

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 536.521.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Б. С. Бейсембаева¹, Н. В. Горячев², А. В. Лысенко³, В. А. Трусков⁴, Н. К. Юрков⁵

¹ Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

^{2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ b.beisembayeva@agakaz.kz, ² ra4foc@yandex.ru, ³ luysenko_av@bk.ru, ⁴ kipra@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В процессе проектирования, тестирования и использования электронных устройств часто обязательным является применение специализированных температурных измерительных приборов. В зависимости от стадии жизненного цикла электронного оборудования могут использоваться различные типы измерителей, основанные на разных физических принципах работы. Современная метрология выделяет два фундаментальных подхода к измерению температуры – это контактный метод (с непосредственным взаимодействием с объектом) и бесконтактный метод (неразрушающий контроль). В рамках данного исследования основное внимание сосредоточено на бесконтактной методике измерений, причем проводится детальный анализ двух различных типов бесконтактных измерительных устройств, каждый из которых обладает уникальными характеристиками и областями применения. *Материалы и методы.* В основе исследования лежат теоретические и практические аспекты процесса неразрушающего контроля температуры и методология теплофизического проектирования радиоэлектронной аппаратуры и приборов. *Результаты и выводы.* Подробно рассмотрены достоинства и недостатки пирометрических и тепловизионных бесконтактных измерителей температуры. Приведен пример современного интегрального пирометрического измерителя, а также рассмотрены два самых распространенных электронных прибора для бесконтактного проведения температурных измерений – пирометр и тепловизор. В заключении авторы обосновывают применение информационно-измерительной системы неразрушающего контроля температуры при конструировании радиоэлектронных средств, совместно с программными средствами теплофизического проектирования.

Ключевые слова: тепло, поток, излучение, температура, объект, пирометр, тепловизор

Для цитирования: Бейсембаева Б. С., Горячев Н. В., Лысенко А. В., Трусков В. А., Юрков Н. К. Средства реализации бесконтактного способа измерения температуры при неразрушающем контроле тепловых режимов радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 47–54. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

MEANS OF IMPLEMENTING A NON-CONTACT METHOD FOR MEASURING TEMPERATURE DURING NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THERMAL MODES OF ELECTRONIC MEANS

B.S. Beisembayeva¹, N.V. Goryachev², A.V. Lysenko³, V.A. Trusov⁴, N.K. Yurkov⁵

¹ Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

^{2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

¹ b.beisembayeva@agakaz.kz, ² ra4foc@yandex.ru, ³ luyenko_av@bk.ru, ⁴ kipra@mail.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* In the process of designing, testing and using electronic devices, the use of specialized temperature measuring devices is often mandatory. Depending on the stage of the life cycle of electronic equipment, different types of meters based on different physical principles of operation can be used. Modern metrology identifies two fundamental approaches to temperature measurement: the contact method (with direct interaction with an object) and the non-contact method (non-destructive testing). This study focuses on contactless measurement techniques, and provides a detailed analysis of two different types of contactless measuring devices, each with unique characteristics and applications. *Materials and methods.* The research is based on the theoretical and practical aspects of the process of non-destructive temperature control and the methodology of thermophysical design of electronic equipment and devices. *Results and conclusions.* The advantages and disadvantages of pyrometric and thermal non-contact temperature meters are considered in detail, an example of a modern integrated pyrometric meter is given, and two of the most common electronic devices for non-contact temperature measurements are considered – a pyrometer and a thermal imager. In conclusion, the authors substantiate the use of an information and measuring system for non-destructive temperature control in the design of radioelectronic devices, together with software tools for thermophysical design.

Keywords: heat, flow, radiation, temperature, object, pyrometer, thermal imager

For citation: Beisembayeva B.S., Goryachev N.V., Lysenko A.V., Trusov V.A., Yurkov N.K. Means of implementing a non-contact method for measuring temperature during non-destructive testing of thermal modes of electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2025;(2):47–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-5

Введение

Современные тенденции развития радиоэлектронной аппаратуры характеризуются неуклонным сокращением габаритов как готовых устройств, так и их компонентной базы. Этот процесс микроминиатюризации существенно усложняет задачу эффективного теплоотвода от нагреваемых элементов конструкции. В ответ на эти технологические вызовы разрабатываются инновационные системы терморегулирования, использующие как принципиально новые физические подходы, так и модернизированные традиционные решения, в частности – усовершенствованные системы воздушного охлаждения, основанные на конвекционном теплообмене. Для объективной оценки эффективности таких охлаждающих систем требуется точный и достоверный температурный мониторинг их рабочих параметров в реальных условиях эксплуатации. На практике это реализуется посредством контактных измерительных систем контроля температуры. Однако современные контактные методики температурных измерений имеют существенные технологические ограничения, что в ряде случаев снижает достоверность проводимых исследований характеристик систем охлаждения и затрудняет получение репрезентативных результатов.

Ключевые проблемы существующих контактных методов включают:

- ограниченную точность измерений в условиях микроминиатюризации;
- возможность искажения температурного поля объекта измерения;
- технологические сложности установки датчиков на микрообъекты;
- ограниченный диапазон рабочих температур;
- недостаточную скорость реакции на температурные изменения.

Эти факторы обуславливают необходимость разработки новых подходов к температурному мониторингу, сочетающих преимущества контактных и бесконтактных методов измерений.

Габариты современных электронных компонентов зачастую сопоставимы или даже значительно меньше размеров стандартных контактных температурных датчиков, что неизбежно приводит к искажению результатов измерений. Хотя бесконтактные методы измерения температуры также имеют определенные ограничения [1], главным из которых является сравнительно меньшая чувствительность из-за зависимости от уровня теплового излучения объекта. В рамках данной работы

основное внимание уделено анализу бесконтактных методов температурного контроля, основанных на современных средствах и технологиях измерений, а также практическим аспектам реализации термического мониторинга [2, 3].

Постановка проблемы. Проблемой, на решение которой направлено исследование, является обоснование выбора средств неразрушающего контроля и измерения температуры деталей и узлов радиоэлектронных средств.

Теоретическая база бесконтактного измерения температур

Любое физическое тело обладает способностью излучения электромагнитной энергии, на интенсивность которого влияет его температура. В свою очередь значение температуры можно вычислить, исходя из количественных характеристик теплового потока. Именно на этом основывается бесконтактный метод измерения температуры. Суть его заключается в следующем. Исследуемый источник тепла излучает в окружающую атмосферу тепловой поток, который на определенном расстоянии улавливается датчиком-приемником, чувствительным элементом прибора для измерения температуры на расстоянии. Основных видов таких приборов два: пирометр и тепловизор.

Точность измерения напрямую зависит от множества составляющих:

- 1) объект, температура которого измеряется на расстоянии, должен находиться в прямой видимости теплового датчика;
- 2) датчику не должно ничего препятствовать на пути его луча к изучаемому объекту. Разнообразные предметы, атмосферные условия (туман, пыль, пар) могут негативно сказаться на точности измерения. Также следует уделить особое внимание чистоте оптических компонентов прибора, они не должны быть никак загрязнены;
- 3) на температурные показания влияют структура и физическое состояние исследуемой поверхности. Данное влияние четко прослеживается на рис. 1, на котором приводятся характеристики разных оттенков: черного, серого и цветного.

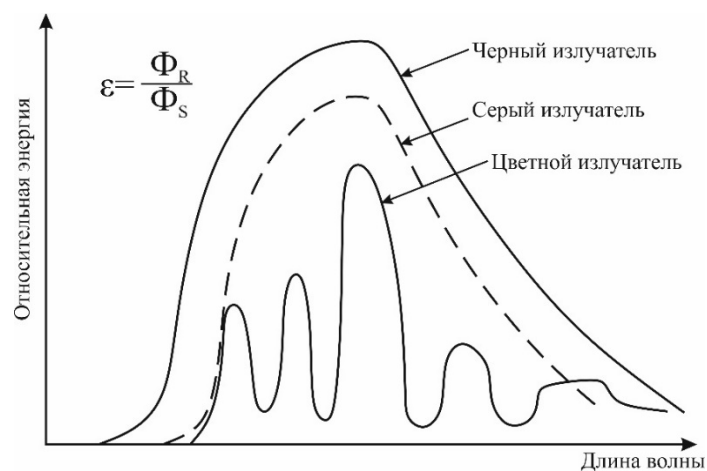


Рис. 1. Коэффициент излучения материала

Инфракрасное излучение черного излучателя Φ_S выступает в качестве исходной точки, равной единице, от которой ведется вычисление коэффициентов излучения других веществ и физических тел Φ_R . Исходя из принятого значения, все другие показания автоматически становятся равными меньше исходной величины. На данном принципе основывается работа всех приборов для бесконтактного измерения температуры. Другими словами, в реальных условиях эксплуатации все пирометры и тепловизоры выводят конечное значение температуры, вычисленное на основе идеального показателя. Не стоит забывать и о том, что на точность измерения, помимо перечисленных выше составляющих, оказывают влияние реальная температура изучаемого тела, а также длина волны инфракрасного спектра, которая и является важнейшей составляющей замера.

Таким образом, бесконтактные методы измерения температуры основаны на регистрации теплового излучения объектов без физического контакта с ними. Они нашли широкое применение в промышленности, медицине, энергетике и научных исследованиях. Выделяют следующие способы бесконтактного измерения температуры:

- 1) пирометрия (инфракрасное измерение температуры);
- 2) термография (тепловизоры);
- 3) оптические методы (спектроскопия, интерферометрия);
- 4) акустические методы (ультразвуковая термометрия);
- 5) радиометрические методы (микроволновая термометрия).

Принцип построения пирометрического измерителя

Обобщенно состав пирометрических измерителей или пирометров можно представить четырьмя блоками:

- 1) приемного ИК-датчика, оснащенного оптикой и системой зеркал;
- 2) набора электронных компонентов для принятия и обработки информации;
- 3) экрана для отображения полученных значений;
- 4) кнопок включения и управления прибором.

Измерение температуры в пирометре происходит в два этапа. Сначала система оптики «ловит» тепловой поток и с помощью зеркального механизма отправляет его на датчик, производящий преобразование тепла в электрический сигнал. Затем данный сигнал передается в главное электронное устройство, в котором производятся все необходимые вычисления и вывод полученного значения на экран пирометра.

В первом приближении можно предположить, что измерение температуры с помощью пирометра – это очень просто и все, что нужно сделать, это навести его на объект измерения и нажать на кнопку. Отчасти это верно, если точность измерения не имеет большого значения и погрешность измерения в несколько градусов не является проблемой [4]. Однако если необходимо получить максимально точные показания, то необходимо учесть не только описанные в статье факторы, но и расстояние от прибора до изучаемого объекта (рис. 2) [5]. Последнее, в свою очередь, зависит от оптического разрешения устройства.

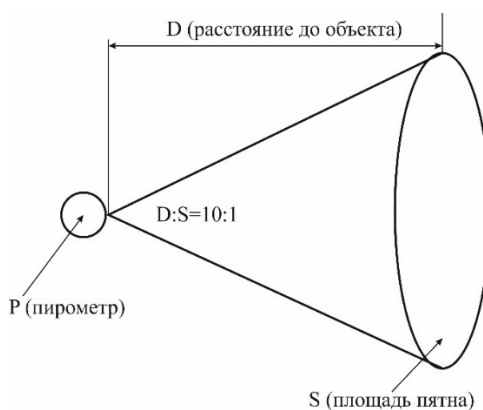


Рис. 2. Оптическое разрешение пирометра

Разновидностей моделей пирометров и их производителей в мире достаточно много, и каждый из них желает привнести в свой образец что-то уникальное, что выгодно выделило бы его устройство на фоне остальных. Одним из результатов подобных изысканий стали различные углы обзора в разных моделях. Для комфорта использующего прибор человека данная характеристика является отношением расстояния до объекта к площади пятна, образующегося на поверхности этого объекта при непосредственном измерении [6]. Так как обе величины находятся в прямой зависимости друг от друга, точность получаемых значений тесно связана как с точностью наведения на объект, так и с правильностью подбора расстояния для определения площади измерения. Правильно подобрав эти два параметра, обработка тепловых потоков системой оптики будет производиться максимально корректно, на нее не будут влиять посторонние, оказавшиеся рядом, предметы и другие отвлекающие факторы. С целью упростить вычисления и подбор правильных расстояний простыми пользователями большинство моделей пирометров в наши дни оснащаются лазерными указателями, проецирующими небольшую точку на объекте измерения, что, несмотря на всю простоту решения, в разы упрощает использование прибора [7].

Ранее реализация пирометров представляла достаточно сложную инженерную работу. Это прежде всего связано со сложностью оптической системы этих устройств. Между тем прогресс в микроэлектронике и обработке сигналов позволил сделать эти приборы более доступными.

Ярким представителем пирометрических измерителей является инфракрасный термометр MLX90614. Этот интегральный измеритель выполнен в корпусе ТО-39, имеет четыре вывода. В верхней грани находится кремниевая линза, предназначенная для фокусировки регистрируемого излучения. В конструкцию данного ИК-термометра может включаться рефракционный фильтр, предназначенный для ограничения угла обзора чувствительного элемента (рис. 3).

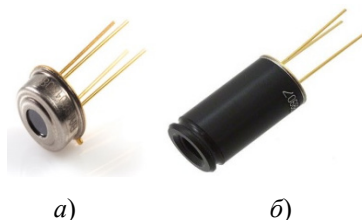


Рис. 3. Внешний вид измерителя MLX90614:
а – без рефракционного фильтра; б – с рефракционным фильтром

Данный пирометрический измеритель может измерять температуру в диапазоне от $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $380\text{ }^{\circ}\text{C}$. Питание осуществляется от постоянного тока напряжением от 2,6 до 5,5 В. Имеет в своем составе энергонезависимую память (EEPROM), мощный цифровой сигнальный процессор и 16-битный АЦП. Связь между измерителем и устройством обработки может осуществляться посредством шины I2C или с использованием широтно-импульсной модуляции. Кроме того, у MLX90614 имеется два цифровых фильтра.

Принцип построения тепловизионного измерителя

Большинство людей привыкло думать, что устройство тепловизора в разы сложнее устройства пирометра, однако в общем виде отличий у них не так уж и много. Основным и главным из них является гибридная микросхема, работающая в качестве приемника теплового излучения [8]. Инфракрасное излучение воспринимается эпитаксиальным слоем, обладающим высокой фоточувствительностью, и проникает дальше через сильнолегированную подложку. Схематичное изображение ИК-приемника с гибридной микросхемой представлено на рис. 4.

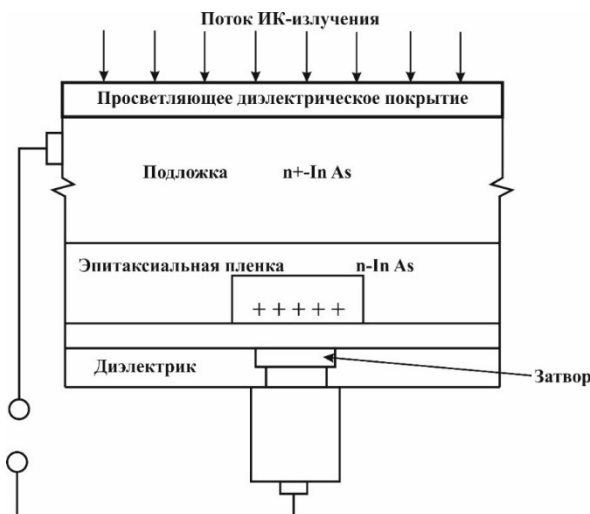


Рис. 4. Устройство приемника тепловизора

Точность измерения в тепловизорах, оснащенных матричными детекторами, достигает 0,1 град., что является очень большим преимуществом перед более простыми по своей конструкции пирометрами. Такая точность зачастую и не требуется обычным пользователям, поэтому тепловизоры применяются как в стационарных лабораторных установках [9, 10], так и в переносном виде [6].

Существуют, конечно, и ручные тепловизоры, принцип работы с которыми не сильно отличается от работы с пирометром. Информация также выводится на встроенный экран, но не в виде сухих цифр, а в виде мультимедийного изображения, на котором виден объект исследования и все его зоны с разными степенями нагрева. Рядом с изображением всегда присутствует шкала, позволяющая сопоставить видимые на дисплее цвета с реальными показаниями температуры. Суммируя все вышесказанное, можно с уверенностью сказать, что тепловизор позволяет провести более углубленный анализ всех составляющих исследуемого объекта, в то время как пирометр лишь покажет примерную температуру в области, на которую направлен его датчик.

Заключение

Приведенные в данной работе устройства являются самыми распространенными устройствами для бесконтактного измерения температуры. Оба они мобильны, обладают встроенными аккумуляторами и небольшими габаритами, чтобы их комфортно можно было использовать в ручном режиме и при необходимости взять с собой на удаленное место работы.

Сфера применения данных устройств существенно шире простого измерения тепловых параметров. В частности, современный ассортимент включает специализированные низкотемпературные модификации, обладающие ключевыми особенностями, обеспечивающими преимущества перед контактным измерением температур. Сравнение различных способов бесконтактного измерения температур приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение способов измерения температур

Метод	Диапазон температур	Точность	Применение
Пирометрия	–50 °С ... +3000 °С	±1...5 %	Промышленность, медицина
Термография	–20 °С ... +2000 °С	±2 %	Диагностика, энергетика
Оптические	100 °С ... 5000 °С	Высокая	Наука, высокотемпературные процессы
Акустические	–50 °С ... +500 °С	±1 °С	Жидкости, газы
Радиометрические	–100 °С ... +1000 °С	±2...5 %	Метеорология, медицина

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что пирометры и тепловизоры как устройства, реализующие бесконтактный способ измерения температуры, являются крайне востребованными приборами. Между тем их недостатки могут существенно ограничить сферу их применения, в частности, при исследовании новых конструкций радиоэлектронной аппаратуры, в которой прямой доступ к тепловыделяющим элементам закрыт элементами конструкции или другими деталями [10, 11].

В этих условиях остро встает необходимость создания универсального измерителя температур, объединяющего как бесконтактный, так и контактный способ измерения, подробно рассмотренный в работах [9, 12]. Для создания подобного измерителя необходимо использовать методологию построения проблемно-ориентированных информационно-измерительных систем [13]. Это позволит обеспечить единство измерений при использовании нескольких измерительных каналов одной величины, но функционирующих на разных физических принципах. Исходя из этого, на начальных стадиях конструирования и проектирования радиоэлектронных средств, содержащих теплонагруженные элементы, подобная информационно-измерительная система станет основным инструментом, позволяющим путем натурного эксперимента обосновать конструкторские решения. Такая система, логично дополняя программные средства теплофизического проектирования [14], расширяет потенциальные возможности конструктора.

Список литературы

1. Proshin A., Melnichuk A., Gerasimova Yu., Yurkov N. Principle of operation and means of implementing a non-contact method of temperature measurement // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сб. тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2020 г.) / под ред. С. У. Увайсова. М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2020. Р. 440–444. EDN: KZQIGD
2. Семенцов С. Г., Гриднев В. Н., Сергеева Н. А. Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 6–10.

3. Гарелина С. А., Латышенко К. П., Фрунзе А. В. Сравнительный анализ энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. Т. 1, № 8. С. 417–420.
4. Гуляев И. П., Долматов А. В., Бересток Г. М. Оптимизация температурных измерений спектральным пирометром на базе MATLAB // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. 2016. Т. 1, № 6. С. 201–207.
5. Веснин В. И., Прилепский А. С. Погрешности измерения температуры инфракрасным пирометром // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность : сб. ст. Самара, 2017. С. 177–181.
6. Семешина Н. И., Гришина С. Ю. Тепловизор в строительстве // Студенчество России: век XXI : сб. материалов III молодеж. науч.-практ. конф. Орел, 2016. С. 311–312.
7. Кабаева О. Н., Садовников И. В. Тепловизор в современном мире // Научная дискуссия: вопросы технических наук. 2016. № 2. С. 76–81.
8. Кошкин С. Ю. Тепловизор. Критерии выбора // Водоочистка. 2019. № 7. С. 47–53.
9. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1984. 247 с.
10. Горячев Н. В. Тепловая модель сменного блока исследуемого объекта // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 263. EDN: PCBXGH
11. Rybakov I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. [et al.]. Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board // Journal of Physics: Conference Series (Tomsk, September 21–26, 2016). Bristol : IOPscience, 2017. P. 012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130 EDN: YVQINH
12. Горячев Н. В., Юрков Н. К. Совершенствование структуры современного информационно-измерительного комплекса // Инновационные информационные технологии. 2013. № 2-3. С. 433–436. EDN: QCWBSP
13. Горячев Н. В., Граб И. Д., Лысенко А. В., Юрков Н. К. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2011. Т. 2. С. 119–120. EDN: NWZBOT
14. Горячев Н. В., Юрков Н. К. Программные средства теплофизического проектирования печатных плат электронной аппаратуры // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 128–130. EDN: RHJJSJ

References

1. Proshin A., Melnichuk A., Gerasimova Yu., Yurkov N. Principle of operation and means of implementing a non-contact method of temperature measurement. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: sb. tr. XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Sochi, 1–10 oktyabrya 2020 g.) = Innovative, information and communication technologies : proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference (Sochi, October 1–10, 2020)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo sodeystviya sokhraneniya istoricheskogo i nauchnogo naslediya VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo, 2020:440–444. EDN: KZQIGD
2. Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Investigation of the influence of temperature conditions on the reliability of electronic equipment by thermal imaging methods. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;2:6–10. (In Russ.)
3. Garelina S.A., Latyshenko K.P., Frunze A.V. Comparative analysis of energy pyrometers and spectral ratio pyrometers. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy = Fire safety: problems and prospects*. 2017;1(8): 417–420. (In Russ.)
4. Gulyaev I.P., Dolmatov A.V., Berestok G.M. Optimization of temperature measurements with a spectral pyrometer based on MATLAB. *Mnogoyadernye protsessory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov = Multi-core processors, parallel programming, FPGAs, signal processing systems*. 2016;1(6):201–207. (In Russ.)
5. Vesnin V.I., Prilepskiy A.S. Errors in measuring temperature with an infrared pyrometer. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Estestvennye nauki i tekhnosfernaya bezopasnost': sb. st. = Traditions and innovations in construction and architecture. Natural sciences and technosphere safety : collection of articles*. Samara, 2017:177–181. (In Russ.)
6. Semeshina N.I., Grishina S.Yu. Thermal imager in construction. *Studenchestvo Rossii: vek XXI: sb. materialov III molodezh. nauch.-prakt. konf. = Russian students: Century XXI: collection of materials of the III youth. scientific and practical conference*. Orel, 2016:311–312. (In Russ.)
7. Kabaeva O.N., Sadovnikov I.V. Thermal imager in the modern world. *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk = Scientific discussion: issues of technical sciences*. 2016;(2):76–81. (In Russ.)
8. Koshkin S.Yu. Thermal imager. Selection criteria. *Vodoochistka = Water treatment*. 2019;(7):47–53. (In Russ.)
9. Dul'nev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature: uchebnik dlya vuzov = Heat and mass transfer in radioelectronic equipment : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 1984:247. (In Russ.)
10. Goryachev N.V. Thermal model of a replaceable unit of the object under study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:263. (In Russ.). EDN: PCBXGH

11. Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I.I. et al. Application of the model of the printed circuit board with regard to the topology of external conductive layers for calculation of the thermal conditions of the printed circuit board. *Journal of Physics: Conference Series (Tomsk, September 21–26, 2016)*. Bristol: IOPscience, 2017:012130. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012130 EDN: YVQINH
12. Goryachev N.V., Yurkov N.K. Improving the structure of a modern information and measurement complex. *Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii = Innovative information technologies*. 2013;(2-3):433–436. (In Russ.). EDN: QCWBSP
13. Goryachev N.V., Grab I.D., Lysenko A.V., Yurkov N.K. The structure of the automated laboratory for heat sink research. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2011;2:119–120. (In Russ.). EDN: NWZBOT
14. Goryachev N.V., Yurkov N.K. Software tools for thermophysical design of printed circuit boards of electronic equipment. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2013;(10):128–130. (In Russ.). EDN: RHJJSJ

Информация об авторах / Information about the authors

Бакытгуль Сагимжановна Бейсембаева

старший преподаватель
кафедры авиационной техники и технологий,
Академия гражданской авиации
(Казахстан, г. Алматы, ул. Ахметова, 44)
E-mail: b.beisembayeva@agakaz.kz

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Алексей Владимирович Лысенко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: luysenko_av@bk.ru

Василий Анатольевич Трусов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Bakytgul S. Beisembayeva

Senior lecturer of the sub-department
of aviation engineering and technology,
Academy of Civil Aviation
(44 Akhmetov street, Almaty, Kazakhstan)

Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Aleksey V. Lysenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Vasily A. Trusov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025

Принята к публикации/Accepted 05.05.2025