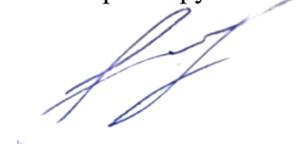


На правах рукописи



Чупринова Ольга Витальевна

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: **Щеников Ярослав Алексеевич**
кандидат технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Русинов Леон Абрамович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры автоматизации процессов химической промышленности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Костин Геннадий Александрович
доктор технических наук, доцент, проректор по научной и инновационной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А.А. Новикова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Защита диссертации состоится «19» мая 2026 г., в 13-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/chuprinova_ov. Автореферат разослан «12» марта 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02
Кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Радиоэлектронные изделия играют важную роль во многих отраслях. Повышение надежности и долговечности изделий радиоэлектроники требует внедрения эффективных методов неразрушающего контроля и технической диагностики печатных узлов, от которых во многом зависит работоспособность изделий. О необходимости внедрения современных автоматизированных систем контроля и диагностики говорят государственные указы и стратегии, связанные с Индустрией 4.0: стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, национальный проект технологического лидерства «Средства производства и автоматизации». Используемые в настоящее время методы не позволяют в полной мере автоматизировать процессы контроля и диагностики изделий радиоэлектроники. В частности, метод оптического контроля не позволяет выявлять скрытые дефекты печатных узлов, а метод рентгеновской инспекции является сложным и дорогостоящим в использовании. Трудности автоматизации и вызванная этим необходимость использования ручного труда порождает проблему недостатка контролеров и/или их неполного соответствия профессиональным компетенциям.

Возникает противоречие: национальные программы развития электронной промышленности говорят о необходимости внедрения современных автоматизированных систем контроля и диагностики, однако на сегодняшний день значительная доля предприятий осуществляет процедуры преимущественно за счет ручного труда, т.к. существующие методы имеют ряд ограничений: сложность интерпретации результатов, высокая стоимость оборудования. Наиболее подходящим для автоматизации процессов контроля и диагностики является тепловизионный метод неразрушающего контроля, благодаря следующим его преимуществам: бесконтактный способ измерения, высокая скорость проведения диагностики, возможность выявления скрытых дефектов, связанных с локальными перегревами или нарушением тепловых режимов.

Задача автоматизированного контроля и диагностики печатных узлов неразрушающим тепловизионным методом решается внедрением программно-аппаратного комплекса с поддержкой анализа данных на базе искусственных нейронных сетей. Внедрение реализованного программно-аппаратного комплекса минимизирует влияние человеческого фактора и сопутствующих ошибок в процессе контроля печатных узлов, а также способствует повышению их надежности за счет более точного выявления дефектов компонентов. Используемые в настоящее время методы тепловизионного контроля и диагностики ПУ не удовлетворяют современным требованиям: высокая точность контроля при низкой трудоемкости его проведения. В связи с вышесказанным возникает научно-практическая задача, связанная с разработкой и внедрением программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля и алгоритмов обработки данных термограмм ПУ с обеспечением возможности его цифровой интеграции в информационную инфраструктуру отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности.

Степень разработанности проблемы.

Развитие тепловизионного метода неразрушающего контроля в России берет начало в 1970-х годах. Особо важные результаты в данной области описаны в публикациях: Д.А. Рапопорта, В.П. Вавилова, В.В. Ширяева и др. На сегодняшний день научные исследования в области тепловизионного неразрушающего контроля в нашей стране проводят: О.Н. Будадин (ЦНИИ СМ, г. Хотьково), С.А. Смотров и А.В. Смотров (ЦАГИ им. Е.В. Жуковского, г. Жуковский), В.П. Вавилов и А.О. Чулков (НИ ТПУ, г. Томск), В.Н. Чернышов (ТГТУ, г. Тамбов), С.У. Увайсов (МИРЭА, г. Москва), М.И. Щербаков (ИРТИС, г. Москва), Е.В. Абрамова (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва), А.В. Лукьянов (ИрГУПС, г. Иркутск) и др. В зарубежных исследованиях применение тепловизионного метода неразрушающего контроля изделий и материалов описано в работах: S. Sfarra (Университет Аквилы, Италия), J.-C. Batsale (Университет Бордо, Франция), В. Oswald-Tranta (Университет Леобен, Австрия), С. Maierhofer (Институт исследования материалов, Германия), Х. Maldague (Университет Лавала, Канада), J. Morikawa (Токийский институт технологий, Япония).

Цель работы: совершенствование процессов проведения диагностики печатных узлов, за счет внедрения алгоритмов обработки данных на базе тепловизионного метода неразрушающего контроля.

Объект исследования: процесс контроля и диагностики печатных узлов для отечественных предприятий, отвечающим требованиям Индустрии 4.0.

Предмет исследования: автоматизированный метод неразрушающего тепловизионного контроля и диагностики печатных узлов.

Для достижения цели диссертационного исследования в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. **Разработка** программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод автоматизированного контроля печатных узлов.

2. **Разработка** математической модели процесса обработки термограмм для осуществления автоматизированной классификации дефектов компонентов при тепловизионном контроле печатных узлов.

3. **Разработка** алгоритма оценки влияния перегрева компонентов, на скорость деградации их параметров, способствующий повышению надежности печатных узлов.

Методы исследований: элементы математического, статистического методов обработки данных, построения искусственных нейронных сетей, имитационное моделирование. Программные средства реализации диссертационного исследования: Microsoft Office, Python, MySQL.

Область исследования: соответствует пунктам 1, 4, 6 паспорта специальности: 2.2.8 - «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Программно-аппаратный комплекс контроля и диагностики печатных узлов, реализующий тепловизионный метод неразрушающего контроля, повышающий эксплуатационный ресурс изделий радиоэлектроники за счет внедрения нейросетевой модели распознавания дефектов.

2. Математическая модель обработки термограмм при тепловизионном контроле печатных узлов, обеспечивающая автоматизацию процесса выявления скрытых дефектов печатного узла.

3. Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов печатного узла на показатель надежности, на основании данных полученных при тепловизионном контроле.

Научная новизна:

1. Программно-аппаратный комплекс, реализующий тепловизионный метод неразрушающего контроля, **отличается от известных тем**, что обработка полученных термограмм осуществляется искусственной нейронной сетью, что позволяет повысить оперативность проведения контроля и диагностики печатных узлов.

2. Математическая модель обработки термограммы с помощью искусственной нейронной сети **отличается от известных тем**, что основана на упрощенной обработке численных данных, полученных при тепловизионном контроле, что позволяет повысить оперативность выявления дефектов печатного узла.

3. Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов **отличается от известных тем**, что учитывает отличия температуры компонентов от эталонных значений и позволяет оценить изменение надежности печатного узла.

Практическая значимость:

1. Программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий повышение оперативности проведения контроля и диагностики печатных узлов до 20%, в сравнении с ручным методом.

2. Математическая модель обработки термограмм позволяет автоматизировать процесс тепловизионного контроля и сократить количество ошибок диагностирования, связанных с влиянием человеческого фактора до 15%, а также увеличить оперативность проведения контроля и диагностики до 40%.

3. Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов, позволяющий повысить точность оценки надежности печатного узла на 5-7 % за счет оценки влияния реальных температур компонентов.

Теоретическая значимость

Программно-аппаратный комплекс, позволяющий выявлять скрытые дефекты компонентов печатных узлов. Математическая модель, позволяющая повысить оперативность процесса контроля и диагностики печатных узлов за счет автоматизации распознавания дефектов компонентов. Алгоритм оценки влияния перегревов компонентов, позволяющий повысить точность расчета надежности печатного узла.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применяемого математического аппарата, анализа данных с использованием федеральных нормативно-правовых и нормативно-технических документов подтверждается результатами практической апробации.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке основных положений, выносимых на защиту.

Реализация работы. Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность ООО «Нью-Лайн» и ООО «Бергмаш», что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на VI международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» 2024, 2025г; международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» 2024, 2025 г.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 25 научных работ, в том числе: 6 работ в рецензируемых научных изданиях ВАК, из них 4 без соавторов, 17 работ в других изданиях, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, и приложений. Содержание работы изложено на 139 стр. (8,7 п.л.) машинописного текста, включая 41 рисунок и 11 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования.

В первом разделе представлен анализ существующих методов неразрушающего контроля изделий радиоэлектроники, рассмотрена их применимость при диагностике печатных узлов. Современные методы автоматизированного неразрушающего контроля позволяют выявлять три типа дефектов: дефекты конструкции – автоматическая оптическая инспекция изображений, полученных с помощью обычной камеры; скрытые дефекты компонентов – автоматическая рентгеновская инспекция по изображениям рентгенограмм, полученным при облучении объекта рентгеновскими лучами; структурные дефекты материалов – автоматизированная лазерная дефектоскопия. Тепловизионный метод неразрушающего контроля на сегодняшний день практически не автоматизирован. Результаты сравнительного анализа методов тепловизионного контроля, а также их применимость при диагностике печатных узлов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Существующие методы тепловизионного контроля и диагностики

Метод тепловизионного контроля	Преимущества метода	Недостатки метода	Применимость при диагностике печатных узлов
Пассивный	Высокая скорость, простая реализация	Не выявляет внутренние дефекты, сильная зависимость от внешних условий	Поиск горячих точек
Модулированная термография	Меньшая чувствительность к неравномерности нагрева, помехозащищенность	Сложность внедрения, высокая стоимость, сложность математической обработки результатов	Контроль многослойных структур, дефектоскопия металлов
Импульсный	Высокая скорость, чувствительность к дефектам поверхности материалов	Неравномерность нагрева маскирует дефекты, необходимость мощного источника тепла	Поиск расслоений, полостей

Тепловизионный метод неразрушающего контроля и диагностики основан на регистрации инфракрасного излучения объекта с последующим преобразованием его в воспринимаемый контролером визуальный образ. Автоматизация существующих методов тепловизионного неразрушающего контроля затруднена наличием таких проблем, как высокая стоимость оборудования и сложность интерпретации результатов тепловых измерений. Для решения проблемы поиска скрытых дефектов и совершенствования процессов контроля и диагностики печатных узлов предлагается внедрение программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля и диагностики печатных узлов.

При расчёте надежности печатных узлов радиоэлектронных систем, в случае отсутствия резервирования, принято, что отказ одного компонента приводит в неисправное состояние весь печатный узел – расчёт надежности по последовательной схеме замещения. В этом случае событие отказа печатного узла можно записать как:

$$A_S = A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N = \bigcap \quad (1)$$

Вероятности событий A_i и A_S совпадают с определением вероятности безотказной работы i -го элемента системы, поэтому вероятность выражается через вероятность безотказной работы P_i :

$$P_i = \Pr\{A_i\}, i = 1 \dots N \quad (2)$$

Так как события A_i статистически независимы, вероятность P_i определяется как:

$$\Pr\{A_S\} = \Pr\{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N\} = \Pr\{A_1\} \times \Pr\{A_2\} \times \dots \times \Pr\{A_N\} = \prod_{i=1}^N \Pr\{A_i\}. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность безотказной работы системы, в случае использования последовательной схемы замещения, равна произведению вероятности безотказной работы входящих в нее элементов.

Повышение надежности печатных узлов при одновременном росте точности и скорости их диагностики достигается за счет интеграции в производственный цикл методов тепловизионного неразрушающего контроля, дополненных алгоритмами искусственного интеллекта. Для этого был разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий тепловизионный метод контроля. Комплекс сочетает тепловизионную съемку, автоматизированную обработку данных и искусственный интеллект для бесконтактного измерения температурных полей, выявления аномалий: перегрев, дефекты пайки, короткое замыкание, плохой теплоотвод. Алгоритм работы разработанного программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля и диагностики, приведен на рисунке 1.

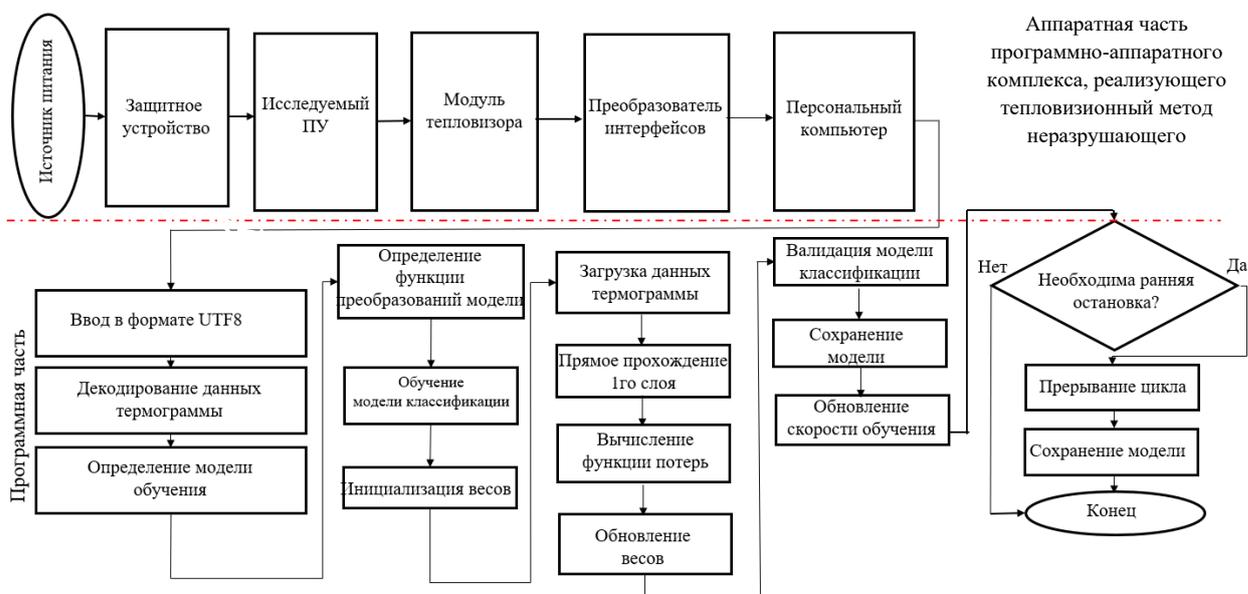


Рисунок 1 – Структура и алгоритм работы программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля

В аппаратную часть программно-аппаратного комплекса входят:

- позиционирующее оборудование – штатив с посадочным местом для установки тестируемого печатного узла (рисунок 2а);
- модуль тепловизора AMG8833 (рис. 2б);
- преобразователь интерфейсов I²C-USB на базе Arduino UNO R3;
- USB-кабель для подключения к персональному компьютеру;
- кабель подключения тестируемого печатного узла к сети 220Вольт 50Гц с защитным устройством.



а - позиционирующее оборудование



б – модуль тепловизора AMG8833

Рисунок 2 – Элементы аппаратной части программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля

В качестве объекта исследования использовался печатный узел импульсного источника питания. Алгоритм обработки данных термограммы, входящий в состав программной части программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля и диагностики представлен на рисунке 3.

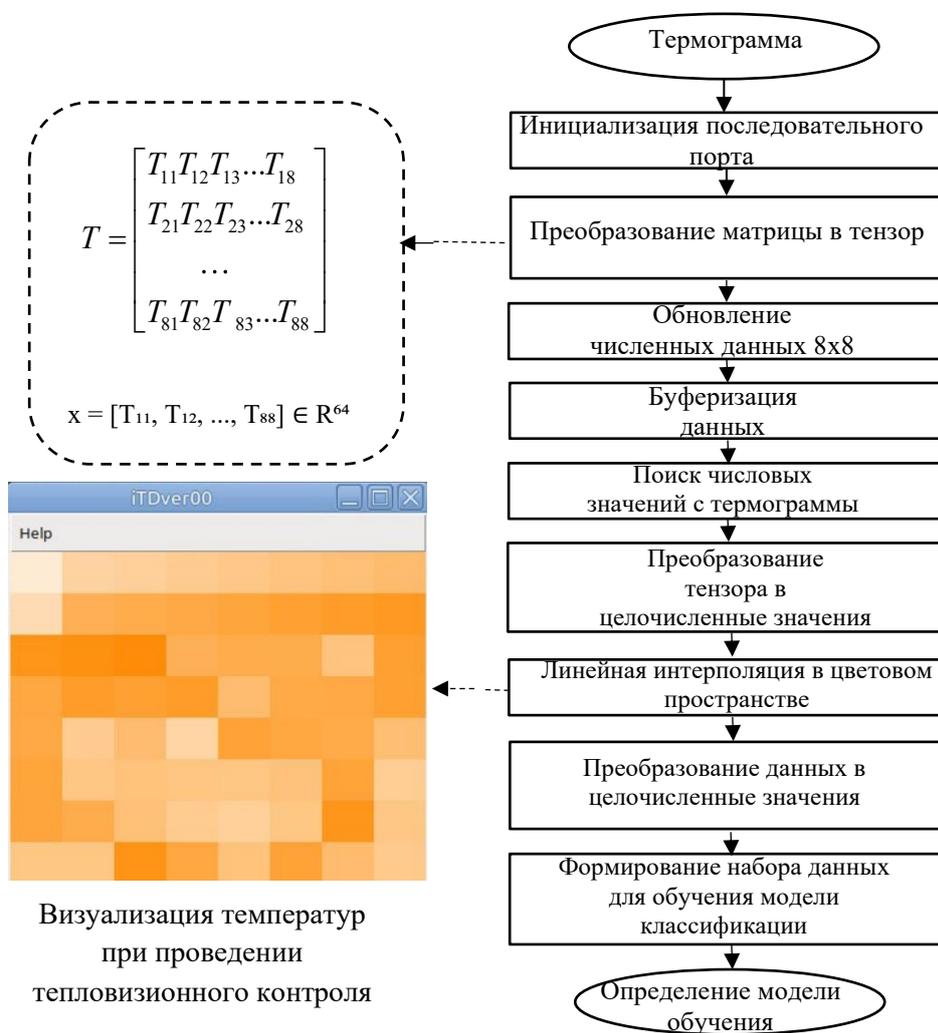


Рисунок 3 – Алгоритм обработки данных термограммы

Основные модули программной части ПАК:

- программный модуль для анализа термограмм: формирование термограммы – цветового отображение температурных полей, распознавание дефектов компонентов печатного узла с помощью предварительно обученной искусственной нейронной сети;
- программный модуль для обучения искусственной нейронной сети;
- электронная таблица для формирования обучающей выборки, например: LibreOffice, Onlyoffice, МойОфис или MS Office.

Порядок проведения контроля и диагностики печатных узлов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса:

- настройка тепловизора: выбор диапазона, калибровка;
- подготовка печатного узла к снятию термограммы: электрическое подключение, прогрев, стабилизация температурного режима;
- проведение измерения: снятие термограммы – статический контроль;
- анализ данных термограммы: выявление «горячих точек», перегретых компонентов.

Разработанный программно-аппаратный комплекс помогает снизить ошибки контролера, осуществляющего процесс контроля и диагностики ПУ, что впоследствии повышает надежность изделий радиоэлектроники.

Во втором разделе представлена реализованная на базе полносвязной искусственной нейронной сети нейросетевая модель обработки термограмм, используемая при тепловизионном контроле печатных узлов и обеспечивающая автоматизацию процесса выявления скрытых дефектов. Интеграция нейронных сетей в системы контроля и диагностики позволяет достичь более высокого уровня точности и эффективности процессов контроля и диагностики. Для определения объема обучающей выборки диагностирующей нейронной сети необходимо оценить число возможных дефектов печатного узла N . Все дефекты разбиты на G независимых групп. Количество дефектов в каждой группе: n_1, n_2, \dots, n_G , тогда количество одиночных дефектов печатного узла:

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_G. \quad (4)$$

Если группы независимы, то две неисправности могут быть: из одной группы (если в группе хотя бы 2 дефекта) или из разных групп.

Расчёт количества сочетаний внутри групп дефектов:

$$C_1 = \left(\sum_{i=1}^G \binom{n_i}{2} \right). \quad (5)$$

Расчёт количества сочетаний между группами дефектов:

$$C_2 = \left(\sum_{1 \leq i < j \leq G} n_i \times n_j \right). \quad (6)$$

Формула для нахождения общего количества одиночных и двойных дефектов:

$$C = N + C_1 + C_2. \quad (7)$$

В таблице 2 представлен пример расчета количества дефектов печатного узла в случае, если при его изготовлении используется ручной монтаж.

Таблица 2 – Расчет количества одиночных дефектов в случае ручного монтажа печатных узлов

Типы компонентов	Количество компонентов в группе, шт.	Группы дефектов			
		Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
		Неправильная установка (полярность)	Обрыв	Замыкание	Перепутаны номиналы
Резисторы	12	0	1	0	1
Конденсаторы неполярные	6	0	1	1	1
Конденсаторы полярные	2	1	0	0	1
Катушки индуктивности	1	0	1	1	0
Предохранитель	1	0	1	0	0
Диод	2	1	1	0	0
Стабилитрон	1	1	1	1	1
Транзистор I	0	0	0	1	0
Транзистор II	1	0	0	0	0
Светодиод	1	1	0	0	0
Микросхема	1	1	1	1	0
Разъем неполярный	2	0	1	0	0
Количество дефектов в группе:		$n_1 = 7$	$n_2 = 26$	$n_3 = 9$	$n_4 = 21$

Расчеты по формулам 4-7 показали, что даже для простого печатного узла общее количество возможных одиночных и двойных дефектов превышает 2000, однако большинство из них имеют исчезающе малую вероятность, поэтому для обучения нейронной сети потребуется выделить основные, самые часто встречающиеся дефекты. В качестве входных данных нейросетевой модели обработки термограмм используется матрица 8x8 значений, которая в развернутом виде представляет собой вектор из 64 значений температурных показателей, полученных с тепловизора при тепловизионном контроле печатного узла. Тепловизор, использующийся в разработанном методе, производит регистрацию температурного поля печатного узла с разрешением 8x8, разбивая при этом температурное поле объекта на 8x8=64 одинаковых сегмента. Все полученные значения температур при контроле печатного узла становятся отдельным признаком, описывающим состояние каждой области печатного узла. На основании этих данных формируются выборки для диагностирующей нейронной сети: обучающая и валидационная. В ходе проведения исследований термограмм печатного узла с помощью программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод контроля была сформирована обучающая выборка. Эмпирическим путем были получены 90 наблюдений термограмм для печатного узла с разными типами неисправностей. В общем виде структура искусственной нейронной сети для контроля и диагностики печатных узлов представлена на рисунке 4.

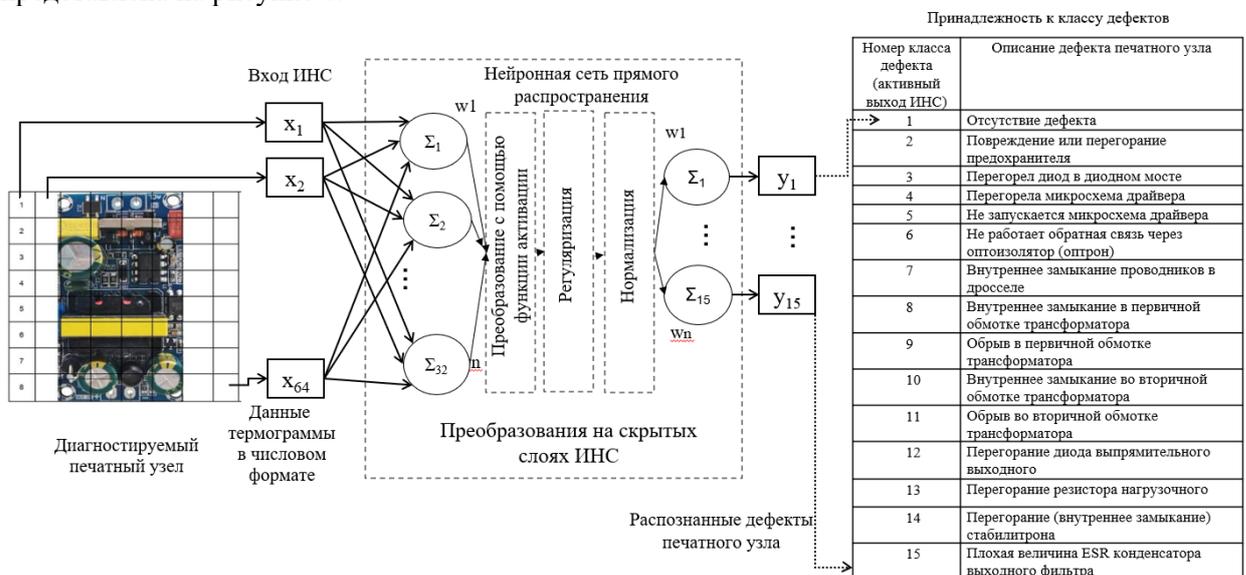


Рисунок 4 – Архитектура искусственной нейронной сети для классификации дефектов печатных узлов

Основные этапы обработки данных искусственной нейронной сетью при классификации дефектов печатного узла:

Нормализация данных. Все данные приводятся к единичной дисперсии:

$$X_{norm}^i = \left(\frac{X_{ij} - \mu_i}{\sigma_j} \right)_{j=1}^m \quad (8)$$

Среднее значение jj-го признака по всей обучающей выборке

$$\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij} \quad (9)$$

Стандартное отклонение jj-го признака. Разброс данных приводится к единичной дисперсии

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \mu_j)^2} \quad (10)$$

Кодирование меток целевого параметра

$$y_{categor}^i = \begin{bmatrix} I(y_{encod}^{(i)} = 0) \\ \vdots \\ I(y_{encod}^{(i)} = C-1) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Далее, нормализованные данные подаются на первый слой нейронной сети

$$z_n = xW_n^T + b_n, \quad (12)$$

где: Z_n – взвешенная сумма значений первого слоя; x – значение признака на первом слое; $x = x_{norm}$; W_n^T – транспонированная матрица весов; b_n – нормализованный выход значений первого слоя.

Данные поступают в нейронную сеть небольшими группами, и еще раз нормализуются, это стабилизирует распределение входных значений для последующих слоев (сдвигает его к нулю и единичной дисперсии):

$$bn_n = \gamma_n \times \frac{a_n - \mu}{\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon}} + \beta_n, \quad (13)$$

где: $\gamma_n, \beta_n \in \mathbb{R}^{64}$ – параметры масштаба и сдвига; μ – скользящее среднее; σ^2 – скользящая дисперсия; $\varepsilon \approx 10^{-8}$ – малая константа для численной стабильности.

Далее данные преобразовываются с помощью кусочно-линейной функции активации ReLu. Производная такой функции:

$$\frac{d}{dx} \text{Re Lu}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0, \\ 0, & \text{если } x \leq 0. \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом при преобразовании между слоями, если значение производной признака ≤ 0 , нейрон становится неактивным. Регуляризация данных предотвращает переобучение искусственной нейронной сети:

$$d_n = bn_n \odot m_n, \quad (15)$$

где: d_n – выход после применения отключения малых весов; m – бинарная маска по Бернулли.

Количество нейронов в выходном слое равно числу классов дефектов K . В качестве функции активации для нейронов выходного слоя используется функция softmax – математическая функция, преобразующая вектор вещественных чисел в вектор вероятностей, сумма которых равна единице. Она широко используется в машинном обучении, особенно в задачах многоклассовой классификации, чтобы представить выходные данные модели как вероятностное распределение по классам:

$$\text{softmax}(z) = \frac{e^{z_3}}{\sum_{j=1}^{15} e^{z_3}}. \quad (16)$$

Функция потерь измеряет расхождение между предсказанным нейросетевой моделью результатом и истинным значением:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C y_{ij} \log(\hat{y}_{ij}). \quad (17)$$

где: N – количество элементов в выборке; C – количество классов; y_{ij} – истинная метка (0 или 1 из вектора); \hat{y}_{ij} – предсказанная вероятность для истинного класса; $\log(\hat{y}_{ij})$ – перекрестная энтропия.

Чем больше предсказанная вероятность \hat{y}_{ij} для правильного класса, тем меньше потери. Функция потерь стремится к 0, если вероятность стремится к 1. К исходной функции потерь добавляется дополнительный член, который пропорционален сумме квадратов всех весов модели, умноженной на коэффициент регуляризации λ . L2-регуляризация уменьшает все веса, но не обнуляет полностью. Алгоритм обработки данных на каждой итерации обучения модели классификации представлен на рисунке 5.

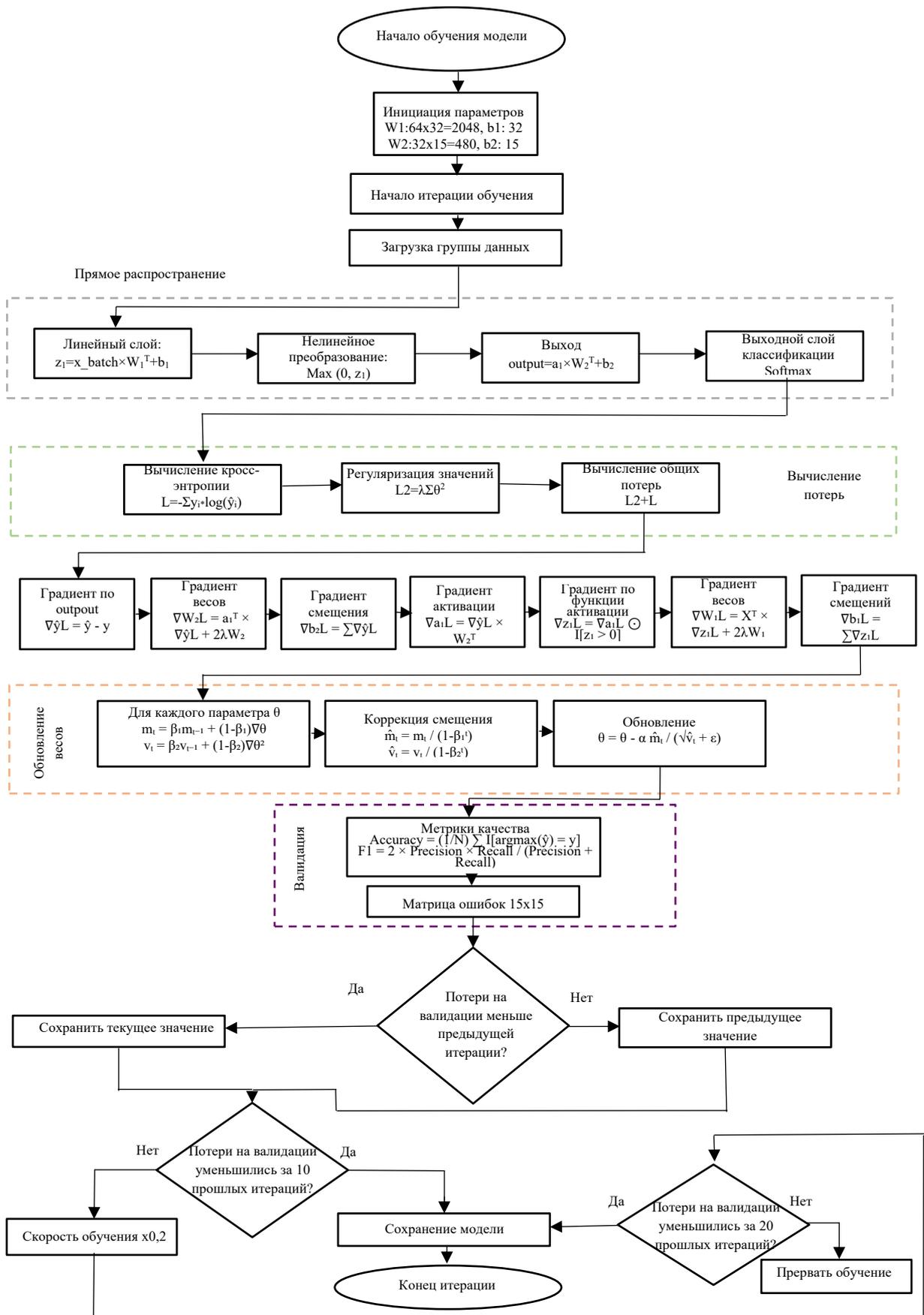


Рисунок 5 – Алгоритм обработки данных на каждой итерации обучения искусственной нейронной сети

Для оценки точности модели классификации дефектов используется категориальная кросс-энтропия L , определяющую расхождение классифицированных ответов нейронной сети от реальных значений термограммы:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{i,c} \log(\widehat{y}_{i,c}). \quad (18)$$

В ходе обучения и тестирования нейронной сети была получена точность работы нейросетевой модели классификации на валидационных данных 98%. На рисунке 6 представлены графики точности нейросетевой модели (в долях) и функции потерь (в долях) на обучающих и тестовых данных от количества эпох обучения.

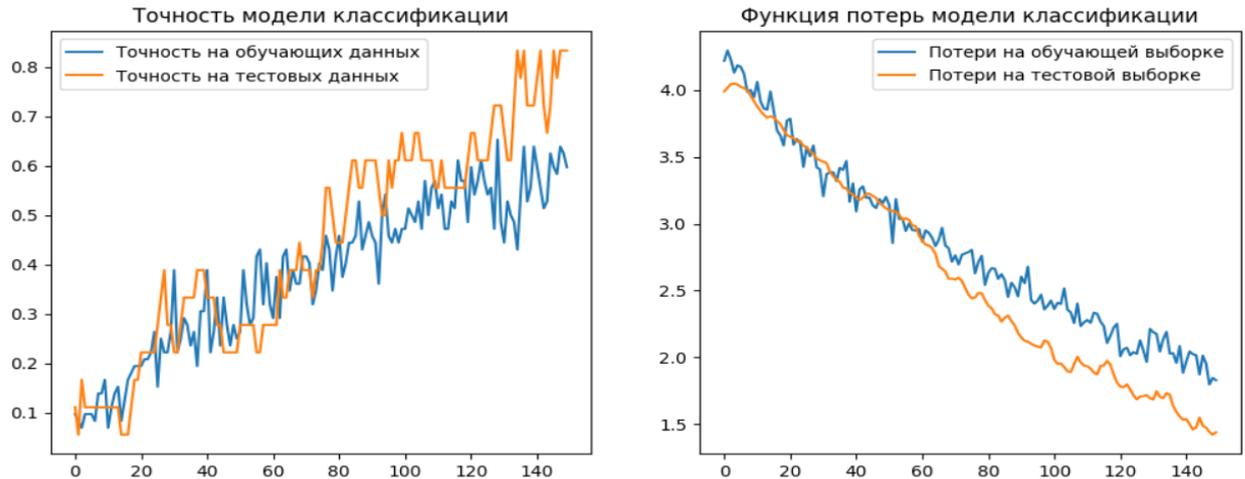


Рисунок 6 – Оценка точности работы модели классификатора на обучающей и тестовой выборках
Для оценки эффективности работы нейросетевой модели используются метрики, показывающие количество правильных откликов относительно всех заданных при валидации.

Возможные исходы в виде количества предсказанных значений, входящих в каждый класс дефектов и значений истинных меток составляют матрицу ошибок многоклассовой классификации, представленной на рисунке 7.

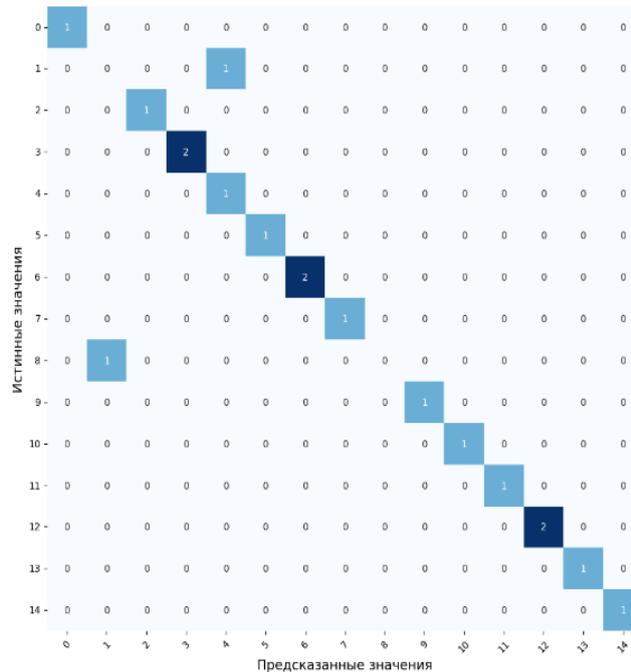


Рисунок 7 – Матрица ошибок при классификации дефектов печатного узла

В случаях, когда диагностируемый ПУ содержит несколько дефектов или есть подозрение на неточность проведенной классификации, программно-аппаратный комплекс выводит контролеру подсказку в виде вероятностей вхождения дефекта в каждый класс. Подсказка используется контролером при принятии окончательного диагностического решения по диагностируемому ПУ.

Верификация нейросетевой модели классификации дефектов печатного узла показала высокие результаты по метрикам точности, что делает ее пригодной для внедрения в автоматизированные процессы контроля и диагностики на базе тепловизионного метода.

В третьем разделе представлен алгоритм оценки влияния перегрева компонентов печатного узла на его надежность. В качестве показателя надежности печатного узла рассматривается средняя наработка до отказа составляющих его компонентов. Надежность печатного узла уменьшается с увеличением рабочей температуры, так что указанный в спецификации к компонентам параметр средней наработки до отказа, как правило, соответствует значению только при нормальных условиях окружающей среды. В основе предложенного алгоритма – модель, основанная на модификации фундаментального закона Аррениуса, который связывает химические изменения ведущие к деградации с тепловыми параметрами. Скорость химической реакции ведущей к деградации материалов задается уравнением коэффициента ускорения Аррениуса:

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (19)$$

где: k – константа скорости реакции, A – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура. При модификации уравнения Аррениуса применительно к электронным компонентам вместо универсальной газовой постоянной R , используется постоянная Больцмана k_b . Энергия активации измеряется в электрон-вольтах, постоянная Больцмана равна $8,617333262145 \cdot 10^{-5}$ эВ/К. Тогда, модифицированная для электронных компонентов формула коэффициента ускорения Аррениуса, будет иметь вид:

$$k = \exp\left[\left(E_a / k_b\right) \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right], \quad (20)$$

где k_b – постоянная Больцмана.

В качестве исходных данных для дальнейших расчетов используются данные, полученные при тепловизионном контроле печатного узла. Для обработки и расчетов берется 8 термограмм: 1 термограмма исследуемого печатного узла без перегревов в качестве эталонной и 7 термограмм печатного узла с различными значениями перегревов компонентов. Расчет параметров надежности производится на срок службы печатного узла и входящих в состав компонентов равный 10 годам.

При использовании математической модели оценки влияния перегрева компонентов печатного узла на его надежность вводятся следующие ограничения:

- каждой области термограммы соответствует какой-либо компонент печатного узла;
- печатный узел диагностируется на стадии производства и не имеет израсходованного ресурса;
- контроль печатного узла проводится в нормальных условиях, в противном случае необходимо использовать термокомпенсацию;
- компонент печатного узла считается греющимся в случае отклонения его измеренной температуры от эталонной $\geq 5^\circ\text{C}$.

Далее критичность перегрева компонента ПУ ранжируется следующим образом: $0-5^\circ\text{C}$ – перегрев отсутствует, либо незначительный; $5-10^\circ\text{C}$ – перегрев компонента; $\geq 10^\circ\text{C}$ – критичный перегрев компонента;

В нормальных условиях, коэффициент ускорения Аррениуса равен единице. При работе печатного узла нагрев компонентов приводит к увеличению величины коэффициента ускорения, что приводит к снижению показателей надежности печатного узла. На рисунке 8 приведен график распределения коэффициента ускорения Аррениуса для исследуемого печатного узла.

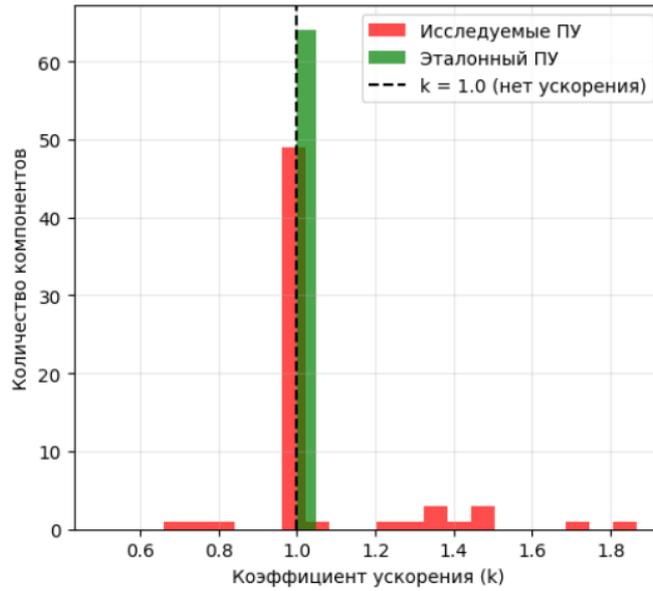


Рисунок 8 – Распределение коэффициента ускорения Аррениуса для исследуемого печатного узла
Функция надежности $R(t)$ – вероятность того, что компонент проработает безотказно до момента времени t

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (21)$$

Функция распределения отказов $F(t)$ – вероятность того, что отказ произойдет до момента t

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (22)$$

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание времени безотказной работы

$$T_{отказа} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (23)$$

Из формулы коэффициента ускорения для компонентов с учетом температур (20) определяется значение каждого i -го компонента:

$$k_i = 2^{\frac{T_{1i} - T_{2i}}{10}}. \quad (24)$$

Тогда средний коэффициент ускорения для компонента i по двум измерениям:

$$k_{cp(i)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_i. \quad (25)$$

Интенсивность отказов компонента i :

$$\lambda_i = \lambda_{теор.} \times k_i = \frac{1}{L_1} \times \exp \left[\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_{1i}} - \frac{1}{T_{2i}} \right) \right], \quad (26)$$

где: L_1 – номинальный срок службы компонента, $\lambda_{теор.}$ – теоретическое значение интенсивности отказов.

Для печатного узла как системы с последовательной схемой замещения надежность будет определяться как:

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \exp(-t \sum_{i=1}^n \lambda_i). \quad (27)$$

Множество критических компонентов с перегревом более 5°C от эталонного значения:

$$C = \{i : \Delta T_{\max}^{(i)} > 5^\circ\text{C}\}. \quad (28)$$

Вероятность безотказной работы компонента:

$$R(t) = P(T > t) = \int_0^t f(x) dx. \quad (29)$$

Интенсивность отказов компонента:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (30)$$

Исследуемый показатель надежности – наработка до отказа. Чувствительность надежности печатного узла к перегревам компонентов определяется как производная функции надежности по температуре:

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial T} = \frac{\partial R_{sys}}{\partial \lambda_{sys}} \times \frac{\partial \lambda_{sys}}{\partial T}. \quad (31)$$

$$\frac{\partial \lambda_{sys}}{\partial T} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda_i}{\partial T} = \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \times \frac{E_a}{k_b * T_i^2} \right] \quad (32)$$

$$\frac{\partial R_{sys}}{\partial T} = \left[-t \times R_{sys}(t) \right] \times \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i \times \frac{E_a}{k_b \times T_i^2} \right] \quad (33)$$

Общая формула оценки влияния температуры компонентов на наработку на отказ печатного узла имеет вид:

$$T_{отказа sys} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{L_i} \times \exp\left(\frac{E_a}{k_b} \left(\frac{1}{T_{1i}} - \frac{1}{T_{2i}}\right)\right) \right]}. \quad (34)$$

где: $T_{отказа sys}$ – средняя наработка на отказ системы.

На рисунке 9 представлена карта перегрева областей исследуемого печатного узла. На рисунке 10 – оценка величины наработки на отказ компонентов печатного узла при значениях таких перегревов.

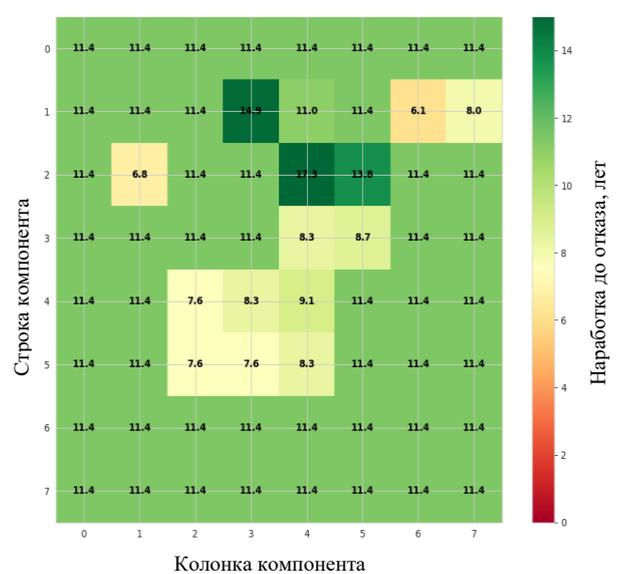
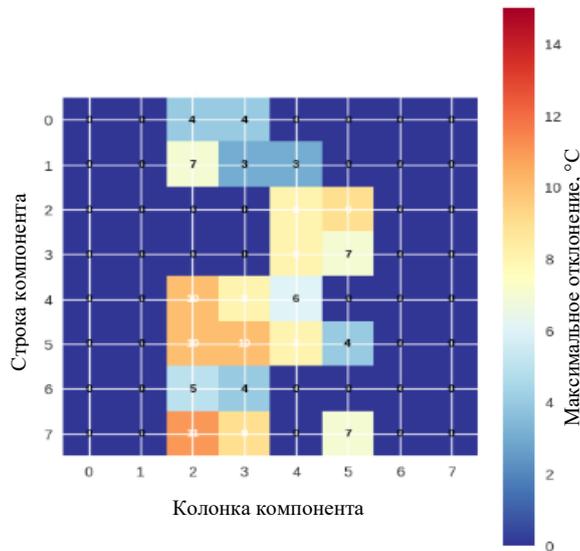


Рисунок 9 – Тепловая карта исследуемого печатного узла

Рисунок 10 – Оценка величины наработки на отказ перегретых компонентов

Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов на наработку на отказ ПУ представлен на рисунке 11.

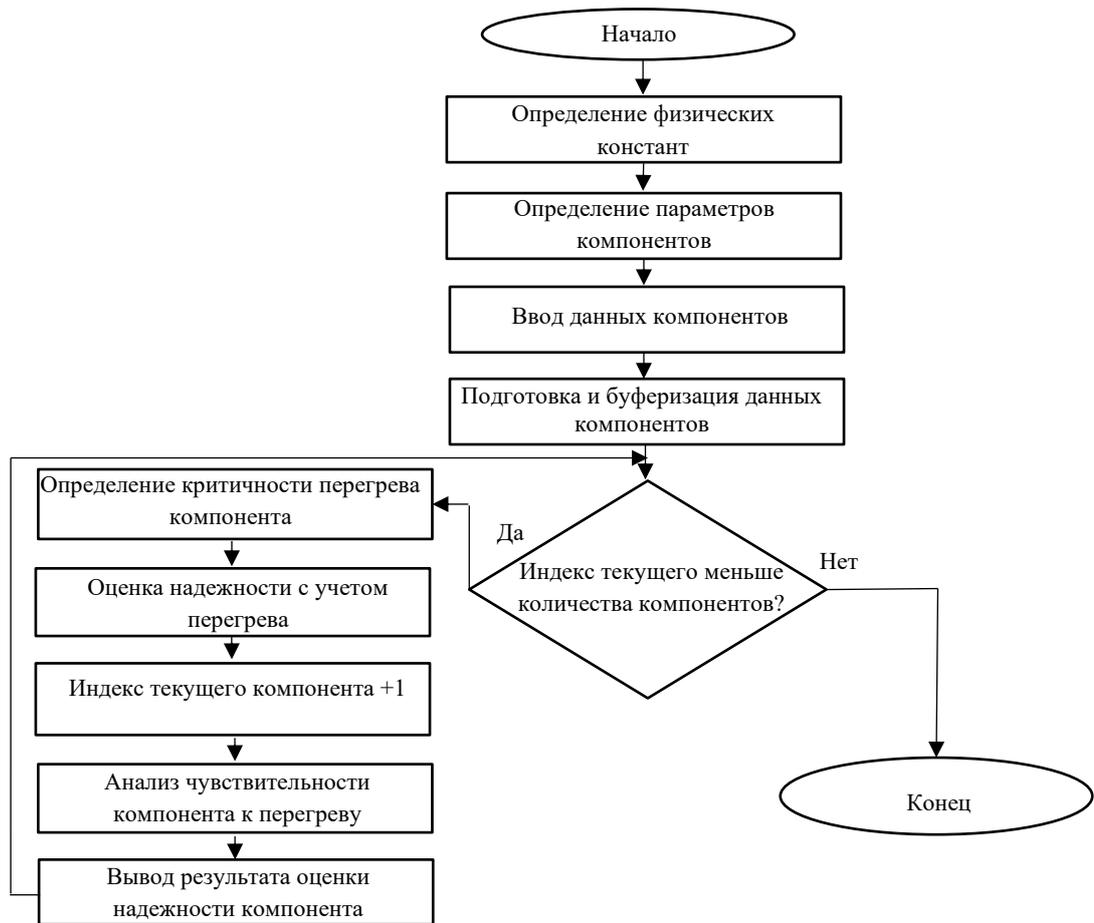


Рисунок 11 – Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов на надежность ПУ

В таблице 3 представлены сводные данные параметров надежности печатного узла от значений отклонений температур от идеальных значений, выявленных при тепловизионном контроле.

Таблица 3 – Сводная таблица показателей надежности при изменении температуры компонентов

Исследуемый ПУ	ΔT макс, °C	Компонентов с перегревом, шт.	λ системы, $\times 10^{-6}$	Наработка до отказа, часы	Наработка до отказа, годы	R, % на 10 лет	Снижение надежности, %
Эталонный ПУ	0	0	11,94	83,800	9,56	41,0	0
ПУ 1	+10	6	17,91	55,846	6,37	20,8	-49,3
ПУ 2	+8	4	17,87	55,960	6,39	20,9	-49,0
ПУ 3	+7	1	12,64	79,114	9,03	38,5	-6,1
ПУ 4	0	0	11,94	83,800	9,56	41,0	0
ПУ 5	0	0	11,94	83,800	9,56	41,0	0
ПУ 6	0	0	11,94	83,800	9,56	41,0	0
ПУ 7	+11	2	14,72	67,935	7,75	31,4	-23,4

Разработанный в работе алгоритм, основанный на модифицированной модели Аррениуса, позволяет повысить точность оценки надежности печатного узла по результатам измерений отличий реальных температур электронных компонентов от эталонных значений в нормальных условиях работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате диссертационного исследования решена важная научно-практическая задача, направленная на повышение оперативности процесса контроля и диагностики неисправностей печатных узлов за счет разработки нового программно-аппаратного комплекса, реализующего тепловизионный метод неразрушающего контроля.

В рамках выполнения поставленных задач получены следующие научные результаты:

1. Программно-аппаратный комплекс реализующий тепловизионный метода неразрушающего контроля, **отличается от известных тем**, что позволяет выявлять скрытые

дефекты печатных узлов и обеспечивает повышение оперативности проведения контроля и диагностики печатных узлов до 20%, в сравнении с ручным методом;

2. Математическая модель обработки термограммы **отличается от известных тем**, что позволяет повысить оперативность выявления дефектов печатного узла при тепловизионном контроле и диагностике до 40% и сократить количество ошибок диагностирования, связанных с влиянием человеческого фактора на 15%;

4. 3. Алгоритм оценки влияния перегрева компонентов **отличается от известных тем**, что учитывает отличия температуры компонентов от эталонных значений и позволяет оценить изменение надежности печатного узла. Разработанный алгоритм позволяет повысить точность оценки надежности печатного узла на 5-7% оценив учет влияния реальных температур компонентов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Чупринова, О.В. Автоматизация теплового метода выходного контроля радиоэлектронных изделий / О.В. Чупринова // Электроника: наука, технологии, бизнес. 2025. №1. С.132-135.

2. Чупринова, О.В. Программно-аппаратный комплекс для интеллектуальной диагностики неисправностей электронных сборочных узлов / О.В. Чупринова, Я.А. Щеников // Электроника: наука, технологии, бизнес. 2025. №1. С.128-131.

3. Чупринова, О.В. Оценка возможности внедрения интеллектуальной системы контроля и диагностики печатных узлов на базе тепловизионного метода / О.В. Чупринова, Я.А. Щеников, Е.А. Фролова, Н.А. Жильникова // Радиотехника. 2025. Т.89. №8. С. 53-59.

4. Чупринова, О.В. Модель оценки количества возможных неисправностей в печатном узле / О.В. Чупринова // Электроника: наука, технологии, бизнес 2025. №8. С.92-100.

5. Чупринова, О.В. Модель оценки влияния перегрева компонентов на надежность печатного узла / О.В. Чупринова // Электроника: наука, технологии, бизнес. 2025. №10. С.120-122.

6. Чупринова, О.В. Модель классификации дефектов печатных узлов на базе тепловизионного метода контроля О.В. Чупринова // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. № 6. С. 89-93.

Статьи в других изданиях и материалы конференций

7. Чупринова, О.В. Упрощенная модель коэффициента ускорения для оценки срока службы изделий радиоэлектроники / О.В. Чупринова // Инновационное приборостроение. 2025. Т. 4, № 6. С. 20-23.

8. Чупринова, О.В. Преобразование уравнения Аррениуса для учета перегревов компонентов печатного узла / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов V Международного форума, Санкт-Петербург, 03 декабря 2025 года, в 2 ч. Ч.1. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 506-507.

9. Чупринова, О.В. Средство технического диагностирования на базе тепловизионного метода неразрушающего контроля / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов V Международного форума, Санкт-Петербург, 03 декабря 2025 года, в 2 ч. Ч.1. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 503-505.

10. Чупринова О.В. Влияние температуры компонентов на надежность печатного узла /О.В. Чупринова// Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов V Международного форума, Санкт-Петербург, 03 декабря 2025 года, в 2 ч. Ч.1. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 501-502.

11. Чупринова, О.В. Архитектура хранилища данных для диагностики неисправностей радиоэлектронной аппаратуры / О.В. Чупринова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 294-295.

12. Чупринова, О.В. Введение предупреждающих действий на основании данных о диагностике радиоэлектронных изделий / О.В. Чупринова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 296-297.

13. Чупринова, О.В. Методы оценки достоверности диагностики в многоклассовой классификации / О.В. Чупринова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб.

статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 298-299.

14. Чупринова, О. В. Архитектура базы знаний для анализа возникновения дефектов печатных узлов / О. В. Чупринова, Я. А. Щеников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3(125). – С. 189-194.

15. Чупринова, О. В. методика оценки результативности процесса тепловой диагностики изделий радиоэлектронной техники / О. В. Чупринова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 35-38.

16. Чупринова, О.В. Применение метода логистической регрессии для бинарной классификации отказов оборудования / О.В. Чупринова // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 6. С. 68-71.

17. Чупринова, О.В. Оценка точности автоматизированных измерений / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года, в 2 ч. Ч.2. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 225-226.

18. Чупринова О.В. Анализ временных рядов для контроля состояния средств измерений / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года, в 2 ч. Ч.2. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 227-228.

19. Чупринова, О.В. Дистанционный метод теплового контроля радиоэлектронной аппаратуры / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года, в 2 ч. Ч.2. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 85-86.

20. Чупринова, О.В. Возможность автоматизации процесса измерений и обработки данных с помощью искусственного интеллекта / О.В. Чупринова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 457-458.

21. Чупринова, О.В. Метод машинного обучения для идентификации показаний приборов / О.В. Чупринова // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов III Международного форума, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года, Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 8.

22. Чупринова, О. В. Архитектура базы данных для автоматизированных измерений / О. В. Чупринова, А. С. Степашкина // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 25-28.

23. Степашкина, А. С. Облачные технологии как инструмент метрологического обеспечения предприятия / А. С. Степашкина, О. В. Чупринова // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докладов Третьей Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. – С. 224-225.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

24. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «СканСим» / О.В. Чупринова, Я.А. Щеников // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025680599. Заявка №2025680012 от 07.08.2025.

25. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа для классификации дефектов печатных узлов при проведении тепловизионного контроля» / О.В. Чупринова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025685604. Заявка №2025685386 от 25.09.2025.