

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ С ПРИЛОЖЕНИЕ В ИНДУСТРИАЛНИТЕ МРЕЖИ ЗА ИНТЕРНЕТ НА НЕЩАТА

Красен Ангелов

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGIES WITH APPLICATION IN INDUSTRIAL NETWORKS FOR THE INTERNET OF THINGS

Krasen Angelov

Резюме: Интегрирането на Интернет на нещата (Internet of Things – IoT) в индустриалните комуникационни мрежи формира основата комуникационната инфраструктура на бъдещите интелигентни фабрики, които включват дигитализирано гъвкаво производство с динамичен технологичен оперативен график и множество мобилни участници. Благодарение на Интернет на нещата, всякакви данни се събират на място с помощта на интелигентни устройства и се изпращат до системата за управление на предприятието за вземане на решения. Основата на подобно производство са надеждни и сигурни комуникационни мрежи, включително безжични. Като основен принос в статията е предложеният сравнителен анализ на възможностите на съвременните напреднали поколения безжични технологии за безжичен пренос на данни в индустриалните мрежи на Интернет на нещата, и приложимостта им за различни сценарии. Специално внимание е обърнато на 5G (за клетъчна комуникация), WLAN (IEEE 802.11ax) и LoRaWAN.

Ключови думи: Индустриален интернет на нещата, безжични технологии, безжични мрежи с ниска мощност, интелигентни сензори

Abstract: The integration of the Internet of Things (IoT) into industrial communication networks is set to become the cornerstone of the communication infrastructure of future smart factories. These factories will comprise digitalized flexible production with a dynamic technological operational schedule and multiple mobile participants. The Internet of Things facilitates the collection of data at the point of use through the utilization of smart devices, which subsequently transmits the gathered information to the enterprise management system for the purpose of decision-making. The foundation for such production lies in the establishment of reliable and secure communication networks, encompassing wireless technologies. The primary contribution of the article is the proposed comparative analysis of the capabilities of modern advanced generations of wireless technologies for wireless data transmission in industrial networks of the Internet of Things, and their applicability for various scenarios. This paper focuses on three particular technologies: 5G (for cellular communication), WLAN (IEEE 802.11ax), and LoRaWAN.

Keywords: Industrial Internet of Things, wireless technologies, low power wireless networks, intelligent sensors

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременната Индустрия 4.0 трансформира развитието на индустриалния сектор и създава нови пазарни възможности с висока добавена стойност. Енергийно ефективно производство, вериги за доставки и съоръжения с голям брой активи могат да бъдат реализирани с възможностите на интелигентните решения на Индустриалния интернет на нещата (Industrial Internet of Things – IIoT). Специално разработени интелигентни сензори и мрежи вече са внедрени в мащаби, ориентирани към различните сфери на индустрията и

производството. Наблюдава силен растеж във внедряването на PoT системи в много сектори, като се очаква броят на свързаните устройства да достигне 29,4 милиарда до 2030 г. [1, 2].

Внедряването на PoT във фабрична или производствена среда е сложна задача, породена от редица фактори, като например естеството на индустриалните системи (на закрито или на открито) и съответните предизвикателства, свързани с характеристиките на разпространение на радиосигналите в тези разнообразни среди. Инженерите трябва също да вземат предвид чувствителността на безжичната комуникация към шум и електромагнитни смущения, както и изискванията за захранване на безжичните устройства и общата липса на опит във внедряването на безжични технологии в производствени среди. Комбинирането в мрежа на голям брой сензори, изпълнителни механизми, ефектори и системи за управление на машини в динамична фабрична среда, може да се постигне по различни начини, например чрез широка гама от стандартни и нестандартни безжични мрежови технологии.

Същевременно трябва да се отбележи, че мрежовите нужди на индустриалните устройства и приложения са различни от изискванията на потребителския свят, тъй като при тях надеждността и сигурността са на първо място. Тези високи изисквания разграничават наличните технологии от тези, които са най-подходящи за критични за бизнеса PoT приложения. Например, начинът, по който сензорите са свързани към мрежата, определя възможността за тяхното сигурно, надеждно и рентабилно внедряване в условия, типични за промишлени приложения [3]. Правилният избор и използване на съвременни безжични технологии ще позволи значително намаляване на разходите за пренос на данни и, по-важното, на разходите и времето за настройване на оборудването и провеждане на онлайн измервания. По този начин, изборът на най-приемливата безжична комуникационна технология за PoT, която ще удовлетвори както изискванията за сигурност и безопасност, така и производителността, както и ще осигури повишена гъвкавост и мащабируемост, е важен научен, но и практически проблем, необходимостта от решаването на който обуславя избора на темата на настоящата статия.

2. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА БЕЗЖИЧНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ИНДУСТРИАЛЕН ИНТЕРНЕТ НА НЕЩАТА

През последното десетилетие са публикувани редица обзорни статии, насочени към разглеждане на различни аспекти на прилагането на безжичните технологии, системи и протоколи при изграждане на индустриални безжични мрежи за индустриалната автоматизация [4-8].

Сравнителни проучвания на архитектурата и дизайна на протоколи, които разглеждат четири добре познати индустриални безжични технологии, базирани на стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee, WireleshART, ISA100.11a и WIA-PA), са представени в [9-12].

Въпреки съществуващите разработки и публикации, редица въпроси в тази област остават отворени. Така че, технологията за ултра надеждна комуникация с ниска латентност (Ultra-Reliable Low Latency Communication – URLLC), която е много важна за критични PoT приложения, заслужава специално внимание. Освен това, е необходим по-подробен анализ на най-незабележимите технологии за глобални мрежи с ниска мощност (Low Power Wide Area Network – LPWAN) за индустриални среди. Тук ще бъде представен сравнителен анализ на най-съвременните технологии за безжично предаване на данни в индустриалните мрежи на Интернет на нещата. Съществува широка гама от безжични технологии, които могат да бъдат приложени за интелигентно производство. За да се определи пригодността на дадена безжична технология за конкретен случай на

употреба, е необходимо да се сравнят свойствата и възможностите на различните технологии.

Безжичните технологии разширяват мрежовата оперативна съвместимост в интелигентните фабрики, като по този начин създават напълно интелигентни производствени системи. Използването им може да даде няколко предимства:

- осигуряване на по-голяма гъвкавост при промяна на схемата на свързване / комуникация, което опростява разполагането на комуникационните възли / мрежови устройства и подобрява мащабируемостта;
- подобряване на комуникацията между възлите / мрежовите устройства за вземане на решения и мобилните устройства или техни части;
- елиминиране на кабелни линии, което намалява разходите за внедряване.

Въпреки това, безжичните технологии имат и някои недостатъци, които влошават тяхната предвидимост и увеличават честотата на грешките. Характерът на разпространението на радиовълните може да причини различни явления, които повлияват негативно качеството на услугата (QoS) на безжичните приложения. Най-важните от тях са [13]:

- честотно зависимото затихване на сигналите в свободното пространство и при преминаване през препятствия;
- многолъчевото разпространение на сигналите;
- възможностите за засенчване и интерференция.

Тези явления влияят негативно на надеждността, целостта и сигурността на комуникационните канали в сравнение с кабелната комуникация. В резултат на това честотата на битовите грешки (Bit Error Rate – BER) се увеличава, което може да причини неопределеност в работата на приложенията.

Обикновено безжичните стандарти, свързани с IoT, се разделят на две големи категории:

- базирани на стандарти (напр. LTE-M/NB-IoT, Bluetooth, Thread и Zigbee, LoRaWAN);
- патентовани (напр. Z-Wave, Sigfox и LoRa).

Ключовата разлика между двете категории е, че технологиите, базирани на стандарти, се разработват, лицензират и контролират от алианси или групи по специални интереси, съставени от много търговски компании, докато патентованите технологии са собственост (и се популяризират) от една-единствена компания.

Тъй като това са съвместни предприятия, безжичните технологии, базирани на стандарти, обикновено разполагат с голям набор от квалифицирани инженери и ресурси, които могат да бъдат използвани. Това, от една страна, насърчава устойчива верига за доставки от различни производители и дава увереност на крайните потребители, че технологията ще съществува и утре. От друга страна, стандартизиращите управляващи органи могат да бъдат бюрократични, което е предпоставка за забавяне в разработването и развитието на стандарти, да възпрепятства иновациите и да създаде пречки, които затрудняват развитието на нови или малки компании.

За разлика от това, патентованите безжични технологии разполагат с много по-малък набор от налични разработчици и ресурси, носят рисковете, свързани с всеки монопол, и като цяло остават нишови. Въпреки това, има и положителна страна на подобни технологии: липсата на инерция от страна на регулаторните органи може да накара компаниите да реагират по-бързо на промените в пазарното търсене.

**СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ С
ПРИЛОЖЕНИЕ В ИНДУСТРИАЛНИТЕ МРЕЖИ ЗА ИНТЕРНЕТ НА НЕЩАТА
КРАСЕН АНГЕЛОВ**

Таблица 1 е представен общ сравнителен анализ на най-подходящите безжични технологии/решения, които могат да се използват за различни IoT приложения. Подчертани са технологиите и техните спомагателни характеристики, като например обхват на комуникация, скорост на предаване на данни и др., както и инфраструктурните изисквания на съответната безжична технология.

Таблица 1. Сравнителен анализ на съвременни безжични технологии и решения за IoT приложения

Безжична технология	Пример за използване		Обхват	Скорост на предаване на данните	Инфраструктурни изисквания
IEEE 802.15.1 (малък и среден обхват)	Bluetooth	Безжичен интерфейс на хардуерни устройства	100 m	< 3 Mbps	Без специална инфраструктура, от точка-до-точка (P2P)
	WISA	Автоматизация на производството	5 до 15 m	1 Mbps	Безжични безконтактни ключове, безжични сензорни екрани панели и безжични входно/изходни панели
	WSAN-FW	Автоматизация на производството	5 до 15 m	1 Mbps	Базова станция(и) WSAN-FW и конвертор(и)
	IO-Link	Автоматизация на производството	5 до 15 m	1 Mbps	Безжично устройство(а) IO-Link (концентратор) и безжичен мост(ове)
IEEE 802.15.4 (средно малък обхват)	Zigbee	Управление на устройства	15 m	250 kbps	Точка за достъп
	Wireless HART	Сензори и изпълнителни механизми	15 m	250 kbps	HART шлюз за връзка към полевата шина
	ISA100.11a	Сензори и изпълнителни механизми	15 m	250 kbps	Шлюзове
	WIA-PA (IEC62601)	Автоматизация на процесите	10 до 100 m	250 kbps	Главен компютър, шлюз, маршрутизиращо устройство(а) и преносимо(и) устройство(а)
	6TiSCH	Сензори и актюатори	15 m	250 kbps	Множество шлюзове и ретранслатори
IEEE	WLAN	Широколенков	100 m	600 Mbps	Маршрутизатор,

802.11 (малък и среден радиус на действие)		достъп до Интернет			точки за достъп
	Industrial WLAN	Сензори и изпълнителни механизми	100 m	450 Mbps	Точки за достъп, шлюз към полевата шина
	WIA-FA (IEC 62948)	Автоматизация на производството	5 до 30 m	< 54 Mbps	Главен компютър, шлюз, маршрутизиращо устройство(а) и преносимо(и) устройство(а)
Други технолог ии с малък и среден радиус на действие	UWB	Приложения за позициониране	10 m	1 Gbps	Локаторни устройства
	EnOcean	Събиране на енергия, Интелигентен дом	30 m	125 kbps	Приемо- предавателни модули
	NFC	Безконтактна идентификация, безконтактни разплащания, търговия	≤ 10 cm	106 до 424 kbps	Приемо- предавателни модули
	RFID	Безконтактна идентификация и проследяване	6 m	100 kbps	Етикети, скенери
Голям радиус на действие	LoRa / LoRaWAN	Интелигентни измерване	≤ 10 km	$\leq 21,9$ kbps	Един или няколко шлюза, сървър за приложения или облачна система
	NB-IoT	Интелигентно измерване, приложения за Умен град	1 km (в градска среда)	< 100 kbps	Инфраструктура от оператор на клетъчна мрежа
	LTE-M	Носими устройства и приложения за проследяване	10 km (в извън градска среда)	0,384 до 1 Mbps	Инфраструктура от оператор на клетъчна мрежа
	SigFox	Приложения за мониторинг	500 m (в градска среда)	100 или 600 bps	Инфраструктура от доставчика
LTE		Мобилни устройства и терминали за данни	10 km	150 Mbps	Комплексна инфраструктура от доставчика
5G		Мобилни устройства и терминали за	$\leq$ няколко стотин	до 100 Gbps	Комплексна инфраструктура от доставчика

**СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ С
ПРИЛОЖЕНИЕ В ИНДУСТРИАЛНИТЕ МРЕЖИ ЗА ИНТЕРНЕТ НА НЕЩАТА
КРАСЕН АНГЕЛОВ**

	данни, сензори и изпълнителни механизми	метра		
IEEE 802.11ax (WiFi 6)	Мобилни устройства и терминали за данни, сензори и изпълнителни механизми за вътрешни мрежи	10 m	до 11 Gbps	Комплексна инфраструктура от доставчика

По-надолу е направен анализ на някои от най-популярните технологии.

2.1. Анализ на аспектите на приложение на IEEE 802.11 (WiFi) в IoT мрежи

Повечето IoT устройства днес използват WiFi 4 (IEEE 802.11n) на честота 2.4 GHz поради ниската му консумация на енергия, ниската цена и увеличения радиус на действие. Въпреки това, поради ограничението на броя радиочестотни канали и наличието на други протоколи като Bluetooth Classic, Bluetooth Low Energy и Zigbee, използващи същия радиочестотен спектър, той става все по-пренаселен и поради това WiFi 6 (IEEE 802.11ax) заслужава по-специално внимание.

Повечето маршрутизатори и преносими устройства вече имат Wi-Fi 6 възможности, а крайните IoT устройства/възли с WiFi 6 възможности стават все по-голям брой. WiFi 6 е много подходящ за среди с голям брой съвместно работещи устройства, дори в радиочестотния спектър на 2,4GHz, благодарение на функции като OFDMA и MU-MIMO, които поддържат множество съвместно работещи устройства в гъсти среди [13]. Това позволява голям брой IoT устройства да оперират едновременно в спектъра на 2,4 GHz, без да е необходимо да се преминава към честоти от 5 или 6 GHz, което би довело до увеличени разходи и консумация на енергия. Областите на приложение включват електрически инструменти и индустриални носими устройства. Освен това, консумацията на енергия може да бъде намалена благодарение на Target Wake Time (TWT) – нова функция, въведена в WiFi 6. TWT позволява на крайните устройства да се „събуждат“ и да проверяват за наличност на данни в определено време, а не периодично, което значително намалява консумацията на енергия, което е много важно за всички устройства със захранване от батерия [14].

С увеличаването на броя на свързаните устройства на фона на нарастващите изисквания за пренос на данни и необходимостта от протоколи, които могат да взаимодействат с множество устройства, Wi-Fi все повече навлиза на индустриалния пазар.

2.2. Анализ на аспектите на приложение на 5G в IoT мрежи

От особено значение за IoT е и 5G технологията. Чувствителната към времето комуникация формира основата на Индустрия 4.0, където машините, устройствата и системите трябва да взаимодействат синхронно с минимална латентност.

Интеграцията на структурата на IEEE TSN с 5G системата проправя пътя за детерминистична комуникация с ниска латентност във фабриките на бъдещето. Концепцията за 5G комуникация, съобразена с времето, се заражда, предлагайки поддръжка за детерминистична и/или изохронна комуникация с изключително високо ниво на надеждност и достъпност [15]. Тази услуга осигурява транспортиране на пакети с атрибути за качество на услугата (QoS), включително с ниска латентност и висока

надеждност. Ключът към постигането на детерминистично свързване е синхронизацията. Цялата 5G система работи като IEEE 802.1AS „система за отчитане на времето“, осигуряваща синхронизация между елементи като потребителското оборудване (UE), базовите станции (gNB), функциите от потребителската равнина (UPF), и TSN транслаторите NW-TT и DS-TT. Процесът на синхронизация се върти около 5G GM, осигурявайки тясна координация за елиминиране на закъсненията в комуникацията [16, 17].

Основната цел на 5G TSN (Time sensitive networking) е да позволи на 5G мрежите да поддържат приложения, които изискват точно планиране на предаването на информация, например приложения в областта на операционните технологии (OT) като EtherCAT over TSN, Profinet over TSN, или OPC/UA over TSN [18]. В 5G TSN се въвеждат две основни нови функционалности:

- Нова функционалност на контролната равнина: централен мрежов контролер (CNC) планира TSN потоците и разпределя резултатните конфигурации в Ethernet мрежата.
- Нова функционалност за управление: централизирана конфигурация на потребителя (CUC) предоставя конзола за управление на администраторите, за да могат да конфигурират изискванията за TSN потоците.

В 5G мрежата, TSN транслаторите (TT) играят ключова роля. Тези TT улесняват работата по IEEE 802.1AS, като по този начин постигат синхронизация на времето и детерминистично доставяне на трафик. Взаимодействието между 5G и TSN компонентите предоставя възможност за организиране на непрекъснат пренос на данни, отговаряйки на строгите времеви изисквания на индустриалните приложения. Интегрирането на (g)PTP синхронизацията позволява реализирането на сценарии за синхронизация по прав и обратен канал. Независимо къде се намира главният тактов генератор (на потребителския хардуер или в мрежата), 5G системата поддържа и двете конфигурации. Такава гъвкавост гарантира, че независимо от модела на внедряване, комуникацията, чувствителна към времето, ще остане точна и надеждна [15, 16].

От особено значение са частните 5G мрежи, които са от особен интерес в промишлените приложения. Частните мрежи могат да осигурят специално покритие, което е ключов фактор за създаването на надеждни вътрешни мрежи дори в отдалечени райони. Освен това, няма конкуренция за мрежови ресурси, както е в споделените мрежи, което повишава надеждността и устойчивостта на мрежата. Възможно е да се осигури управление на вътрешна мрежа. Това позволява приоритизиране на трафика или прилагане на политики за сигурност, за да се постигне устойчивост на данните. Частните мрежи могат да бъдат конфигурирани така, че да отговарят на специфичните изисквания на различни приложения. Всички тези характеристики правят частните 5G мрежи надеждни и устойчиви на откази.

Идеята за непублична / частна мрежа (Non-Public Network – NPN) в сферата на 5G е революционна. Непубличните мрежи се отнасят до частни 5G мрежи, които не са достъпни за обществеността [19]. Тези мрежи обикновено се използват за специфични индустрии или приложения, като например индустриални сценарии, медийно производство, частни събития или конференции.

NPN са проектирани да осигуряват сигурна и надеждна свързаност за специфични случаи на употреба, като същевременно запазват поверителността на мрежовата инфраструктура и данните.

Основни характеристики на NPN са

- Частна мрежова инфраструктура: NPN не са свързани с публичния интернет, което осигурява допълнителен слой сигурност.

- Персонализирана мрежова архитектура: NPN могат да бъдат проектирани да отговарят на специфични изисквания на индустрията или приложението.

- Сигурно предаване на данни: NPN гарантират, че чувствителните данни се предават сигурно и поверително.

Непубличните/частни мрежи включват както автономни непублични мрежи (Standalone Non-Public Networks – SNPN), така и интегрирани в публична мрежа NPN (Public Network Integrated NPN – PNI-NPN) [19]. Автономните непублични мрежи работят независимо от традиционните наземни мобилни мрежи за споделено ползване (Public Land Mobile Network – PLMN). Те се идентифицират чрез комбинация от PLMN и NID (Network Identifier) идентификатори. Потребителско оборудване (UE) с активирана SNPN мрежа е конфигурирано с абонатни идентификационни данни за всяка подписана SNPN мрежа. Такава конфигурация осигурява ефикасност и сигурност комуникация в съответствие с изискванията на индустрията.

Интегрираните споделени мрежи, от друга страна, представляват непублични мрежи, които използват PLMN поддръжка. Те се идентифицират чрез PLMN ID и ID на групата за затворен достъп (Closed. Access Group – CAG) [19]. CAG клетките в PNI-NPN предават идентификатори, които осигуряват достъп само на потребителски устройства (UE), съвместими със спецификациите на мрежата. Подобна интеграция запазва предимствата на PLMN инфраструктурата, като същевременно отговаря на индустриалните изисквания.

2.3. Анализ на аспектите на приложение на LoRa в IoT мрежи

Следващата ключова съвременна безжичната комуникационна технология, която трябва да се разгледа, е LoRa, която е разновидност на LPWAN, насочена към осигуряване на комуникация на дълги разстояния и в широк обхват между устройства, захранвани от батерии. LoRa е абревиатура от „далечен обхват“ (Long Range). Нейното физическо ниво е базирано на патентован алгоритъм за модулация на спектъра на сигнала. LoRa използва различни честотни ленти в зависимост от региона, например в Европа LoRa оперира в честотната лентата от 868 MHz [21]. Обхватът на тази технология зависи от препятствията и релефа на терена. Например, в градски условия радиусът на обхват на LoRa обикновено е 5 km, докато в по-открит терен може да достигне до повече от 15 km.

През 2019 г. неиндустриалният стандартизиран формат LoRaWAN постави световен рекорд за успешно предаване на данни – разстояние 832 km между шлюзове [22]. В този случай, LoRaWAN шлюзовете бяха на височина няколко километра и с неограничена видимост един към друг.

LoRa комуникацията изисква много ниска консумация на енергия, което прави тази технология подходяща за устройства, захранвани от батерии. LoRa определя само физическия слой, докато каналният и мрежовият слой са покрити от LoRaWAN (мрежа с голям обхват и широка зона на покритие) [23]. LoRaWAN постига своя обхват чрез използването на LPWA технология, която позволява на устройствата да обменят данни на по-голямо разстояние, като същевременно консумират по-малко енергия. Това е в рязък контраст с традиционните безжични технологии като WiFi и Bluetooth, чийто по-малък радиус на действие се дължи на по-висока консумация на енергия и смущения от физически препятствия (в диапазона от 2,4 GHz).

LoRaWAN съчетава предимството на ниската консумация на енергия с интелигентна и патентована технология за модулация. Тази модулация се нарича: Chirp Spread Spectrum (наричан по-долу – CSS) [23], която изкуствено разширява обхвата, позволявайки филтрирането на повече шум, което улеснява преодоляването на

препятствия и достигането на по-големи разстояния от страна на сигналите. За разлика от традиционните безжични технологии, които използват фиксирана носеща честота, CSS разпределя сигнала в широк диапазон от честоти, което го прави по-малко податлив на смущения и ради шум.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледани, анализирани и сравнени са технологичните аспекти и специфика на приложение в IoT на напредналите поколения безжични технологии и по-конкретно: за клетъчна комуникация – 5G, за WLAN - Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), за LPWAN – LoRa / LoRaWAN.

Анализирани са основните предизвикателства, които трябва да бъдат решени при внедряването на безжични технологии в съвременни индустриални среди – радиосмущенията, високата плътност на устройствата и необходимостта от осигуряване на резервно храняване, както и необходимата честотна лента, висока честота и ниска латентност. За да се справят с тези предизвикателства, в момента се развива широка гама от безжични комуникационни технологии за индустриалния Интернет на нещата, всяка от които може да бъде приложима в различни сценарии. Представен е сравнителен анализ на приложението и инфраструктурните изисквания за всяка от тези технологии.

ИЗПОЛЗВАНИ ИЗТОЧНИЦИ (REFERENCES)

- [1] NAIDOO, P., M. SIBANDA. Emerging Trends and Future Directions of the Industrial Internet of Things. In: Odhiambo, M.O., Mwashita, W. (eds) *From Internet of Things to Internet of Intelligence. Transactions on Computational Science and Computational Intelligence*. Springer, Cham. 2024, pp. 91-110. ISBN 978-3-031-55717-0. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-031-55718-7_5
- [2] SISINNI, E., A. SAIFULLAH, S. HAN, U. JENNEHAG and M. GIDLUND. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. In *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, vol. 14, no. 11, pp. 4724-4734. ISSN: 1551-3203. Available from: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>
- [3] KATHIRIYA H., A. PANDYA, V. DUBAY and A. BAVARVA. State of Art: Energy Efficient Protocols for Self-Powered Wireless Sensor Network in IIoT to Support Industry 4.0. In *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, India, 2020, pp. 1311-1314. ISBN:978-1-7281-7016-9 Available from: <https://doi.org/10.1109/ICRITO48877.2020.9198036>
- [4] GOTO, S., O. YOSHIE and S. FUJIMURA. Industrial IoT business workshop on smart connected application development for operational technology (OT) system integrator. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 2017, pp. 125-129, ISBN:978-1-5386-0948-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289864>
- [5] LIU, Y., R. CANDELL, M. KASHEF and L. BENMOHAMED, Dimensioning wireless use cases in Industrial Internet of Things. In *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Imperia, Italy, 2018, pp. 1-4, ISBN:978-1-5386-1066-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402370>
- [6] LIU, Y., M. KASHEF, K. B. LEE, L. BENMOHAMED and R. CANDELL, Wireless Network Design for Emerging IIoT Applications: Reference Framework and Use Cases. In *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 1166-1192, June 2019, ISSN: 0018-9219. Available from: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2905423>
- [7] DELFINO, L. R., A. S. GARCIA and R. L. de MOURA, Industrial Internet of Things: Digital Twins. In *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, 2019, pp. 1-3. ISBN:978-1-7281-3099-6. Available from: <https://doi.org/10.1109/IMOC43827.2019.9317591>
- [8] REMIZOV, B., S. TRETYAKOV and Y. ANDREEV, Edge IIoT in Manufacturing. In *2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 322-326. ISBN:979-8-3503-9504-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515695>
- [9] WANG, W., G. HE and J. WAN. Research on Zigbee wireless communication technology. In *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Yichang, China, 2011, pp. 1245-1249. ISBN:978-1-4244-8165-1. Available from: <https://doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057961>.

- [10] WINTER, J. M., C. LIMA, I. MULLER, C. E. PEREIRA and J. C. NETTO. WirelessHART Routing Analysis Software. In *2011 Brazilian Symposium on Computing System Engineering*, Florianopolis, Brazil, 2011, pp. 96-98. ISBN:978-0-7695-4641-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/SBESC.2011.21>
- [11] REZHA, F. P. and S. Y. SHIN. Performance evaluation of ISA100.11A industrial wireless network. In *IET International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT 2013)*, Beijing, China, 2013, pp. 587-592. ISBN:978-1-84919-653-6. Available from: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0105>
- [12] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks". In *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, vol., no., pp.1-709, 22 April 2016. ISBN:978-1-5044-0845-5. Available from: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7460875>
- [13] BOŠTJANČIČ, S., V. TIMČENKO, M. KABOVIĆ and A. KABOVIĆ. Industrial Internet: Architecture, characteristics and implementation challenges. In *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2021, pp. 1-4. ISBN:978-1-7281-8229-2. Available from: <https://doi.org/10.1109/INFOTEH51037.2021.9400694>
- [14] PULIGHEDDU, C., F. BUSACCA, R. RUSCA, F. RAVIGLIONE, C. CASETTI, C.F. CHIASSERINI. Target Wake Time Scheduling for Time-Sensitive Networking in the Industrial IoT. In *2024 IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, Spain, 2024, pp. 1-7. ISBN:979-8-3503-6224-4. Available from: <https://doi.org/10.1109/PIMRC59610.2024.10817339>
- [15] Пасарелски, Р., Теодора Пасарелска. Изследване на мрежовите функции и референтната архитектура на 5G мобилни системи. Сборник доклади от научна конференция „Знание, наука, технологии, иновации“ 2023, 6-7 юли 2023 г., гр. Велико Търново, стр. 388-400, ISSN 2815-3480, 2023
- [16] ПАСАРЕЛСКИ, Росен. *Нови 5G мобилни клетъчни системи. Изследване на взаимодействието между 4G-LTE и 5G системите: архитектура, мрежови функции, интерфейси и протоколи*. София, Изд. на Нов български университет, 2024. ISBN 978-619-233-282-2 [PASARELSKI, Rosen. *Novi 5G mobilni kletachni sistemi. Izsledvane na vzaimodeystviето mezhdu 4G-LTE i 5G sistemite: arhitektura, mrezhovi funktsii, interfeysi i protokoli*. Sofia, Izd. na Nov balgarski universitet, 2024. ISBN 978-619-233-282-2]
- [17] ПАСАРЕЛСКИ, Росен, Васил КЪДРЕВ, и Теодора ПАСАРЕЛСКА. Петото поколение (5G) - мобилни системи и технологии за комуникации на бъдещето. XXV научна конференция с международно участие „Телеком 2017“, София, 26-27.10.2017: Сборник доклади [CD]. 2017, с. 1-10. ISSN 1314-2690. [PASARELSKI, Rosen, Vasil KADREV, i Teodora PASARELSKA. *Petoto pokolenie (5G) - mobilni sistemi i tehnologii za komunikatsii na badeshteto*. XXV nauchna konferentsia s mezhdunarodno uchashtie „Telekom 2017“, Sofia, 26-27.10.2017: Sbornik dokladi [CD]. 2017, s. 1-10. ISSN 1314-2690.]
- [18] VAILLANT, Stefan. 5G Time Sensitive Networking. *Technology Radar Software AG* [online]. [viewed 11.03.2025]. Available from: <https://techradar.softwareag.com/technology/5g-tsn/>
- [19] Non-Public Networks (NPN). *3GPP Technologies* [online]. [viewed 13.03.2025]. Available from: <https://www.3gpp.org/technologies/npn>
- [20] 5G for Industry 4.0. *3GPP Technologies* [online]. [viewed 13.03.2025]. Available from: <https://www.3gpp.org/technologies/tsn-v-lan>
- [21] MANCHEV, N. P., K. K. ANGELOV, P. G. KOGIAS and S. M. SADINOV. Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications. In *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 1-4. ISBN:979-8-3503-0329-2. Available from: <https://doi.org/10.1109/ET.2019.8878492>
- [22] LoRa World Record Broken: 832km/517mi using 25mW, *TheThings Network* [online]. [viewed 19.03.2025]. Available from: <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>
- [23] TS001-1.0.4 LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification, *LoRa Alliance* [online]. [viewed 19.03.2025]. Available from: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification>
- [24] СИМЕОНОВА, Цветелина. Развитие на перспективните технологии в „Интернет на свързаните неща“ IoT (Internet of Things). София: Асеновци, 2021. ISBN 978-619-7586-25-1. [SIMEONOVA, Tsvetelina. *Razvitie na perspektivnite tehnologii v „Internet na svarzanite neshta“* IoT (Internet of Things). Sofia: Asenevtsi, 2021. ISBN 978-619-7586-25-1.]

Информация за автора:

доц. д-р инж. Красен Киров Ангелов, Технически университет – Габрово, Катедра „Комуникационна техника и технологии“, ул. Х. Димитър № 4, Габрово, Тел.: 066 827 202, e-mail: kkangelov@tugab.bg

Contacts:

Assoc. Prof. Krasen Kirov Angelov, PhD, Technical University – Gabrovo, Department of Communications Equipment and Technologies, 4 H. Dimitar Str. Gabrovo. Tel.: 066 827 202, e-mail: kkangelov@tugab.bg

Дата на постъпване на ръкописа (Date of receipt of the manuscript): 12.09.2024

Дата на приемане за публикуване (Date of adoption for publication): 30.09.2024