

# Организация мониторинга технологического оборудования

Мартинова Л.И.  
Кафедра компьютерных систем  
управления  
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"  
г. Москва, РФ  
[lili@ncsystems.ru](mailto:lili@ncsystems.ru)

Соколов С.В.  
Кафедра компьютерных систем  
управления  
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"  
г. Москва, РФ  
[sokolov@ncsystems.ru](mailto:sokolov@ncsystems.ru)

Бабин М.С.  
Кафедра компьютерных систем  
управления  
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН"  
г. Москва, РФ  
[binafon88@yandex.ru](mailto:binafon88@yandex.ru)

**Abstract** — The article describes an approach to the practical implementation of a combined system of monitoring of the state of the technological equipment for the collection, visualization, storage and subsequent analysis of information. The system collects information from both systems of control of technological equipment and external (additional) sensors attached to process units. The article presents the example of obtaining information from the motion controller by ORS UA, from the CNC system by using a specific set of API-functions and receiving information from an external temperature sensor. It is demonstrated that the solution permits to collect a large array of various data on the operation of the equipment.

**Ключевые слова** — Индустрия 4.0, MDC, цифровое производство, сбор данных, ЧПУ, ПЛК

## I. ВВЕДЕНИЕ

При организации цифрового производства успех работы всей производственной структуры базируется на достоверных оперативных данных о состоянии и режиме работы технологического оборудования и состоянии технологических процессов. По-прежнему «узким местом» остается подключение к единой информационной среде исполнительных механизмов технологического оборудования [1, 2]. Системы мониторинга производства (Machine Data Collection) призваны быть связующим звеном между технологическим оборудованием и системами управления производством (MES), собирать и передавать объективную информацию о функционировании производства и его составляющих [3].

Источниками такой информации являются встраиваемые в технологические комплексы специальные программные и аппаратные средства, номенклатура которых весьма широка, и они очень разнородны [4], часто бывают несовместимы, что становятся большим препятствием при создании систем автоматического мониторинга технологических комплексов [5-7].

## II. ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТИМОСТИ

Производители систем управления создают программный инструментарий для диагностики и настройки следящих приводов и удаленных модулей ввода/вывода электроавтоматики (цифровые осциллографы, логические анализаторы и др.) [8-10]. Они позволяют напрямую читать память УЧПУ, получать сведения о состоянии станка, о текущем состоянии системы ЧПУ и технологических параметрах: режимы резания, текущий кадр, G- и M-векторы, нагрузка на приводах, код ошибки и др. [11].

Из-за разнообразия станков и разнородности систем управления большим препятствием при создании систем автоматического мониторинга технологического оборудования становятся такие факторы, как: разные протоколы передачи данных и несовместимость между ними, разные способы доступа к данным, предоставляемым системами управления и пр., что в итоге усложняет задачу автоматического сбора, обработки и передачи информации на более высокие уровни производства для оперативного принятия решений [12, 13].

Требуются новые модели и инструментальные средства оперативного сбора и обработки информации с подконтрольных объектов промышленных предприятий, каковыми являются станки, автоматизированные линии, роботы и другие автоматизированные средства технологического оснащения оборудования, а также возможности ее агрегирования и передачи на более высокие уровни управления предприятием [14, 15]. Предлагаемое решение состоит в построении единой мультипротокольной коммуникационной среды на базе интеллектуального концентратора.

## III. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Интеллектуальный концентратор представляет собой многофункциональное устройство с функциями коммутатора и управления, располагающее набором разного типа портов для агрегации данных с систем ЧПУ и контроллеров автоматизации, «классических» дискретных и интеллектуальных датчиков, и исполнительных устройств, а также приборов учета и контроля [16]. На рис. 1 представлена архитектурная модель интеллектуального концентратора в структуре системы промышленной автоматизации и управления производственным процессом.

Интеллектуальный концентратор выполнен в виде отдельного вычислительного устройства, выполняющего роль шлюза между коммуникационной средой и полевыми шинами цехового уровня и общей информационной средой предприятия. В зависимости от количества подключаемых устройств аппаратная реализация возможна как на базе одноплатных компьютеров с процессорами ARM, так и на базе более производительных промышленных ПК с архитектурой x86/64. Использование кроссплатформенных инструментов разработки и операционной системы Linux позволяет легко адаптировать программную часть интеллектуального концентратора под различные аппаратные платформы [17].

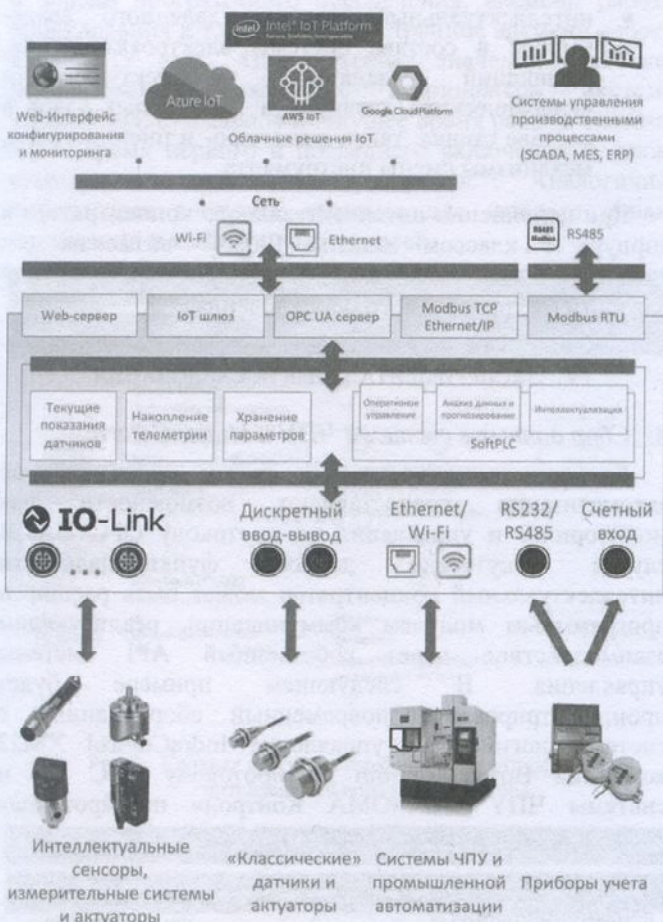


Рис. 1. Архитектурная модель интеллектуального концентратора

Программная архитектура интеллектуального концентратора имеет 3 гибко конфигурируемых уровня: уровень коммуникации с технологическими устройствами, уровень обработки и хранения данных и уровень взаимодействия с системами управления производственными процессами. Взаимодействие между программными компонентами разных уровней реализовано на основе обобщенных интерфейсов, позволяющих варьировать набор подключаемого оборудования в зависимости от решаемых задач [18].

#### A. Коммуникация на уровне технологического комплекса

Для автоматизации и управления производственным процессом на уровне технологического комплекса интеллектуальный концентратор может иметь 4-8 портов ввода-вывода по интерфейсу IO-Link для коммуникации с интеллектуальными датчиками и актуаторами, порты дискретного ввода-вывода 24В для подключения «классических» датчиков и исполнительных устройств, порты RS232/RS485 и счетные входы для подключения приборов учета и контроля. Данный набор интерфейсов позволяет производить мониторинг и оперативное управление общими вспомогательными системами цехового уровня, такими как:

- контроль состояния пневматической магистрали и управление пневмокомпрессором,
- сбор данных о состоянии микроклимата в производственном помещении (температура, влажность, освещенность, содержание газов) и

управление системой вентиляции и кондиционирования,

- мониторинг системы водо- и энергоснабжения и потребления тепловых ресурсов в цеху,
- регистрация событий открытия/закрытия цеховых ворот и данных от системы контроля и управления доступом (СКУД).

Промышленный коммуникационный интерфейс IO-Link позволяет не только передавать информацию от датчиков к системам управления, но и настраивать современные интеллектуальные датчики, осуществлять удаленную параметризацию и диагностику устройств нижнего уровня автоматизации, вести мониторинг состояния различных узлов [19].

Для коммуникации с системами управления станками и системами промышленной автоматизации используются протоколы на базе Ethernet. Расширяемый набор программных модулей обмена данными позволяет осуществлять взаимодействие на базе различных протоколов коммуникации: OPC UA или собственного API интерфейса системы управления. Предусмотрен HTTP-сервер для приема данных с автономных датчиков, отвечающих требованиям IIoT.

#### B. Уровень обработки данных и накопления телеметрии

На уровне программной части интеллектуальный концентратор реализует такие возможности, как:

- считывание текущих показаний с подключенных датчиков и передача их системам автоматизации верхнего уровня;
- накопление телеметрических данных с сохранением истории изменения показаний датчиков, в том числе в режиме offline;
- сохранение параметров настройки интеллектуальных датчиков IO-Link для их быстрой замены, в случае необходимости, без повторного конфигурирования.

Программно-реализованный контроллер электроавтоматики (SoftPLC) в составе интеллектуального концентратора выполняет функции оперативного управления технологическим комплексом без участия систем автоматизации верхнего уровня [20]. Помимо этого, на него возлагаются и ряд других функций, таких как:

- анализ данных с датчиков и телеметрии и измерительных приборов, прогнозирование нештатных ситуаций и возможного выхода параметров за пределы рабочего диапазона, сигнализация о событиях,
- интеллектуализация «классических» датчиков: пересчет «сырых» показаний датчика (напряжение, ток) в непосредственное значение измеряемого параметра в общепринятых единицах измерения (температура, расход л/мин и т.д.),
- интеллектуализация периферийных устройств технологического оборудования (гидростанции,

системы охлаждения, климатические установки, механизмы смены инструмента).

Часть задач со штатного контроллера электроавтоматики станка могут быть перераспределены на интеллектуальный концентратор. Тогда, например, механизм смены инструмента будет представлять собой законченное интеллектуальное устройство с цифровым интерфейсом управления (например, Ethernet/IP), которому штатный ПЛК просто передаст номер вызываемого инструмента, а последовательность действий по смене инструмента (вращение барабана, повороты манипулятора) имплементируется внутри интеллектуального концентратора. Схема подключения значительно упрощается, поскольку отпадает необходимость использования большого количества проводов дискретного ввода-вывода.

### С. Коммуникация с системами верхнего уровня

Для связи с системами промышленной автоматизации верхнего уровня предусмотрены интерфейсы Ethernet/WiFi и Modbus RTU/RS485.

Ethernet/WiFi осуществляет связь по протоколу TCP/IP систем верхнего уровня с:

- встроенным Web-сервером для конфигурирования устройства и построения веб-ориентированных пользовательских интерфейсов мониторинга,
- IoT плюсом для подключения устройства к облачным решениям интернета вещей, таким как Microsoft Azure IoT, Amazon AWS IoT, Google Cloud Platform и т.д.,
- OPC UA сервером для интеграции с системами управления производственными процессами SCADA, MES, ERP и системами Индустрии 4.0,
- SCADA-системами через Modbus TCP и Ethernet/IP протоколы для коммуникации с контроллерами электроавтоматики.

Modbus RTU/RS485 обеспечивает совместимость систем управления верхнего уровня со SCADA системами предыдущего поколения.

Таким образом, многофункциональный интеллектуальный концентратор представляет собой киберфизическую систему, соответствующую концепции интернета вещей и Индустрии 4.0. Его функционирование возможно в таких режимах, как:

- автономный контроллер автоматизации для несложных задач с возможностями конфигурирования и мониторинга через Интернет;
- концентратор для подключения групп датчиков с целью сбора с них и накопления телеметрических данных под управлением SCADA-системы, в том числе, в составе облачного IoT решения. Часть алгоритмов управления подключенными устройствами может реализовываться встроенным SoftPLC и функционировать независимо от подключения к системе верхнего уровня;

- интеллектуальный модуль удаленного ввода-вывода в составе системы электроавтоматики, решающий задачу интеллектуализации «классических» датчиков и даже целых узлов в составе станка, таких как гидро- и пневмостации, механизмы смены инструмента.

При исполнении интеллектуального концентратора в корпусе с классом защиты IP65/67 возможна его установка вне электрошкафа в непосредственной близости от управляемого оборудования.

## IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### А. Сбор данных с системы ЧПУ и MotionControl

Большинство современных систем промышленной автоматизации предоставляют возможности для мониторинга и управления по протоколу OPC UA. В случае отсутствия данной функциональности интеллектуальный концентратор может быть расширен программным модулем коммуникации, реализующим взаимодействие через собственный API системы управления. В следующем примере будет проиллюстрирован одновременный сбор данных с системы логического управления IndraControl XM22 компании Bosch Rexroth по протоколу OPC UA и системы ЧПУ «АксиОМА Контрол» по протоколу коммуникации на базе Ethernet (рис. 2).



Рис. 2. Структура тестового стенда сбора данных

Конфигурирование подключенных устройств к интеллектуальному концентратору производится через Web-интерфейс управления, после чего концентратор запускает необходимые модули коммуникации и начинает выполнять накопление данных. Web-интерфейс также предоставляет удобные страницы сводной статистики и статуса работы подключенных устройств, позволяющий производить оперативный мониторинг состояния технологического оборудования цеха (рис. 3). Отдельные специализированные экраны позволяют просматривать дополнительную информацию

о версии программного обеспечения, времени работы оборудования и т.д. Например, страница времени работы ядра ЧПУ (рис. 4) отображает значения счетчиков использования различных компонентов системы управления: суммарное и текущее время работы системы ЧПУ, время первого и последнего включения, а также суммарное количество запусков. Аналогичная информация доступна отдельно для каждого канала управления и каждого привода осей.

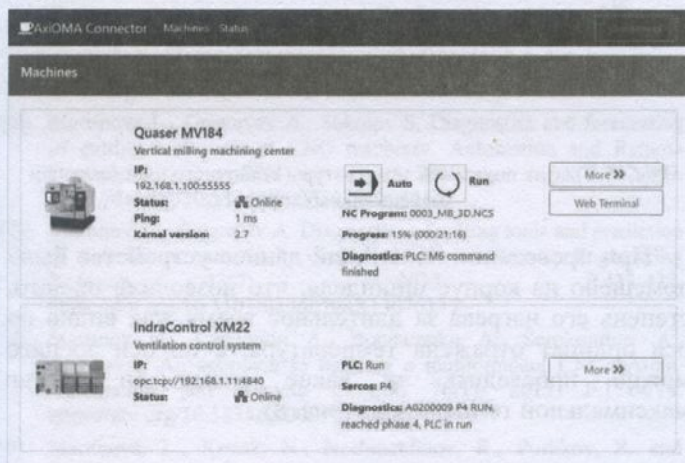


Рис. 3. Сводная статусная страница Web-интерфейса интеллектуального концентратора

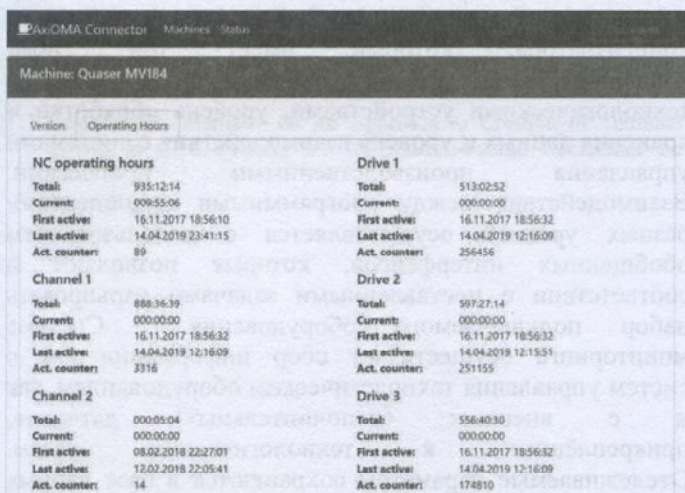


Рис. 4. Страница времени работы ядра системы ЧПУ

Значения всех отслеживаемых параметров сохраняются в базе данных локального хранилища телеметрии интеллектуального концентратора. В любой момент времени сохраненная история за заданный интервал может быть по запросу передана в систему управления производством верхнего уровня или отображена в Web-интерфейсе. На рис. 5 показан сводный график телеметрии нескольких параметров (загрузка процессора, температура и положение одной из осей), полученной из контроллера движения IndraControl XM22 по интерфейсу OPC UA. Регистрация параметров производилась с интервалом 100 мс.

Получение данных из системы ЧПУ «АксиОМА Контроль» с использованием программного интерфейса API системы числового программного управления проиллюстрировано на рис. 6. Несмотря на необходимость реализации для данного случая отдельного модуля коммуникации по нестандартному

протоколу, данный подход дает преимущества по сравнению с мониторингом через OPC UA. Например, возможность запускать по заранее заданному условию специфические функции в системе ЧПУ для получения более подробных диагностических данных.

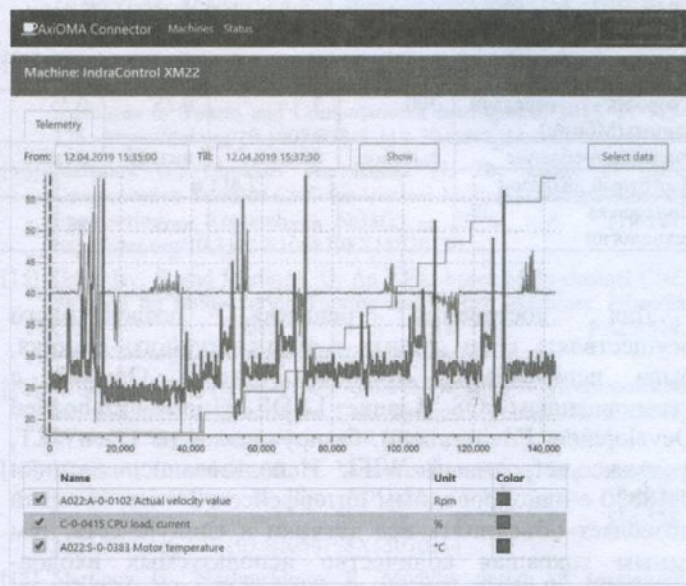


Рис. 5. Просмотр накопленной телеметрии IndraControl XM22

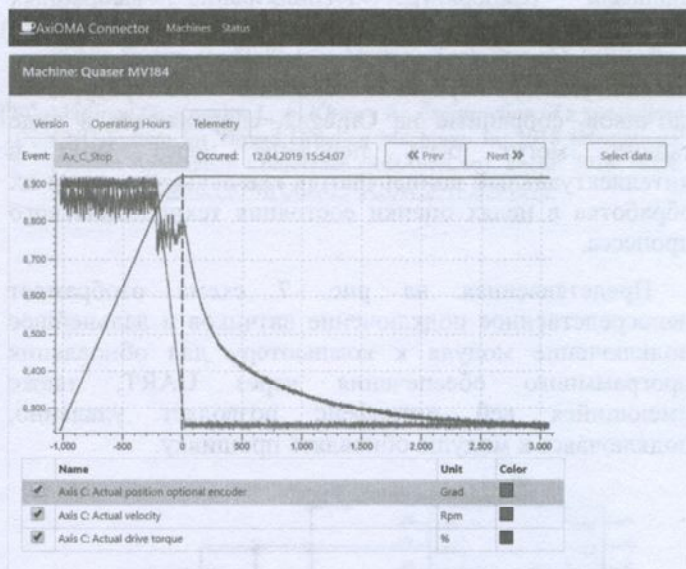


Рис. 6. Отображение измерения движения оси Z системы ЧПУ «АксиОМА Контроль»

В приведенном примере по событию остановки оси Z станка запускается внутренняя система измерений (в системе ЧПУ), позволяющая сохранить подробную информацию о небольшом временном интервале работы системы с высокой частотой дискретизации. На графике представлены результаты измерения позиции, скорости и крутящего момента вокруг оси Z с интервалом 0.5 мс.

#### В. Сбор данных с автономного датчика температуры

При сборе диагностической информации и мониторинге станочного оборудования немаловажной является аппаратная часть, позволяющая отслеживать показания таких параметров, как температура различных узлов, силы резания и других показателей, а также осуществлять телеметрию. Для этого можно использовать модули, позволяющие получать

информацию с внешних датчиков не только по полевым шинам, но и посредством беспроводных протоколов передачи данных, представленных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. СРАВНЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Технология	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	Thread
Скорость передачи данных(Мбит/с)	300	3	0,25	0,25
Энергопотребление	высокое	низкое	низкое	низкое
Частотный диапазон	2,4ГГц			
Поддержка технологии IP	да	нет	нет	да

Для построения решения, позволяющего осуществлять сбор данных с температурного датчика, была использована отладочная плата Omega2 с установленным OS Linux, LEDE (Linux Embedded Development Environment), базирующаяся на OpenWRT, а также встроенный WIFI. Использовались датчики ds18b20 с однопроводным интерфейсом 1-wire, который позволяет объединять все датчики в единую сеть, тем самым сокращая количество используемых входов-выходов. Данные датчики не требуют калибровок, поскольку они уже откалиброваны на определенный диапазон температур. Использование выбранных микросхем допускается и в агрессивных условиях, поскольку они исполнены в защитном герметичном металлическом корпусе. Показания температуры с датчиков, собранные на Omega2, сохраняются в виде таблиц, могут быть переданы через WiFi в интеллектуальный концентратор, где осуществляется их обработка в целях оценки состояния технологического процесса.

Представленная на рис. 7 схема отображает непосредственное подключение датчиков и дальнейшее подключение модуля к компьютеру для обновления программного обеспечения через UART, также имеющийся веб интерфейс позволяет удаленно, подключаясь к модулю обновлять прошивку.

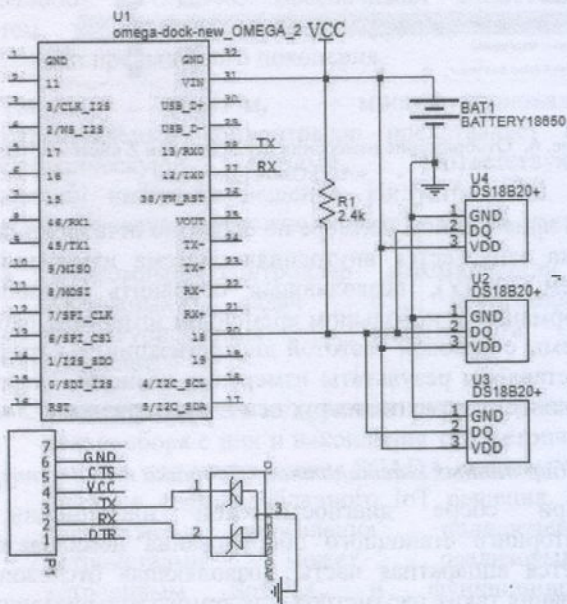


Рис. 7. Принципиальная схема взаимодействия беспроводного модуля с цифровыми датчиками температуры

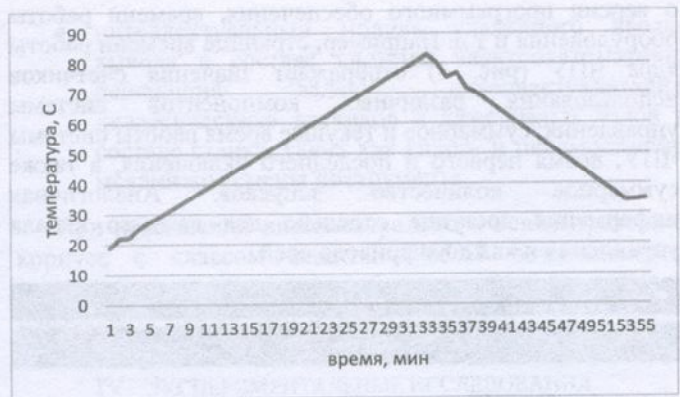


Рис. 8. График показаний температуры станочного шпинделя при максимальных нагрузках

При проведении испытаний данное устройство было помещено на корпус шпинделя, что позволило оценить степень его нагрева за длительное время, как видно по оси ординат отражена температура, а по оси абсцисс можно проследить за какое время он достиг максимальной температуры (рис. 8).

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено решение по организации мониторинга технологического оборудования на базе многофункционального интеллектуального концентратора, который имеет три гибко конфигурируемых уровня: уровень коммуникации с технологическими устройствами, уровень обработки и хранения данных и уровень взаимодействия с системами управления производственными процессами. Взаимодействие между программными компонентами разных уровней осуществляется с использованием обобщенных интерфейсов, которые позволяют в соответствии с поставленными задачами варьировать набор подключаемого оборудования. Система мониторинга осуществляет сбор информации как с систем управления технологическим оборудованием, так и с внешних (дополнительных) датчиков, прикреплённых к технологическим узлам. Отслеживаемые параметры сохраняются в базе данных локального хранилища интеллектуального концентратора, и в любой момент сохраненная история может быть по запросу передана в систему управления производством верхнего уровня или отображена в Web-интерфейсе пользователя. Многофункциональный интеллектуальный концентратор представляет собой киберфизическую систему, соответствующую концепции интернета вещей и Индустрии 4.0.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Martinova L., Martinov G. Automation of Machine-Building Production According to Industry 4.0. 3-rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. - Vladivostok, 2018. P.1 - 4. <https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165>
- [2] Martinova L., Sokolov S., Nikishechkin P. Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots // Advances in Swarm and Computational Intelligence: 6th International Conference, ICSI 2015 held in conjunction with the Second BRICS Congress, CCI, 2015, Proceedings, Part II., P. 200-207. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20472-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20472-7_22)
- [3] Petr Nikishechkin, Nadezhda Chervonnova, Anatoly Nikich Approach to the construction of specialized portable terminals for

- monitoring and controlling technological equipment. In: MATEC Web Conf. Volume 224, 2018. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018. P.1-9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401089>
- [4] Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R., Grigoriev A., Obukhov A. and Martinova, L. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems. *Automation and Remote Control*, 78(3), 2017. P.525-536. <https://doi.org/10.1134/S0005117917030122>
- [5] Martinov G., Sokolov S., Martinova L., Grigoryev A., Nikishechkin P. Approach to the Diagnosis and Configuration of Servo Drives in Heterogeneous Machine Control Systems. In: 8th International Conference, ICSI. Fukuoka, Japan, 2017. P. 586-594. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61833-3\\_62](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61833-3_62)
- [6] Martinova L., Grigoryev A., Sokolov S. Diagnostics and forecasting of cutting tool wear at CNC machines. *Automation and Remote Control*, 73(4), 2012. P.742-749. <https://doi.org/10.1134/S0005117912040133>
- [7] Martinov G., Grigor'ev A. Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. *Russian Engineering Research*, 33(7), 2013. P.433-437. <https://doi.org/10.3103/S1068798X13070137>
- [8] Martinov G., Lyubimov A., Bondarenko A., Sorokoumov A., Kovalev I. An approach to building a multiprotocol CNC system. *Automation and Remote Control*, 76(1), 2015. P.172-178. <https://doi.org/10.1134/S0005117915010178>
- [9] Martinova, L., Kozak, N., Nezhmetdinov, R., Pushkov, R. and Obukhov, A. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. *Automation and Remote Control*, 76(1), 2015. P.179-186. <https://doi.org/10.1134/S000511791501018X>
- [10] Martinova L., Pushkov R., Kozak N., Trofimov E. Solution to the problems of axle synchronization and exact positioning in a numerical control system. *Automation and Remote Control*, 75(1), 2014. P.129-138. <https://doi.org/10.1134/S000511791401010X>
- [11] Grigoriev S., Martinov G. An Approach to Creation of Terminal Clients in CNC System. In: 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok, 2018. P.1 - 4. <https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482165>
- [12] Martinov G., Kozak, N., Nezhmetdinov R. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076119>
- [13] Martinov G., Grigoryev A., Nikishechkin P. Real-Time Diagnosis and Forecasting Algorithms of the Tool Wear in the CNC Systems. *Advances in Swarm and Computational Intelligence*, 2015. P. 115-126. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20469-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20469-7_14)
- [14] Martinov G., Obukhov A., Kozak N. The Usage of Error Compensation Tools of CNC for Vertical Milling Machines. *Russian Engineering Research*, №38(2), 2018. P. 119-122. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18020120>
- [15] Grigoriev, S. and Martinov, G. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines. *Procedia CIRP*, №46, 2016. P.525-528. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036>
- [16] Grigoriev S., Martinov G. The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems. *Procedia CIRP*, №41, 2016. P. 858-863. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031>
- [17] Martinov, G. and Kozak, N. Numerical control of large precision machining centers by the AxiOMA control system. *Russian Engineering Research*, №35(7), 2015. P. 534-538. <https://doi.org/10.3103/S1068798X15070114>
- [18] Martinov G., Nezhmetdinov R. Modular design of specialized numerical control systems for inclined machining centers. *Russian Engineering Research*, №35(5), 2015. P. 389-393. <https://doi.org/10.3103/S1068798X15050160>
- [19] Grigoriev S., Martinov G. Scalable Open Cross-Platform Kernel of PCNC System for Multi-Axis Machine Tool. *Procedia CIRP*, №1, 2012. P. 238-243. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.043>
- [20] Martinov G., Kovalev I., Al Khoury A. Construction of a Specialized CNC System for Thread Grinding Machines. In: 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: 2018. IEEE. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501675>