

УДК 681.518
DOI:10.30987/2223-4608-2021-12-20-25

В.В. Путьрайнен, к.ф.-м.н., **М.А. Беляев**, научный сотрудник,
Д.А. Кириенко, к.ф.-м.н., **П.В. Лунков**, ведущий инженер
(ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»,
185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33)
E-mail: biomax89@yandex.ru

Модульная аппаратная платформа для разработки устройств промышленного интернета вещей*

Представлена архитектура модульной аппаратной платформы для разработки устройств промышленного интернета вещей на примере системы сбора и анализа информации. Приводятся варианты исполнения модулей, реализующих типовые функции подобных устройств: получение данных от распределенного массива датчиков; предварительная обработка, агрегация и передача данных; интеллектуальный анализ данных; хранение первичных данных и результатов анализа.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей; модульная архитектура; система сбора данных; интеллектуальный анализ данных.

V.V. Putrolaynen, Can. Sc. Physics and Mathematics, **M.A. Belyaev**, Researcher,
D.A. Kirienko, Can. Sc. Physics and Mathematics, **P.V. Lunkov**, Senior Engineer
(Petrozavodsk State University, 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910)

Modular hardware platform for the development of industrial Internet of Things (IoT) devices

The modular hardware platform architecture for the development of industrial IoT devices is presented as an example of information harvesting and its analysis. Variants of modules implementing typical functions of such devices are given: data acquisition from a distributed array of sensors; preprocessing, aggregation and data transmission; data mining; storage of primary data and analysis results.

Keywords: IoT (Internet of Things); modular architecture; data harvesting system; data mining.

Введение

В настоящее время большое внимание ис-

* Исследование выполнялось в Петрозаводском государственном университете при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-11-2019-088 от 20.12.2019 по теме: «Создание высокотехнологичного производства мобильных микропроцессорных вычислительных модулей по технологии SiP, PoP для интеллектуального сбора, анализа данных и взаимодействия с окружающими источниками».

следователей привлекает концепция вычислительной сети, объединяющей большое количество взаимодействующих друг с другом «умных» устройств и получившей названия интернета вещей (ИВ) [1, 2]. Данная концепция подразумевает использование различных проводных (Ethernet; USB; RS-485 и др.) и беспроводных (Wi-Fi; Bluetooth; Zigbee и др.) стандартов передачи данных для обмена информацией между устройствами без участия человека.

Кроме того, ИВ объединяет такие области

информационных технологий, как облачные и туманные вычисления, машинное обучение, многопараметрический анализ данных, нечеткая логика и др. [1, 2]. Такая распределенная вычислительная среда может использоваться для автоматизации бытовых задач (умный дом; уход за пожилыми людьми; инвалидами; домашними питомцами), медицинской диагностики, мониторинга транспортной инфраструктуры, автоматизации производства, технического обслуживания оборудования и т.д. [2].

Разнообразие используемых технологий и сфер применения является причиной большого числа исследований в области ИВ, количество которых начинает стремительно расти с 2010 года. Это привело к тому, что на рынке стали появляться как отдельные устройства, так и целые экосистемы устройств, которые объединены с использованием унифицированных в рамках данной экосистемы программных средств взаимодействия [3].

Стоит отметить, что, несмотря на большое количество различных аппаратных платформ устройств ИВ [2], они имеют схожий функционал: получение информации из внешней среды; передача её посредством различных протоколов; анализ полученной информации и хранение результатов работы. Также стоит отметить, что не все устройства ИВ используют весь обозначенный функционал, поэтому при разработке универсальной аппаратной платформы для подобных устройств необходимо руководствоваться модульным подходом построения системы. Такой подход позволяет произвольным образом конфигурировать устройство путем добавления или изменения отдельных модулей.

Использование ИВ в промышленности связано с современными тенденциями, которые подталкивают производителей к созданию оборудования высокой степени автоматизации, эффективно взаимодействующего со своим окружением в составе сетевой архитектуры и подстраивающегося в режиме реального времени под меняющиеся внешние условия с помощью самообучения и самонастройки [4, 5]. Такие системы, положенные в основу четвертой промышленной революции или индустрии 4.0, представляют собой виртуальные копии объектов реального мира и обычно называются киберфизическими системами [5].

Для реализации связи между цифровой копией и объектом реального мира используются данные о различных параметрах оборудования и его окружения, получаемые с помощью распределенного массива датчиков.

Сбор, агрегирование и передача информации от массива датчиков цифровой копии осуществляется с помощью систем сбора и анализа информации, которые могут быть реализованы с помощью технологии промышленного ИВ.

В данной работе приводится описание концепции многомодульной аппаратной платформы для разработки устройств промышленного ИВ на примере системы сбора и анализа информации. В работе приводятся архитектура разрабатываемой системы и отдельных модулей, представлены функциональные схемы и описаны способы взаимодействия отдельных модулей между собой для реализации основных функций: сбора данных с распределенного массива датчиков, предварительной обработки, агрегации и передачи для анализа, интеллектуального анализа данных с применением методов машинного обучения, хранения промежуточных данных и результатов анализа.

Архитектура системы

Модульная система сбора и анализа информации (МССАИ) состоит из следующих компонентов: управляющего вычислительного модуля (УВМ); тензорного вычислительного модуля (ТВМ); модуля хранения данных (МХД); модуля передачи данных (МПД); сенсорных вычислительных модулей (СВМ); объединительной платы (ОП); Ethernet коммутатора; точки доступа Wi-Fi и распределенной сети датчиков (рис. 1).

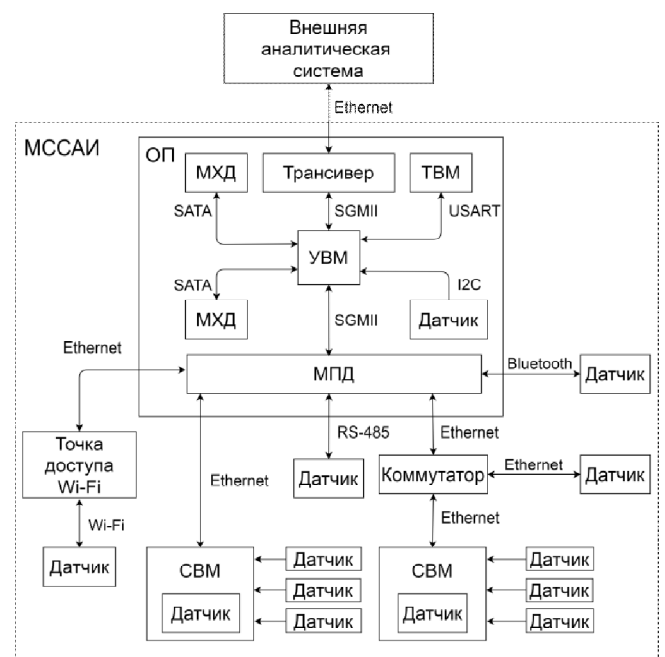


Рис. 1. Функциональная схема МССАИ

Внешние датчики, размещаемые в промышленном окружении, могут подключаться к различным точкам сбора данных: датчики с аналоговыми или дискретными выходами подключаются к СВМ, датчики с выходным интерфейсом RS-485 могут подключаться к СВМ или непосредственно к МПД, датчики с выходным сетевым интерфейсом Ethernet могут подключаться к локальной сети коммутатора или непосредственно к МПД. Система поддерживает подключение беспроводных датчиков по технологиям Bluetooth (через МПД) и Wi-Fi (через точку доступа, подключённую к коммутатору).

Модули УВМ, ТВМ, МХД и МПД предназначены для размещения на ОП, которая представляет собой печатную плату формата Mini-ITX (170×170 мм). Модули СВМ размещаются в непосредственной близости от объекта мониторинга подключаются к сетевым проводным интерфейсам МПД напрямую или через коммутатор. Основная функция ОП – организация связи между модулями и предоставление питающего напряжения. Объединительная плата подключается к внешнему источнику питания с выходным напряжением 12 В и мощностью не менее 60 Вт. Напряжение питания отдельных модулей реализовано с помощью микросхем преобразователей напряжения. Также в составе ОП имеются микросхемы 9-ти осевого инерциального датчика и трансивера Ethernet, который используется

для организации связи МССАИ с внешними аналитическими системами.

Представленная концепция предполагает наличие 4-х уровней организации: уровень получения первичных данных от датчиков; уровень предварительной обработки первичных данных; уровень передачи обработанных данных и уровень анализа данных.

Первый уровень представлен датчиками различных физических величин (линейного ускорения; угловой скорости; температуры; напряжения; тока и т.д.), устройствами звуко- и видеозаписи. Они позволяют получать первичные данные, которые будут подвергаться дальнейшей обработке и анализу. Аналоговые и дискретные датчики подключаются к СВМ, а цифровые могут подключаться как к СВМ (через интерфейс SPI), так и напрямую к МПД, используя проводные (RS-485; Ethernet) и беспроводные (Bluetooth) стандарты передачи данных. Для подключения к МССАИ датчиков с беспроводным интерфейсом Wi-Fi к сетевому интерфейсу МПД подключается точка доступа Wi-Fi. Кроме того, в составе СВМ и ОП находятся встроенные 9-ти осевые инерциальные датчики с интерфейсом подключения I2C, которые размещаются непосредственно на печатных платах устройств.

Второй уровень модульной системы связан с предобработкой данных, полученных от датчиков и реализуется СВМ (рис. 2).

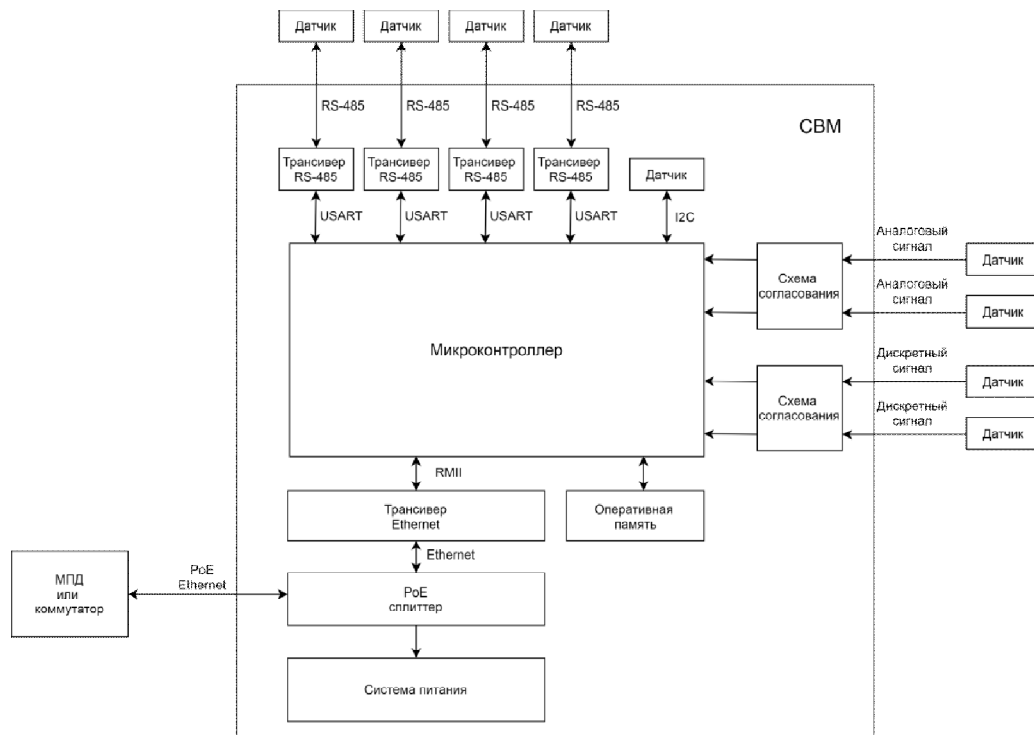


Рис. 2. Функциональная схема СВМ

Сенсорный вычислительный модуль реализует согласование логических сигналов электрических и логических уровней сигналов внешних датчиков с аналоговыми и цифровыми входами микроконтроллера, реализует дискретизацию аналогового сигнала с помощью аналогово-цифрового преобразователя и захват дискретного сигнала с помощью интерфейса ввода-вывода общего назначения. Данные с цифровых датчиков собираются с помощью интерфейсов I2C, SPI и RS-485. Полученные данные могут накапливаться в встроенной памяти и обрабатываются перед отправкой в МПД с помощью сетевого интерфейса Ethernet. В результате предварительной обработки значительно уменьшается объем данных, который передается для дальнейшего анализа в УВМ за счет различных математических операций: усреднения; вычисления дисперсии; преобразования Фурье и др.

Управление СВМ осуществляется с помощью микроконтроллера STM32H747, который дополнительно оснащается внешней оперативной памятью объемом 32 МБ. Данный микроконтроллер имеет встроенный аналого-цифровой преобразователь и позволяет работать с датчиками по цифровым интерфейсам I2C и SPI. Для взаимодействия СВМ с датчиками, подключаемыми по интерфейсу RS-485, имеется четыре независимых линии, реализуемые с помощью трансиверов SN65HVD78 и подключаемых к микроконтроллеру по интерфейсу USART. Также на плате СВМ имеется встроенный 9-ти осевой инерциальный датчик ICM-20948, который подключается непосредственно к микроконтроллеру. Собранные и обработанные данные отправляются для дальнейшего анализа в УВМ через МПД с помощью сетевой передачи данных через Ethernet. Для этого используется микросхема трансивера Ethernet LAN8742A, связанная с микроконтроллером через интерфейс SGMII.

Питание СВМ осуществляется по технологии передачи электроэнергии через Ethernet (Power over Ethernet) с помощью модуля PoE сплиттера Befact PDI-12. Питание отдельных элементов схемы осуществляется с использованием преобразователей напряжения. Плата модуля (размером 150×63 мм) помещается во влаго- и пылезащищенный корпус в связи с возможностью размещения в непосредственной близости от объекта мониторинга.

Третий уровень модульной системы отвечает за передачу данных между отдельными модулями и между системой и внешними устройствами. Для этого в составе МССАИ был

разработан МПД. Основными функциями МПД является сбор, агрегация и передача данных для дальнейшего анализа в УВМ. Данные предоставляются как СВМ, так и датчиками, которые непосредственно подключаются к МПД. Для сбора данных в составе модуля (рис. 3) имеются пять гигабитных портов Ethernet, четыре независимых линии RS-485, и трансивер Bluetooth (с поддержкой спецификации версии 4.2).

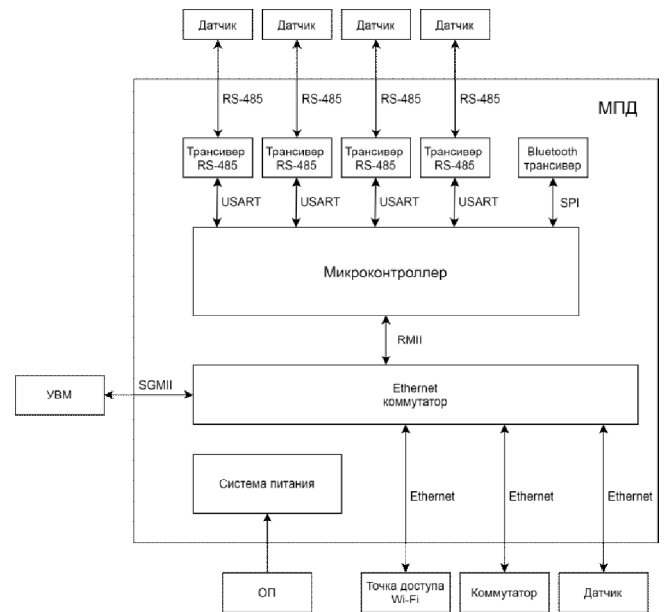


Рис. 3. Функциональная схема МПД

Кроме того, к одной из линий Ethernet предполагается подключение внешнего коммутатора и точки доступа Wi-Fi, что позволяет собирать данные с беспроводных датчиков, передающих данные по данной технологии.

В качестве управляющего микроконтроллера МПД выбрана микросхема STM32H745. К нему по интерфейсу RMII подключается микросхема гигабитного коммутатора KSZ9477, пять портов которого предназначены для коммутации СВМ и внешних датчиков через интерфейс Ethernet, а один – для передачи данных в УВМ через интерфейс SGMII. Четыре интерфейсных линии RS-485 реализуются за счет микросхем SN65HVD78, подключаемых к микроконтроллеру через интерфейс UART.

Для организации беспроводного канала связи Bluetooth используется трансивер NRF52832, подключаемый по интерфейсу SPI. Питание МПД организовано за счет силовой линии от ОП. Модуль передачи данных представляет собой плату размером 40×40 мм, которая монтируется на ОП методом пайки.

Последний уровень осуществляет анализ и хранение данных и представлен 3-мя модулями, которые располагаются на объединительной плате: УВМ; ТВМ и МХД. Управляющий вычислительный модуль является основным контроллером МССАИ и представляет собой микропроцессор системы, выполненный в виде микросхемы типа «корпус-на-корпусе», в

которой микроконтроллер интегрирован с оперативной и флэш-памятью [6]. Микропроцессор имеет одно ядро, работающее на частоте 400 МГц и выполнен по архитектуре MIPS. В составе УВМ имеется 1 Гб оперативной памяти DDR3; 512 Мб флэш памяти NAND (через интерфейс ONFi) и 32 Мб флэш памяти NOR (рис. 4).

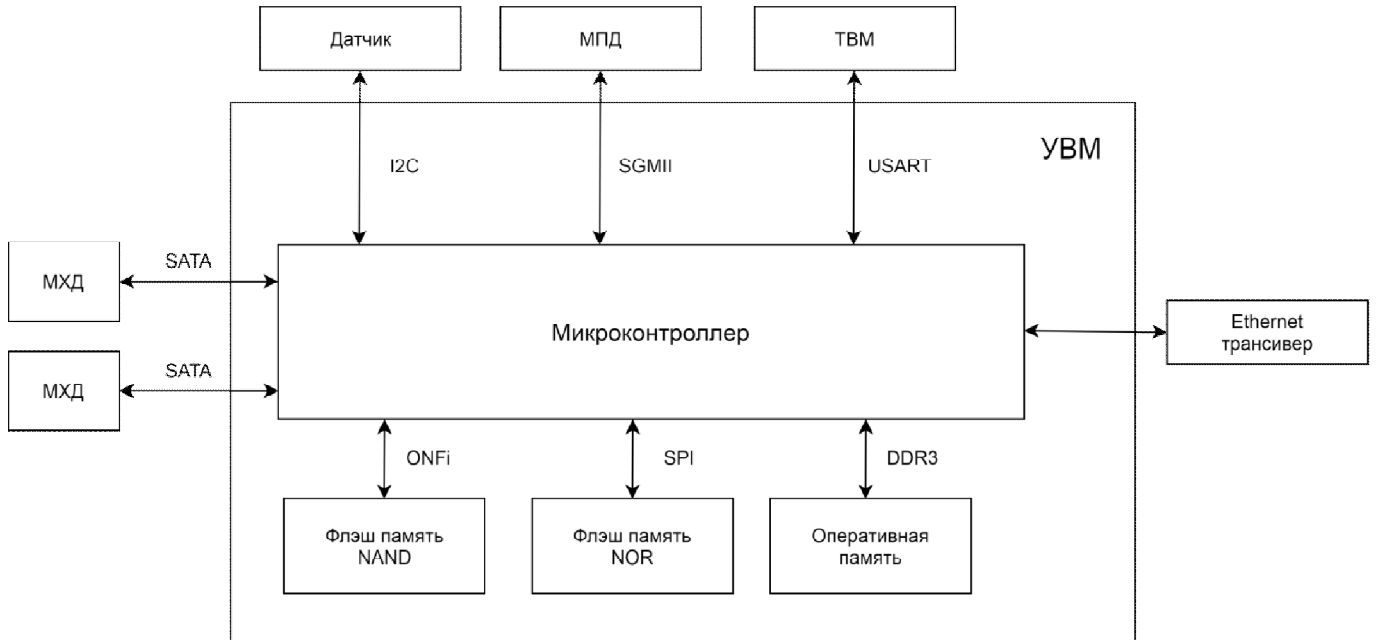


Рис. 4. Функциональная схема УВМ

Основные функции УВМ: контроль выборки данных от датчиков, подключенных к МССАИ, в том числе через СВМ; выполнение запросов на обработку данных с помощью ТВМ; отправка результатов анализа данных в МХД; предоставление результатов анализа данных внешним устройствам через сетевой интерфейс. В качестве системного программного обеспечения используется операционные системы семейства Unix/Linux. Управляющий вычислительный модуль связан с ТВМ через последовательный интерфейс USART, а с МХД – через интерфейс SATA. Также к УВМ через интерфейс I2C подключается 9-ти осевой инерциальный датчик ICM-20948, размещаемый на ОП. Управляющий вычислительный модуль имеет размеры и 21×21 мм и монтируется на ОП методом пайки.

Модули хранения данных имеют форм-фактор mSATA mini, выполняют функции записи, чтения и хранения данных и состоят из микросхемы контроллера памяти Phison PS3111-S11 и двух микросхем флэш памяти NAND объемом 256 Гб. Контроллер диска соединяется с микросхемами флэш памяти с по-

мощью интерфейса Toggle (рис. 5).

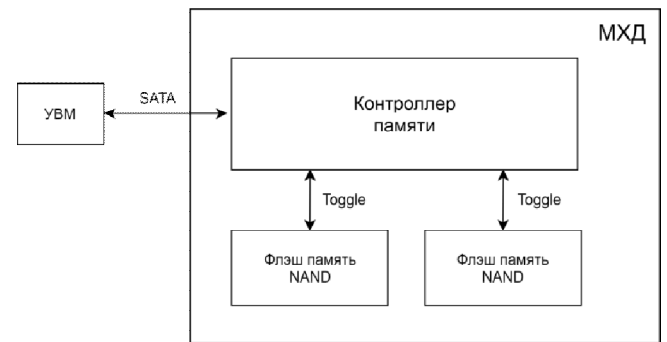


Рис. 5. Функциональная схема МХД

Кроме того, в составе МХД имеется преобразователь напряжения, с помощью которого организуется его питание. На ОП устанавливается два МХД в разъемы mSATA. Питание модуля осуществляется через интерфейс SATA.

Тензорный вычислительный модуль используется для ускорения обработки и интеллектуального анализа собранных с датчиков данных, за счёт аппаратного ускорения мат-

ричных вычислений, выполняемых в МССАИ в процессе мониторинга объекта в промышленном окружении. Матричные вычисления используются в методах машинного обучения, таких как логистическая регрессия; метод опорных векторов; деревья решений; байесовская сеть; метод ближайших соседей; искусственные нейронные сети и др.

Вычислительным центром ТВМ является процессор Kendryte K210, в составе которого имеется: двухъядерный процессор общего назначения; аппаратный блок ускорения тензорных вычислений; статическая память объемом 8 МБ; блок обработки аудиосигналов и блок аппаратного ускорения преобразований Фурье. Также для хранения параметров обработки данных к процессору через интерфейс SPI подключается внешняя флэш-память NOR объемом 16 МБ. Задачи на выполнение матричных вычислений для ТВМ поступают от УВМ через интерфейс USART. Плата ТВМ имеет размеры 22×25 мм и присоединяется к ОП с помощью разъема формата M.2.

Заключение

В данной работе была представлена концепция многомодульной аппаратной платформы для разработки устройств промышленного ИВ на примере МССАИ. Представленная система состоит из модулей, которые обеспечивают следующий функционал: получение первичных значений от датчиков и их предварительная обработка (СВМ); агрегация и передача данных (МПД); анализ полученной информации (УВМ), в том числе с использованием аппаратного ускорения интеллектуального анализа данных методами машинного обучения (ТВМ); хранение промежуточных данных и результатов анализа (МХД). Данные модули представляют собой готовые законченные изделия, которые могут быть использованы для проектирования устройств промышленного ИВ в различных конфигурациях в зависимости от условий применения. Разработанные модули используют стандартизированные интерфейсы и протоколы передачи данных, благодаря чему могут быть использованы совместно с устройствами ИВ сторонних производителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cirani, S., Ferrari, G., Picone, M., Veltri, L. Internet of Things: Architectures, Protocols and Standards. – New York: John Wiley & Sons, 2018. – 408 p.
2. Sethi, P., Sarangi, S.R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – p. 9324035.
3. Mazhelis, O., Luoma, E., Warma, H. Defining an Internet-of-Things ecosystem / Proceedings of International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, St. Petersburg, 2012. – PP. 1-14.
4. Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., Liu, Z. Review on cyber-physical systems // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2017. – №1 (4). – PP. 27-40.
5. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.A., Lee, J. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – №3 (28). – PP. 1622-1627.
6. Design, fabrication and testing of the package-on-package microcircuit / K. Marcinkevich, P. Lunkov, D. Kirienko, V. Putrolaynen, M. Belyaev, A. Yartsev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1155. – p. 012096.

REFERENCES

1. Cirani, S., Ferrari, G., Picone, M., Veltri, L. Internet of Things: Architectures, Protocols and Standards. – New York: John Wiley & Sons, 2018, 408 p.
2. Sethi, P., Sarangi, S.R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017, Vol. 2017, p. 9324035.
3. Mazhelis, O., Luoma, E., Warma, H. Defining an Internet-of-Things ecosystem / Proceedings of International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking, St. Petersburg, 2012, PP. 1-14.
4. Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., Liu, Z. Review on cyber-physical systems // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, №1 (4), PP. 27-40.
5. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.A., Lee, J. Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment // IFAC-PapersOnLine, 2015, №3 (28), PP. 1622-1627.
6. Design, fabrication and testing of the package-on-package microcircuit / K. Marcinkevich, P. Lunkov, D. Kirienko, V. Putrolaynen, M. Belyaev, A. Yartsev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021, Vol. 1155, p. 012096.

*Рецензент д.т.н.
Дмитрий Иванович Петрешин*