

**МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ**

Долматов Алексей Викторович

кандидат технических наук,

доцент кафедры информационных технологий

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»

Ханты-Мансийск, Россия

E-mail: adolmatov@bk.ru

Предмет исследования: статья посвящена измерительному комплексу для экспериментального исследования явления СВС.

Цель исследования: цель разработки заключалась в одновременном наблюдении микрогетерогенных процессов и макрокинетики высокотемпературного синтеза.

Методы и объекты исследования: для организации скоростной многозонной регистрации тепловизионных и спектральных данных задействованы встраиваемые вычислительные платформы с поддержкой средств искусственного интеллекта.

Основные результаты и выводы: в рамках комплекса разработана группа интеллектуальных модулей с автономным анализом данных в режиме реального времени. Пирометрический модуль комплекса выявляет в процессе синтеза материалов структурные фазовые переходы и измеряет характерные температуры. Тепловизионный модуль определяет положение фронта волны СВС и строит распределение фаз материала и температуры на поверхности образца. Мехатронный модуль прогнозирует расположения новой области наблюдения, опираясь на измеренные параметры процесса СВС, и выполняет перемещение туда средств оптического контроля при выходе волны горения за пределы текущей зоны регистрации. Взаимодействие интеллектуальных модулей мехатронной системы реализовано посредством сообщений в беспроводной сети, а их синхронизация по протоколу NTP имеет погрешность около 40 мкс.

Ключевые слова: СВС, встроенный, мехатроника, слежение, спектрометр, тепловидение, искусственный интеллект, система.

**MECHATRONIC CONTROL SYSTEM FOR HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF
MATERIALS BASED ON INTELLIGENT MEASURING MODULES**

Alexey V. Dolmatov

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Information Technology,

Yugra State University

Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: adolmatov@bk.ru

The subject of research: The article is devoted to the measuring complex for the experimental study of the SHS phenomenon.

The purpose of the development was to simultaneously observe microheterogeneous processes and macrokinetics of high-temperature synthesis.

Methods and objects of research: Embedded computing platforms with support for artificial intelligence tools are used to organize high-speed multi-zone registration of thermal imaging and spectral data.

Results of research: Within the framework of the complex, a group of intelligent modules with autonomous data analysis in real time has been developed. The pyrometric module of the complex reveals structural phase transitions in the process of high-temperature synthesis of materials and measures characteristic temperatures. The thermal imaging module determines the position of the SHS wave front and plots the material and temperature phase distributions on the sample surface. The mechatronic module predicts the location of a new observation area, based on the measured parameters of the SHS process, and moves the optical control means there when the combustion wave leaves the current registration area. The interaction of intelligent modules of the mechatronic system is implemented through messages in a wireless network, and their synchronization via the NTP protocol has an error of about 40 μ s.

Keywords: SHS, Embedded, Mechatronics, Tracking, Spectrometer, Thermal imaging, Artificial intelligence, System.

Введение

Современный уровень интеграции механических, электрических и информационных узлов в измерительных и мехатронных системах позволяет создавать интеллектуальные приборы, специализирующиеся на выполнении конкретной задачи [1, 2]. Это дает значительный синергетический эффект при взаимной адаптации сенсоров, способов обработки данных, управляющих сигналов и средств исполнения внутри автономного устройства – модуля [3–5]. Робототехнические и мехатронные комплексы строятся из нескольких модулей, что требует координации действий отдельных членов в подобном сообществе. Следовательно, каждый модуль должен поддерживать протоколы соседства, синхронизации часов, обмена сообщениями с результатами выполнения отдельных операций и обработки зарегистрированных данных [6, 7]. Применение мощных встраиваемых микроконтроллеров позволяет локализовать внутри модуля сложный анализ первичных данных и на несколько порядков сократить количество информации, передаваемое по внутренним каналам связи комплекса, за счет использования высокоуровневого языка сообщений [8, 9]. Сокращение трафика служебных сообщений способствует унификации внутренней коммуникационной среды и повышению быстродействия комплекса либо позволяет усложнить его структуру [10].

Цель настоящей работы – посредством беспроводных сетевых технологий организовать интеллектуальные информационно-измерительные и мехатронные модули в быстродействующую систему оптического контроля высокотемпературного синтеза материалов.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментального комплекса, состоящего из четырех автономных устройств: специализированного пирометрического модуля, интеллектуального тепловизионного модуля, мехатронного модуля, реализующего функцию слежения за процессом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) материалов, и модуля инициации реакции [11, 12].

Взаимодействие модулей экспериментального комплекса производится только посредством сетевых коммуникаций и обмена сообщениями. Для построения экспериментального комплекса любой модуль может инициировать создание сообщества. Сообщество представляет собой логическую схему взаимодействия интеллектуальных модулей и строится на ограниченный отрезок времени, в течение которого предполагаемые члены не должны входить в другие информационно-измерительные и мехатронные комплексы. Физическая организация интеллектуальных модулей лежит на пользователе, организующем работу комплекса. В процессе создания сообщества иницирующий модуль использует процедуру установления соседства, с помощью которой определяет для других модулей GUID сообщества и IP-

адрес группового вещания, а также назначает каждому из них программу действий, привязанную к наборам входящих и исходящих сообщений [13, 14].

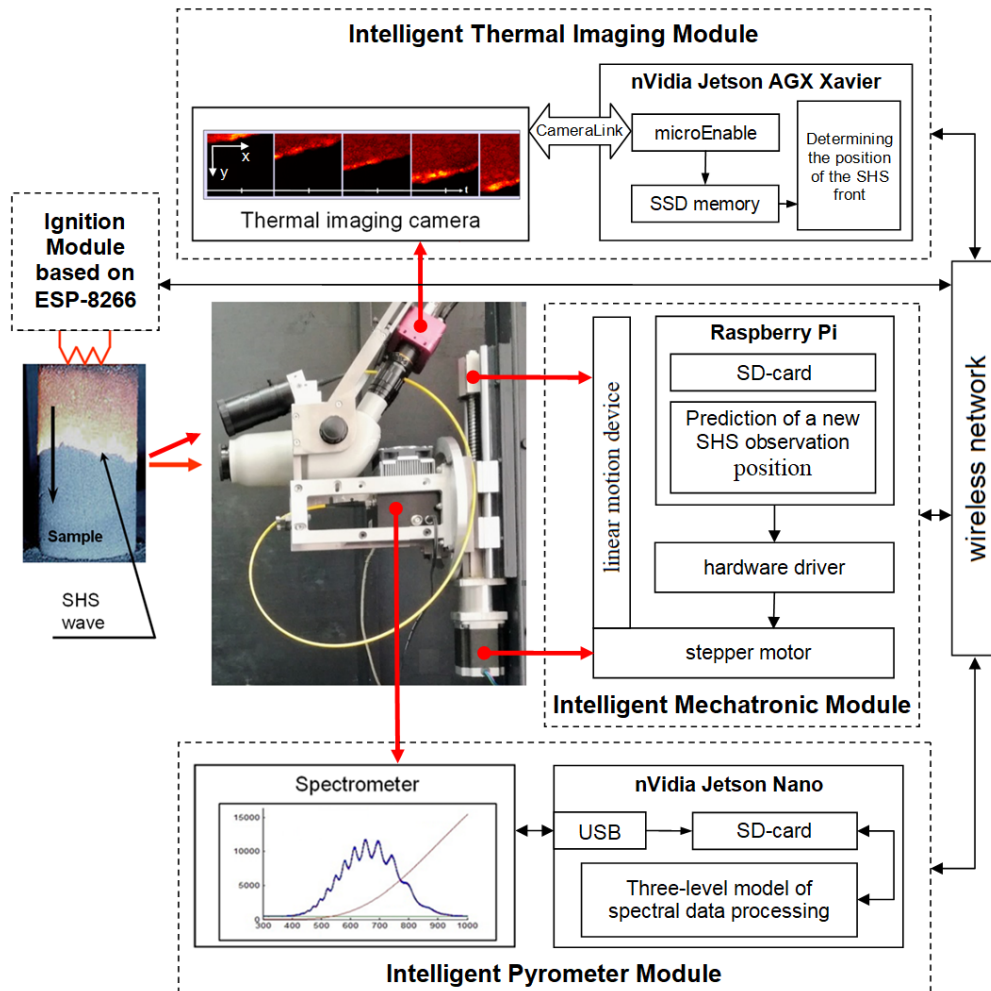


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментального комплекса на базе информационно-измерительных и мехатронных модулей

Входящие сообщения используются модулями для синхронизации шагов их индивидуальной программы, а исходящие инициируют действия соседей по экспериментальному комплексу. В процессе работы сообщества каждый модуль комплекса сохраняет в собственной базе данных специфичную для него информацию. Однако при идентификации данных в базе применяются GUID сообщества и временные отметки собственных часов реального времени. Синхронизация часов модулей комплекса выполняется по протоколу NTP или RTP [15]. Выбор протокола зависит от требования к погрешности часов в эксперименте. Идентификация записей в базах данных интеллектуальных модулей дает возможность внешнему субъекту восстановить логическую структуру работы сообщества и объединить все сведения, полученные экспериментальным комплексом, для собственного анализа и обработки.

Пирометрический модуль используется в экспериментальном комплексе для измерения температуры и излучательной способности образца, а также определения структурных фазовых переходов в материале. Он состоит из двух функциональных блоков, сопряженных интерфейсом USB 2.0 (рис. 2). Измерительным блоком является цифровой спектрометр LR1-T (Aseq, Канада), работающий в диапазоне от 200 до 1100 нм с дисперсией 0.24 нм [16]. В качестве блока обработки данных выбран микрокомпьютер nVidia Jetson Nano под управлением операционной системы Linux Ubuntu. Аппаратные средства nVidia Jetson Nano включают ARM Cortex A57 с 4 ядрами (1600 МГц), графический процессор Maxwell с 128 ядрами

CUDA, LPDDR4 – 4 ГБ, 4xUSB 3.0, GigabitEthernet, SD (128 GB), DP1.2, M.2 key E для подключения модуля беспроводного сетевого интерфейса [17].

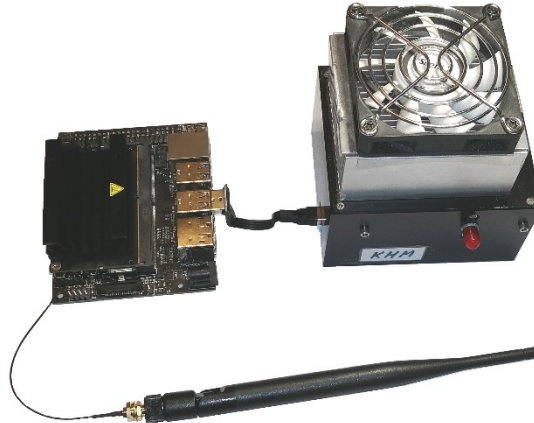


Рисунок 2 – Блок обработки данных и цифровой спектрометр пирометрического модуля

Оптический канал пирометрического модуля построен на базе объектива Computar MLH-10x и световода. Они передают на вход прибора тепловое излучение наблюдаемого объекта в видимом диапазоне спектра. При максимальной производительности ПЗС-сенсора трафик зарегистрированных данных спектрометра составляет 4 Мбит/с. Их обработка в nVidia Jetson Nano выполняется программно на основе трехуровневой информационной модели. На первом уровне осуществляется аддитивная и мультипликативная коррекция цифрового сигнала с использованием поправок, определенных на стадии калибровки пирометрического модуля по спектру абсолютно черного тела и хранящихся в базе данных на SD-карте микрокомпьютера [18]

$$S_i^* = k_i \cdot S_i^o - \delta_i, \quad i = 1, N, \quad (1)$$

где S_i^o , S_i^* – соответственно зарегистрированный и откорректированный сигнал i -го элемента линейного ПЗС-сенсора; δ_i , k_i – аддитивная и мультипликативная поправка на длине волны λ_i ; $N = 3648$ – количество элементов линейного ПЗС-сенсора. На втором уровне сигнал S_i^* используется для определения условных температур и вычисления оценки спектрального коэффициента излучения наблюдаемого объекта. Яркостная температура T_{b_i} на длине волны λ_i находится по таблице соответствия множеств

$$\{ S_i^* \} \leftrightarrow \{ T_{b_i} \}, \quad (2)$$

полученной на этапе температурной калибровки пирометрического модуля и хранящейся в базе данных на SD-карте микрокомпьютера. Спектральная температура T_{s_i} на длине волны λ_i определяется по формуле:

$$T_{s_i} = - \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x_i}^{-1}, \quad (3)$$

где $x_i = C/\lambda_i$, $y_i = \ln(S_i^* \cdot \lambda_i^4)$, $C = 14388 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$. Оценка спектрального коэффициента излучения наблюдаемого объекта – яркостно-спектральный коэффициент излучения (ЯСКИ) ε_{s_i} на длине волны λ_i , рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{s_i} = \exp \left(\frac{C}{\lambda_i} \left(\frac{1}{T_{s_i}} - \frac{1}{T_{b_i}} \right) \right). \quad (4)$$

В работе [19] показано, что ЯСКИ ε_{s_i} связан со спектральной степенью черноты материала ε_{o_i} на длине волны измерения условных температур λ_i формулой:

$$\frac{\varepsilon_{s_i}}{\varepsilon_{o_i}} = \exp \left(\lambda_i \cdot \left(\frac{d(\ln \varepsilon_o)}{d\lambda} \right)_{\lambda_i} \right). \quad (5)$$

Когда описание радиационных свойств материала возможно на основе модели серого тела, его ЯСКИ и спектральная излучательная способность равны. Для многих реальных материалов возможен выбор такой λ_i , что

$$\left| 1 - \varepsilon_{s_i} / \varepsilon_{o_i} \right| \cdot 100 < 5\% \quad (6)$$

Например, у нагретого до 1400–2600 К вольфрама условие (6) выполняется в спектральном диапазоне от 300 до 400 нм. Метод ЯСКИ имеет высокую температурную чувствительность ($\sim d\varepsilon/dT$) и временную разрешающую способность ($\sim d\varepsilon/dt$), а также позволяет использовать бесконтактный и неразрушающий подход для измерения оптического свойства материала, связанного с его макро- и микроструктурой.

После обработки спектральных данных на втором уровне информационной модели при условии определения температуры и ЯСКИ на единственной длине волны трафик пирометрического модуля, генерируемый им во внешнюю среду, сокращается на 3 порядка и ограничивается уровнем 4 кбит/с (модуль передает данные только об измеренных температурах).

В основе обработки сигнала на третьем уровне информационной модели лежит ряд экспериментальных работ [20, 21], где показано, что при фазовых переходах первого рода зависимость спектральной степени черноты материала от температуры испытывает скачок, а при фазовых переходах второго рода на ней можно обнаружить излом, и скачком меняется первая производная. Например, в экспериментах с молибденовой фольгой образец в среде аргона нагревался электрическим током, последовательно проходя ряд состояний, в которых на его поверхности наблюдались стационарные распределения температуры и ЯСКИ ($\lambda=725$ нм). Измерения осуществлялись в нескольких зонах диаметром 100 мкм на продольной оси образца. В результате выявлено, что скачку ЯСКИ в разных зонах соответствует уникальная мощность тепловыделения в образце, но одинаковый уровень температуры, равный температуре кипения MoO_3 [22] (рис. 3).

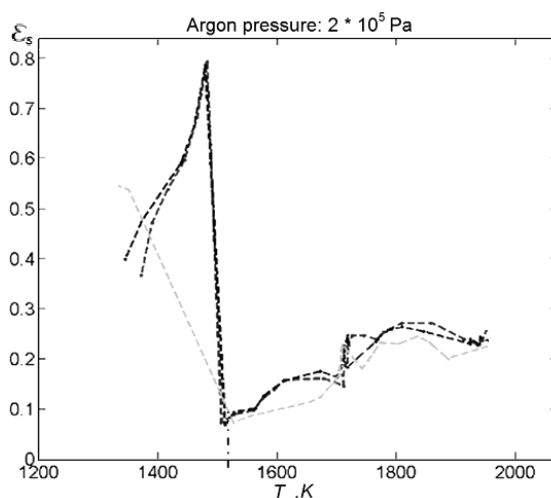


Рисунок 3 – Температурная зависимость коэффициента излучения («черноты») поверхности молибденового образца в зонах со смещением 0, 5, 10 мм

Аналогичные результаты получены в опытах с вольфрамовыми и танталовыми пленочными материалами [20, 21]. Кроме возможности ЯСКИ к обнаружению фазовых переходов,

опыты на танталовых образцах выявили дополнительные особенности данного метода. Он оказался чувствителен к изотермическому горению и изменениям фазового состава в поверхностном слое объекта. Это демонстрирует следующий пример. С помощью анализа фазовых диаграмм (Ta-O и Ta-C), исследований микроструктуры и микроэлементного состава фаз замороженных образцов удалось идентифицировать фазовые переходы, построить вероятный механизм изменения концентрации примесных атомов на поверхности танталовой фольги и последовательность смены фазовых состояний (рис. 4).

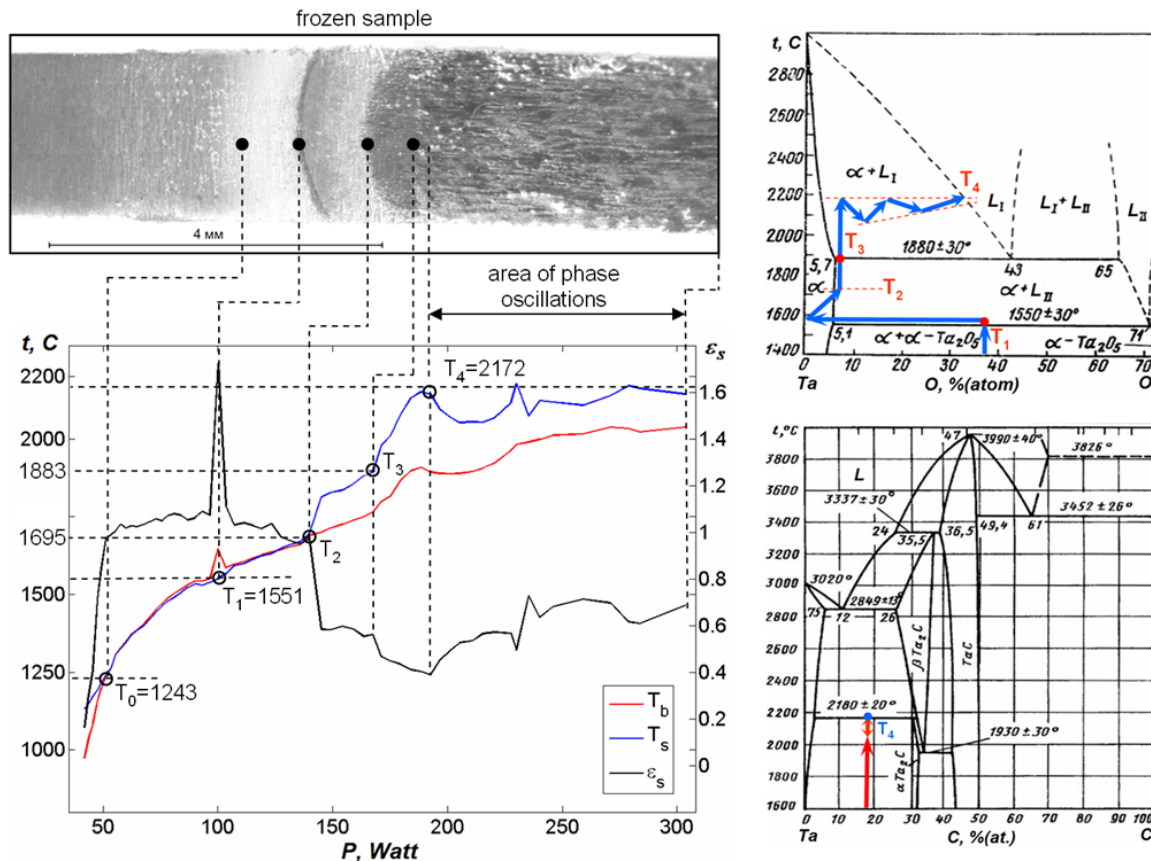


Рисунок 4 – Определение структурно-фазовых переходов на поверхности тантала по изменению ЯСКИ и построение вероятных концентрационных кривых примесных атомов

Согласно предложенной интерпретации результатов эксперимента T_0 соответствует температуре насыщения поверхностного слоя образца примесными атомами О и С. При T_1 происходит плавление эвтектики $\alpha\text{-Ta} + \alpha\text{-Ta}_2\text{O}_5$, что делает возможным растворение в ней примесных атомов и возникновение изотермического горения с образованием газообразных оксидов углерода, которые покидают образец. На изотермию горения указывает узость зоны новой фазы на замороженном образце и неизменность спектральной температуры, зависящей от формы спектра теплового излучения. При этом активация химических источников в поверхностном слое образца в дополнение к джоулевому тепловыделению приводит к резкому увеличению спектральной плотности потока излучения, что обнаруживается методом яркостной пирометрии. Конечно, в подобной точке ϵ_s не может быть оценкой спектральной степени черноты материала (в классическом понимании), но эта особенность позволяет с помощью ЯСКИ обнаруживать временный выброс или поглощение теплоты в химических реакциях, локализованных на дефектах структуры материала.

Выявление структурных фазовых переходов и характерных температур при нагреве или охлаждении материалов возможно по зависимости ЯСКИ от времени. Для этого следует анализировать полное множество значений ЯСКИ, полученное за весь период наблюдения объекта, либо использовать подход скользящего окна, позволяющий определять фазовые изме-

нения на ограниченном временном промежутке. Авторы использовали сверточную нейронную сеть для распознавания событий, связанных с изменением структуры материала наблюдаемого объекта [23]. Ее обучение осуществлялось на основе экспериментальных данных, представленных в работах [20, 21]. Структура нейронной сети и результаты обучения размещены в базе данных на SD-карте встраиваемой системы nVidia Jetson Nano. Интеллектуальный анализ спектральных данных на третьем уровне информационной модели позволяет обнаружить структурно-фазовые изменения в материале и характерные для них температуры. Объем трафика, достаточный для передачи этих сведений через коммуникационную среду экспериментального комплекса, составляет несколько десятков бит в секунду, а время посылки отдельных сообщений через интерфейсы FastEthernet и WiFi оценивается на уровне 5-10 мкс. Таким образом, интеллектуальные возможности пирометрического модуля способствуют построению высокоуровневого языка сообщений и организации быстрого канала обратной связи.

В целом реализация методов обработки сигнала спектрометра с помощью трехуровневой информационной модели на микрокомпьютере пирометрического модуля потребовала развертывания информационных служб: СУБД MySQL, Python, Tensorflow, Apache, PHP. Для ускорения обработки потока спектральных данных и инференса нейронной сети задействованы ядра CUDA GPU-модуля с производительностью 472 GFLOPS. Web-сайт пирометрического модуля содержит средства разработки клиентского программного обеспечения на языках C++, C#, Matlab с описанием объектно ориентированного интерфейса. Кроме того, с помощью Web-интерфейса возможно интерактивное взаимодействие пирометрического модуля и пользователя: настройка длительности экспозиции в пределах от 10 мкс до 10 с, выбор спектрального диапазона в пределах от 200 до 1100 нм, установка скорости регистрации спектров (до 500 sps), просмотр спектральных данных, анализ динамики условных температур и ЯСКИ, определение температуры вероятных фазовых переходов на основе встроенных средств ИИ, загрузка программных средств для разработки клиентских приложений и служб.

Интеллектуальная тепловизионная система использует две цифровые камеры Photonfocus MV1-D1024E-CL, регистрирующие монохромные изображения опытного образца на длинах волн 525 и 725 нм с полушириной полосы пропускания 40 нм. Стереомикроскоп «Альтами CM0655» позволяет контролировать область объекта исследования с разрешением 2.5 мкм. Регистрация видеоряда выполняется платой сбора данных microEnable IV-AD4-CL, а его обработка, анализ и хранение осуществляются высокопроизводительной встраиваемой системой Jetson AGX Xavier (рис. 5). Последняя работает под управлением операционной системы Linux Ubuntu и реализует в экспериментальном комплексе несколько функций:

- взаимодействуя с модулем позиционирования, определяет оптимальную рабочую дистанцию до объекта съемки;
- производит регистрацию изображений области опытного образца, наблюдаемой при заданных координатах рабочего органа модуля позиционирования;
- производит сшивку изображений областей опытного образца, опираясь на данные модуля позиционирования;
- используя данные специализированного пирометра, с которым имеет общую область визирования, идентифицирует структурно-фазовое состояние однородных зон на сшитых изображениях;
- при регистрации процесса СВС в режиме реального времени осуществляет анализ видеоданных, определяет положение фронта волны реакции и отправляет эти сведения посредством беспроводной сети модулю позиционирования.



Рисунок 5 – Высокоскоростные средства сбора и обработки видеоданных интеллектуальной тепловизионной системы на базе Jetson AGX Xavier и microEnable IV-AD4-CL

Результатом работы интеллектуального тепловизионного модуля являются временные ряды изображений структурно-фазовых зон и распределений температуры на поверхности образца. Эта информация размещается в базе данных модуля, развернутой на SSD интегрированной системы Jetson AGX Xavier. По запросу она доступна другим членам экспериментального комплекса и внешним субъектам.

Модуль 3D-позиционирования имеет оригинальную конструкцию и блок управления, в котором источник питания и драйверы шаговых двигателей подчиняются сигналам микроконтроллера Raspberry Pi 4B (8 Гб) с операционной системой Raspberry Pi OS. База данных модуля содержит программу перемещения рабочего органа по заданной траектории и сохраняет информацию о динамике его движения. В экспериментальном комплексе модуль отвечает за позиционирование средств измерения и удержание наблюдаемого явления как в области визирования, так и в фокальной плоскости оптической системы.

На начальной стадии эксперимента модуль позиционирования запрашивает параметры области визирования тепловизионной системы и связывает их с собственной системой координат. В ходе эксперимента модуль позиционирования в режиме реального времени с кадровой частотой получает от тепловизионных средств контроля сведения о положении фронта СВС в области наблюдения и делает прогноз времени выхода волны реакции за ее пределы. Другой прогнозируемой величиной является новое положение средств оптического контроля, в которое модуль позиционирования должен переместить их при измеренной скорости фронта СВС, заданном ускорении и максимальной скорости своего рабочего органа. Прогноз выполняется так, чтобы после фиксации средств измерения в новой позиции волна реакции могла заново пересечь их область визирования. В итоге, когда текущее время эксперимента достигает спрогнозированного значения, модуль позиционирования отправляет сообщение о приостановке регистрации данных на вычисленный им интервал и перемещает средства оптического контроля в новое положение.

Для инициации процесса СВС в экспериментальном комплексе разработан модуль зажигания, в котором прием команд по беспроводной сети осуществляется микроконтроллером ESP-8266. Программирование контроллера выполнено в среде Arduino на основе библиотеки ESP8266WiFi, которая поддерживает стек протоколов TCP/IP. С помощью оригинальных программных средств реализованы NTP-клиент и базовые функции интеллектуального сетевого прибора [24].

Заключение и выводы

Вычислительные платформы модулей экспериментального комплекса подобраны в соответствии с объемом трафика, генерируемого их сенсорами, ресурсоемкостью задач по обработке первичных данных и служебных сообщений. На всех платформах реализована единая концепция сетевых интеллектуальных приборов, позволившая объединить специализированные модули в информационно-мехатронную систему для решения задачи совместного контроля макрокинетики и микрогетерогенных процессов явления СВС [25]. В качестве механизма решения указанной задачи в экспериментальном комплексе реализован подход многозонного наблюдения СВС с высоким пространственным и временным разрешением [26]. В экспериментальном комплексе применена двухуровневая синхронизация с мировым временем. Модуль, инициирующий построение комплекса, осуществляет свою синхронизацию по NTP-серверу сети Интернет с точностью до 40 мс, и сам при этом выступает источником временных данных для остальных интеллектуальных модулей. Это позволяет добиться в локальной сети средней ошибки хода часов модулей около 20 мкс. Единая коммуникационная среда, использование группового вещания при передаче сообщений, собственные хранилища данных и интеллектуальные способности модулей позволили минимизировать задержку в цепях обратной связи и добиться временного разрешения экспериментального комплекса на уровне 250 мкс (оценка выполнена на базе тепловизионного модуля). Для увеличения быстродействия интеллектуальной информационно-мехатронной системы следует минимизировать набор задач, решаемых модулями в режиме реального времени, а основную обработку данных выполнять по завершении процесса регистрации. Организация интеллектуальных модулей на программно-логическом уровне с помощью беспроводной сети позволяет гибко менять архитектуру экспериментального комплекса для решения широкого спектра задач оптического контроля быстропротекающих процессов [27–31].

Литература

1. Miniature parallel robot with submillimeter positioning accuracy for minimally invasive laser osteotomy / M. Eugster, J.-P. Merlet, N. Gerig, P. C. Cattin, G. Rauter, // *Robotica*. – 2022. – № 40(4). – С. 1070–1097.
2. Design of a tensegrity servo-actuated structure for civil applications / Scoccia, C., Carbonari, L., Palmieri, G. [et al.] // *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*. – 2022. – № 144(4). – P. 043302.
3. Kinigadner, A. Schaeffler axle family – future solutions for the electric drivetrain / A. Kinigadner, T. Biermann // *VDI Berichte*. – 2019. – № 2354. – С. 567–581.
4. Jordan, V. I. 3D computer-aided simulation of SHS macrokinetics in the Ni-Al porous medium with the closest packing of «mesocells» / V. I. Jordan, I. A. Shmakov, A. A. Grigoryevskaya // *Journal of Physics: Conference Series* : 6, Samara, 26–29 мая 2020 года. – Samara, 2021. – P. 012062. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012062.
5. Лопота, В. А. Закономерности развития мехатроники и робототехники / В. А. Лопота, Е. И. Юревич. – Текст : непосредственный // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2008. – № 3(59). – С. 12–18.
6. Offline programming of robot model with virtual environment support / I. Abramov, Y. Turygin, A. Shchenyatsky [et al.] // *12th International Conference ELEKTRO 2018, 2018 ELEKTRO Conference Proceedings* : 12, Mikulov, 21–23 мая 2018 года. – Mikulov, 2018. – P. 1–6. – DOI 10.1109/ELEKTRO.2018.8398315.
7. Тряпкин, Е. Ю. Система синхронизации времени для работы распределенной измерительной системы / Е. Ю. Тряпкин, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко. – Текст : непосредственный // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. – 2021. – № 4 (29). – С. 72–76.

8. Жуков, Ю. А. Нейросетевое решение задач управления гексаподом для встраиваемой платформы NVIDIA Jetson / Ю. А. Жуков, Е. Б. Коротков, А. В. Мороз. – Текст : непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8. – С. 231–241.
9. Suzen, A. A. Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN / A. A. Suzen, B. Duman, B. Sen // HORA 2020 : 2nd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications : Proceedings. – 2020. – С. 9152915.
10. Kryjak, T. Real-time hardware-software embedded vision system for ITS smart camera implemented in Zynq SoC / T. Kryjak, M. Komorkiewicz, M. Gorgon // Journal of Real-Time Image Processing. – 2018. – № 15 (1). – С. 123–159.
11. Зенин, А. А. Исследование структуры тепловой волны в СВС-процессах (на примере синтеза боридов) / А. А. Зенин, А. Г. Мержанов, Г. А. Нерсисян. – Текст : непосредственный // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 16, № 1. – С. 79–90.
12. Моделирование фрактальных структур упаковок порошковых СВС-материалов / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, И. В. Милукова [и др.]. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2007. – № 3. – С. 39–41.
13. Bratchikova, O. M. The advantage of multicast IP technology in comparison with traditional technology IP-address (unicast) / O. M. Bratchikova, V. V. Kukartsev, O. I. Suslova. – Текст : непосредственный // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. – 2015. – № 14. – С. 99–100.
14. Коробко, И. В. Поиск данных в Active Directory по GUID / И. В. Коробко. – Текст : непосредственный // Системный администратор. – 2012. – № 4 (113). – С. 15.
15. Климов, Д. А. Особенности синхронизации в беспроводных сетях связи / Д. А. Климов. – Текст : непосредственный // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 17–19.
16. ASEQ Instruments Homepage. – URL: <https://aseq-instruments.com/>, last accessed 2022/04/19 (дата обращения: 09.05.2022).
17. nVidia: Jetson Nano. – URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>, last accessed 2022/04/19 (дата обращения: 09.05.2022).
18. 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.
19. Долматов, А. В. Оценка спектральной степени черноты материалов средствами оптической пирометрии / А. В. Долматов, И. В. Милукова, А. Э. Алиев. – Текст : непосредственный // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 147–155.
20. Автоматизированный комплекс пирометрического контроля структурообразования в материалах / А. В. Долматов, И. В. Милукова, И. М. Исакова, А. В. Калачев. – Текст : непосредственный // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. – 2017. – Т. 1, № 7. – С. 172–183.
21. 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, Saint Petersburg, 14–16 мая 2019 года. – Saint Petersburg : Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010.
22. Самсонов, Г. В. Физико-химические свойства окислов : справочник / Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Л. Жидкова. – Москва : Металлургия. – 1978. – 472 с. – Текст : непосредственный.
23. Haykin, S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. – 3rd Edition. – Prentice Hall, 2009.
24. Долматов, А. В. Сетевая архитектура калибровочного стенда тепловизионных и спектральных приборов для контроля высокотемпературного синтеза материалов / А. В.

Долматов. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – № 4 (63). – С. 35–44. – DOI 10.17816/byusu20210435-44.

25. Dolmatov, A. V. Chrono-topographic analysis of the fire focus dynamics in the SHS wave / A. V. Dolmatov, P. Yu. Gulyaev, I. V. Milyukova // Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 16–22 September 2018 years. – Tomsk : Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042024. – DOI 10.1088/1742-6596/1115/4/042024.

26. Dolmatov, A. V. Thermal imaging complex with tracking function for joint research of microheterogeneous processes and macrokinetics of SHS phenomenon / A. V. Dolmatov, P. Y. Gulyaev // Journal of Physics Conference Series : The International Conference «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, 18–20 February 2019 years. – IOP Publishing : IOP Publishing, 2019. – P. 062006. – DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062006.

27. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напыления / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–10. – С. 2135–2140.

28. Ермаков, К. А. Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления. – Текст : непосредственный / К. А. Ермаков, А. В. Долматов, И. П. Гуляев // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 56–68.

29. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, П. Ю. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3. – С. 70–73.

30. Formation of highly concentrated heterogeneous flows during plasma deposition of powder materials / V. I. Kuzmin, I. P. Gulyaev, D. V. Sergachev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31 May – 6 June 2021 года. – Divnomorskoe, 2021. – P. 052095. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052095.

31. Grigoryevskaya, A. A. Spin instability of technological combustion mode in a wave of self-propagating high-temperature synthesis / A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev // Yugra State University Bulletin. – 2022. – № 1(64). – P. 9–20. – DOI 10.18822/byusu20220109-20.

32. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings / V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev [et al.] // MATEC Web of Conferences, Sevastopol, 11–15 September 2017 years. – Sevastopol: EDP Sciences, 2017. – P. 01052. – DOI 10.1051/matecconf/201712901052.