

М.В. Сергиенко, А.Н. Алпатов

---

## ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

---

**Аннотация.** Промышленный интернет вещей составляет основу будущих умных заводов, которые представляют собой оцифрованное гибкое производство с быстроменяющейся планировкой выпуска и множеством мобильных и подвижных участников. Благодаря интернету вещей всевозможные данные собираются на местах с помощью смарт-устройств и отправляются в систему управления предприятием для принятия решений. Основу такого производства составляют надежные и безопасные сети связи, в том числе беспроводные. В статье рассмотрены современные и наиболее прогрессивные технологии беспроводной передачи данных в сетях промышленного интернета вещей. Отдельное внимание уделено 5G, WLAN и LoRaWAN. Сделан вывод, что для решения этих проблем в настоящее время доступен широкий спектр технологий беспроводной связи для промышленного интернета вещей, каждая из которых может быть применима для разных сценариев. Особого внимания, в частности, заслуживают передовые поколения беспроводных технологий: для сотовой связи – это 5G, для WLAN – Wi-Fi 6 (IEEE 802.11AX).

*Ключевые слова:* интернет вещей, промышленность, связь, беспроводные технологии, WLAN, LoRaWAN.

M.V. Sergienko, A.N. Alpatov

---

## WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS NETWORKS

---

**Abstract.** The industrial Internet of Things forms the basis for future smart plants which are digitized, flexible manufacturing facilities with a rapidly changing output layout and numerous mobile participants. Through the Internet of Things, data are collected from various sources using smart devices and transmitted to the management system for analysis and decision-making purposes. Reliable and secure communication networks, including wireless networks, are essential for such production. This article discusses advanced wireless data transmission technologies used in industrial IoT networks, specifically 5G, WLAN, and LoRaWAN. While there is a wide range of options available, each technology has its own strengths and limitations, making it suitable for different use cases. In particular, advanced generations of wireless technologies deserve special attention. For cellular communications, this is 5G; for WLAN, it is Wi-Fi 6 (IEEE 802.11AX).

*Keywords:* Internet of Things, industry, communication, wireless technologies, WLAN, LoRaWAN.

### *Введение*

Современная Индустрия 4.0 преобразует развитие промышленного сектора и создает новые рыночные возможности на триллионы долларов. Энергоэффективное производство, цепочки поставок и объекты с большим количеством активов могут быть реализованы с помощью интеллектуальных решений промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things, далее – IIoT). Специально созданные датчики и сети уже распространяются в промышленных масштабах – от нефтеперерабатывающих заводов до производственных линий. Сегодня наблюдается стремительный рост развертывания систем IIoT во многих секторах, при этом ожидаемое количество устройств достигнет 29,4 млрд к 2030 году [1].

Развертывание IIoT на заводе или в производственной среде – сложная задача, обусловленная рядом факторов, таких как природа промышленных систем (крытое или от-

**Сергиенко Михаил Владимирович**

аспирант, ассистент кафедры практической и прикладной информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва. Сфера научных интересов: интернет вещей, системы передачи данных, телекоммуникации, беспроводные технологии. Автор одной опубликованной научной работы. SPIN-код: 6664-9116, AuthorID: 1230038.

Электронный адрес: Sergienko.m@inbox.ru

**Алпатов Алексей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва. Сфера научных интересов: децентрализованные системы. Автор более 50 опубликованных научных работ. SPIN-код: 9012-0246, AuthorID: 1064377.

Электронный адрес: aleksej01-91@mail.ru

крытое помещение), и соответствующими проблемами, связанными с характеристиками распространения радиосигналов в этих разнообразных средах. Инженеры также должны учитывать восприимчивость беспроводной связи к шумам и электромагнитным помехам, а также требования к питанию беспроводных устройств и общий недостаток опыта внедрения беспроводных технологий в производственных условиях. Объединение в сеть большого количества датчиков, исполнительных механизмов, эффекторов и систем управления машинами в динамичной заводской среде может быть достигнуто различными способами, например, с помощью широкого спектра стандартных и нестандартных технологий беспроводных сетей.

В то же время необходимо отметить, что сетевые потребности промышленных устройств и приложений отличаются от запросов потребительского мира, поскольку в них надежность и безопасность занимают первое место. Эти высокие требования отсеивают доступные технологии от тех, которые лучше всего подходят для критически важных для бизнеса приложений IoT. Например, способ подключения датчиков к сети определяет возможность их защищенного, надежного и экономически эффективного развертывания в условиях, характерных для промышленных приложений [2]. Правильный выбор и использование современных беспроводных технологий позволит значительно сократить расходы на передачу данных и, что более важно, затраты и время на установку оборудования и проведение измерений в режиме онлайн.

Таким образом, выбор наиболее приемлемой технологии беспроводной связи для IoT, которая будет удовлетворять всем требованиям безопасности и производительности, обеспечивать повышенную гибкость и масштабируемость, является важной научно-практической задачей, необходимость решения которой и обуславливает выбор темы данной статьи.

*Основные результаты*

За последнее десятилетие был опубликован ряд обзорных статей, направленных на рассмотрение различных аспектов беспроводных технологий в промышленной автоматизации. Например, анализ промышленных беспроводных сетей и их проблем представлен в работах А.М. Малько, И.А. Дяченко, В.В. Муравьева, П.П. Слугина, В.А. Дрошнева, А. Tripathi, A.K. Singh, P. Choudhary, P.C. Vashist, K.K. Mishra.

Сравнительные исследования архитектуры и проектирования протоколов, в которых рассматривались четыре известные промышленные беспроводные технологии, основанные на стандарте IEEE 802.15.4 (ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a и WIA-PA), были представлены в публикациях О.А. Лавшука, Н.И. Листопада, И.В. Грузкова, Е.В. Скиперской, Е.В. Русановского, G.Z. Papadopoulos, F. Theoleyre, X. Vilajosana.

Всесторонний обзор современных стандартов беспроводной связи, которые подходят для приложений IIoT, представлен в публикациях Н.И. Литвиной, М.В. Черкашова, Н.В. Савичкиной, А.В. Арефьева, О.В. Афанасьевой, Н.А. Вешева, S. Raza, M. Faheem, M. Guenes.

Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, ряд вопросов в данной предметной плоскости остается открытым. Так, отдельного внимания заслуживает технология сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC), которая очень актуальна для критически важных приложений IIoT. Кроме того, в более детальном анализе нуждаются новейшие технологии маломощных глобальных сетей (LPWAN) для промышленных сред.

Таким образом, *цель статьи* заключается в рассмотрении современных технологий беспроводной передачи данных в сетях промышленного интернета вещей.

Существует широкий спектр технологий беспроводных сетей, которые можно применить в интеллектуальном производстве. Чтобы определить пригодность беспроводной технологии для конкретного варианта использования, необходимо сравнить свойства и возможности различных технологий.

Беспроводные технологии расширяют возможности межсетевое взаимодействия на умных заводах, создавая тем самым полностью интеллектуальные производственные системы. Их использование может дать несколько преимуществ:

- обеспечение большей гибкости при изменении схемы соединений, что упрощает развертывание узлов и улучшает масштабируемость;
- улучшение связи между узлами принятия решений и мобильными устройствами или их частями;
- устранение проводов, что снижает стоимость развертывания.

Однако беспроводные технологии имеют и некоторые недостатки, которые снижают их предсказуемость и увеличивают частоту ошибок. Характер распространения волн может вызывать различные явления, снижающие качество обслуживания (QoS) беспроводных приложений. Наиболее важными из них являются замирания, многолучевое распространение, затенение и помехи [3; 4]. Эти явления влияют на надежность, целостность и безопасность каналов связи по сравнению с проводной связью. В результате увеличивается частота битовых ошибок, что может вызвать неопределенность в приложениях.

В целом беспроводные стандарты, имеющие отношение к IIoT, делятся на две большие категории: (1) основанные на стандартах (например, LTE-M/NB-IoT, Bluetooth, Thread и Zigbee); (2) запатентованные (например, Z-Wave, Sigfox и LoRa). Ключевое различие между ними заключается в том, что технологии, основанные на стандартах, разрабатываются, лицензируются и контролируются альянсами или группами специальных интересов, состоящими из множества коммерческих компаний, в то время как запатентованные технологии принадлежат (и продвигаются) одной компанией.

Поскольку это совместные предприятия, беспроводные технологии, основанные на стандартах, как правило, имеют большой пул квалифицированных инженеров и ресурсов, которые можно использовать, что, с одной стороны, способствует устойчивой цепочке

## Технологии беспроводной передачи данных в сетях промышленного интернета вещей

поставок от разных производителей и дает конечным пользователям уверенность в том, что технология будет существовать и завтра. С другой стороны, органы управления стандартами могут быть бюрократическими, что способно замедлить разработку стандарта, препятствовать инновациям и создавать препятствия, затрудняющие продвижение новых или небольших компаний.

Напротив, запатентованные беспроводные технологии имеют гораздо меньший пул доступных талантов и ресурсов, которые можно использовать, несут риски, связанные с любой монополией, и, как правило, остаются нишевыми. Однако есть и положительная сторона таких технологий: отсутствие инерции руководящих органов может заставить компании быстрее реагировать на изменения рыночного спроса.

В Таблице представлен обзор наиболее актуальных беспроводных технологий/решений, которые могут быть использованы для различных приложений IIoT. Выделены технологии и их вспомогательные характеристики, такие как дальность связи, скорость передачи данных и др., а также требования к инфраструктуре соответствующей беспроводной технологии.

Таблица

Обзор беспроводных технологий для IIoT

Название	Пример для использования		Диапазон	Скорость передачи данных	Потребность в инфраструктуре
Малый и средний диапазон (IEEE 802.15.1)	Bluetooth	Интерфейс продукта	100 м	< 3 Мбит/с	Без специальной инфраструктуры, точка-точка (P2P)
	WISA	Автоматизация производства	5... 15 м	1 Мбит/с	Беспроводные бесконтактные переключатели, беспроводные сенсорные панели и панели беспроводного ввода/вывода
	WSAN-FW	Автоматизация производства	5... 15 м	1 Мбит/с	Базовая станция(и) WSAN-FA и конвертер(ы)
	IO-Link	Автоматизация производства	5... 15 м	1 Мбит/с	Беспроводное устройство(а) IO-Link (концентратор) и беспроводной мост(ы)
Короткий средний диапазон (IEEE 802.15.4)	Zigbee	Управление устройствами	15 м	250 кбит/с	Точки доступа
	Wireless HART	Датчики и исполнительные механизмы	15 м	250 кбит/с	HART-шлюз для подключения к полевой шине
	ISA100.11a	Датчики и исполнительные механизмы	15 м	250 кбит/с	Шлюзы
	WIA-PA (IEC62601)	Автоматизация процессов	10... 100 м	250 кбит/с	Главный компьютер, шлюз, устройство(а) маршрутизации и портативное(ые) устройство(а)
	6TiSCH	Датчики и актуаторы	15 м	250 кбит/с	Несколько шлюзов и ретрансляторы

Окончание Таблицы

Малый и средний радиус действия (IEEE 802.11)	WLAN	Более широкий доступ в Интернет	100 м	600 Мбит/с	Маршрутизатор, точки доступа
	Industrial WLAN	Датчики и исполнительные механизмы	100 м	450 Мбит/с	Точки доступа, шлюзы к полевой шине
	WIA-FA (IEC 62948)	Автоматизация производства	5 ... 30 м	< 54 Мбит/с	Главный компьютер, шлюз, устройство(а) доступа, полевое устройство(а) и портативное(ые) устройство(а)
Малый и средний радиус действия (другие)	UWB	Приложения для позиционирования	10 м	1 Гбит/с	Локационные устройства
	EnOcean	Сбор энергии, умные дома	30 м	125 кбит/с	Модули приемопередатчиков
	NFC	Бесконтактная идентификация, продажа	≤ 10 см	106 ... 424 кбит/с	Модули приемопередатчиков
	RFID	Бесконтактная идентификация и отслеживание	6 м	100 кбит/с	Метки, сканер
Большой радиус действия	LoRa/LoRaWAN	Разрозненное зондирование	≤ 10 км	≤ 21,9 кбит/с	Один или несколько шлюзов, сервер приложений или облачная система
	NB-IoT	Умные измерения, приложения для умного города	1 км (город)	< 100 кбит/с	Инфраструктура от провайдера
	LTE-M	Носимые и отслеживающие приложения	10 км (сельская местность)	0,384-1 Мбит/с	Инфраструктура от провайдера
	SigFox	Приложения для мониторинга	500 м (город)	100 или 600 бит/с	Инфраструктура от провайдера
LTE		Мобильные устройства и терминалы данных	10 км	150 Мбит/с	Комплексная инфраструктура от провайдера
5G		Мобильные устройства и терминалы данных, датчики и исполнительные механизмы	≤ несколько сотен м	до 100 Гбит/с	Комплексная инфраструктура от провайдера
WIFI 6		Мобильные устройства и терминалы данных, датчики и исполнительные устройства для внутренних сетей	10 м	до 11 Гбит/с	Комплексная инфраструктура от провайдера

Источник: таблица составлена авторами.

Рассмотрим подробнее некоторые из наиболее популярных технологий.

Большинство устройств IoT сегодня используют Wi-Fi 4 на частоте 2,4 ГГц из-за его низкого энергопотребления, низкой стоимости и увеличенного радиуса действия. Однако из-за ограниченности каналов и других протоколов, таких как Bluetooth Classic, Bluetooth Low Energy и Zigbee, эксплуатирующих тот же спектр, он становится все более переполненным, и именно здесь особого внимания заслуживает Wi-Fi 6.

Большинство маршрутизаторов и ноутбуков уже имеют возможности Wi-Fi 6, а устройства конечных узлов IoT с возможностями Wi-Fi 6 сейчас набирают обороты. Wi-Fi 6 хорошо подходит для сред с большим количеством сосуществующих устройств, даже в спектре 2,4 ГГц, благодаря таким функциям, как OFDMA и MU-MIMO, которые поддерживают множество сосуществующих устройств в плотных средах [4]. Это позволяет большому количеству устройств IoT сосуществовать в спектре 2,4 ГГц без необходимости перехода на частоты 5 или 6 ГГц, что привело бы к увеличению затрат и энергопотребления. Области применения включают электроинструменты и промышленные носимые устройства. Кроме того, энергопотребление может быть снижено благодаря Target Wake Time (далее – TWT) – новой функции, представленной в Wi-Fi 6. TWT позволяет конечным устройствам «просыпаться» и проверять наличие данных в определенное время, а не периодически, значительно снижая энергопотребление, что очень важно для всех устройств с питанием от батарей [5].

С увеличением количества подключенных устройств на фоне растущих требований к передаче данных и потребности в протоколах, которые могут взаимодействовать с несколькими устройствами, Wi-Fi все больше проникает на промышленный рынок.

Особое значение для IoT имеет технология 5G. Чувствительная ко времени связь составляет основу Индустрии 4.0, где машины, устройства и системы должны взаимодействовать синхронно с минимальной задержкой.

Интеграция структуры IEEE TSN с системой 5G открывает путь к детерминированной связи с малой задержкой на заводах будущего. Появляется концепция связи 5G с учетом времени, предлагающая поддержку детерминированной и/или изохронной связи с безупречной надежностью и доступностью. Эта служба обеспечивает транспортировку пакетов с атрибутами качества обслуживания (QoS), включая ограниченную задержку и надежность. Ключом к достижению детерминированной связи является синхронизация. Вся система 5G работает как «система с учетом времени» IEEE 802.1AS, обеспечивая синхронизацию между такими элементами, как UE, gNB, UPF, NW-TT и DS-TT. Процесс синхронизации вращается вокруг 5G GM, гарантируя тесную координацию для устранения задержек связи [6].

На стыках системы 5G трансляторы TSN (TT) играют ключевую роль. Эти TT облегчают работу IEEE 802.1AS, тем самым достигается синхронизация времени и детерминированная доставка трафика. Взаимодействие между компонентами 5G и TSN дает возможность организовать бесперебойную передачу данных, удовлетворяя жесткие временные требования промышленных приложений. Интеграция синхронизации (g)PTP позволяет реализовать сценарии синхронизации по восходящей и нисходящей линии связи. Независимо от того, где расположены главные часы (на пользовательском оборудовании или в сети), система 5G поддерживает обе конфигурации. Такая гибкость гарантирует, что, независимо от модели развертывания, связь, чувствительная ко времени, останется точной и надежной [7].

Особого внимания заслуживают частные сети 5G, которые особенно интересны в промышленных приложениях. Частные сети могут обеспечить выделенное покрытие, что является ключевым фактором для создания надежных внутренних сетей даже в удаленных районах. Кроме того, отсутствует борьба за сетевые ресурсы, как в сетях общего пользования, что повышает надежность и устойчивость сети. Можно обеспечить внутреннее управление сетью. Это позволяет реализовать приоритеты трафика или политики безопасности для достижения сохранности данных. Частные сети можно настраивать в соответствии с конкретными требованиями различных приложений. Все эти характеристики делают частные сети 5G надежными и безотказными.

Идея частной сети (NPN) в сфере 5G является революционной. Она включает в себя как автономные непубличные сети (SNPN), так и интегрированные в публичную сеть NPN (PNI-NPN).

Автономные непубличные сети работают независимо от традиционных наземных мобильных сетей общего пользования (PLMN). Они идентифицируются комбинацией идентификаторов PLMN и NID (Network Identifier). Пользовательское оборудование (UE) с поддержкой SNPN конфигурируется с учетными данными абонента для каждой подписанной SNPN. Такая конфигурация обеспечивает эффективную и безопасную связь в соответствии с требованиями отрасли [8].

Интегрированные сети общего пользования, с другой стороны, представляют собой непубличные сети, которые используют поддержку PLMN. Они идентифицируются по идентификатору PLMN и идентификатору группы закрытого доступа (CAG). Ячейки CAG в PNI-NPN передают идентификаторы, которые обеспечивают доступ только UE, совместимым со спецификациями сети. Такая интеграция сохраняет преимущества инфраструктуры PLMN, удовлетворяя при этом промышленные требования.

Отдельно необходимо акцентировать внимание на технологии беспроводной связи LoRa, которая является разновидностью LPWAN, направленной на обеспечение связи устройств, работающих от аккумуляторов, на большом расстоянии и в широкой зоне. Фактически LoRa означает «дальний радиус действия». Ее физический уровень основан на запатентованном алгоритме модуляции спектра. LoRa использует различные частотные диапазоны в зависимости от региона, например, в Европе LoRa развернута в диапазоне 863...873 МГц [2]. Дальность действия этой технологии зависит от препятствий на местности. Например, в городских условиях радиус действия LoRa обычно составляет 5 км, а в более открытой местности он может достигать более 15 км.

В 2019 году неиндустриальный стандартный формат LoRaWAN установил мировой рекорд успешной передачи данных – невероятные 766 км между шлюзами. В данном случае шлюзы LoRaWAN были высотой в несколько километров и с неограниченным обзором друг на друга.

Передачи LoRa имеют очень низкое энергопотребление, что делает эту технологию подходящей для устройств с батарейным питанием. LoRa определяет только физический уровень, в то время как канальный и сетевой уровни охватывает LoRaWAN (сеть дальнего действия с широкой зоной охвата). LoRaWAN достигает своей дальности действия за счет использования технологии LPWA, которая позволяет устройствам обмениваться данными на большом расстоянии, потребляя при этом меньше энергии. Это резко контрастирует с традиционными беспроводными технологиями, такими как Wi-Fi и Bluetooth, меньший радиус действия которых обусловлен более высоким энергопотреблением и помехами от физических препятствий (в диапазоне 2,4 ГГц) [4].

LoRaWAN сочетает преимущество низкого энергопотребления с интеллектуальной и запатентованной технологией модуляции. Эта модуляция называется: Chirp Spread Spectrum (далее – CSS), которая искусственно расширяет диапазон, позволяя фильтровать больше шума, в результате чего сигналы легче преодолевают препятствия и достигают больших расстояний. В отличие от традиционных беспроводных технологий, использующих фиксированную несущую частоту, CSS распределяет сигнал по широкому диапазону частот, делая его менее восприимчивым к помехам и радиошуму.

#### Заключение

Таким образом, радиопомехи, высокая плотность устройств и необходимость обеспечения отказоустойчивости, а также высокая пропускная способность и низкая задержка являются основными проблемами, которые необходимо решить при развертывании беспроводных технологий в современных промышленных средах. Для решения этих проблем в настоящее время доступен широкий спектр технологий беспроводной связи для промышленного интернета вещей, каждая из которых может быть применима для разных сценариев. Особого внимания заслуживают передовые поколения беспроводных технологий: для сотовой связи – 5G, для WLAN – Wi-Fi 6 (IEEE 802.11AX).

#### Литература

1. Тину О. Беспроводные сенсорные технологии в приложениях IIoT // Электронные компоненты. 2022. № 7. С. 24–28. EDN IOQQGP.
2. Лавишук О.А., Листопад Н.И. Моделирование сенсорной сети промышленного интернета вещей // Проблемы инфокоммуникаций. 2023. № 1 (17). С. 67–77. EDN PIGQWV.
3. Papadopoulos G.Z., Theoleyre F., Vilajosana X. Industrial Internet of Things: Specificities and challenges // Internet Technology Letters. 2020. Vol. 3. No. 4. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1002/itl2.172>
4. Арефьев А.В., Афанасьева О.В., Вешев Н.А., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Сорокин А.А. Проблемы построения больших локальных сетей интернета вещей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 261–267. EDN GEOOYM. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-261-267
5. Raza S., Faheem M., Guenes M. Industrial wireless sensor and actuator networks in industry 4.0: Exploring requirements, protocols, and challenges – A MAC survey // International Journal of Communication Systems. 2019. Vol. 32. No. 15. P. 76–79. DOI: 10.1002/dac.4074
6. Srivastava G., Chun-Wei Lin J. Future of wireless access technologies and frameworks for internet of things applications // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2023. Vol. 34. No. 11. P. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4879>
7. Галка Н.С., Тихонов Э.Е. К вопросу применения технологии 5G для промышленного интернета вещей и поддержке радиосвязи с ключевой ролью облака // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2023. № 2. С. 14–17. EDN BHWES.
8. Тарханова О.Ю. Применение беспроводных сенсорных сетей в прецизионном сельском хозяйстве // Проблемы информатики. 2017. № 4 (37). С. 16–46. EDN XQZZQD.

#### References

1. Tinu O. (2022) Wireless sensor technologies in IIoT applications. *Elektronnye komponenty*. No. 7. Pp. 24–28. (In Russian).



2. Lavshuk O.A., Listopad N.I. (2023) Simulation of the sensor network of the industrial Internet of things. *Problemy infokommunikatsiy*. No. 1 (17). Pp. 67–77. (In Russian).
3. Papadopoulos G.Z., Theoleyre F., Vilajosana X. (2020) Industrial Internet of Things: Specificities and challenges. *Internet Technology Letters*. Vol. 3. No. 4. Pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1002/itl2.172>
4. Arefiev A.V., Afanasyeva O.V., Veshev N.A., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Sorokin A.A. (2022) Problems of building large local networks of the Internet of things. *News of Tula State University. Technical sciences*. No. 10. Pp. 261–267. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-261-267 (In Russian).
5. Raza S., Faheem M., Guenes M. (2019) Industrial wireless sensor and actuator networks in industry 4.0: Exploring requirements, protocols, and challenges – A MAC survey. *International Journal of Communication Systems*. Vol. 32. No. 15. Pp. 76–79. DOI: 10.1002/dac.4074
6. Srivastava G., Chun-Wei Lin J. (2023) Future of wireless access technologies and frameworks for internet of things applications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. Vol. 34. No. 11. Pp. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4879>
7. Galka N.S., Tikhonov E.E. (2023) To the question of application of 5G technology for industrial Internet of Things (IIoT) and radio communication support with key role of cloud. *Scientific bulletin NSHTI*. No. 2. Pp. 14–17. (In Russian).
8. Tarkhanova O.Yu. (2017) Application of wireless sensor networks in precision agriculture. *Problems of informatics*. No. 4 (37). Pp. 16–46. (In Russian).