

А. В. Долматов

**СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА КАЛИБРОВОЧНОГО СТЕНДА  
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ**

*Работа посвящена изменению структуры программного обеспечения стенда температурной калибровки для организации взаимодействия с сетевыми интеллектуальными устройствами спектрального и тепловизионного контроля. На базе технологии .Net и языка программирования C# создан сетевой сервис источника PSH-2035, управляющий током образцовой температурной лампы ТРУ-1100-2350. Сервис транслирует сетевые сообщения со значениями температуры в ASCII-команды источника с соответствующим уровнем тока лампы и направляет их на исполнение посредством интерфейса RS-232. Обратное преобразование позволяет сетевому клиенту получить сведения о текущем состоянии лампы. Передача сообщений между сетевым сервисом и клиентом производится по уникальному протоколу, который базируется на транспорте TCP. Серверная часть программного обеспечения использует СУБД MySQL в качестве оператора структурированного хранилища пакетных заданий и журнала работы температурной лампы, осуществляет синхронизацию собственной вычислительной платформы с системой мирового времени по протоколу NTP и предоставляет GUID калибруемому интеллектуальному устройству для согласованной идентификации записей в специализированных базах данных. Программные средства стенда поддерживают протокол группового вещания с целью одновременной калибровки нескольких устройств.*

*Ключевые слова: прибор, тепловизор, спектрометр, высокотемпературный, синтез, калибровка, сетевая программа.*

A.V. Dolmatov

**NETWORK ARCHITECTURE OF THE CALIBRATION BENCH  
OF THERMAL IMAGING AND SPECTRAL DEVICES  
FOR MONITORING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF MATERIALS**

*The work is devoted to changing the structure of the software of the temperature calibration stand for organizing interaction with networked intelligent devices for spectral and thermal imaging control. On the basis of .Net technology and the C # programming language, a network service of the PSH-2035 source was created, which controls the current of the TRU-1100-2350 model temperature lamp. The service translates network messages with temperature values in ASCII commands of the source with the corresponding lamp current level and sends them for execution via the RS-232 interface. The reverse conversion allows the network client to obtain information about the current state of the lamp. The transfer of messages between the network service and the client is carried out using a unique protocol based on TCP transport. The server side of the software uses the MySQL DBMS as an operator for a structured storage of batch jobs and a temperature lamp operation log, synchronizes its own computing platform with the world time system via the NTP protocol and provides a GUID to a calibrated smart device for consistent identification of records in specialized databases. The stand software supports the multicast protocol for the simultaneous calibration of several devices.*

*Keywords: instrument, thermal imager, spectrometer, high temperature, synthesis, calibration, network program.*

## Введение

Современное изменение технологического уклада во многом связано с развитием аддитивных методов производства, которые используют послойное или поэлементное выращивание материалов, покрытий и изделий [1–3]. Особую роль здесь имеют методы высокотемпературного синтеза из металла и керамики [4, 5]. Их развитие делает актуальной разработку быстродействующих приборов контроля температуры и фазового состояния соединяемых частиц вещества [6, 7].

Высокотемпературные аддитивные технологии в основном опираются на порошки с дисперсностью 1–100 мкм [8, 9]. В ходе синтеза частицы порошка могут двигаться к точке фиксации со скоростями 1–2700 м/с (селективное лазерное спекание, газотермическое напыление, HVOF/HVAF и др.), а в месте их приваривания, спекания или реакционной диффузии (СВС) температура достигает 2000 – 4800 К [10–14]. Такие экстремальные условия практически исключают альтернативу оптическим (бесконтактным и быстродействующим) способам наблюдения [15, 16].

Методы пирометрии, реализуемые в тепловизионных и спектральных приборах на базе кремниевых фотоприемников, позволяют исследовать гетерофазные дискретные потоки с пространственным и временным разрешением порядка 1 мкм и 1 мкс соответственно [17–19]. Принципы измерения таких устройств опираются на результаты калибровки по эталонам со сверхвысокой рабочей температурой. Для чего применяют либо образцовые лампы с вольфрамовой лентой, либо модели черного тела (МЧТ) [20]. Эти тестовые объекты на участке спектра 300 – 2000 нм позволяют определить пространство состояний цифрового прибора и выявить его аппаратную функцию в температурных диапазонах 800 – 2800 К и 600 – 3500 К соответственно. Образцовые лампы обеспечивают точность определения температуры до 1 градуса, а МЧТ – до 0.1 градуса [21].

В работе [22] определен яркостно-спектральный коэффициент излучения (ЯСКИ)  $\varepsilon_s(\lambda, T)$  как результат совместного измерения яркостной и спектральной температуры объекта. ЯСКИ является оценкой спектральной степени черноты  $\varepsilon_0(\lambda, T)$  и обладает следующим свойством: на участке спектра, где объект излучает как серое тело,  $\varepsilon_s = \varepsilon_0$ . Для вольфрама, имеющего обширные экспериментальные данные по спектральному коэффициенту излучения в области 300–1200 нм и 1200–2800 К, относительная погрешность ЯСКИ на участке спектра 300–400 нм в температурном диапазоне 1400–2600 К не превышает 5 % [23].

Результаты экспериментальных исследований, опубликованные в статьях [23, 24], показывают особенности поведения ЯСКИ на температурах структурных фазовых переходов. Так в процессе нагрева пленочных образцов вольфрама, тантала и молибдена выявлено, что при фазовых переходах первого рода зависимость ЯСКИ от температуры испытывает скачок, а при фазовых переходах второго рода на ней можно обнаружить излом, где скачком меняется первая производная. Таким образом, реализация метода измерения ЯСКИ в тепловизионных и спектральных приборах делает возможным оптический контроль структурных фазовых изменений в дисперсных материалах во время высокотемпературного синтеза. Учитывая высокую корреляцию спектральной степени черноты и ЯСКИ вольфрама можно сделать вывод, что калибровку подобных средств измерения можно выполнять только на основе образцовых температурных ламп с вольфрамовой рабочей поверхностью. У МЧТ спектральный коэффициент излучения стремится к единице, а отличие условных температур (яркостной и спектральной) от температуры АЧТ приближается к нулю. Поэтому данный класс эталонных объектов невозможно применять для калибровки приборов, измеряющих ЯСКИ.

**Цель работы** – перестроить программное обеспечение калибровочного стенда высокотемпературных средств технологического контроля в соответствии с концепцией сетевых интеллектуальных приборов.

### Структура стенда в информационно-измерительной сети

Исходный калибровочный стенд ранее построен на базе концепции виртуальных приборов. В качестве аппаратных средств в нем задействованы программируемый источник тока PSH-2035, образцовая температурная лампа ТРУ-1100-2350 и персональный компьютер (рис. 1).

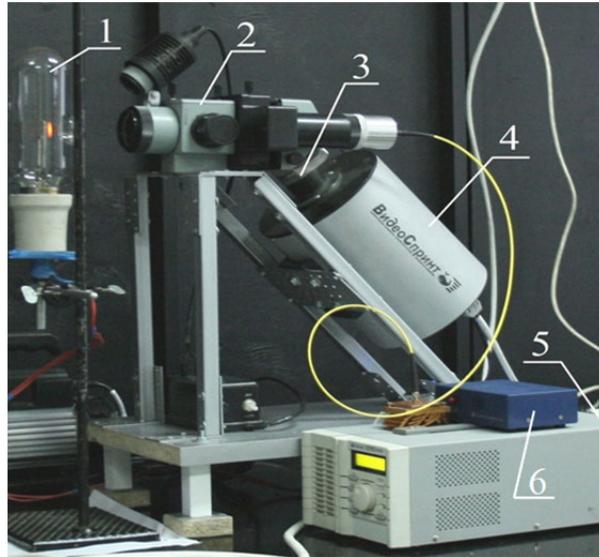


Рисунок 1. Аппаратное обеспечение калибровочного стенда

(1 – образцовая температурная лампа ТРУ-1100-2350; 2, 3, 4 – элементы калибруемого тепловизионного устройства; 2 – стереомикроскоп МБС-10; 3 – полосовой светофильтр SL-725-50; 4 – скоростная камера «ВидеоСпринт»; 5 – программируемый источник тока PSH-2035; 6 – осветитель)

Для передачи управляющих ASCII-команд с уставками тока и напряжения между ПК и источником использован интерфейс RS-232. Программный контроль температурной лампы организован из среды MATLAB с помощью оригинального класса объектов ETLamp. Его методами реализована настройка и определение текущих значений тока и напряжения на выходе устройства, включение и отключение нагрузки, прямое и обратное преобразование тока образцовой лампы в температуру АЧТ или условные температуры на заданной длине волны. Отображения «ток-температура» построены на основе калибровочных данных лампы и радиационной характеристики вольфрама.

Для работы с виртуальным калибровочным стендом достаточно включить источник тока и в командной строке или сценарии MATLAB создать переменную класса ETLamp. Конструктор класса идентифицирует COM-порт, на который отображен PSH-2035 в операционной системе ПК, и проверит наличие лампы ТРУ-1100-2350 во внешней цепи источника посредством тестового значения тока. После успешной инициализации стенда с помощью свойств класса: *Current*, *T*, *Tb*, *Ts*, *Wavelength*, связанных с соответствующими set- и get-методами, возможна настройка режима работы температурной лампы или определение ее текущего состояния. Методы *on* и *off* отвечают на включение и выключение тока в цепи лампы. При удалении переменной класса ETLamp из рабочего пространства среды MATLAB неявно активируется деструктор, который корректно завершит использование ресурсов операционной системы.

При описанной выше организации калибровочного стенда для определения пространства состояний цифровых тепловизоров или аппаратной функции спектральных приборов необходимо их виртуальное представление в среде MATLAB, аналогичное классу ETLamp, или доступ к функциям драйвера (рис. 2). В работах [25, 26] приведены примеры реализации и использования в MATLAB виртуальных измерительных приборов на основе скоростной камеры «ВидеоСпринт» (НПК «ВидеоСкан», Россия) и цифрового спектрометра ВТС-110S

(B&W Тек, США). Алгоритм калибровки этих устройств воплощен в сценарий MATLAB, где посредством объекта класса ETLamp задается температура вольфрамовой ленты образцовой лампы ТРУ-1100-2350, а с помощью виртуальных измерительных приборов определяется средний уровень сигнала при различных значениях времени экспозиции на единственной или множестве длин волны. В случае калибровки спектрального пирометра ее результатом является массив коэффициентов для коррекции спектральной чувствительности прибора и восстановления теплового спектра объекта (рис. 3).

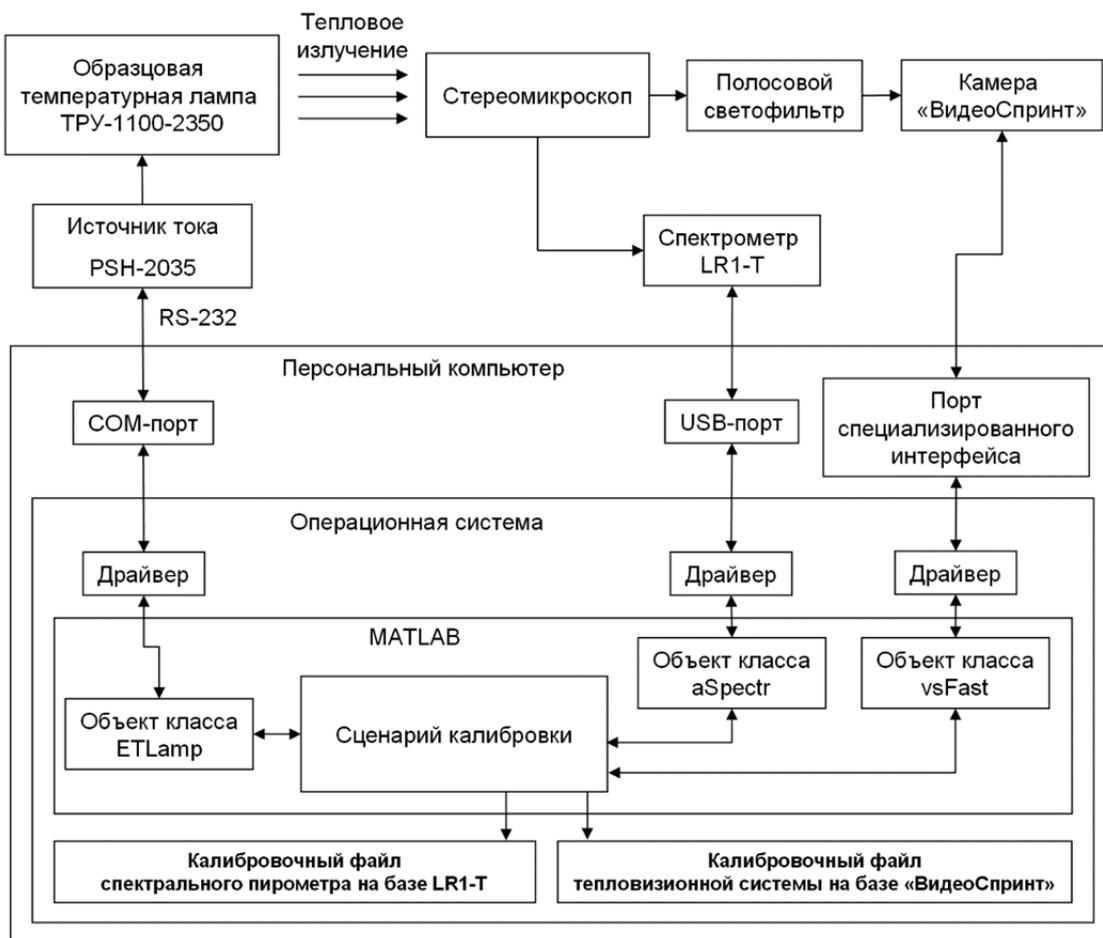


Рисунок 2. Структура калибровочного стенда на основе виртуальных приборов

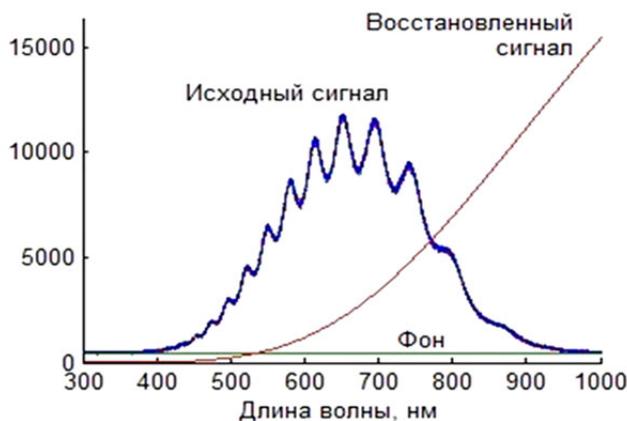
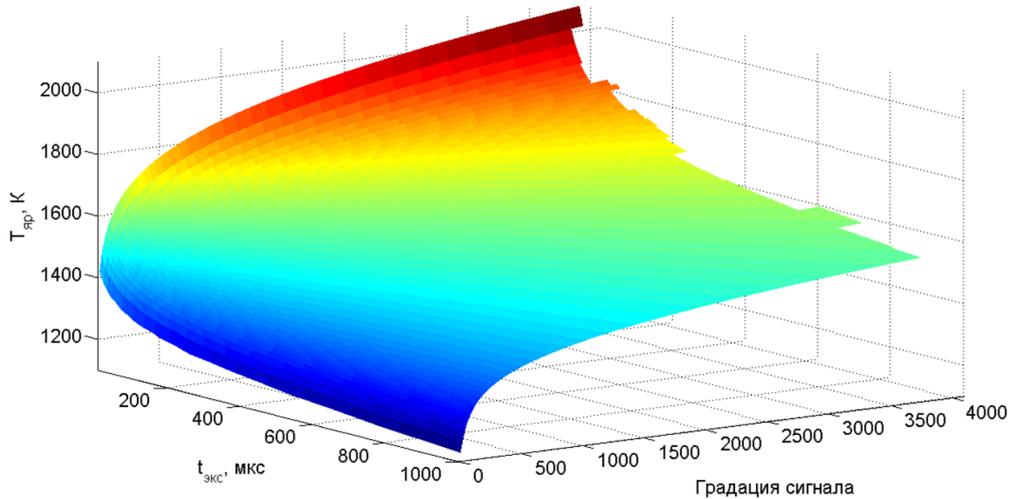
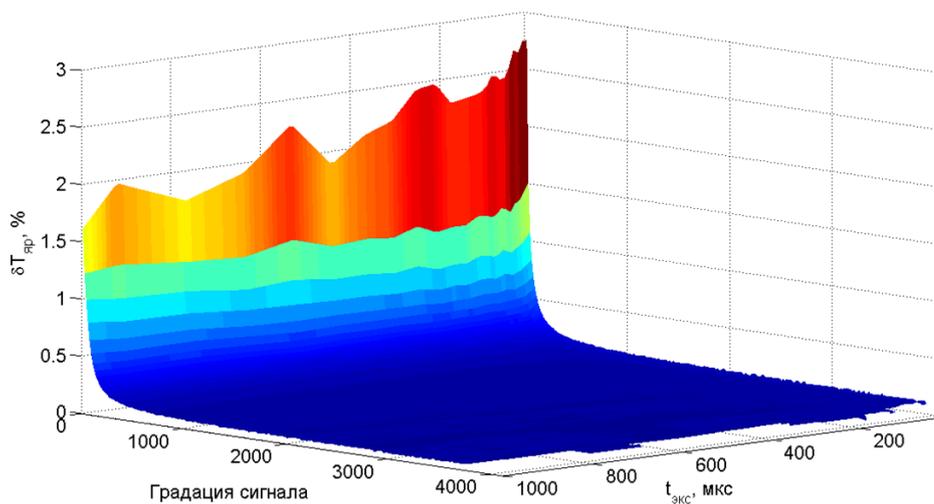


Рисунок 3. Восстановление теплового спектра объекта по калибровочным данным спектрального пирометра

Результатом выполнения сценария калибровки тепловизионной системы, производящей монохромные измерения, является зависимость яркостной температуры и ошибки ее определения от времени экспозиции и уровня сигнала (рис. 4).



а)



б)

Рисунок 4. Результат температурной калибровки тепловизионной системы (зависимость определяемой температуры (а) и относительной ошибки измерения (б) от времени экспозиции и уровня сигнала)

Измерительный комплекс на общей для всех виртуальных приборов вычислительной платформе (рис. 2) имеет ряд недостатков, связанных с ограниченностью его ресурсов (памяти, процессорного времени, пропускной способностью шины данных и др.). Кроме того, для определенного класса измерительных приборов требуются особые аппаратные средства, которые, как правило, отсутствуют в универсальных компьютерах. В настоящее время решить указанную проблему можно с помощью встраиваемых микроконтроллеров, где совмещена работа процессора общего назначения и специальных функциональных блоков, обеспечивающих преобразование как цифровых, так и аналоговых сигналов. Это решение позволяет отказаться от ряда промежуточных интерфейсов, ограничивающих быстродействие измерительного прибора, и подстроить аппаратные средства вычислительной платформы под особенности методов обработки данных. За счет индивидуальных вычислительных ресурсов у прибора может быть организована высокоуровневая сигнальная система, сводящая к мини-

муму трафик данных, которыми он обменивается с другими устройствами измерительного комплекса. Описанный подход лег в основу разработки интеллектуального спектрального пирометра [27–30]. Так, трафик его первичных данных из модуля АЦП в память микроконтроллера составляет 4 Мбит/с. Однако после определения температуры и ЯСКИ на единственной длине волны он сокращается почти на 3 порядка и на входе, действующей в приборе сверточной нейронной сети, составляет около 10 кбит/с. Распознавание фазовых переходов по зависимости ЯСКИ от времени средствами ИИ сводит объем выходных данных спектрального пирометра к десяткам бит, которые в локальной сети можно передавать между устройствами за единицы микросекунд. Таким образом, с помощью интеллектуальных способностей (вычислительных ресурсов и методов обработки данных) спектрального пирометра организуется его высокоуровневая сигнальная система, которая позволяет сообщать о событиях фазовых переходов (характерная температура и момент времени структурных изменений в теплофизическом процессе) во внешнюю среду только посредством сетевых коммуникаций. Обобщение данного подхода приводит к концепции сетевых интеллектуальных приборов. Следуя ей авторы разработали схему стенда температурной калибровки тепловизионных и спектральных приборов, предназначенных для мониторинга высокотемпературных быстротекущих процессов синтеза материалов, покрытий и изделий (рис. 5).

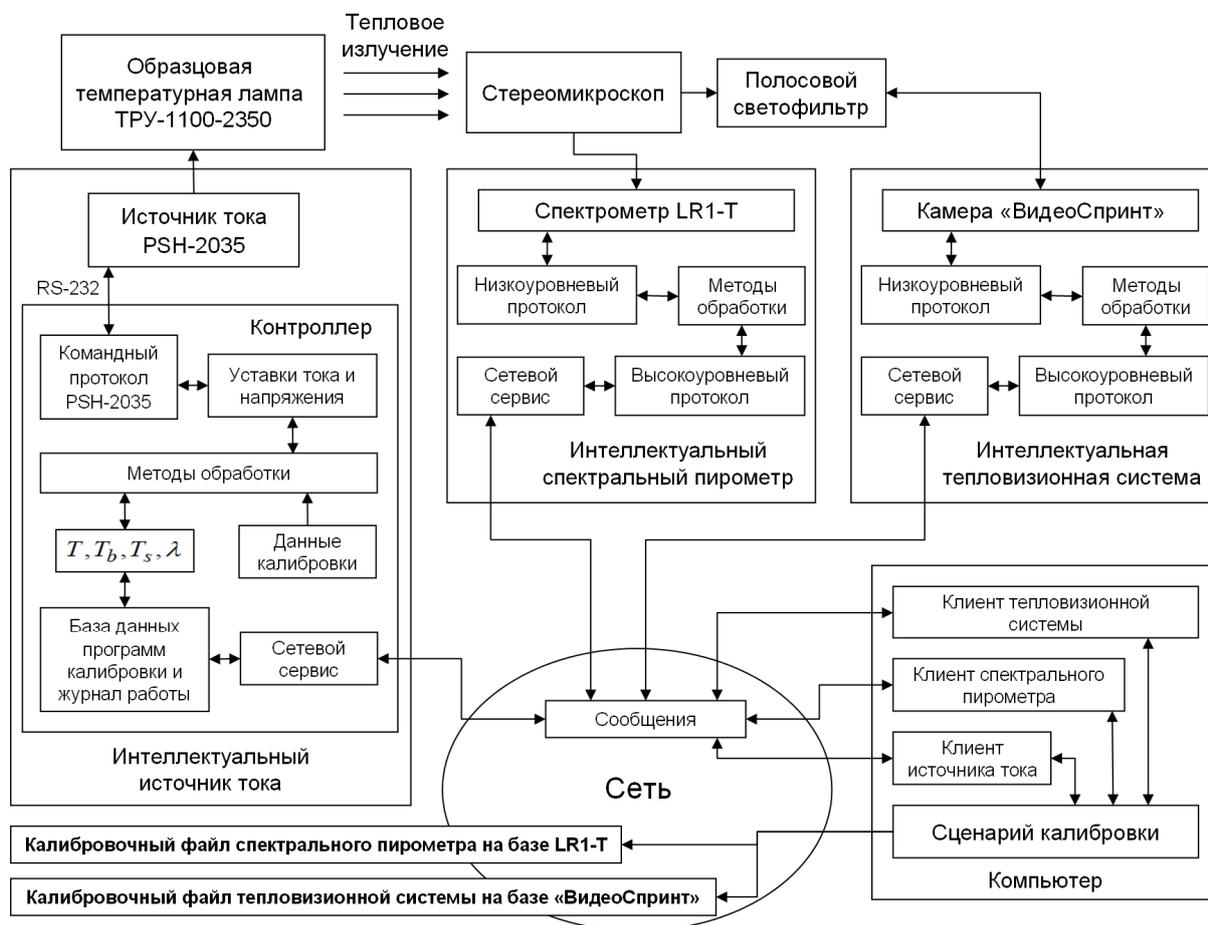


Рисунок 5. Структура калибровочного стенда на основе сетевых интеллектуальных приборов

Основные черты устройства, отвечающего концепции сетевых интеллектуальных приборов, можно обозначить следующим образом:

- обладает собственной вычислительной платформой, аппаратные средства которой оптимизированы под специфику методов обработки регистрируемых данных;
- реализует обмен данными или управляющими сигналами с другими устройствами только посредством сетевого интерфейса;

- готово инициировать и вступать в соседские отношения для организации измерительного комплекса;
- способно взаимодействовать с другими устройствами измерительного комплекса посредством уникальных и групповых сообщений, а также на протяжении всего срока эксплуатации готово участвовать в работе неограниченного количества измерительных комплексов;
- обладает собственным хранилищем специфичных для него данных и поддерживает во время работы измерительного комплекса механизм их согласованной с соседями идентификации;
- поддерживает механизм синхронизации с системой мирового времени с заданной в измерительном комплексе точностью;
- стремиться минимизировать собственный сетевой трафик в процессе регистрации данных измерительным комплексом;
- обеспечивает постоянный авторизованный доступ к собственным данным и методам их обработки для соседей по измерительным комплексам;
- публикует сведения о целевом назначении и предоставляет инструменты взаимодействия.

В разработке программного обеспечения калибровочного стенда с учетом перечисленных требований использованы следующие технологии и сервисы: СУБД MySQL, Python, .Net, Matlab, C#, Apache, PHP.

### **Особенности сетевой реализации**

Сервер сетевой службы стенда построен на платформе .Net с помощью языка программирования C#. Он реализует оригинальный протокол взаимодействия интеллектуальных приборов, который опирается на сообщения с уникальным форматом и транспорт TCP. Для поддержки прикладного программного интерфейса калибровочного стенда разработаны клиентские части сетевой службы в виде классов объектной модели на языках C#, Python, Matlab. Эти инструменты вместе с документацией планируются к размещению на встроенном Web-сервере стенда.

Протокол взаимодействия интеллектуальных приборов определяет их общие свойства. Поэтому приведенное ниже описание характеризует, в том числе, стенд для температурной калибровки тепловизионных и спектральных приборов.

Протокол позволяет любому прибору инициировать построение измерительного комплекса и представить его в виде логической схемы. Схема создается на ограниченный отрезок времени, в течение которого участники не должны давать согласие на включение в другие измерительные комплексы. Ответственность за физическую организацию интеллектуальных приборов лежит на пользователе комплекса. В процессе построения логической схемы инициирующий прибор использует процедуру установления соседства, с помощью которой передает другим членам GUID измерительного комплекса и IP-адрес группового вещания, а также назначает каждому программу действий, привязанную к наборам входящих и исходящих сообщений. Входящие сообщения используются приборами для синхронизации шагов их индивидуальной программы, а исходящие – инициируют действия соседей по измерительному комплексу. В процессе работы измерительного комплекса каждый прибор сохраняет в собственной базе специфичные для него данные. Однако для идентификации записей применяется GUID комплекса, а также временные отметки собственных часов реального времени. Синхронизация часов в приборах комплекса с системой мирового времени выполняется по протоколу NTP или RTP. Выбор протокола зависит от требований к погрешности часов. Идентификация записей в базах данных интеллектуальных приборов дает возможность внешнему субъекту в любое время восстановить логическую структуру работы измерительного комплекса и объединить сведения для собственного анализа и обработки.

За время эксплуатации интеллектуальный прибор может быть задействован в разных комплексах. Сбор данных прибором осуществляется только в рамках логической схемы, действующей в настоящий момент времени. Однако анализ ранее собранной информации может

производиться в любое время. Поэтому прибор обладает способностью одновременно обмениваться данными со всеми известными ему соседями. Для оптимизации такого информационного обмена интеллектуальный прибор может иметь цифровых двойников в глобальной сети, поддерживая протокол виртуализации и синхронизацию данных с резервными серверами.

### Заключение

Развитие технологий микроконтроллеров, ПЛИС и специальных процессоров для векторных и тензорных вычислений позволяет интегрировать практически любые методы обработки данных в измерительный прибор. С одной стороны, это усложняет внутреннюю структуру средств контроля и заставляет перешагнуть границу операционной системы при организации измерительных комплексов. С другой, возможность преобразования данных в интеллектуальных приборах способствует переходу к сигнальной системе высшего порядка, что значительно сокращает трафик управления измерительными сетями, дает возможность унифицировать подход к синхронизации устройств в процессе регистрации данных, позволяет избавиться от промежуточных интерфейсов, преодолеть ограниченность ресурсов единственной вычислительной платформы измерительного комплекса и увеличить его быстродействие. Разработка программного обеспечения калибровочного стенда потребовала внедрение сетевых технологий, которые ранее были задействованы при создании спектрального пирометра [27]: синхронизация часов устройства с системой мирового времени по протоколу NTP, использование группового вещания на основе протоколов стека TCP/IP, применения GUID для сопоставления записей из различных баз данных нескольких сетевых приборов. Проектирование и тестирование сетевых программных элементов выполнено в среде Windows. Однако реализация сервера на платформе .Net позволяет с минимальными затратами перейти к эксплуатации в операционных системах Linux и Android, которые обслуживают большинство современных микроконтроллерных систем. Сетевая архитектура стенда не изменила качество и структуру результата калибровки, но позволила использовать стенд для обслуживания нового класса тепловизионных и спектральных устройств, построенных в соответствии с развивающейся концепцией сетевых интеллектуальных приборов.

### Литература

1. Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook / P. Zhuo, S. Li, I. A. Ashcroft, A. I. Jones // *Composites Part B: Engineering*. – 2021. – Vol. 224. – P. 109143.
2. Express wire coil cladding (EW2C) as an advanced technology to accelerate additive manufacturing and coating / M. Gipperich, J. Riepe, R. Day, T. Bergs // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. – 2021. – Vol. 7. – P. V007T16A009.
3. Effect of plasma spraying regimes on structure and properties of Ni3Al coatings / E. E. Kornienko, D. O. Mul', O. A. Rubtsova [et al.]. – DOI: 10.1134/S0869864316060147 // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2016. – Vol. 23 (6).. – P. 919–927.
4. Lin, Z. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy / Z. Lin, K. Song, X. Yu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 70. – P. 24–45.
5. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev // *Yugra State University Bulletin*. – 2019. – № 4 (55). – P. 33–40.
6. Бороненко, М. П. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев. – Текст : непосредственный // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 60–64.
7. Долматов, А. В. Методы контроля структурообразования в процессах высокотемпературного синтеза (обзор) / А. В. Долматов. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2020. – № 2 (57). – С. 7–18.

8. Plasma-sprayed TiC-based cermets / V. I. Kalita, A. A. Radyuk, D. I. Komlev [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021. – Vol. 12 (2). – P. 461-467.
9. Алымов, М. И. Консолидация порошковых наноматериалов: обзор тенденций развития и применения / М. И. Алымов, П. Ю. Гуляев, С. В. Семичев. – Текст : непосредственный // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2019. – № 4 (55). – С. 7–16.
10. Чижик, С. А. Аддитивные синерготехнологии формирования поверхностного слоя сложно профильного изделия / С. А. Чижик, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец. – Текст : непосредственный // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2020. – № 1 (775). – С. 11–18.
11. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.
12. Novel utilization of liquid feedstock in high velocity air fuel (HVAF) spraying to deposit solid lubricant reinforced wear resistant coatings / A. Ganvir, A. R. Jahagirdar, A. Mulone [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 295. – P. 117203.
13. Air-plasma spraying of cavitation- and hydroabrasive-resistant coatings / V. I. Kuzmin, I. P. Gulyaev, D. V. Sergachev [et al.] // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2020. – Vol. 27 (2). – P. 285–294.
14. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing  $K_xTiO_2$  / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.
15. Optical diagnostics of radiation interaction with the powder stream laterally transported during laser cladding / I. P. Gulyaev, O. B. Kovalev, P. A. Pinaev, G. N. Grachev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2020. – Vol. 126. – P. 105877.
16. Cui, H. Zh. The temperature control in the combustion wave SHS / H. Zh. Cui, P. Yu. Gulyaev. – Текст : непосредственный // *Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов*. – 2016. – Т. 1, № 6. – С. 207–211.
17. Luan, Y. Light-field multi-spectral radiation thermometry / Y. Luan, D. Mei, S. Shi // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46 (1). – P. 9–12.
18. Gulyaev, I. P. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 116. – P. 1016–1025.
19. Gulyaev, P. Yu. Temperature hysteresis in the unstable combustion mode of SHS: experiment with high-speed micro-pyrometry / P. Yu. Gulyaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1115 (4). – P. 042026.
20. Гуляев, П. Ю. Виновский критерий выбора параметров редукции температурного распределения частиц по их суммарному тепловому спектру / П. Ю. Гуляев, В. И. Иордан, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2008. – Т. 51, № 9-3. – С. 69-76.
21. Increasing the noise immunity of optical-electronic systems based on video cameras with an optical converter / M. P. Boronenko, P. Yu. Gulyaev, A. E. Seregin, K. G. Poluhina. – DOI: 10.1088/1742-6596/643/1/012028 // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 643. – P. 012028.
22. Долматов, А. В. Оценка спектральной степени черноты материалов средствами оптической пирометрии / А. В. Долматов, И. В. Милюкова, А. Э. Алиев. – Текст : непосредственный // *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 147–155.
23. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1281 (1). – P. 012010.

24. Высокотемпературные химические превращения в молибденовых пленках / А. Э. Алиев, М. К. Котванова, С. С. Павлова, А. В. Долматов. – Текст : непосредственный // Мир современной науки. – 2019. – № 5 (57). – С. 8–14.
25. Ермаков, К. А. Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления / К. А. Ермаков, А. В. Долматов, И. П. Гуляев. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 56–68.
26. Долматов, А. В. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, Р. Р. Имамов. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 32–42.
27. Долматов, А. В. Интеллектуальный сетевой пирометр для контроля структурных фазовых переходов в материалах / А. В. Долматов, П. Ю. Гуляев, И. В. Милюкова. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 172–177.
28. Гуляев, П. Ю. Байесовское восстановление цвета цифровых изображений / П. Ю. Гуляев, Ю. П. Гуляев, А. В. Долматов. – Текст: непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 1997. – № 2. – С. 114–115.
29. Григорьевская, А. А. Компьютерный эксперимент верификации инвариантных свойств Трасе-критерия спиновой неустойчивости движения фронта горения / А. А. Григорьевская. – Текст : непосредственный // Математика : материалы 59-й Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск : ИПУ НГУ, 2021. – С. 94–95.
30. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, E.A. Lyskov [et al.]. – DOI: 10.1134/S0869864317010097 // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24 (1). – P. 83–94.