

УДК 621.384.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

© А. Р. Новоселов¹, М. А. Демьяненко², И. В. Марчишин²,
А. В. Гусаченко¹, А. О. Морозов¹, И. В. Рогова¹, Б. Н. Новгородов¹,
П. А. Алдохин¹, С. М. Чурилов¹

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

E-mail: novoselov@oesd.ru

Представлены результаты исследования систем дистанционного измерения температур промышленных электроустановок на основе болометрических фотоприёмников. Рассмотрены фотоприёмные тепловизоры «смотрящего» типа и специализированный радиометрический тепловизор с внутренними датчиками температур и калибровочными шторками. Определено наилучшее покрытие для калибровочных шторок с минимальным уровнем отражения ИК-излучения от их поверхности (интегральный коэффициент отражения в спектральном диапазоне 8–14 мкм составляет не более 5,8 %). Дано математическое описание процесса калибровки тепловизора «смотрящего» типа в широкой области изменения температур его компонент и окружающей среды. Проанализированы требования к тепловизору для систем дистанционного диагностирования температур промышленных установок.

Ключевые слова: болометрическая матрица, тепловизор, тепловая диагностика оборудования, персональный компьютер.

DOI: 10.15372/AUT20230213

Введение. В последние десятилетия получили развитие фотоприёмные системы, чувствительные в спектральном инфракрасном диапазоне (ИК), «смотрящего» типа (системы FLIR — forward looking infrared), в которых тепловое излучение от объектов поступает на многоэлементные матричные фотоприёмники [1]. В данных системах формируется качественное контрастное изображение рассматриваемых объектов. Для измерения температур объектов (с точностью не хуже $\pm 1-2$ °С) требуется несколько другой подход в построении радиометрического тепловизора (РТ) — прибора для визуализации объектов и измерения их температур. Физические модели теплового контроля и обработки данных отражены, например, в [2].

Цель данной работы — представить полную информацию результатов исследования систем дистанционного измерения температур промышленных электроустановок на основе болометрических фотоприёмников с выводом потока информации на персональный компьютер. По результатам исследования разных покрытий шторок выбрано покрытие радиометрического тепловизора с минимальным отражением ИК-излучения (взвесь частиц углерода в криогенностойком лаке). Найденные эмпирические соотношения, учитывающие паразитный сигнал, и предлагаемая методика корректного определения температуры поверхности объектов при значительных изменениях температур внешней среды и компонентов тепловизоров позволяют достаточно точно измерить температуру наблюдаемого объекта. Определены технические характеристики и конструктивные требования. Часть материала была опубликована в [3].

Первый тепловизор — радиометрический — разработан и изготовлен в ИФП СО РАН на основе микроболометрической матрицы размера 320×240 элементов (VOx, шаг 51 мкм) и второй тепловизор — системы FLIR — разработан и изготовлен в КТИПМ СО РАН на основе болометрической матрицы (ULIS, США) размера 384×288 элементов (a-Si, шаг 25 мкм).

Матричные болометрические прототипы промышленных тепловизоров. На рис. 1, *a* представлена фотография РТ (первого тепловизора) с двумя калибровочными шторками (внешней и внутренней, расположенных вблизи болометрической матрицы) и семью датчиками температур. Рис. 1, *b* демонстрирует блок-схему прибора. Источник вторичных питающих напряжений (1) обеспечивает питание всех блоков устройства от одного внешнего источника напряжения (12–18 В).

Управляющий микроконтроллер (2) осуществляет инициализацию и управление генератором импульсов для работы микроболометрической матрицы (МБМ) (3) и Ethernet-контроллера (6). Блок постоянных питающих напряжений (4) вырабатывает все необходимые для работы МБМ постоянные напряжения. Контроллер термоэлектрического охладителя (5) обеспечивает стабилизацию температуры МБМ в диапазоне работы прибора. Выходной видеосигнал с МБМ (9) через предусилитель (8) поступает на 14-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (7), который тактируется с генератора управляющих импульсов (3). Цифровые 16-битные данные с АЦП поступают на Ethernet-контроллер и передатчик физического уровня (6). Для измерения температуры в различных точках тепловизионного устройства применён измерительный преобразователь с USB-интерфейсом (10), к которому через согласующее устройство (11), содержащее источники опорного тока и фильтры, подключены измерительные датчики температуры (12), выполненные на базе миниатюрных полупроводниковых диодов. Подробное обоснование необходимости внешней шторки для точности определения температуры исследуемого оборудования представлено в [4].

Расположение семи датчиков температуры схематично показано на рис. 2. Обозначения месторасположения датчиков контроля температур: 1 — окружающая среда на внешней поверхности объектива, 2 — передняя часть перестраиваемого объектива, 3 — задняя часть перестраиваемого объектива, 4 — калибровочная шторка, 5 — диафрагма, 6 — поверхность вакуумированного корпуса ФПУ, 7 — кремниевый чип с матрицей микроболометров.

При измерении температуры объектов калибровочная шторка 4 расположена над датчиком 5, который контролирует температуру диафрагмы. Для калибровки уровня сигнала шторка кратковременно перекрывает оптический канал и болометры облучаются излучением шторки с известной температурой. В дальнейшем осуществляется вычитание данного сигнала из информационного. При проникновении фонового паразитного излучения от внутренних поверхностей ФПУ на поверхность шторки и от неё на матрицу болометров возможно искажение уровней сигнала. Поэтому материал покрытия калибровочной шторки должен обладать следующими характеристиками:

- хорошей адгезией к материалу шторки и механической прочностью для долговременного использования без разрушения;
- минимальным уровнем отражения падающего на него ИК-излучения в диапазоне 8–14 мкм без явно выраженной зеркальной составляющей.

Исследованы возможности измерения температуры объектов вторым тепловизором. На рис. 3, *a* представлена фотография тепловизора, на рис. 3, *b* — его структурная схема. Обозначения: 1 — термостабилизированный объектив; 2 — диафрагма; 3 — кремниевый чип с матрицей микроболометров, расположенный на столике 4, обеспечивающий равномерность температуры матрицы по площади и эффективный тепловой контакт с окружающей средой; 5 — аналоговый модуль, состоящий из 14-битного АЦП (принимает

a



b

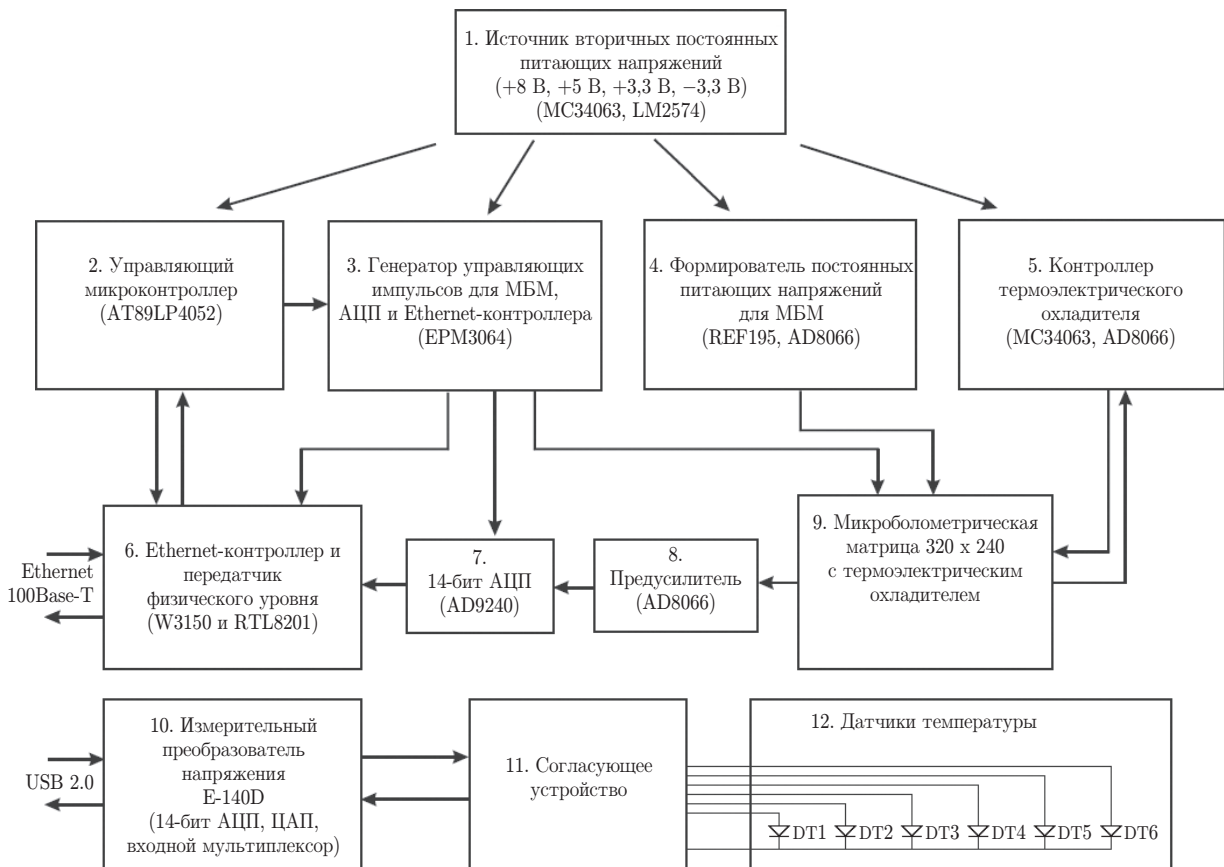


Рис. 1

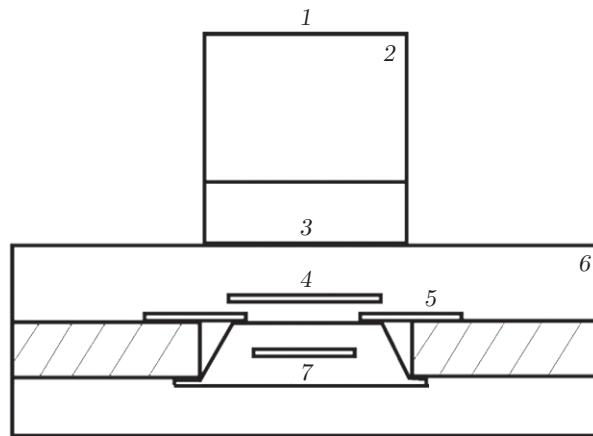
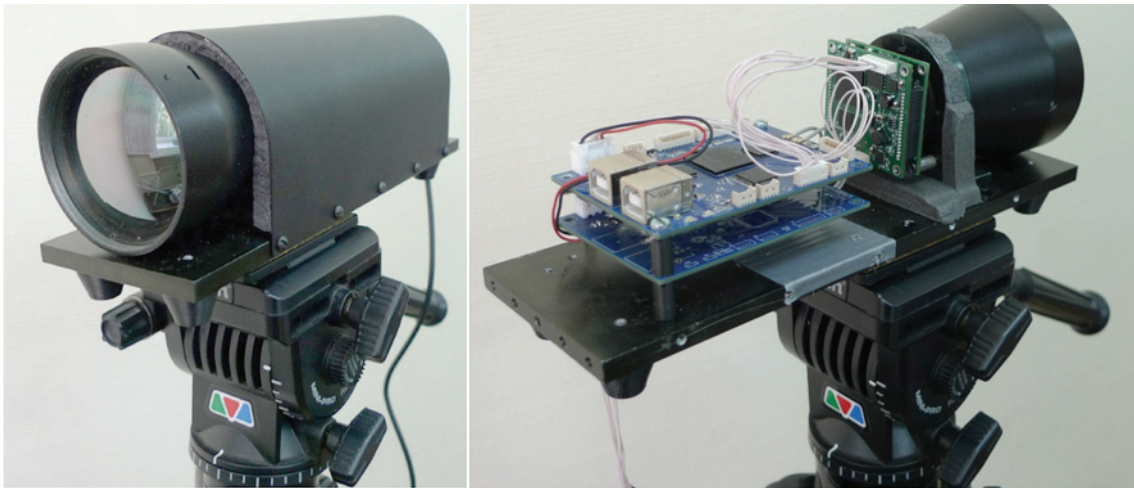


Рис. 2

a



b

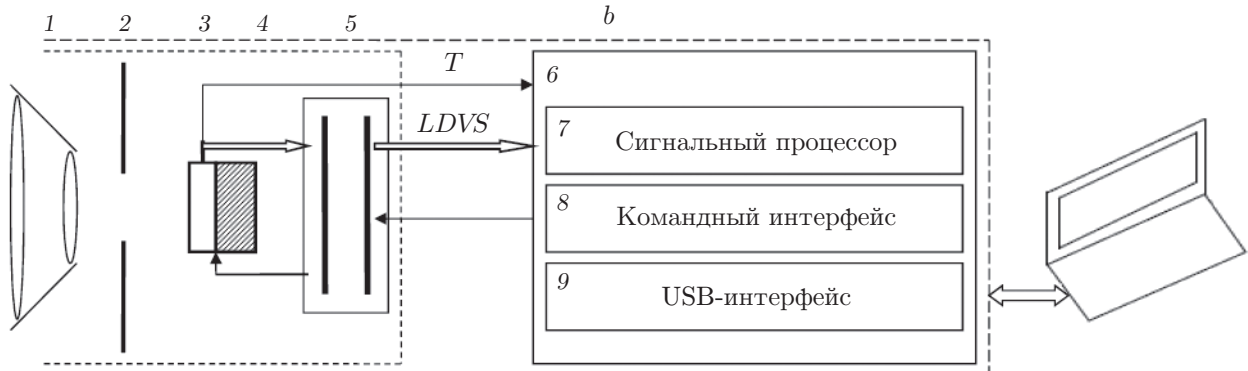


Рис. 3

аналоговый сигнал с матрицы), блока управления матрицы (формирует опорные напряжения и тактирующие сигналы); *б* — цифровой модуль в составе блока цифровой обработки сигнала; 7; 8 — интерфейс управления; 9 — интерфейс USB (вывод видеоданных на ПК и управление прибором).

Кремниевый чип с матрицей микроболометров представляет собой единый прибор из массива микроболометров и управляющей электроники низкого уровня (каскады усиления, мультиплексор и т. д.). Также на подложку интегрирован термодатчик. Выходной сигнал — видеокадр с прогрессивной развёрткой — поступает на АЦП.

Параметры прототипов тепловизора:

- диапазон рабочей температуры от -15 до $+50$ °С;
- диапазон измеряемых температур от 0 до $+350$ °С;
- объективы обеспечивают фокусирование на объекте от $0,8$ до $4,0$ м.

Методики исследования спектров отражения от поверхностей калибрующих шторок. В [5] представлены результаты исследования разных покрытий диафрагм охлаждаемых тепловизионных приборов. Было выяснено, что большинство материалов (анодный окисел и полимерная краска) имеет зеркальную составляющую отражения. Не имеют явно выраженной зеркальной составляющей покрытия на основе взвеси окиси титана или углерода в криогенностойком лаке. Для выбора оптимального покрытия шторки исследовались их спектры и вычислялись интегральные коэффициенты отражения в инфракрасном спектральном диапазоне на инфракрасном фурье-спектрометре ФТ-801 с приставкой отражения ПО-15В (Россия) [6]. Угол падения центрального луча излучения около 15° , область сбора отражённого ИК-излучения в угле не менее 15 ± 7 . Спектрометр ФТ-801 относится к классу модуляционных спектральных приборов, в которых разделение исследуемого излучения на спектральные составляющие производится специальной модуляцией потока излучения оптическим подвижным элементом с последующей электронно-математической обработкой сигнала оптического приёмника, регистрирующего модулированное излучение — интерферограмму относительно опорного спектра. Опорным являлся спектр отражения штатного образца сравнения (зеркало). В качестве зеркала использовалась плоская полированная стальная пластина, входящая в состав прибора. Погрешность измерения амплитуды эталона серого тела на длине волны $13,5$ мкм составила 7% от паспортных данных.

Методика калибровки тепловизора. Известны три основных метода калибровки: первый связан с изменением температуры наблюдаемой сцены (абсолютно чёрного тела (АЧТ)), второй — с варьированием времени интегрирования и третий — с варьированием коэффициентов серости используемых материалов для калибровки [7].

При варьировании температуры наблюдаемой сцены существует несколько возможных вариантов калибровки:

- 1) одноточечная, при которой данные получают только для одной температуры чёрного тела;
- 2) двухточечная, при которой данные получают для пары температур чёрного тела;
- 3) многоточечная, при которой данные получают для нескольких температур чёрного тела и интерполируют в диапазоне температур наблюдаемой сцены.

При калибровке необходимо учитывать, что при измерении температуры объекта тепловизор принимает излучение не только от него, но и от других окружающих объектов, которое частично отражается поверхностью рассматриваемого объекта. Оба эти компонента излучения ослабляются при прохождении через атмосферу на пути к тепловизору, и в то же время к ним добавляется третья составляющая излучения, создаваемая уже самой атмосферой. В тепловизоре существуют собственные источники теплового излучения из-за наличия конечной температуры деталей тепловизора ($T_{\text{тепл}}$): оптическая система, элементы корпуса и т. д. Немаловажным фактором является «паразитное» переотражение

теплого излучения внутри тепловизора от его элементов. Оказывает влияние и собственная температура многоэлементного матричного фотоприёмника ($T_{\text{ФП}}$) [4–7]. В [8] показана важность учёта интегрального коэффициента излучения при температурных измерениях. Подробно рассмотрены факторы, влияющие на точность измерения температурных полей с помощью тепловизионной техники. К таким факторам следует отнести: структуру, зеркальность поверхности, угол наблюдения, форму поверхности. Для вычисления температуры исследуемого объекта необходимо учитывать все эти факторы.

Излучение, попадающее на матрицу микроболометра (Φ_{ij}), преобразуется в сигнал напряжения V_{ij} , где индекс i — номер строки, а j — номер столбца.

Уровень сигнала напряжения можно описать выражением [9]

$$V_{ij} = R_{vij}\Phi_{ij} + V_{0ij},$$

где R_{vij} — чувствительность болометра, V_{0ij} — уровень напряжения смещения, прикладываемого к болометру. Оба эти параметра зависят от температуры матрицы. На уровень выходного сигнала влияет не только напряжение рабочей точки ($V_{0ij}(T_{\text{ФП}})$), но и уровень «паразитного» сигнала, зависящий от температуры собственных источников теплового излучения в приборе ($V_{\text{п}ij}(T_{\text{тепл}})$). Уровень выходного сигнала, соответствующего температуре изучаемого объекта, может быть вычислен как [8]

$$V_{\text{вых}ij}(T_{\text{ФП}}, T_{\text{тепл}}) = V_{0ij}(T_{\text{ФП}}) + V_{\text{инф}ij}(T_{\text{ФП}}, T_{\text{тепл}}) + V_{\text{п}ij}(T_{\text{ФП}}, T_{\text{тепл}}),$$

где $V_{\text{инф}}$ — уровень напряжения, отражающий информацию о температуре исследуемого объекта.

Для решения уравнения проводят калибровку тепловизора в климатической камере, где исследуемым объектом является АЧТ [9]. При калибровке необходимо убрать разброс значений выходных сигналов по фоточувствительной матрице (с учётом передаточной характеристики каждого пиксела) и компенсировать влияние температуры окружающей среды на измерения. Калибровку осуществляют при разных температурах АЧТ ($T_1 - T_n$). Для каждой температуры добиваются совпадения уровней выходного напряжения между собой вычислением индивидуальных коэффициентов наклона a_{ij} и смещения b_{ij} [10]:

$$V_{\text{кор}ij} = a_{ij}V_{\text{вых}ij} + b_{ij}.$$

Результатом такой калибровки тепловизора является незначительный разброс значений выходных напряжений между пикселями по фоточувствительной матрице при измерении температуры АЧТ в диапазоне $T_1 - T_n$ [11, 12].

Калибровка прибора была проведена в широком диапазоне изменения температур деталей тепловизора ($T_{\text{тепл}}$). Изменение коэффициентов корректировки при этом было значительным. Отметим, что уровни выходных сигналов зависят нелинейно от температуры матрицы болометров ($T_{\text{ФП}}$) без её термостабилизации. Удовлетворительное приближение даёт интерполяция кубическими сплайнами по калибровочным точкам. Была применена аппроксимация кубическими сплайнами.

Уровень выходного сигнала измерялся в относительных единицах: $F(T_{\text{тепл}}) = a_i + b_i(T_i - T_{\text{тепл}}) + c_i(T_i - T_{\text{тепл}})^2 + d_i(T_i - T_{\text{тепл}})^3$.

Коэффициенты a , b , c и d определялись в достаточно узких (10 °C) интервалах изменения температуры прибора.

Крутизна S типичной характеристики составила по температуре АЧТ $S_{\text{сцены}} = \frac{\partial F(T_{\text{тепл}})}{\partial T_{\text{АЧТ}}} = 9 \dots 26 \frac{1}{\text{°C}}$, по температуре системы (матрицы) $S_{\text{матрицы}} = \frac{\partial F(T_{\text{тепл}})}{\partial T_{\text{матрицы}}} = -63 \dots 250 \frac{1}{\text{°C}}$.

Найдём алгоритм определения температуры в тепловизоре на основе FLIR-системы.

Для каждого пиксела по точкам экспериментальных данных строится 3D-поверхность, на которой определено соответствие температуры болометрической матрицы температур наблюдаемого объекта (в нашем случае АЧТ). Затем по этой характеристике строится функция отклика пиксела по температуре АЧТ при текущей температуре болометрической матрицы (сплайн-интерполяция по экспериментальным точкам) и по наблюдаемому уровню выходного напряжения восстанавливается температура АЧТ (интерполяция квадратичной функции и решение обратной задачи), а также вносятся необходимые корректировки коэффициента излучения и т. д.

По данной методике была проведена калибровка болометрического тепловизора на основе FLIR-системы. Измерены уровни выходного сигнала при разных температурах АЧТ (от 10 до 90 °С, шаг 5 °С) и компонентов тепловизора (от –10 до 50 °С, шаг 10 °С).

Аналогично осуществлена калибровка РТ.

Экспериментальные результаты. В спектральном диапазоне 8–14 мкм исследованы спектры отражения калибровочных шторок болометрических камер: Indigo (США)(1), производства КНР (2), с покрытием анодным окислом (3) и взвесью углеродных частиц (диаметром до 40 мкм) в криогенностойком лаке (4) (рис. 4). Значения интегральных коэффициентов отражения исследуемых покрытий калибровочных шторок для спектрального диапазона 8–14 мкм приведены в таблице.

На рис. 5 показан результат калибровки болометрического тепловизора на основе FLIR-системы в виде 3D-графика передаточной характеристики болометрической мат-

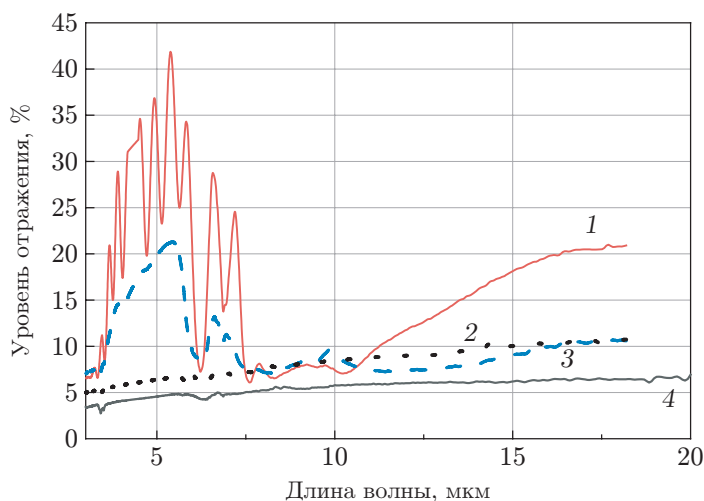


Рис. 4

Интегральные коэффициенты отражения калибровочных шторок

Типы камер	Интегральные значения коэффициентов отражения, %
Indigo (США)	10,2
КНР	8,7
С анодным окислом (ИФП, Россия)	7,5
Со взвесью углеродных частиц (КТИПМ, Россия)	5,8

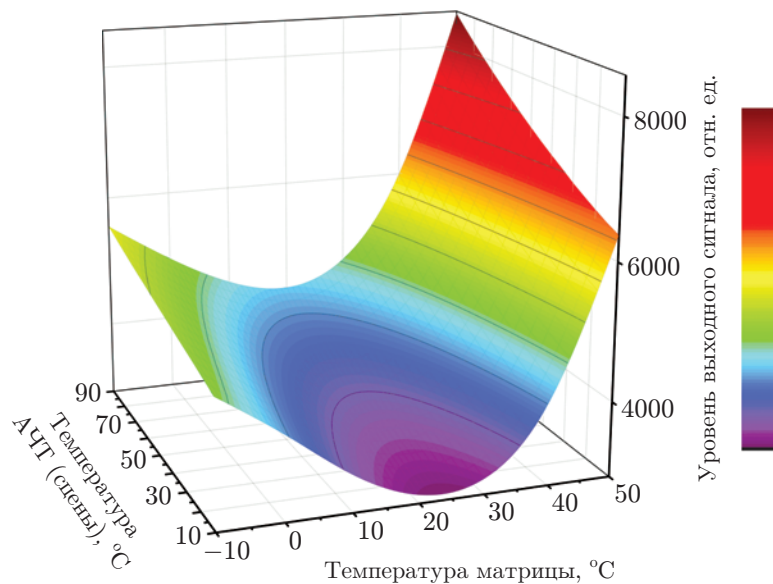


Рис. 5

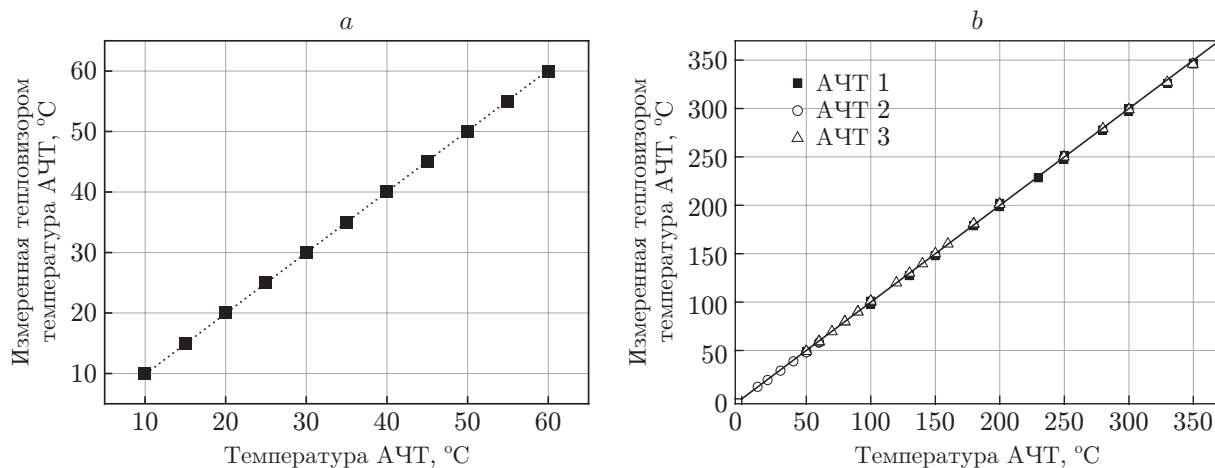


Рис. 6

рицы с усреднением уровня сигнала по квадрату из 20×20 пикселей. Отметим, что болометрическая матрица была достаточно однородна и передаточные характеристики практически всех пикселей качественно повторяют представленный график на рисунке. Температура болометрической матрицы определялась встроенным в неё датчиком. Измерения проводились после длительной (более 30 мин) выдержки в климатической камере при заданной температуре для термостабилизации компонентов тепловизора.

Практическое измерение температур АЧТ тепловизоров представлено на рис. 6: передаточная характеристика тепловизора на основе FLIR-системы (рис. 6, а), РТ-измерения с помощью трёх разных АЧТ в температурном диапазоне от 0 до 350 °С (рис. 6, б).

Радиометрический тепловизор был исследован на точность и временную стабильность измерения температурного поля объекта бесконтактным способом. Пластина анодированного дюралюминия была помещена в климатическую камеру (коэффициент излучения 0,9), измерялась её температура встроенными датчиком температуры и тепловизором. Диапазон изменения температуры камеры от 20 до 60 °С. Тепловизор расположен перед смотровым окном камеры. На рис. 7, а приведено изменение температуры в камере, реги-

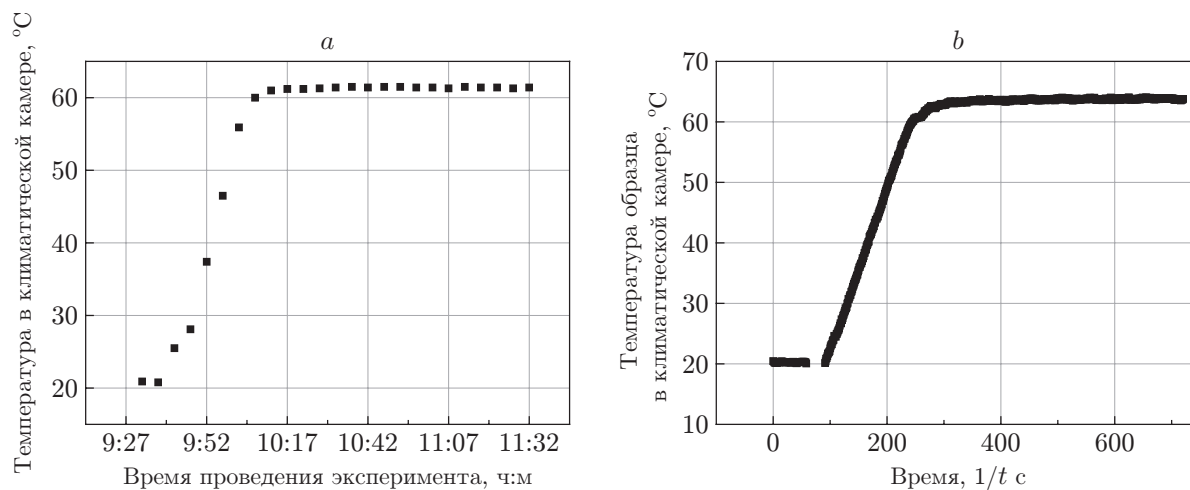


Рис. 7

стрируемое датчиком, а на рис. 7, *b* — изменение температуры объекта исследования в климатической камере, измеренной тепловизором.

Для визуализации изображения объекта исследования и измерения его температуры РТ создана программа «ThermoMetr». На рис. 8 показан графический интерфейс программы при проведении натурных исследований измерений температур выходного коллектора дизель-генераторной установки.

Выбор прототипа и анализ требований к тепловизору промышленного применения. При отсутствии специальных требований к прибору, таких как компактность, отсутствие движущихся частей и т. п., для построения измерительной системы рационально использовать схему с термостабилизированной шторкой и датчиками температур на всех основных деталях тепловизора.

На основе полученных экспериментальных данных разработана система тепловизора, включающая тепловизионный и телевизионный каналы. Тепловизионный канал спроектирован для работы с матрицами формата 384×288 и 640×480 элементов. Блок-схема показана на рис. 9. Телевизионный канал спроектирован на основе телевизионного модуля (ТВ-камеры ВНВ-1000, Россия). Изображения на мониторе телевизионного и теплового каналов совпадают, возможно рассмотрение объекта переключением как в тепловом, так и видимом спектрах.

Технические характеристики устройства дистанционного измерения температуры на основе микроболометра.

Тепловизионный канал:

- тип детектора — неохлаждаемое ФПУ с разрешением не менее 320×240 пикселей;
- температурная чувствительность (NETD) < 100 мК при 30 °C;
- спектральный диапазон $7,5-13$ мкм;
- рабочий диапазон измерения температур от -20 до $+350$ °C (двухдиапазонный, от -20 до 100 °C и от 0 до $+350$ °C); для каждого диапазона своё время экспозиции;
- погрешность измерения при правильно выставленных значениях: дальности, коэффициента излучения объекта, установки тепловизора перпендикулярно поверхности ± 2 °C в каждом диапазоне;
- оптическое поле зрения $32 \times 23^\circ$;
- минимальное фокусное расстояние $0,4$ м;

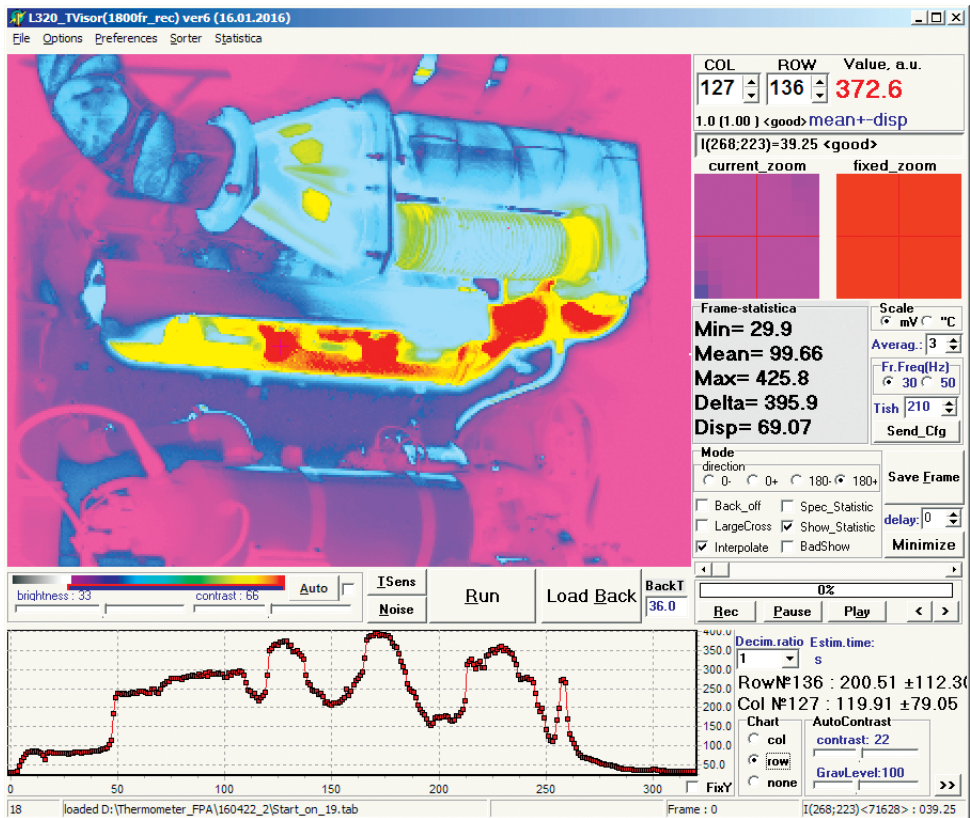


Рис. 8

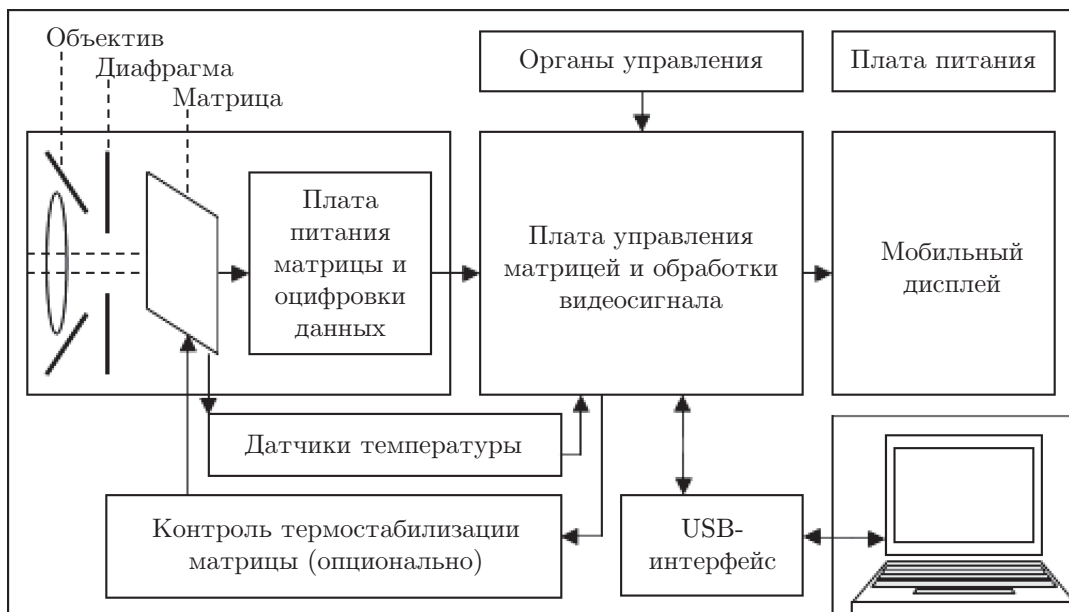


Рис. 9

— частота обновления кадров не менее 9 Гц.

Телевизионный канал:

— изображение размером 640×480 пикселей;

— минимальное фокусное расстояние 0,4 м;

— опции отображения: ИК-изображение или видимый диапазон, или смешанное изображение;

— диапазон рабочей температуры от -15 до $+50$ °С.

Конструктивные требования к устройству дистанционного измерения температуры на основе микроболометра:

— возможность сохранения реальных изображений объектов измерений и их ИК-изображений;

— возможность совмещения визуальных и ИК-изображений для повышения качества анализа;

— откидной поворотный дисплей 5,6'' для точного наведения на объект исследования;

— встроенная цифровая телевизионная камера оптического диапазона;

— отображение минимальных и максимальных значений температуры выделенного участка изображения;

— автоматическая оптимизация контрастности и яркости для упрощения температурного анализа исследуемых объектов;

— интерфейс USB и/или Ethernet;

— передача 14-битных радиометрических данных или данных в формате RAW.

Закключение. Передаточные характеристики тепловизоров измерялись в климатической камере после 30-минутной выдержки при заданной температуре. Экспериментально выяснено, что этого времени должно быть достаточно для равномерного нагрева всех деталей до заданной температуры (это является важным фактором из-за отсутствия датчиков температуры в тепловизоре на основе FLIR-системы). Однако из-за разных масс отдельных частей тепловизора (объектива, корпуса и болометрической матрицы) время прогрева различно. Анализируя форму передаточной характеристики 3D-тепловизора с явно выраженным минимумом при температуре 20 °С (температура окружающей среды, в которой тепловизор находился достаточно долго), можно предположить, что 30-минутной выдержки при заданных температурах недостаточно для его полной термостабилизации. При калибровке РТ, имеющего температурные датчики на всех важных частях, явно выраженный минимум при 20 °С отсутствует. Следовательно, применение тепловизора на основе FLIR-системы для точных измерений проблематично.

Наилучшим покрытием калибровочной шторки (интегральный коэффициент отражения в спектральном диапазоне 8–14 мкм не более 5,8 %) является взвесь частиц углерода в криогенностойком лаке. Покрытие разработано и изготавливается в филиале ИФП КТИПМ СО РАН.

Найдены эмпирические соотношения, позволяющие учесть паразитный сигнал и, следовательно, достаточно точно измерить температуру наблюдаемого объекта.

Создана методика корректного определения температуры поверхности объектов при значительных изменениях температур внешней среды и компонентов тепловизоров, которые создают дополнительные к измеряемому потоку излучения, сравнимые с ним по величине.

Определены технические характеристики и конструктивные требования к тепловизорам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.** Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
2. **Вавилов В. П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. М: ИД Спектр, 2009. 544 с.
3. **Новоселов А. Р., Демьяненко М. А., Марчишин И. В. и др.** Отечественный болометрический термовизор для промышленного применения // Тез. конф. «Фотоника 2017». Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. С. 159.
4. **Пат. 2569170 РФ.** Способ калибровки тепловизионного прибора на микроболометрической матрице и устройство для его реализации /А. Я. Александрович, А. О. Калабеков. Опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
5. **Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Добровольский П. П. и др.** Исследование отражения диафрагмами ИК-излучения в тепловизионных приборах // Автометрия. 2021. **57**, № 3. С. 117–125. DOI: 10.15372/AUT20210313.
6. **Приставка** отражения ПО-15 В. URL: http://simex-ftir.ru/product_3-18.html (дата обращения: 03.10.2022).
7. **Бабкин П. С., Павлов Ю. Н., Перов А. Н.** Применение двухточечного метода калибровки для тепловизионных матриц фирмы ULIS // Радиооптика. Сетевое научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 6. С. 13–26. URL: <https://astrohn.ru/wp-content/uploads/2017/10/52-62-1-PB.pdf?ysclid=ldqxp0dgsa931756324> (дата обращения: 03.10.2022).
8. **Прошкин С. С.** К вопросу о точности измерения температуры с помощью термовизора // Вестн. Международной академии холода. 2014. № 1. С. 51–54.
9. **Tempelhahn A., Budzier H., Krause V., Gerlach G.** Modeling signal-determining radiation components of microbolometer-based infrared measurement systems // Proc. of the Association for Sensors and Measurement (AMA) Conferences. Nuremberg, Germany, 14-16 May, 2013. P. 100–104. DOI: 10.5162/irs2013/iP3.
10. **Tempelhahn A., Budzier H., Krause V., Gerlach G.** Development of a shutterless calibration process for microbolometer-based infrared measurement systems // The e-Journal of Nondestructive Testing. 2015. **20**, N 5. URL: <https://www.ndt.net/article/qirt2014/papers/QIRT-2014-060.pdf> (дата обращения: 03.06.2022).
11. **Budzier H., Gerlach G.** Calibration of uncooled thermal infrared cameras // Journ. Sens. Sens. Syst. 2015. **1**, Iss. 4. P. 187–197. DOI: 10.5194/jsss-4-187-2015.
12. **Parrish W. J., Woolaway J. T.** Improvements in uncooled systems using bias equalization // Proc. SPIE. 1999. **3698**. P. 748–755. DOI: 10.1117/12.354575.

Поступила в редакцию 03.06.2022

После доработки 15.09.2022

Принята к публикации 03.10.2022