

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт Космических и информационных технологий  
Базовая кафедра «Интеллектуальные системы управления»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_      \_\_\_\_\_  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Математические модели и алгоритмы анализа данных для сети измерения  
температуры

27.04.03 Системный анализ и управление

27.04.03.02 Системный анализ данных и технологий принятия решений

Научный руководитель	_____	<u>доцент, к.т.н.</u>	<u>А.А.Корнеева</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>И.О.Бессмертный</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>доцент кафедры «ИС», к.т.н.</u>	<u>Н.В.Кононова</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	<u>ст. преподаватель</u>	<u>Н.Б. Позолотина</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2019

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Математические модели и алгоритмы анализа данных для сети измерения температуры» содержит 112 страниц текстового документа, 41 таблиц, 27 рисунков, 89 формул, 35 использованных источников.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА, ТЕРМОРЕЗИСТОР, АГРЕССИВНАЯ СРЕДА, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ.

Цель данной работы состоит в повышении точности температурного контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- разработка и исследование численного метода анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат;
- разработка и исследование алгоритма обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов.

Для решения поставленных задач в работе используются численные методы, методы электротехники, физики, радиоэлектроники, уравнения математической физики, программирование, данные из методов оптимизации, математико-физическое моделирование.

Новизна работы состоит в принципиально новом взгляде на способы контроля температуры в экстремальных условиях, ориентированном на создании алгоритмов обеспечения температурного контроля радиоэлектронной аппаратуры, основанных на использовании тонких металлических проводников для расчёта теплового баланса и измерении температуры при небольшом количестве проводов с минимизацией дополнительного оборудования.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1 Математическая модель для терморезисторной сети измерения температуры. 9	
1.1 Воздействие окружающей среды на космические аппараты..... 9	
1.1.1 Общие сведения о космосе .....	9
1.1.2 Излучение в космическом пространстве..... 14	
1.1.3 Воздействие космического пространства на характеристики искусственных аппаратов .....	20
1.2 Контроль температуры бортовой радиоэлектронной аппаратуры .....	23
1.2.1 Назначение системы терморегулирования .....	23
1.2.2 Пассивные системы терморегулирования .....	26
1.2.3 Активные методы регулирования температуры КА .....	27
1.2.4 Испытания и отработка теплового режима КА .....	29
1.2.5 Математическое моделирование теплового режима КА .....	31
1.3 Датчики температуры .....	36
1.3.1 Общие сведения о датчиках температуры .....	36
1.3.2 Термопары .....	37
1.3.3 Резистивные датчики температуры..... 40	
1.3.4 Термисторы..... 41	
1.3.5 Полупроводниковые датчики температуры..... 43	
1.3.6 Термореле и регуляторы с установкой температуры .....	45
1.4 Существующие решения измерения температуры участков КА..... 45	
Выводы к главе 1..... 52	
2 Численный метод анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат..... 53	
2.1 Постановка задачи..... 53	
2.2 Математическая модель..... 54	
2.3 Алгоритм решения задачи .....	56
2.4 Вычислительный эксперимент .....	67
2.4.1 Эксперимент для электрической платы размерностью $5 \times 5$ ..... 68	

2.4.2 Эксперимент для электрической платы размерностью $7 \times 7$ .....	72
2.4.3 Эксперимент для электрической платы размерностью $10 \times 10$ .....	75
Вывод к главе 2 .....	79
3 Алгоритм обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов.....	80
3.1 Постановка задачи.....	80
3.2 Математическая модель.....	81
3.3 Алгоритм расчёта сопротивлений терморезисторов.....	83
3.3.1 Метод прогонки.....	92
3.4 Вычислительный эксперимент .....	96
3.4.1 Одинаковые значения сопротивлений резисторов и терморезисторов	96
3.4.2 Различные значения сопротивлений резисторов и терморезисторов	99
3.4.3 Большие значения сопротивлений резисторов при небольших значениях терморезисторов.....	101
3.4.4 Схема из пяти терморезисторов .....	103
3.4.5 Проверка алгоритма в лабораторных условиях.....	107
Вывод к главе 3 .....	108
Заключение .....	109
Список используемых источников.....	110

## ВВЕДЕНИЕ

С древнейших времён человек изучал окружающий его мир. В начале это были лишь окрестные леса и горы, поля и реки, но чем больше он узнавал, тем сильнее становилась его «жажда» познания. Для утоления этой «жажды» люди покидали свои дома и отправлялись на поиски ответов на свои вопросы. В конце концов весь доступный на тот момент мир был полностью исследован, и перед человеком встало величайшее препятствие – океан. Но разве настоящего исследователя может остановить какая-то преграда? Энтузиасты строили корабли и отправлялись покорять морскую гладь. Так в конце XV века была открыта Америка, а всего через 30 лет совершено первое кругосветное путешествие. В 1605 году открыли Австралию, а в 1820 – Антарктиду. В итоге на нашей планете не осталось такого места, где бы не ступала нога человека. «Но неужели это конец? И всё, что можно исследовать, уже открыто и изучено?» - подумал человек, а потом поднял взгляд в ночное небо. Космос... Бесконечный кладёзь тайн, которые только и ждут того, чтобы их разгадали.

Исследование космического пространства является одной из важнейших задач современного общества. Но для успешного освоения околоземного пространства человечеству необходимы надёжные и долговечные космические аппараты (КА). Поддержание этих факторов на требуемом уровне – это важнейшая инженерная, экономическая и научная задача, решение которой основывается на системном подходе, применяемом на каждом этапе проектирования и эксплуатации бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Обеспечение длительного срока работоспособности КА напрямую зависит от реализации на всех этапах жизненного цикла бортовой РЭА предельно достижимых показателей надёжности. Использование эффективных методов и средств проектирования, производства и испытаний на этапе наземной экспериментальной отработки, а также прогнозирование процессов, которые могут привести к неправильному функционированию или преждевременному отказу бортовой РЭА на этапе активного существования КА, помогают достичь

таких показателей. Суть этих методов состоит в том, чтобы при помощи физико-математической модели воспроизвести условия работы КА в наземных лабораториях.

Как показывает время и многолетний опыт инженеров космической промышленности стабильность теплового режима космического аппарата является одним из основных факторов, определяющих его долговечность и надёжность. Современная бортовая РЭА, устанавливаемая на борту космических кораблей и спутников, может работать только в ограниченном температурном диапазоне. К большинству отказов РЭА приводят различные термические воздействия на оборудование такие как:

- прямое солнечное излучение;
- отражённое солнечное излучение от планеты;
- собственное излучение планеты;
- столкновение КА с молекулами газа в верхних слоях атмосферы;
- резкое падение температуры КА, связанное с его заходом в тень планеты;
- собственное нагревание внутренних источников бортовой РЭА КА: приборов, агрегатов, энергоустановок.

Чаще всего отказы РЭА, вызванные отклонением температуры от допустимых значений, приводят к изменению различных характеристик оборудования, снижению ресурса аппаратуры и различным функциональным нарушениям. Поэтому особенно пристальное внимание уделяется оперативному контролю тепловых режимов РЭА. При отсутствии визуального мониторинга температурный контроль осуществляется контактными датчиками, которые размещают на радиоэлектронном изделии или печатной плате. Такими датчиками могут выступать терморезисторы, термопары, детекторы температурного сопротивления, различные резистивно-диодные структуры. Но трудность использования датчиков состоит в том, что любой датчик требует дополнительное оборудование (источники тока и напряжения, управляющие элементы, потребители), а также большого количества соединительных

проводников. Это приводит к усложнению схемы контроля всего критичного оборудования.

Почти все известные на сегодняшний день виды КА содержат специальные системы терморегулирования или термостатирования, вес которых может достигать до 30% веса аппарата. Вывод на орбиту планеты каждого килограмма груза сопровождается огромными энергетическими затратами. Снижение веса терморегулирующих систем и повышение надёжности их работы при помощи оперативного температурного контроля радиоаппаратуры, а в частности обнаружение перегрева отдельных элементов бортовой РЭА является актуальной задачей. Решение этой задачи затрудняется невозможностью прямого визуального наблюдения с использованием тепловизионных приборов. Решение этой задачи является причиной возрастающего интереса к проблемам тепловой стабилизации КА и средствам её обеспечения.

Жёсткие весовые ограничения приводят к тому, что конструкторам приходится создавать терморегулирующие системы без хладо- или термопроизводительных запасов. Это приводит к тому, что самые незначительные ошибки в тепловых расчётах вызывают ситуации, когда тепловые режимы КА не будут выдержаны в требуемых пределах. Чаще всего конструкция КА является довольно сложной для точного теоретического расчёта тепловых режимов. Тогда для проверки расчётов и их уточнения используют экспериментальные методы.

Одно из перспективных направлений – использование тонких протяжных металлических проводников или проводников на основе специальных сплавов с определённым локальным сопротивлением, которое непосредственно зависит от локальной температуры. Другим перспективным направлением является использование схем, содержащих виртуальные переключатели, представленные диодными структурами. В современных реалиях датчики в сетевом исполнении отличаются сложной технической реализацией, или их математические модели не обеспечивают заданную точность измерений.

Целью данной работы является повышение точности температурного контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать и исследовать численный метод анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат;
- разработать и исследовать алгоритм обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов.

Новизна работы состоит в принципиально новом взгляде на способы контроля температуры в экстремальных условиях, ориентированном на создании алгоритмов обеспечения температурного контроля РЭА, основанных на использовании тонких металлических проводников для расчёта теплового баланса и измерении температуры при небольшом количестве проводов с минимизацией дополнительного оборудования.

В работе предпринимаются попытки создания эффективных распределенных сетей температурных датчиков для бортовой РЭА КА с использованием меньшего количества проводников и дополнительного оборудования, обладающих большей точностью обеспечения температурного контроля при помощи более эффективных схем соединения и алгоритмов обработки измерений.



# **1 Математическая модель для терморезисторной сети измерения температуры**

## **1.1 Воздействие окружающей среды на космические аппараты**

### **1.1.1 Общие сведения о космосе**

В современной науке под космосом понимают бесконечную во времени и пространстве Вселенную. Использование высокоточных оптических телескопов позволяет вести исследования объектов, расположенных на расстоянии 5 млрд. световых лет от Земли (приблизительно  $5 \cdot 10^{21}$  км), а с изобретением радиотелескопов это расстояние увеличилось в два раза. Нижней границей космоса принято считать 100 км от поверхности Земли, стоит заметить, что земная атмосфера ограничивается сферической поверхностью, расположенной на высоте 70 км (расстояние между 70 и 100 км называется переходной областью). Следовательно, космическим полётом, или движением в космическом пространстве, называется движение объекта, искусственного происхождения, на высотах более 100 км от поверхности нашей планеты (для других космических объектов это значение может изменяться, так как оно зависит от многих параметров: его диаметров, наличии атмосферы, силы притяжения и др.). Наблюдаемая часть Вселенной позволяет учёным исследовать многообразие процессов и явлений, протекающих во Вселенной.

Существование различных типов полей в космосе: электростатических, магнитных, гравитационных; - широко известный факт. Действия этих полей можно наблюдать в Солнечной системе. Также существуют гипотезы о изолированных электромагнитных образованиях – геонах и гравитонах (квантах гравитационного поля) [1]. К сожалению на данном этапе технологического развития невозможно полностью подтвердить или опровергнуть данные гипотезы.

В настоящее время установлено наличие магнитного поля у звёзд. Так, у Солнца, максимальная напряжённость магнитного поля у наружной поверхности солнечных пятен и равняется от 4 до  $24 \cdot 10^5$  А/м, а среднее значение напряжённости магнитного поля на поверхности Солнца – составляет  $4 \cdot 10^3$  А/м. Также существуют магнитопеременные звёзды, ярким их представителем является звезда  $\alpha^2$  созвездия Гончих Псов, магнитное поле которой меняется в течении 4-5 земных суток от  $+4 \cdot 10^5$  до  $-4 \cdot 10^5$  А/м [2].

Магнитное поле Галактики Млечной Путь имеет незначительную величину (всего несколько А/м); оно направлено вдоль галактических рукавов, имеющих протяжённость несколько тысяч световых лет. Не смотря на небольшую величину учёные считают, что оно сыграло большую роль в конфигурации и эволюции Галактики.

Русские учёные Б. Понтекорво и Я. Смородинский высказали гипотезу о преобладании нейтрино во Вселенной – самой проникающей частицы.

Если производить сравнения, то наша Галактика похожа на чечевицу с диаметром 100 и толщиной в центре 16 световых лет. Мы можем наблюдать её с ребра в виде Млечного Пути. В галактике примерно 150 миллиардов звёзд. Наша звезда – Солнце относится к звёздам спектрального класса G (жёлтый карлик)[3].

На данный момент рассчитаны скорости перемещения небесных тел в космическом пространстве, значения которых приведены в таблице 1.1.1.1.

Таблица 1.1.1.1 – Значения скоростей некоторых небесных тел.

Наименование	Значение, км/с
Скорость движения (средняя) Земли по орбите вокруг Солнца	29
Скорость движения Солнца относительно звёзд ближайшей галактической окрестности	19
Скорость вращения галактики в точке расположения Солнечной системы	250
Скорость движения галактики относительно фона реликтового излучения	160

Для измерения расстояний в космическом пространстве используют несколько единиц. Самой маленькой из которых является а.е. – астрономическая единица длины, равная среднему расстоянию от Земли до Солнца (эту единицу

применяли в своих расчётах такие известные астрономы как И.Кеплер и Н.Коперник). Астрономическая единица позволяет выполнить оценку расстояний с высокой точностью, жаль что этого нельзя сказать о самой единицы измерения (1.1.1.1):

$$1 \text{ а. е.} = 149\,600\,000 \pm 30\,000 \text{ км} \quad (1.1.1.1)$$

Точность которой для практических целей космонавтики должна быть увеличена до 30 км. Наряду с астрономической единицей для измерения расстояний применяют парсеки. 1 парсек (пк) – это расстояние от Земли до светила, которое обладает годичным параллаксом в 1 секунду (угол, под которым радиус земной орбиты виден со звезды под углом в 1 секунду). Значение парсека в разных единицах измерения расстояния приведено в (1.1.1.2).

$$1 \text{ ПК} = 206\,264,8 \text{ а. е.} = 3,0837 \cdot 10^{13} \text{ км} = 3,259 \text{ св. лет} \quad (1.1.1.2)$$

Световой год (свет.год) – ещё одна единицы измерения расстояний в космическом пространстве, применяемая повсеместно. 1 световой год равен расстоянию, которое преодолет свет за 1 год, если на его пути не встретится препятствий. Его значение приведено в (1.1.1.3).

$$1 \text{ свет. год} = 9,460 \cdot 10^{12} \text{ км} = 0,3069 \text{ ПК} = 63\,280 \text{ а. е.} \quad (1.1.1.3)$$

В конце XVI начале XVII вв. произошла революция в астрономии. В свет вышли три знаменитые книги: в 1543г. «Об обращении небесных сфер» Николая Коперника; в 1609г. «О движениях Марса» и в 1610г. «Звёздный вестник» Галилео Галилея. Также немаловажным событием стало изобретение телескопа в 1608 г. мастером по изготовлению очков Галилео Галилеем.

До этого момента считалось, что система описания мира Птолемея истинно верная. Птолемей утверждал, что Земля находится в центре Вселенной; небесные

тела перемещались по малым окружностям (эпициклам), а центр эпициклов двигался по большой окружности вокруг Земли. Однако в этой картине мира был один существенный недочёт: расчёты показывали, что центр большой окружности не совпадал с «центром Вселенной» - Землёй (он находился близко с центром планеты, но они не совпадали). Н.Коперник предложил следующее: Солнце было помещено в центр системы, а планеты, к которым относилась и Земля - на эпициклы. Следующий шаг в становлении астрономии сделал И.Кеплер.

Используя наработки датского астронома Тихо Браге, который в 1609-1619 гг. наблюдал за движениями планет, а в частности Марса, И. Кеплер изобразил положения Марса на большом листе бумаге. То что он увидел, заставило учёного усомниться в себе. Наблюдение не только безоговорочно опровергало геоцентрическую модель Птолемея, но и показывало, что система Коперника, сторонником которой был сам Кеплер, также является ошибочной. Ожидалось, что путь обращения Марса вокруг Солнца должен представлять из себя идеальный круг, но вопреки ожиданиям получилась совершенно иная фигура – эллипс, который имел не один центр, как окружность, а два фокуса. Таким образом, был сделан вывод, что планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых расположено Солнце. Этот вывод известен под первым законом Кеплера.

Первый закон гласит: «Движение всех планет и комет происходит по коническим сечениям (эллипс, парабола, гипербола), в одном из фокусов которых расположено Солнце». Математическая формулировка этого закона приведена в (1.1.1.4).

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \varphi}, \quad (1.1.1.4)$$

где  $r$  – радиус-вектор из фокуса, в котором находится Солнце;

$p$  – параметр орбиты (геометрически он равен половине хорды, проведённой через фокус конического сечения перпендикулярно к его главной оси);

$e$  – эксцентриситет конического сечения (для эллиптической орбиты эксцентриситет равен отношению расстояния от центра эллипса к его большей полуоси);

$\varphi$  – угол между радиус-вектором и главной осью орбиты, отсчитываемый по движению планеты от направления радиус-вектора в перигелий (ближайшую точку траектории к фокусу, в котором находится Солнце).

Второй закон звучит следующим образом: «Площади, которые описывают радиус-векторы планет относительно Солнца, прямо пропорциональны соответствующим временам движения по орбитам этих планет». Также этот закон известен как «Закон площадей».

Для двух планет его можно записать следующим образом (1.1.1.5):

$$V_1 r_1 \cos \theta_1 = V_2 r_2 \cos \theta_2, \quad (1.1.1.5)$$

где  $\theta$  – угол наклона траектории.

Третий закон: «Для планет движущихся по эллипсам, квадраты времени обращения относятся, как кубы больших полуосей их эллиптических орбит». Этот закон известен в астрономии как «Гармонический закон».

Математический вид третьего закона Кеплера представлен в (1.1.1.6):

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{f}{4\pi^2} (M + m), \quad (1.1.1.6)$$

где  $a$  – большая полуось эллиптической орбиты;

$T$  – период одного полного обращения планеты вокруг Солнца;

$f$  – гравитационная постоянная;

$M$  – масса Солнца;

$m$  – масса планеты.

В 1666 году на основе этих законов был выведен Исааком Ньютоном закон всемирного тяготения, ставшим не только краеугольным камнем ньютоновского мировоззрения, но и небесной механики: «Любые два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними» (1.1.1.7):

$$F = \frac{f m_1 m_2}{r^2}. \quad (1.1.1.7)$$

### 1.1.2 Излучение в космическом пространстве

Так как основной причиной перегрева и отказа КА является радиация, то следует более подробно изучить вопрос излучения энергии в Солнечной системе.

Солнце – единственный мощный источник лучистой энергии в нашей планетарной системе. Ежесекундно оно излучает в космическое пространство примерно  $3,86 \cdot 10^{23}$  кВт энергии. Если перевести это на один квадратный метр видимой поверхности Солнца, то получим 64000кВт. На орбите Земли (расстояние 1 а.е.) плотность солнечного лучистого потока ослабевает до 1396 Вт/м<sup>2</sup>, эту величину называют солнечной постоянной и обозначают  $S_{\theta}$ . Но как показывают наблюдения, уровень солнечной активности всегда изменяется, поэтому и значение солнечной постоянной отклоняется от принятого на  $\pm 2\%$ . Также не стоит забывать о сезонных вариациях  $S_{\theta}$ , которые обусловлены эллиптичностью орбиты Земли, составляющих  $\pm 3,5\%$ . В перигелии солнечная постоянная равна 1444 Вт/м<sup>2</sup>, а в афелии - 1349 Вт/м<sup>2</sup> [4].

При расчётах тепловых режимов КА обычно принимается, что средняя яркость Солнца равняется 2020 Вт/см<sup>2</sup>, а его радиационная температура (температура абсолютно чёрного тела, имеющего угловой размер Солнца и создающего в вакууме на поверхности, перпендикулярной к падающим лучам, энергетическую освещённость, равную солнечной) равна 5785°К.

Вокруг Солнца находится вечно меняющаяся светящаяся корона с температурой около  $1000000^{\circ}\text{K}$  и диаметром, превышающий солнечный в 2-3 раза. Лучистый поток от короны приблизительно в 900000 раз слабее солнечного потока и примерно в 2 раза слабее света полной Луны. Поэтому для расчёта температурных режимов КА им часто пренебрегают.

Основной вклад в тепловой баланс КА вносит длинноволновая область спектра (0,38 – 3 мкм), в ней сосредоточено 92% всей лучистой энергии Солнца. Коротковолновая часть спектра (0,2 – 0,38 мкм) содержит около 7,4%. Но именно эта часть заслуживает особого внимания, так как ультрафиолетовая радиация является одной из причин изменения коэффициентов лучеиспускания внешних поверхностей КА, которые и определяют их тепловой режим [5].

Средние абсолютные значения интенсивности излучения для различных участков коротковолнового спектра можно найти в работах Х. Хинтереггера [6,7], для области с длиной волны  $\lambda > 3000\text{Å}$  – в работе Джонсона [8], для рентгеновского излучения – у С.Л. Мандельштама [9]. В рентгеновской части спектра излучения напрямую зависит от солнечной активности. Содержание  $\gamma$ -лучей в солнечной радиации ничтожно мало, поэтому их влиянием на КА можно пренебречь.

Излучение от планет можно разбить на два вида. Первый вид - это собственное инфракрасное излучение, состоящее в основном из поглощённой солнечной энергии и переизлучаемой планетой в длинноволновом диапазоне спектра. Также сюда можно отнести тепловыделение из недр планет. Вторым видом является отражённое от планеты солнечное излучение, которое зависит от отражающей способности, простейшей численной характеристикой которой принимают сферическое альbedo [10].

Величина сферического альbedo равняется отношению полного количества рассеянной по всем направлениям солнечной энергии ( $\Phi$ ), ко всему лучистому потоку Солнца ( $S_{\odot}F_n$ ), попавшему на поверхность планеты (1.1.2.1):

$$A_{\text{сф}} = \frac{\Phi}{S_{\odot} F_n} \quad (1.1.2.1)$$

Для идеальной белой поверхности, то есть поверхности имеющей одинаковую яркость для любого направления,  $A_{\text{сф}} = 1$ . Так как таких поверхностей в природе не встречается, то величина сферического альбедо зависит от длины волны падающего излучения и угла его падения. Для некоторых веществ зависимость от угла падения лучей очень велика. Например, в воде значение  $A_{\text{сф}}$  меняется от 0,03 до 0,45.

Земля – это оптически неоднородная и изменчивая поверхность для солнечных лучей. Наша планета с большого расстояния выглядит как вечно изменяющийся облачный покров, который скрывает большую часть материков и морей. Визуальная яркость разных участков земного шара изменяется в широком диапазоне видимого и невидимого спектра. Отражённое солнечное излучение складывается из разных излучений:

- отражённого от облачного покрова;
- отражённого от подстилающей поверхности;
- рассеянного атмосферой.

При движении по низким орбитам над поверхностью Земли КА получает облучение в каждый момент времени от какой-то определённой небольшой области, для которой значение местного альбедо может существенно отличаться от сферического альбедо планеты. Причина этого заключается как в различных отражающих способностях разных участков Земли, так и в зависимости коэффициентов отражения этих участков от угла падения солнечных лучей [11].

Характер облаков, их плотность и распределение над поверхностью Земли, а следовательно и их альбедо, постоянно изменяются. Если принять, что все типы облаков (плотные, слоисто-кучевые, высокослоистые и т.д.) равновероятны и их среднее альбедо равно 0,5. Облака занимают 50% поверхности Земли, то отражённое от них излучение составит 25%. Среднее альбедо для воды – 0,09,



для суши – 0,12. Тогда альbedo для поверхности планеты не занятой облаками составит 0,1. А вместе с облаками 0,35.

Но эти расчёты являются очень приближёнными. Они не учитывают такие важные факторы, как коэффициент отражения облаков, воды, льда зависит от угла падения солнечных лучей; рассеивание излучения на частицах пыли, воды, льда и молекулах воздуха в атмосфере; метеорологические условия. Как же тогда производить измерения альbedo? Наиболее точные распределения этой величины получают посредством прямого измерения с искусственных спутников Земли. Кроме того измерения со спутников показали сильную зависимость альbedo от длины волны: отражательная способность облаков, морей и суши носит спектрально-селективный характер. Наибольшее рассеивание и отражение имеют волны в сине-зелёной части спектра (около 50%), в остальной видимой области (около 40%), в инфракрасной (до 28%). Ультрафиолетовая область почти полностью поглощается озоновым слоем [12].

Собственное тепловое излучение Земли состоит из излучения атмосферы, суши и морей. Температура на поверхности Земли изменяется в районе 150°K (190°K в Антарктиде и 340°K в каменистых пустынях). Закон Планка гласит, что максимум излучения абсолютно чёрного тела с такими температурами приходится на инфракрасную область с длинами волнами от 8,7 мкм до 14,8 мкм. Следовательно, средняя излучательная способность для всей планеты равняется примерно 0,93 [13].

Большая часть излучения поверхности задерживается облаками. Только около 2,5% радиации покидает планету через так называемые окна прозрачности.

Среднее расстояние от Венеры до Солнца составляет 0,62 а.е. Интенсивность солнечного потока за год равняется 2698 Вт/м<sup>2</sup>. Из-за того что эксцентриситет орбиты очень небольшой (0,007), сезонные колебания солнечного потока незначительны и не превышают ±36 Вт/м<sup>2</sup>. Год на Венере длится 226 земных суток. Атмосфера Венеры однородная и плотная, совершенно непрозрачная для видимого участка спектра. Учёные не пришли к

единогласному мнению о значении сферического альbedo планеты, в разных источниках это значение принимают от 0,73 до 0,8. Предполагается, что поглощаемая Венерой радиация равномерно распределяется по поверхности планеты и излучается в инфракрасном диапазоне верхними слоями атмосферы с температурой, равной примерно 234°К. Средняя плотность лучистого потока достигает в инфракрасном диапазоне 173 Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности Венеры около 490°С, но это излучение не может пройти через толщу атмосферы, тем самым создавая парниковый эффект [14].

Среднее расстояние от Марса до Солнца примерно 1,52 а.е., и поэтому интенсивность солнечного потока в разы меньше земной и составляет 620 Вт/м<sup>2</sup>. Вытянутость орбиты Марса немного больше, чем у Земли, что приводит к сезонным вариациям солнечного потока, равным  $\pm 117$  Вт/м<sup>2</sup>. Среднее планетарное альbedo Марса равняется 0,15 [15]. На поверхности Марса можно наблюдать полярные шапки, состоящие, скорее всего, из кристаллов льда СО<sub>2</sub> или водного льда. Сферическое альbedo этих мест достигает 0,7. Из-за того, что ось вращения Марса наклонена к плоскости орбиты почти также, как и ось Земли, то на Марсе явно прослеживается смена времён года, проявление которых можно наблюдать в изменении размеров полярных шапок и яркости некоторых частей планеты.

Средняя температура поверхности Марса равняется 260°К, полярных областей 213°К, а экваториальных 290°К. За год, который равен почти 687 земных суток, температура в полярных областях меняется на 110°, в экваториальных – на 30° [16]. Благодаря наблюдениям У. Синтона и Дж. Стронга были рассчитаны температуры поверхности Марса для различных широт и моментов марсианских суток.

Тёмные области Марса приблизительно на 20° горячее светлых. Мелкомасштабных температурных неоднородностей не обнаружено. С помощью радиометрических наблюдений Ф. Лоу был получен инфракрасный спектр, указывающий на селективное поглощения излучения планетой.

Луна отражает примерно 7,3% падающих на неё солнечных лучей. Хотя даже самые простые визуальные наблюдения показывают, что Луна имеет более светлые (отражают около 18% лучей) и более тёмные (около 5%) участки поверхности, для которых сферическое альbedo может очень сильно отличаться от среднего значения. Самое светлое место на Луне – это поверхность кратера Аристарх, альbedo этого места равняется 0,176 и почти в 3,5 раза больше местного альbedo любого из «морей». Лунная поверхность обладает одной очень важной и примечательной способностью в Солнечной системе: отражённые с неё солнечные лучи распределяются по направлениям крайне неравномерно, а именно так, что при любом угле падения лучей большая часть света отражается обратно в направлении Солнца. Именно по этой причине Луна кажется наблюдателю с Земли плоским, равномерно освещённым диском. Учёные считают, что это связано с чрезвычайной изрытостью, неровностью и пористостью материала её поверхности. Рельеф поверхности обратной стороны Луны сильно отличается от видимой с Земли. Снимки показывают, что доля «морей» на обратной стороне составляет всего 10% всей поверхности, что в 2,5 раза меньше чем на видимой стороне. На основе этого можно предположить, что альbedo обратной стороны Луны немного выше альbedo видимой. Данных по излучательной способности всей лунной поверхности в инфракрасном диапазоне почти нет [17].

Температура освещённой поверхности Луны в основном зависит от коэффициентов лучеиспускания и угла падения солнечных лучей. Поэтому, а также из-за очень низкой теплопроводности лунной поверхности, на Луне практически полностью отсутствует выравнивание температур.

Меркурий – это ближайшая к Солнцу планета. День на Меркурии длится  $59 \pm 5$  земных суток. Период обращения вокруг Солнца равен почти 98 суткам. Максимальная зафиксированная температура на освещённой стороне  $686^{\circ}\text{K}$ . На теневой стороне температура опускается до  $143^{\circ}\text{K}$ . Из-за отсутствия атмосферы выравнивания температур не происходит. Сферическое альbedo Меркурия, как и альbedo Луны, около 0,07. Вследствие вытянутости орбиты планеты

интенсивность солнечного излучения для разных участков поверхности изменяется почти вдвое – от 6250 до 12560 Вт/м<sup>2</sup>.

При приближении к Юпитеру интенсивность солнечного потока уменьшается почти в 26 раз по отношению к Земной и равняется приблизительно 52,8 Вт/м<sup>2</sup>. Из-за внутреннего тепловыделения собственное излучение Юпитера в три раза превышает энергию, получаемую им от Солнца.

На орбитах Сатурна, Урана, Нептуна, Плутона солнечное излучение слабее чем на Земле в 90, 360, 900 и 1500 раз соответственно. Альbedo газовых гигантов равняется альbedo Венеры, а у Плутона оно такое же как и у Марса [18].

### **1.1.3 Воздействие космического пространства на характеристики искусственных аппаратов**

Низкое давление в космическом пространстве вызывает ускоренную сублимацию (переход вещества из твёрдого состояния в газообразное, минуя жидкое) поверхностных слоёв материалов конструкции КА [19] и приводя к таким нежелательным последствиям как: потеря массы материала, нарушению его поверхностных свойств и т.д.

Помимо вакуума в космическом пространстве множество разнообразных электромагнитных и корпускулярных излучений. Энергия связи между молекулами или атомами материалов КА может быть меньше энергии соответствующих видов излучений. Что может привести к значительному усилению эффекта сублимации. Это явление ярко выражено для материалов, которые интенсивно поглощают излучения, например, для оксида железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или оксида цинка (ZnO), поглощающих ультрафиолетовое излучение.

Исследование сублимации терморегулирующих покрытий производилось в вакууме при воздействии ультрафиолетового излучения, интенсивность которого достигала 10–кратной интенсивности солнечного излучения. В течении нескольких дней эксперимента было выявлено, что некоторые вещества, в состав которых входил фтористый этиленовый пропилен, показывали большое

сопротивление сублимации. Большинство покрытий и материалов при испытаниях в вакууме в течении недели и температуре 120°С теряло заметную часть своего веса.

Удаление защитных газовых и оксидных плёнок при сублимации поверхностных слоёв с толщиной, кратной длине волны излучения, приводит к изменению оптических радиационных характеристик поверхностей. Исследования показывают, что при совместном воздействии сверхвысокого вакуума и ультрафиолетового излучения на терморегулирующие поверхности, наблюдается повышение отражательной способности у белых покрытий, причём органические краски подвержены изменениям больше неорганических.

Из-за низких температур, близких к абсолютному нулю, и разряженной среды в вакууме почти нет теплообмена и теплопроводности среды, а передача тепла происходит путём лучистого обмена извне. Теплопередача между соприкасающиеся статическими частями КА также затруднена из-за микронеровностей поверхности и вакуумных промежутков между ними. Выделяют три режима теплопередачи в газе: вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный. Математического аппарата для определения границ между этими режимами не существует. Для расчётов используют безразмерны критерий Кнудсена, который равен отношению средней длины свободного пробега  $l$  частиц газа к линейному размеру системы  $L_o$  (1.1.3.1):

$$Kn = \frac{l}{L_o} \quad (1.1.3.1)$$

Границы режимов имеют следующие значения:  $Kn < 0,005$  – для вязкостного;  $0,005 < Kn < 5$  – для молекулярно-вязкостного и  $Kn > 5$  для молекулярного режима [20]. При вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах течения газа теплообмен происходит из-за передачи тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением; в молекулярном режиме

теплопроводность и конвекция настолько малы, что ими пренебрегают, а теплопередача осуществляется в основном благодаря лучистому обмену.

Коэффициент обмена энергии между газом и твёрдой поверхностью называется коэффициентом термической аккомодации  $\alpha_t$ , существенно зависящего от состояния внешней поверхности КА. Присутствие или, наоборот, отсутствие адсорбированных, окисных плёнок значительно влияет на значение коэффициента аккомодации. Например, для гелия на «чистом» вольфраме  $\alpha_t \approx 0,017$ , а при наличии адсорбированной плёнки  $\alpha_t \approx 0,5$  [21]. При движении КА через плотные слои атмосферы влияние коэффициента аккомодации на его тепловой режим очень существенно, которое приводит к распылению материала поверхности КА. В основном указанный процесс имеет место для передних частей (по направлению движения) космического аппарата. Слой распылённого таким образом материала обычно незначителен, но, в свою очередь, при движении в «солнечном ветре» или в водородной короне Земли происходит диффузия ионов водорода в поверхностные слои материала (насыщение водородом может достигать 10%), что несомненно приводит к изменению оптических характеристик материала.

При низких давлениях космического пространства могут происходить нарушения поверхностей КА, что обязательно приведёт к изменению механических свойств материалов. Это может произойти в результате появления микроскопических трещин, интеркристаллитной коррозии. Также при изменении свойств поверхностных слоёв происходит ухудшение объёмно-механических свойств материалов.

В вакууме на поверхностях диэлектриков могут накапливаться значительные электрические заряды, приводящие к возникновению на поверхностных слоях токов утечки, которые негативно влияют на распространение высокочастотных электромагнитных сигналов.

Всё рассмотренное выше относится к отрицательным воздействиям вакуума и около космического пространства на КА, но эти недостатки можно использовать и в положительном ключе:

- для формирования надувных и вспенивающихся конструкций в космосе;
- для управления положением и стабилизации КА при использовании диффузионных и сублимационных поверхностей [22];
- для создания сублимационных микродвигателей [23].

## **1.2 Контроль температуры бортовой радиоэлектронной аппаратуры**

### **1.2.1 Назначение системы терморегулирования**

Для различных КА требуется поддержать определённый тепловой режим, который зависит от назначения аппарата:

- для научных прибором диапазон изменения температур довольно широкий:  $0^{\circ} \pm 10^{\circ} \dots 40^{\circ} \pm 15^{\circ}\text{C}$ ;
- для пилотируемых космических кораблей (КК) в отсеках работы и расположения экипажа должна поддерживаться температура в районе  $18 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- в других отсеках КК и отсеках автоматических КА -  $0 \dots 40^{\circ}\text{C}$ ;
- для агрегатов двигательной установки -  $50 \dots 90^{\circ}\text{C}$ ;
- для тех элементов, которые расположены вне герметичных отсеков, температурный режим зависит от требований, предъявляемых к конструкции.

КА является самостоятельным небесным телом, которое постоянно находится в теплообмене с окружающей средой, но из-за чрезвычайно разреженной межпланетной среды конвективный теплообмен КА с космическим пространством исключается. Единственный путь обмена энергией КА с окружающей средой – это поглощение и испускание электромагнитного излучения в определённом диапазоне спектра.

Получение тепла КА происходит и от внутренних источников (приборов, агрегатов, энергоустановок), и от внешних [10]:

- прямое излучение Солнца;
- отражённое излучение от небесных объектов;
- собственное излучение небесных объектов;

- тепло, выделяющееся при столкновении аппарата с молекулами газа в верхних слоях атмосферы планеты.

При нахождении КА в термодинамическом равновесии с окружающим пространством уравнение теплового баланса будет выглядеть следующим образом (1.2.1.1):

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{\text{внутр}} + Q_{\text{солн}} A_S + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{соб}} A_{\text{соб}} + Q_{\text{мол}} - Q_{\text{изл}}, \quad (1.2.1.1)$$

где  $Q_{\text{соб}}$  – энергия собственного излучения космического объекта;

$Q_{\text{внутр}}$  – суммарные внутренние тепловые потоки;

$Q_{\text{солн}}$  – прямой солнечный поток, падающий на поверхность КА;

$Q_{\text{отр}}$  – солнечная энергия, отражённая от космического объекта;

$Q_{\text{мол}}$  – тепловая энергия, которая выделяется при столкновении КА с отдельными молекулами атмосферы планеты;

$Q_{\text{изл}}$  – энергия, излучаемая КА;

$A_S$  – коэффициент поглощения солнечной радиации;

$A_{\text{соб}}$  – коэффициент поглощения собственного излучения космического объекта.

Формула (1.2.1.1) показывает, что при движении космического аппарата тепловые потоки изменяются во времени. Поэтому тепловые режимы не являются стационарными, а их расчёты становятся чрезвычайно сложными.

Солнечные тепловые потоки определяются по формуле (1.2.1.2):

$$Q_{\text{солн}} = S_0 F_M A_S, \quad (1.2.1.2)$$

где  $S_0$  – солнечная постоянная (тепловой поток на площадь в  $1 \text{ м}^2$ , находящуюся перпендикулярно солнечным лучам);

$F_M$  – проекция поверхности КА на плоскость, перпендикулярную солнечным лучам.



Для нахождения потока солнечной радиации  $S$  на расстоянии  $R$  от Солнца используется формула (1.2.1.3):

$$S = \frac{R_0^2}{R^2} S_0 \quad (1.2.1.3)$$

Если искусственный спутник земли (ИСЗ) находится на её орбите, то некоторую часть времени он находится в тени. Тогда за один оборот тепловой поток, попадающий на ИСЗ равен (1.2.1.4):

$$Q_{\text{солн.ср}} = Q_{\text{солн}} \frac{T-\tau}{T}, \quad (1.2.1.4)$$

где  $T$  – период обращения ИСЗ вокруг Земли;

$\tau$  – время пребывания в тени Земли.

Количество тепловой энергии, которая выделяется при столкновении ИСЗ с отдельными молекулами в атмосфере, можно приближённо определить по формуле (1.2.1.5):

$$Q_{\text{мол}} = k \frac{pV^3}{2084}, \quad (1.2.1.5)$$

где  $p$  – плотность атмосферы;

$V$  – скорость движения ИСЗ;

$k$  – коэффициент аккомодации.

Коэффициент аккомодации показывает степень упругости столкновения молекул с корпусом ИСЗ:  $k = 0$ , когда столкновение является упругим, то есть без превращения кинетической энергии в тепловую;  $k = 1$ , если происходит полный переход всей кинетической энергии в тепловую.

## 1.2.2 Пассивные системы терморегулирования

Для поддержания заданной температуры КА в пассивных системах терморегулирования используют:

- тепловую термоизоляцию;
- терморегулирующие покрытия;
- оптимальное расположение элементов КА относительно источников тепла.

Обеспечение заданных температур пассивными системами всегда происходит при постоянстве тепловых потоков.

На практике же тепловые потоки из разных источников постоянно изменяются, да и различные величины, такие как: относительная излучательная способность тела и коэффициент поглощения солнечной радиации; берутся с определённой точностью. При таких обстоятельствах пассивные системы терморегулирования не могут обеспечить для элементов КА заданную температуру, но их использование позволяет поддерживать диапазон температур, который определяется границами изменений указанных выше величин.

Пассивные системы терморегулирования нельзя использовать для КА, совершающих межпланетные путешествия. Так, например, при полёте к Венере солнечная постоянная будет меняться в диапазоне  $1373...2679 \text{ Вт/м}^2$ ; и если при нахождении КА около Земли поверхностные покрытия обеспечат ему температуру около  $0^\circ\text{C}$ , то рядом с Венерой температура КА будет составлять  $45^\circ\text{C}$ . Если в качестве примера взять полёт к Марсу, то диапазон изменения солнечной постоянной будет приблизительно равен  $1373...500 \text{ Вт/м}^2$ ; и при обеспечении температуры около Земли  $0^\circ\text{C}$ , то около Марса температура КА упадёт до  $-71^\circ\text{C}$  [24].

Пассивные системы терморегулирования нашли применение на объектах, температурных режим которых можно поддерживать в широких пределах.

### 1.2.3 Активные методы регулирования температуры КА

Вместе с пассивными элементами обеспечения теплового режима используются активные методы. Активными системами терморегулирования называются системы, обеспечивающие принудительный обмен элементов КА энергией с окружающей средой.

Изменение температуры КА в космическом пространстве зависит от:

- ориентации КА в пространстве;
- внутреннего теплового сопротивления;
- термосопротивления между приборным отсеком и поверхностью КА;
- излучательной способности поверхности КА при использовании «жалюзи».

При изменении ориентации КА можно регулировать количество получаемого и излучаемого тепла, но этот метод регулирования температуры ограничен практическим применением, поскольку ориентация КА в пространстве определяется основными решаемыми задачами.

Возможно регулирование температуры КА изменением термосопротивления между приборами и конструкцией корпуса КА.

Принудительный теплообмен КА с окружающей средой может обеспечиваться:

- радиоизотопными и электрическими подогревателями;
- внешними и внутренними радиаторами с движением теплоносителя между ними.

В КА обычно используют и активные, и пассивные элементы обеспечения теплового режима. Увеличение количества автономных контуров активной системы приводит к повышению надёжности. В контурах происходит циркуляция жидких или газообразных теплоносителей. Если используется несколько теплоносителей, то на стыке контуров устанавливается теплообменник. Как пример вышесказанного можно рассмотреть герметический

отдел тепловыделяющих приборов, тепло от которого передаётся омывающему их газу, который охлаждается в жидкостном теплообменнике.

Регулирование тепловой мощности системы терморегулирования (СТР) возможно осуществлять при использовании механического изменения площади радиаторов. При неизменной площади радиационных поверхностей регулирование происходит с помощью:

- изменения расхода теплоносителя;
- перепуска некоторой части теплоносителя через байпасную (обводную) линию;
- периодического включения и отключения расхода теплоносителя.

Механическое регулирование теплового режима может осуществляться при использовании автоматических створок или экранов, которые должны затенять элементы пассивной СТР от внешних тепловых потоков. Жалюзи – очень эффективная конструкция для изменения излучательной и поглощательной способности КА. С их помощью выполняется эффективная регулировка температуры внутри КА. Конструкция жалюзи зависит от решаемой задачи КА, она может быть выполнена в виде створок, барабана с прорезями и др.

Охлаждение элементов КА до низких температур происходит при использовании специальных систем излучателей или активных систем охлаждения. На практике применяют систему радиаторов-излучателей для обеспечения температуры жидкого азота в районе 78 К. Активная система поддерживает уровень температуры жидкого гелия в районе 4К, необходимого для нормального функционирования чувствительного элемента субмиллиметрового телескопа станции «Салют». Эта система состоит из газового компрессора, двух холодильных машин, набора теплообменников, средств автоматики и контроля оборудования.

## 1.2.4 Испытания и отработка теплового режима КА

Перед запуском космического аппарата его необходимо проверить и отладить. Наряду с другими испытаниями одно из наиболее важных мест занимает отработка теплового режима КА. Работы проводятся по различным направлениям. Сюда могут входить:

- проверка эффективности работы СТР КА в максимально приближенным к натуральным условиям;
- исследование работоспособности КА в аварийных ситуациях, при частичном отказе некоторых блоков, узлов, датчиков, изменении случайным образом оптических свойств, нарушении герметичности, изменении внутреннего тепловыделения и т.д.;
- исследование реализуемого поля температур в конструкции КА, отсека приборов, элементов солнечных батарей и т.д.;
- проверка работы электронной аппаратуры в условиях критической температуры;
- выявление температурных пределов работоспособности автоматических систем, бортового оборудования, подвижных элементов;
- отработка наиболее рационального (с точки зрения охлаждения) расположения тепловыделяющих приборов и исследование их взаимного теплового влияния;
- испытание всех систем в реальных температурных условиях;
- определение средних теплофизических параметров: эффективное значение температуры, теплопроводность, теплоёмкость и т.д.;
- проверка теоретических методов расчёта теплового режима КА в целом или элементов его конструкции для возможности экстраполяции результатов расчёта на условия, которые отличаются от условий проведения эксперимента;
- исследование деформаций КА при температурном воздействии.

Также вместе с основными задачами отработки теплового режима проводятся исследования стабильности материалов и покрытий во время полёта и лётные эксперименты.

Методика комплексного экспериментального исследования теплового режима КА строится на основании его конструктивных особенностей, ориентацией в полёте, внутренним тепловыделением, требованиями к точности поддержания температурного режима.

Предположим, необходимо исследовать аппарат сложной формы с подвижными выступающими частями. Активная система терморегулирования используется только для приборного отсека. Требуется выяснить тепловой режим КА при длительном полёте рядом с Землёй. Для эксперимента используется КА со штатной функциональной аппаратурой размерами и конструкцией идентичный с аппаратом, который должен отправиться в полёт. На объект исследования устанавливают датчики температуры везде, где, по мнению исследователей, наиболее полно характеризуется тепловое поле аппарата. Также устанавливаются и другие датчики: давления, напряжения батарей, расхода теплоносителя и т.д.. КА тщательно очищается от всевозможных загрязнений. После этого объект исследования закрепляют в раме механизма вращения и устанавливают в барокамеру. На следующем шаге происходит проверка работы бортовой аппаратуры и систем измерения контрольных параметров. Далее в камере устанавливают необходимое давление и производят охлаждение криогенных экранов до температуры жидкого азота. Теперь можно начинать эксперимент [25].

Включают генератор имитации лучистых потоков и бортовая аппаратура, с помощью механизма вращения ориентируют КА относительно Солнца и планеты. Показания датчиков принимает регистрирующая аппаратура, расположенная вне барокамеры. Продолжительность эксперимента зависит от условий полёта и цикличности работы РЭА. Если время полёта КА будет исчисляться месяцами или годами, то проверка проводится по сокращённый

программе: имитируются режимы, наиболее характерные или экстремальные для данной аппаратуры.

В настоящее время известно и используется множество методов моделирования тепловых режимов КА. Наиболее распространённые из них:

- наиболее полная имитация окружающих условий космического пространства, которые воздействуют на полноразмерный КА;
- моделирование результирующего теплового потока на внешнюю поверхность КА;
- имитация реальных температурных условий на внешнюю поверхность КА;
- масштабное моделирование КА в тождественных окружающих условиях;
- масштабное моделирование с видоизменёнными окружающими условиями;
- математическое моделирование теплообмена КА с окружающей средой на основе экспериментальных данных по моделированию отдельных видов воздействия окружающей среды на оптические характеристики материалов КА.

Каждый представленный метод имеет свои преимущества и недостатки. Перед выбором метода необходимо взять в расчёт конструкцию КА, имеющиеся в распоряжении ресурсы (как временные, так и материальные), представлять степень точности, которая будет обеспечена экспериментальными средствами.

### **1.2.5 Математическое моделирование теплового режима КА**

Одним из наиболее применяемых способов получения информации о распределении температур в КА является сочетание математического моделирования теплового режима аппарата с результатами измерений температур в различных узлах его макета. Этот способ хорошо описан в работах М. Таусэйнта [26]. Метод позволяет вносить уточнения в исходную

математическую модель. Ниже будут кратко описаны основные этапы метода для формирования чёткого представления об его использовании.

Объект исследования разбивается на отдельные узлы, где можно считать температуру постоянной. Такими узлами выбираются крупные или мелкие детали КА, для которых критерий Био (критерий подобия стационарного теплообмена между нагретым или охлажденным твёрдым телом и окружающей средой) достаточно мал ( $Bi \leq 0,1$ ).

Математической моделью будем называть вектор  $\vec{M}$ , компонентами которого являются величины (1.2.5.1):

$$A_{s1}, A_{s2}, \dots, A_{sN}; (Cq)_1, \dots, (Cq)_N; \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N; \alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{NN}; \\ \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \dots, \varepsilon_{NN} \quad (1.2.5.1)$$

Измерения теплоёмкостей  $(Cq)$ , коэффициентов лучистого обмена  $\varepsilon$  и других компонент вектора  $\vec{M}$  позволяют получить первое априорное приближение математической модели. Первое приближение обозначим как  $\vec{M}^0$ . Это приближение позволяет рассчитать температуру любого узла, решив систему дифференциальных уравнений из условий эксперимента.

При несоответствии экспериментальных данных значений температуры вычисленным вводятся поправки в математическую модель. Обозначим вектор поправок к элементам первого приближения как  $\vec{X}$ . Тогда можно записать (1.2.5.2):

$$\vec{M} = \vec{M}^0 + \vec{X} \quad (1.2.5.2)$$

Задачу, включающую в себя определение компонент вектора  $\vec{M}$  по результатам эксперимента, будем называть «обратной задачей». Самым простым методом решения обратной задачи является метод подбора. Последовательно задаются величины поправок и рассчитываются температуры, соответствующие



математической модели. Подбор повторяется столько раз, пока не совпадут вычисленные и измеренные величины температуры.

Найдём условия, при которых математическая модель будет определена. Вместо последовательного вычисления температуры каждого узла сравним результаты расчёта с экспериментом.

Построим функцию (1.2.5.3):

$$\psi = \int_{t_0}^{t_f} \sum_i^N |f_i(t)|^2 dt, \quad (1.2.5.3)$$

где  $t_0$  и  $t_f$  – начальный и конечный моменты времени испытания;

$f_i(t)$  – мгновенный тепловой баланс в  $i$ -ом узле.

Функцию  $\psi$  можно рассматривать как функцию математической модели  $\vec{M}$  ( $\psi = \psi(\vec{M})$ ), так и как функцию поправок  $\vec{X}$  ( $\psi = \psi(\vec{X})$ ). Функция  $f_i(t)$  – функция линейных переменных  $\varepsilon_i, A_{si}, (Cq)_i, \alpha_{ij}$ .

Функция  $\psi(\vec{X})$  всегда принимает только положительные значения для любых величин вектора  $\vec{X}$ . При соответствии компонент вектора  $\vec{X}$  математической модели функция будет иметь минимальное значение  $\psi(\vec{X})=0$ .

Итак, решение обратной задачи – это вычисление минимума функции  $\bar{\psi}(\vec{X})$ , другими словами решение системы уравнений (1.2.5.4):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\psi}(\vec{X})}{\partial X_1} = 0, \\ \frac{\partial \bar{\psi}(\vec{X})}{\partial X_2} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \bar{\psi}(\vec{X})}{\partial X_N} = 0. \end{cases} \quad (1.2.5.4)$$

По существу система (1.2.5.4) – это метод наименьших квадратов.

Рассмотрим наглядный пример, в котором используются результаты вычислений вместо экспериментальных данных. Предположим, исследуемая система состоит из трёх изотермических узлов, которые окружены общей сферической оболочкой. Степень черноты поверхности узлов одинакова для всех узлов и равна:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,9$ . Площадь поверхностей узлов:  $F_1 = F_3 = 3000 \text{ см}^2$ ,  $F_2 = 40000 \text{ см}^2$ . Теплоёмкость узлов:  $(Cq)_1 = (Cq)_3 = 300 \text{ ккал/}^\circ\text{С}$ ,  $(Cq)_2 = 400 \text{ ккал/}^\circ\text{С}$ . Начальные температуры узлов:  $T_1 = 123,74^\circ\text{С}$ ;  $T_2 = 123,06^\circ\text{С}$ ;  $T_3 = 122,38^\circ\text{С}$ . Принимаем коэффициенты теплообмена равными:  $\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{13} = 0,5 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$ ,  $\alpha_{32} = \alpha_{23} = 0,2 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$ . Введём допущение, что внешние тепловые потоки отсутствуют до определённого времени и, следовательно, отсутствует поглощённая узлами энергия:  $P_1 = P_2 = P_3 = 0,0$ .

В определённый момент времени ( $t = 0$ ) был включен имитатор солнечного излучения и система начала поглощать тепло:  $P_1 = 2,0 \text{ Вт}$ ,  $P_2 = 1,0 \text{ Вт}$ ,  $P_3 = 0,0$ . Ориентация КА на момент эксперимента была постоянна, как и падающий тепловой поток, поэтому в течении всего времени проведения опыта (26 часов) поглощаемая мощность оставалась постоянной. Метод Рунге Кутты позволяет вычислить значения температур узлов  $T_i(t)$  и производных по времени  $\dot{T}_i(t)$ . Заданный период времени (26 часов) разобьём на  $N$  частей ( $N = 26$ ). Получается три системы  $2N$  величин (1.2.5.5):

$$T_i(t_1), T_i(t_2), \dots, T_i(t_N); \dot{T}_i(t_1), \dot{T}_i(t_2), \dots, \dot{T}_i(t_N) \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (1.2.5.5)$$

Теперь величины (1.2.5.5) используются в качестве исходных данных для обратной задачи. Математическая модель имеет вид (1.2.6.6) и состоит из 12 величин.

$$\vec{M} = \vec{M}(P_1, P_2, P_3, (Cq)_1, (Cq)_2, (Cq)_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \alpha_{31}, \alpha_{21}, \alpha_{32}) \quad (1.2.5.6)$$

Максимальное число неизвестных равно 12. Неизвестные рассчитываются при решении системы (1.2.5.4). Поправки зависят от неизвестных таким образом, как показано в (1.2.5.7):

$$\begin{aligned} X_1 &= \Delta P_1, & X_4 &= \Delta(Cq)_1, & X_7 &= \Delta\varepsilon_1, & X_{10} &= \Delta\alpha_{31}, \\ X_2 &= \Delta P_2, & X_5 &= \Delta(Cq)_2, & X_8 &= \Delta\varepsilon_2, & X_{11} &= \Delta\alpha_{21}, \\ X_3 &= \Delta P_3, & X_6 &= \Delta(Cq)_3, & X_9 &= \Delta\varepsilon_3, & X_{12} &= \Delta\alpha_{32} \end{aligned} \quad (1.2.5.7)$$

Для решения нормальных уравнений в работе [26] использовалась ЭВМ. Программа позволила для любых комбинаций неизвестных оценивать численные коэффициенты уравнений и проверять определённость системы, без которой невозможно было бы решить саму систему.

Способ решения системы и найденные значения не будут приведены в этой работе по причине того, что целью изложение данного материала было показать применяемые способы контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры, а не привести расчёты господина М. Таусэйнта. С его вычислениями можно ознакомиться в монографии [26]. Куда более полезными являются следующие выводы, сделанные в результате вычислений:

- Введённые поправки оказались существенно больше, чем соответствующие члены математической модели.
- Погрешность результатов вычислений не превышало значение 0,001.
- Соотношения между различными неизвестными в некоторых случаях могут быть найдены непосредственно. Это говорит о возможности оптимизации метода, например, при использовании метода Лагранжа для вычисления минимума функции  $f(\vec{X})$ .
- В случаях, когда при решении системы, получались значения не удовлетворяющие условию  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , приходилось решать задачу заново и использовать другую комбинацию неизвестных.

Таким образом описанный метод позволяет контролировать температуру различных участков КА, но он является очень громоздким в плане расчётной

базы, основан на целом ряде допущений, которые невозможно контролировать в реальных условиях. Но несмотря на описанные недостатки данный метод широко используется на первых этапах тестирования КА.

## **1.3 Датчики температуры**

### **1.3.1 Общие сведения о датчиках температуры**

Перейдём к рассмотрению датчиков измерения температуры. Различают следующие назначения датчиков при построении температурных контрольно-измерительных устройств:

- а) для мониторинга температуры:
  - портативного оборудования;
  - центрального процессора;
  - аккумуляторной батареи;
  - окружающей среды.
- б) для компенсации:
  - дрейфа генератора в сотовых телефонах;
  - температуры холодного спая термопар.
- в) для управления
  - зарядом аккумуляторной батареи;
  - процессом удержания температуры.

Большинство температурных датчиков являются нелинейными. Резистивные датчики температуры (РДТ) достаточно точно измеряют температуру, но требуют внешнего тока возбуждения. Термисторы наиболее чувствительные, но и в то же время самые нелинейные. Полупроводниковые датчики наиболее точные по сравнению с другими датчиками, но имеют узкий температурный диапазон применения.

В таблице 1.3.1.1 приведены некоторые типы температурных датчиков.

Таблица 1.3.1.1 – Типы температурных датчиков

Термопары	РДТ	Термисторы	Полупроводниковые датчики температуры
Самый широкий диапазон температур -184°С до +2300°С	Диапазон -200°С до +850°С	Диапазон 0°С до +100°С	Диапазон -55°С до +150°С
Высокая точность и повторяемость	Высокая линейность	Низкая линейность	Линейность 1°С Точность 1°С
Необходимость компенсации холодного спая	Требует внешнего возбуждения	Требует внешнего возбуждения	Требует внешнего возбуждения
Низкое выходное напряжение	Низкая стоимость	Высокая чувствительность	Типовой выходной сигнал: 10мВ/К, 20мВ/К или 1мА/К

### 1.3.2 Термопары

Термопары достаточно точные и относительно недорогие датчики, которые функционируют в широком диапазоне температур, а для измерения высоких температур до 2300°С и в агрессивных средах термопары являются незаменимыми. Но основная проблема их применения состоит в том, что они дают на выходе милливольтные сигналы, поэтому требуется точное усиление для последующей их обработки. Ещё одним недостатком является компенсация температуры холодного спая. Обычно термопары довольно линейны. Изготовление термопар производится из разных металлов: железа, родия, платины, вольфрама, рения, меди; и сплавов: алюмеля (никеля и алюминия), хромеля (никеля и хрома), константана (меди и никеля) и др..

Ознакомимся с основами функционирования термопар. При соединении двух разнородных металлов при температуре выше абсолютного нуля появляется между ними разность потенциалов, так называемая термо ЭДС (рисунок 1.3.2.1, а). Для формирования двух спаев (рисунок 1.3.2.1, б) необходимо соединить два термопарных провода с обоих концов. Если температура обоих спаев различна, то в цепи появляется результирующая ЭДС и начинает течь ток. При разрыве одного из проводов напряжение в точке

разрыва будет равно величине результирующей терм ЭДС в цепи, которое можно использовать для расчёта разности температур двух спаев (рисунок 1.3.2.1, в) [27].

Термопара измеряет разницу температур двух спаев, а не абсолютную температуру одного из них. Замер температуры проводится только, если известна температура другого спая, который носит название опорного или холодного спая.

Если подключить вольтметр к цепи термопар (рисунок 1.3.2.1, г), то в местах подключения произойдёт образование дополнительных термопар, состоящих из проводов вольтметра и проводов цепи, что может привести к появлению ошибок измерения. Поэтому так важно, чтобы все пары в цепи с термопарой имели одну температуру, кроме измерительных контактов термопар.

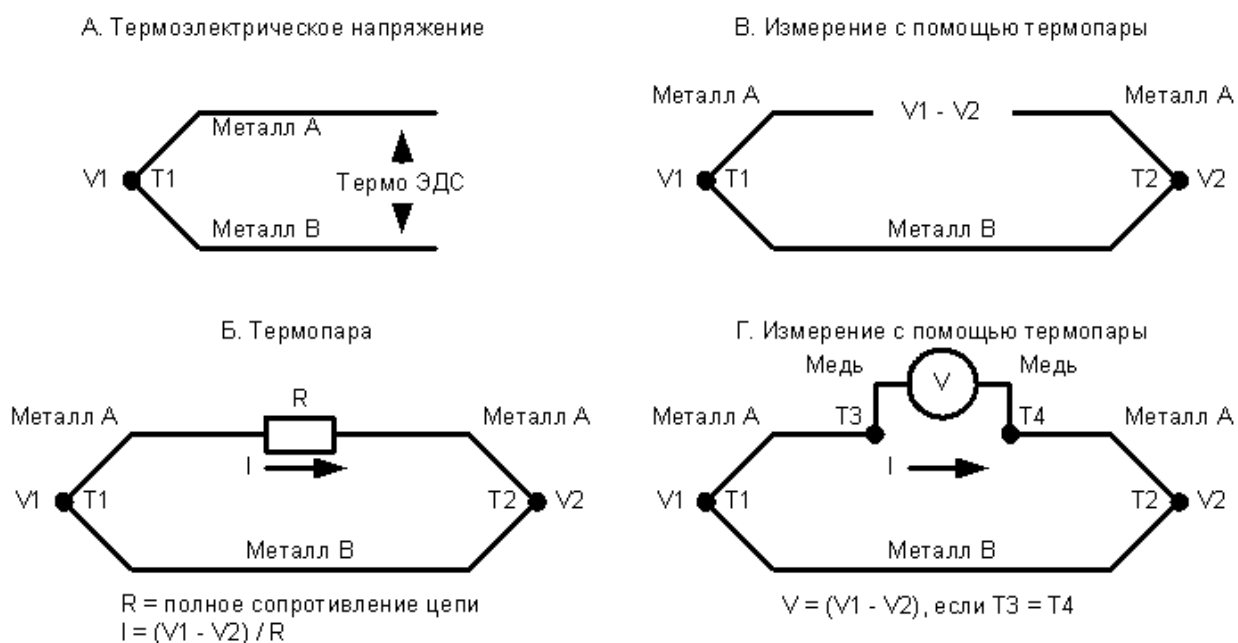


Рисунок 1.3.2.1 – Основы работы термопары

Для термопар не требуется внешнее возбуждение. Обычно для измерения используется два спая:  $T1$  - измерительный спай и  $T2$  – опорный (холодный) спай. Если  $T1 = T2$ , то  $V1 = V2$  и выходное напряжение  $V = 0$ . Выходные

напряжения термопар определяются по отношению к температуре опорного спая при  $0^{\circ}\text{C}$  (рисунок 1.3.2.2).

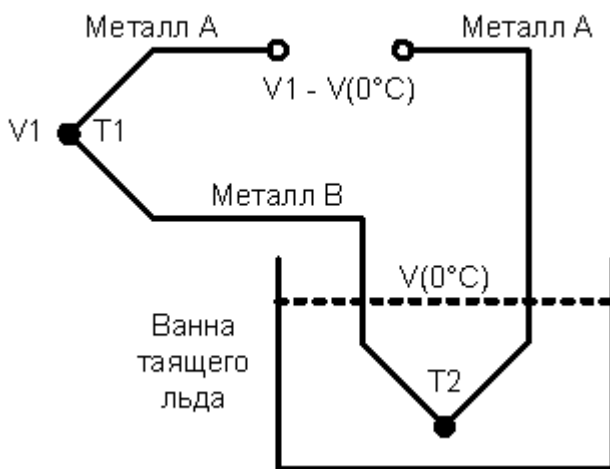


Рисунок 1.3.2.2 – Классическая схема компенсации температуры холодного спая

Следовательно, термопара даёт напряжение  $0\text{В}$ , если температура измерительного спая  $0^{\circ}\text{C}$ . Но необязательно, чтобы температура холодного спая была равно  $0^{\circ}\text{C}$ . Можно использовать другой температурный датчик для измерения температуры холодного спая, его сигнал будет компенсировать разницу между действительной температурой холодного спая и идеальной величиной, за которую берётся  $0^{\circ}\text{C}$ . Пример такой измерительной схемы приведён на рисунке 1.3.2.3.

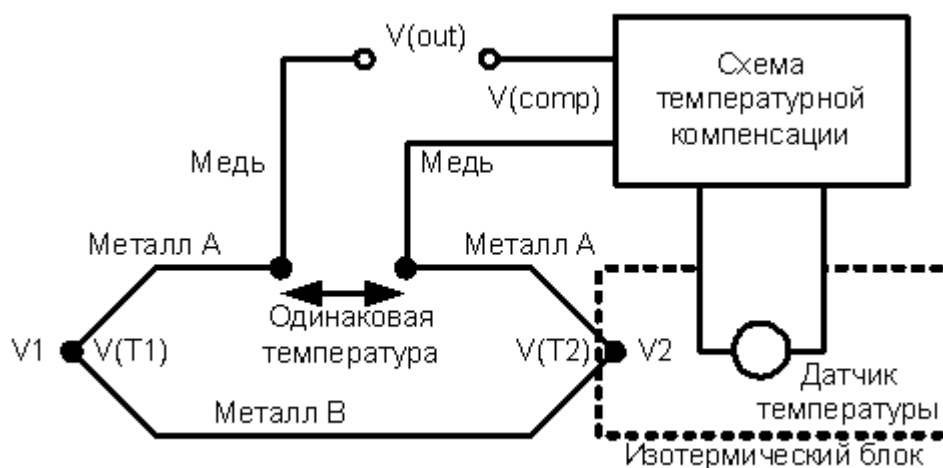


Рисунок 1.3.2.3 – Использование датчика температуры для компенсации холодного спая

### 1.3.3 Резистивные датчики температуры

У РДТ сопротивление меняется с изменением температуры, как и у терморезисторов. РДТ изготавливаются из дорогостоящего платинного провода, который наматывается на керамический каркас. Сопротивление датчика варьируется от  $100\Omega$  до  $1000\Omega$ . РДТ точнее и линейнее термопар. РДТ – пассивные датчики, поэтому им требуется наличие тока возмущения. Один из главных недостатков РДТ – это саморазогрев. Он проявляется, когда ток течёт через датчик, тем самым нагревая последний, из-за этого появляется ошибка измерения температуры. Поэтому, при разработки схем сопряжения с РДТ нужно учитывать величину саморазогрева. На практике она не должна превышать половину градуса. Для уменьшения ошибки саморазогрева необходимо использовать минимально возможные токи возбуждения.

Обычно, подключение РДТ происходит по мостовой схеме. Выход моста усиливается. На рисунке 1.3.3.1 изображён  $100\Omega$  платиновый РДТ, который питается от источника тока  $400\mu\text{A}$ . Выходной сигнал датчика квантуется АЦП. Изменение тока возбуждения не влияет на точность схемы, так как входное и опорное напряжение измеряются относительным образом. Использование АЦП с



высоким разрешением и встроенным усилителем исключает необходимость в дополнительной нормирующей цепи [28].

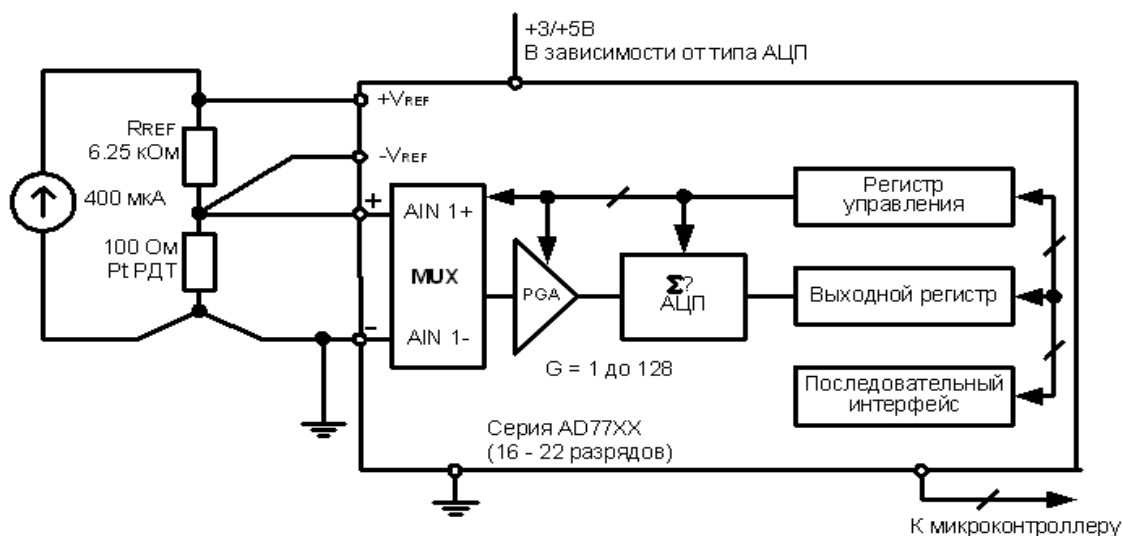


Рисунок 1.3.3.1 – Пример подключения платинового РДТ к АЦЦ

### 1.3.4 Термисторы

Термисторы – это недорогие и чувствительные к температуре резисторы. Их изготавливают из полупроводниковых материалов, имеющих и положительный, и отрицательный температурный коэффициент. На рисунке 1.3.4.1 изображена зависимость сопротивления термистора от температуры. Термистор – самое нелинейное устройство из рассмотренных выше, но и у него самая высокая чувствительность [29].

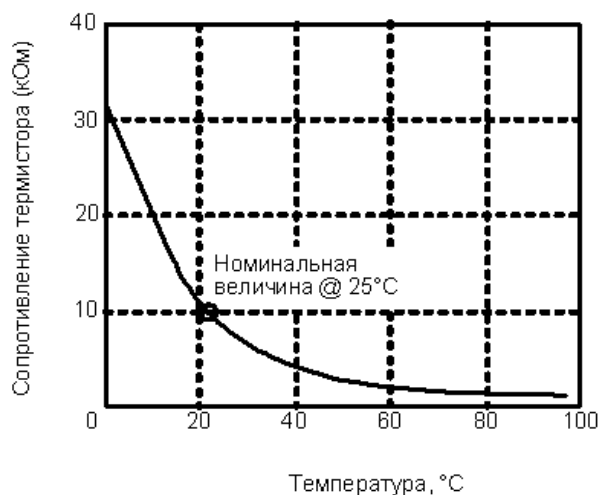


Рисунок 1.3.4.1 – Зависимость сопротивления термистора от температуры

Так как термисторы обладают высокой чувствительностью, они являются незаменимыми в высокоскоростном определении температуры. Но не стоит забывать, что термистор достаточно не линеен (рисунок 1.3.4.2). Поэтому необходимо выполнять линеаризацию всех величин температуры, и по этой причине термисторы применяются только в узком диапазоне измерений.

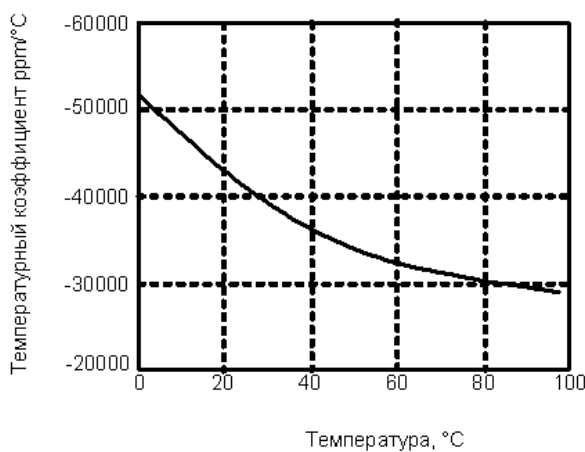


Рисунок 1.3.4.2 – Зависимость температурного коэффициента термистора от температуры

Самым простым способом линеаризации термисторов является установка параллельного шунтирующего резистора. Величина этого резистора рассчитывается по формуле (1.3.4.1):

$$R = \frac{R_{T_2}(R_{T_1} + R_{T_3}) - 2R_{T_1}R_{T_3}}{R_{T_1} + R_{T_3} - 2R_{T_2}}, \quad (1.3.4.1)$$

где  $R_{T_1}$  - сопротивление термистора при температуре  $T_1$ , нижний предел температурного диапазона;

$R_{T_3}$  - сопротивление термистора при температуре  $T_3$ , верхний предел температурного диапазона;

$R_{T_2}$  - сопротивление термистора при температуре  $T_2$ , средняя точка температурного диапазона.

Например, для термистора 10 К $\Omega$ ,  $R_{T_1} = 32650\Omega$  при 0 $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{T_2} = 6532\Omega$  при 35 $^{\circ}\text{C}$  и  $R_{T_3} = 1752\Omega$  при 70 $^{\circ}\text{C}$ . Это приводит к величине  $R = 5.17 \text{ К}\Omega$  (рисунок 1.3.4.3).

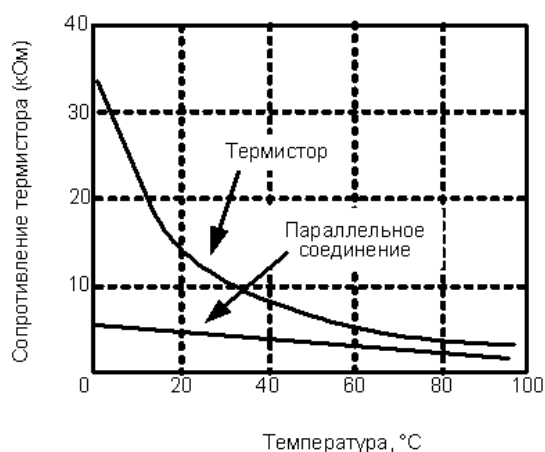


Рисунок 1.3.4.3 – Линеаризация термистора при подключении параллельного резистора 5.17 К $\Omega$

### 1.3.5 Полупроводниковые датчики температуры

Самую высокую точность и линейность имеют интегральные полупроводниковые датчики температуры. Их главный недостаток – это узкий диапазон рабочих температур от -55 $^{\circ}\text{C}$  до +150 $^{\circ}\text{C}$ . Датчики оборудованы

встроенными усилителями, что позволяет им масштабировать выходные сигналы.

Физический принцип работы полупроводникового датчика основан на зависимости от температуры падения напряжения на прямом p-n переходе. Данная зависимость очень близка к линейной, это позволяет создавать датчики, которые не требуют сложных схем коррекции. На практике в качестве чувствительных элементов используются диоды, или включенные по схеме диода транзисторы. Для проведения измерений, необходимо протекание стабильного тока через чувствительный элемент. Выходным сигналом является падение напряжения на датчике.

Схемы с одиночным p-n переходом, отличаются низкой точностью и большим разбросом параметров, связанных с особенностями изготовления и работы полупроводниковых приборов. По этой причине в промышленности выпускается множество типов специализированных датчиков, которые имеют в своей основе вышеописанный принцип, но дополнительно оснащенных цепями, устраняющими негативные особенности и значительно расширяющими функционал приборов (рисунок 1.3.5.1).

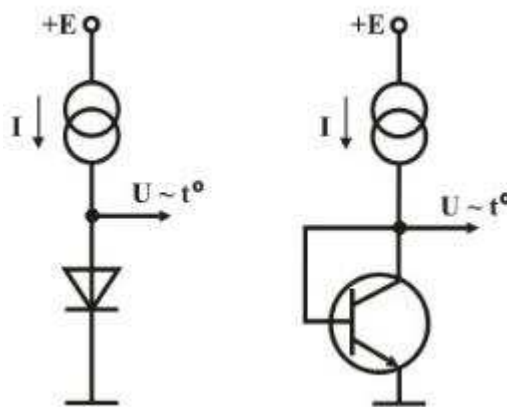


Рисунок 1.3.5.1 – Полупроводниковые датчики температуры

### 1.3.6 Термореле и регуляторы с установкой температуры

Если температурный датчик подключить к компаратору, то получится термореле. Термореле срабатывает при достижении температурного порога. В качестве примера термореле можно привести ADT05 (рисунок 1.3.6.1), где благодаря внешнему резистору устанавливается температура переключения с точностью в  $2^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . ADT05 создан для работы с однополярным питанием в диапазоне от  $+2.7\text{В}$  до  $+7\text{В}$ .

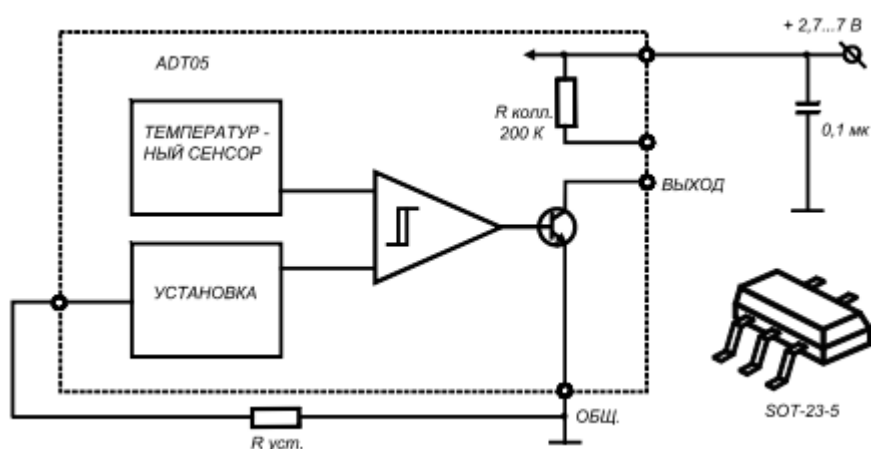


Рисунок 1.3.6.1 – Термостатирующий переключатель ADT05

### 1.4 Существующие решения измерения температуры участков КА

Перед созданием алгоритмов измерения температуры бортовой радиоэлектронной аппаратуры рассмотрим существующие способы терморегулирования оборудования КА. Так как большинство результатов работы над данным направлением строго засекречены, то ниже будут приведены некоторые решения, которые удалось обнаружить.

Первое решение было предложено группой учёных: Башкировой А.Г., Евдокимовым Ю.К. Краевым В.В., Натфуловым Ф.Х. [30]. Способ может быть использован при исследовании распределения температуры протяжённого объекта сложной формы. В качестве прототипа изобретения использовалась польская система многоточечного измерения температуры N 267058, кл. G 01 K,

1991, которая содержит датчик температуры, основанный на полупроводниковых переходах. Недостаток прототипа – это наличие большого числа проводов.

В работе устройство измерения распределения температуры включает в себя регулируемый источник напряжения и источник гармонического сигнала, термочувствительные элементы соединены последовательно друг с другом и представляют собой Т-схемы с резисторами  $R$  и полупроводниковыми диодами. Между первым и последним термочувствительными элементами подключён источник постоянного напряжения  $E$ , перед первым термочувствительным элементом подключены последовательно источник гармонического сигнала, регулируемый источник напряжения и измеритель амплитуды переменного тока.

На рисунке 1.4.1 показана функциональная схема устройства.

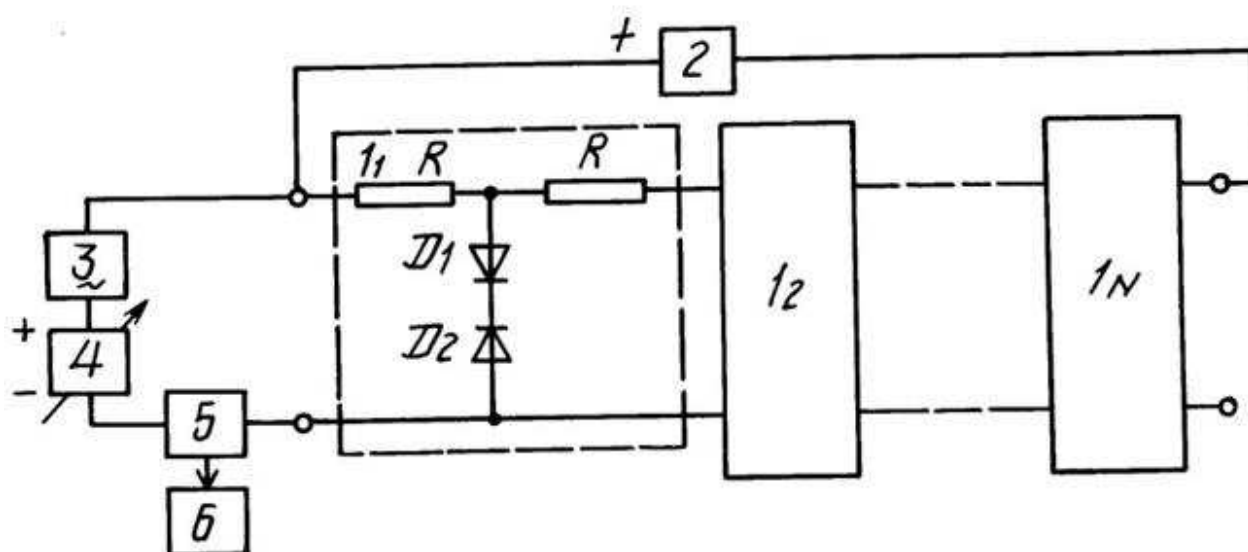


Рисунок 1.4.1 - Схема устройства измерения пространственного распределения температуры

Устройство содержит:

- $N$  последовательно соединённых термочувствительных элементов  $1_n$ ;
- источник постоянного напряжения 2;
- источник гармонического сигнала 3;

- регулируемый источник напряжения 4;
- измеритель амплитуды переменного тока 5;
- регистратор 6.

Работа устройства осуществляется следующим образом. На вход термочувствительных элементов поступает суммарное напряжение с 2 и 3. Напряжение на выходе 4 изменяется от 0 до  $E$ , где  $E$  – напряжение источника 2, включенного встречно с 4, вследствие чего вдоль цепочки термочувствительных элементов 1 устанавливается линейное распределение потенциала. При изменении напряжения 4 значение потенциала становится равным нулю на входе каждого параллельного плеча Т-схемы. В этот момент дифференциальное сопротивление встречных диодов  $D_1$  и  $D_2$  минимально и ток в цепи определяется  $n$ -ым термочувствительным элементом. Измерение амплитуды переменного тока в цепи позволяет определить температуру в точках установки термочувствительных элементов.

Недостаток этого способа - это низкая точность измерений, которая вызвана изменением величины измеряемого тока вследствие дрейфа параметров измерительной аппаратуры при изменении температуры, старении элементов, низкая помехоустойчивость, а также невысокий верхний предел температурного диапазона измерений, ограниченный предельной температурой работоспособности  $p$ - $n$  перехода.

Другое решение [31] предназначено для определения температуры во множестве точек исследуемого объекта. Задачей изобретения являлось повышение точности и помехоустойчивости, а также расширение температурного диапазона измерения распределения температурного поля. Способ состоит в помещении в точки термочувствительных элементов множества датчиков, которые соединены параллельно двухпроводной линией, подачи переменного напряжения на вход одной линии и снятия регистратором значений входного переменного тока. В качестве датчиков температуры использовались кварцевые пьезорезонансные датчики. Регистратор включает в себя последовательно соединённую схему согласования, регистратор амплитуды

переменного тока, анализатора спектра и блока обработки и индикации. В качестве сигнала переменного напряжения берётся сигнал со спектром, который перекрывает частотный диапазон датчиков. После регистрации входного переменного тока вычисляется его амплитудный спектр, по положению его максимума определяются резонансные частоты кварцевых датчиков и по теоретически известным или предварительно найденным зависимостям резонансной частоты датчиков от температуры определяется искомая температура в контрольных точках.

Схема устройства, реализующего данный способ приведена на рисунке 1.4.2.

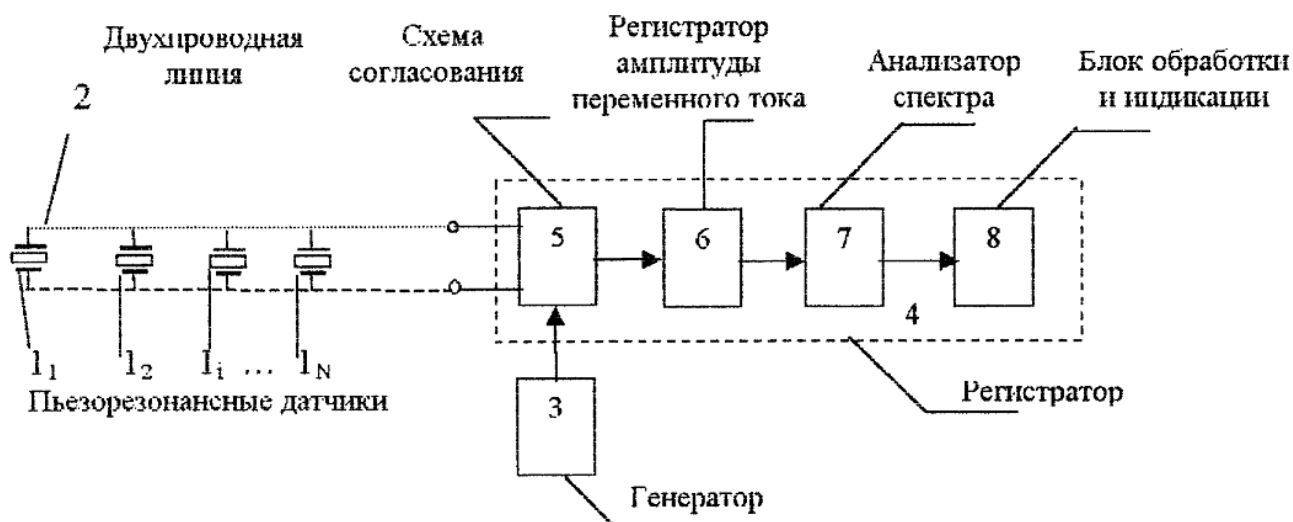


Рисунок 1.4.2 – Схема измерительного устройства

Устройство содержит  $N$  кварцевых пьезорезонансных датчиков  $1_1 \dots 1_N$ , двухпроводную линию 2, генератор 3, регистратор 4, содержащего схему согласования 5, регистратор амплитуды переменного тока 6, анализатор спектра 7, блок обработки и индикации 8. Количество термо-датчиков определяется необходимым количеством точек контроля температуры.

Использование пьезорезонансных датчиков температуры авторы объясняют наличием ряда преимуществ, которыми не обладают другие виды датчиков, а именно:



- рабочий диапазон от  $-50$  до  $+370^{\circ}\text{C}$ ;
- повышенная помехоустойчивость при преобразовании температуры в частотных сигнал выхода;
- высокая точность измерения температуры (до  $0,1\%$ ).

Автором следующего решения является Ковтун В.С. [32]. Изобретение было создано специально для терморегулирования КА. Задача изобретения состоит в продлении срока эксплуатации КА посредством уменьшения расхода ресурса бортовой РЭА по количеству включений и продолжительности её работы при продолжительном полёте.

На рисунке 1.4.3 представлена структурная схема тепловой системы изобретения.

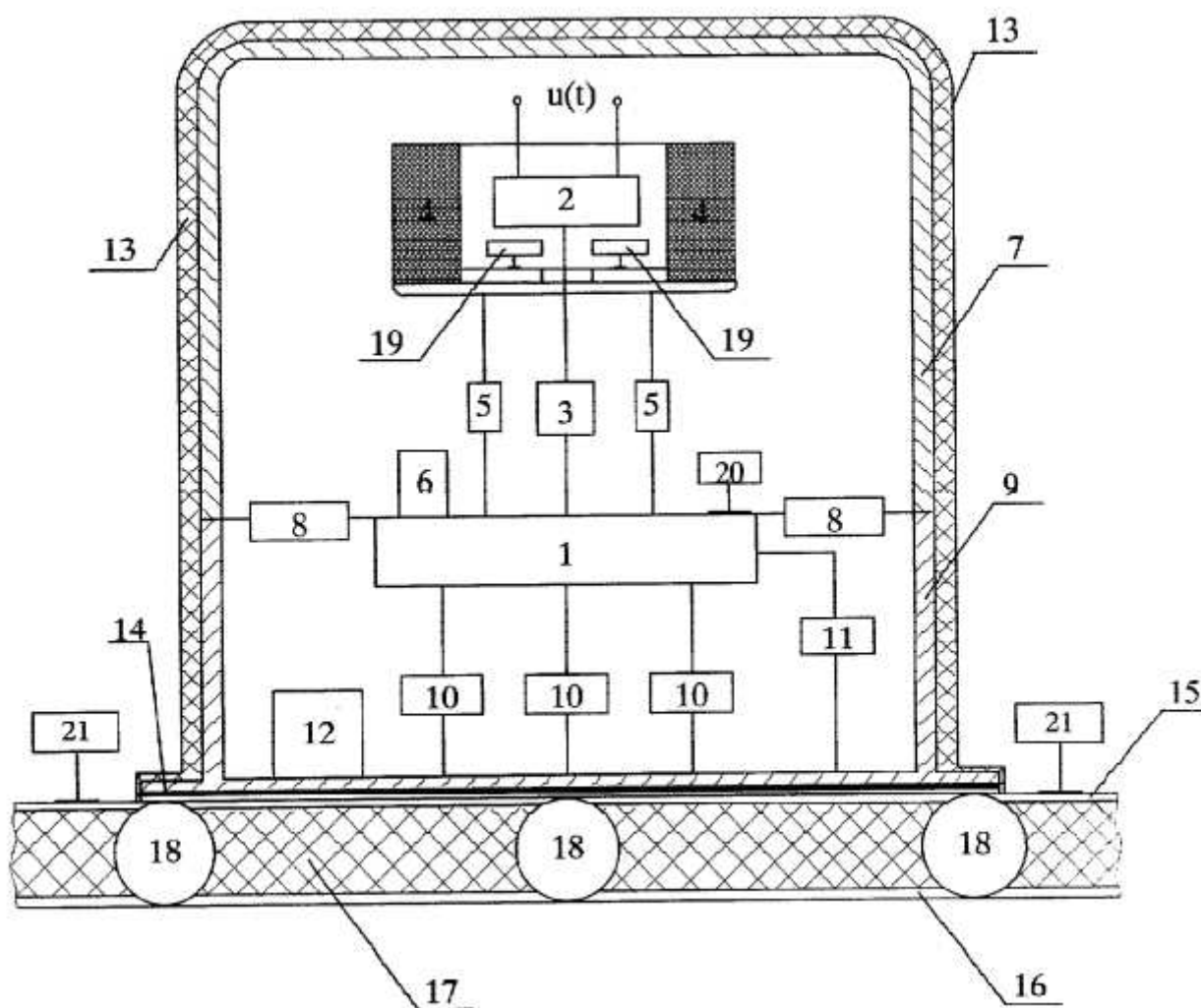


Рисунок 1.4.3 – Структурная схема тепловой системы прибора

Ниже приведена расшифровка блоков схемы:

- 1 - основание прибора;
- 2 - чувствительный элемент;
- 3 - опора чувствительного элемента;
- 4 - система терморегулирования чувствительного элемента;
- 5 - опора системы терморегулирования;
- 6 - РЭА системы терморегулирования;
- 7 - кожух прибора;
- 8 - прокладки для кожуха;
- 9 - корпус прибора;
- 10 - опора корпуса;
- 11 - система терморегулирования основания;
- 12 - РЭА системы терморегулирования основания;
- 13 - экранно-вакуумная теплоизоляция;
- 14 - теплопроводящая паста;
- 15 - верхняя обкладка радиационной панели;
- 16 - нижняя обкладка радиационной панели;
- 17 - наполнитель радиационной панели;
- 18 - тепловые трубки;
- 19 - термодатчик системы терморегулирования чувствительного элемента;
- 20 - термодатчик системы терморегулирования основания;
- 21 - термодатчик терморегулирования в области установки прибора.

Выделяемое в терморегулируемых тепло отводится на основание 1, теплоизолированное алюминиевым кожухом 7, который закреплён на 1 через текстолитовые прокладки 8. Основание 1 крепится на корпусе прибора 9 посредством теплоизолирующих опор 10. Тепло с основания 1 отводится с помощью системы терморегулирования 11 на корпус 9, на котором установлена РЭА 12, не требующая точного термостатирования. Кожух 7 с корпусом 9 закрыт снаружи ЭВТИ 13, который защищает изобретение от внешних тепловых

потоков. Тепло из корпуса 9 через заполненный теплопроводящей пастой 14 зазор передаётся на обкладку 15 радиационной панели. Панель содержит верхнюю 15 и нижнюю 16 обкладки с заполненным между ними теплоносителем 17, внутри которого проложены тепловые трубы 18.

Вывод на рабочую температуру производится по датчикам 19. Нагревательные элементы (НЭ) являются исполнительными элементами системы, которые вместе с датчиками 19 соединены в систему терморегулирования через усилитель, расположенный в блоке 6 и обеспечивающий автоматическое регулирование мощности в НЭ на основании термодатчиков.

Система терморегулирования 11 управляется на основании значений датчиков 20, которые установлены на основании 1 и подключены к входным цепям регулятора, находящегося в блоке 12.

Термоэлектрические микроохладители – это исполнительные элементы системы, они расположены между основанием 1 и корпусом 9 с хорошим обоюдным тепловым контактом. В зоне установки прибора терморегулирование осуществляется по показаниям термодатчиков 21, расположенных на верхней обкладке 15. Подвод и отвод тепла осуществляется двумя способами: по тепловым трубам и через нижнюю обкладку 16 радиационной панели.

## **Выводы к главе 1**

В качестве результата написания первой главы магистерской диссертации можно сделать следующие выводы:

- были получены необходимые теоретические знания в исследуемой предметной области;
- рассмотрены существующие методы терморегулирования в КА и моделирования его теплового режима;
- проанализированы преимущества и недостатки существующих датчиков измерения температуры;
- рассмотрены работы, предложенные другими авторами и имеющие общую цель с данной диссертацией.

Проделанная работа позволяет построить математическую модель для термисторной сети измерения температуры и разработать алгоритмы анализа температурных данных РЭА КА, которые описаны в главах 2 и 3.

## **2 Численный метод анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат**

### **2.1 Постановка задачи**

Отказы бортовой РЭА, вызванные отклонением температуры от допустимых значений, составляют почти 80% от всех отказов оборудования КА и приводят к снижению ресурса аппаратуры и различным функциональным нарушениям. Поэтому особенно пристальное внимание уделяется оперативному контролю тепловых режимов РЭА. При отсутствии визуального мониторинга температурный контроль осуществляется контактными датчиками, которые размещают на радиоэлектронном изделии или печатной плате.

Из всего многообразия температурных датчиков, описанных в пункте 1.3 настоящей работы, в измерительной схеме было принято решение использовать терморезисторы. Во-первых, из-за зависимости сопротивления проводника от температуры, наблюдаемой в терморезисторе. Во-вторых, реализация терморезисторов может быть выполнена в виде тонких протяжённых проводников из специальных сплавов или металлов. В-третьих, точность измерения достигает сотых долей градуса.

В работе предложена идея использования протяжённых терморезисторных плёнок в виде сети для анализа температурного поля объекта исследования. Рассмотрим печатную плату, как геометрическую прямоугольную структуру, состоящую из определённого количества ячеек, с расположенными на ней тонкими металлическими проводниками, локальное сопротивление которых строго зависит от локальной температуры ячейки. Измерение сопротивления протяжённых проводников-термосопротивлений производится не в каждой ячейки отдельно, а в общем для горизонтальных и вертикальных участков платы. Также используются физические, качественные и логические соображения, на основании которых предложен алгоритм вычисления перегрева ячеек и нахождения их температуры.

В качестве дополнительных логических соображений использовалось следующее:

- сопротивление ячейки не может быть отрицательным;
- на температуру в ячейке помимо элементов в самой ячейке влияет температура соседних ячеек;
- для увеличения точности измерений размер ячеек берётся одинаковым;
- при перегреве любого элемента прирост температуры в других элементах платы также не отрицательный;
- градиент температуры сглаживается из-за передачи тепла между соседними элементами.

Математическая формулировка этих соображений приводит к невырожденной системе линейных уравнений, которые позволяют определить ячейки перегрева и температуру всех ячеек платы. Представленный алгоритм и вычислительные эксперименты показали применимость данного подхода для определения температуры участков исследуемого объекта и нахождения мест перегрева.

## 2.2 Математическая модель

Пусть имеется прямоугольная плата размером  $s \times r$ , начало координат у которой расположено в левом нижнем углу. Разобьём её на равные прямоугольные ячейки, количество которых будет равно  $n \times m$  с помощью условно проведённых горизонтальных и вертикальных линий (рисунок 2.2.1).

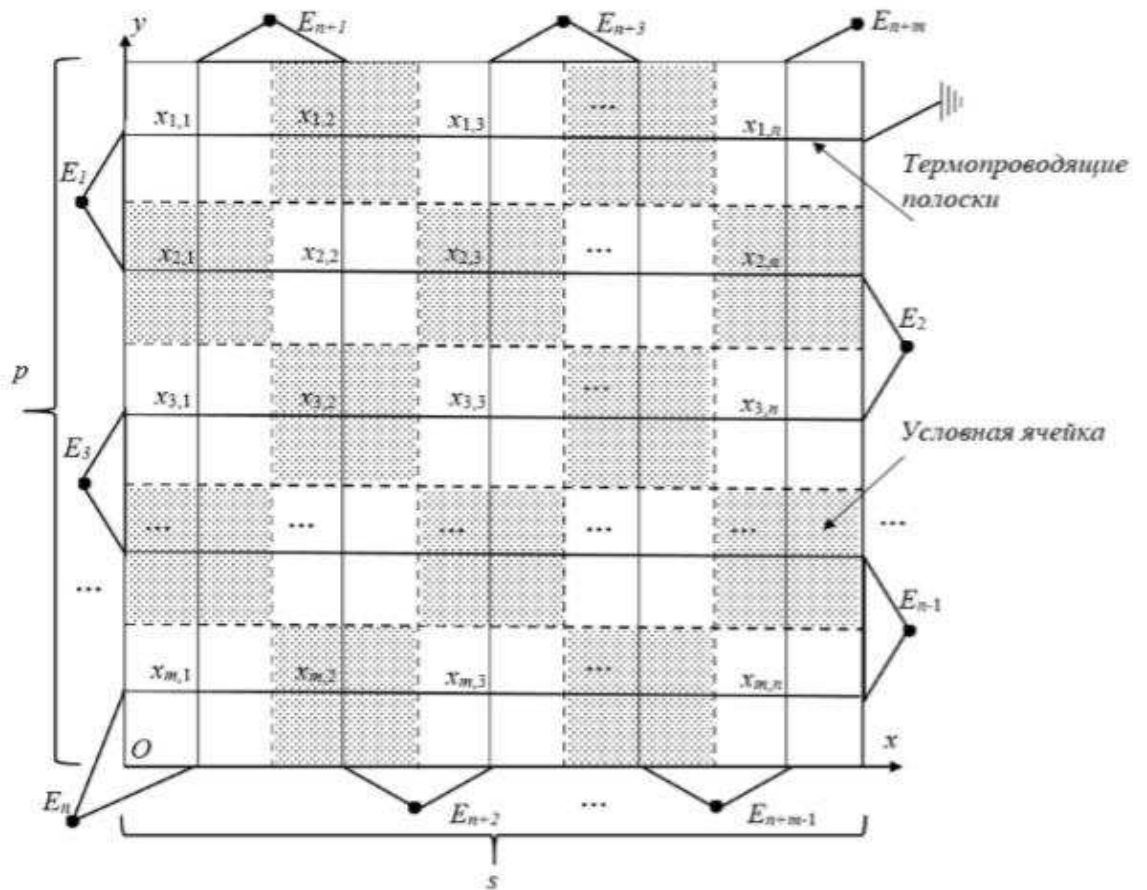


Рисунок 2.2.1 – Прямоугольная плата размерностью  $s \times p$

Тепловой контроль осуществляется с помощью нанесённых на плату вертикальных и горизонтальных тонких металлических полосок, сделанных из специального сплава и проходящих через середины ячеек  $x_{i,j}$ . Сплав выбирается таким образом, чтобы локальное сопротивление полоски  $R_{loc}$  существенно зависело от локальной температуры ячейки  $T_{loc}$  (2.2.1).

$$R_{loc} = F(T_{loc}), \quad (2.2.1)$$

где  $F(T_{loc})$  – строго монотонная функция.

Тогда найдя обратную к ней функцию, можно будет определить локальную температуру (2.2.2):

$$T_{loc} = F^{-1}(R_{loc}) \quad (2.2.2)$$

Таким образом, предполагаемое решение будет направлено на определение сопротивления каждой ячейки  $R_{loc}$ , на основании которого будет получена локальная температура этой ячейки (2.2.2).

Контроль сопротивления осуществляется при помощи измерения силы тока  $I$  во всей цепи и разности потенциалов для каждой горизонтальной и вертикальной металлической полоски, полученных вычитанием соседних измеренных значений напряжения  $E_i, i = 1, \dots, m + n$ . По закону Ома определяются сопротивления всех участков. Обозначим локальные сопротивления ячеек как  $x_{i,j}$ , тогда значения сопротивлений горизонтальных  $R_{h,i}$  и вертикальных  $R_{v,j}$  участков будут вычисляться как сумма сопротивлений ячеек, через которые проходят данные участки. Тогда будет справедлива следующая система линейных алгебраических уравнений с  $n$  уравнениями для вертикальных участков и  $m$  уравнениями для горизонтальных участков (2.2.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{1,1} + x_{2,1} + \dots + x_{m,1} = R_{v,1}, \\ x_{1,2} + x_{2,2} + \dots + x_{m,2} = R_{v,2}, \\ \dots \\ x_{1,n} + x_{2,n} + \dots + x_{m,n} = R_{v,n}, \\ x_{1,1} + x_{1,2} + \dots + x_{1,n} = R_{h,1}, \\ x_{2,1} + x_{2,2} + \dots + x_{2,n} = R_{h,2}, \\ \dots \\ x_{m,1} + x_{m,2} + \dots + x_{m,n} = R_{h,m}. \end{array} \right. \quad (2.2.3)$$

Данная система сильно недоопределена при  $n, m > 2$ , так как количество неизвестных равно  $nm$ , а количество уравнений  $n + m$ .

### 2.3 Алгоритм решения задачи

Представим систему (2.2.3) в матричной форме (2.3.1):

$$Mr = f, \quad (2.3.1)$$





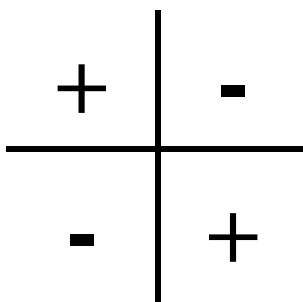


Рисунок 2.3.1 – Вид ядра

Здесь не будет приведено доказательство того, что данное ядро единственная линейная оболочка оператора  $M$ .

Тогда любое решение системы (2.3.3) представляет собой сумму частного решения  $x$  с линейной комбинацией векторов ядра. Общий вид схемы с добавлением узлов приведён на рисунке 2.3.2.

Пусть компоненты этого решения будут обозначены как  $u_{i,j}$ . Тогда имеется 9 равенств, зависящих от расположения ячейки на плате (здесь и дальше в работе алгоритма предполагаем, что плата имеет квадратный вид и размером  $n \times n$ ).

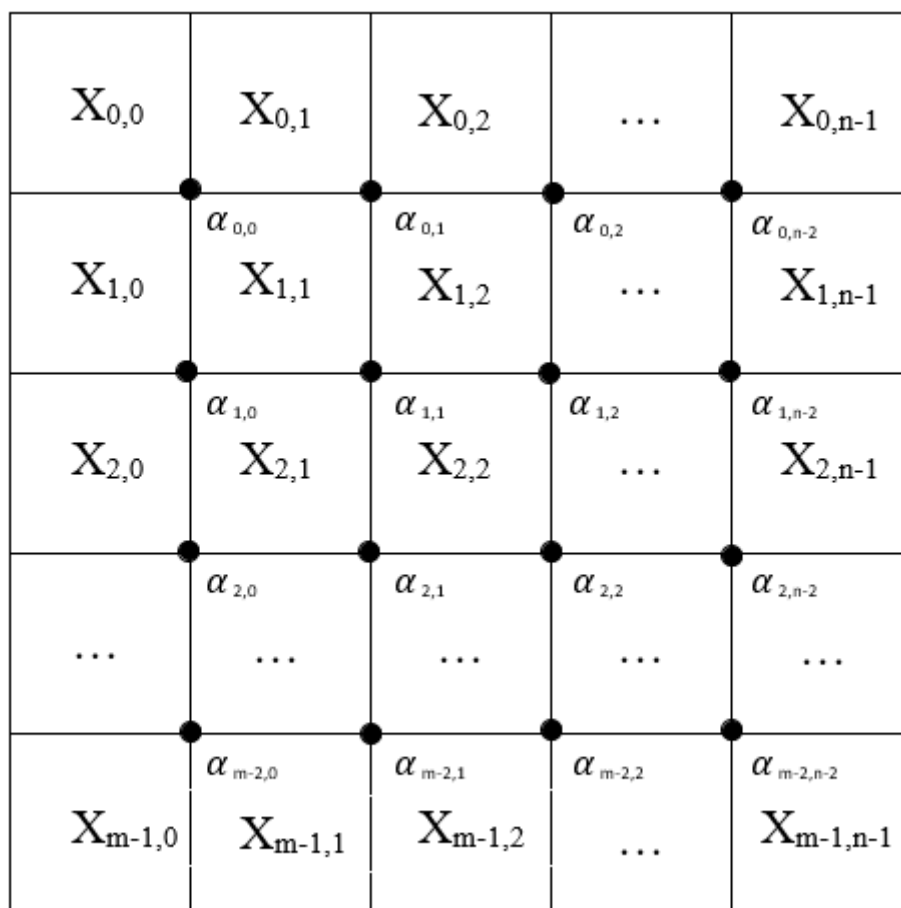


Рисунок 2.3.2 – Схема с узлами  $\alpha$

Девять вариантов расположения ячейки на плате и формулы нахождения  $u$  для каждого варианта:

- верхний левый угол (2.3.4):

$$u_{0,0} = x_{0,0} + \alpha_{0,0} \tag{2.3.4}$$

- верхний правый угол (2.3.5):

$$u_{0,n-1} = x_{0,n-1} - \alpha_{0,n-2} \tag{2.3.5}$$

- нижний левый угол (2.3.6):

$$u_{m-1,0} = x_{m-1,0} - \alpha_{m-2,0} \tag{2.3.6}$$

- нижний правый угол (2.3.7):

$$u_{n-1,n-1} = x_{n-1,n-1} + \alpha_{n-2,n-2} \quad (2.3.7)$$

- в верхней центральной части (2.3.8):

$$u_{0,j} = x_{0,j} + \alpha_{0,j} - \alpha_{0,j-1} \quad (2.3.8)$$

- в левой центральной части (2.3.9):

$$u_{i,0} = x_{i,0} + \alpha_{i,0} - \alpha_{i-1,0} \quad (2.3.9)$$

- в правой центральной части (2.3.10):

$$u_{i,n-1} = x_{i,n-1} + \alpha_{i-1,n-2} - \alpha_{i,n-2} \quad (2.3.10)$$

- в нижней центральной части (2.3.11):

$$u_{n-1,j} = x_{n-1,j} + \alpha_{n-2,j-1} - \alpha_{n-2,j} \quad (2.3.11)$$

- в любой части внутри платы (2.3.12):

$$u_{i,j} = x_{i,j} + \alpha_{i,j} + \alpha_{i-1,j-1} - \alpha_{i-1,j} - \alpha_{i,j-1} \quad (2.3.12)$$

Встаёт вопрос о вычислении коэффициентов  $\alpha_{i,j}$ . Нас интересует установление координат перегрева платы, т.е. конкретной ячейки, где случился перегрев, для определения её примерной температуры, которая должна дать конструкторам ключ к определению возможного источника перегрева. Для

определённости будет рассматриваться терморезисторная плёнка с повышением сопротивления при возрастании температуры.

Для дальнейшей работы алгоритма введём два логических допущения:

- из-за существования теплового потока и передачи энергии между ячейками локальная температура ( $\alpha$ , следовательно, и локальное сопротивление) разглаживается, поэтому большие перепады температур (сопротивлений) в соседних ячейках недопустимы;

- так как исследуются именно режимы перегрева, то отрицательные компоненты  $u_{i,j}$  также считаются невозможными.

Введём функционал  $F$ , который представляет собой сумму квадратов разности для вертикальных и горизонтальных участков платы (2.3.13):

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n (u_{i+1,j} - u_{i,j})^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} (u_{i,j+1} - u_{i,j})^2 \quad (2.3.13)$$

Минимизируем это выражение посредством нахождения частных производных  $\partial F(\alpha)/\partial \alpha_{i,j}$  и приравнивании их к нулю. Получим систему линейных алгебраических уравнений размерностью  $(n - 1)(n - 1)$  (формула 2.3.14).

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{0,0}} = 0; \\ \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{0,1}} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{n-2,n-2}} = 0. \end{cases} \quad (2.3.14)$$

Решив систему (2.3.14) с невырожденной матрицей, получим коэффициенты  $\alpha_{i,j}$ . В зависимости от геометрического расположения узла выражение  $\partial F(\alpha)/\partial \alpha_{i,j}$  принимает одну из 9 форм. Рассмотрим все из них.

Девять вариантов расположения узла на плате и формулы нахождения  $\partial F(\alpha)/\partial \alpha_{i,j}$  для каждого варианта:

- верхний левый узел (2.3.15):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{0,0}} = & 40\alpha_{0,0} - 26\alpha_{0,1} - 26\alpha_{1,0} + 4\alpha_{0,2} + 16\alpha_{1,1} + 4\alpha_{2,0} - \\ & - 2\alpha_{1,2} - 2\alpha_{2,1} + 8x_{0,0} - 10x_{0,1} - 10x_{1,0} + 2x_{0,2} + 12x_{1,1} + \\ & + 2x_{2,0} - 2x_{1,2} - 2x_{2,1} \end{aligned} \quad (2.3.15)$$

- верхний правый узел (2.3.16):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{0,n-2}} = & 4\alpha_{0,n-4} - 26\alpha_{0,n-3} - 2\alpha_{1,n-4} + 40\alpha_{0,n-2} + \\ & + 16\alpha_{1,n-3} - 26\alpha_{1,n-2} - 2\alpha_{2,n-3} + 4\alpha_{2,n-2} - 2x_{0,n-3} + \\ & + 10x_{0,n-2} + 2x_{1,n-3} - 8x_{0,n-1} - 12x_{1,n-2} + 10x_{1,n-1} + \\ & + 2x_{2,n-2} - 2x_{2,n-1} \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

- нижний левый узел (2.3.17):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{n-2,0}} = & 4\alpha_{n-4,0} - 2\alpha_{n-4,1} - 26\alpha_{n-3,0} + 16\alpha_{n-3,1} + \\ & + 40\alpha_{n-2,0} - 2\alpha_{n-3,2} - 26\alpha_{n-2,1} + 4\alpha_{n-2,1} - 2x_{n-3,0} + \\ & + 2x_{n-3,1} + 10x_{n-2,0} - 12x_{n-2,1} - 8x_{n-1,0} + 2x_{n-2,0} + \\ & + 10x_{n-1,1} - 2x_{n-1,2} \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

- нижний правый узел (2.3.18):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{n-2,n-2}} &= 4\alpha_{n-4,n-2} - 2\alpha_{n-3,n-4} - 2\alpha_{n-4,n-3} + 16\alpha_{n-3,n-3} + \\
&+ 4\alpha_{n-2,n-4} - 26\alpha_{n-3,n-2} - 26\alpha_{n-2,n-3} + 40\alpha_{n-2,n-2} - \\
&- 2x_{n-3,n-2} - 2x_{n-2,n-3} + 2x_{n-3,n-1} + 12x_{n-2,n-2} + \\
&+ 2x_{n-1,n-3} - 10x_{n-2,n-1} - 10x_{n-1,n-2} + 8x_{n-1,n-1}
\end{aligned} \tag{2.3.18}$$

- верхний центральный узел (2.3.19):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{0,j}} &= 44\alpha_{0,j} - 26\alpha_{0,j-1} + 16\alpha_{1,j-1} - 26\alpha_{0,j+1} - \\
&- 28\alpha_{1,j} - 2\alpha_{2,j-1} + 4\alpha_{2,j} + 16\alpha_{1,j+1} - 2\alpha_{2,j+1} + \\
&+ [4\alpha_{0,j+1} - 2\alpha_{1,j+2}] + [4\alpha_{0,j-1} - 2\alpha_{1,j-2}] - 2x_{0,j-1} + \\
&+ 10x_{0,j} + 2x_{1,j-1} - 10x_{0,j+1} - 12x_{1,j} + 2x_{0,j+2} + \\
&+ 12x_{1,j+1} + 2x_{2,j} - 2x_{1,j+2} - 2x_{2,j+1}
\end{aligned} \tag{2.3.19}$$

- левый центральный узел (2.3.20):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{i,0}} &= 16\alpha_{i-1,1} - 26\alpha_{i-1,0} + 44\alpha_{i,0} - 2\alpha_{i-1,2} - 8\alpha_{i,1} - \\
&- 26\alpha_{i+1,0} + 4\alpha_{i,2} + 16\alpha_{i+1,1} - 2\alpha_{i+1,2} + [4\alpha_{i+2,0} - 2\alpha_{i+2,1}] + \\
&+ [4\alpha_{i-2,0} - 2\alpha_{i-2,1}] - 2x_{i-1,0} + 2x_{i-1,1} + 10x_{i,0} - 12x_{i,1} - \\
&- 10x_{i+1,0} + 2x_{i,2} + 12x_{i+1,1} + 2x_{i+2,0} - 2x_{i+1,2} - 2x_{i+2,1}
\end{aligned} \tag{2.3.20}$$

- правый центральный узел (2.3.21):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{i,n-2}} = & 16\alpha_{i-1,n-3} - 2\alpha_{i-1,n-4} + 4\alpha_{i,n-4} - 26\alpha_{i-1,n-2} - \\
& -28\alpha_{i,n-3} + 44\alpha_{i,n-2} + 16\alpha_{i+1,n-3} - 26\alpha_{i+1,n-2} - 2\alpha_{i+1,n-4} + \\
& + [4\alpha_{i+2,n-2} - 2\alpha_{i+2,n-3}] + [4\alpha_{i-2,n-2} - 2\alpha_{i-2,n-3}] - \\
& -2x_{i-1,n-2} - 2x_{i,n-3} + 2x_{i-1,n-1} + 12x_{i,n-2} + 2x_{i+1,n-3} - \\
& -10x_{i,n-1} - 12x_{i+1,n-2} + 10x_{i+1,n-1} + 2x_{i+1,n-2} - 2x_{i+2,n-1}
\end{aligned} \tag{2.3.21}$$

- нижний центральный узел (2.3.22):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{n-2,j}} = & 4\alpha_{n-4,j} - 2\alpha_{n-4,j-1} + 16\alpha_{n-3,j-1} - 2\alpha_{n-4,j+1} - \\
& -28\alpha_{n-3,j} - 26\alpha_{n-2,j-1} + 16\alpha_{n-3,j+1} + 44\alpha_{n-2,j} - \\
& -26\alpha_{n-2,j+1} + [4\alpha_{n-2,j+2} - 2\alpha_{n-3,j+2}] + [4\alpha_{n-2,j-2} - \\
& -2\alpha_{n-3,j-2}] - 2x_{n-3,j} - 2x_{n-2,j-1} + 2x_{n-3,j+1} + 12x_{n-2,j} + \\
& + 2x_{n-1,j-1} - 12x_{n-2,j+1} - 10x_{n-1,j} + 2x_{n-2,j+2} + \\
& + 10x_{n-1,j+1} - 2x_{n-1,j+2}
\end{aligned} \tag{2.3.22}$$

- любой внутренний узел (2.3.23):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F(\alpha)}{\partial \alpha_{i,j}} = & 16\alpha_{i-1,j-1} - 28\alpha_{i-1,j} - 28\alpha_{i,j-1} + 16\alpha_{i-1,j+1} + \\
& + 48\alpha_{i,j} + 16\alpha_{i+1,j-1} - 28\alpha_{i,j+1} - 28\alpha_{i+1,j} + 16\alpha_{i+1,j+2} + \\
& + [4\alpha_{i,j+2} - 2\alpha_{i-1,j+2} - 2\alpha_{i+1,j+2}] + [4\alpha_{i+1,j} - 2\alpha_{i+2,j-1} - \\
& -2\alpha_{i+2,j+1}] + [4\alpha_{i,j-2} - 2\alpha_{i-1,j-2} - 2\alpha_{i+1,j-2}] + [4\alpha_{i-2,j} - \\
& -2\alpha_{i-2,j-1} - 2\alpha_{i-2,j+1}] - 2x_{i-1,j} - 2x_{i,j-1} + 2x_{i-1,j+1} + \\
& + 12x_{i,j} + 2x_{i+1,j-1} - 12x_{i,j+1} - 12x_{i+1,j} + 2x_{i,j+2} + \\
& + 12x_{i+1,j+1} + 2x_{i+2,j} - 2x_{i+1,j+2} - 2x_{i+2,j+1}
\end{aligned} \tag{2.3.23}$$



Слагаемые в квадратных скобках [...] могут опускаться в зависимости от расположения ячейки, тем самым упрощая формулы (2.3.19 – 2.3.23).

Выписав все производные по существующим узлам  $\alpha_{i,j}$ , можно найти значения этих узлов. Для этого воспользуемся уравнением (2.3.24) в матричной форме:

$$A\alpha = R, \quad (2.3.24)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов, стоящих перед  $\alpha_{i,j}$ ;

$\alpha$  – вектор-столбец неизвестных узлов;

$R$  – вектор-столбец суммы сопротивлений, найденных из формул 2.3.15-2.3.24.

Матрица коэффициентов  $A$  размерностью  $(n - 1)^2 \times (n - 1)^2$  выглядит следующим образом (2.3.25):

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{0,0\alpha_{0,0}} & \alpha_{0,1\alpha_{0,0}} & \alpha_{0,2\alpha_{0,0}} & \dots & \alpha_{n-1,n-1\alpha_{0,0}} \\ \alpha_{0,0\alpha_{0,1}} & \alpha_{0,1\alpha_{0,1}} & \alpha_{0,2\alpha_{0,1}} & \dots & \alpha_{n-1,n-1\alpha_{0,1}} \\ & & \dots & & \\ \alpha_{0,0\alpha_{n-1,n-1}} & \alpha_{0,1\alpha_{n-1,n-1}} & \alpha_{0,2\alpha_{n-1,n-1}} & \dots & \alpha_{n-1,n-1\alpha_{n-1,n-1}} \end{pmatrix} \quad (2.3.25)$$

Решая систему (2.3.24) любым известным методом, например Гауссом, вычисляем значения узлов. Подставляем найденные значения в формулы 2.3.4-2.3.12 находим искомые  $u_{i,j}$ . Но найденные решения могут содержать отрицательные значения, что не удовлетворяет физическому смыслу сопротивления. В этом случае необходимо применить метод множителей Лагранжа. Дополним функционал (2.3.13) слагаемыми, соответствующими отрицательным компонентам  $u$  (2.3.26).

$$F^*(\alpha, \lambda) = F(\alpha) - \sum_{i=1}^q \lambda_i \gamma_i(\alpha), \quad (2.3.26)$$

где  $q$  – количество компонент  $u$  с отрицательными значениями;

$\lambda_i$  – множители Лагранжа;

$\gamma_i(\alpha)$  – функции ограничения.

В данном случае ограничения  $\gamma_i(\alpha)$  – это правая часть формул 2.3.4-2.3.12, т.е. компоненты сопротивлений с соответствующими узлами.

Теперь находятся новые значения коэффициентов узлов  $\alpha_{i,j}$  и сопротивлений  $u$  с использованием функционала (2.3.26) из системы (2.3.27):

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}, \quad (2.3.27)$$

где  $A_{11}$  – исходная матрица коэффициентов  $A$ ;

$A_{21}$  – дополнительная матрица коэффициентов метода множителей Лагранжа размерностью  $q \times (n - 1)^2$ ;

$A_{12}$  – транспонированная  $A_{21}$  размерностью  $(n - 1)^2 \times q$ ;

$A_{22}$  – нулевая матрица размерностью  $q \times q$ ;

$u_1$  – вектор столбец решений  $u$ ;

$u_2$  – вектор столбец, соответствующий множителям Лагранжа:  $(\lambda_1, \dots, \lambda_s)^T$ .

Полученное решение необходимо проверить на отрицательность сопротивлений  $u_{i,j}$ . Если в решении имеется отрицательный элемент, то метод множителей Лагранжа применяется повторно с дополнением матриц  $A_{21}$ ,  $A_{12}$  и  $u_2$  на соответствующий элемент. Метод применяется до тех пор, пока в конечном решении не останутся только неотрицательные элементы  $u_{i,j}$ .

## 2.4 Вычислительный эксперимент

Пусть уравнение исходного профиля распределения сопротивлений ячеек на электронной плате выглядит следующим образом (2.4.1):

$$r_{i,j} = R_0 + R_1 \sin\left(\frac{\pi(i-1)}{(n-1)}\right) \sin\left(\frac{\pi(j-1)}{(n-1)}\right)^2, \quad (2.4.1)$$

где  $R_0, R_1$  – константы;

$r_{i,j}$  – локальное сопротивление ячейки с координатами  $i, j$ ;

$n$  – размерность платы.

График общего распределения приведён на рисунке 2.4.1.

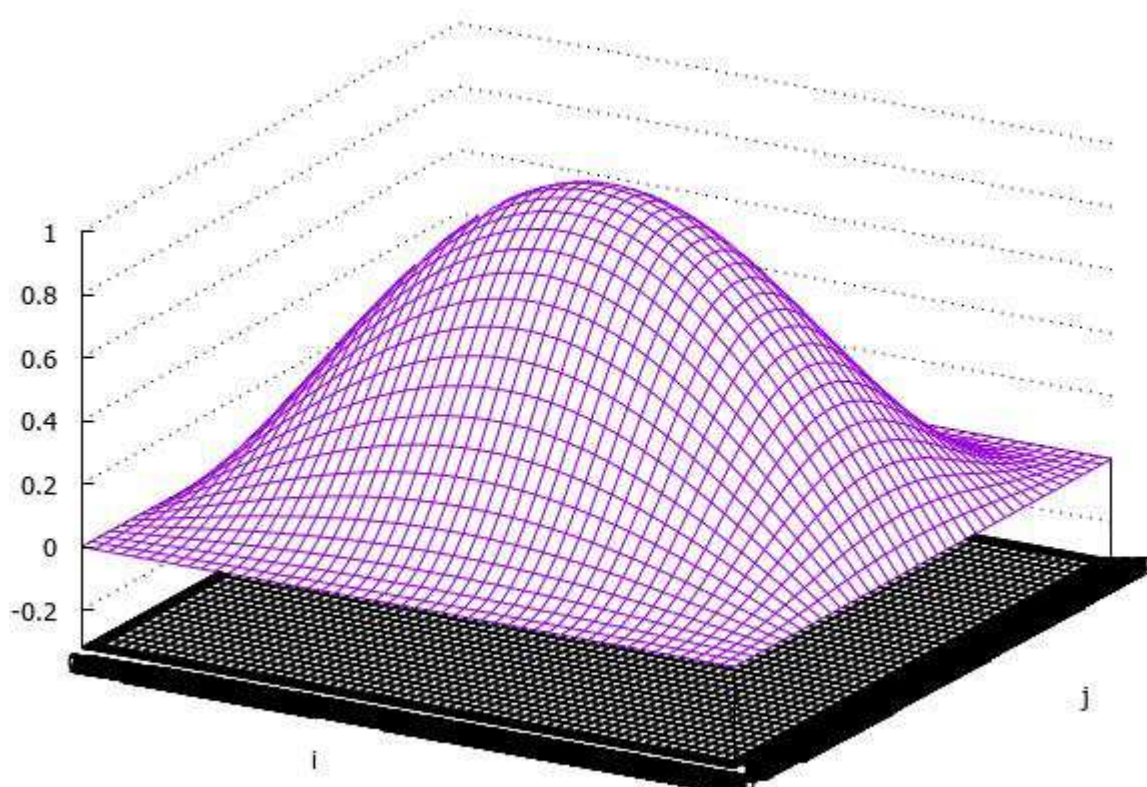


Рисунок 2.4.1 – Распределение сопротивлений ячеек электронной платы

Согласно алгоритму, компоненты (2.4.1) неизвестны, а входными данными для их определения являются суммы горизонтальных и вертикальных участков (2.4.2):

$$R_{v,i} = \sum_{j=1}^n r_{i,j}, R_{g,j} = \sum_{i=1}^n r_{i,j} \quad (2.4.2)$$

На языке Си# было разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм, описанный в пункте 2.3 для электрических плат любой размерности. Ниже будут проведены вычислительные эксперименты для плат разной размерности:  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  и  $10 \times 10$ .

#### **2.4.1 Эксперимент для электрической платы размерностью $5 \times 5$**

Предположим исходная плата была разбита на 25 ячеек. Распределение сопротивлений ячеек имеет вид, представленный на рисунке 2.4.1.1.

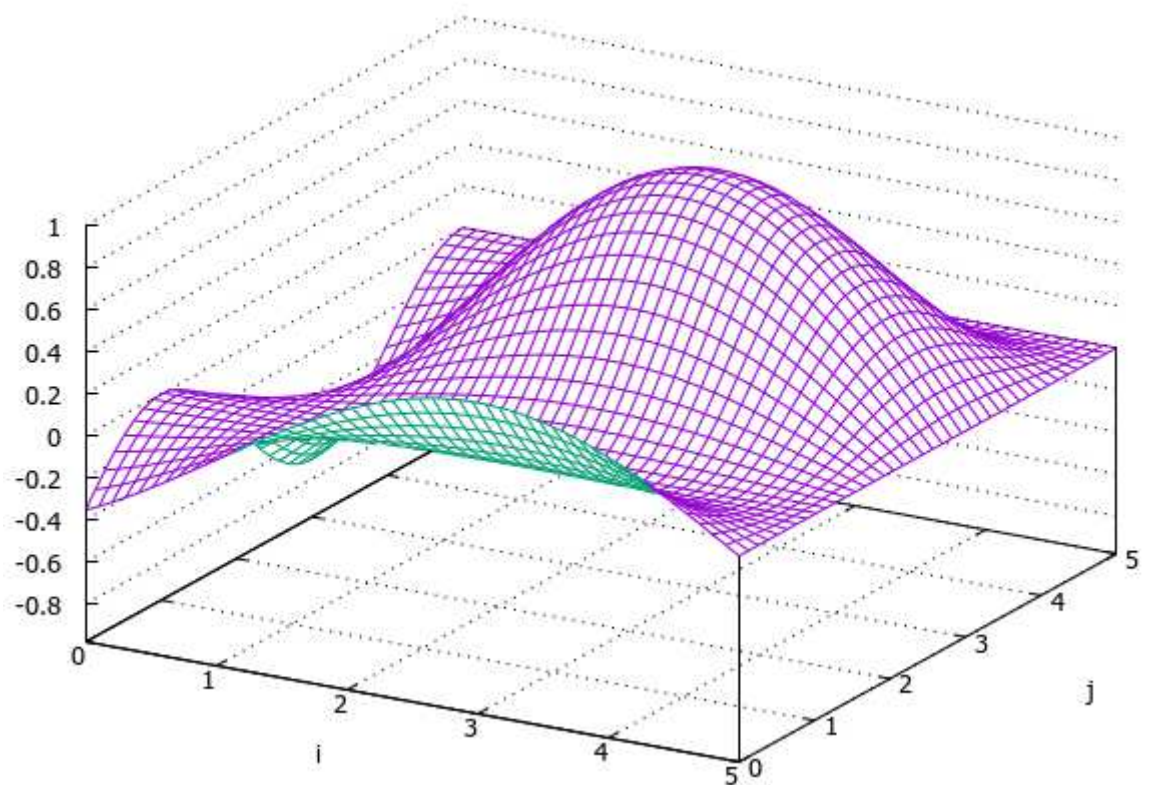


Рисунок 2.4.1.1 - Распределение сопротивлений ячеек электронной платы  
размерностью  $5 \times 5$  ячеек

В таблице 2.4.1.1 приведены численные значения этих сопротивлений для каждой ячейки.

Таблица 2.4.1.1 – Тестируемое распределение

$i \setminus j$	0	1	2	3	4	$\Sigma g$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,354	0,707	0,354	0	1,414
2	0	0,5	1	0,5	0	2
3	0	0,354	0,707	0,354	0	1,414
4	0	0	0	0	0	0
$\Sigma v$	0	1,207	2,414	1,207	0	

Ячейка с максимальным значением температуры находится в позиции (2,2). Матрица коэффициентов  $M$  при  $x_{i,j}$  представлена на рисунке 2.4.1.2.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4.1.2 – Матрица коэффициентов М

Матрица узловых коэффициентов А для платы размерностью  $5 \times 5$  показана на рисунке 2.4.1.3.

$$\begin{pmatrix} 40 & -26 & 4 & 0 & -26 & 16 & -2 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -26 & 44 & -26 & 4 & 16 & -28 & 16 & -2 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & -26 & 44 & -26 & -2 & 16 & -28 & 16 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & -26 & 40 & 0 & -2 & 16 & -26 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -26 & 16 & -2 & 0 & 44 & -28 & 4 & 0 & -26 & 16 & -2 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 \\ 16 & -28 & 16 & -2 & -28 & 48 & -28 & 4 & 16 & -28 & 16 & -2 & -2 & 4 & -2 & 0 \\ -2 & 16 & -28 & 16 & 4 & -28 & 48 & -28 & -2 & 16 & -28 & 16 & 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 16 & -26 & 0 & 4 & -28 & 44 & 0 & -2 & 16 & -26 & 0 & 0 & -2 & 4 \\ 4 & -2 & 0 & 0 & -26 & 16 & -2 & 0 & 44 & -28 & 4 & 0 & -26 & 16 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & 2 & 0 & 16 & -28 & 16 & -2 & -28 & 48 & -28 & 4 & 16 & -28 & 16 & -2 \\ 0 & -2 & 4 & -2 & -2 & 16 & -28 & 16 & 4 & -28 & 48 & -28 & -2 & 16 & -28 & 16 \\ 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & -2 & 16 & -26 & 0 & 4 & -28 & 44 & 0 & -2 & 16 & -26 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 & -26 & 16 & -2 & 0 & 40 & -26 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & 0 & 16 & -28 & 16 & -2 & -26 & 44 & -26 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & -2 & -2 & 16 & -28 & 16 & 4 & -26 & 44 & -26 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & -2 & 16 & -26 & 0 & 4 & -26 & 40 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4.1.3 – Матрица узловых коэффициентов

Вычисленные значения узлов  $\alpha_{i,j}$  приведены на рисунке 2.4.1.4.

$$\begin{pmatrix} 4,635 & 3,476 & 1,352 & 0,193 \\ 3,311 & 2,483 & 0,931 & 0,103 \\ 1,518 & 1,138 & 0,276 & -0,103 \\ 0,193 & 0,145 & -0,145 & -0,193 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4.1.4 – Вычисленные значения узлов

Результаты работы первого этапа алгоритма без использования метода множителей Лагранжа показаны в таблице 2.4.1.2.

Таблица 2.4.1.2 – Результаты работы первого этапа алгоритма

i\j	0	1	2	3	4
0	-0,193	0,048	0,29	0,048	-0,193
1	0,09	0,331	0,573	0,331	0,09
2	0,207	0,448	0,69	0,448	0,207
3	0,09	0,331	0,573	0,331	0,09
4	-0,193	0,048	0,29	0,048	-0,193

Как видно ячейка с значением максимального сопротивления определена верно, но полученный результат содержит отрицательные значения сопротивления, что противоречит самой природе, поэтому применим к полученному решению метод множителей Лагранжа.

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2.4.1.3.

Таблица 2.4.1.3 – Результаты работы алгоритма

i\j	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	0,347	0,72	0,347	0
2	0	0,513	0,975	0,513	0
3	0	0,347	0,72	0,347	0
4	0	0	0	0	0

После применению метода множителей Лагранжа отрицательные значения сопротивлений устранены, позиция ячейки с максимальной температурой (возможного перегрева) не изменилась. Рассчитаем относительную ошибку определения локального сопротивления  $\varepsilon$  по формуле (2.4.1.1):

$$\varepsilon = \frac{|x - \hat{x}|}{x} \cdot 100\%, \quad (2.4.1.1)$$

где  $x$  – сопротивление ячейки смоделированное;

$\hat{x}$  – полученное сопротивление ячейки.

Относительная ошибка определения локального сопротивления ячеек перегрева составила 2,524%.

#### **2.4.2 Эксперимент для электрической платы размерностью $7 \times 7$**

Разобьём электронную плату на 49 ячеек. Распределение сопротивлений ячеек имеет вид, представленный на рисунке 2.4.2.1.



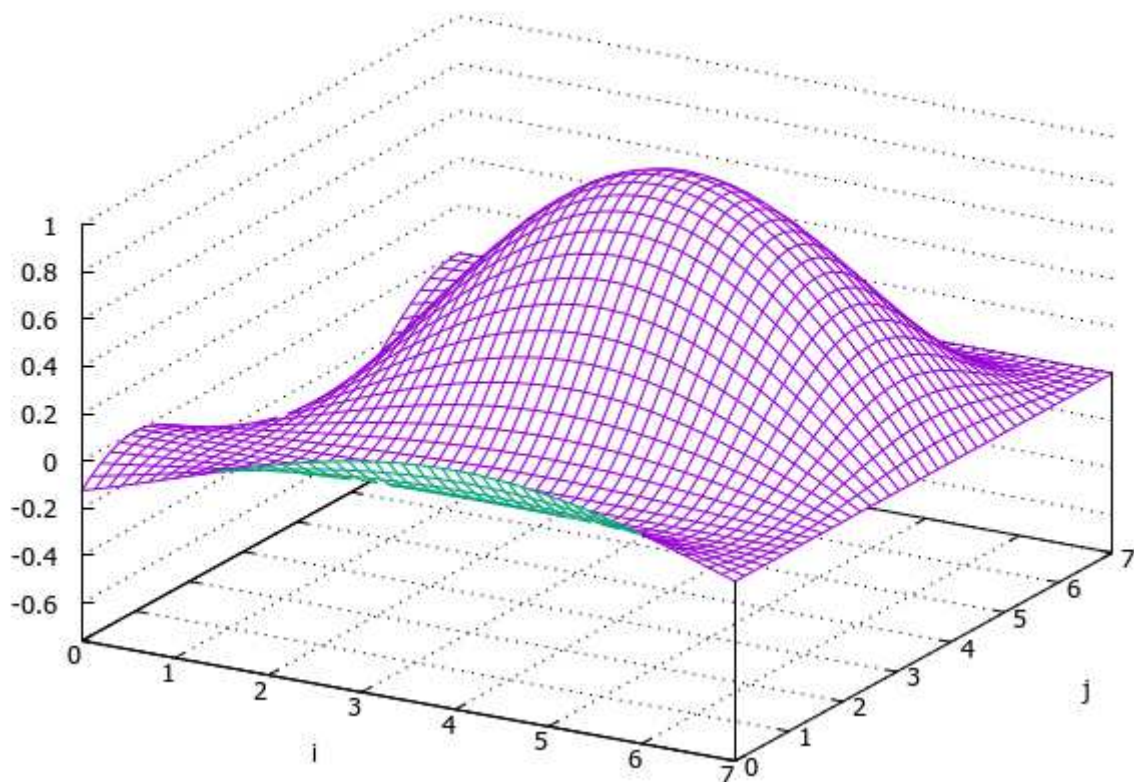


Рисунок 2.4.2.1 - Распределение сопротивлений ячеек электронной платы  
размерностью  $7 \times 7$  ячеек

В таблице 2.4.2.1 приведены численные значения этих сопротивлений для каждой ячейки.

Таблица 2.4.2.1 – Тестируемое распределение

$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6	$\Sigma g$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,125	0,375	0,5	0,375	0,125	0	1,5
2	0	0,217	0,65	0,866	0,65	0,217	0	2,598
3	0	0,25	0,75	1	0,75	0,25	0	3
4	0	0,217	0,65	0,866	0,65	0,217	0	2,598
5	0	0,125	0,375	0,5	0,375	0,125	0	1,5
6	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma v$	0	0,933	2,799	3,732	2,799	0,933	0	

Ячейка с максимальным значением температуры находится в позиции (3,3). Здесь не будет приводиться вид матрицы коэффициентов  $M$  и матрицы узловых коэффициентов  $A$  из-за их громоздкости для такого количества ячеек. Поэтому приведём сразу вычисленные значения узлов  $\alpha_{i,j}$ , которые показаны на рисунке 2.4.2.2.

$$\begin{pmatrix} 10,968 & 9,939 & 7,312 & 3,884 & 1,257 & 0,228 \\ 9,453 & 8,544 & 6,302 & 3,394 & 1,152 & 0,243 \\ 6,998 & 6,365 & 4,665 & 2,433 & 0,733 & 0,1 \\ 4,198 & 3,898 & 2,799 & 1,299 & 0,2 & -0,1 \\ 1,743 & 1,719 & 1,162 & 0,338 & -0,219 & -0,243 \\ 0,228 & 0,324 & 0,152 & -0,152 & -0,324 & -0,228 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4.2.2 - Вычисленные значения узлов

Результаты работы первого этапа алгоритма без использования метода множителей Лагранжа показаны в таблице 2.4.2.2.

Таблица 2.4.2.2 – Результаты работы первого этапа алгоритма

$i \setminus j$	0	1	2	3	4	5	6
0	-0,228	-0,095	0,171	0,305	0,171	-0,095	-0,228
1	-0,014	0,119	0,386	0,519	0,386	0,119	-0,014
2	0,143	0,276	0,543	0,676	0,543	0,276	0,143
3	0,2	0,333	0,6	0,733	0,6	0,333	0,2
4	0,143	0,276	0,543	0,676	0,543	0,276	0,143
5	-0,014	0,119	0,386	0,519	0,386	0,119	-0,014
6	-0,228	-0,095	0,171	0,305	0,171	-0,095	-0,228

Как видно ячейка с значением максимального сопротивления определена верно, но полученный результат содержит отрицательные значения

сопротивления, что противоречит самой природе, поэтому применим к полученному решению метод множителей Лагранжа.

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2.4.2.3.

Таблица 2.4.2.3 – Результаты работы алгоритма

$ij$	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,098	0,385	0,534	0,385	0,098	0
2	0	0,228	0,645	0,852	0,645	0,228	0
3	0	0,281	0,738	0,961	0,738	0,281	0
4	0	0,228	0,645	0,852	0,645	0,228	0
5	0	0,098	0,385	0,534	0,385	0,098	0
6	0	0	0	0	0	0	0

После применению метода множителей Лагранжа отрицательные значения сопротивлений устранены, позиция ячейки с максимальной температурой (возможного перегрева) не изменилась. Относительная ошибка определения локального сопротивления ячеек перегрева составила 3,874%.

### 2.4.3 Эксперимент для электрической платы размерностью 10 × 10

Разобьём электронную плату на 100 ячеек. Распределение сопротивлений ячеек имеет вид, представленный на рисунке 2.4.3.1.

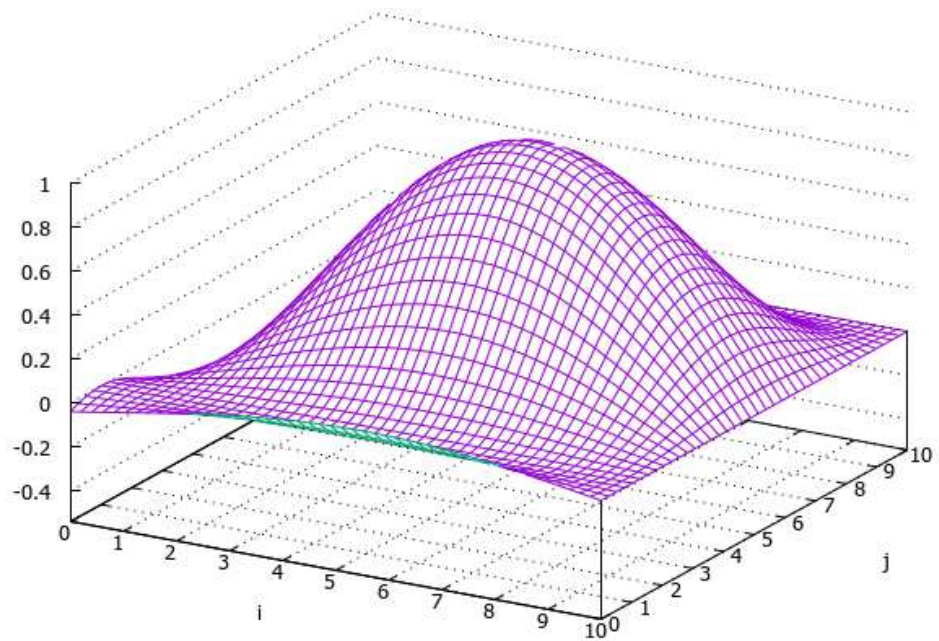


Рисунок 2.4.3.1 - Распределение сопротивлений ячеек электронной платы  
размерностью 10 × 10 ячеек

В таблице 2.4.3.1 приведены численные значения этих сопротивлений для каждой ячейки.

Таблица 2.4.3.1 – Тестируемое распределение

i\j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\Sigma g$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,04	0,141	0,257	0,332	0,332	0,257	0,141	0,04	0	1,539
2	0	0,075	0,266	0,482	0,623	0,623	0,482	0,266	0,075	0	2,893
3	0	0,101	0,358	0,65	0,84	0,84	0,65	0,358	0,101	0	3,897
4	0	0,115	0,407	0,739	0,955	0,955	0,739	0,407	0,115	0	4,432
5	0	0,115	0,407	0,739	0,955	0,955	0,739	0,407	0,115	0	4,432
6	0	0,101	0,358	0,65	0,84	0,84	0,65	0,358	0,101	0	3,897
7	0	0,075	0,266	0,482	0,623	0,623	0,482	0,266	0,075	0	2,893
8	0	0,04	0,141	0,257	0,332	0,332	0,257	0,141	0,04	0	1,539
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma v$	0	0,663	2,343	4,253	5,5	5,5	4,253	2,343	0,663	0	

Ячейки с максимальным значением температуры находятся в позиции (4,4); (4,5); (5,4); (5,5). Здесь не будет приводиться вид матрицы коэффициентов  $M$ , матрицы узловых коэффициентов  $A$  и матрицы вычисленных значений узлов  $\alpha_{i,j}$  из-за их громоздкости для такого количества ячеек.

Результаты работы первого этапа алгоритма без использования метода множителей Лагранжа показаны в таблице 2.4.3.2.

Таблица 2.4.3.2 – Результаты работы первого этапа алгоритма

i\j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-0,255	-0,189	-0,021	0,17	0,295	0,295	0,17	-0,021	-0,189	-0,255
1	-0,101	-0,035	0,133	0,324	0,449	0,449	0,324	0,133	-0,035	-0,101
2	0,034	0,1	0,268	0,459	0,584	0,584	0,459	0,268	0,1	0,034
3	0,135	0,201	0,369	0,56	0,685	0,685	0,56	0,369	0,201	0,135
4	0,188	0,254	0,422	0,613	0,738	0,738	0,613	0,422	0,254	0,188
5	0,188	0,254	0,422	0,613	0,738	0,738	0,613	0,422	0,254	0,188
6	0,135	0,201	0,369	0,56	0,685	0,685	0,56	0,369	0,201	0,135
7	0,034	0,1	0,268	0,459	0,584	0,584	0,459	0,268	0,1	0,034
8	-0,101	-0,035	0,133	0,324	0,449	0,449	0,324	0,133	-0,035	-0,101
9	-0,255	-0,189	-0,021	0,17	0,295	0,295	0,17	-0,021	-0,189	-0,255

Как видно ячейки со значениями максимального сопротивления определены верно, но полученный результат содержит отрицательные значения сопротивления, что противоречит самой природе, поэтому применим к полученному решению метод множителей Лагранжа.

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2.4.3.3.

Таблица 2.4.3.3 – Результаты работы алгоритма

i\j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0,003	0,122	0,272	0,372	0,372	0,272	0,122	0,003	0
2	0	0,06	0,257	0,488	0,641	0,641	0,488	0,257	0,06	0
3	0	0,118	0,366	0,643	0,822	0,822	0,643	0,366	0,118	0
4	0	0,151	0,426	0,724	0,915	0,915	0,724	0,426	0,151	0
5	0	0,151	0,426	0,724	0,915	0,915	0,724	0,426	0,151	0
6	0	0,118	0,366	0,643	0,822	0,822	0,643	0,366	0,118	0
7	0	0,06	0,257	0,488	0,641	0,641	0,488	0,257	0,06	0
8	0	0,003	0,122	0,272	0,372	0,372	0,272	0,122	0,003	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

После применению метода множителей Лагранжа отрицательные значения сопротивлений устранены, позиции ячеек с максимальной температурой (возможного перегрева) не изменились. Относительная ошибка определения локального сопротивления ячеек перегрева составила 4,179%.

## Вывод к главе 2

В результате написания второй главы был разработан и исследован численный метод анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат, работающий с определённой точностью.

Сформулированный алгоритм работает с приращениями сопротивлений, которые линейно зависимы от измеряемых приращений падения напряжения на сегментах цепи. Что позволяет оценивать как положительные приращения всех сопротивлений, так и отрицательные, это даёт возможность решать другую задачу обнаружения дефектов: определение неработающего элемента платы. Здесь отсутствие рассеяния мощности на неработающем элементе приводит к отрицательному приращению температур по сравнению со штатной ситуацией и, следовательно, к отрицательному приращению сопротивлений платы. Умножая приращения правой части на  $-1$ , приходим к сформулированному ранее алгоритму с неотрицательными решениями, но уже для локализации неработающих узлов.

### **3 Алгоритм обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов**

#### **3.1 Постановка задачи**

В настоящее время вес систем терморегулирования КА достигает около 30% веса всего аппарата. Для вывода на орбиту или в космическое пространство каждого килограмма полезного веса необходимо затратить огромное количество топлива. Жёсткие весовые ограничения заставляют конструкторов уменьшать или совсем отказываться от дополнительных хладо- и термопроизводительных запасов. Что в свою очередь может привести к тому, что самые незначительные ошибки в расчётах тепловых режимов КА ставят под угрозу выполнение поставленной задачи. Снижение веса терморегулирующих систем, а в частности систем измерения температуры отдельных участков КА и обнаружения перегрева или переохлаждения отдельных элементов бортовой РЭА, позволяет снизить энергетические затраты на преодоление земной гравитации и выход в открытый космос, которые приводят к уменьшению веса КА, что опять же позволяет уменьшить объём хранилища топлива или улучшить одну из других систем аппарата. Одним из способов снижения веса системы терморегулирования является минимизация дополнительного оборудования (переключателей, источников тока, измерителей напряжения и др.) систем измерения температуры.

Также большое количество соединительных проводов приводит к возникновению сложностей в реализации измерительной системы КА. Поэтому использование измерительных сетей с небольшим количеством проводов для температурного анализа исследуемых объектов нашло широкое применение в экстремальных и агрессивных средах. В таких сетях одно измерение для анализа большого объёма данных чаще всего компенсируется динамической вариацией источника питания и использование компьютерных алгоритмов для последующей обработки данных.



В работе показана измерительная сеть температуры с тремя соединительными проводами, источником постоянного напряжения и источником пилообразного сигнала. Измерение тока осуществляется только в одном из проводов при помощи амперметра. Для расчёта температур требуемых элементов КА используется разработанный компьютерный алгоритм обработки полученной информации, основанный на зависимости текущего сопротивления терморезистора от его температуры. Источник пилообразного сигнала предназначен для создания различных режимов питания, приводящих к переключению состояния измерительной сети при помощи перехода некоторых диодов из закрытого состояния в открытое. Полученные на основе работы алгоритма значения температуры можно считать вычисленными с определённой точностью или использовать их в качестве начального приближения для дальнейшего уточнения при неудовлетворении требуемой точности.

### 3.2 Математическая модель

Рассмотрим измерительную схему, показанную на рисунке 3.2.1. Постоянное напряжение  $E_1$  является опорным и поддаётся на сеть делителей напряжения, состоящую из резисторов  $R_0, R_1, \dots, R_n$ . Пилообразное напряжение  $E_2$  изменяется в промежутке от 0 до  $E_1$  и подаётся на общий контакт  $n$  пар диод-терморезистор  $D_1 + T_1, D_2 + T_2, \dots, D_n + T_n$ , подключенных между соседними делителями напряжения.

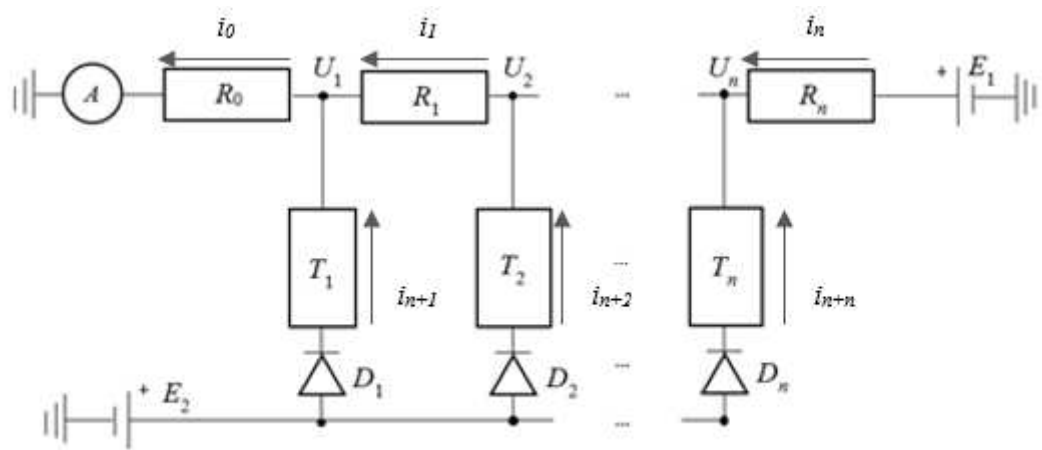


Рисунок 3.2.1 – Измерительная схема

Искомыми величинами являются значения сопротивлений терморезисторов  $T_1, T_2, \dots, T_n$ . Терморезисторы прикреплены некоторым способом на элементы, температуру которых необходимо измерить. Так как значение температуры терморезистора прямо пропорциональна его текущему сопротивлению, то зная сопротивление можно по графику зависимости найти искомую температуру. Для определения  $T_1, T_2, \dots, T_n$  используются заданные значения  $E_1, E_2$  и измеряемый по показаниям амперметра  $A$  ток  $I$ . Амперметр возможно заменить на вольтметр, с помощью которого измеряется падение напряжения на резисторе  $R_0$ .

Геометрическая реализация схемы представляет собой компактного последовательного расположения троек  $D_i + T_i + R_i$ , которые соединены с двумя проводами по всей длине, площади или объёму исследуемого объекта. Третий провод предназначен для подачи опорного напряжения в конце измерительной сети.

Считается, что применяются идеальные диоды, то есть диоды, сопротивление которых в закрытом состоянии стремится к бесконечности, а в открытом приблизительно равно нулю, также не учитывается время открытия диода, предполагается, что открытие происходит мгновенно и напряжение открытия равно 0. В начальный момент времени значение пилообразного напряжения  $E_2$  равно 0, следовательно, все диоды закрыты, в этот момент можно

посчитать токи  $i_0, i_1$ . Далее  $E_2$  начинает увеличиваться, и в определенный момент ближайший к резистору  $R_0$  диод открывается. По первому закону Кирхгофа рассчитывается ток, протекающий через этот диод и терморезистор, подключённый к нему, и находится сопротивление данного терморезистора. На следующем этапе значение пилообразного напряжения достигает значения, при котором открывается следующий диод. Так как температура первого терморезистора за такой короткий промежуток времени не могла сильно измениться, то и его сопротивление тоже, значит используем значение этого сопротивления для расчёта сопротивления второго терморезистора. Таким образом вычисляем все необходимые значения сопротивлений терморезисторов.

### 3.3 Алгоритм расчёта сопротивлений терморезисторов

Обозначим численные значения сопротивлений резисторов  $R_i$ , диодов  $D_i$  и терморезисторов  $T_i$  также, как и элементы измерительной схемы. Зафиксируем напряжения  $E_1, E_2$  и эти сопротивления и выпишем первый закон Кирхгофа для токов в узлах  $k = 1, 2, \dots, n$  и потенциалами  $U_1, U_2, \dots, U_n$ . Получим систему (3.3.1):

$$\begin{cases} -i_0 + i_1 + i_{n+1} = 0, \\ -i_1 + i_2 + i_{n+2} = 0, \\ \dots \\ -i_{n-1} + i_n + i_{2n} = 0. \end{cases} \quad (3.3.1)$$

Ток, который входит в узел  $k$  со стороны  $k + 1$  узла, обозначим через  $i_k$ , а ток, который входит со стороны  $k$ -ой измерительной пары  $D_i + T_i$ , как  $i_{n+k}$ . Выходящий из  $k$ -го узла ток будет обозначаться  $i_{k-1}$  и писаться со знаком «-». Ток  $i_0$  выходит из первого узла в сторону заземления. Выбор знаков осуществляется по правилу Кирхгофа: входящие в узел со знаком «+», выходящие - со знаком «-»; и поясняется на рисунке 3.2.1. Выпишем закон Ома для каждого тока (3.3.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0 = \frac{U_1}{R_0}, \\ i_1 = \frac{U_2 - U_1}{R_1}, \\ \dots \\ i_k = \frac{U_{k+1} - U_k}{R_k}, \\ \dots \\ i_{n-1} = \frac{U_n - U_{n-1}}{R_{n-1}}, \\ i_n = \frac{E_1 - U_n}{R_n}, \\ i_{n+1} = \frac{E_2 - U_1}{T_1 + D_1}, \\ \dots \\ i_{n+k} = \frac{E_2 - U_k}{T_k + D_k}, \\ \dots \\ i_{2n} = \frac{E_2 - U_n}{T_n + D_n}, \end{array} \right. \quad (3.3.2)$$

где  $U_k$  – потенциал в  $k$ -ом узле;

$R_k$  – резистор, подключенный между  $k$ -ым и  $k + 1$  узлами;

$T_k + D_k$  – пара терморезистор и диод, входящих в  $k$ -ый узел.

Заменим токи в (3.3.1) значениями из (3.3.2). Результат этих действий показан в системе (3.3.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{U_1}{R_0} + \frac{U_2 - U_1}{R_1} + \frac{E_2 - U_1}{T_1 + D_1} = 0, \\ -\frac{U_2 - U_1}{R_1} + \frac{U_3 - U_2}{R_2} + \frac{E_2 - U_2}{T_2 + D_2} = 0, \\ \dots \\ -\frac{U_n - U_{n-1}}{R_{n-1}} + \frac{E_1 - U_n}{R_n} + \frac{E_2 - U_n}{T_n + D_n} = 0. \end{array} \right. \quad (3.3.3)$$

Приведём подобные члены и перенесём источники напряжения в правую часть (3.3.4):

$$\begin{cases} U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1 + D_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1} = E_2 \frac{1}{T_1 + D_1}, \\ U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{T_2 + D_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_2 + D_2}, \\ \dots \\ U_n \left( \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{T_n + D_n} \right) - U_{n-1} \frac{1}{R_{n-1}} = E_2 \frac{1}{T_n + D_n} + E_1 \frac{1}{R_n}. \end{cases} \quad (3.3.4)$$

В результате имеем систему линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей для вычисления неизвестных  $U_2, U_3, \dots, U_n$ . Матрица является неразложимой, имеет диагональное преобладание, особенно ярко выраженное в первой и последней строке, невырожденная и при любых положительных  $E_1, E_2$  потенциалы  $U_i$  также будут положительными.

Таким образом все уравнения системы (3.3.4), кроме последнего, можно записать в общей форме (3.3.5):

$$U_k \left( \frac{1}{R_{k-1}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{T_k + D_k} \right) - U_{k-1} \frac{1}{R_{k-1}} - U_{k+1} \frac{1}{R_k} = E_2 \frac{1}{T_k + D_k} \quad (3.3.5)$$

Покажем основную идею работы алгоритма на измерительной схеме, состоящей из трёх терморезисторов (рисунок 3.3.1).

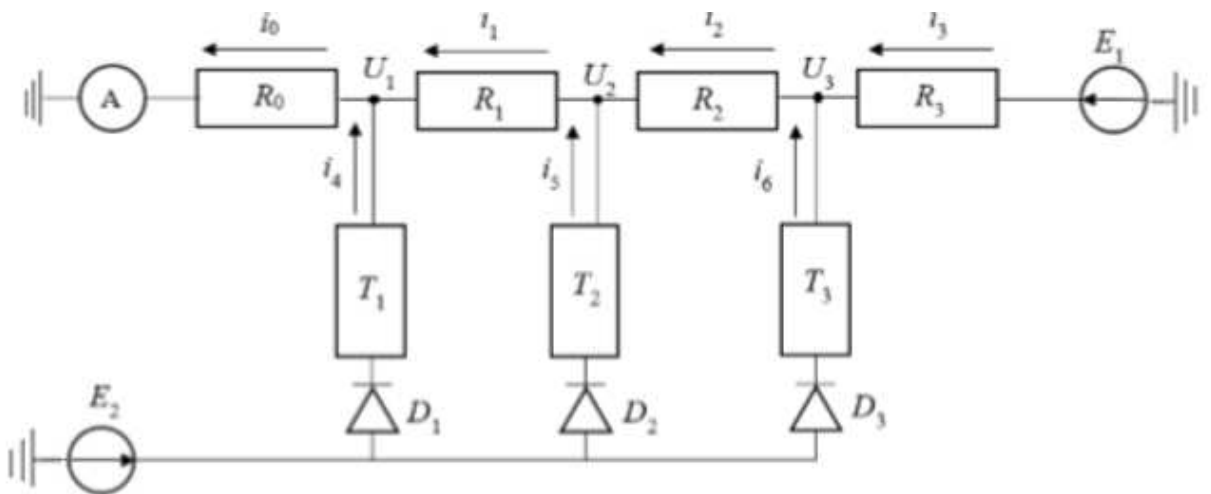


Рисунок 3.3.1 – Измерительная схема для трёх терморезисторов

Обозначим через  $i$  ток, который протекает только через делители напряжения (3.3.6):

$$i = \frac{E_1}{R_0 + R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.3.6)$$

При изменении пилообразного напряжения  $E_2$  имеем 4 варианта протекания токов через измерительную схему:

- если  $E_2 < U_1$ . В этом случае получается, что  $E_2 < U_2$  и  $E_2 < U_3$ . То есть все диоды закрыты и через амперметр пройдет ток, вычисляемый по формуле (3.3.7):

$$i - i_{обр4} - i_{обр5} - i_{обр6} = I_1 \quad (3.3.7)$$

- если  $U_2 > E_2 \geq U_1$ , значит и  $E_2 < U_3$ . Тогда ток, протекаемый через амперметр будет равен (3.3.8):

$$i + i_{обр4} - i_{обр5} - i_{обр6} = I_2 \quad (3.3.8)$$

- если  $U_3 > E_2 \geq U_2$ , значит и  $E_2 > U_1$ . Через амперметр протекает ток (3.3.9):

$$i + i_{обр4} + i_{обр5} - i_{обр6} = I_3 \quad (3.3.9)$$

- если  $E_2 \geq U_3$ , тогда  $E_2 > U_2 > U_1$ . Ток равен (3.3.10):

$$i + i_{обр4} + i_{обр5} + i_{обр6} = I_4 \quad (3.3.10)$$

Получаем систему линейных алгебраических уравнений (3.3.11):

$$\begin{cases} i - i_{\text{обр}4} - i_{\text{обр}5} - i_{\text{обр}6} = I_1, \\ i + i_{\text{обр}4} - i_{\text{обр}5} - i_{\text{обр}6} = I_2, \\ i + i_{\text{обр}4} + i_{\text{обр}5} - i_{\text{обр}6} = I_3, \\ i + i_{\text{обр}4} + i_{\text{обр}5} + i_{\text{обр}6} = I_4. \end{cases} \quad (3.3.11)$$

Матрица коэффициентов системы (3.3.11) выглядит следующим образом (рисунок 3.3.2).

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.3.2 – Матрица коэффициентов токов

Определитель этой матрицы равен 8, это говорит о том, что система (3.3.11) невырожденная и имеет единственное решение. На основе этих выводов можно с уверенностью сказать, что последовательное определение токов, проходящих через терморезисторы при закрытых и открытых состояниях возможно.

Запишем первый закон Кирхгофа для узлов измерительной схемы. Получается система уравнений (3.3.12):

$$\begin{cases} i_1 + i_4 - i_0 = 0, \\ i_5 + i_2 - i_1 = 0, \\ i_6 + i_3 - i_2 = 0. \end{cases} \quad (3.3.12)$$

По закону Ома выразим эти токи (3.3.13):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0 = \frac{U_1}{R_0}, \\ i_1 = \frac{U_2 - U_1}{R_1}, \\ i_2 = \frac{U_3 - U_2}{R_2}, \\ i_3 = \frac{E_1 - U_3}{R_3}, \\ i_4 = \frac{E_2 - U_1}{T_1 + D_1}, \\ i_5 = \frac{E_2 - U_2}{T_2 + D_2}, \\ i_6 = \frac{E_2 - U_3}{T_3 + D_3}. \end{array} \right. \quad (3.3.13)$$

Подставим выраженные в (3.3.13) значения в (3.3.12) и приведём подобные. Получим систему уравнений (3.3.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1 + D_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1} = E_2 \frac{1}{T_1 + D_1}, \\ U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{T_2 + D_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_2 + D_2}, \\ U_3 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{T_3 + D_3} \right) - U_2 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_3 + D_3} + E_1 \frac{1}{R_3}. \end{array} \right. \quad (3.3.14)$$

Как уже говорилось выше рассмотрим идеальные диоды, сопротивление которых в открытом состоянии равно нулю, а в закрытом -  $\infty$ . Тогда система (3.3.14) примет вид (3.3.15):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1} = E_2 \frac{1}{T_1}, \\ U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{T_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_2}, \\ U_3 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{T_3} \right) - U_2 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_3} + E_1 \frac{1}{R_3}. \end{array} \right. \quad (3.3.15)$$



Трёхдиагональная матрица системы (3.3.15) приведена в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Трёхдиагональна матрица

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	=
$U_1$	$\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1}$	$-\frac{1}{R_1}$	0	$E_2 \frac{1}{T_1}$
$U_2$	$-\frac{1}{R_1}$	$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{T_2}$	$-\frac{1}{R_2}$	$E_2 \frac{1}{T_2}$
$U_3$	0	$-\frac{1}{R_3}$	$\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{T_3}$	$E_2 \frac{1}{T_3} + E_1 \frac{1}{R_3}$

При закрытых диодах  $D_2$  и  $D_3$  система (3.3.15) трансформируется в (3.3.16):

$$\begin{cases} U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1} = E_2 \frac{1}{T_1}, \\ U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2} = 0, \\ U_3 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - U_2 \frac{1}{R_2} = E_1 \frac{1}{R_3}. \end{cases} \quad (3.3.16)$$

Выразим из (3.3.16) интересующее нас значение сопротивления первого терморезистора (3.3.17):

$$T_1 = \frac{E_2 - U_1}{U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1}} \quad (3.3.17)$$

В этом уравнении  $U_1$  известно, так как является измеренным потенциалом – падением напряжения на резисторе  $R_0$ . Получается, что в этом уравнении имеем 2 неизвестных: искомое сопротивление  $T_1$  и потенциал  $U_2$ . Так как при закрытых диодах  $D_2$  и  $D_3$  ток через эти диоды не идёт, то  $U_2$  можно определить с помощью делителя напряжения между потенциалами  $E_1$  и  $U_1$  (3.3.18):

$$U_2 = \frac{R_1(E_1 - U_1)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.3.18)$$

Подставив это значение в (3.3.17) однозначно определяем сопротивление первого терморезистора  $T_1$ .

При открытых диодах  $D_1$  и  $D_2$  система (3.3.15) трансформируется к виду (3.3.19):

$$\begin{cases} U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1} \right) - U_2 \frac{1}{R_1} = E_2 \frac{1}{T_1}, \\ U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{T_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2} = E_2 \frac{1}{T_2}, \\ U_3 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - U_2 \frac{1}{R_2} = E_1 \frac{1}{R_3}. \end{cases} \quad (3.3.19)$$

Из второго уравнения выражаем сопротивление второго терморезистора  $T_2$  (3.3.20):

$$T_2 = \frac{E_2 - U_2}{U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - U_1 \frac{1}{R_1} - U_3 \frac{1}{R_2}} \quad (3.3.20)$$

Измеряется новое значение  $U_1$ , для расчёта  $U_2$  используем, найденное на предыдущем этапе алгоритма, сопротивление первого терморезистора  $T_1$  по формуле (3.3.21):

$$U_2 = R_1 U_1 \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_1} \right) - E_2 \frac{R_1}{T_1} \quad (3.3.21)$$

Так как ток не проходит через диод  $D_3$ , то потенциал  $U_3$  можно найти делителем напряжения между потенциалами  $E_1$  и  $U_2$  (3.3.22):

$$U_3 = \frac{(E_1 - U_2)R_2}{R_2 + R_3} \quad (3.3.22)$$

Подставляем, найденные величины в (3.3.21) и (3.3.22) в (3.3.20) и определяем сопротивление второго терморезистора  $T_2$ .

При открытии диода  $D_3$  из системы (3.3.15) можно выразить сопротивление последнего терморезистора  $T_3$  (2.2.23):

$$T_3 = \frac{E_2 - U_3}{U_3 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - U_2 \frac{1}{R_2} - E_1 \frac{1}{R_3}}. \quad (3.3.23)$$

Так как сопротивления терморезисторов  $T_1$  и  $T_2$  уже определены, то  $U_2$  вычисляем по формуле (3.3.21), а  $U_3$  из второго уравнения. Получаем (3.3.24):

$$U_3 = R_2 U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{R_2} \right) - U_1 \frac{R_2}{R_1} - E_2 \frac{R_2}{T_2} \quad (3.3.24)$$

Подставляем найденные значения в формулу (3.3.23) и вычисляем значение сопротивления последнего терморезистора  $T_3$ .

Далее сопротивления терморезисторов по известной зависимости переводятся в температуру. Цель работы алгоритма достигнута.

При большем числе троек  $D_k + T_k + R_k$  расчёт  $T_k$  осуществляется аналогично по нарастанию индекса  $k$  для открытия диода  $D_k$ . К этому моменту уже вычислены  $T_1, \dots, T_{k-1}$ .

Для проверки работы алгоритма использовался метод, который с хорошей точностью работает с трёхдиагональными матрицами); - метод прогонки.

### 3.3.1 Метод прогонки

Впервые о методе прогонки или алгоритме Томаса заговорили в начале 1952 года. Он был предложен независимо учёными из разных стран. В СССР метод открыли И.М. Гельфанд, О.В. Локуцевский, В.С. Владимиров, А.С. Крондорд, также установивших устойчивость алгоритма и использовавших его для решения сложных задач [33].

Под прогонкой понимается модифицированный метод Гаусса. Он является простым и эффективным инструментом для решения систем линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей (рисунок 3.3.1.1).

$$\begin{array}{rcl} b_1 x_1 + c_1 x_2 & & = d_1, \\ a_2 x_1 + b_2 x_2 + c_2 x_3 & & = d_2, \\ \dots & & \dots \\ a_i x_{i-1} + b_i x_i + c_i x_{i+1} & & = d_i, \\ \dots & & \dots \\ a_{m-1} x_{m-2} + b_{m-1} x_{m-1} + c_{m-1} x_m & & = d_{m-1}, \\ & a_m x_{m-1} + b_m x_m & = d_m. \end{array}$$

Рисунок 3.3.1.1 – Общий вид трёхдиагональной матрицы

Такие системы нередко возникают при решении различных вычислительных задач математической физики: приближение функций сплайнами или численное решение краевых задач для дифференциальных уравнений. На главной диагонали матрицы этой системы стоят элементы  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , над ней – элементы  $c_1, c_2, \dots, c_{n-1}$  под ней – элементы  $a_2, a_3, \dots, a_n$  (обычно коэффициенты главной диагонали  $b_i$  не равны нулю). Все остальные элементы матрицы равны нулю. Метод прогонки проявляет слабую чувствительность как к погрешностям вычислительного характера, так и к погрешностям задания начальных условий.

Метод прогонки состоит из двух этапов – прямой прогонки (аналог прямого хода метода Гаусса) и обратной прогонки (аналог обратного хода метода Гаусса).

Преобразуем первое уравнение системы (рисунок 1) к виду (3.3.1.1):

$$x_1 = \alpha_1 x_2 + \beta_1, \quad (3.3.1.1)$$

где  $\alpha_1 = -\frac{c_1}{b_1}, \beta_1 = \frac{d_1}{b_1}$ .

Полученное выражение для  $x_1$  подставим во второе уравнение системы (3.3.1.2):

$$a_2(\alpha_1 x_2 + \beta_1) + b_2 x_2 + c_2 x_3 = d_2 \quad (3.3.1.2)$$

Преобразуем полученное уравнение к виду (3.3.1.1):

$$x_2 = \alpha_2 x_3 + \beta_2, \quad (3.3.1.3)$$

где  $\alpha_2 = -\frac{c_2}{b_2 + a_2 \alpha_1}, \beta_2 = \frac{d_2 - a_2 \beta_1}{b_2 + a_2 \alpha_1}$ .

Выражение (3.3.1.3) подставим в третье уравнение системы и так далее.

Таким образом, на  $i$ -ом шаге ( $1 < i < m$ )  $i$ -ое уравнение системы преобразуется к виду (3.3.1.4):

$$x_i = \alpha_i x_{i+1} + \beta_i, \quad (3.3.1.4)$$

где  $\alpha_i = -\frac{c_i}{b_i + a_i \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{d_i - a_i \beta_{i-1}}{b_i + a_i \alpha_{i-1}}$ .

На  $m$ -ом шаге подстановка в последнее уравнение системы выражения (3.3.1.5):

$$x_{m-1} = \alpha_{m-1}x_m + \beta_{m-1} \quad (3.3.1.5)$$

Даёт (3.3.1.6):

$$\alpha_m(\alpha_{m-1}x_m + \beta_{m-1}) + b_mx_m = d_m \quad (3.3.1.6)$$

Из уравнения (3.3.1.6) находим  $x_m$ :

$$x_m = \beta_m = \frac{d_m - a_m\beta_{m-1}}{b_m + a_m\alpha_{m-1}} \quad (3.3.1.7)$$

Значения оставшихся  $x_i$   $i = m - 1, m - 2, \dots, 1$  вычисляются по формуле (3.3.1.4).

Вышеизложенные преобразования необходимы для вычисления метода прогонки в 2 этапа.

Прямая прогонка состоит в вычислении прогоночных коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ). Если  $i = 1$ , то коэффициенты рассчитываются по формулам (3.3.1.8):

$$\alpha_1 = -\frac{c_1}{\gamma_1}, \beta_1 = \frac{d_1}{\gamma_1}, \gamma_1 = b_1 \quad (3.3.1.8)$$

При  $1 < i \leq m - 1$  - по рекуррентным формулам (3.3.1.9):

$$\alpha_i = -\frac{c_i}{\gamma_i}, \beta_i = \frac{d_i - a_i\beta_{i-1}}{\gamma_i}, \gamma_i = b_i + a_i\alpha_{i-1} \quad (3.3.1.9)$$

А при  $i = m$  вычисляется  $\beta_m$  и прямая прогонка завершается:

$$\beta_m = \frac{d_m - a_m\beta_{m-1}}{\gamma_m}, \gamma_m = b_m + a_m\alpha_{m-1} \quad (3.3.1.10)$$

Обратная прогонка заключается в нахождении неизвестных. Полагают  $x_m = \beta_m$ . Остальные неизвестные вычисляются по формуле (3.3.1.4):

$$x_i = \alpha_i x_{i+1} + \beta_i, i = m - 1, m - 2, \dots, 1 \quad (3.3.1.4)$$

Вычисления ведутся в порядке убывания значений  $i$ .

Анализ метода показывает, что для реализации вычислений по формулам (3.3.1.8), (3.3.1.9), (3.3.1.10) и (3.3.1.4) необходимо  $8m$  арифметических операций, а в методе Гаусса это число составляет  $\frac{2}{3}m^3$ . Также стоит заметить, что при трёхдиагональной структуре матрицы системы для её хранения используются  $3m - 2$  ячейки памяти.

Таким образом, очевидно, что при равных значениях производительности и оперативной памяти ЭВМ метод прогонки позволяет решать системы гораздо большей размерности, чем метод Гаусса.

Более подробно метод прогонки, а также его вариации, представлены в работах [34] и [35].

### 3.4 Вычислительный эксперимент

Рассмотрим модельные задачи с идеальными диодами и различными исходными данными для проверки работы алгоритма, а также в заключении сравним результаты с данными, полученными с измерительной схемы, собранной в лабораторных условиях. Сопротивления, как резисторов, так и терморезисторов могут принимать любые значения от очень маленьких  $10^{-2}$  Ом до очень больших  $10^9$  Ом, всё зависит от целей, преследуемых учёными. Поэтому в работе рассматриваются различные значения сопротивлений для проверки работы алгоритма. Алгоритм был запрограммирован на языке C# в Visual Studio.

#### 3.4.1 Одинаковые значения сопротивлений резисторов и терморезисторов

Исходные значения приведены в таблице 3.4.1.1:

Таблица 3.4.1.1 – Исходные данные схемы

Величина	Значение
$R_0$	600 Ом
$R_1$	600 Ом
$R_2$	600 Ом
$R_3$	600 Ом
$T_1$	1000 Ом
$T_2$	1000 Ом
$T_3$	1000 Ом
$E_1$	5 В

Для расчёта параметров цепи использовался алгоритм, описанный в пункте 3.3. В тестовых расчетах использовались идеальные диоды: у открытого диода сопротивление равно нулю, а у закрытого – проводимость равна нулю. Стоит



заметить, что эти условия плохо выполняются при незначительном падении напряжения на реальном диоде. Следовательно, при измерениях следует избегать ситуаций, близких к точкам переключения диодов.

Пилообразное напряжение  $E_2$  изменялось в интервале от 0 до 5В с шагом 0,1. Полученные значения приведены в таблицах 3.4.1.2 – 3.4.1.5.

Таблица 3.4.1.2 – Часть измерений, когда диоды находятся в закрытом состоянии

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
1	1,25	2,5	3,75	0,2
2	1,25	2,5	3,75	0,3
3	1,25	2,5	3,75	0,4
4	1,25	2,5	3,75	0,5
5	1,25	2,5	3,75	0,6
6	1,25	2,5	3,75	0,7

Столбец № никак не связан с номером итерации вычислений алгоритма, здесь он приводится для удобного обращения к какой-либо строке в таблицах.

Таблица 3.4.1.3 – Часть измерений, когда диод  $D_1$  открыт

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
7	1,359	2,572	3,786	1,6
8	1,39	2,593	3,797	1,7
9	1,421	2,614	3,807	1,8
10	1,452	2,634	3,817	1,9
11	1,483	2,655	3,828	2
12	1,514	2,676	3,838	2,1

Таблица 3.4.1.4 – Часть измерений, когда диоды  $D_1$  и  $D_2$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
13	1,853	2,959	3,979	3,1
14	1,895	3,007	4,004	3,2
15	1,937	3,056	4,028	3,3
16	1,978	3,104	4,052	3,4
17	2,02	3,152	4,076	3,5
18	2,062	3,201	4,1	3,6

Таблица 3.4.1.5 – Часть измерений, когда все диоды открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
19	2,446	3,66	4,369	4,5
20	2,491	3,718	4,414	4,6
21	2,537	3,776	4,46	4,7
22	2,582	3,834	4,505	4,8
23	2,628	3,892	4,551	4,9
24	2,673	3,95	4,596	5

В качестве исходных данных для работы алгоритма были выбраны три ситуации с разными состояниями диодов для расчёта сопротивлений соответствующих терморезисторов:

- а) №8:  $E_1 = 5\text{В}$ ;  $E_2 = 1,7\text{В}$ ;  $U_1 = 1,39\text{В}$  (открыт  $D_1$ );
- б) №17:  $E_1 = 5\text{В}$ ;  $E_2 = 3,5\text{В}$ ;  $U_1 = 2,02\text{В}$  (открыты  $D_1$  и  $D_2$ );
- в) №22:  $E_1 = 5\text{В}$ ;  $E_2 = 4,8\text{В}$ ;  $U_1 = 2,582\text{В}$  (открыты  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$ ).

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 3.4.1.6.

Таблица 3.4.1.6 – Результаты работы алгоритма

Открытые диоды	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$T_i$ , Ом	$T_{ист}$ , Ом
$D_1$	2,593	3,797	1000	1000
$D_1$ и $D_2$	3,152	4,076	1000,602	1000
$D_1$ , $D_2$ и $D_3$	3,834	4,505	994,652	1000

Рассчитаем относительную ошибку расчёта сопротивления терморезисторов  $\varepsilon$  по формуле (2.4.1.1). Она составила 0,595%.

### 3.4.2 Различные значения сопротивлений резисторов и терморезисторов

Исходные значения приведены в таблице 3.4.2.1:

Таблица 3.4.2.1 – Исходные данные схемы

Величина	Значение
$R_0$	561 Ом
$R_1$	478 Ом
$R_2$	503 Ом
$R_3$	612 Ом
$T_1$	500 Ом
$T_2$	1000 Ом
$T_3$	1500 Ом
$E_1$	7 В

Пилообразное напряжение  $E_2$  изменялось в интервале от 0 до 7В с шагом 0,1. Полученные значения приведены в таблицах 3.4.2.2 – 3.4.2.5.

Таблица 3.4.2.2 – Часть измерений, когда диоды находятся в закрытом состоянии

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
1	1,823	3,377	5,011	0,7
2	1,823	3,377	5,011	0,8
3	1,823	3,377	5,011	0,9
4	1,823	3,377	5,011	1
5	1,823	3,377	5,011	1,1
6	1,823	3,377	5,011	1,2

Таблица 3.4.2.3 – Часть измерений, когда диод  $D_1$  открыт

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
7	2,221	3,655	5,164	2,7
8	2,266	3,687	5,181	2,8
9	2,311	3,718	5,199	2,9
10	2,357	3,75	5,216	3
11	2,402	3,782	5,234	3,1
12	2,448	3,814	5,251	3,2

Таблица 3.4.2.4 – Часть измерений, когда диоды  $D_1$  и  $D_2$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
13	3,226	4,469	5,611	4,8
14	3,278	4,522	5,64	4,9
15	3,331	4,575	5,669	5
16	3,384	4,627	5,698	5,1
17	3,437	4,68	5,727	5,2
18	3,49	4,733	5,756	5,3

Таблица 3.4.2.5 – Часть измерений, когда все диоды открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
19	3,971	5,225	6,053	6,2
20	4,026	5,284	6,096	6,3
21	4,082	5,343	6,139	6,4
22	4,137	5,402	6,182	6,5
23	4,192	5,461	6,225	6,6
24	4,247	5,521	6,268	6,7

В качестве исходных данных для работы алгоритма были выбраны три ситуации с разными состояниями диодов для расчёта сопротивлений соответствующих терморезисторов:

а) №10:  $E_1 = 7\text{В}$ ;  $E_2 = 3\text{В}$ ;  $U_1 = 2,357\text{В}$  (открыт  $D_1$ );

б) №15:  $E_1 = 7\text{В}$ ;  $E_2 = 5\text{В}$ ;  $U_1 = 3,331\text{В}$  (открыты  $D_1$  и  $D_2$ );

в) №23:  $E_1 = 7\text{В}$ ;  $E_2 = 6,6\text{В}$ ;  $U_1 = 4,192\text{В}$  (открыты  $D_1, D_2$  и  $D_3$ ).

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 3.4.2.6.

Таблица 3.4.2.6 – Результаты работы алгоритма

Открытые диоды	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$T_i, \text{Ом}$	$T_{\text{ист}}, \text{Ом}$
$D_1$	3,75	5,216	499,534	500
$D_1$ и $D_2$	4,575	5,669	994,012	1000
$D_1, D_2$ и $D_3$	5,461	6,225	1484,873	1500

Относительная ошибка расчёта сопротивления терморезисторов  $\varepsilon$  составила 1,7%.

### 3.4.3 Большие значения сопротивлений резисторов при небольших значениях терморезисторов

Исходные значения приведены в таблице 3.4.3.1:

Таблица 3.4.3.1 – Исходные данные схемы

Величина	Значение
$R_0$	12 кОм
$R_1$	23 кОм
$R_2$	34 кОм
$R_3$	54 кОм
$T_1$	4 кОм
$T_2$	6 кОм
$T_3$	8 кОм
$E_1$	30 В

Пилообразное напряжение  $E_2$  изменялось в интервале от 0 до 30В с шагом 0,1. Полученные значения приведены в таблицах 3.4.3.2 – 3.4.3.5.

Таблица 3.4.3.2 – Часть измерений, когда диоды находятся в закрытом состоянии

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
1	2,927	8,537	16,829	1,9
2	2,927	8,537	16,829	2
3	2,927	8,537	16,829	2,1
4	2,927	8,537	16,829	2,2
5	2,927	8,537	16,829	2,3
6	2,927	8,537	16,829	2,4

Таблица 3.4.3.3 – Часть измерений, когда диод  $D_1$  открыт

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
7	11,159	15,063	20,834	14,2
8	11,232	15,121	20,87	14,3
9	11,305	15,179	20,905	14,4
10	11,378	15,237	20,941	14,5
11	11,451	15,295	20,976	14,6
12	11,524	15,353	21,012	14,7

Таблица 3.4.3.4 – Часть измерений, когда диоды  $D_1$  и  $D_2$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
13	15,458	19,546	23,585	19,9
14	15,535	19,637	23,641	20
15	15,612	19,727	23,696	20,1
16	15,689	19,817	23,751	20,2
17	15,765	19,908	23,807	20,3
18	15,842	19,998	23,862	20,4

Таблица 3.4.3.5 – Часть измерений, когда все диоды открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$E_2$
19	22,448	27,799	28,903	29
20	22,525	27,893	28,991	29,1
21	22,602	27,988	29,079	29,2
22	22,68	28,082	29,168	29,3
23	22,757	28,177	29,256	29,4
24	22,834	28,271	29,345	29,5

В качестве исходных данных для работы алгоритма были выбраны три ситуации с разными состояниями диодов для расчёта сопротивлений соответствующих терморезисторов:

а) №7:  $E_1 = 30\text{В}$ ;  $E_2 = 14,2\text{В}$ ;  $U_1 = 11,159\text{В}$  (открыт  $D_1$ );

б) №14:  $E_1 = 30\text{В}$ ;  $E_2 = 20\text{В}$ ;  $U_1 = 15,535\text{В}$  (открыты  $D_1$  и  $D_2$ );

в) №20:  $E_1 = 30\text{В}$ ;  $E_2 = 29,1\text{В}$ ;  $U_1 = 22,525\text{В}$  (открыты  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$ ).

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 3.4.3.6.

Таблица 3.4.3.6 – Результаты работы алгоритма

Открытые диоды	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$T_i$ , Ом	$T_{ист}$ , Ом
$D_1$	15,063	20,834	4000,381	4000
$D_1$ и $D_2$	19,637	23,641	5980,45	6000
$D_1$ , $D_2$ и $D_3$	27,893	28,991	8049,13	8000

Относительная ошибка расчёта сопротивления терморезисторов  $\varepsilon$  составила 0,95%.

### 3.4.4 Схема из пяти терморезисторов

Исходные значения приведены в таблице 3.4.4.1:

Таблица 3.4.4.1 – Исходные данные схемы

Величина	Значение
$R_0$	478 Ом
$R_1$	461 Ом
$R_2$	468 Ом
$R_3$	475 Ом
$R_4$	479 Ом
$R_5$	461 Ом
$T_1$	458 Ом
$T_2$	477 Ом
$T_3$	469 Ом
$T_4$	461 Ом
$T_5$	470 Ом
$E_1$	7,2 В

Пилообразное напряжение  $E_2$  изменялось в интервале от 0 до 7,2В с шагом 0,1. Полученные значения приведены в таблицах 3.4.4.2 – 3.4.4.7.

Таблица 3.4.4.2 – Часть измерений, когда диоды находятся в закрытом состоянии

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
1	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	1,9
2	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	2
3	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	2,1
4	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	2,2
5	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	2,3
6	1,22	2,396	3,59	4,802	6,024	2,4



Таблица 3.4.4.3 – Часть измерений, когда диод  $D_1$  открыт

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
7	1,536	2,65	3,781	4,928	6,086	1,9
8	1,582	2,687	3,809	4,947	6,095	2
9	1,628	2,724	3,837	4,966	6,104	2,1
10	1,675	2,761	3,865	4,984	6,113	2,2
11	1,721	2,799	3,893	5,003	6,122	2,3
12	1,768	2,836	3,921	5,022	6,132	2,4

Таблица 3.4.4.4 – Часть измерений, когда диоды  $D_1$  и  $D_2$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
13	2,609	3,725	4,589	5,465	6,349	4
14	2,666	3,795	4,641	5,5	6,366	4,1
15	2,724	3,865	4,694	5,535	6,383	4,2
16	2,781	3,934	4,746	5,57	6,4	4,3
17	2,838	4,004	4,798	5,604	6,417	4,4
18	2,896	4,073	4,85	5,639	6,435	4,5

Таблица 3.4.4.5 – Часть измерений, когда диоды  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
19	3,658	5,03	5,668	6,183	6,701	5,8
20	3,719	5,109	5,745	6,233	6,726	5,9
21	3,779	5,188	5,822	6,284	6,751	6
22	3,839	5,267	5,898	6,335	6,776	6,1
23	3,9	5,346	5,975	6,386	6,801	6,2
24	3,96	5,424	6,052	6,437	6,826	6,3

Таблица 3.4.4.6 – Часть измерений, когда диоды  $D_1, D_2, D_3$  и  $D_4$  открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
25	4,142	5,662	6,284	6,595	6,903	6,6
26	4,203	5,744	6,369	6,669	6,94	6,7
27	4,265	5,826	6,455	6,744	6,976	6,8
28	4,326	5,908	6,54	6,818	7,013	6,9
29	4,388	5,99	6,626	6,892	7,049	7

Таблица 3.4.4.7 – Часть измерений, когда все диоды открыты

№	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$E_2$
30	4,449	6,073	6,712	6,969	7,091	7,1
31	4,511	6,156	6,801	7,052	7,152	7,2

В качестве исходных данных для работы алгоритма были выбраны пять ситуаций с разными состояниями диодов для расчёта сопротивлений соответствующих терморезисторов:

- а) №11:  $E_1 = 7,2\text{В}$ ;  $E_2 = 2,3\text{В}$ ;  $U_1 = 1,721\text{В}$  (открыт  $D_1$ );
- б) №15:  $E_1 = 7,2\text{В}$ ;  $E_2 = 4,2\text{В}$ ;  $U_1 = 2,724\text{В}$  (открыты  $D_1$  и  $D_2$ );
- в) №23:  $E_1 = 7,2\text{В}$ ;  $E_2 = 6,2\text{В}$ ;  $U_1 = 3,9\text{В}$  (открыты  $D_1, D_2$  и  $D_3$ );
- г) №27:  $E_1 = 7,2\text{В}$ ;  $E_2 = 6,8\text{В}$ ;  $U_1 = 4,265\text{В}$  (открыты  $D_1, D_2, D_3$  и  $D_4$ );
- д) №30:  $E_1 = 7,2\text{В}$ ;  $E_2 = 7,1\text{В}$ ;  $U_1 = 4,449\text{В}$  (открыты  $D_1, D_2, D_3, D_4$  и  $D_5$ ).

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 3.4.4.8.

Таблица 3.4.4.8 – Результаты работы алгоритма

Открытые диоды	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$U_4, \text{В}$	$U_5, \text{В}$	$T_i, \text{Ом}$	$T_{\text{ист}}, \text{Ом}$
$D_1$	2,799	3,893	5,003	6,122	458,787	458
$D_1$ и $D_2$	3,865	4,694	5,535	6,383	475,573	477
$D_1, D_2$ и $D_3$	5,346	5,975	6,386	6,801	466,732	469
$D_1, D_2, D_3$ и $D_4$	5,826	6,455	6,744	6,976	446,236	461
$D_1, D_2, D_3, D_4$ и $D_5$	6,073	6,712	6,969	7,091	493,022	470

Относительная ошибка расчёта сопротивления терморезисторов  $\varepsilon$  составила 9,05%.

### 3.4.5 Проверка алгоритма в лабораторных условиях

Схема из трёх терморезисторов была собрана в лабораторных условиях командой коллег-физиков. Опорное напряжение подавалось на делитель напряжения, состоящий из четырёх резисторов с номиналами, указанными в таблице 3.4.5.1. Использовались точечные германиевые диоды Д2В и терморезисторы типа СТ5-1. пилообразное напряжение изменялось в интервале от 0 до 7,2В.

Таблица 3.4.5.1 – Исходные данные схемы

Величина	Значение
$R_0$	1002 Ом
$R_1$	994 Ом
$R_2$	995 Ом
$R_3$	1002 Ом
$E_1$	7,2 В

Сравнение величин, вычисленных алгоритмом, и измеренных на схеме приведено в таблицах 3.4.5.2 и 3.4.5.3.

Таблица 3.4.5.2 – Значения величин, полученные опытным путём

Открытые диоды	$E_1, В$	$E_2, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$T_i, Ом$
$D_1$	7,1126	3,3454	1,9759	3,6698	-	1000
$D_1$ и $D_2$	7,1179	5,1261	2,2122	3,8905	5,4975	1000
$D_1, D_2$ и $D_3$	7,1238	6,9059	2,4756	4,1283	5,6144	1000

Таблица 3.4.5.3 – Значения величин, полученные алгоритмом

Открытые диоды	$E_1, В$	$E_2, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$T_i, Ом$
$D_1$	7,2	3,4	1,9759	3,6725	5,45	933,77
$D_1$ и $D_2$	7,2	5,2	2,2122	3,8937	5,52	945,62
$D_1, D_2$ и $D_3$	7,2	6,9	2,4756	4,103	5,61	1074,97

Относительная ошибка расчёта сопротивления терморезисторов  $\varepsilon$  составила 19,558%.

Такая большая ошибка связана прежде всего с тем, что в алгоритме используется допущение об идеальности диодов, на практике же они такими не являются – в диодах возникают обратные токи.

### **Вывод к главе 3**

В результате написания третьей главы был разработан и исследован алгоритм обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов, работающий с определённой точностью.

Эксперименты показали, что в реальных схемах вольтамперные характеристики диодов не настолько идеальные, насколько нам бы хотелось. Из-за этого ошибка определения сопротивления терморезисторов прямо пропорциональна количеству диодов, используемых в схеме, так как обратные токи суммарно могут дать существенный вклад в погрешность описанного алгоритма. Поэтому данный алгоритм стоит применять для получения начального приближения для решения системы нелинейных алгебраических уравнений, в которых учитывается, что сопротивление диодов зависит не только от направления тока, но и от амплитуды напряжения и даже температуры. В этом случае необходимо знать температурную вольтамперную характеристику используемых диодов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы была тщательно изучена предметная область. Рассмотрено воздействие окружающей среды на космические аппараты, виды и последствия излучения и радиации на РЭА. Также подробно объяснено назначение системы терморегулирования и её работы, методы снижения и повышения температуры для отдельных участков КА. Проанализированы существующие датчики температуры и рассмотрены известные решения температурного контроля бортовой РЭА КА.

Поставленные задачи выполнены в полном объёме. Разработан и исследован численный метод анализа температурных данных с плёночных терморезисторов электронных плат. Метод позволяет измерять температуру участков электронной платы посредством её разбиения на условные ячейки и вычисления сопротивления этих ячеек, а также воздействие на температуру любой ячейки соседних ячеек. Алгоритм работает с определённой точностью и показывает хорошие результаты в решении модельных задач.

Также был разработан и исследован алгоритм обработки данных терморезисторной сети измерений температуры с небольшим количеством проводов. Измерительная схема состоит из делителя напряжения, измерительного прибора, пар диод-терморезистор, двух источников напряжения, постоянного и пилообразного соответственно, и трёх проводов. В алгоритме используется допущение об использовании в измерительной схеме «идеальных» диодов, которых на практике существует, поэтому при попытке внедрить алгоритм для решения реальной задачи была получена большая суммарная ошибка определения температуры терморезисторов.

Оба алгоритма могут быть модернизированы с целью повышения точности измерения температуры для конкретной аппаратуры в определённых условиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бурдаков, В. П. Физические основы космонавтики / В.П. Бурдаков, Ф. Ю. Зигель - М. : Атомиздат, 1996.
2. Воронцов-Вельяминов, Б. А. Астрономия / Б. А. Воронцов-Вельяминов - М. : Учпедгиз, 1958.
3. Тарасов, В. Е. Космонавтика / В. Е. Тарасов - М. : Машиностроение, 1977.
4. Кондратьев, К. Я. Лучистая энергия Солнца / К. Я. Кондратьев - М. : Гидрометеоиздат, 1954.
5. Ультрафиолетовое излучение Солнца и межпланетная среда. Сб. статей. ИЛ, 1962.
6. Хинтереггер, Х. Предварительные результаты наблюдения далекого ультрафиолетового спектра Солнца в верхней атмосфере / Х. Хинтереггер // Ультрафиолетовое излучение Солнца и межпланетная среда : сб науч тр. / ИЛ, 1962.
7. Hinteregger, H. Absolute intensity measurement in the extreme ultraviolet spectrum of solar radiation / H. Hinteregger // Space / Science Review, 1965. - v. 4, pp. 461—47.
8. Johnson, F. S. The Solar Constant / F. S. Johnson // J. of Meteorology, 1954. - v. 11.
9. Mandelstam S. L. X-ray Emission of the Sun / S. L. Mandelstam // Space / Science Review, 1965. - v. 4, No. 5/6.
10. AIAA Space Simulation Testing Conference, 1964, 1966.
11. Казачевский, В. М. Определение альbedo земного шара / В. М. Казачевский // Известия Астро-физич. института АН Казахской ССР / 1955. - т. I, вып. 1.
12. Кондратьев, К. Я. Поле излучения Земли как планеты / К. Я. Кондратьев, О. А. Авасте, М. П. Федорова, К. Е. Якушевская - М. : Гидрометеоиздат, 1967.

13. Fritz, S. Solar radiant energy and its modification by the Earth and its atmosphere / S. Fritz // *Compendium of Meteorology* / edited by T. F. Malone, American Meteorological Society - Boston, 1951.
14. Шаронов, В. В. Планета Венера / В. В. Шаронов - М. : «Наука», 1967.
15. Барабашов, Н. П., Марс / Н. П. Барабашов - М. : «Советская Россия», 1963.
16. Вандерс, А. Дж. Физические условия на планете Марс / А. Дж. Вандерс - ИЛ., 1960.
17. Сытинская, Н. Н. Природа Луны / Н.Н. Сытинская - М. : Физматгиз, 1959.
18. Шаронов, В. В. Природа планет / В. В. Шаронов - М. : Физматгиз, 1958.
19. Jaffe, L. D. Behaviour of materials in space ARS / L. D. Jaffe, J. B. Rillenhous - J, 1962. - v. 32, No. 3.
20. Дешман, С. Научные основы вакуумной техники / С. Дешман - М. : «Мир», 1965.
21. Wachman, H. X., ARS / H. X. Wachman - J, 1962. - 32, 2.
22. Roberts, J. Stabilisation of Space Vehicles by means Gas-diffusion surfaces / J. Roberts, L. Stern, G. Richard - Adv. Astron. Sci., 1966. - v. 9.
23. Sutherland, G. S. A Review of Microrocket Technology / G. S. Sutherland, M. E. Mach - J. of Spacecraft and Rockets, 1966. - No. 8, v. 3, p. 1153.
24. Chao, B. T. Similarity criteria for thermal modeling of spacecraft / B. T. Chao, G. L. Wedeking - Journal of Spacecraft and Rockets, 1965. - v. 2. No 2, pp. 146—252.
25. Katzoff, S. Similitude in Thermal Models of Spacecraft / S. Katzoff - NASA TN D-1631, 1963. - April.
26. Toussaint, M. Verification of the thermal mathematical Model for Artificial Satellites: a new Test Philosophy / M. Toussaint - AIAA Paper, 1976. - No. 67—304.
27. Гордов, А. Н. Основы температурных измерений / А. Н. Гордов, О. М. Жагулло, А. Г. Иванова - М. : Энергоатомиздат, 1992.

28. Трофимов, Н. А. Измерение параметров теплофизических процессов в ядерной энергетике / Н.А. Трофимов, В. В. Лаппо - М. : Атомиздат, 1979.

29. Датчики теплофизических и механических параметров / Справочник, т.1, кн.1/ Под общ.ред. Коптева Ю. Н., под ред. Багдатьяева Е. Е..

30. Российское агентство по патентам и товарным знакам [Электронный ресурс] : Устройство измерения пространственного распределения температуры – Режим доступа : [https://patents.s3.yandex.net/RU2079822C1\\_19970520.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2079822C1_19970520.pdf).

31. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [Электронный ресурс] : Способ измерения пространственного распределения температуры (варианты) и устройство для его осуществления – Режим доступа : <http://bd.patent.su/2194000-2194999/pat/servlet/servlet1796.html>.

32. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [Электронный ресурс] : Способ терморегулирования бортовой аппаратуры космического аппарата – Режим доступа : <http://www.freepatent.ru/images/patents/167/2304071/patent-2304071.pdf>.

33. Федоренко, Р. П. Введение в вычислительную физику / Под ред. А. И. Лобанова. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. - 500 - 504 с. - ISBN 978-5-91559-011-2.

34. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев – М. : Наука, 1978.


35. Ильин В. П. Трёхдиагональные матрицы и их приложения / В. П. Ильин, Ю. И. Кузнецов – М. : Наука, 1985.



Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт Космических и информационных технологий  
Базовая кафедра «Интеллектуальные системы управления»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Журав Ю.Ю.  
подпись                      инициалы, фамилия





« 01 » 04 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Математические модели и алгоритмы анализа данных для сети измерения  
температуры

27.04.03 Системный анализ и управление

27.04.03.02 Системный анализ данных и технологий принятия решений

Научный руководитель	 <u>01.07.19</u> подпись, дата	<u>доцент, к.т.н.</u> должность, ученая степень	<u>А.А.Корнеева</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 <u>01.07.19</u> подпись, дата		<u>И.О.Бессмертный</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 <u>01.07.19</u> подпись, дата	<u>доцент кафедры «ИС», к.т.н.</u> должность, ученая степень	<u>Н.В.Кононова</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 <u>01.07.19</u> подпись, дата	<u>ст. преподаватель</u> должность, ученая степень	<u>Н.Б. Позолотина</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2019

