

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МОНИТОРИНГОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В ИНДУСТРИИ 4.0, С ПОМОЩЬЮ ПРОТОКОЛА КОММУНИКАЦИИ BLUETOOTH LOW ENERGY 6.0

© 2025 Е.Д. Коршунова, А.И. Тагаев

Московский государственный технологический университет «Станкин»
(МГТУ «Станкин»), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 27.03.2025

В статье рассмотрены подходы к организации мониторинга производственных систем в условиях Индустрии 4.0 на основе протокола Bluetooth Low Energy (BLE). Представлены три основных типа коммуникации в BLE (point-to-point, star, mesh) и показана их применимость для задач контроля состояния оборудования, диагностики и адаптивного управления. Предложен интегральный индекс актуальности внедрения BLE-мониторинга, учитывающий специфику технического задания, готовность инфраструктуры, квалификацию персонала и политику предприятия. Показаны возможности реализации многоканальных потоков данных (управленческого, телеметрического и аварийного) в BLE-комплексах, а также алгоритмы выбора оптимальной топологии сети в зависимости от числа узлов и условий цеховой инфраструктуры. Обоснована роль встроенных периферийных вычислений (Edge computing) в BLE-датчиках для локальной предобработки сигналов и обеспечения надежности мониторинга. Разработанная концептуальная модель организации BLE-коммуникации соотнесена с требованиями ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика» и ГОСТ Р ИСО 17359-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство». Результаты исследования могут быть использованы при проектировании программно-аппаратных комплексов (ПАК) мониторинга, интегрируемых в производственные системы, а также при планировании мероприятий по организации производства в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, Bluetooth Low Energy, мониторинг, организация производства, техническая диагностика, цифровое производство, ПАК.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-47-53

EDN: MEKQRX

В условиях Индустрии 4.0 современное производство все чаще опирается на распределенные системы мониторинга, способные в режиме реального времени отслеживать состояние оборудования и автоматически подстраиваться под изменяющиеся технологические параметры [1-4]. Одним из ключевых решений в этой области является использование протокола Bluetooth Low Energy (BLE), который поддерживает три вида коммуникации: «один-к-одному» (point-to-point), «один-ко-многим» (star) и «многие-ко-многим» (mesh) (рис. 1), что делает его перспективным для различных сценариев мониторинга и диагностики [5-9].



Рис. 1. Основные типы коммуникации в протоколах.

Появление в BLE-датчиках дополнительных вычислительных ресурсов (Edge calculations) открывает новые возможности: наряду с передачей телеметрии они могут выполнять локальный самоконтроль, формировать отдельный аварийный канал и при возникновении критических событий мгновенно передавать приоритетный поток данных в зависимости от выбранной топологии сети (рис. 2). Рассматривая преимущества BLE, в частности, применительно к организации производства, можно отметить - наличие низкого энергопотребления, небольшие габариты модуля и при этом достаточно гибкую архитектуру для обмена данными (что предполагает широкие возможности по адаптации мониторинга под разные производственные инфраструктуры) [8, 9, 10].

Коршунова Елена Дмитриевна, профессор, доктор экономических наук, директор Института социально-технологического менеджмента, заведующая кафедрой экономики и управления предприятием.

E-mail: ed.korshunova@stankin.ru

Тагаев Арсен Ильнурович, аспирант. E-mail: ion8@bk.ru

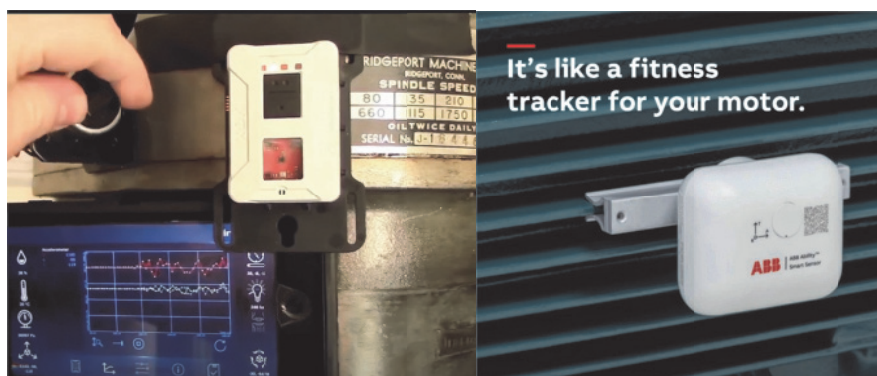


Рис. 2. Типичные представители портативных датчиков Индустрии 4.0: слева Bosch xdk110, справа ABB Ability™ Smart Sensor (которые также поддерживают работу с BLE)

В комплексах мониторинга BLE-модули могут устанавливаться непосредственно на датчики или выступать в роли промежуточных хабов, ретранслирующих информацию в реальном времени. Такая конфигурация позволяет:

- оперативно перестраивать сеть датчиков при изменении исследовательской задачи;
- снижать нагрузку на энергопотребление (за счёт режима сна и невысокой пиковой передачи) для длительных экспериментов;
- расширять радиус действия за счёт сетевых топологий (например, BLE Mesh) [9];
- обеспечивать автоматическое обновление прошивки (OTA) и адаптацию системного ПО к новым условиям эксплуатации или меняющимся производственным требованиям (что системно поддерживается в протоколе BLE) [7,8, 9, 10,11].

Таким образом, комплекс, использующий протокол BLE в качестве центрального протокола обмена, отвечает потребностям гибкого и многофункционального мониторинга.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПРОТОКОЛА BLE В КОМПЛЕКСЕ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Организацию работы протокола BLE в комплексе мониторинга возможно разложить на 3 основных этапа: расчет интегрального индекса актуальности внедрения, выбор эффективного типа коммуникации и непосредственное внедрение. Также, для выявления уровней и принципов взаимодействия модуля BLE с остальными компонентами комплекса мониторинга была предложена концептуальная модель, которая может использоваться при планировании организации производства вместе с данной технологией.

Для организации функционирования протокола BLE в комплексе мониторинга предлагается количественная оценка «готовности» или «сложности» организации его работы, которая представляет собой **интегральный индекс**, объединяющий четыре ключевых фактора (формула 1):

$$I_{BLE} = \omega_1 C_{specs} + \omega_2 C_{infrastructure} + \omega_3 C_{personal} + \omega_4 C_{policy}, \quad (1)$$

где

- $C_{specs} \in [0,1]$ – фактор №1, нормированный индекс сложности технического задания (объём и распределение оборудования);
- $C_{infrastructure} \in [0,1]$ – фактор №2, индекс готовности инфраструктуры (портативные/стационарные шлюзы, ретрансляторы);
- $C_{personal} \in [0,1]$ – фактор №3, индекс квалификации и вовлечённости персонала;
- $C_{policy} \in [0,1]$ – фактор №4, индекс поддержки со стороны политики предприятия по внедрению НТП;

• ω_i – весовые коэффициенты, отражающие относительную важность каждого фактора в конкретном проекте (например, $\omega_1 = 0,3, \omega_2 = 0,25, \omega_3 = 0,25, \omega_4 = 0,2$).

При этом интерпретировать формулу 1 возможно следующим образом:

- при $I_{BLE} \rightarrow 1$ система обладает благоприятными условиями для быстрого и надёжного развёртывания BLE-мониторинга;
- при $I_{BLE} \rightarrow 0$ необходима доработка ТЗ, инфраструктуры, обучение персонала или пересмотр политики внедрения.

Исходя из инфраструктуры производственной системы также и вытекает возможность расчета эффективного выбора способа коммуникации внутри данного протокола. На предложенный алгоритм (рис. 3) влияет количество узлов в сети коммуникации, наличие централизованности принятия или передачи данных шлюзом, а также размеры цехов - расстояния между измеряемым объектом и устройством принятия данных (шлюз, мобильный или стационарный).

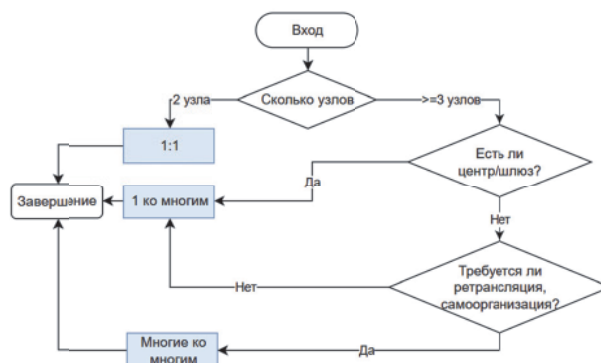


Рис. 3. Алгоритм выбора наиболее эффективного способа коммуникации по средством BLE, исходя из инфраструктуры производственной системы и технического задания

Помимо всего прочего, из-за наличия в датчиках индустрии 4.0 дополнительных вычислительных мощностей – на их базе возможно внедрить также и специальную адаптированную под мониторинг систему потоков данных, которая включает в себя 3 основных канала коммуникации – управленческий, телеметрии и аварийный.

Их сочетание на примере типа коммуникации один к одному показано на рисунке 4. Как видим показан типичные для мониторинга операции – снятие показаний с датчика и, если они превышают норму – получение аварийного уведомления. Также возможно из-за воздействия внешних или внутренних факторов датчик может снижать свою точность, для компенсации данного явления иногда необходимо прибегнуть к калибровке.

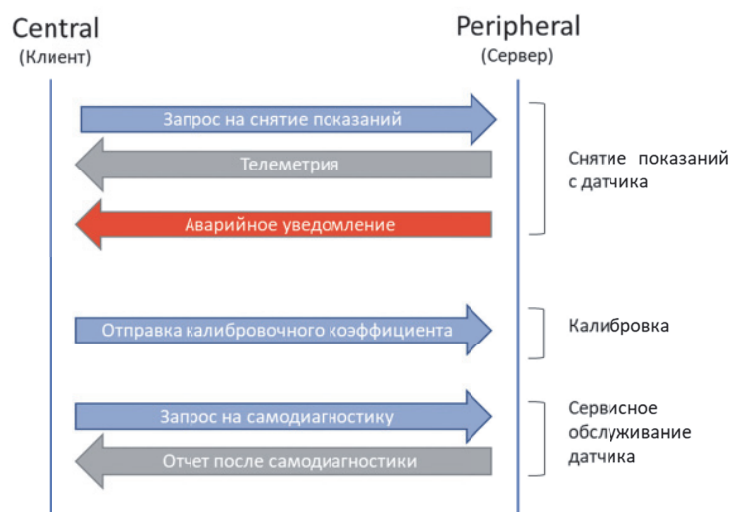


Рис. 4. Диаграмма последовательности (sequence-диаграмма) работы BLE коммуникации 1 к 1

При этом процесс мониторинга в данном случае будет носить точечный и ручной характер, так как для обмена данных потребуется поиск, подключение и в некоторых случаях ввод пароля пэйринга (Pairing, Bonding функционал) BLE устройства.

Свойство коммуникации 1 ко многим, диктует наличие одного Сервера (broadcaster) и множества Клиентов (observer), «слушающих» потоки данных (Рис. 5). В данном случае наличие надежного подключения не требуется – достаточно сканировать полезную нагрузку BLE датчика с нужной частотой, а для его определения необходимо заранее настроить Сервер для вещания нужного паттерна данных (Manufacture ID, MAC-адрес, первичные флаги в полезной нагрузке). Процесс мониторинга в данном случае носит пассивный характер, так как для проверки состояния цехового оборудования достаточно пройти по цеху – принимающее устройство шлюз за это время успеет отсканировать полезные нагрузки вещающих датчиков (прикрепленных к оборудованию), без наличия прямого подключения к ним.

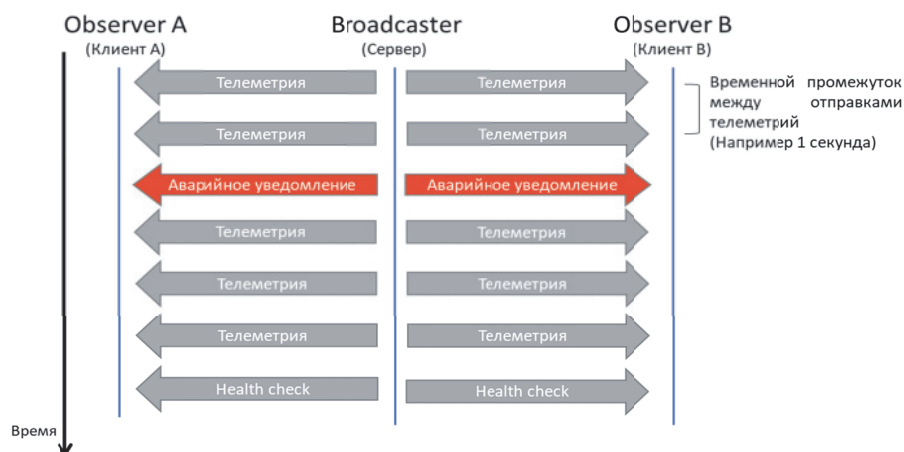


Рис. 5. Диаграмма последовательности работы типа BLE коммуникации 1 к многим

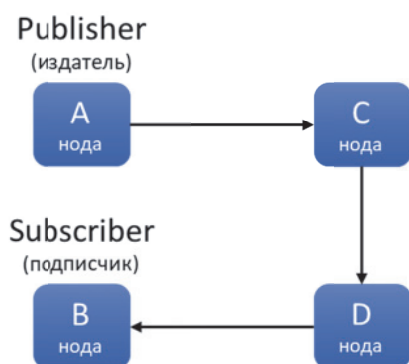


Рис. 6. Диаграмма последовательности работы типа BLE коммуникации многие ко многим

Также данный тип коммуникации позволяет контролировать сразу множество датчиков одновременно, не тратя энергию на поддержку постоянного подключения к каждому из них.

Сетевой характер типа коммуникации многие ко многим может применяться для снятия показаний одного оборудования сразу с нескольких его участков, или в качестве ретранслятора каждой ноды его системы, и транслирования сигнала на дальние расстояния (рис. 6). В мониторинге его применение подразумевает фокусирование на самообслуживание комплекса контроля производственной системы или в вариантах ретранслирования данных диагностики.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ BLE КОММУНИКАЦИИ

Рассматривая порядок организации мониторинга на базе коммуникации с BLE, с большего масштаба – основываясь на ГОСТ 17359-2015 (Контроль состояния и диагностика машин), и его рисунка под номером 1 (блок-схема программы контроля состояния оборудования), предлагается концептуальная модель взаимодействия, структуры влияния модулей BLE (и выбранных типов коммуникации) на основные этапы организации работы комплекса мониторинга, контроля состояния оборудования (Рис. 7).

Наибольшее влияние использование BLE типов коммуникации может оказать на 5-8 этапы. После выбора метода измерений и подготовки будущей инфраструктуры датчиков предлагается сконфигурировать сбор данных, управленческо-информационные потоки и определить способ проведения анализа собранных данных (удаленно или на месте измерений). За счет наличия встроенного центра для длительных кастомизированных вычислений в модуле датчика, требуется следить за поддержкой его автономности, калибровать RSSI (для более точного определения расположения датчиков), поддерживать актуальность ПО (в следствии возможности программирования поведения модуля датчика в течении мониторинга), производить резервирование важных данных (паролей, json скриптов для коммуникации с сервером) и базово проверять его крепление.

В IoT-системах с распределёнными BLE-датчиками решения о ТО (техническом обслуживании) формируются автоматически на основании телеметрии и аналитики в облаке. При относительно «мягких» отклонениях (например, колебаниях температуры или вибрации до уровня предупреждения) может быть решено просто продолжить наблюдение, оставив штатный интервал опроса датчиков.

Однако при уверенном выявлении деградации или аномалии по прогнозным моделям облачной аналитики принимаются следующие меры:

- Ускоренный сбор данных

Шлюз автоматически уменьшает интервал опроса BLE-датчиков и повышает частоту уведомлений (GATT-Notify) для более детальной картины состояния.

- Адаптивная нагрузка оборудования



Рис. 7. Концептуальная модель организации мониторинга производственной системы с использованием протокола BLE и его трех основных типов

Контроллер производственной линии снижает скорость конвейера или мощность приводов в ответ на рост виброуровня, подтопленность или перегрузку.

- *Визуальный и дистанционный осмотр*

В SMS- или push-уведомлении технику приходит просьба подойти к узлу, где приложение автоматически показывает последние 3–5 точек данных и карту Mesh-топологии для локализации неисправности.

- *Перенос регламентного обслуживания*

Центр мониторинга автоматически планирует выезд бригады, выбирая ближайший свободный слот, а приложение напоминает о предстоящем ТО за 24 ч.

- *Удалённая перепрошивка OTA*

После ТО или замены узла BLE-датчика можно дистанционно обновить прошивку по BLE OTA— без физического доступа к модулю.

Если та же точечная BLE-метка фиксирует повторяющиеся отказы, алгоритмы IoT-аналитики автоматически пересматривают стратегию мониторинга: увеличивают пороги предупреждения, меняют тип характеристики (например, добавляют shock-pulse помимо RMS), либо инициируют обсуждение с производителем узла о конструктивных изменениях.

Учитывая цифровой характер мониторинговой системы с BLE и соответственно производственной системы, необходимо также производить мероприятия по поддержке стабильности ее работы:

1. *Аудит используемых методов*

Каждый квартал платформа формирует отчёт об эффективности сенсорных алгоритмов и их стоимости (BLE-пакеты, облачные вычисления, объёмы хранения). Низкопроизводительные режимы опроса автоматически отключаются на шлюзах.

2. *Пересчёт пороговых значений*

После крупного ремонта, замены узлов или изменения режима работы система автоматически обновляет базовые RMS- и shock-pulse-пороги. Разовые выбросы сигналов, связанные с изменением условий, не приводят к немедленным перенастройкам.

3. *Дублирование и защита данных*

Вся телеметрия с BLE-датчиков одновременно поступает на шлюз (Edge) и в облачное хранилище, что исключает потерю данных при сбоях связи или оборудования.

4. *Автоматическая корректировка warning-уровней*

Пороги, при достижении которых система инициирует ускоренный сбор данных или безопасную остановку, автоматически пересматриваются после каждого серьёзного обновления оборудования — будь то новый привод, изменение загрузки или параметров процесса.

5. Поддержка квалификации обслуживающего персонала

В связи с нетривиальным устройством работы цифрового мониторинга, следует поддерживать уровень знаний персонала на должном уровне, чтобы использовать цифровые инструменты в полной мере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение протокола BLE в комплексы мониторинга производственных систем позволяет существенно повысить гибкость и адаптивность организации производства. За счет низкого энергопотребления, многообразия топологий сети и встроенных вычислительных ресурсов BLE-датчики формируют основу для реализации концепции распределенного мониторинга и предиктивного обслуживания оборудования. Предложенный интегральный индекс актуальности (формула 1) обеспечивает возможность количественной оценки готовности предприятия к внедрению технологии и выделяет ключевые организационные факторы успеха. Концептуальная модель BLE-коммуникаций согласуется с этапами контроля состояния машин по ГОСТ 17359-2015 и подтверждает возможность интеграции в действующие производственные регламенты.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в создании универсальной методики планирования и эксплуатации ПАК, поддерживающих функции автоматической диагностики, дистанционного обновления ПО (ОТА) и адаптивного управления производственными процессами. Таким образом, использование BLE в системах мониторинга отвечает стратегическим задачам развития организации производства в условиях Индустрии 4.0, обеспечивая повышение надежности оборудования, сокращение времени простоев и оптимизацию эксплуатационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунова, Е. Д. Технологическая база инновационно ориентированного предприятия: структура, стратегия, инструменты развития / Е. Д. Коршунова, Ю. А. Новосельцева // ЭСГИ. – 2014. – № 3-4(3-4). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskaya-baza-innovatsionno-orientirovannogo-predpriyatiya-struktura-strategiya-instrumenty-razvitiya> (дата обращения: 25.01.2025).
2. Scotti, Lucia, et al. «Review of material modeling and digitalization in industry: Barriers and perspectives.» Integrating Materials and Manufacturing Innovation 12.4 (2023): 397-420.
3. Mendoza, Nicole, et al. «Adapting the technology performance level integrated assessment framework to low-TRL technologies within the carbon capture, utilization, and storage industry, Part I.» Frontiers in Climate 4 (2022): 818786.
4. Kirmse, Sebastian. Towards the Commercialization of a Carbon Fiber Composite Reinforced with Carbon Nanofiber Z-Threads Utilizing a Hybrid Lean LaunchPad/Model-Based Systems Engineering Approach. Diss. University of South Alabama, 2019.
5. Li, Zhi, Fei Fei, and Guanglie Zhang. «Edge-to-cloud IIoT for condition monitoring in manufacturing systems with ubiquitous smart sensors.» Sensors 22.15 (2022): 5901.
6. Gupta, Vijay Prakash. «Smart sensors and industrial IoT (IIoT): A driver of the growth of industry 4.0.» Smart Sensors for Industrial Internet of Things: Challenges, Solutions and Applications (2021): 37-49.
7. Anik, Sheik Murad Hassan, et al. «A cost-effective, scalable, and portable IoT data infrastructure for indoor environment sensing.» Journal of Building Engineering 49 (2022): 104027.
8. Developing with Silicon Labs Bluetooth Low Energy (LE) | Developing Guide | Bluetooth LE | v6.0.0 | Silicon Labs. (n.d.). <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.0.0/bluetooth-fundamentals-overview/>
9. Throughput with Bluetooth Low Energy Technology | Performance | Bluetooth LE | v6.1.0 | Silicon Labs. (n.d.). <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.1.0/bluetooth-fundamentals-system-performance/throughput>
10. Specifications | Bluetooth® Technology website. (n.d.). Bluetooth® Technology Website. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/>
11. Kim, Sunho, et al. «Extending data quality management for smart connected product operations.» IEEE Access 7 (2019): 144663-144678.
12. M. E. Porter and J. E. Heppelmann, «How smart, connected products are transforming competition,» Harvard Bus. Rev., vol. 92, no. 11, pp. 64–88, Nov. 2014. [Online]. Available: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>
13. Khalaifat, Walla, and Fawzi Abdulaziz. «Challenges and Opportunities of DevOps for IoT Systems: DevOps-For-IoT.» 2024 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). IEEE, 2024.
14. Oleff, Alexander, et al. «Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review.» Progress in Additive Manufacturing 6.4 (2021): 705-730.
15. Jónasdóttir, Hanna, et al. «Upgrading legacy equipment to industry 4.0 through a cyber-physical interface.» Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II. Springer International Publishing, 2018.

MANAGEMENT OF MONITORING OF THE PRODUCTION SYSTEM IN INDUSTRY 4.0, USING THE BLUETOOTH LOW ENERGY 6.0 COMMUNICATION PROTOCOL

© 2025 E.D. Korshunova, A.I. Tagaev

Moscow State Technological University “Stankin” (MSTU “Stankin”), Moscow, Russia

The article discusses approaches to the organization of monitoring of production systems in the context of Industry 4.0 based on the Bluetooth Low Energy (BLE) protocol. Three main types of communication in BLE (point-to-point, star, mesh) are presented and their applicability for equipment condition monitoring, diagnostics, and adaptive control is shown. An integral index of the relevance of the implementation of BLE monitoring is proposed, taking into account the specifics of the technical task, infrastructure readiness, personnel qualifications and enterprise policy. The possibilities of implementing multi-channel data flows (management, telemetry, and emergency) in BLE complexes are shown, as well as algorithms for selecting the optimal network topology depending on the number of nodes and the conditions of the workshop infrastructure. The role of embedded peripheral computing (Edge computing) in BLE sensors for local signal preprocessing and monitoring reliability is substantiated. The developed conceptual model of the BLE communication organization is correlated with the requirements of GOST 20911-89 “Technical diagnostics” and GOST R ISO 17359-2015 “Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidance”. The research results can be used in the design of monitoring software and hardware complexes integrated into production systems, as well as in the planning of production management activities in the context of digital transformation.

Keywords: Industry 4.0, Bluetooth Low Energy, monitoring, production organization, technical diagnostics, digital production, PAK.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-47-53

EDN: MEKQRX

REFERENCES

1. Korshunova, E. D. Tekhnologicheskaya baza innovacionno orientirovannogo predpriyatiya: struktura, strategiya, instrumenty razvitiya / E. D. Korshunova, Yu. A. Novosel'ceva // ESGI. – 2014. – № 3-4(3-4). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskaya-baza-innovatsionno-orientirovannogo-predpriyatiya-struktura-strategiya-instrumenty-razvitiya> (data obrashcheniya: 25.01.2025).
2. Scotti, Lucia, et al. “Review of material modeling and digitalization in industry: Barriers and perspectives.” Integrating Materials and Manufacturing Innovation 12.4 (2023): 397-420.
3. Mendoza, Nicole, et al. “Adapting the technology performance level integrated assessment framework to low-TRL technologies within the carbon capture, utilization, and storage industry, Part I.” Frontiers in Climate 4 (2022): 818786.
4. Kirmse, Sebastian. Towards the Commercialization of a Carbon Fiber Composite Reinforced with Carbon Nanofiber Z-Threads Utilizing a Hybrid Lean LaunchPad/Model-Based Systems Engineering Approach. Diss. University of South Alabama, 2019.
5. Li, Zhi, Fei Fei, and Guanglie Zhang. “Edge-to-cloud IIoT for condition monitoring in manufacturing systems with ubiquitous smart sensors.” Sensors 22.15 (2022): 5901.
6. Gupta, Vijay Prakash. “Smart sensors and industrial IoT (IIoT): A driver of the growth of industry 4.0.” Smart Sensors for Industrial Internet of Things: Challenges, Solutions and Applications (2021): 37-49.
7. Anik, Sheik Murad Hassan, et al. “A cost-effective, scalable, and portable IoT data infrastructure for indoor environment sensing.” Journal of Building Engineering 49 (2022): 104027.
8. Developing with Silicon Labs Bluetooth Low Energy (LE) | Developing Guide | Bluetooth LE | v6.0.0 | Silicon Labs. (n.d.). <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.0.0/bluetooth-fundamentals-overview/>
9. Throughput with Bluetooth Low Energy Technology | Performance | Bluetooth LE | v6.1.0 | Silicon Labs. (n.d.). <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.1.0/bluetooth-fundamentals-system-performance/throughput>
10. Specifications | Bluetooth® Technology website. (n.d.). Bluetooth® Technology Website. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/>
11. Kim, Sunho, et al. “Extending data quality management for smart connected product operations.” IEEE Access 7 (2019): 144663-144678.
12. M. E. Porter and J. E. Heppelmann, “How smart, connected products are transforming competition,” Harvard Bus. Rev., vol. 92, no. 11, pp. 64–88, Nov. 2014. [Online]. Available: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>
13. Khalaifat, Walla, and Fawzi Abdulaziz. “Challenges and Opportunities of DevOps for IoT Systems: DevOps-For-IoT.” 2024 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). IEEE, 2024.
14. Oleff, Alexander, et al. “Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review.” Progress in Additive Manufacturing 6.4 (2021): 705-730.
15. Jónasdóttir, Hanna, et al. “Upgrading legacy equipment to industry 4.0 through a cyber-physical interface.” Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II. Springer International Publishing, 2018.

Elena Korshunova, Professor, Doctor of Economics, Director of the Institute of Social and Technological Management.

E-mail: ed.korshunova@stankin.ru

Arsen Tagaev, PhD Student. E-mail: ion8@bk.ru