикальной разверткой следует использовать модуль аналоговых сигналов (МАС) с 12-и битными АЦП или выше, что уменьшит погрешность измерения  $\tau$  более чем в 2 раза.

Конструкция разработанных болометров представлена на рисунке 2.14. Она включает в себя текстолитовую основу, полученную путем механической обработки двухсторонней монтажной печатной платы с переходными металлизированными отверстиями диаметром 1 мм и площадками 2 мм, расположенными с шагом 2,54 мм. Центральное отверстие текстолитовой основы имеет диаметр 2,3 мм. Над ним располагается резистивный элемент болометра, представляющий собой металлическую пленку с припаянными на её края медными электродами диаметром 100 мкм. Пленка находится в свободном состоянии, а её электроды с помощью пайки крепятся к металлическим площадкам. Геометрические размеры резистивных элементов болометров

представлены в таблице 2.11. Погрешность измерения линейных размеров элементов составляет  $\pm 5$  мкм, толщины –  $\pm 1$  мкм. Нормированный коэффициент поглощения оптического излучения для всех элементов был уточнен при помощи термоэлектрического приемника 818P-001-12 с электронным блоком 841-P-USB фирмы Newport Corporation и составил  $0,432 \pm 0,005$ . Температурные зависимости электросопротивления болометров в диапазоне  $15 - 85$  °С с шагом  $10$  °С, которые представлены на рисунке 2.15, были измерены с помощью экспериментальной установки на рисунке 2.6.

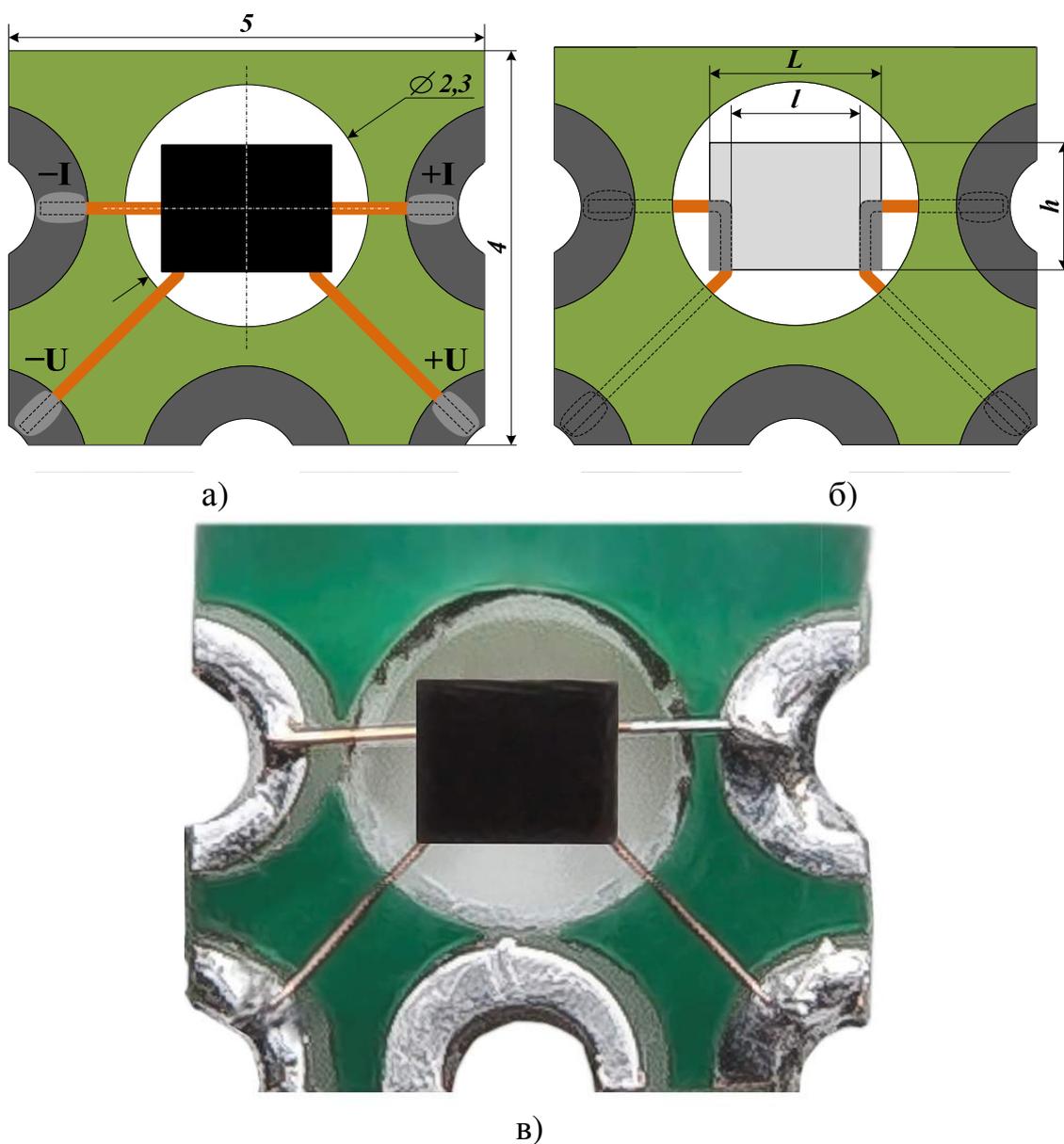


Рисунок 2.14 – Конструкция макетов болометров и обозначение линейных размеров резистивных элементов: а) вид сверху; б) вид снизу; в) фото

Размеры резистивных элементов болометров

Размер элемента	Материал элемента		
	Ni	Ti	Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>
$L$ , мм	1,58	1,59	1,61
$l$ , мм	1,19	1,19	1,2
$h$ , мм	1,35	1,34	1,33
$w$ , мкм	38	39	39

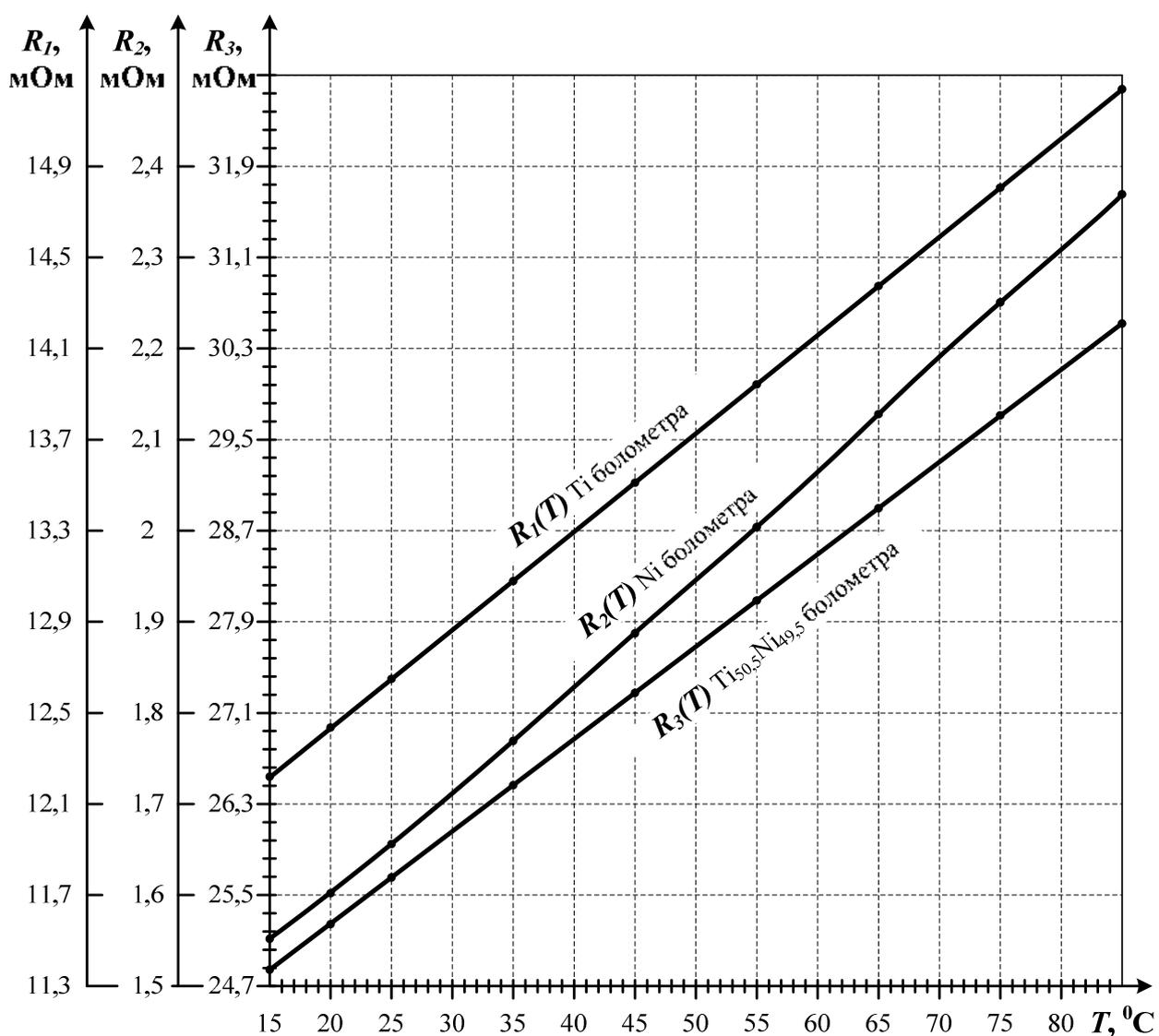


Рисунок 2.15 – Температурная зависимость электросопротивления Ni-, Ti- и Ti<sub>50.5</sub>Ni<sub>49.5</sub>-болометров

ТКС и удельное электросопротивление резистивных элементов из Ni и  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ , рассчитанные согласно (2.18) и (2.19), соответствовали значениям в таблице 2.3 и 2.4. Для Ti элемента  $\alpha = (3,47 \pm 0,05) 10^{-3} K^{-1}$ ,  $\rho_0 = (0,54 \pm 0,01) \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ . Измерение вольт-ваттной чувствительности, теплопроводности и постоянной времени болометров проводилось с помощью экспериментальной установки представленной на рисунке 2.16. В состав установки входили: источник питания iFi iPower (iFi Audio, Великобритания); MAC RT USB3000 (R-Technology, Россия) с 8-и канальным 14-и битным АЦП и частотой дискретизации до 3 МГц; амперметр на базе мультиметра U1251В; вольтметр на базе мультиметра UT71С.

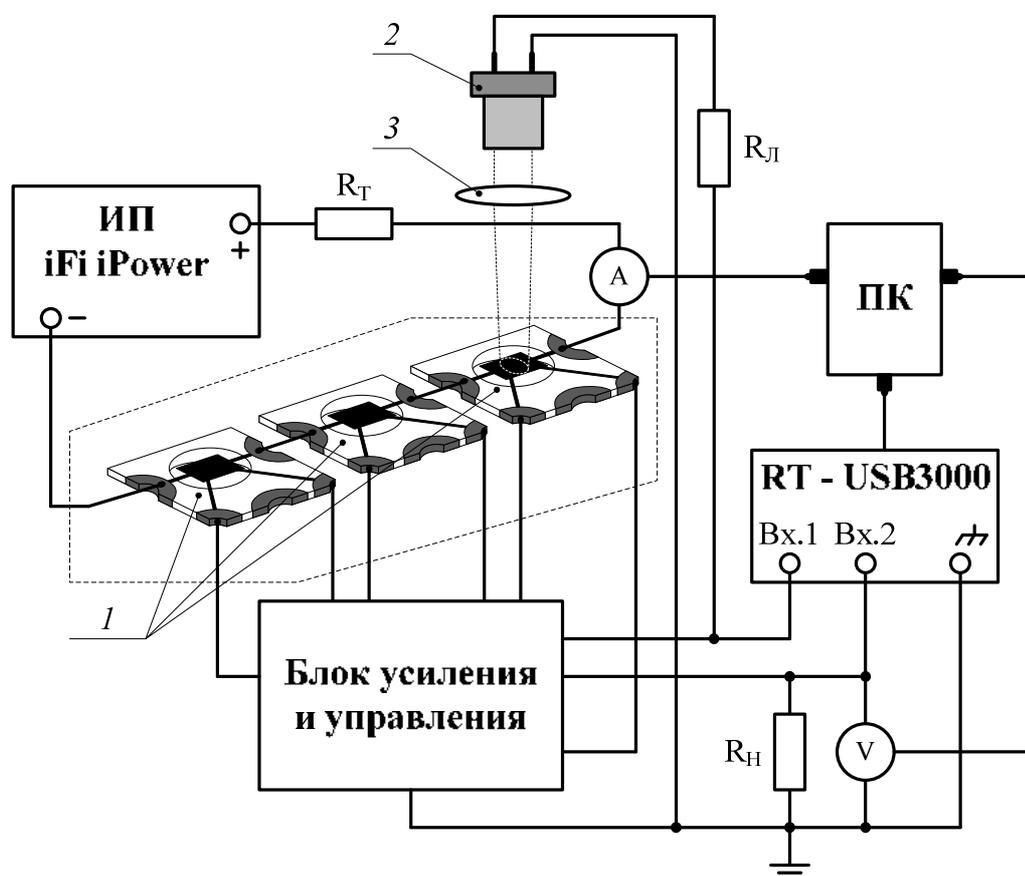


Рисунок 2.16 – Схема экспериментальной установки измерения характеристик макетов болометров: 1) болометры; 2) лазерный диод; 3) фокусирующая линза

Методика эксперимента заключалась в следующем. Болометры крепились на дне защитного корпуса. Лазерный диод ML101J21 с линзой располагался на крышке корпуса, которая имела три фиксированных положения. Напряжение на

болометрах усиливалось и регистрировалось одновременно вольтметром и МАС. Запись данных вольтметра, амперметра и МАС осуществлялась с помощью ПК по средствам интерфейса USB. После включения источника питания через болометры начинал протекать ток 1 А, при этом крышка корпуса выставлялась в первое положение. Затем, спустя 180 с, начинал функционировать блок усиления и управления. Его принципиальная схема и эюры напряжения, поясняющие работу блока, показаны на рисунках 2.17 и 2.18 соответственно.

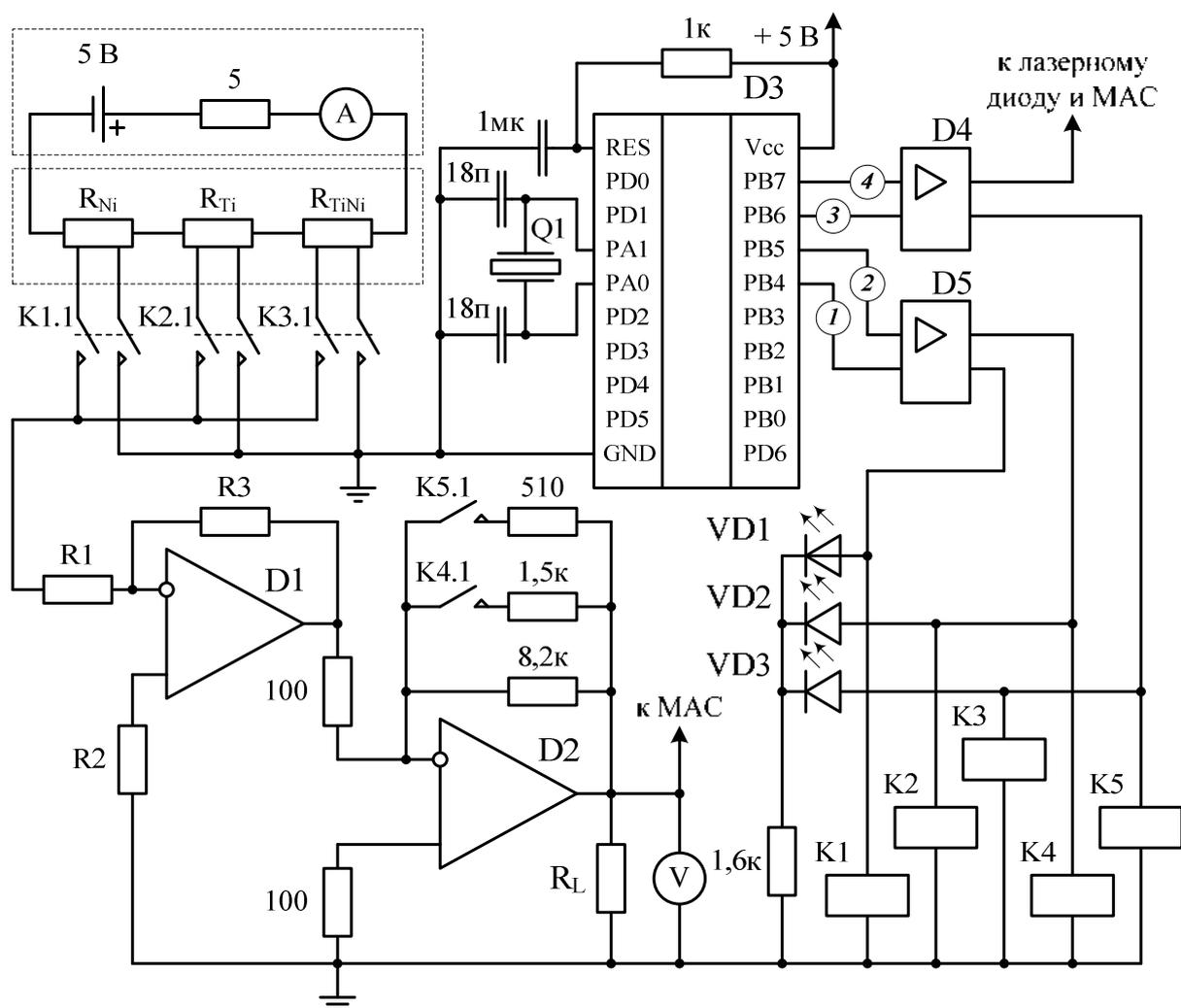


Рисунок 2.17 – Принципиальная электрическая схема блока усиления и управления

В состав схемы входили: операционные усилители  $D1$  и  $D2$  – OPA211 (Texas Instruments, США); 8-и битный микроконтроллер  $D3$  – ATtiny-2313 (Atmel Corporation, США); драйвер силовых транзисторов  $D4$  и  $D5$  – MAX5056 (Maxim

Integrated, США); двухконтактные реле  $K1 - K3$  – TRR-2A-05-D, одноконтактные реле  $K4 - K5$  – TRR-1A-05-D (Tai-Shing Electronic, Тайвань). Тактовая частота микроконтроллера задавалась внешним кварцевым резонатором  $Q1$  и составляла 1 МГц.

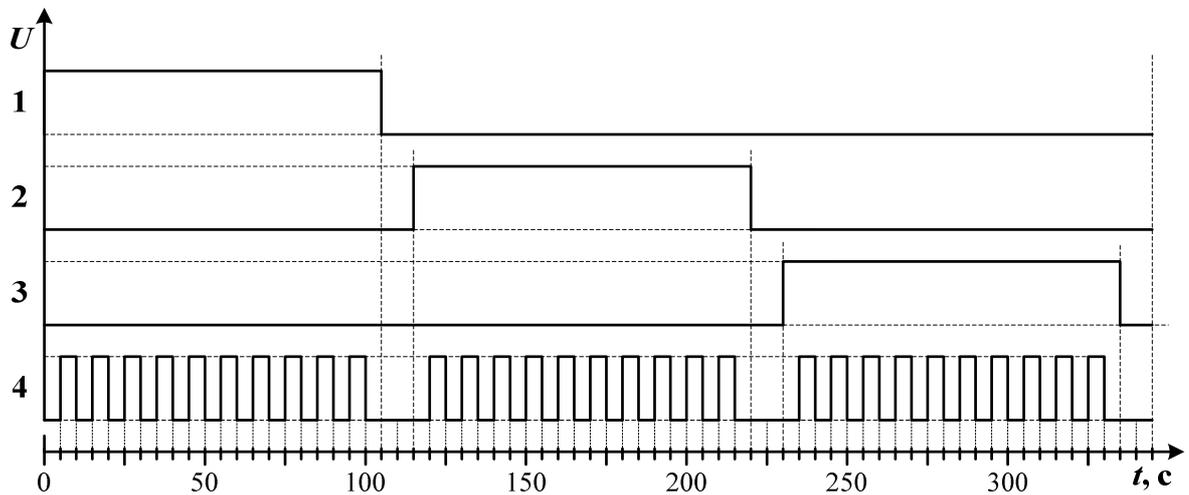


Рисунок 2.18 – Эпюры напряжения на выводах микроконтроллера

Микроконтроллером  $D3$  согласно заданному алгоритму осуществлялось управление временным режимом работы реле  $K1 - K5$  и лазерного диода. Разработка данной системы управления, осуществляющая автоматизацию работы лабораторного макета по сбору экспериментальных данных, описана в главе 4. С помощью реле  $K4 - K5$  производилась смена коэффициента усиления  $D2$ , а реле  $K1 - K3$  использовались для подключения/отключения Ni-, Ti- и  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болометров к схеме измерения. Функционирование блока усиления и управления начиналось с замыкания контактов реле  $K1$ , осуществляющего подключение Ni болометр к входу  $D1$ , а также с зажигания светодиодного индикатора  $VD1$ . Затем, по истечению 5 с, осуществлялось питание лазерного диода 10-ю импульсами длительностью 5 с и скважностью 2. Микросхемы  $D4$  и  $D5$  служили усилителями тока. С отключением индикатора  $VD1$  осуществлялось размыкание контактов реле  $K1$ . Крышка корпуса устанавливалась во второе фиксированное положение. После этого зажигался светодиодный индикатор  $VD2$  и происходило замыкание контактов реле  $K2$  и  $K4$ , осуществляющих соответственно подключение Ti болометра к входу  $D1$  и смену коэффициента усиления схемы. Далее следовала

серия импульсов, питающих лазерный диод. После отключения индикатора  $VD2$  и размыкания контактов реле  $K2$  и  $K4$ , крышка корпуса устанавливалась в третье фиксированное положение. Далее зажигался светодиодный индикатор  $VD3$  и, с помощью реле  $K3$  и  $K5$ , осуществлялось подключение  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болметра к входу  $D1$  и смена коэффициента усиления схемы. Затем следовала серия импульсов, питающих лазерный диод. После отключения индикатора  $VD3$  и размыкания контактов реле  $K3$  и  $K5$ , крышка корпуса устанавливалась в первоначальное положение и эксперимент повторялся трижды. При работе с  $Ni$  болметром суммарный коэффициент усиления  $D1$  и  $D2$  составлял  $1528 \pm 4$ ; с  $Ti - 200,7 \pm 0,4$ ; с  $Ti_{50.5}Ni_{49.5} - 93,5 \pm 0,2$ . Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 2.12. По усредненным данным построена временная зависимость падения напряжения на болметрах (рисунок 2.19) в начале воздействия лазерного излучения. Мощность лазерного диода регистрировалась термоэлектрическим приемником 818P-001-12 до и после эксперимента. Следует отметить высокую стабильность регистрируемых параметров: флуктуации тока в ходе измерений не превышали 5 мА; напряжения – 1 мВ. Погрешность прямых многократных и косвенных измерений определена согласно ГОСТ Р8.736–2011 и [51]. Коэффициент Стьюдента для измеряемых величин со степенью свободы 28 и при доверительной вероятности 0,99 составлял 2,8.

Таблица 2.12

## Экспериментальные данные

Параметр		Материал резистивного элемента		
		Ti	Ni	$Ti_{50.5}Ni_{49.5}$
$P_{rad} = 40$ мВт	$I, A$	$0,986 \pm 0,004$		
	$V_f, B$	$2,847 \pm 0,002$	$2,671 \pm 0,002$	$3,068 \pm 0,002$
	$V_s, B$	$2,609 \pm 0,002$	$2,393 \pm 0,002$	$2,739 \pm 0,002$

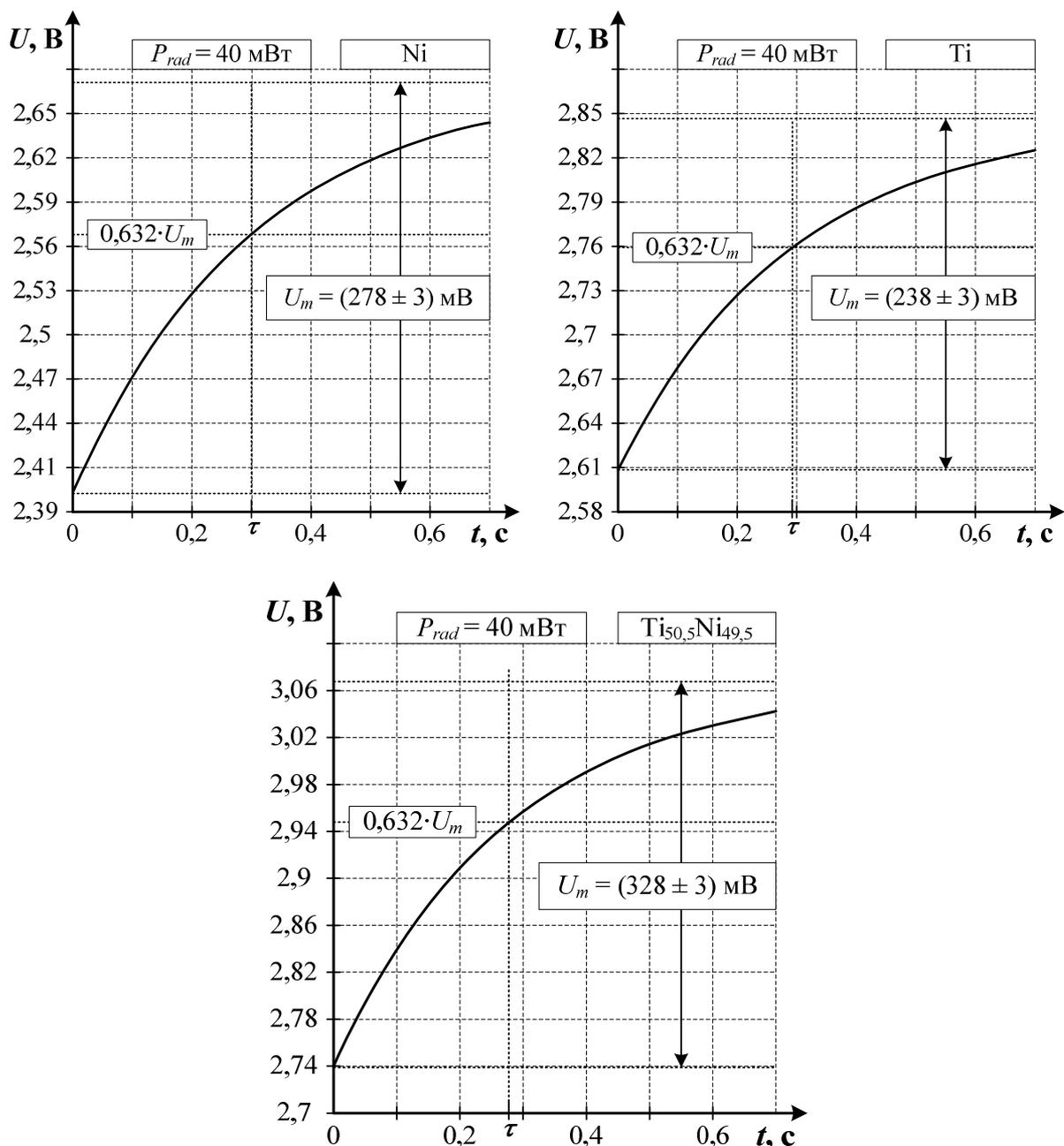


Рисунок 2.19 – Временная зависимость падения напряжения на болометрах

Оценка шумового напряжения, приведенного к входу ( $V_{iamp}$ ) и выходу ( $V_{oamp}$ ) схемы усиления, проводилась согласно [67, 68] по формулам:

$$\begin{aligned}
 V_{iamp}^2(f) = \Delta f \cdot & \left[ 4kT_0 R_1 + 4kT_0 R_2 \left( \frac{R_1 + R_3}{R_3} \right)^2 + 4kT_0 R_3 \left( \frac{R_1}{R_3} \right)^2 \right] + \\
 & + V_{nRMS}^2(f) \cdot \left( \frac{R_1 + R_3}{R_3} \right)^2 + I_{nRMS}^2(f) \cdot \left[ R_2^2 \left( \frac{R_1 + R_3}{R_3} \right)^2 + R_3^2 \left( \frac{R_1}{R_3} \right)^2 \right], \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

$$V_{oamp}(f) = A \cdot V_{iamp}(f), \quad (2.29)$$

где:

- $V_{nRMS}$  и  $I_{nRMS}$  – соответственно, среднеквадратическое значение шумового напряжения и шумового тока на входе усилителя в заданной полосе частот;
- $R_1 = R_2 = 100$  Ом,  $R_3 = 1,8$  кОм – резисторы инвертирующего усилителя  $D1$  (рисунок 2.17);
- $A$  – суммарный коэффициент усиления  $D1$  и  $D2$ .

$V_{nRMS}$  и  $I_{nRMS}$  ОРА 211 для области  $f_2 - f_1 = \Delta f$  рассчитывались согласно выражениям [69]:

$$V_{nRMS}(f) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} e_n^2(f) df}, \quad (2.30)$$

$$I_{nRMS}(f) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} i_n^2(f) df}, \quad (2.31)$$

где  $e_n(f)$  и  $i_n(f)$  – соответственно, входная спектральная плотность шумового напряжения и шумового тока ОРА 211, представленные на рисунке 2.20.

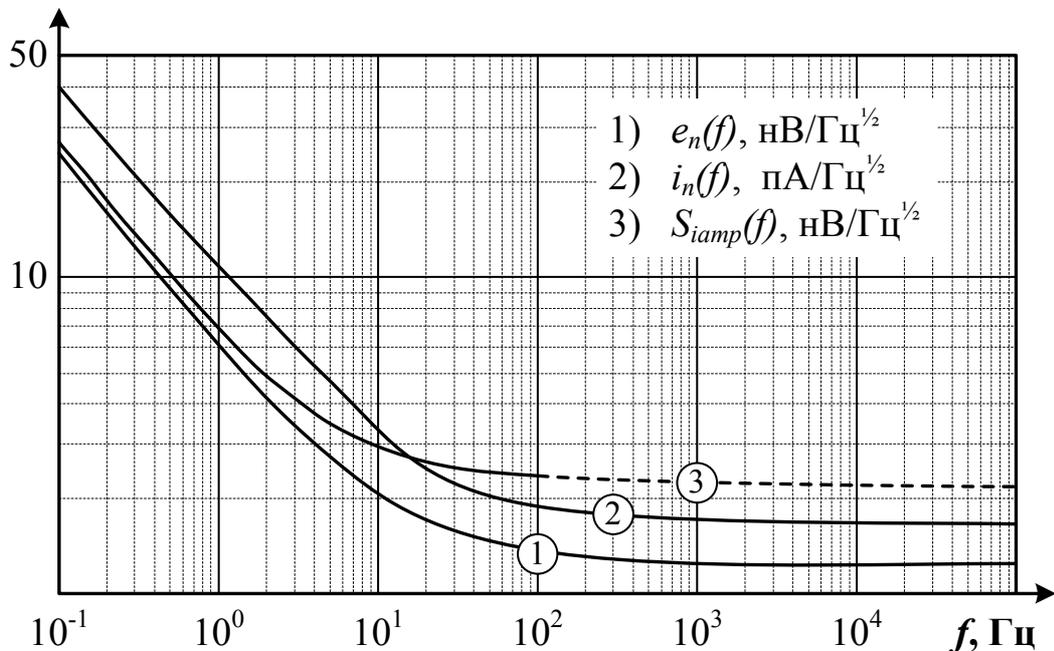


Рисунок 2.20 – Спектральная плотность шумового напряжения, приведенная к входу схемы усиления, а также шумового напряжения и шумового тока ОРА 211

В таблице 2.13 приведены характеристики разработанных болометров. Вольт-ваттная чувствительность болометров определена на частоте следования импульсов 0,1 Гц. Напряжения Джонсоновского шума и дробового шума фононной теплопроводности болометров рассчитаны для единичной полосы частот. Оценка спектральной плотности шумового напряжения (рисунок 2.20), в единичной полосе частот приведенной к входу схемы усиления (рисунок 2.17), проведена по формуле:

$$S_{iamp}(f) = \frac{V_{iamp}(f)}{\sqrt{\Delta f}} \quad (2.32)$$

Удельная теплоемкость материала резистивных элементов Ni и Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub> болометра согласно (2.22) соответствовала полученным ранее значениям, а Ti болометра соответствовала значению в таблице 2.10.

Таблица 2.13

## Характеристики макетов болометров

Параметр	Материал резистивного элемента		
	Ti	Ni	Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>
$R_V$ , мВ/Вт	$28,8 \pm 0,4$	$4,53 \pm 0,05$	$80,7 \pm 0,8$
$\tau$ , мс	$293 \pm 8$	$301 \pm 7$	$278 \pm 6$
$H$ , $10^{-4}$ Дж/К	$1,97 \pm 0,07$	$3,2 \pm 0,2$	$1,39 \pm 0,05$
$G$ , $10^{-3}$ Вт/К	$0,67 \pm 0,02$	$1,07 \pm 0,06$	$0,51 \pm 0,01$
$V_J$ , пВ ( $\Delta f = 1$ Гц)	$14,96 \pm 0,01$	$5,10 \pm 0,02$	$23,27 \pm 0,03$
$V_{th}$ , пВ ( $\Delta f = 1$ Гц)	$1,71 \pm 0,06$	$0,32 \pm 0,02$	$4,4 \pm 0,2$

Питание операционных усилителей  $D1$  и  $D2$  (рисунок 2.17) осуществлялось напряжением  $\pm 9$  В от двух солевых батарей типа «КРОНА». Ток через исследуемые болометры задавался силовым сопротивлением LTO030F5R000FTE3 (Vishay, США) и источником питания iFi iPower с выходным напряжением 5 В и среднеквадратическим напряжением шума 1 мкВ. Погрешность измерения

напряжения МАС составляла  $\pm 2,5$  мВ при разрешающей способности 1,2 мВ, а мультиметром UT71С –  $\pm 1,7$  мВ. Для работы с выходными данными МАС RT USB3000 использовалось программное обеспечение (ПО) PowerGraph 3.2.0. Частота дискретизации исследуемых сигналов задавалась пользователем в соответствующих настройках ПО и составляла 1 кГц. Согласно экспериментальным данным МАС RT USB3000 наблюдаемый уровень пикового шумового напряжения сигнала в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 кГц не превышал 2,4 мВ. При этом максимальный уровень пикового шумового напряжения на выходе схемы усиления  $V_{ор-р} = 6,6 \cdot V_{оамр}$  в данной полосе частот составлял 495 мкВ. Таким образом, точность определения значений  $V_f$  и  $V_s$  находилась в рамках погрешности используемых средств измерения. Частотная зависимость пороговой чувствительности каждого болометра, представленная на рисунке 2.21, определена по формуле:

$$NEP(f) = \frac{S_{iamp}(f) \sqrt{1 + (2\pi\tau f)^2}}{R_v} \quad (2.33)$$

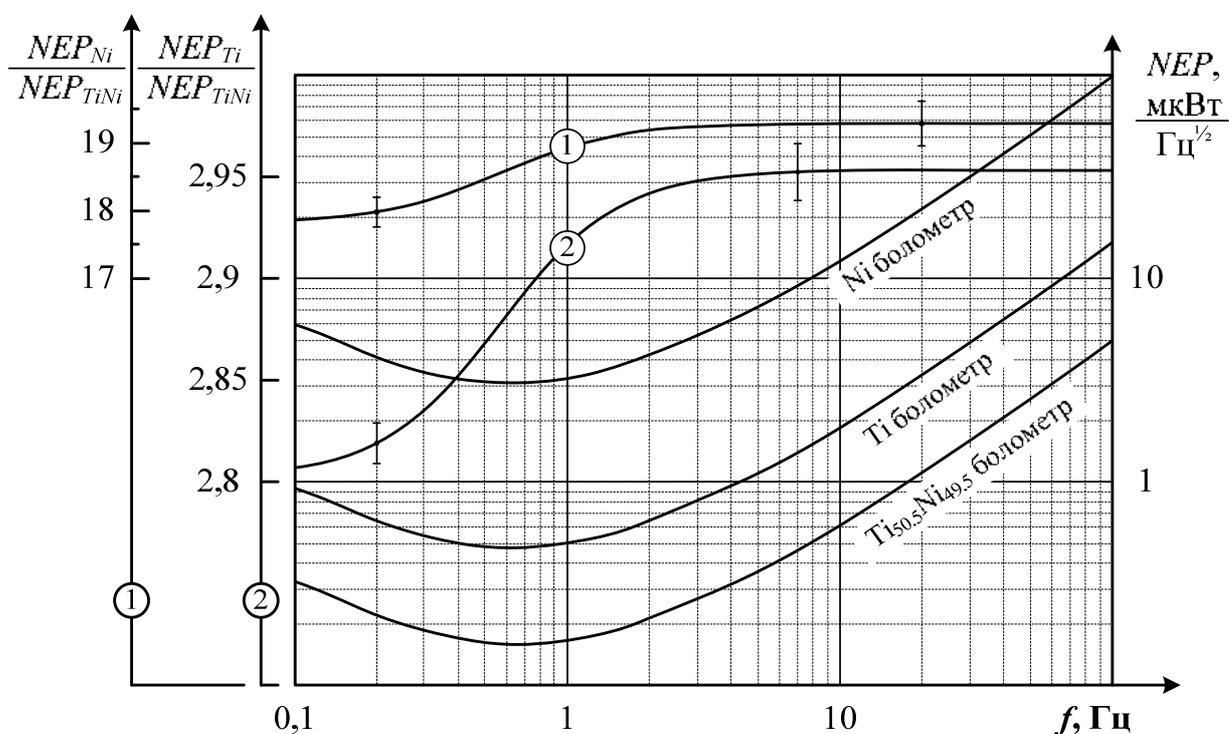


Рисунок 2.21 – Частотная зависимость пороговой чувствительности болометров и их сравнительная оценка

Полученные в эксперименте удельное электросопротивление и ТКС резистивного элемента Ni болометра соответствовали полученным ранее значениям, а ТКС элемента Ti болометра, отличался от справочных данных, представленных в таблице 2.10. Также рабочая температура  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  болометра, а, следовательно, и сопротивление его резистивного элемента, за счет большей мощности собственного разогрева, были выше аналогичных параметров ранее исследуемого  $2-Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  элемента. При этом различия между размерами резистивных элементов разработанных болометров были сведены к значениям погрешности соответствующих средств измерения. Основываясь на результатах эксперимента для болометров с максимально отличающимися  $G$ ,  $H$  и  $\rho_0$ , были приняты верными следующие равенства:  $\tau_1/\tau_2 = 1 \pm 6 \%$ ;  $\rho_{c1}/\rho_{c2} = (\rho_{01}/\rho_{02}) + 17 \%$  и  $T_{c1}/T_{c2} = (T_{01}/T_{02}) + 18 \%$  при условии, что  $\rho_{01} > \rho_{02}$ . В итоге, после уточнения выражение (2.26) примет вид:

$$\frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} = N = (0,94...1,23) \cdot \left( \frac{\rho_{01}\alpha_1}{c_1\rho_1} \right) \cdot \left( \frac{c_2\rho_2}{\rho_{02}\alpha_2} \right)$$

для  $R_0 < 10 \text{ Ом}$  и  $w > 0,2 \text{ мкм}$

(2.34)

Расчеты отношения пороговых чувствительностей болометров согласно (2.34) с учетом полученных электрофизических характеристик их резистивных элементов полностью соответствуют экспериментальным результатам (рисунок 2.21). Таким образом,  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  болометр при условии его сопротивления менее 10 Ом благодаря лучшей совокупности электрофизических свойств материала резистивного элемента имеет более чем 2-х кратное преимущество в пороговой чувствительности относительно болометров идентичной конструкции на основе всех технологически применимых металлов [59].

Исследования болометров проводились в интервале температур, в котором сплав  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  находился в однофазном низкотемпературном состоянии и не претерпевал фазовых превращений. Как известно на линейном участке двухфазной области сплавы TiNi обладают в несколько раз большим (отрицательным или положительным) ТКС ( $10^{-2} \text{ K}^{-1}$  и выше, что сопоставимо с

ТКС полупроводниковых материалов) по сравнению с однофазным состоянием. Вместе с тем, электронно-фононные взаимодействия в системе кристаллических решеток сплавов сильно зависят от процентного содержания их компонентного состава и совместно с методами кристаллизации и термомеханической обработки определяют их основные свойства [49, 70, 71]. При этом число полученных соединений (сплавов) с новыми свойствами составляет малую долю от числа возможных [50, 72]. Эти обстоятельства делают сплавы на основе TiNi перспективным материалом для неохлаждаемых металлических болометров, в том числе нового поколения.

Вместе с тем, результаты работы показывают, что установление зависимости  $\tau$  от размеров резистивных элементов позволит снять ограничения оценки  $NEP$  неохлаждаемых металлических болометров. Для этого предложен алгоритм подобных исследований, который может быть также использован для оценки эффективности неохлаждаемых болометров на основе металлов и их сплавов, основанный на измерении характеристик резистивных элементов известных размеров, при их нагреве под действием тока смещения в импульсном режиме [73]. Алгоритм состоит из минимального количества измерений, требуемых для установления необходимой совокупности характеристик резистивных элементов. В первую очередь устанавливается температурная зависимость сопротивления элемента определенных размеров. Затем с помощью выражений (2.18) и (2.19) определяется ТКС и удельное сопротивление его материала. Далее к исследуемому элементу необходимо подключить модуль АЦП и импульсную схему питания, задающую ток смещения. Амплитуду и длительность импульса тока смещения следует выбирать исходя из необходимости исключения перегрева резистивного элемента. Затем, определив временную зависимость падения напряжения на резистивном элементе с помощью модуля АЦП, необходимо известным способом оценить количество энергии  $Q$  затраченной на нагрев элемента под действием тока смещения. Тогда произведение удельной

теплоёмкости и плотности материала резистивного элемента можно рассчитать по формуле, полученной путем компиляции известных аналитических выражений:

$$c \cdot \rho = \frac{Q \rho_0 \alpha}{(\rho_c - \rho_0) l h w}. \quad (2.35)$$

При этом одним из достоинств данного алгоритма является то, что собственный нагрев элемента сводится к пренебрежимо малой величине, относительно общего количества сообщенной ему энергии. Далее, воспользовавшись полученным массивом данных для исследуемых резистивных элементов возможно установить зависимости  $\tau$  от размеров элементов, а также с использованием выражений (2.27) и (2.34) произвести оценку эффективности использования того или иного металла и металлического сплава в неохлаждаемых металлических болометрах. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет произвести выбор наиболее оптимального с точки зрения наилучшей чувствительности материала резистивного элемента.

### **Глава 3. Теоретические и экспериментальные исследования неохлаждаемых металлических болометров в составе оптико- электронных приборов**

Оптико-электронными называются приборы, действие которых основано на приеме и преобразовании электромагнитного излучения в различных диапазонах оптической области спектра, а информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением или содержится в параметрах оптического сигнала: амплитуде, частоте, фазе, состоянии поляризации, длительности импульса и т. д. [74]. Область их применения на сегодняшний день достаточно обширна, затрагивает практически все отрасли народного хозяйства, науки, техники, и при этом непрерывно расширяется. Структура современных оптико-электронных приборов разнообразна и нередко состоит из большого числа различных по своей физической природе и принципу действия звеньев – аналоговых и цифровых преобразователей электрических сигналов, микропроцессоров, механических и электромагнитных узлов и др. Основными и общими элементами схемы таких приборов являются источник излучения естественного или искусственного происхождения, приемная оптическая система, приемник излучения и электронный блок.

Неохлаждаемые металлические болометры в составе оптико-электронных приборов главным образом применяют в виде планарных интегральных антенн единичного и матричного исполнения, работающих преимущественно в ИК и терагерцовой области спектра с настройкой на заданную полосу частот [75, 76]. В настоящее время их доля рынка составляет несколько процентов от общего объема промышленного производства неохлаждаемых болометров. При этом в составе приборов ультрафиолетового или видимого диапазона длин волн болометры практически не используются.

### 3.1. Измеритель средней мощности оптического излучения

Современной элементной базой, широко применяемой в коммерческих измерителях средней мощности оптического излучения, являются фотодиодные и термоэлектрические приемники. Для фотодиодных приемников характерна высокая чувствительность и быстродействие (до  $10^{-11}$  с), низкий уровень шумов. Они работают в диапазоне длин волн от 0,2 до 2 мкм и обладают нелинейной спектральной чувствительностью. Их диапазон измерения средней мощности излучения составляет от 0,3 пВт до 3 Вт и ограничен наличием у фотодиодных приемников режима насыщения. Термоэлектрические приемники обладают близко к линейной спектральной чувствительностью в области от 0,2 до 20 мкм и работают в диапазоне измерения средней мощности излучения от 0,1 мкВт до 11 кВт. Их постоянная времени зависит от модификаций приемника, отличающихся величиной измерения максимальной средней мощности излучения, и составляет от нескольких секунд до нескольких минут. В промышленном варианте фотодиодные и термоэлектрические приемники располагают в жестком и защищенном корпусе измерительной головки (обычно совместно со схемой предварительного усиления), которая для отображения данных подсоединяется к переносному цифровому устройству или персональному компьютеру.

Для исследования Ni-, Ti- и  $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ -боллометров в качестве измерителя средней мощности излучения [77, 78] использовалась экспериментальная установка (без МАС) и методика измерения, описанные в пункте 2.3. Принципиальная электрическая схема блока усиления отличалась от схемы на рисунке 2.17 тем, что на неинвертирующий вход  $D1$  подавалось напряжение смещения  $U_{os}$ , формируемое литиевой батареей CR2032 и делителем сопротивления  $R_D$  и  $R_{os}$  (рисунок 2.9). Также в качестве  $K4$  -  $K5$  использовались двухконтактные реле. С их помощью производилась одновременно установка коэффициента усиления  $D2$  и напряжения смещения в соответствии с временным алгоритмом работы экспериментальной установки (рисунок 2.18). Суммарный коэффициент усиления  $D1$  и  $D2$  для Ni боллометра составлял  $1528 \pm 4$ ; для Ti –

$200,7 \pm 0,4$ ; для  $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$  –  $93,5 \pm 0,2$ . Источниками оптического излучения служили полупроводниковые лазеры, характеристики которых представлены в таблице 3.1. Выходная мощность  $P_{out}$  лазеров выставилась током питания. В качестве эталонного измерителя мощности излучения выступал термоэлектрический приемник 818P-001-12 совместно с электронным блоком 841-P-USB, подключенным к ПК. Минимальная погрешность измерения средней оптической мощности лазерных диодов образцовой системой составляла  $\pm (0,5 \%$  от измеренного значения +  $0,033 \%$  от полной шкалы измерения).

Таблица 3.1

## Основные характеристики лазерных диодов

Лазерный диод (фирма)	$\lambda$ , нм	$P_{max}$ , мВт	$P_{out}$ , мВт	$U$ , В	$I$ , мА
NDV4316 (Nichia Corp.)	405	120	50	4,05	73
			95	4,35	105
PLT5 510 (Osram)	520	10	5	4,9	48
			9,5	5,2	62
QFLD-635-1SAX (QPhotonics)	636	1,1	0,2	2,15	37
			0,95	2,2	45
L980P200 (Thorlabs)	980	200	195	1,45	268

Расчет мощности излучения лазерных диодов, измеренной исследуемыми болометрами, учитывал собственный разогрев их резистивных элементов и определялся согласно формулам:

$$P_{изл.} = \frac{(V_f - V_s)}{k_{yc.} R_V} - \delta P, \quad (3.1)$$

$$\delta P = \frac{I(V_f - V_s)}{k_{yc.}}. \quad (3.2)$$

Предварительная оценка температуры резистивных элементов болометров (2.8) при воздействии на них излучением мощностью 50, 95 и 195 мВт показала, что

максимальная температура Ti- и Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>-элементов может быть близкой к точке плавления контактной пайки электродов (припой ПОС 60) или превысить её, а также соответствовать двухфазной высокотемпературной области сплава Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub>. Поэтому для измерения  $P_{out} \geq 50$  мВт вольт-ваттная чувствительность болометров была снижена путем уменьшения величины тока, протекающего через резистивные элементы, а схема формирования  $U_{os}$ , не использовалась. Дополнительно к этому при  $P_{out} = 195$  мВт коэффициент поглощения Ti и Ti<sub>50,5</sub>Ni<sub>49,5</sub> резистивного элемента был уменьшен. Погрешность прямых многократных и косвенных измерений определена по ГОСТ Р8.736–2011 и [51]. Коэффициент Стьюдента для измеряемых величин со степенью свободы 28 и при доверительной вероятности 0,99 составлял 2,8. Экспериментальные данные приведены в таблице 3.2, а результаты расчета представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.2

Экспериментальные данные измерения мощности лазерного излучения

Параметры и условия измерения		Болометр		
		Ni	Ti	Ti <sub>50,5</sub> Ni <sub>49,5</sub>
$I$ , мА		$991 \pm 4$		
$R_V$ , мВ/Вт		$4,53 \pm 0,05$	$28,8 \pm 0,4$	$80,7 \pm 0,8$
$U_{os}$ , мВ		$1,44 \pm 0,05$	$12,78 \pm 0,05$	$28,89 \pm 0,06$
0,2 мВт	$V_s$ , мВ	$199,6 \pm 0,1$	$46,17 \pm 0,07$	$50,29 \pm 0,07$
	$V_f$ , мВ	$200,9 \pm 0,1$	$47,37 \pm 0,07$	$51,96 \pm 0,07$
0,95 мВт	$V_s$ , мВ	$199,6 \pm 0,1$	$46,16 \pm 0,07$	$50,31 \pm 0,07$
	$V_f$ , мВ	$206,1 \pm 0,1$	$51,86 \pm 0,07$	$58,18 \pm 0,07$
5 мВт	$V_s$ , мВ	$199,6 \pm 0,1$	$46,16 \pm 0,07$	$50,28 \pm 0,07$
	$V_f$ , мВ	$235,3 \pm 0,1$	$77,31 \pm 0,08$	$93,41 \pm 0,08$
9,5 мВт	$V_s$ , мВ	$199,6 \pm 0,1$	$46,18 \pm 0,07$	$50,31 \pm 0,07$
	$V_f$ , мВ	$265,6 \pm 0,1$	$103,46 \pm 0,09$	$129,67 \pm 0,09$

$I, \text{мА}$		$433,5 \pm 0,7$		
$R_V, \text{мВ/ВТ}$		$1,99 \pm 0,02$	$12,7 \pm 0,2$	$35,5 \pm 0,4$
50 мВТ	$V_s, \text{В}$	$1,046 \pm 0,001$	$1,102 \pm 0,001$	$1,090 \pm 0,001$
	$V_f, \text{В}$	$1,202 \pm 0,001$	$1,230 \pm 0,001$	$1,262 \pm 0,001$
95 мВТ	$V_s, \text{В}$	$1,046 \pm 0,001$	$1,102 \pm 0,001$	$1,089 \pm 0,001$
	$V_f, \text{В}$	$1,343 \pm 0,001$	$1,341 \pm 0,001$	$1,408 \pm 0,001$
$I, \text{мА}$		$433,5 \pm 0,7$		
$R_V, \text{мВ/ВТ}$		$1,99 \pm 0,02$	$8,6 \pm 0,1$	$14,8 \pm 0,2$
$\eta$		$0,432 \pm 0,005$	$0,294 \pm 0,006$	$0,181 \pm 0,007$
195 мВТ	$V_s, \text{мВ}$	$1,046 \pm 0,001$	$1,101 \pm 0,001$	$1,089 \pm 0,001$
	$V_f, \text{мВ}$	$1,686 \pm 0,001$	$1,443 \pm 0,001$	$1,364 \pm 0,001$

Таблица 3.3

Результаты измерения мощности лазерного излучения  $P_{изл.}$  в мВт болометрами и термоэлектрическим приемником (в скобках указан предел измерения)

Болометр			Образцовый прибор
Ni	Ti	Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub>	818P-001-12
$0,19 \pm 0,02$ (20)	$0,20 \pm 0,02$ (20)	$0,20 \pm 0,01$ (20)	$0,201 \pm 0,001$ (0,3)
$0,94 \pm 0,02$ (20)	$0,96 \pm 0,02$ (20)	$0,96 \pm 0,02$ (20)	$0,959 \pm 0,005$ (1)
$5,13 \pm 0,06$ (20)	$5,23 \pm 0,07$ (20)	$5,26 \pm 0,06$ (20)	$5,24 \pm 0,03$ (10)
$9,5 \pm 0,1$ (20)	$9,6 \pm 0,1$ (20)	$9,7 \pm 0,1$ (20)	$9,65 \pm 0,05$ (10)
$51,4 \pm 0,7$ (400)	$50,4 \pm 0,8$ (400)	$51,1 \pm 0,6$ (400)	$50,8 \pm 0,3$ (100)
$98 \pm 1$ (400)	$94 \pm 1$ (400)	$95 \pm 1$ (400)	$94,3 \pm 0,5$ (100)
$210 \pm 2$ (400)	$196 \pm 3$ (400)	$197 \pm 2$ (400)	$197 \pm 1$ (300)

Сравнение практических результатов измерения с модельными оценками показало, что проведение расчета мощности излучения без учета  $\delta P$  резистивных элементов болометров может приводить к существенным ошибкам измерения (рисунок 3.1).

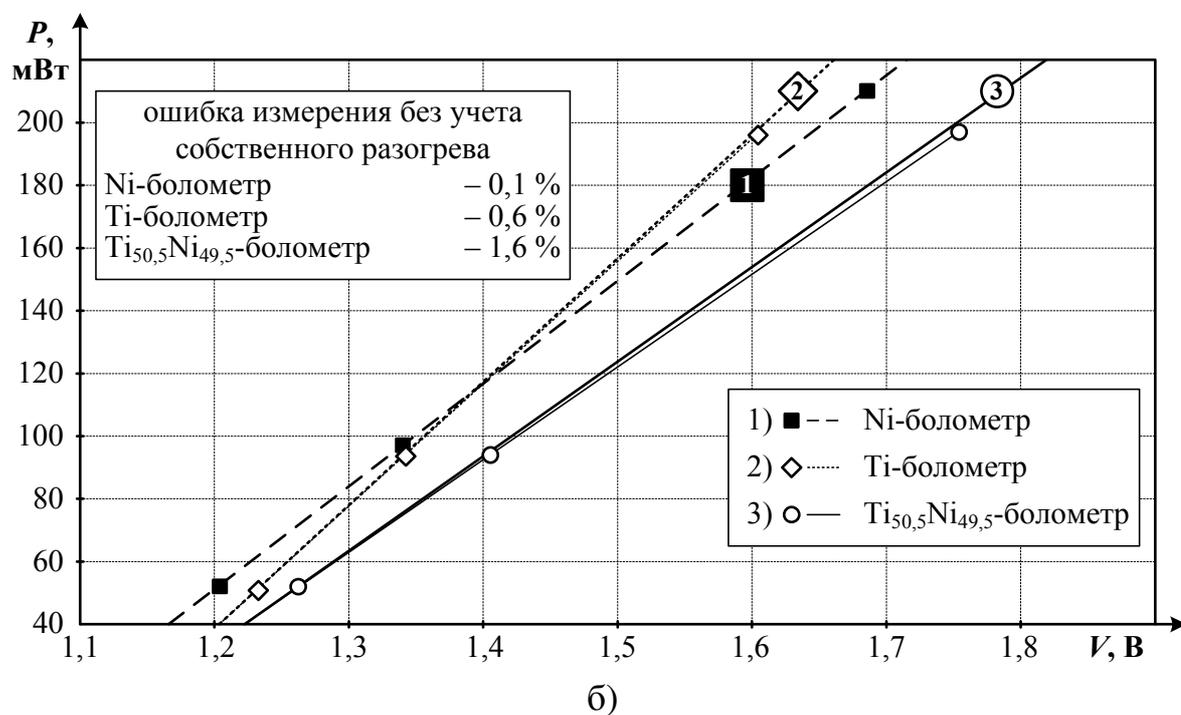
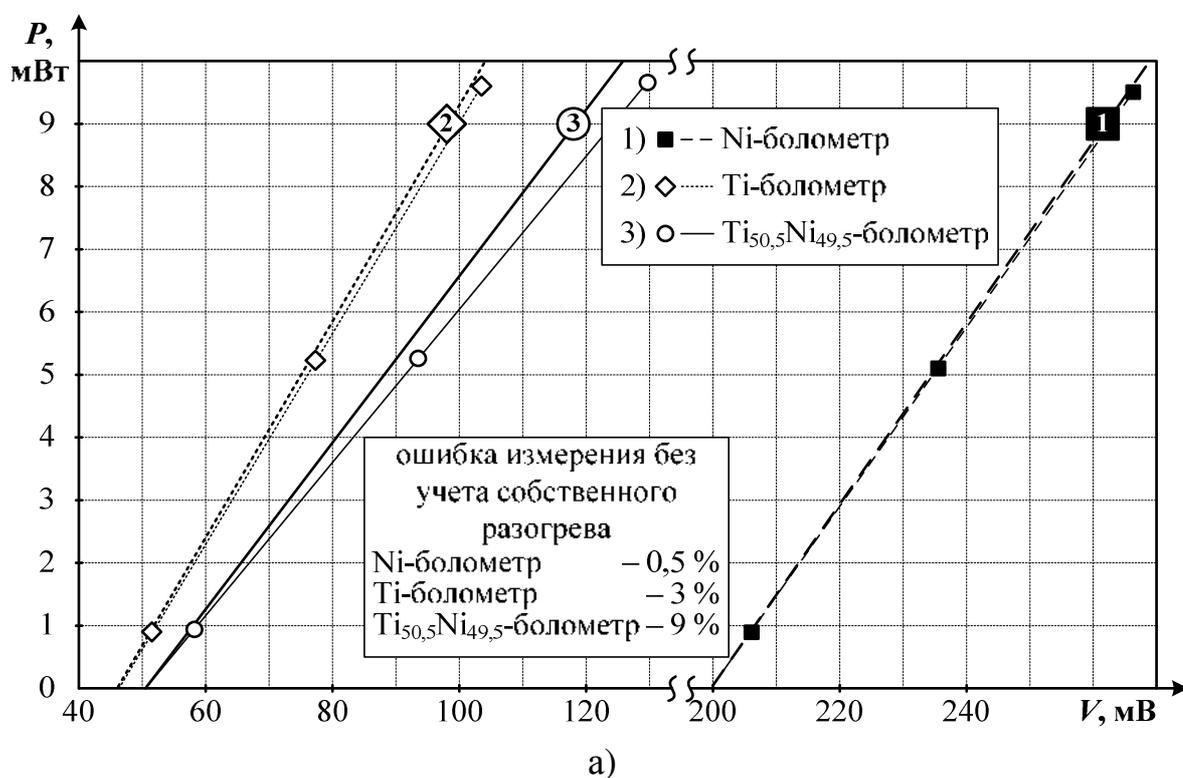


Рисунок 3.1 – Зависимость выходного напряжения экспериментальной установки от измеряемой мощности излучения: а) до 10 мВт б) до 220 мВт

Для учета  $\delta P$  в экспериментальных исследованиях необходимо было использовать помимо вольтметра дополнительно амперметр. Вместе с тем установлено, что величина ошибки измерения без учета  $\delta P$  остается постоянной во всем диапазоне измеряемых мощностей излучения. Следовательно, предварительно оценив эту величину для определенного болометра и схемы усиления как дополнительный коэффициент к аналитическому выражению (3.1) вместо  $\delta P$ , появляется возможность использования только вольтметра в измерении неохлаждаемыми металлическими мощности излучения. При этом данный способ компенсации  $\delta P$  является более практичным по сравнению с методами, предложенными в [35, 36].

На рисунке 3.2 (в дополнение к таблице 3.3) представлена зависимость погрешности экспериментальной установки от измеряемой мощности излучения с учетом  $\delta P$  для каждого исследуемого болометра. Как видно, определение мощности излучения менее 0,8 мВт на минимальном пределе измерения установки являлось некорректным с точки зрения точности измерения и требовало совершенствования схемы. Этот факт был учтен при проектировании макета по измерению суммарной солнечной радиации (глава 3, п. 3.3). При этом очевидно, что  $P_{изл.}$  измеренная Ni-болометром с коэффициент усиления схемы для Ti- или Ti<sub>50.5</sub>Ni<sub>49.5</sub>-болометров, имела бы существенно низкую точность. В итоге результаты измерения  $P_{изл.}$  лазерного излучения показали следующее:

- данные Ti- и Ti<sub>50.5</sub>Ni<sub>49.5</sub>-болометров в рамках погрешности измерения соответствовали показаниям эталонного приемника;
- данные Ni болометра отличались от показаний образцового прибора, что объясняется нелинейной зависимостью электросопротивления никеля от температуры в диапазоне 20 – 100 °С;
- основным критерием выбора материала резистивного элемента болометра для задач измерения средней мощности излучения является линейность температурной зависимости его электросопротивления, тогда как чувствительность болометра определяет исключительно диапазон измерений;

– регулирование вольт-ваттной чувствительности болометров путем изменения тока протекающего через резистивные элементы для достижения оптимальных условий измерения указал на потенциальную возможность разработки простой и эффективной системы автоподстройки диапазона измерения мощности излучения.

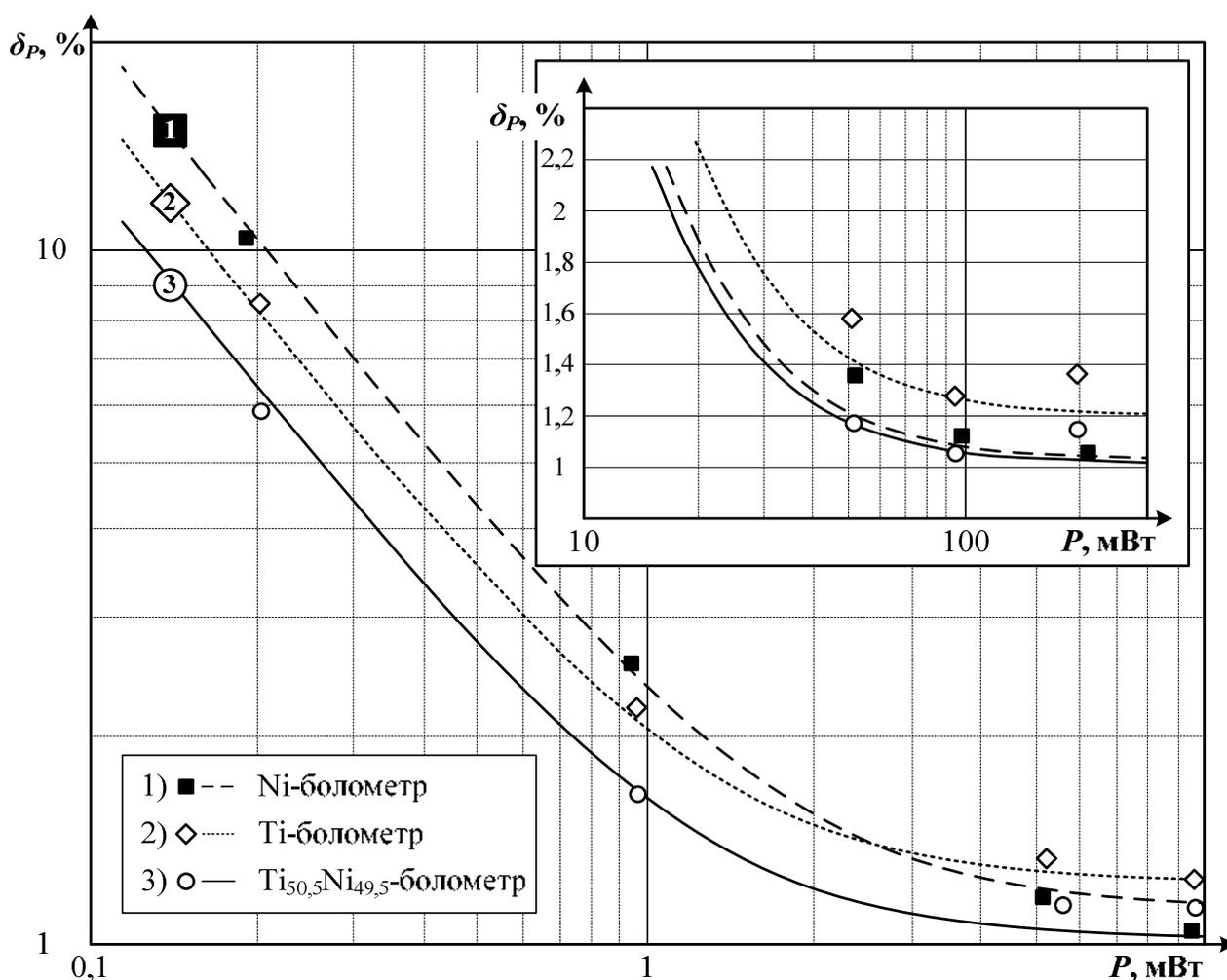


Рисунок 3.2 – Зависимость погрешности экспериментальной установки от измеряемой мощности излучения

На основании полученных результатов сделан вывод, что в ходе практических исследований, неохлаждаемые металлические болометры продемонстрировали высокую стабильность параметров и возможность эффективной замены фотодиодных и термоэлектрических приемников в измерителях энергетических параметров лазерного излучения [52, 59].

### 3.2. Оптический абсорбционный газоанализатор

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии, основанный на измерении поглощения резонансного излучения свободными атомами в газовой фазе, является одним из наиболее эффективных современных аналитических методов [79]. Он характеризуется низким пределом обнаружения, высокой селективностью, экспрессностью, обеспечивает возможность автоматизации и непрерывного контроля, широко применяются для анализа сложных систем. Основными узлами абсорбционных газоанализаторов, как правило, являются источник излучения, пара приемников излучения и два оптических канала – рабочий и сравнительный. При этом на оптической оси рабочего канала анализируемая газовая смесь присутствует, а в сравнительном канале – отсутствует. Мерой концентрации измеряемой газовой компоненты является разность электрического сигнала приемников рабочего и сравнительного канала. Для абсорбционных методов спектроскопии концентрация анализируемого компонента, осуществляющего селективное поглощение параллельного монохроматического электромагнитного излучения, в  $\text{нг/м}^3$  согласно закону Бугера – Ламберта – Бера определяется следующим выражением [80]:

$$C(U) = \frac{10^6 M}{N_A \sigma L} \cdot \ln \left( \frac{U_0}{U} \right), \quad (3.3)$$

где:

- $U_0$  и  $U$  – соответственно выходное напряжение приемного блока, эквивалентное оптической мощности излучения сравнительного и рабочего каналов [В];
- $M$  – молярная масса анализируемого компонента [г/моль];
- $N_A$  – число Авогадро,  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>;
- $\sigma$  – площадь сечения поглощения анализируемого компонента [см<sup>2</sup>];
- $L$  – длина оптической оси рабочего канала [см].

Литературный анализ характеристик неохлаждаемых металлических болометров и проведенные исследования  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ -болометра указали на

высокий потенциал таких приемников излучения в составе оптических абсорбционных газоанализаторов [81-84]. Ключевым параметром любого газоанализатора, выступающим критерием его эффективности, является предел обнаружения. Пределом обнаружения газоанализатора называют минимальную величину искомого компонента, электрический сигнал от которого можно надежно отличить от фонового уровня, и, как правило, принимают равным утроенному значению стандартного отклонения шумового сигнала. Поэтому для оценки эффективности использования неохлаждаемых металлических болометров в составе абсорбционных газоанализаторов был проведен аналитический расчет потенциальной погрешности измерения искомого газового компонента на примере анализа паров ртути в открытой атмосфере по формуле:

$$\Delta C(U) = \left[ \left( \left| \frac{\partial C(U)}{\partial U_0} \right| \Delta U_0 \right)^2 + \left( \left| \frac{\partial C(U)}{\partial U} \right| \Delta U \right)^2 + \left( \left| \frac{\partial C(U)}{\partial (\sigma L)} \right| \Delta(\sigma L) \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta U_0$  и  $\Delta U$  – среднеквадратическое напряжение шума в единичной полосе частот, приведенное к выходу приемного устройства сравнительного и рабочего каналов соответственно [В];  $\Delta(\sigma L)$  – совместная погрешность площади сечения поглощения анализируемого компонента и длины оптической оси рабочего канала [см<sup>3</sup>].

Для оценки  $C(U)$  и  $\Delta C(U)$  были взяты следующие исходные величины:  $\sigma = 3,3 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup> [85];  $L = 100$  см;  $P_{out\ 253,652\ nm} = 10$  мВт;  $\Delta(\sigma L) = 0,001 \cdot \sigma L$ . При расчетах было принято во внимание, что в случае использования неохлаждаемых металлических болометров при работе с узкополосными источниками излучения необходимо предусмотреть применение соответствующих оптических фильтров, к примеру, 10MLF10-254 с коэффициентом пропускания не более 12 % на длине волны 254 нм. Одним из требований анализа газового компонента в открытой атмосфере является возможность регистрации сигнала за время, при котором влияние скорости движения воздушной массы на измерения было бы минимальным. Известно, что частота регистрации сигнала для подобных условий измерения должна быть не менее 500 Гц. В связи с этим, предел обнаружения

анализатора паров ртути, на базе разработанного  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ -болметра, оказался выше фоновой концентрации  $1 \text{ нг/м}^3$  более чем на порядок. Поэтому был произведен расчет характеристик  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ -болметра с меньшей толщиной резистивного элемента исходя из результатов проведенных исследований и параметров ранее выпускаемого в промышленных масштабах никелевого болметра НБГ-1(2):  $l = 1,8 \text{ мм}$ ;  $h = 1,2 \text{ мм}$ ;  $w = 0,1 \text{ мкм}$ ;  $R_V$  составляет 1,5 и 0,5 В/Вт при частоте модуляции 9 и 80 Гц соответственно [86]. С учетом известной зависимости вольт-ваттной чувствительности от частоты (2.15), получим, что из равенства:

$$R_V^{9\text{Гц}} \sqrt{1 + (2\pi\tau \cdot 80\text{Гц})^2} = R_V^{80\text{Гц}} \sqrt{1 + (2\pi\tau \cdot 9\text{Гц})^2}, \quad (3.5)$$

постоянная времени НБГ-1  $\tau \approx 6 \text{ мс}$ . В итоге при условии  $I = 16,6 \text{ мА}$ ,  $\eta = 95 \%$ ,  $\tau = 6 \text{ мс}$ ,  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_c \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$   $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ -болметр с идентичными НБГ-1 размерами резистивного элемента потенциально обладает следующими параметрами:  $R_V(1\text{Гц}) = 18,1 \text{ В/Вт}$ ;  $R_c = 21,5 \text{ Ом}$ ;  $G = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/К}$ ;  $S_J = 682 \text{ пВ/Гц}^{1/2}$  и  $S_{th} = 408 \text{ пВ/Гц}^{1/2}$ ;  $NEP = 1,7 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$  на частоте  $1 \text{ кГц}$  [87].

Расчет  $\Delta U_0$  проведен для неохлаждаемых болметров идентичных размеров, включенных в схему Уитстона с последующей подачей разностного сигнала плеч моста на входы инструментального усилителя INA163 (Texas Instruments, США). При этом в одном из плеч моста расположен болметр, который находится под воздействием излучения рабочего канала, в другом – болметр, служащий для компенсации изменения температуры окружающей среды. Коэффициент усиления INA163  $k_{yc.} = 100$ . Расчет  $\Delta U$  проведен по аналогичной методике. В итоге  $\Delta U_0 = \Delta U \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ В}$ , что при  $U_0 = k_{yc.} \cdot P'_{изл.} \cdot R_V(1\text{кГц})$  соответствует отношению сигнал-шум на выходе схемы усиления 109,6 дБ. На рисунке 3.3 представлена зависимость  $C = f(\Delta C)$ , позволяющая наглядно оценить предел обнаружения потенциального анализатора паров ртути в открытой атмосфере на базе модифицированного  $\text{Ti}_{50,5}\text{Ni}_{49,5}$ -болметра и показывающая эффективность использования ведущих моделей измерительных устройств (вольтметров и амперметров) в качестве эталонных средств калибровки его приемного блока.

Следует отметить, что проведенная оценка предела обнаружения анализатора предполагала использование в его составе специализированных ультрафиолетовых лазерных систем [88], шумы которых, как известно, пренебрежимо малы на фоне шумов аппаратной части анализаторов. В тоже время при использовании различных ламп низкого давления в качестве источника излучения анализаторов необходимо серьезным образом учитывать не только уровень их шумов, но и уширение спектральной линии [79].

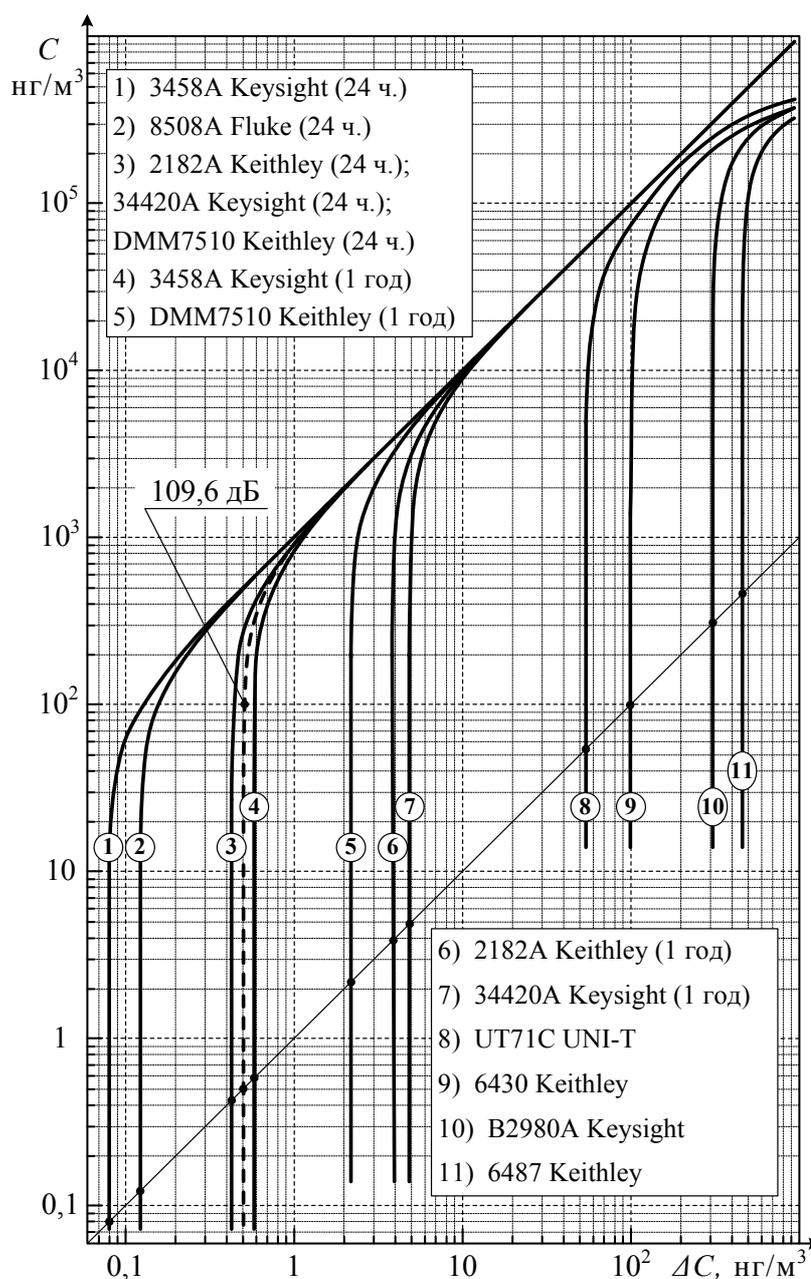


Рисунок 3.3 – Зависимость массовой концентрации паров ртути и погрешности её измерения (в скобках указано время, прошедшее с момента поверки приборов)

Таким образом, предел обнаружения анализатора паров ртути в открытой атмосфере с использованием в его составе потенциального  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болметра составил  $1,5 \text{ нг/м}^3$  [59]. Одним из возможных методов дальнейшего улучшения предела обнаружения анализатора, помимо улучшения чувствительности  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болметра, является увеличение длины рабочего канала путем применения многоходовых кювет.

Оценка  $\Delta U_0$  и  $\Delta U$  проведена также для приемного устройства на основе фотодиода ультрафиолетового (230 – 285 нм) диапазона SG01L-C5 UV (SgLux, Германия), который рассчитан на максимальную мощность излучения (254 нм) 960 мкВт. Рекомендованной производителем схемой включения такого фотодиода является трансимпедансный усилительный каскад. В итоге расчет проведенный с использованием аналитической модели [89] показал, что при использовании трансимпедансного усилителя с  $i_n < 10^{-11} \text{ А}$ , отношение сигнал-шум на частоте 1 кГц для SG01L-C5 составил более 130 дБ (график 1 на рисунке 3.3).

В итоге сделан вывод, что применение детекторов с  $NEP \leq 1 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$  при рабочей частоте свыше 500 Гц и отношением сигнал-шум 110 дБ в составе анализатора является достаточным для обнаружения фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере. При этом использование неохлаждаемых металлических болметров с соответствующими параметрами является предпочтительным с точки зрения простоты конструкции и высоких эксплуатационных параметров.

### **3.3. Измеритель суммарной солнечной радиации**

Пиранометр является актинометрическим прибором и предназначен для измерения суммарной солнечной радиации, состоящей из прямой и рассеянной составляющей потока излучения, поступающего на горизонтальную поверхность. Солнечная радиация на 98% сосредоточена в диапазоне длин волн 0,3 – 4,0 мкм, который в актинометрии называется коротковолновым [90]. Установлено, что в видимом спектре 400 – 750 нм заключается 45 % солнечной лучистой энергии,

47 % приходится на инфракрасное излучение, а 7 % – на ультрафиолетовое. Элементарной базой пиранометров являются главным образом термоэлектрические приемники, так как обладают линейной спектральной чувствительностью в коротковолновом диапазоне. Как правило, приемный элемент пиранометра представляет собой термобатарею квадратной формы, приемная площадка которой разбита на участки покрытые слоем чёрного и белого поглотителя. Пример такого приемного элемента представлен на рисунке 3.4. Черный слой являются платиновой чернью или сажей с коэффициентом поглощения не менее 95 % излучения в широком спектре частот, а белый – магнезией, поглощающей только длинноволновую (4 – 100 мкм) радиацию. Приемник защищается от ветра и атмосферных осадков полусферическим стеклянным колпаком, пропускающим лучистый поток в диапазоне от 0,33 до 3 мкм. Между черными и белыми участками в силу различия их коэффициентов поглощения в коротковолновой области спектра появляется разность температур, величина которой в итоге пропорциональна мощности падающего излучения.

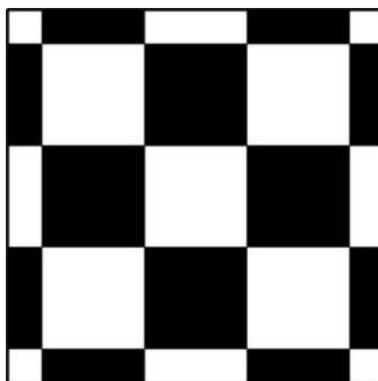


Рисунок 3.4 – Приемная площадка термобатареи пиранометра

Результаты исследования неохлаждаемых болометров на основе сплавов никелида титана предопределили их использование в составе актинометрических приборов [83, 84, 91]. Приемная площадка предложенного пиранометра содержит основной и дополнительный резистивные элементы. Оба элемента расположены на общей диэлектрической подложке с малым коэффициентом теплопроводности и имеют одинаковые размеры и форму, при этом основной элемент зачернен, а дополнительный имеет полированную поверхность, тем самым отличаясь друг от

друга только коэффициентом поглощения лучистого потока. Основной зачерненный элемент поглощает бóльшую часть радиации, вследствие чего его температура повышается пропорционально мощности падающего излучения. Дополнительный отполированный элемент отражает бóльшую часть солнечной радиации и служит для компенсации изменения параметров окружающей среды, влияющих на измерение суммарной солнечной радиации. Подложка служит электрической и тепловой изоляцией. В итоге, различная степень нагрева элементов приводит к возникновению разности их сопротивлений, пропорциональной мощности прямого и рассеянного солнечного излучения. Высокотехнологичность сплавов на основе TiNi создает возможность придания резистивным элементам помимо традиционной плоской формы, например, форму шарового сегмента, как показано на рисунке 3.5, что позволяет измерять суммарный поток радиации при нулевом угле солнечных лучей относительно горизонта.

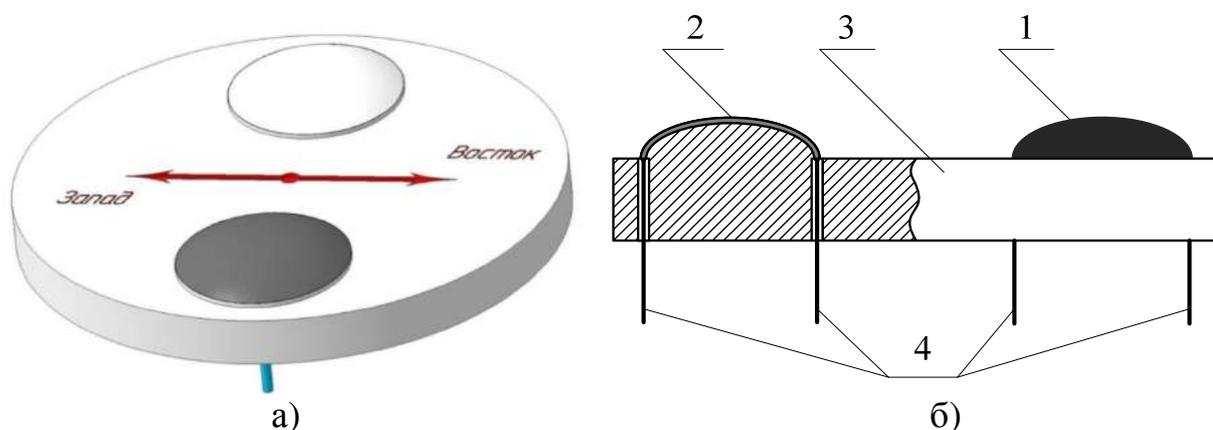


Рисунок 3.5 – Приемная головка пиранометра на основе металлических элементов: а) графическая модель; б) 1 и 2 – основной и дополнительный резистивный элемент соответственно; 3 – подложка; 4 – электроды

Конструкция учитывает взаимное пространственное расположение элементов 1 и 2, которое устраняет влияние их теней друг на друга, вызванных прямыми солнечными лучами. Это достигается тем, что линия, соединяющая вершины элементов, ориентирована вдоль направления север-юг, а расстояние между вершинами устанавливают равным двум диаметрам основания шарового

сегмента, что приемлемо с практической конструктивной точки зрения и учитывает значение азимутальных углов зимнего и летнего солнцестояния на большей территории Земного шара. Подобная конструкция приемной площадки способствует возникновению новой модификации пиранометра, данные с которого актуальны для создания моделей инсоляции объектов живой природы расположенных в различных ландшафтных условиях.

Для исследования возможности применения разработанного  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болметра в составе актинометрических приборов был разработан макет пиранометра, схема которого представлена на рисунке 3.6. Она состояла из источника питания на базе Li-ion батареи LIR18650 с выходным напряжением +3,7 В и ёмкостью 2,2 А·ч, вольтметра на базе мультиметров UT71С. Каскад усиления  $D1$  и  $D2$  был собран с использованием микросхем ОРА211. Общий коэффициент усиления схемы составлял  $4242 \pm 8$ . На неинвертирующий вход каждого каскада усиления подавалось напряжение смещения  $U_{os}$ , формируемое литиевой батареей CR2032 и делителем сопротивления. Питание  $D1$  и  $D2$  осуществлялось напряжением  $\pm 9$  В от двух солевых батарей типа «КРОНА».

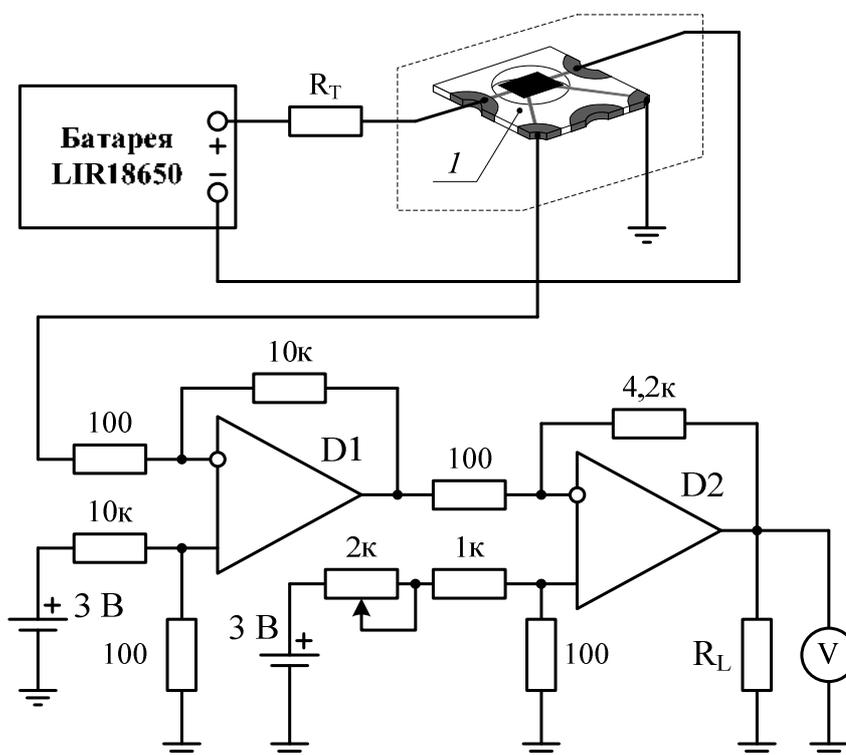


Рисунок 3.6 – Макет пиранометра на основе  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болметра

Измерение суммарной солнечной радиации проводилось по следующей методике. Болومتر располагался под 1 мм кварцевым стеклом марки КИ с коэффициентом пропускания 0,9 в диапазоне излучения 0,28 – 2,8 мкм на горизонтальной подложке параллельно поверхности земли. Стекло было накрыто плотной белой крышкой, которая периодически удалялась на 10 с для засветки приемной площадки болометра прямой и рассеянной солнечной радиацией. Эксперимент проводился на протяжении 7 дней в период времени с 12:00 по 12:10, что соответствовало максимальной для этих дней высоте солнца над горизонтом  $\sim 48^\circ$ . Регистрируемое при этом изменение напряжения на  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$ -болометре было пропорционально плотности потока солнечного излучения, рассчитанной по формуле:

$$Q_{\Sigma} = \frac{10}{9} \cdot \beta \cdot \frac{(V_f - V_s)}{Ak_{yc} \cdot R_V}, \quad (3.6)$$

где  $A$  – площадь приемной площадки  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$ -болометра [ $\text{м}^2$ ];  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий компенсацию  $\delta P$ .

Модельные оценки установили, что для исследуемого макета пиранометра на базе разработанного  $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$ -болометра  $\beta = 0,92$ .  $A = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . В итоге, результаты измерения, представленные в таблице 3.4, после обработки данных сравнивались с идентичными по времени показаниями сертифицированного в РФ пиранометра СМР-11 (Kipp&Zonen, Нидерланды), расположенного вблизи места проведения эксперимента.

Таблица 3.4

Усредненные за 3 минуты экспериментальные данные измерения  $Q_{\Sigma}$

Дата измерения	Ti <sub>50.5</sub> Ni <sub>49.5</sub> -болومتر		СМР-11	
	$I, A$	$1,013 \pm 0,004$	$Q_{\Sigma}, \text{Вт/м}^2$	
	$R_V, \text{мВ/Вт}$	$81 \pm 1$		
30.07.2012	$V_s, \text{мВ}$	$73,2 \pm 0,5$	$690 \pm 10$	$690 \pm 10$
	$V_f, \text{мВ}$	$454,5 \pm 0,8$		

31.07.2012	$V_s$ , мВ	$77,3 \pm 0,5$	$700 \pm 10$	$700 \pm 10$
	$V_f$ , мВ	$463 \pm 1$		
1.08.2012	$V_s$ , мВ	$83,12 \pm 0,07$	$259 \pm 4$	$264 \pm 4$
	$V_f$ , мВ	$225,9 \pm 0,1$		
2.08.2012	$V_s$ , мВ	$78,4 \pm 0,5$	$603 \pm 7$	$607 \pm 9$
	$V_f$ , мВ	$410,9 \pm 0,7$		
3.08.2012	$V_s$ , мВ	$69,9 \pm 0,1$	$119 \pm 2$	$124 \pm 2$
	$V_f$ , мВ	$135,7 \pm 0,1$		
4.08.2012	$V_s$ , мВ	$73,6 \pm 0,5$	$620 \pm 10$	$620 \pm 10$
	$V_f$ , мВ	$414,9 \pm 0,7$		
5.08.2012	$V_s$ , мВ	$70,24 \pm 0,07$	$376 \pm 5$	$379 \pm 6$
	$V_f$ , мВ	$271,2 \pm 0,7$		

В таблице 3.5 приведены ключевые характеристики термоэлектрического приемника коммерческого пиранометра СМР-11 и потенциального  $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ -приемника (два болометра, работающих по дифференциальной схеме), а также показано их количественное отличие. На рисунке 3.7 представлена зависимость погрешности макета пиранометра от измеряемой суммарной солнечной радиации и проведено её сравнение с результатами эксперимента.

Таблица 3.5

## Сравнение приемников СМР-11 и разработанного макета

Параметр	Приемник СМР-11	$Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ -приемник	Отношение
Время измерения (уровень сигнала 95 %)	5 с	0,9 с	5,6
Температурное смещение или его эквивалент	мин 2 Вт/м <sup>2</sup>	0,4 Вт/м <sup>2</sup>	мин 5
Чувствительность	7-14 мкВ/Вт/м <sup>2</sup>	130 нВ/Вт/м <sup>2</sup>	53-107
Апертура приемника	450 мм <sup>2</sup>	1,6 мм <sup>2</sup>	281
Пиковое шумовое напряжения приемника	14-28 мкВ	52 нВ	> 270

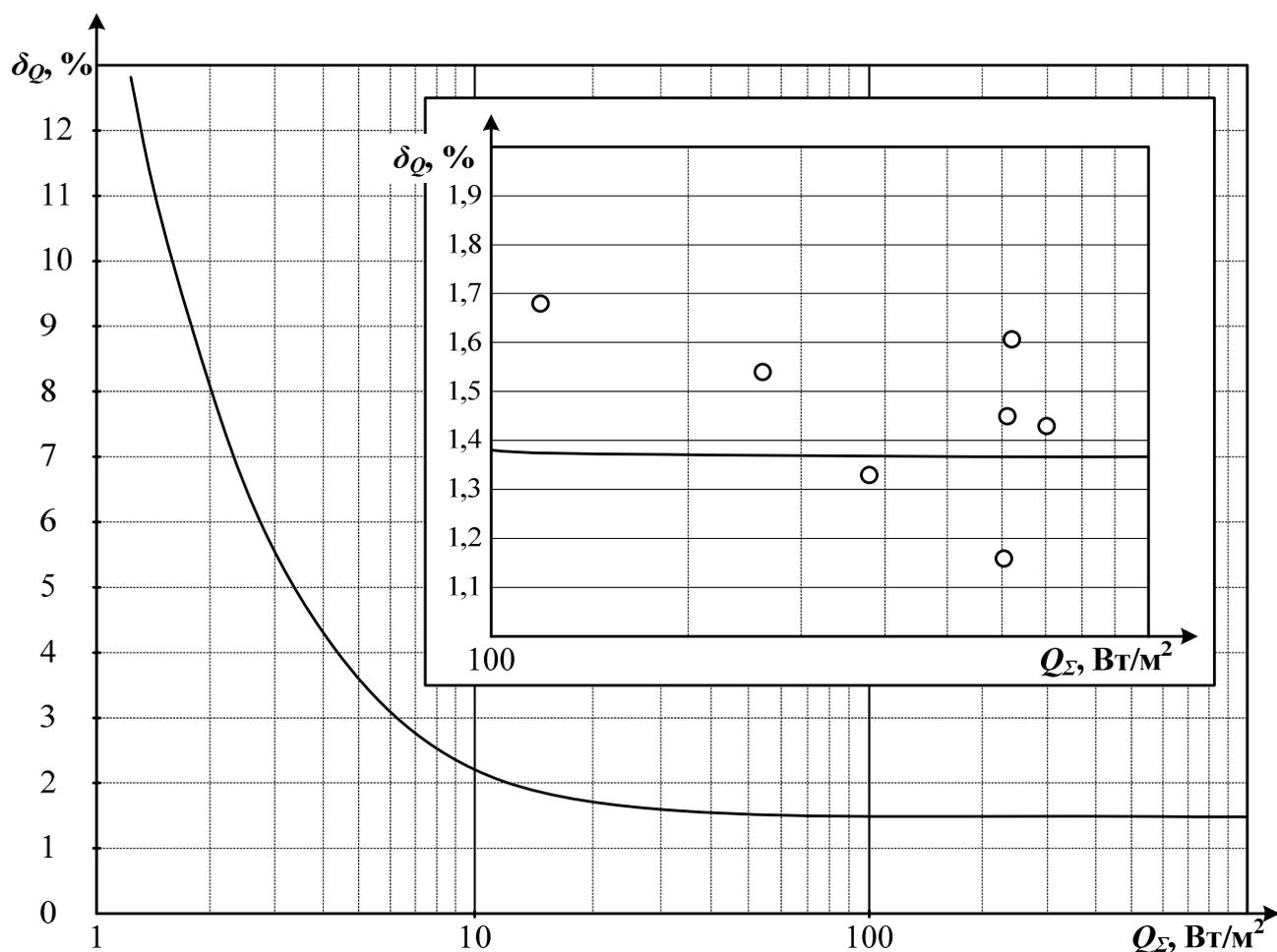


Рисунок 3.7 – Зависимость погрешности макета пиранометра от измеряемой суммарной солнечной радиации

Результаты измерения суммарной солнечной радиации макетом пиранометра на основе  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болومترом показали следующее:

- данные макета для диапазона 120 – 700 Вт/м<sup>2</sup> соответствовали показаниям коммерческого пиранометра SMP-11 в рамках  $\pm 4$  %, при этом большее различие показаний приборов приходилось на период эксперимента, когда главной составляющей потока излучения (до 300 Вт/м<sup>2</sup>) являлась исключительно рассеянная солнечная радиация;
- расчетный пиковый уровень шумового напряжения  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -приемников приведенного к выходу схемы усиления составлял 52 нВ, что соответствует пределу обнаружения приемного блока 0,4 Вт/м<sup>2</sup> (предел обнаружения

измерительной системы –  $1 \text{ Вт/м}^2$ ) при быстродействии 1 с, что на порядок лучше аналогичных параметров СМР-11;

– доверительный интервал определения суммарной солнечной радиации макетом был обусловлен главным образом значением погрешности определения вольт-ваттной чувствительности и площади приемной площадки болометра;

– достаточным критерием выбора неохлаждаемого металлического болометра для эффективного измерения им плотности потока солнечного излучения является уровень пороговой чувствительности не более  $0,7 \text{ мкВт}$  при размере входной апертуры приемника не менее  $1,5 \text{ мм}^2$ .

В итоге сделан вывод, что применение высокочувствительных неохлаждаемых металлических болометров в актинометрических приборах позволит уменьшить предел обнаружения и время измерения анализируемой величины, а также повысить эксплуатационные характеристики и снизить массогабаритные параметры прибора [59]. При этом степень защиты от климатических и механических воздействий таких приборов, по сравнению с коммерческими образцами, является более высокой.

## **Глава 4. Разработка специализированной системы управления на базе микроконтроллера**

На протяжении последних десятилетий основной элементной базой автоматизации в области управления являются специализированные микропроцессорные системы (МПС). Использование МПС в составе сложных автоматизированных систем управления (АСУ) обусловлено их высокой гибкостью, возможностью быстрой перенастройки при необходимости даже значительных изменений алгоритмов управления. Как правило, перенастройка систем управления на базе МПС осуществляется программным путём без существенных производственных затрат. Микропроцессор (МП), который является центральным модулем системы, позволяет реализовать принципы открытых систем, функциональные возможности которых могут наращиваться по мере необходимости или по мере появления новых технических средств. Тем самым использование МПС позволяет достичь высокой централизации функций управления и реализовать наилучшие технико-экономические и тактико-технические характеристики систем управления, которые остаются актуальными в течение длительного времени [92]. Поэтому на сегодняшний день МПС являются неотъемлемыми компонентами устройств управления различных систем, в том числе за счет возможности реализации сложных алгоритмов достаточно простыми средствами и создания систем с качественно новыми «интеллектуальными» свойствами.

### **4.1. Общая характеристика микроконтроллеров**

Характерными особенностями микропроцессорных информационно-управляющих систем являются [93]:

- наличие ограниченного набора четко сформулированных задач;
- требования оптимизации структуры системы для конкретного применения;

- работа в реальном масштабе времени, т. е. обеспечение минимального времени реакции на изменение внешних условий;
- наличие развитой системы внешних устройств, их большое разнообразие;
- существенное различие функциональных задач;
- высокие требования по надёжности с учётом большой продолжительности непрерывной работы;
- сложные условия эксплуатации;
- обеспечение автоматического режима работы или режима с участием оператора как элемента системы.

Создание МП явилось следствием развития и совершенствования технологии производства интегральных схем. Реализованный в виде сверхбольшой интегральной схемы (СБИС), МП является программно-управляемым устройством, предназначенным для обработки цифровой информации и управления процессом обработки [94]. Различие выполняемых функций и сфер применения МП обусловили их специализацию. МП по функциональному признаку разделяют на два класса: МП общего назначения и специализированные МП. Микроконтроллер (МК) является специализированным МП и представляет собой изготовленную на одном кристалле микропроцессорную систему, ориентированную на реализацию алгоритмов цифрового управления различными объектами и процессами. В отличие от МП МК содержат на одном кристалле законченную вычислительную систему, что позволяет разрабатывать компактные системы с малым потреблением энергии. Характерной особенностью структуры МК является размещение в пределах одного полупроводникового кристалла наряду с центральным процессором внутренней памяти и большого набора периферийных устройств. МК базируются либо на существующем микропроцессорном ядре либо на специально разработанном процессоре, что соответствует наличию большого функционального разнообразия даже среди устройств, выполняющих одинаковые задачи. За счет достижения высокого уровня интеграции и надёжности при сохранении низкой цены, МК оснащены

встроенными дополнительными специализированными устройствами, которые обеспечивают включение в реализуемую систему с использованием минимального количества дополнительных электронных компонентов. Эти устройства под управлением микропроцессорного ядра выполняют определенные функции. При этом настройка МК на выполнение определенных задач осуществляется посредством программного кода, разработка и отладка которого может составлять всего несколько дней. Структурная организация, набор команд и аппаратурно-программные средства ввода/вывода информации МК лучше всего приспособлены для решения задач управления и регулирования в различных системах автоматики и менее для задач обработки данных [95]. Проектированию устройств на основе МК посвящено достаточное количество работ [95 – 98], что позволяет в полной мере владеть информацией об элементной базе, методах и инструментах для разработки современных микроконтроллерных систем управления. Вместе с тем, остается возможность творческого подхода разработчика к решению поставленных задач.

Обширная номенклатура современных функциональных МК создают хорошие условия для проектирования конкурентоспособных систем различного назначения. Однако, осуществить правильный выбор типа микроконтроллерного средства управления, можно только опираясь на знание архитектуры, системных возможностей, организации и средств поддержки процесса проектирования. Одним из ключевых вопросов начального этапа проектирования системы управления является построение схемы объектов и процессов управления, с учётом особенностей применения МК. На рисунке 4.1 показан один из способов построения системы логического управления [99]. Под управлением понимают целенаправленное воздействие на объект, в результате которого он переходит в требуемое состояние. Для управления объектом необходима следующая информация: перечень возможных состояний объекта (Y); перечень входных параметров объекта и диапазоны изменения их значений (X, E); допустимые управляющие воздействия; характер возмущений; цель управления объектом (Z).

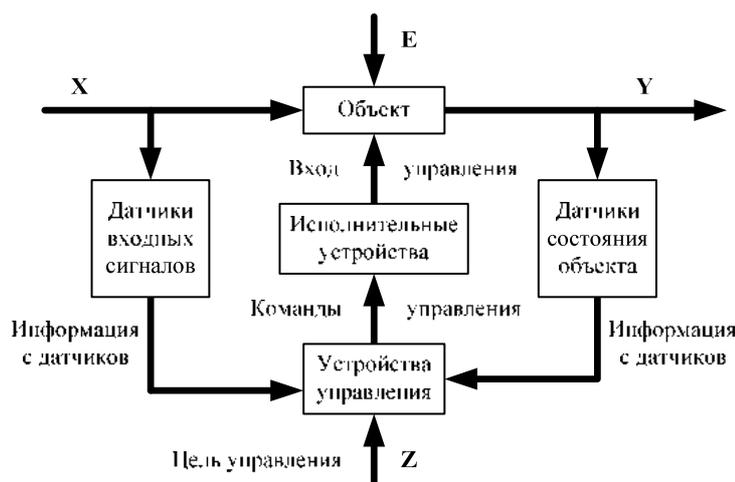


Рисунок 4.1 – Структурная схема системы управления

На основе этой информации для достижения цели управления требуются алгоритмы и средства преобразования входов объекта в необходимые управляющие воздействия и цели управления – в последовательность состояний объекта. Поэтому достижение цели управления осуществляется по алгоритму управления [100], представляющему собой набор программ. При этом важной особенностью работы устройства управления на основе МК является выполнение им всех операций в реальном масштабе времени. Термин «реальное время» означает, что задержка реакции устройства управления должна быть конечной и не превышать определённого значения. Это касается не столько скоростных характеристик МК, сколько относится к сложности реализованных в нем алгоритмов и программ.

МК в составе системы управления решает следующие задачи:

- прием информации о текущем состоянии системы или объекта;
- расчёт в реальном масштабе времени управляющих воздействий (команды управления) и передача их на исполнительные устройства;
- отображение информации о состоянии системы и объекта;
- обработка команд по изменению условий процесса управления;
- взаимодействие информацией с другими устройствами.

Каждая задача решается с помощью определенной программы, выполняемой в заданное время с учетом определенных условий и присвоенного приоритета. При этом к программам МК предъявляются повышенные требования по надёжности и отказоустойчивости, поскольку от этого зависит эффективная работа системы управления, а также экономические и другие потери. Надёжность и отказоустойчивость систем управления определяется структурной, временной, информационной и программной избыточностью [98]. Структурная избыточность предполагает включение в состав системы избыточных элементов, позволяющих скомпенсировать отказы отдельных элементов устройства или системы в целом и обеспечить надёжное их функционирование. В целом увеличение надёжности введением структурной избыточности неразрывно связано с увеличением стоимости проектируемых устройств и представляет собой сложную оптимизационную проблему, связанную с правильным выбором технико-экономических критериев функционирования. Требуемого уровня надёжности можно достичь и введением программной избыточности, причём её можно вводить в любую уже созданную систему, не нарушая существующей конфигурации технических средств. Информационная избыточность исходных и промежуточных данных, обрабатываемых программными и аппаратными комплексами, существенно влияет на качество нормального функционирования и время восстановления данных с заданной степенью достоверности. При этом для сохранения важных данных обычно применяют дублирование или утроение с соответствующей дисциплиной контроля их сохранности и периодическим обновлением, а для менее важных данных – помехозащищённые коды.

Номенклатура предлагаемых МК на мировом рынке постоянно растет, появляются новые, более совершенные и технологичные изделия повышенной степени интеграции, новые полупроводниковые структуры, новые идеологические решения. Количество фирм производителей неуклонно растет при одновременном повышении их уровня технической и технологической оснащенности. При этом требования, предъявляемые к производительности

процессора МК, объёму его внутренней памяти команд и данных, набору необходимых периферийных устройств, в зависимости от сложности поставленной задачи оказываются весьма разнообразными. Поэтому выбор МК является одной из важных задач следующего этапа проектирования системы управления. основополагающим критерием выбора МК [93] является комплексный показатель «количество данных – количество вычислений». В таблице 4.1 представлены возможные значения показателя, определяющего классы задач и основные характеристики МК. Выпускаемые МК разделяют на 8-, 16- и 32-разрядные. 8-разрядные МК представляют наиболее многочисленную группу этого класса МК с относительно низкой производительностью, которая, тем не менее, достаточна для решения широкого круга задач управления различными объектами.

Таблица 4.1

## Значения комплексного показателя МК

Комплексный показатель	Характеристика задач	Разрядность МК / производительность
Мало данных, мало вычислений	Задачи логического управления несложными объектами и процессами	8 / низкая
Мало данных, много вычислений	Локальные регуляторы, системы управления электрическими двигателями, подвижными аппаратами, роботами-манипуляторами, станками и т.д.	16 / средняя
Много данных, мало вычислений	Многие сетевые задачи, системы управления потоками данных, коммутаторы, концентраторы и т.п.	32 / высокая
Много данных, много вычислений	Задачи управления реального времени, обработка сигналов с интенсивным обменом, системы распознавания речи, изображений и т.п.	32 / сверхвысокая

Состав устройств и блоков, входящих в структуру МК, и реализуемые механизмы их взаимодействия определяются функциональным назначением и областью применения МК. Архитектура и структура МК тесно взаимосвязаны.

Реализация тех или иных архитектурных особенностей требует введения в структуру МК необходимых аппаратных средств (устройств и блоков) и обеспечения соответствующих механизмов их совместного функционирования. Под «архитектурой процессора» понимается набор программно-доступных регистров и исполнительных (операционных) устройств, систему основных команд и способов адресации, объём и структуру адресуемой памяти, виды и способы обработки прерываний. В современных МК реализуются следующие варианты архитектур:

- CISC (Complex Instruction Set Computer) – микропроцессоры с полной системой команд;
- RISC (Reduced Instruction Set Computer) – микропроцессоры с сокращенной системой команд.

МК с CISC-архитектурой имеют однобайтовый, двухбайтовый и трёхбайтовый (редко четырёхбайтовый) формат команды. Выборка команды из памяти осуществляется побайтно в течение нескольких циклов синхронизации микроконтроллера. Время выполнения каждой команды с учётом времени выборки составляет от 1 до 10 циклов. МК с RISC-архитектурой имеют формат команды, фиксированной длины (например, 12 или 14 бит), а выборка команды из памяти и её исполнение осуществляются за один цикл синхронизации МК. Это позволяет упростить аппаратную реализацию центрального процессора и возможность повысить его производительность. Большое многообразие выполняемых команд и способов адресации в МК с CISC – архитектурой позволяет разработчику реализовать наиболее эффективные алгоритмы решения различных задач. При этом существенно усложняется структура МК, особенно его устройства управления, что приводит к увеличению размеров и стоимости кристалла, снижению производительности. В то же время многие команды и способы адресации используются редко. В RISC – процессорах значительно сокращается число используемых способов адресации. Как правило, все команды обработки данных выполняются с регистровой парой или непосредственной

адресацией. Обращение к памяти в МК с RISC – архитектурой осуществляется только в операциях загрузки данных в регистры общего назначения (РОН) или пересылки результатов из РОН в память. При этом используется небольшое число простых способов адресации: косвенно-регистровая, индексная и некоторые другие. В результате существенно упрощается структура МК, сокращаются его размеры и стоимость, значительно повышается производительность.

Кроме набора выполняемых команд и способов адресации важной архитектурной особенностью МК является используемый вариант реализации памяти и организации выборки команд и данных. По этим признакам различаются МК с Гарвардской или Принстонской архитектурой [94]. Принстонская архитектура характеризуется использованием общей оперативной памяти для хранения программ, данных, а также организации стека. Для обращения к этой памяти используется общая системная шина, по которой в процессор поступают команды и данные. Гарвардская архитектура характеризуется физическим разделением памяти команд (программ) и памяти данных (рисунке 4.2). В оригинальном варианте используется отдельный стек для хранения содержимого программного счётчика, который обеспечивает возможность выполнения вложенных подпрограмм. Каждая память соединяется с процессором отдельной шиной, что позволяет одновременно с чтением-записью данных при выполнении текущей команды производить выборку и декодирование следующей команды.

Разрядность МК указывается в соответствии с разрядностью его шины данных. В Гарвардской архитектуре команды могут иметь большую разрядность, чем данные, что позволяет считывать за один такт целую команду. Например, МК семейства PIC в зависимости от модели используют команды с разрядностью 12, 14 и 16 бит. В МК AVR команда всегда имеет разрядность 16 бит. Однако все эти МК имеют шину данных разрядностью 8 бит. В устройстве с Принстонской архитектурой разрядность данных обычно определяет разрядность (число линии) используемой шины. В МК Motorola 68HC05 24-разрядная команда размещается в

трёх 8-разрядных ячейках памяти программ. Для полной выборки такой команды необходимо произвести три цикла считывания из памяти.

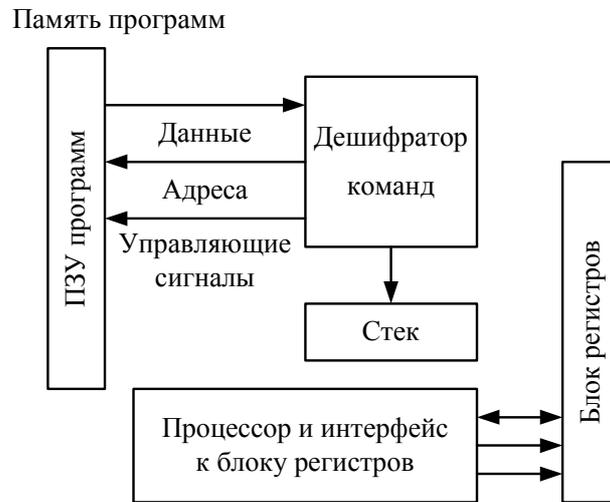


Рисунок 4.2 – Структура процессора МК с Гарвардской архитектурой

Для МК характерен модульный принцип построения его структуры. Все МК одного семейства содержат в себе базовый функциональный блок, который одинаков для всех МК семейства, и изменяемый функциональный блок, который отличает МК разных моделей в пределах одного семейства (рисунок 4.3) [94].

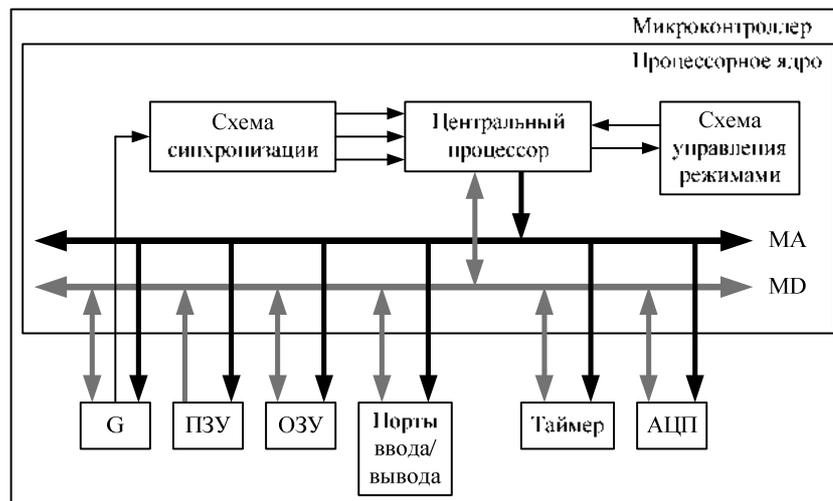


Рисунок 4.3 – Модульная структура МК

Базовый функциональный блок включает в себя:

- центральный процессор;
- внутренние магистрали адреса, данных и управления;

- схему формирования многофазной импульсной последовательности для тактирования центрального процессора и межмодульных магистралей;
- устройство управления режимами работы МК, такими как активный режим, в котором МК выполняет прикладную программу, режимы пониженного энергопотребления, в один из которых МК переходит, если по условиям работы выполнение программы может быть приостановлено, состояние начального запуска (сброса) и прерывания.

Процессорное ядро МК является базовым функциональным блоком и представляет собой неразрывное единство трёх составляющих его технического решения, которые неразрывно связаны друг с другом и определяют важнейший параметр процессорного ядра МК – его производительность:

- Архитектуры центрального процессора с присущим ей набором регистров для хранения промежуточных данных, организации памяти и способа адресации операнда в пространстве памяти, системы и команд, определяющий набор возможных действий над операндами, организации процессов выборки и исполнения команд.
- Схемотехнического воплощения архитектуры, которая определяет последовательность перемещения данных по внутренним магистралям микроконтроллера между регистрами, арифметическо-логическим устройством и ячейками памяти в процессе выполнения каждой команды.
- Технологии производства полупроводниковой БИС микроконтроллера, которая позволяет разместить структуру любой сложности на полупроводниковом кристалле и определяет допустимую частоту переключений в схеме и энергию потребления.

Изменяемый функциональный блок включает модули, которые разработаны для определенного процессорного ядра и образуют библиотеку периферийных модулей [101]. Библиотека каждого современного семейства МК включает модули пяти функциональных групп:

- модули памяти;

- модули периферийных устройств;
- модули встроенных генераторов синхронизации;
- модули контроля за напряжением питания и ходом выполнения программы;
- модули внутрисхемной отладки и программирования.

Основополагающим при выборе МК является модуль периферийных устройств, состоящий из следующих основных типов:

- параллельные порты ввода/вывода:
  - однонаправленные порты, предназначенные в соответствии со спецификацией микроконтроллера для ввода или только вывода информации;
  - двунаправленные порты, направление которых (ввод и вывод) определяется в процессе инициализации системы;
  - порты с альтернативной функцией. Отдельные линии этих портов связаны со встроенными в МК периферийными устройствами. Если соответствующий периферийный модуль МК не используется, то его выводы можно задействовать как обычные линии ввода-вывода;
  - порты с изменяемой программно управляемой схмотехникой входного буфера;
- таймеры-счётчики (8- и 16-битные), таймеры периодических прерываний, процессоры событий;
- контроллеры последовательного интерфейса связи нескольких типов (UART, SCI, SPI, I<sup>2</sup>C, CAN, USB);
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- цифроаналоговые преобразователи (ЦАП);
- контроллеры ЖК-индикаторов и светодиодной матрицы.

## **4.2. Задачи системы управления и выбор микроконтроллера**

Функциональной задачей разработанной системы управления являлось создание аппаратно-программного комплекса на базе МК, осуществляющего формирование последовательности 3-х основных сигналов и 1-го тактового с

возможностью оперативной смены длительности импульсов и интервалов между ними в пакетно-импульсном режиме. Основными сигналами управления задавался режим работы герконовых реле (рисунок 2.17), осуществляющих поочередное подключение исследуемых болометров к каскаду усиления и задание соответствующего коэффициента усиления. Тактовые сигналы служили для формирования импульсов питания полупроводникового лазера. При этом владением языками программирования для смены режимов и временных параметров работы МК не требуется.

Технические требования, предъявляемые к аппаратной части системы управления, заключаются в следующем:

- основные технические параметры:
  - напряжение питания от 4,5 до 5,5 В;
  - потребляемая мощность не более 0,5 Вт;
  - количество выходных сигналов до 4;
  - количество подключаемых датчиков не менее 4;
  - дискретность изменения временных параметров выходных сигналов на максимальной тактовой частоте МК не более 0,1 мкс.
- условия эксплуатации:
  - диапазон рабочих температур от - 30 до + 70 °С;
- надежность:
  - количество циклов стирания/программирования ПЗУ МК не менее 1000;
  - среднее время безотказной работы не менее 10000 ч.

Выбор МК с учетом поставленной задачи осуществлялся согласно следующим критериям:

- технические характеристики:
  - Разрядность. Требования к разрядности внутренней шины данных и адреса МК минимальные;

- Производительность. Требования к вычислительной мощности ядра процессора высокие: на максимальной тактовой частоте МК, выполнение большинства команд должно происходить за один/два машинных такта;
- Объем памяти программ. МК должен обладать многократно перепрограммируемой памятью программ объемом не менее 1 Кбайт;
- Наличие линий ввода с альтернативной функцией. МК должен иметь не менее четырех однонаправленных линий ввода с функцией прерывания;
- Количество основных линий вывода. МК должен иметь не менее четырех однонаправленных линий вывода;
- Наличие встроенных периферийных устройств. МК должен обладать одним 8-разрядным и одним 16-разрядным таймер/счётчиком;
- потребительские свойства:
  - Программная поддержка разработчика. Необходимо наличие компиляторов и средств отладки МК;
  - Информационная поддержка разработчика. Необходимо наличие технического описания МК и сервисных программ.
  - Доступность. Необходима стабильность производства МК и возможность их поставки;
  - Затраты. Стоимость программно-аппаратного комплекса и МК должны быть минимальны.

Согласно критериям наиболее оптимальным устройством для реализации проектируемой системы управления является ATtiny2313-20xx (Atmel Corporation), который относится к 8-разрядным МК серии AVR. Архитектура серии AVR включает высокопроизводительный Гарвардский RISC-процессор с разделенным доступом к памяти программ и данных, Flash-память программ, память данных EEPROM и SRAM, 18 портов ввода-вывода, интерфейсные схемы, 32 регистра общего назначения, каждый из которых может работать как регистр-аккумулятор, и развитую систему команд фиксированной 16-битной длины. Расположение и название выводов МК представлено на рисунке 4.4. Большинство

команд выполняется за один машинный такт с одновременным исполнением текущей и выборкой следующей команды, что обеспечивает производительность до 1 MIPS на каждый МГц тактовой частоты [96, 97, 101].

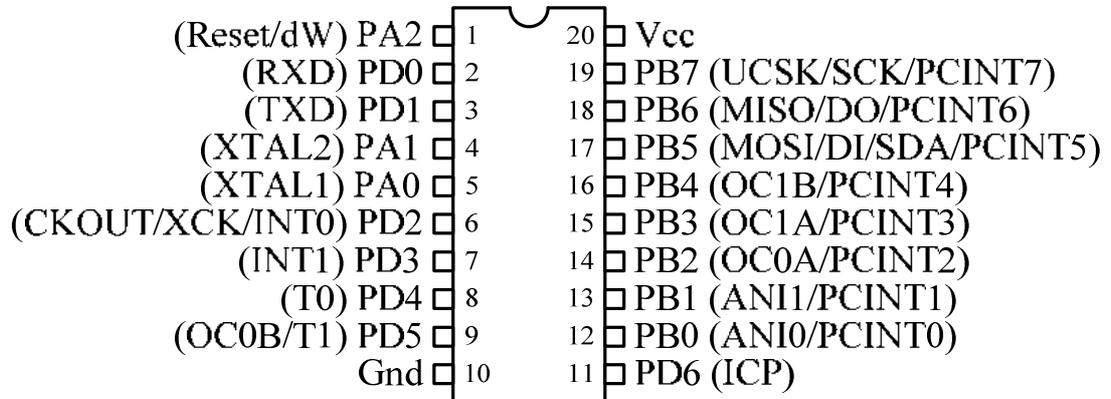


Рисунок 4.4 – Расположение и название выводов ATtiny2313-20

Внутренняя структура ATtiny2313-20 включает следующие модули:

- 2 порта ввода/вывода: В (8 линий) и D (7 линий);
- 32 8-битных рабочих регистра общего применения;
- 2 КБайт самопрограммируемой в системе Flash памяти программы с  $10^4$  циклами записи/стирания;
- 128 Байт программируемой в системе EEPROM памяти данных с  $10^5$  циклами записи/стирания;
- 128 Байт встроенной SRAM памяти (статическое ОЗУ);
- 8-разрядный таймер/счетчик с отдельным предделителем частоты;
- 16-разрядный таймер/счетчик с отдельным предделителем частоты;
- встроенный аналоговый компаратор;
- программируемый сторожевой таймер со встроенным генератором;
- USI – универсальный последовательный интерфейс;
- полнодуплексный UART – универсальный асинхронный приёмопередатчик.

### 4.3. Разработка программного обеспечения микроконтроллера

Разработка прикладных программ для МК включает следующие этапы [91]:

- определение целевой функции;

- описание задачи;
- анализ задачи;
- разработка общего алгоритма программы;
- разработка алгоритмов подпрограмм;
- формирование исходного текста программы.

Разработанный аппаратно-программный комплекс представлял собой усовершенствованную версию созданной системы управления и контроля транзисторными блоками двухполярного высоковольтного импульсного источника питания «VppS» [102-104], целевая функция которой заключалась в следующем: формирование последовательности периодических сигналов управления заданной длительности в тестовом и основном режиме; отслеживание состояния 4 входных сигналов от внешних источников напряжения и, при их наличии, осуществление блокировки основного режима; подсчет и хранение в ПЗУ общего времени работы системы в основном режиме.

В тестовом режиме МК формирует последовательность 2-х из 4-х сигналов управления «s2» и «s4», производится проверка состояния цифровых датчиков. Подсчет времени работы МК не ведется. Перевод в основной режим работы МК осуществляется по инициативе оператора подачей внешнего управляющего сигнала. В этом режиме формируется последовательность сигнала управления «s1» - «s4» (рисунок 4.5) и запускается таймер подсчета времени работы системы. Также осуществляется проверка состояния входных сигналов и при наличии хотя бы одного из них с уровнем выше логической «1» для ATtiny2313-20, МК переводиться в тестовый режим, также как и при подаче оператором повторного управляющего сигнала, после чего происходит сохранение времени работы МК в ПЗУ памяти данных.

Для формирования выходных сигналов управления задействованы четыре линии порта ввода/вывода В (PB4 - PB7). Направление передачи данных для каждой линии программируется отдельно установкой или сбросом битов bit4 - bit7 регистра DDRB. Установка в значении бита «0» настраивает линию порта на

«вывод» и подает на нее содержимое соответствующего бита регистра данных порта В. Подаваемое значение записывается в регистр-защелку и поступает на контакты выводов. Формирование выходных сигналов управления осуществляется путем последовательной команды «включить» и «отключить» соответствующей линии порта ввода/вывода с промежуточным вызовом временной задержки, которая определяет длительность импульсов и интервалов между ними.

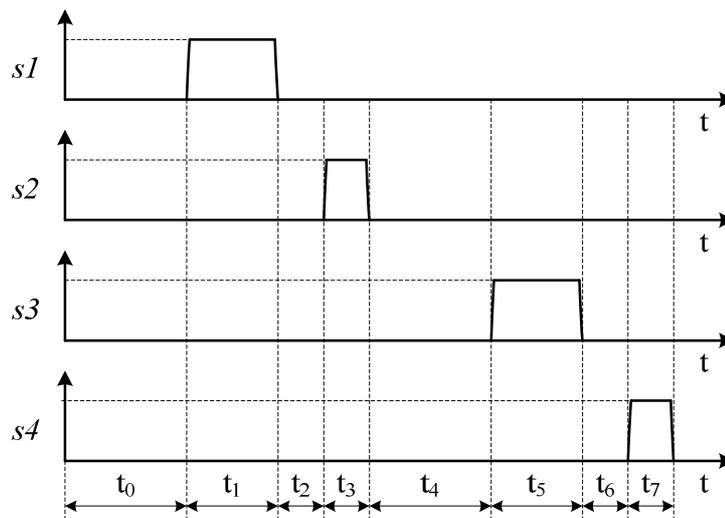


Рисунок 4.5 – Временная последовательность выходных сигналов управления МК в периодическом режиме

Временная задержка реализуется программным путём – метод программных циклов. Для этого в некоторый рабочий регистр загружается число, которое затем в каждом проходе цикла уменьшается на единицу. Когда содержимое рабочего регистра становится равным нулю, программа осуществляет выход из цикла. Время задержки определяется числом рабочего (счетного) регистра и временем выполнения команд. Нововведением в данной части программы является формирование длительностей  $t_0 - t_7$  посредством двойного цикла временной задержки (цикл в цикле) с выбором режима работы таймера-счетчика T1.

Для отслеживания состояния входных сигналов задействованы четыре линии порта ввода/вывода В (PB0 – PB3) и одна линия порта ввода/вывода D (PD2). Перевод из тестового режима работы МК в основной осуществляется подачей

управляющего сигнала на вход PD2 (INT0), который является источником внешнего прерывания. Запрос на прерывание осуществляется по переднему фронту сигнала на выводе INT0. Для этого в значении битов ISC00 и ISC01 в регистре MCUCR установлена «1». Само прерывание отсутствует, так как запрещено глобальное внешнее прерывание (в значении бита I регистра SREG установлен «0»). Проверка появления управляющего сигнала осуществляется по флагу прерывания INTF0 (в значении bit6 регистра флагов EIFR установлена «1»), который устанавливается в соответствии с прерывающими событиями независимо от того, замаскированы эти прерывания или нет. Наличие входного сигнала с уровнем выше логической «1» для ATtiny2313-20 на одной из линии порта ввода/вывода В (PB0 – PB3) также вызывает прерывания. Сами прерывания замаскированы (в значении bit7 регистра SREG установлен «0»), идентификация флага-прерывания происходит по значению bit5 (PCIF) регистра EIFR.

Подсчет времени работы МК осуществляется с помощью модуля таймера T0, который работает в режиме асинхронного счётчика. Для этого производится выбор режима работы таймера с помощью разрядов CS02...CS00 регистра управления таймером TCCR0. Таймер T0 включается с предварительным делением тактовой частоты на 1024 (в значениях CS02, CS01 и CS00 установлены «1», «0» и «1» соответственно). При переполнении таймера устанавливается «1» в значении bit1 (TOV0) регистра TIFR. Проверка на переполнение таймера будет производиться в начале каждого периода (перед сигналом «s1»). Поступление повторного управляющего сигнала на вход PD2 (INT0) производится запись значений таймера в EEPROM-память.

В пакетно-импульсном режиме МК, который и использовался при измерении характеристик неохлаждаемых болометров, количество  $n$  периодов ( $t_0 - t_7$ ) устанавливается программно, путем использования дополнительного регистра-счетчика, куда заранее заносится соответствующее число (рисунок 4.6). После каждого периода ( $t_0 - t_7$ ), содержимое регистра-счетчика уменьшается на единицу. По истечении времени  $T = n \cdot (t_0 - t_7)$ , содержимое регистра-счетчика становится

равным единице и МК переходит к формированию временной задержки  $T_0$ . Ее длительность определяется числом, загруженным в два регистра-счетчика, где в одном из них содержится младшая часть шестнадцатеричного числа, в другом старшая. При этом сигнал «s1» - «s3» являлись основными, а «s4» - тактовым (рисунок 2.18). Блок-схема общего алгоритма работы МК приведена в приложении А.

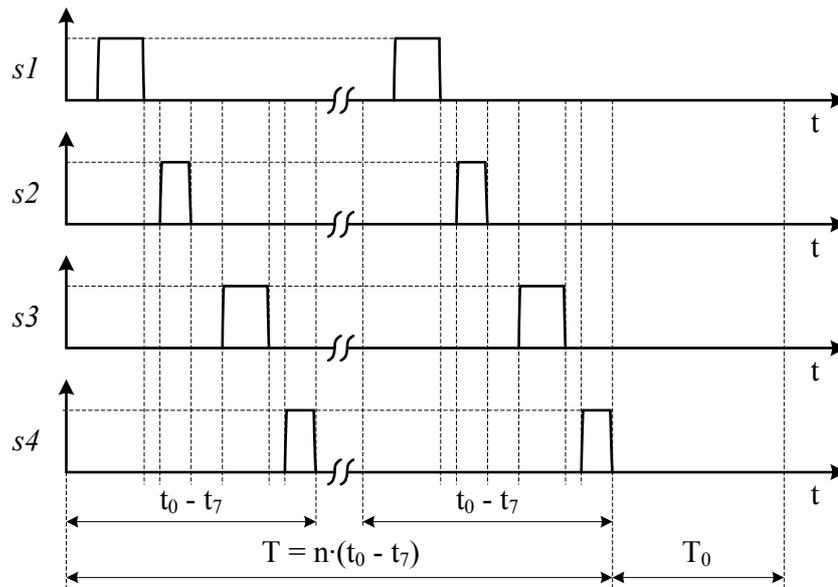


Рисунок 4.6 – Временная последовательность выходных сигналов управления МК в пакетно-импульсном режиме

Важную роль при создании прикладного программного обеспечения играет выбор алгоритмического языка программирования. Каждый МК имеет свой машинный язык программирования, содержащий перечень операций, который он может выполнять. Существуют аппаратно или машинно-независимые алгоритмические языки программирования не ориентированные на конкретный МК и для описания процесса вычислений они обладают более привычной для программиста символикой (Си, Бейсик, Паскаль). Операторы таких языков обозначают, как правило, крупные вычислительные процедуры и транслируются не в одну, а в серию машинных команд. Поэтому их называют языками высокого уровня. Написанные с их помощью программы могут исполняться на различных МК с разными системами команд. Кроме того, при использовании языков

высокого уровня повышается производительность труда программиста, уменьшается число ошибок при разработке программ.

В данном проекте использование машинно-независимых языков является не эффективным с точки зрения требований проектируемой системы управления к затратам машинного времени и оперативной памяти. Объектные программы, полученные в результате трансляции с языка высокого уровня, характеризуются большим числом машинных команд и, следовательно, временем исполнения программы. Причина заключается в том, что для генерации машинных команд при трансляции операторов исходной программы используется универсальный набор блоков машинных команд. В силу своей универсальности этот набор для каждой конкретной исходной программы является избыточным. Поэтому разработка прикладного программного обеспечения данного проекта осуществляется на машинно-ориентированном языке – макроассемблере, который является расширенным вариантом ассемблера, дополнительно включающим такие средства, как макрокоманды. Макрокоманда – это оператор, который при трансляции заменяется последовательностью других операторов языка. Эта последовательность называется макрорасширением. Макрорасширение не конструируется транслятором-макроассемблером заново, а берется из библиотеки стандартных макрорасширений языка. Каждой макрокоманде соответствует макроопределение – совокупность операторов, используемых для формирования макрорасширения всякий раз, когда в исходном модуле встречается макрокоманда. Написание исходных модулей на языке макроассемблера – трудоемкий процесс, требующий высокой квалификации программиста, досконального знания принципов построения аппаратной части МК и особенностей выполнения каждой команды из системы команд.

Для компилирования программы использовался AVR macro assembler version 2.0.30 и файл «tn2313def.inc» с описанием периферии МК. В начале программы содержатся директивы ассемблера. Они также называются псевдокомандами, поскольку эти директивы не транслируются в двоичные коды команд. Директивы

используются для распределения памяти, обеспечения связей между модулями манипуляций с символическими именами. Программа начинается с директивы «include», которую ассемблер воспринимает как содержимое файла. Директива «def» позволяет ссылаться на регистр через некоторое символическое имя, которое может использоваться в программе для обращений к данному регистру. Названия регистров имеют семантическое значение, связанное с соответствующими функциями в программе. Директива «cseg» определяет начало программного сегмента. Исходный файл может состоять из нескольких программных сегментов, которые объединяются в один программный сегмент при компиляции. Программный сегмент является сегментом по умолчанию, при этом он имеет свой собственный счётчик положения, который считают не побайтно, а пословно. Директива «org» устанавливает счётчик положения равным заданной величине («=0x00»), которая передаётся как параметр. Она позволяет размещать программы или данные, начиная с определенного места памяти. Для сегмента данных она устанавливает счётчик положения в ОЗУ, для сегмента программ это программный счётчик, а для сегмента EEPROM это положение в EEPROM.

Далее идёт блок ссылок на обработчики прерываний, которые входят в состав программы МК и могут размещаться в любой её части. Поэтому для обнаружения начала обработчика конкретного прерывания в программе его адрес заносится в фиксированную ячейку памяти программ. В программе используется только прерывание «Reset». Адрес подпрограммы, обрабатывающей прерывание «Reset», всегда хранится в ячейке памяти программ с адресом 0x0000. Обработчик этого прерывания выполняется после изменения уровня («0» → «1») на линии порта ввода/вывода PA2. Для обозначения начала обработчика, в программе ставится метка «RESET:», а ее адрес фиксируется в нулевой ячейке памяти программ. В следующих 25 ячейках в строгой последовательности должны храниться адреса оставшихся 25 прерываний МК ATtiny2313-20xx. Так как эти прерывания не используются, вместо адресов помещаются пустые команды

«пор», при этом в тексте программы за каждой командой «пор» следует закомментированная ссылка на подпрограмму обработки прерываний.

В программе для наиболее часто встречающихся последовательностей команд были использованы макросредства ассемблера. Они позволяют подставить вместо символических имён соответствующие последовательности команд. Наиболее часто встречающимися последовательностями команд являются: формирование временных задержек на основе программного цикла и таймера, проверки логического состояния одного и двух флаг-битов в регистрах. Все макроопределения содержат две основные части: оператор начала и оператор конца макроса. Оператор начала сообщает ассемблеру имя макрокоманды, а оператор конца, что он должен закончить определение этой макрокоманды.

Макрос «DELAY\_P» осуществляет временную задержку на основе программного цикла. Для получения требуемого времени задержки необходимо загрузить соответствующее число в рабочий регистр. Команды макроса в каждом проходе цикла уменьшают содержимое рабочего регистра на единицу. При установлении содержимого рабочего регистра «0», в значении битов Z регистра состояния SREG установится «1». После этого макрос передаст управление основной программе. Назначение макроса «CHECK\_FLAG» – проверка логического состояния флаг-бита. Команды макроса производят проверку значения бита требуемого регистра. Если в значении бита установится «1», происходит переход в указанное место основной программы. Макрос «CHECK\_FLAG\_2» производит последовательную проверку значений двух битов и в зависимости от того в значении какого бита установится «1» осуществляется переход в соответствующее место основной программы.

Основная программа начинается с метки «RESET:», где выполняется инициализация стека, портов ввода/вывода, таймера и различных служебных переменных. Первая пара операторов определяет адрес начала стека в оперативной памяти МК. Функция «low(RAMEND)» выбирает младший байт из константы «RAMEND». Константа «RAMEND» (\$DF) – это адрес последней

ячейки ОЗУ. Для определения адреса последней ячейки ОЗУ МК ATtiny2313-20xx достаточно одного байта. Поэтому указатель стека представлен одним регистром SPL и используется только младший байт адреса, старший байт равен нулю. Стек предназначен в основном для обслуживания программ; при занесении в стек нескольких величин адрес каждой последующей величины уменьшается. Для наиболее часто используемых констант и служебных переменных необходимо установить значения. Команда «clr» сбрасывает все разряды регистра «zero» путём выполнения операции «исключающее ИЛИ» регистра с самим собой. Этот регистр будет использоваться для сброса всех разрядов других регистров. Поскольку команды выполняющих действия между константой и регистром могут обращаться только ко второй половине регистров (R16-R31), то необходимо предварительно записать константу во временный регистр «temp», а затем из него записать константу в служебный. Таким образом, устанавливаются значения регистров «one», «sixty», «reset\_T1» и «over». Служебный регистр «sixty» используется в подпрограмме обработки времени работы устройства в качестве делителя. С помощью него производится преобразование содержимого счетчиков в минуты и часы. Переменные «reset\_T1» и «over» предназначены для сброса значений битов переполнения таймера T1 и таймера T0 соответственно. Значения служебных регистров «s\_1», «s\_2», «s\_3» и «s\_4» заносятся в линии PB4-PB7 порта ввода/вывода В, которые конфигурируются как выходы с нулевыми начальными значениями. Линии PB0-PB3 порта ввода/вывода В конфигурируются как входные источники внешнего прерывания (прерывания маскируются) PCIF, а PD2 порта D – как INTF0.

Основной блок программы начинается с метки «MAIN:». Команда «rcall» служит для вызова подпрограмм. Адрес, на котором находилась команда, запоминается в регистре стека и после возврата из подпрограммы выполнение продолжается со следующей команды после «rcall». Подпрограмма «TEST\_MODE» начинается с проверки значения INT0 внешнего прерывания по переднему фронту сигнала на линии PD2. Для этого используется макрос

«CHECK\_FLAG». Если на линию PD2 поступал входной сигнал, то в значении INTF0 регистра флагов EIFR установится «1» и подпрограмма перейдет к команде «ret» возврата в основную программу, в противном случае продолжится выполнение следующей за макросом команды. Далее в счетный регистр загружается значение константы в шестнадцатеричном виде соответствующее требуемому времени задержки. Для формирования программной временной задержки требуется флаг нуля, относительно которого будет фиксироваться длительность задержки. Поэтому командой «clz» флаг нуля устанавливается в «0» состояние. Далее макрокоманда «DELAY\_P» формирует временную задержку длительностью  $t_0 - t_2$ . Затем следует команда включения выходного сигнала «s2» и на линии PB5 порта В устанавливается уровень логической «1». Занесение константы в регистр-счётчик осуществляется командой «count». После временной задержки длительностью  $t_3$  выходного сигнала «s2» отключается и на PB5 устанавливается уровень логической «0». Формирование временных задержек длительностью  $t_4 - t_6$  и  $t_7$ , а также включение и отключение сигнала «s4» на линии PB7 порта В производится аналогично. Затем цикл заканчивается и происходит переход к началу подпрограммы «TEST\_MODE». После выхода из подпрограммы «TEST\_MODE» в основной блок «MAIN» следует включение таймера T0 с предварительным делением тактовой частоты на 1024, который будет фиксировать время проработанное системой. Для пакетно-импульсного режима в конце каждого цикла производится проверка регистра-счетчика фиксирующего количество периодов  $t_0 - t_7$ . Когда его содержимое станет равным «1», произойдет переход в метку «signal\_zero\_1», где аналогичным методом будет формироваться временная задержка длительностью  $T_0$ , а и подсчет времени отсутствует. При выборе четырехсигнального режима, в котором формируются три основных сигнала «s1» - «s3» и один тактовый «s4», подпрограмма «TEST\_MODE» проводить только проверку входных сигналов, а выходные сигналы отсутствуют.

В начале подпрограммы «BASIC\_MODE» осуществляется сброс значений битов внешнего прерывания PCIF и INTF0, после чего следуют подпрограмма

«CHECK\_FLAG\_2» проверки значений битов внешнего прерывания PCIF и INTF0. Если в их значениях установлена «0», то выполняется следующая команда. В противном случае возврат из подпрограммы. Далее производится последовательное включение/отключение выходных сигналов «s1», «s2», «s3» и «s4», длительности которых и интервалы между ними с  $t_0$  по  $t_7$  формируются макрокомандой «DELAY\_P». В течение временной задержки длительностью  $t_1$  происходит проверка переполнения таймера T0. Он переполняется каждые 13 мс при тактовой частоте МК 20 МГц. Если переполнение произошло, то программа переходит к метке «time\_1», где начинается проверка на переполнение регистров-счётчиков времени. Сначала командой «out TIFR,over» в значении бита переполнения таймера T0 устанавливается «0», после чего увеличиваем содержимое регистра-счётчика «count\_1» на единицу. Каждое из 256 инкрементирования этого регистра соответствует времени переполнения T0. После переполнения регистр-счётчик «count\_1» произойдет инкрементирование регистра-счётчика «count\_2», который переполняется по истечению 14 минут. После переполнения регистр-счётчик «count\_2» произойдет инкрементирование регистра-счётчика «count\_3», который переполнится через 61 час. Проверка переполнения регистров производится командой «bme», которая проверяет флаг нуля и выполняет переход, если в его значении установлен «0». При формировании временной задержки длительностью  $t_1$  учитывается время на обработку переполнения каждого регистра-счётчика. Если переполнение таймера T0 не произошло, то программа выполняет последующие команды. После отключения выходного сигнала «s4» происходит возврат в начало подпрограммы «BASIC\_MODE» и повтор ее цикла. В случае возврата из «BASIC\_MODE», запускается подпрограмма «TESTX\_MODE». Она отличается от «TEST\_MODE» тем, что в ней происходит подсчёт времени работы МК. В цикл подпрограммы включена проверка переполнения таймера T0 и обработка регистров-счётчиков. Если переход из «BASIC\_MODE» в «TESTX\_MODE» произошел по причине появления хотя бы одного входного сигнала на линии PB0-PB3 порта

ввода/вывода В, то возврат из подпрограммы «TESTX\_MODE» осуществляется оператором подачи входного управляющего сигнала на линии PD2 порта D.

Далее производится обработка содержимого регистров-счётчиков и запись в EEPROM-память. При этом полученное время работы МК суммируется со временем уже хранившемся в EEPROM-памяти. Для этого сначала следует считать значения из памяти, сложить с исходными данными и записать полученный результат в EEPROM. В адресе «0x2C» EEPROM хранятся минуты, «0x35» и «0x3E» – часы. Чтение данных из EEPROM осуществляется с помощью подпрограммы «EEPROM\_read». Перед чтением данных из EEPROM проверяется значение бита EEWE, где должен быть установлен «0», в противном случае загрузка в регистры новых значений адреса и данных во время записи в EEPROM, процедура записи будет прервана, а результат этой записи не определён. После загрузки требуемого адреса в регистр EEAR, программа установит «1» в значение бита EERE регистра EECR. Когда запрошенные данные будут находиться в регистре данных EEDR, произойдёт аппаратный сброс значения бита EERE. Операция чтения из EEPROM всегда выполняется за один машинный цикл. Кроме того, после установки «1» в значении бита EERE в процессор пропускает 4 машинных такта перед началом выполнения следующей инструкции. Запись данных в EEPROM осуществляется с помощью подпрограммы «EEPROM\_write». Прием новых данных в EEPROM происходит после установки «0» в значении бита EEWE регистра EECR. Затем загружается байт данных регистра DATA в регистр EEDR, а требуемый адрес «EEPROM\_adress» – в регистр EEAR.

Для проверки соответствия прикладного программного обеспечения поставленным задачам перед МК использовались отладчики. Они реализуют следующие основные возможности: верификация программы в пошаговом режиме; просмотр и коррекцию содержимого регистров и ячеек памяти; дисассемблирование команд; контроль выполнения предыдущих шагов программы в точке остановки; подсчёт числа тактов выполнения тех или иных фрагментов программы; инициирование прерываний. При написании программы

использовалась интегрированная отладочная среда разработки приложений (IDE) AVR Studio 4 фирмы Atmel, которая содержит:

- транслятор языка ассемблера (Atmel AVR macroassembler);
- отладчик (Debugging);
- программное обеспечение верхнего уровня для поддержки внутрисхемного программирования (In-System Programming, ISP).

Отладчик AVR Studio 4 поддерживает все типы микроконтроллеров AVR и имеет два режима работы: программной симуляции и управления внутрисхемными эмуляторами (In-System Programming, ISP) различного типа. AVR Studio 4 способен моделировать практически все возможные варианты работы программы и осуществлять проверку ее работоспособности при нестандартных ситуациях в условиях поступления некорректных входных воздействий (для применений с повышенными требованиями к безопасности).

#### **4.4. Разработка программного обеспечения для ЭВМ**

Для оперативной смены режимов работы МК ATtiny2313-20 и изменения длительностей выходных сигналов необходима автоматизация процесса управления прикладным программным обеспечением. Решение данной задачи возможно путем разработки специализированного системного программного обеспечения (СПО) реализующего следующие функции:

- выбор режима работы системы управления на основе МК ATtiny2313-20 и задание длительностей выходных сигналов и интервалов между ними;
- сохранение выбранных параметров в файл-проект с возможностью его последующей загрузки;
- визуализация режима работы системы управления и параметров выходных сигналов;
- компиляция прикладного программного обеспечения МК (формат Intel Hex);
- загрузка выходного файла в память МК и установка его lock/fuse битов;
- отображение суммарного времени работы системы управления.

Структура СПО зависит от задействованных аппаратных средств и задач, на реализацию которых оно ориентировано, и состоит из набора независимых программных модулей, объединенных главным модулем (рисунок 4.7). В данном проекте СПО, установленное на персональный компьютер (ПК), является связующим звеном между оператором и аппаратными средствами системы управления. Оператор посредством ввода/вывода ПК, к которому с помощью последовательного порта (СОМ) соответствующим образом присоединен МК, осуществляет управление СПО.



Рисунок 4.7 – Структура СПО

Разработка СПО велась в среде программирования Borland Delphi Enterprise Version 7.0. Это интегрированная среда разработки (Integrated Development Environment, IDE), инструменты которой позволяют значительно ускорить процесс разработки, создания и отладки программ, ориентированных для Windows. Для разработки пользовательского интерфейса СПО использовался объектно-ориентированный язык программирования Object Pascal.

Разработанное в среде Delphi приложение состоит из нескольких элементов, объединенных в проект. Взаимосвязи между отдельными файлами проекта показаны на рисунок 4.8. Исходными файлами проекта, расположенными в папке InputFiles, являются: Pumping\_FS.asm, Pumping\_TS.asm, PPR\_FS.asm и PPR\_TS.asm. Они содержат исходный код (текст) программы в операторах языка

ассемблер и соответствуют одному из четырех функциональных режимов работы микроконтроллера.

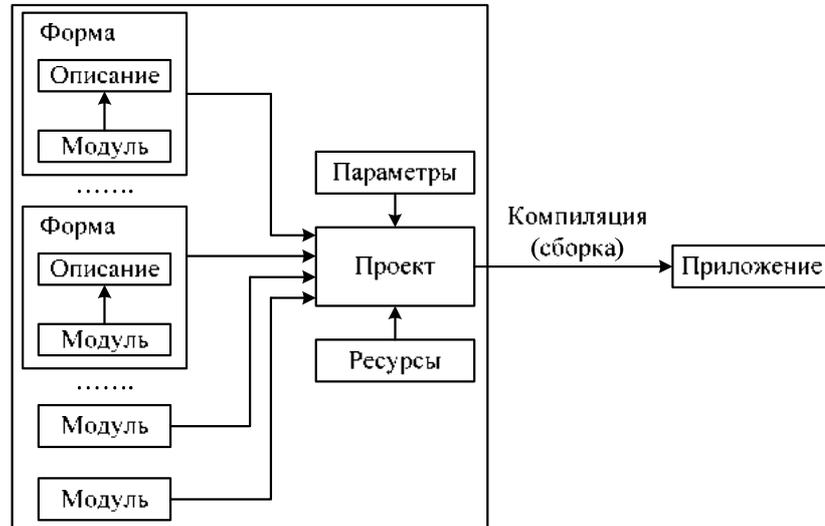


Рисунок 4.8 – Связь между файлами проекта

В папке `Compile` находятся файлы: `Compile.bat`, `Compile_avr.exe`, `ReadOnly.asm`. Файл `Compile_avr.exe` является версией транслятора макроассемблера для работы из командной строки MS-DOS. В папке `Appnotes` расположены настроечные файлы «\*.inc», в которых содержится информация по конкретному МК необходимая для преобразования исходного модуля в объектную программу на машинном языке. В проекте, ориентированном на работу с ATtiny2313-20 используются файлы `tn2313def.inc` и `tiny2313.mk`, являющийся библиотечным файлом для программы-загрузчика hex-файлов в память МК. Пакетный файл `Compile.bat` содержит последовательность команд MS-DOS. Ему в качестве параметра передается файл `ReadOnly.asm`, который является переменным файлом, куда заносится содержимое выходного файла проекта. В результате выполнения `Compile.bat` будет прочитан файл `ReadOnly.asm`, сгенерирован файл листинга `listfile.lst`, файл скомпилированного кода для загрузки в память программ микроконтроллера `ReadOnly.hex` и объектный файл «\*.obj», используемый отладчиком. В папку `OutputFiles` по умолчанию заносятся все полученные в результате работы приложения файлы, в том числе выходные ассемблер-файлы. В процессе проектирования приложения Delphi автоматически создает код головной программы и отдельных модулей. В

предложении uses перечисляются модули проекта: Forms – системный, InterFace\_VppS – связующий модуль, PathOutFile – модуль для выбора имени и папки сохранения выходного файла, fuse – модуль установки fuse-битов МК в режиме его программирования, Timer – модуль хранения времени работы МК. После ключевого слова Begin и до последнего завершающего программу оператора End с точкой записано тело программы. Первый его оператор инициализирует приложение, четыре следующих – создают объекты форм (Form1, Form2, Form5, Form3), последний – начинает выполнение приложения. На рисунке 4.9 показано начальное диалоговое окно графического интерфейса при запуске программы оператором, где осуществляется выбор режима работы МК, ввод или корректировка параметров сигналов управления и вывод данных.

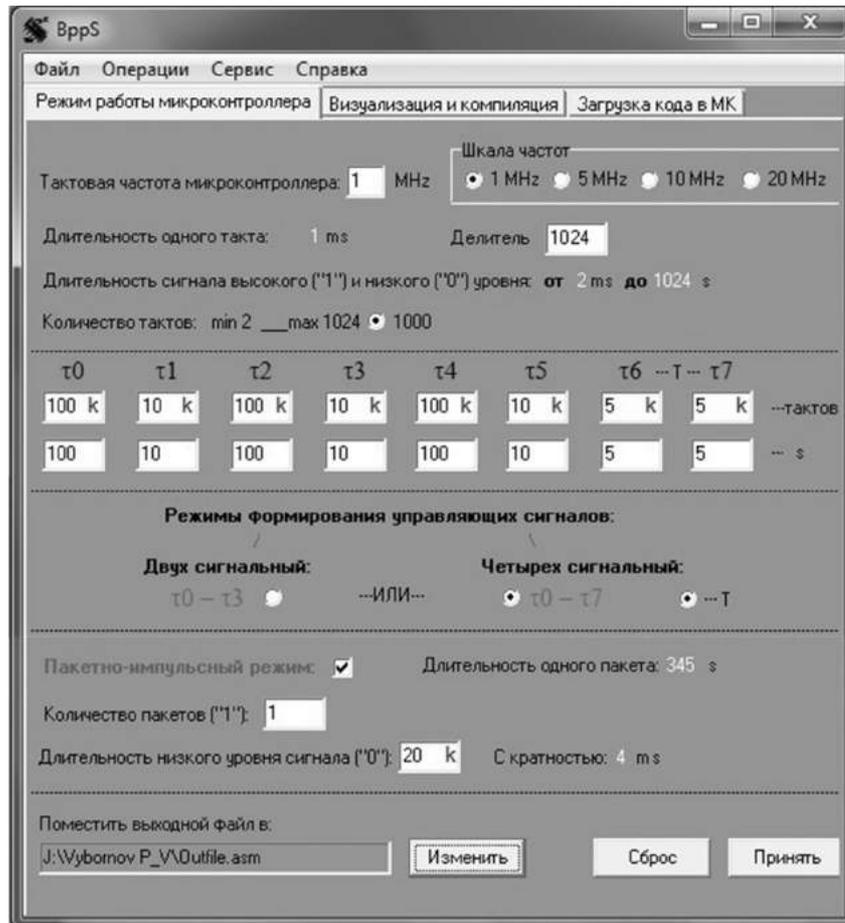


Рисунок 4.9 – Диалоговое окно СПО: «Режим работы микроконтроллера»

Вначале работы программы оператор в зависимости от требуемого диапазона длительностей сигналов управления выбирает одну из четырех тактовых частот

работы МК. Далее производится расчет и отображение времени одного машинного такта МК. В новой редакции добавлена возможность увеличения диапазона длительностей сигналов в 1000 раз и выбора делителя частоты: 1024; 256; 64; 8; 1. Затем производится выбор режим формирования управляющих сигналов и осуществляется ввод значений ( $t_0 - t_7$ ), которые отображаются в соответствующем окне. При этом осуществляется проверка введенных данных с последующим пересчетом их в соответствующее количество тактов, поскольку длительности сигналов управления и их диапазон ограничены прикладным программным обеспечением. Далее можно либо перейти к сохранению введенных параметров периодического режима, либо выбрать пакетно-импульсный режим работы МК. В последнем случае программа переходит в режим ожидания ввода оператором числа  $n$  («количество пакетов») и длительности периода  $T_0$ . Затем следует указать директорию сохранения введенных данных и имя создаваемого файла. Также предусмотрена возможность сброса всех введенных параметров. После введения всех необходимых параметров работы МК, нажатием кнопки «Принять» происходит формирование выходного ассемблер файла и отображается страница визуализации введенных данных и компиляции, вид которой представлен на рисунке 4.10. При этом в обработчике события СПО осуществляется проверка корректности введенных данных оператором и в зависимости от выбранного режима работы МК производится загрузка текста соответствующего входного файла из папки InputFiles. В диалоговом окне «Визуализация и компиляция» графически отображается последовательность выходных сигналов управления и их временные параметры в выбранном режиме работы МК как для «TEST\_MODE», так и для «BASIC\_MODE». При этом реализована возможность вывода изображения диалогового окна на устройства печати. Нажатием кнопки «Компилировать» запускается соответствующая программа, блок-схема алгоритма которого изображена на рисунке 4.11. Сначала программа перекодирует исходный текст из выходного ассемблер файла в перемещаемый объектный код. Далее содержимое временного hex-файла

копируется в выходной 16-ричный объектный файл, который создается в папке, где находится выходной ассемблер файл. В итоге формируется файл в 16-ричном формате, который содержит введенные оператором длительности сигналов управления в выбранном режиме работы МК.

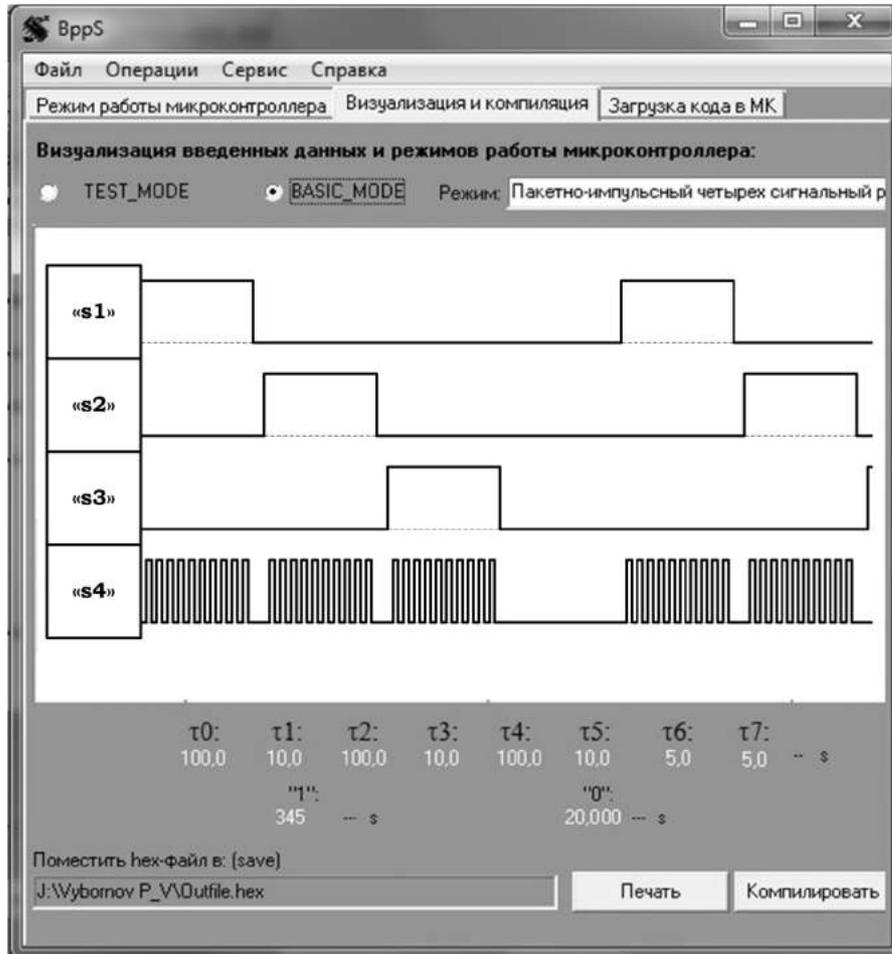


Рисунок 4.10 – Диалоговое окно СПО: «Визуализация и компиляция»

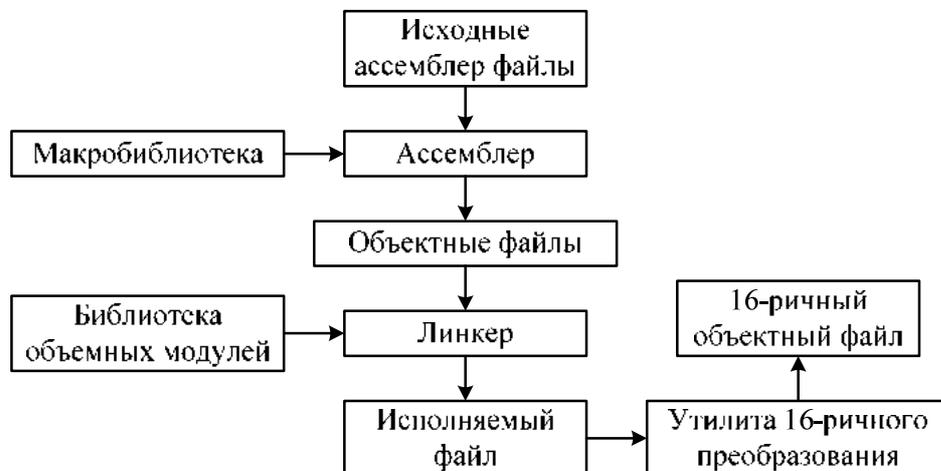


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритма компиляции ассемблер файла

Пояснение к блок-схеме алгоритма компиляции:

- Исходные ассемблер файлы – файлы, содержащие исходный код (текст) программы в операторах языка ассемблер;
- Макробибблиотека – совокупность макросов, которые могут быть включены в исходный текст ассемблер программы.
- Ассемблер – программа, перекодирующая исходный текст из выходного ассемблер файла в перемещаемый объектный код.
- Объектные файлы – это файлы программы в машинных кодах, которая не имеет привязки к адресам памяти микропроцессорной системы. Несколько таких программ (программных модулей) могут связываться в одну (компоноваться) при помощи программы-компоновщика (линкера).
- Библиотека объектных модулей – совокупность файлов в объектном коде, которые могут компоноваться при помощи линкера.
- Линкер – программа, позволяющая связывать несколько программных модулей в одну программу в непереключаемом объектном коде. Программа в непереключаемом объектном коде имеет привязку к конкретным адресам в памяти микропроцессорной системы.
- Исполняемый файл – файл в непереключаемом объектном коде, представляющий собой законченную программу, которую можно преобразовывать в шестнадцатеричный формат.
- Утилита преобразования в 16-ричный формат – программа, преобразующая непереключаемый объектный файл в 16-ричный объектный файл.
- 16-ричный объектный файл – файл в 16-ричном формате, который может быть загружен в память микропроцессорной системы при помощи программатора.

Далее производится загрузка полученного файла в память МК. Для этого необходимо перейти к диалоговому окну СПО «Загрузка кода в МК», вид которого представлен на рисунке 4.12, и подключить МК к последовательному порту ПК по схеме, изображенной на рисунке 4.13. После нажатия кнопки

«Включить программатор» происходит определение МК с отображением его типа.

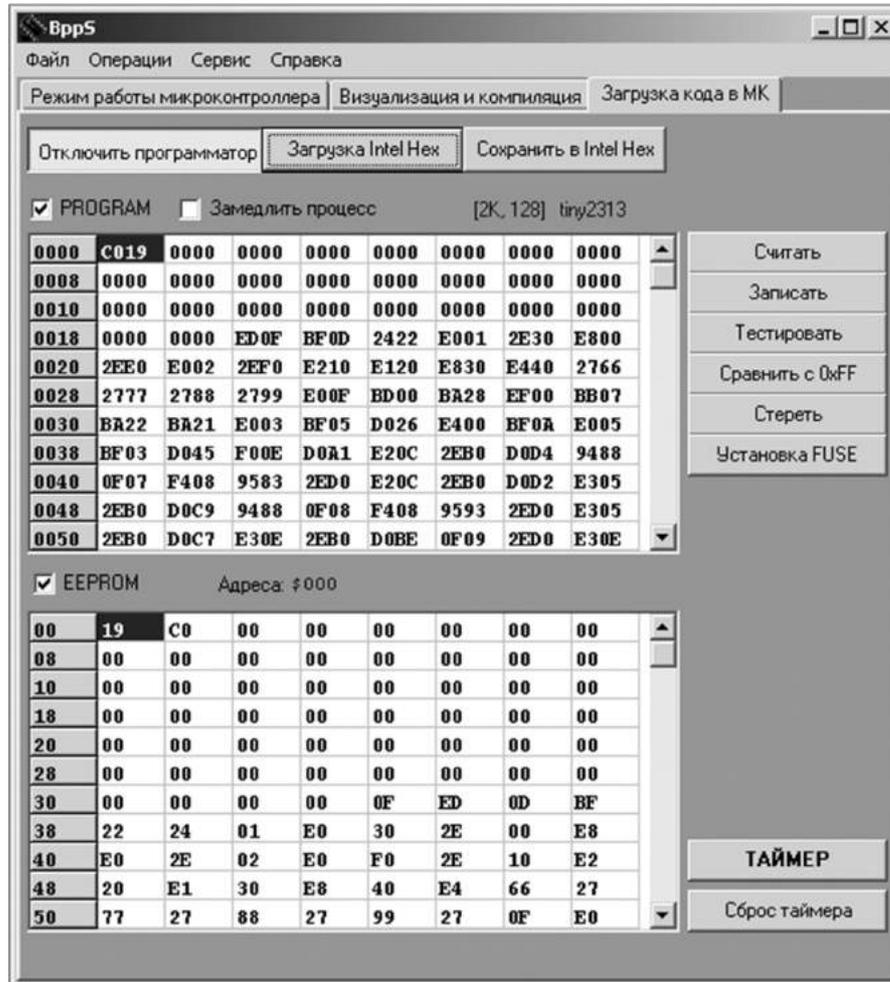


Рисунок 4.12 – Диалоговое окно СПО: «Загрузка кода в МК»

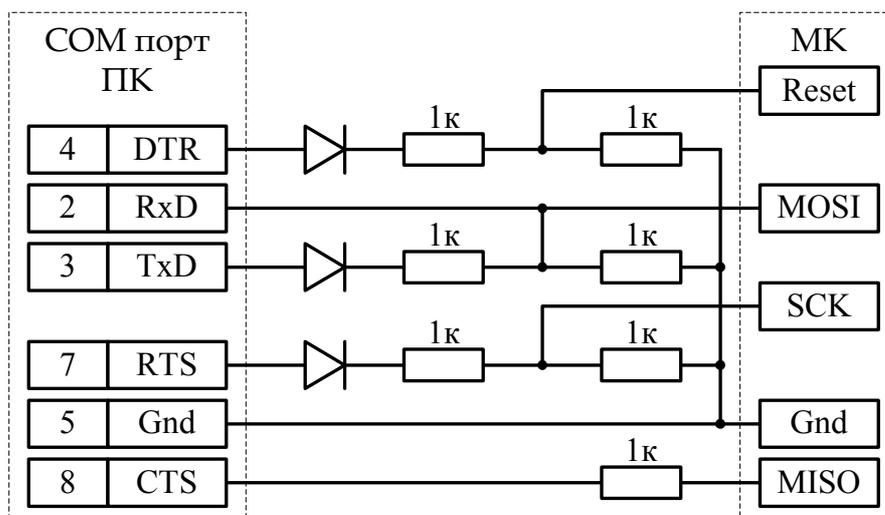


Рисунок 4.13 – Схема подключения МК к ПК

Программный код компилятора «avras32.exe» для МК серии AVR, используемый в составе СПО, был приобретен в 2005 году по лицензионному соглашению у его разработчика [105]. Диалоговое окно «Загрузка кода в МК» содержит следующие элементы управления:

- Команда «Загрузка Intel Hex» производит загрузку данных ранее сформированного hex-файла и их отображение в соответствующих окнах PROGRAM и EEPROM.
- Команда «Сохранить в Intel Hex» осуществляет сохранение данных находящихся в соответствующих окнах PROGRAM и EEPROM.
- Команда «Установка FUSE» производит настройку fuse-битов МК в дополнительно появляющемся окне СПО.
- Команда «Стереть» выполняет очистку содержимого памяти МК. При этом предусмотрена защита очистки данных EEPROM путем установки соответствующих fuse-битов.
- Команда «Тестировать» осуществляет сравнение содержимого окон PROGRAM и EEPROM с соответствующими данными памяти МК. Сегменты окон, в которых обнаружены различия, помечаются «\*». Возможно прерывание процесса сравнения путем нажатия клавиши ESC.
- Команда «Сравнить с 0xFF» проводит проверку МК на чистоту начиная с области с 0xFF (0xFFFF).
- Команда «Считать» производит загрузку содержимого памяти МК и его отображение в соответствующих окнах PROGRAM и EEPROM. При этом предусмотрена защита от считывания данных EEPROM путем установки соответствующих fuse-битов. Возможно прерывание процесса записи/чтения путем нажатия клавиши ESC.
- Команда «Записать» выполняет запись содержимого окон PROGRAM и EEPROM в память МК. В этом случае очистка содержимого МК необязательна, поскольку запись производится путем замены данных в ячейках памяти.

– Команда «Таймер» производит считывание области памяти МК, в которой содержатся данные о времени его работы. После преобразования этих данных выполняется их отображение в дополнительно появляющемся окне с разделением на часы и минуты.

– Команда «Сброс таймера» осуществляет очистку области памяти МК, в которой содержатся данные о времени его работы.

Для работы СПО, объем которого составил 8,95 МБ, ПК должен соответствовать следующим минимальным характеристикам:

- Тип: IBM PC Pentium II 233 и выше;
- Операционная система: Windows 98/NT/2000/XP/Seven.

В ходе практических испытаний специализированной системы управления на базе МК ATtiny-2313-20 установлено её полное соответствие поставленной задачи по функциональным, техническим и эксплуатационным параметрам.

## Заключение

В работе на основании теоретических и экспериментальных исследований разработана новая методика сравнения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых металлических болометров, позволяющая произвести выбор эффективного материала их резистивного элемента. Исследовано новое техническое решение улучшения чувствительности неохлаждаемых болометров путем применения в качестве материала элемента высокоомных металлических сплавов. Установлено, что в настоящее время наиболее перспективными материалами, обладающими наилучшей совокупностью электрофизических свойств, являются сплавы на основе TiNi, потенциал которых способен существенно увеличить конкурентные преимущества неохлаждаемых болометров перед полупроводниковыми аналогами.

В результате проведенных исследований получены новые сведения способные стать научно-техническим и технологическим обоснованием создания высокоэффективных неохлаждаемых металлических болометров нового поколения и показаны преимущества использования таких приемников излучения в составе измерителей средней мощности излучения, пиранометров и оптических абсорбционных газоанализаторов. Также разработана система управления и контроля отдельными электронными узлами устройств и лабораторных макетов различного назначения на базе МК ATtiny-2313-20 со специализированным программным обеспечением, позволяющим оператору без вмешательства в программный код МК осуществлять быструю смену режимов и временных параметров его работы.

### **Основные результаты работы:**

1. Сформулирован новый критерий выбора материала резистивного элемента неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения их пороговых чувствительностей.
2. Установлено, что постоянная времени отклика резистивных элементов микронной толщины на основе металлов главным образом определяется их

размерами; подтверждено несоответствие результатов модельных оценок теплопроводности подобных элементов экспериментальным данным.

3. На основании данных п.1 и п.2 разработана методика, позволяющая произвести сравнительную оценку эффективности использования металлов и их сплавов в качестве резистивных элементов неохлаждаемых болометров, которая показала хорошее соответствие модельных оценок с результатами экспериментов.
4. Установлено, что неохлаждаемый болометр с  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  резистивным элементом сопротивлением до 10 Ом за счет наилучшей совокупности электрофизических характеристик сплава обладает в 2 раза более высокой чувствительностью в сравнении с элементами идентичных размеров из всех технологически применимых металлов и некоторых металлических сплавов при прочих равных условиях.
5. Разработан макет пиранометра на основе  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болометра, который может быть использован в качестве более эффективного измерителя суммарной солнечной радиации, в сравнении с пиранометром СМР-11, рекомендованным службой Росгидромет.
6. Экспериментальные исследования показали, что неохлаждаемые металлические болометры обладают высокой стабильностью параметров и способны заменить термоэлектрические и фотодиодные приемники в измерителях энергетических характеристик оптического излучения.
7. Модельные оценки показали, что применение неохлаждаемых металлических болометров с пороговой чувствительностью менее  $1 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$  при частоте модуляции более 500 Гц и отношением сигнал-шум не менее 110 дБ в составе оптического абсорбционного анализатора является достаточным для обнаружения фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере и предпочтительны с точки зрения высоких эксплуатационных параметров и простоты конструкции.

8. Разработана система управления на базе МК ATtiny-2313, формирующая последовательность 4 импульсов в периодическом или пакетно-импульсном режиме, отслеживающая состояние 4 датчиков и осуществляющая подсчет времени работы схемы, при этом смена алгоритма и временных параметров МК с минимальной дискретностью 50 нс производится оператором с помощью системного программного обеспечения.

## Список используемой литературы

1. Rogalski A. Infrared Detectors. 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press.: Boca Raton, 2010. 898 p.
2. Karasik B., Sergeev A., Prober D. Nanobolometers for THz Photon Detection // IEEE Trans. THz Sci. Technol. 2011. V. 1, № 1. P. 97-111.
3. Du X., Prober D., Vora H., Mckitterick C. Graphene-based Bolometers // Graphene 2D Mater. 2014. V. 1, № 1. P. 1-22.
4. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // Progress in Quantum Electronics. 2012. V. 36, № 2-3. P. 342-473.
5. Herschel W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 1800. V. 90. P. 284–292.
6. Langley S. P. The Bolometer // Nature. 1881. V. 25, № 627. P. 14-16.
7. Rogalski A. History of infrared detectors // Opto-Electron. Rev. 2012. V. 20, № 3. P. 279-308.
8. Talghader J. J., Gawarikar A. S., Shea R. P. Spectral selectivity in infrared thermal detection // Light: Science & Applications. 2012. V. 1. e24.
9. Yoneoka S. ALD-metal uncooled bolometer / S. Yoneoka, M. Liger, G. Yama, R. Schuster, F. Purkl, J Provine, F. B. Prinz, R. T. Howe, and T. W. Kenny // IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Cancun. 2011. P. 676–679.
10. Yang H. H., Rebeiz G. M. Sub-10 pW/Hz<sup>1/2</sup> room temperature Ni nano-bolometer // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. 053106.
11. Degnan J. H. Fast, large-signal, free-standing foil bolometer for measuring ultrasoft x-ray burst fluence // Rev. Sci. Instrum. 1979. V. 50, № 10. P. 1223-1226.
12. Spielman R. B., Deeney C., Fehl D. L., Hanson D. L., Keltner N. R., McGurn J. S., McKenney J. L. Fast resistive bolometry // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70, № 1. P. 651-655.
13. Block W. H., Gaddy O. L. Thin metal film room-temperature IR bolometers with nanosecond response time // IEEE J. Quantum Electron. 1973. V. 9, № 11. P. 1044-1053.

14. Block W. H., Gaddy O. L. Improved responsivity and sensitivity characteristics of the thin-film bismuth bolometer // *IEEE J. Quantum Electron.* 1973. V. 9, № 2. P. 252-254.
15. Abdel-Rahman M., Al-Khalli N., Kusuma A., Debbar N. A slot antenna-coupled microbolometer for detection at 94 GHz // *Progress In Electromagnetics Research Letters.* 2012. V. 32. P. 137-143.
16. Barr E. S. The infrared pioneers – III. Samuel Pierpont Langley // *Infrared Phys.* 1963. V. 3, № 4. P. 195-206.
17. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review // *Proc. SPIE.* 2008. V. 6836. P. 0D.1-0D.15.
18. Gonzalez F., Alda J., Simon J., Ginn J., Boreman G. The effect of metal dispersion on the resonance of antennas at infrared frequencies // *Infrared Physics and Technology.* 2009. V. 52, № 1. P. 48-51.
19. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical antennas // *Advances in Optics and Photonics.* 2009. V. 1, № 3. P. 438-483.
20. Rogalski A. Infrared detectors for the future // *Acta Phys. Pol. A.* 2009. V. 116, № 3. P. 389-406.
21. Kruse P. W. *Uncooled infrared imaging: arrays, systems, and applications.* Washington: SPIE Press, 2001. 110 p.
22. Budzier H., Gerlach G. *Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice.* Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 324 p.
23. Загрубский А. А., Цыганенко Н. М., Чернова А. П. *Детекторы излучения. Учебное пособие.* СПб.: СПбГУ, 2007. 68 с.
24. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я. Разработка датчика из металла с памятью формы для задач оптической спектроскопии // *Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых.* Томск.: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. С. 297-299.

25. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я. Тепловой приемник оптического излучения из металла с памятью формы // Научная сессия ТУСУР-2010: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск.: В-Спектр, 2010. Ч. 4. С. 122-125.
26. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Высокочувствительный приемник из металла с эффектом памяти формы: Тезисы докл. // II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии». Томск, май, 2011. Томск.: Изд-во ТПУ, 2011. С. 10-11.
27. Oloomi H. M., Alam M. S., Rana M. M. Noise performance evaluation of uncooled infrared detectors // IEEE Sensors J. 2011. V. 11, № 4. P. 971-987.
28. Richards P. L. Bolometers for infrared and millimeter waves // Journal of Applied Physics. 1994. V. 76, № 1. P. 1-24.
29. Li S. C., Chen T. M. Noise in Metal Bolometers // Journal of Applied Physics. 1967. V. 38, № 9. P. 3448-3451.
30. MacDonald M. E., Grossman E. N. Niobium microbolometers for far-infrared detection // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1995. V. 43, № 4. P. 893-896.
31. Hooge F. N.  $1/F$  noise sources // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. V. 41, № 11. P. 1926-1935.
32. Radamson H., Kolahdouz M. Chapter 1: Group IV materials for low cost and high performance bolometers / Bolometers: A. G. Unil Perera Editor // Publisher: InTech, 2012. P. 3-22.
33. Уваров А. В., Кузьмин А. А., Шитов С. В., Коваленко А. Г. Электрические измерения тонкопленочных ниобиевых микроструктур для неохлаждаемых болометров миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн // Журнал Радиоэлектроники. 2011. № 3. С. 1-11.
34. Kohl F., Keplinger F., Jachimowicz A., Schalko J. A model of metal film resistance bolometers based on the electro-thermal feedback effect // Sens. Actuators A. 2004. V. 115, № 2-3. P. 308-315.

35. Ramakrishna M. V. S., Karunasiri G., Neuzil P., Sridhar U., Zeng W. J. Highly sensitive infrared temperature sensor using self-heating compensated microbolometers // *Sens. Actuators A*. 2000. V. 79, № 2. P. 122-127.
36. Neuzil P. Mei T. A method of suppressing self-heating signal of bolometers // *IEEE Sensors J*. 2004. V. 4, № 2. P. 207-210.
37. Boarino L., Monticone E., Amato G., Lérondel G., Steni R., Benedetto G., Rossi A., Lacquaniti V., Spagnolo R., Lysenko V., Dittmar A. Design and fabrication of metal bolometers on high porosity silicon layers // *Microelectronics Journal*. 1999. V. 30, № 11. P. 1149-1154.
38. Lee K., Guo Y., Stimson P., Potter K., Chiao J., Rutledge D. Thin-film power-density meter for millimeter wavelengths // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1991. V. 39, № 3. P. 425-428.
39. Chasmar R. P., Mitchell W. H., Rennie A. Theory and performance of metal bolometers // *J. Opt. Soc. Am.* 1956. V. 46, № 3. P. 469-477.
40. Бакшаев Ю. Л., Данько С. А., Чукбар К. В. К теории импульсных фольговых болометров // *ЖТФ*. 2012. Т. 82, № 7. С. 38-43.
41. Tae-Sik Kim, Hee Chul Lee A highly sensitive bolometer structure with an electrostatic-actuated signal bridge // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2006. V. 53, № 9. P. 2392-2400.
42. Bhan R. K., Saxena R. S., Jalwania C. R., Lomash S. K. Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterization techniques // *Defence Science Journal*. 2009. V. 59, № 6. P. 580-589.
43. Fleetwood D. M., Masden J. T., Giordano N. 1/f noise in platinum films and ultrathin platinum wires: evidence for a common, bulk origin // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V. 50, № 6. P. 450-453.
44. Tanaka A., Matsumoto S., Tsukamoto N., Itoh S., Chiba K., Endoh T., Nakazato A., Okuyama K., Kumazawa Y., Hijikawa M., Gotoh H., Tanaka T., Teranishi N. Infrared focal plane array incorporating silicon IC process compatible bolometer // *IEEE Trans. Electron. Devices*. 1996. V. 43, № 11. P. 1844-1850.

45. González F. J. Noise Measurements on Optical Detectors // *Rev. Mex. Fís.* 2006. V. 52, № 6. P. 550-554.
46. Monticone E. et al. Properties of metal bolometer fabricated on porous silicon // *Applied Surface Science*. 1999. V. 142, № 1-4. P. 267-271.
47. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., Тихомиров А. А., Шейдель А. И. Датчики и индикаторы на основе металла с памятью формы для систем мониторинга окружающей среды // *Датчики и системы*. 2012. №3. С. 61-66.
48. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. *Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Applications*. ETS Publ.: Montreal, 2003. 844 p.
49. Ерофеев В. Я., Паскаль Ю. И. Кинетические и морфологические закономерности мартенситных превращений в сплавах Ti(NiCu) // *ДАН СССР*. 1986. Т. 286. С. 879-882.
50. Mookerjee A., Sarma D. D. *Electronic structure of alloys, surfaces and clusters*. London and New York: Taylor & Francis, 2003. 384 p.
51. Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я. «Обработка результатов технических измерений». Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 72 с.
52. Vybornov P., Erofeev V. TiNi alloy as a highly sensitive bolometer material // *Sensors & Materials*. 2014. V. 26, № 1. P. 1-7.
53. Buehler W. J., Wiley R. C. *The properties of TiNi and associated phases*. Maryland: U. S. Naval Ordnance Laboratory, 1961. 91 p.
54. Grummon D., Shaw J., Gremillet A. Low-density open-cell foams in the NiTi system // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82, № 16. P. 2727-2729.
55. *Таблицы физических величин / Справочник: под ред. акад. И. К. Кикоина*. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
56. Ишанин Г. Г. *Источники и приемники излучения*. СПб.: Политехника, 1991. 219 с.
57. Хирд Г. *Измерение лазерных параметров / Пер. с англ. под ред. Ф. С. Файзуллова*. М.: Изд. «Мир», 1970. 540 с.

58. Волков Г. С., Лахтюшко Н. И., Терентьев О. В. Радиационный болометр из фольги для измерения энергетических потерь быстрых Z пинчей // ПТЭ. 2010. № 5. С. 115–120.
59. Vybornov P., Andreev Yu. Perspective material and applications of uncooled metal bolometers // IEEE Sensors J. 2016. V. 16, № 16. P. 6155-6160.
60. Smithells metals reference book. 7<sup>th</sup> edition / Edited by E. A. Brandes and G. B. Brook. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992. 1794 p.
61. Material property data. Режим доступа: <http://www.matweb.com/index.aspx>, свободный (дата обращения: 7.08.2015). Яз. англ.
62. Ling C. C., Rebeiz G. M. A wide-band monolithic quasi-optical power meter for millimeter- and submillimeter-wave applications // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1991. V. 39, № 8. P. 1257-1261.
63. Lee K., Guo Y., Stimson P., Potter K., Chiao J., Rutledge D. Thin-film power-density meter for millimeter wavelengths // IEEE Trans. Antennas Propag. 1991. V. 39, № 3. P. 425-428.
64. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // ЖТФ. 2004. Т. 24, № 7. С. 114-120.
65. Kim M., Oh T. Thermoelectric characteristics of the thermopile sensors with variations of the width and the thickness of the electrodeposited bismuth-telluride and antimony-telluride thin films // Materials Transactions. 2010. V. 51, № 10. P. 1909-1913.
66. Michal Ziv-El Bi-bolometer: senior thesis. Madison: Department of Physics, University of Wisconsin, 2004. 38 p. Режим доступа: [http://cmb.physics.wisc.edu/papers/theses/Michal\\_Ziv-El\\_thesis.pdf](http://cmb.physics.wisc.edu/papers/theses/Michal_Ziv-El_thesis.pdf), свободный (дата обращения: 9.09.2015). Яз. англ.
67. Tim J. Sobering Op amp noise analysis. Technote 5. 2002. Режим доступа: <http://www.k-state.edu/edl/docs/pubs/technical-resources/Technote5.pdf>, свободный (дата обращения: 23.09.2015). Яз. англ.

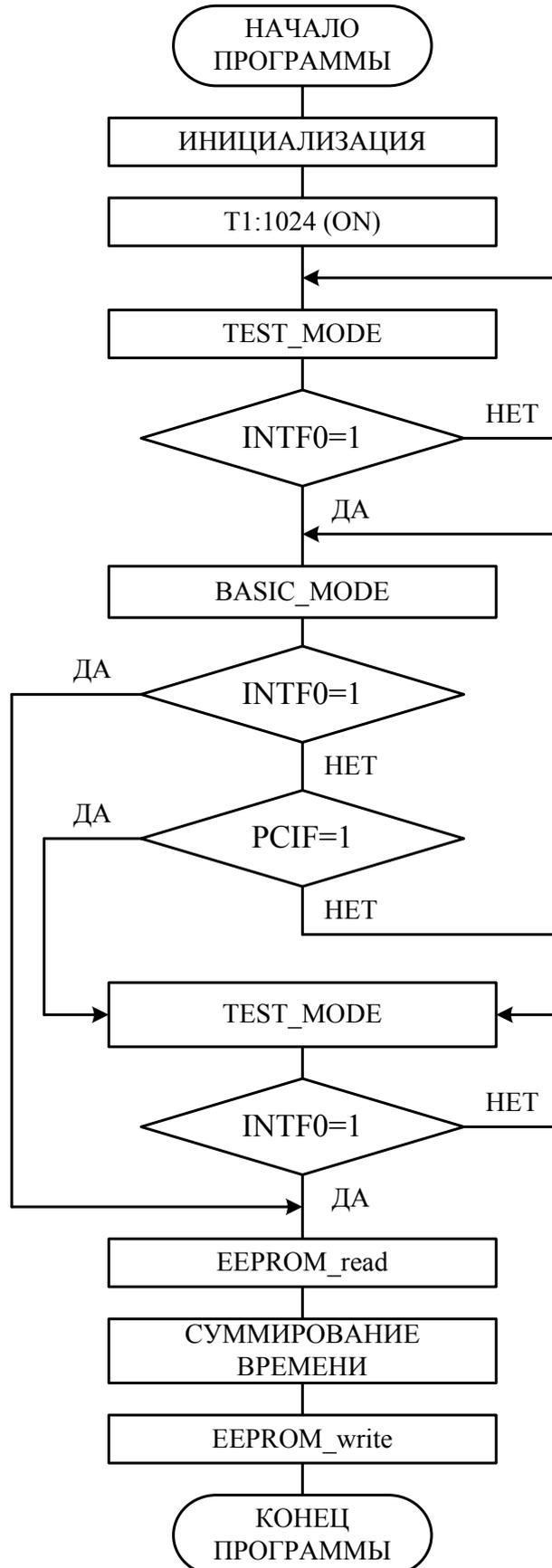
68. Steffes M. Noise analysis for high-speed op amps. Application report. 2005. Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/sboa066a/sboa066a.pdf>, свободный (дата обращения: 23.09.2015). Яз. англ.
69. Noise analysis in operational amplifier circuits. Application report. 2007. Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf>, свободный (дата обращения: 23.09.2015). Яз. англ.
70. Saravanan R., Rani M. P. Metal and alloy bonding: an experimental analysis. charge density in metals and alloys. London: Springer, 2012. 151 p.
71. Hogan C.M. Density of States of an Insulating Ferromagnetic Alloy // *Phys. Rev.*, Vol. 188, № 2. P. 870–874.
72. Martin J. W. Concise encyclopedia of the structure of materials. Oxford: Elsevier, 2008. 512 p.
73. Выборнов П. В., Кабанов М. В., Андреев Ю. М. Алгоритм оценки эффективности неохлаждаемых болометров на основе металлов и их сплавов // *Известия ВУЗов. Физика*. 2016. Т. 59, № 9. С. 170-172.
74. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: учебное пособие. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
75. Niesler F. B. P., Gansel J. K., Fischbach S., Wegener M. Metamaterial metal-based bolometers // *Applied Physics Letters*. V. 100. 203508.
76. Park K. Y. Chahal P. Novel THz imaging array using high resistivity metasurfaces // in *IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference*. 2014. P. 775–781.
77. Vybornov P., Erofeev V. Laser power measurement with shape-memory-metal sensor: Abstracts // X International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2011. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2011. С. 115.
78. Способ измерения мощности лазерного излучения: пат. 2345334 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> G 01 J 5/58 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., заявитель и

- патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2007133060/28. заявл. 03.09.2007, опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3.
79. Бейзель Н. Ф. Атомно-абсорбционная спектрометрия. Учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 2008. 72 с.
80. Faïn X., Moosmüller H., Obrist D. Toward real-time measurement of atmospheric mercury concentrations using cavity ring-down spectroscopy // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, № 6. P. 2879–2892.
81. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Оптический абсорбционный газоанализатор, оснащенный чувствительным элементом из металла с эффектом памяти формы // Восьмое Сибирское совещание по климатологическому мониторингу: Материалы российской конференции. / Под ред. М. В. Кабанова. Томск.: Аграф-Пресс, 2009. С. 391-393.
82. Оптический абсорбционный газоанализатор: пат. 2421709 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> G 01 N 21/61 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., заявитель и патентообладатель Томск, ИМКЭС СО РАН. – № 2009121770/28. заявл. 08.06.2009, опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17.
83. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Приемники на основе титановых сплавов и их применение в устройствах мониторинга окружающей среды // Тезисы докладов VIII Всероссийского симпозиума «Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012». Томск.: Аграф-Пресс, 2012. С. 49.
84. Vybornov P., Erofeev V. Optoelectronic system based on uncooled metal bolometers: Abstracts // XII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2015. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2015. P. 124.
85. Edner H., Faris G. W., Sunesson A., Svanberg S. Atmospheric atomic mercury monitoring using differential absorption lidar techniques // *Appl. Optics.* 1989. V. 28, № 5. P. 921-930.
86. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.

87. Vybornov P., Erofeev V. Investigation of the characteristics of the bolometer with TiNi sensitive element: Abstracts // XI International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2013. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2013. P. 112-113.
88. Scheid M., Markert F., Walz J., Wang J., Kirchner M., Hänsch T. 750 mW continuous-wave solid-state deep ultraviolet laser source at the 253.7 nm transition in mercury // Opt. Lett. 2007. V. 32, № 8. P. 955-957.
89. Transimpedance Cumulative Output Noise Voltage Режим доступа: <http://www.jensign.com/transimpedance/index.html>, свободный (дата обращения: 13.12.2015). Яз. англ.
90. Восканян К. Л., Саенко А. Г. Актинометрические наблюдения. Пособие для учебной практики. СПб.: РГГМУ, 2010. 54 с.
91. Актинометрический приемник болометрического типа: пат. 2469282 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> G 01 J 5/20 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., Зуев С. В., Тихомиров А. А.; заявитель и патентообладатель Томск, ИМКЭС СО РАН. – № 2011122464/28. заявл. 02.06.2011, опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
92. Левенталь Л. А. Введение в микропроцессоры: Программное обеспечение, аппаратные средства, программирование / Пер. с англ. под ред. В. В. Сташина. М.: Энергоатомиздат, 1983. 464 с.
93. Рождественский Д. А. Микропроцессорные устройства в системах управления: Учебное пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. 130 с.
94. Александров Е. К., Грушвицкий Р. И., Купрянов М. С., Мартынов О. Е. Микропроцессорные системы: Учебное пособие для вузов / Под общ. ред. Д. В. Пузанкова. СПб.: Политехника, 2002. 935 с.
95. Сташин В. В., Урусов А. В., Мологонцева О. Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 224 с.

96. Баранов В. Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. 288 с.
97. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Tiny и Mega фирмы «ATMEL». М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. 560 с.
98. Арсеньев Ю. Н., Журавлев В. М. Проектирование систем логического управления на микропроцессорных средствах. Учебное пособие для вузов. М.: Высш. Шк, 1991. 319 с.
99. Кормилин В. А., Костевич А. Г. Микропроцессоры в устройствах и системах радиосвязи, радиовещания и телевидения. Учебное пособие. Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2004. 313 с.
100. Ремизевич Т. В. Микроконтроллеры для встраиваемых приложений: от общих подходов – к семействам HC05 и HC08 фирмы Motorola / Под редакцией Кирюхина И. С. М.: ДОДЭКА, 2000. 272 с.
101. Гребнёв В. В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы «ATMEL». М.: ИП Радиософт, 2002. 176 с.
102. Программа “Управление и контроль – пакетно-импульсный режим”. А.С. 2007610893 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2006614596. заявл. 27.12.2006, опубл. 22.02.2007.
103. Программа “Управление и контроль”. А.С. 2007610894 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2006614597. заявл. 27.12.2006, опубл. 22.02.2007.
104. Программа “Bipolar pulse power supply («BppS»)". А.С. 2007611346 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2007610522. заявл. 15.02.2007, опубл. 28.03.2007.
105. Простейший программатор AVR. Режим доступа: <http://avr.nikolaew.org/progr>, свободный (дата обращения: 23.11.2015). Яз. рус.

## Блок-схема общего алгоритма программы МК в периодическом режиме





### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы П.В. Выборнова  
«Неохлаждаемый болометр на основе  $Ti_{30,5}Ni_{49,5}$  для оптико-электронных измерительных систем»

Техническая комиссия лаборатории новых материалов и перспективных материалов СФТИ ТГУ по установлению факта использования результатов в научных исследованиях лаборатории в составе: председателя зам. зав. лаборатории, к.ф.-м.н., доцента В.А. Светличного и членов комиссии с.н.с., к.х.н. Т.И. Изаак, с.н.с., к.х.н. А.В. Шабалиной составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, были использованы в разработке и создании спектрометра среднего ИК и терагерцового диапазона, входящего в состав лазерного исследовательского стенда лаборатории новых материалов и перспективных технологий Сибирского физико-технического института Томского государственного университета. По результатам диссертационной работы получено три патента на изобретения.

Использование представленных в диссертационной работе результатов позволило повысить эффективность оценки физических свойств, состава и состояния измеряемых объектов, а именно:

- определения лучевой стойкости и возможностей выполнения условий фазового синхронизма для различных процессов параметрического преобразования частоты в нелинейных кристаллах в пределах среднего ИК и ТГц диапазона;
- оценок состава и состояния естественных биологических объектов лазерными спектроскопическими методами после физических воздействий, в частности волокон естественного и искусственного происхождения и тканей из них после температурного воздействия.

Результаты диссертационной работы используются при проведении исследований и включены в отчеты по проекту № 8.1.51.2015 Программы повышения конкурентоспособности ТГУ «Разработка комплексной системы определения состава и свойств различных объектов и сред».

**Председатель комиссии по установлению факта использования:**

Зам. зав. лаб. новых материалов  
и перспективных технологий, к.ф.-м.н.

 В.А. Светличный

**Члены комиссии:**

С.н.с. лаборатории новых материалов и перспективных технологий, к.х.н.

 Т.И. Изаак

С.н.с. Лаборатории новых материалов и перспективных технологий, к.х.н.

 А.В. Шабалина

Рисунок 1 – Акт о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
Выборнова Павла Викторовича