

Standardy komunikacyjne stosowane w systemach Smart Lighting

Streszczenie. Z uwagi na obserwowaną dynamikę rozwoju projektów wdrażanych w systemach Smart City i Smart Lighting kluczowym stają się standardy komunikacyjne stosowane na potrzeby Internetu Rzeczy. W artykule dokonano porównania i krytycznej oceny standardów komunikacyjnych stosowanych w systemach klasy Smart Lighting. Poddano ocenie standardy komunikacji istniejące obecnie oraz będące w opracowaniu. Nacisk został położony na rozwiązania bezprzewodowe, ponieważ one wydają się być bardziej perspektywiczne, ale z uwagi na podniesienie niezawodności funkcjonowania systemu zarządzania oświetleniem oraz niezawodności infrastruktury komunikacyjnej proponuje się stosowanie hybrydowych (bezprzewodowe i przewodowe) rozwiązań komunikacyjnych.

Abstract. Due to the observed dynamics of the development of projects implemented for the needs of Smart City and Smart Lighting, communication standards used for the needs of the Internet of Things are becoming key. The article compares and critically evaluates communication standards used in Smart Lighting systems. The existing and under development communication standards were assessed. The emphasis was placed on wireless solutions, as they seem to be more prospective, but due to the increase in the operational reliability of the lighting management system and the reliability of the communication infrastructure, it is proposed to use hybrid (wireless and wired) communication solutions (**Communication standards applied in Smart Lighting systems**).

Słowa kluczowe: smart city, smart lighting, standardy komunikacji, rozwiązania komunikacji Internetu Rzeczy

Keywords: smart city, smart lighting, communication standards, communication solutions IoT

Wstęp

Powszechne wdrażanie technologii IoT (*ang.* *Internet of Things*) w segmencie Smart City, otworzyło nowe perspektywy przed aplikacjami inteligentnego oświetlenia miejskiego (Smart Lighting). Architektura współcześnie wdrażanych systemów Smart Lighting pokrywa się z architekturą IoT, a rolę klasycznych koncentratorów w systemach Smart Lighting spełniają bramy IoT [9,10,12,17]. Uwzględniając to, że systemy Smart Lighting należą do tych aplikacji Smart City, które są wdrażane zwykle w pierwszej kolejności i obejmują swym zasięgiem znaczny obszar miasta, zbudowaną infrastrukturę komunikacyjną można użyć do wdrożenia innych aplikacji Smart City bez ponoszenia kosztów na część komunikacyjną. Takie podejście pozwala w sposób efektywny wykorzystać infrastrukturę komunikacyjną, ale jednocześnie wymaga, aby na etapie jej powstawania, tzn. w trakcie projektowania i wdrażania inteligentnego oświetlenia miejskiego, zastosować takie rozwiązania, które będą spełniały wymagania innych przewidzianych do wdrożenia aplikacji [4,6,13,25].

W systemach klasy Smart Lighting, w oprawach oświetleniowych instaluje się inteligentne sterowniki wyposażone w układy sterujące i pomiarowe. Takie oprawy określa się jako węzły lub węzły końcowe w systemie Smart Lighting. Posiadają one, w określonym zakresie, zasoby zdolne do gromadzenia i przetwarzania zgromadzonych danych. Integralną i ważną częścią sterownika oprawy jest szeregowy interfejs komunikacyjny pozwalający na dwukierunkową komunikację. Interfejs ten sprawia, że sterownik oprawy staje się jednym z elementów infrastruktury komunikacyjnej, dzięki której można nim zdalnie zarządzać, udostępniać informacje pomiarowo – sterujące oraz statusowe. Z uwagi na charakter obiektu (duża liczba węzłów, duże rozproszenie) oraz panujące obecnie tendencje rozwojowe w obszarze interfejsów komunikacyjnych, wynikające głównie z wymagań stymulowanych przez wprowadzanie technologii IoT, dominują w nich rozwiązania bezprzewodowe. Z uwagi na przyszłe zastosowania i rolę jaką może odegrać aplikacja Smart Lighting jako element szkieletu komunikacyjnego Smart City, należy założyć, że węzły końcowe mogą być

wyposażone w więcej niż jeden interfejs komunikacyjny. Parametry komunikacyjne tych interfejsów będą wynikały z zastosowanych standardów komunikacyjnych. Określenie standardy komunikacyjne należy rozumieć jako zestaw właściwości związanych z architekturą sieciową, której funkcjonalności współcześnie zdefiniowane są przez warstwowy model referencyjny ISO/OSI lub są do niego odnoszone [11,18].

Smart Lighting jako platforma komunikacyjna dla Smart City

Jednym z czynników mających wpływ na dynamikę wprowadzania innowacji miejskich związanych ze Smart City jest sposób rozwiązania Smart Lighting z uwagi na to, że sieci teleinformatyczne budowane na potrzeby zarządzania oświetleniem mogą stanowić platformę dla szeregu innych zastosowań w Smart City. O tym, aby infrastruktura komunikacyjna budowana na potrzeby Smart Lighting mogła być użyta jako platforma komunikacyjna na potrzeby innych aplikacji, należy zdecydować na etapie formułowania założeń projektowych. Zastąpienie tradycyjnego systemu oświetlenia ulicznego oświetleniem z oprawami LED może zmniejszyć rachunki za energię miejską do 50%, natomiast integracja tych świateł z sieciami i inteligentnymi sterowaniami może zapewnić dalsze 30% oszczędności. Co więcej, może stanowić platformę dla obecnych i przyszłych aplikacji w inteligentnych miastach (bezpieczeństwo publiczne, zarządzanie ruchem, zdrowie, komfort i inne) [3,7,10,15,19].

W przypadku, gdy infrastruktura Smart Lighting ma stanowić platformę dla aplikacji Smart City, to niezbędne jest dokonanie analizy wymagań jakie stawiają te aplikacje po to, ażeby na etapie projektowania infrastruktury Smart Lighting wymagania te zostały uwzględnione. Przykładowe możliwe do implementacji aplikacje dla Smart City i oszacowanie ich wymagań na technologie komunikacyjne przedstawiono w tabeli 1.

W dalszej części artykułu, dla kilku przykładowych aplikacji przedstawiono wymagania stawiane przez te aplikacje, natomiast końcowe wyniki analiz wielokryterialnych przedstawiono w postaci maczyzy przydatności. Mapa ta wskazuje, które z dostępnych

obecnie lub planowanych do wdrożenia technologii komunikacyjnych spełniają wymogi danej aplikacji Smart Lighting i Smart City.

Tabela 1. Zestawienie technologii komunikacyjnych i aplikacji dla Smart Lighting i Smart City

Sieciowe technologie komunikacyjne Smart City			
	Wąskopasmowe	Średniopasmowe	Szerokopasmowe
Aplikacje	Podstawowe sterowanie oświetleniem	Podstawowe sterowanie oświetleniem	Sterowanie sygnalizacją świetlną
	Monitoring środowiska	Zaawansowane sterowanie oświetleniem	Publiczny HotSpot
	Odczyt liczników	Monitoring środowiska	HD CCTV
		Inteligentne parkingi	Pojazdy autonomiczne
		Zarządzanie odpadami	
	E-mobilność		
	Cyfrowe tablice informacyjne		
	Niskie koszty wdrożenia	Średnie koszty wdrożenia	Wysokie koszty wdrożenia

Technologie szerokopasmowe

W obszarze technologii szerokopasmowych skupiono się na nowo opracowanej technologii bezprzewodowej IEEE 802.11ah [24], która jest interesująca z uwagi na segmenty zastosowań IoT w obszarze Smart Lighting i Smart City. IEEE 802.11ah może być stosowana zarówno w obszarze dostępowym do obsługi węzłów oraz jako połączenie szkieletowe z poziomu koncentratora lub bramy IoT do chmury. Inne technologie szerokopasmowe, takie jak WiMax (IEEE 802.16m) czy IEEE 802.20 nie wydają się być przydatne do zastosowania w rozpatrywanym w artykule obszarze aplikacyjnym [5,25].

W świecie technologii komunikacyjnych sieci bezprzewodowych klasy WLAN, od kilkunastu lat dominują standardy opracowane przez podgrupę IEEE 802.11. Rozwój w obszarze technologii elektronicznych i ewolucja tych standardów komunikacyjnych doprowadziły do opracowania i wdrożenia zakończonego sukcesem kilku z nich począwszy od standardu IEEE 802.11 w 1997 r. poprzez IEEE 802.11a/b/g/n do standardu IEEE 802.11ac opracowanego w 2014 r. osiągającego szybkość transmisji powyżej 1 Gb/s. IEEE 802.11ac pracujący w paśmie 5 GHz osiągnął przyrost przepływności w porównaniu do pierwszego standardu o trzy rzędy wyższą. Coraz większe przepływności osiągane w kolejnych standardach stanowiły wyznacznik rozwoju standardów transmisji bezprzewodowej klasy WLAN. Pojawienie się kolejnej fazy rozwoju Internetu w postaci Internetu Rzeczy, w którym transmisje bezprzewodowe stały się dominującym sposobem komunikacji pomiędzy urządzeniami z niskim poborem mocy i niskimi przepływnościami, spowodowało zainteresowanie podgrupy standardyzacyjnej IEEE 802.11 opracowaniem nowego standardu IEEE 802.11ah dedykowanego dla tych rozwiązań [5,25].

Pełną wersję standardu IEEE 802.11ah ratyfikowano w 2017 r. Standard od samego początku był tworzony jako nowoczesne rozwiązanie pozwalające na transmisję danych od i do urządzeń IoT w zależności od ich potrzeb. IEEE 802.11ah pracuje z szerokością kanału komunikacyjnego od 1 MHz do 16 MHz w pasmach ISM Sub-1GHz, co przy użyciu warstwy fizycznej i schematów modulacji z IEEE 802.11ac pozwala uzyskiwać

przeptywności od 100 kb/s do niemal 80 Mb/s na odległość do 1 km. Kanały komunikacyjne o szerokości od 4 MHz do 16 MHz są opcjonalne natomiast kanały o szerokości 1 i 2 MHz są obligatoryjne. W standardzie przewidziano 26 kanałów komunikacyjnych obsługiwanych przez punkty dostępowe z funkcją przekaźnika. Liczba dostępnych kanałów zależna jest od regulacji prawnych dotyczących dostępności pasma na danym obszarze. W warstwie MAC wdrożono mechanizmy podnoszące jej efektywność i pracę w trybach energooszczędnych, skrócono nagłówki, zwiększono czas przerwy pomiędzy kolejnymi transmisjami, ograniczono liczbę ramek sterujących, wprowadzono mechanizmy szybkiego przełączania pomiędzy kanałami komunikacyjnymi w celu łagodzenia zjawiska fadingu czyli zaniku sygnału oraz wprowadzono hierarchiczną adresację węzłów. Wszystko to umożliwia punktom dostępowym efektywne zarządzanie nawet tysiącami stacji oraz efektywną realizację komunikacji w scenariuszu M2M (*ang. Machine to Machine*). Mechanizmy związane z obsługą dołączanych urządzeń zaprojektowano z myślą o maksymalizacji liczby węzłów obsługiwanych przez jeden punkt dostępowy oraz minimalizacji zapotrzebowania na energię potrzebną do transmisji danych.

Gdy potraktuje się sieć komunikacyjną systemu Smart Lighting jako szkielet komunikacyjny dla aplikacji Smart City, to dyskutowane w tym paragrafie rozwiązanie IEEE 802.11ah może być użyte jako alternatywna technologia komunikacyjna dla połączeń poprzez sieci komórkowe. Wydaje się, że naturalnym rozwiązaniem bezprzewodowej komunikacji szkieletowej może być wykorzystanie łącz komórkowych 4G/5G, ale w tym przypadku jest się zależnym od operatora sieci komórkowej, ponosimy dodatkowe koszty i większe jest opóźnienie w transmisji danych.

Funkcjonalności zapewniane w ramach specyfikacji IEEE 802.11ah wydają się szczególnie interesujące dla aplikacji pracujących w środowisku rozproszonym przestrzennie, do którego należy zaliczyć zarówno systemy Smart Lighting jak i Smart City.

W specyfikacji IEEE 802.11ah wprowadzono wiele modyfikacji w warstwie fizycznej oraz warstwie łącza danych standardu IEEE 802.11. Wprowadzono grupowanie węzłów, które związane jest z nowym, hierarchicznym sposobem adresacji. Umożliwia to wprowadzenie podziału węzłów zarządzanych przez AP na grupy urządzeń i przydział uprawnień dostępu do kanału w określonym przedziale czasu węzłom należącym do danej grupy. Rozbudowano funkcję oszczędnego gospodarowania energią. W tym celu zdefiniowano docelowy czas wybudzenia TWT (*ang. Target Wake Time*), który umożliwia określenie czasu wybudzenia węzła i/lub ustalenie dla poszczególnych węzłów czasów ich dostępu do medium. Nową funkcjonalnością jest realizacja tzw. szybkiej wymiany ramek SFE (*ang. Speed Frame Exchange*), związanej z procedurą wymiany ramek i algorytmem przesyłania powiadomień blokowych ACK.

Analiza standardu IEEE 802.11ah wskazuje na dwa potencjalne obszary jego zastosowania. Jeden obszar to duże bezprzewodowe sieci sensorowe (max 8191 węzłów z cztero-poziomą hierarchią) rozmieszczone zarówno wewnątrz dużych budynków jak i na obszarze poza budynkami, rozwiązania komunikacyjne dla np. Smart Meteringu z przepływnościami na poziomie 150 kb/s. Drugi obszar to komunikacja szkieletowa z przepływnościami około 1 Mb/s lub wyższymi na poziomie urządzeń agregujących dane z węzłów pomiarowych, co w odniesieniu do architektury IoT oznacza urządzenia klasy IoT Hub lub IoT Gateway [12,17]. W tym przypadku komunikację szkieletową należy rozumieć jako

horyzontalną wymianę danych pomiędzy węzłami agregującymi dane tzn. IoT Hub i IoT Gateway lub jako wertykalną wymianę danych w której urządzenie agregujące dane (Hub, Gateway) komunikuje się z chmurą. Zaletą standardu IEEE 802.11ah użytego jako szkielet sieci komunikacyjnej jest duża dynamika zmian przepływności od 150 kb/s do 78 Mb/s.

Bezprzewodowe technologie energooszczędne krótkiego i średniego zasięgu

Bezprzewodowe technologie energooszczędne swój duży rozwój zawdzięczają przede wszystkim poprzez zdolność do oferowania niedrogiej łączności z urządzeniami małej mocy rozmieszczonymi w dużych odległościach geograficznych. Podejście takie jest w pełni zgodne z ideą Internetu Rzeczy, w którym dane dostarczane są z wielu urządzeń, często bardzo odległych od siebie. Mała moc i mała intensywność transmisji niewielkich porcji danych sprawia, że technologie energooszczędne uzupełniają, a czasem zastępują konwencjonalne technologie bezprzewodowe stosujące transmisję szerokopasmową lub sieci komórkowe. Badania przeprowadzone przez firmę Frost & Sullivan [7,8] wskazują, iż technologie, w których jedną z najważniejszych cech jest niskie zużycie energii są szczególnie pożądane w aplikacjach do monitorowania środowiska. Przesyłanie wyników pomiarów wykonywanych w sieciach energetycznych, ciepłowniczych, gazowych, monitorowanie ilości wolnych miejsc na parkingach miast, czy zdalne odczyty zużycia mediów poprzez urządzenia montowane w lampach ulicznych, to tylko niektóre z możliwości stosowania tej technologii na potrzeby Internetu Rzeczy.

W tabeli 2 przedstawiono przykładowe obszary zastosowań bezprzewodowych energooszczędnych technologii wraz z odpowiadającą im ilością przesyłanych danych oraz intensywnością odczytu.

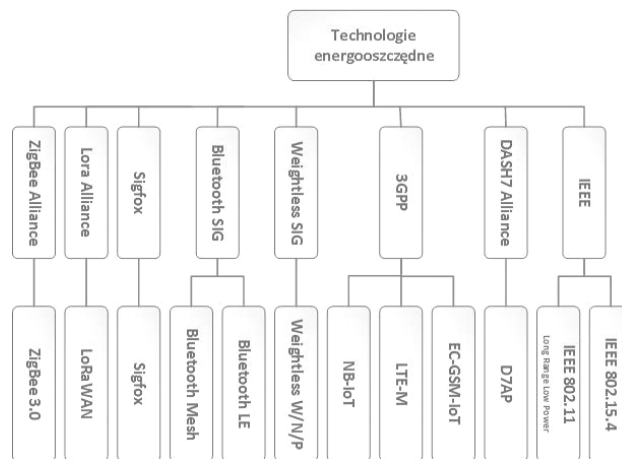
Tabela 2. Przykładowe obszary zastosowań energooszczędnych technologii bezprzewodowych krótkiego i średniego zasięgu

Obszar zastosowania	Prawdopodobne ilości danych / częstotliwość
Przetwarzanie pomiaru temperatury	10 Bajtów / minutę
Monitorowanie stanu maszyn	1000 – 50 000 Bajtów / dzień
Monitorowanie stanu życia	20 Bajtów / minutę
Przenośny skaner kodów	64 Bajty / 10 sekund
Badanie stanu środowiska	10 Bajtów / zdarzenie
Odczyt licznika gazu	70 Bajtów / 2x/dzień
Odczyt licznika wody	96 Bajtów / dzień
Odczyt licznika energii	100 Bajtów / 24x/dzień

Duże zainteresowanie tym rodzajem technologii transmisji danych jest szczególnie widoczne gdy spojrzymy na mnogość organizacją normalizacyjnym zaangażowanych w proces ratyfikacji wybranych standardów. Takie organizacje, jak: IEEE, ETSI, 3GPP wraz z konsorcjami przemysłowymi Bluetooth SIG, LoRa™ Alliance, czy ZigBee Alliance, dbają o ciągły rozwój własnych standardów (rys. 1.) [8,9,14].

W firmie Silicon Labs, używając platformy Wireless Gecko SoC Platform, przeprowadzono znaczące badania rzeczywistej sieci bezprzewodowej pracującej w topologii mesh dla trzech współcześnie najbardziej znanych standardów bezprzewodowych klasy WPAN: Bluetooth Mesh [16,23,26], Thread [21] i ZigBee [20,28]. Testowane urządzenia były rozmieszczone w budynku biurowym,

salach konferencyjnych, biurach, holu i w otwartej przestrzeni. Poza testowanymi urządzeniami w budynku były użytkowane sieci WiFi oraz ZigBee.



Rys. 1. Organizacje normalizacyjne zaangażowane w rozwój technologii energooszczędnych

Z uwagi na to, że wyniki testów dostępne są na stronie internetowej firmy Silicon Labs [22], w artykule skomentowano jedynie podstawowe rezultaty testów. Generalna uwaga odnosząca się do trzech badanych sieci pracujących w konfiguracji kratowej jest taka, że dla sieci o małych rozmiarach (w tym przypadku 24 węzły i 2 lub 3 skoki), standardy Thread, Zigbee i Bluetooth działają podobnie w małych sieciach z małymi ładunkami danych, natomiast Thread i Zigbee są lepsze niż sieci Bluetooth Mesh, gdy rośnie ilość przesyłanych danych. Wraz ze wzrostem rozmiaru sieci (w teście do 192 węzłów) zwiększa się opóźnienie dla wszystkich trzech standardów, ale największy wzrost opóźnienia uzyskano dla sieci Bluetooth Mesh. Należy nadmienić, że w sieci Bluetooth Mesh istnieje możliwość optymalizacji jej wydajności, ale wymaga to każdorazowo zarządcy sieci. Dotyczy to ręcznego ustawienia filtracji w węzłach przekaźnikowych. Sieć Bluetooth Mesh działa najlepiej, gdy transmitowane dane są krótkie (wiadomości <= 11B).

Ważnym parametrem komunikacyjnym każdej sieci jest jej przepustowość, odnosząca się do ilości przesyłanych danych użytecznych w jednostce czasu (bity/sek). Wyniki testów tego parametru pokazują, że zależy ona od liczby skoków po częstotliwościach i we wszystkich trzech przypadkach uzyskuje się zbliżone rezultaty dla sieci o liczbie skoków większej niż 6. Dla sieci o mniejszej liczbie skoków najlepsze wyniki daje sieć Thread, a nieco gorsze ZigBee. Najmniejszą przepustowość uzyskuje się dla sieci Bluetooth Mesh.

Kolejnym bardzo ważnym parametrem komunikacyjnym sieci jest opóźnienie wnoszone przez poszczególne węzły usytuowane na drodze przesyłanej wiadomości pomiędzy węzłem źródłowym a węzłem docelowym. Wszystkie protokoły zapewniają podobne opóźnienia (50 – 80 ms) dla bardzo małych rozmiarów przesyłanych danych w sieci z 4. skokami i 24. węzłami. Wraz ze wzrostem rozmiaru danych najbardziej rośnie wartość opóźnienia w sieci Bluetooth Mesh (800 ms przy 130 bajtach danych), natomiast w sieci Thread i w sieci ZigBee wartość opóźnienia rośnie znacznie wolniej i dla 130 bajtów danych wynosi odpowiednio 80 ms dla sieci Thread i 140 ms dla sieci ZigBee, co jest wynikiem znacznie lepszym niż wynik osiągnięty dla sieci Bluetooth Mesh. Z uwagi na warunki panujące w środowisku komunikacyjnym, wartości czasu opóźnienia mogą zmieniać się. W przeprowadzonych badaniach dla małych

sieci i dla pola danych 50 bajtów najlepsze wyniki osiągnięto dla protokołu Thread (opóźnienia mieściły się w przedziale 10-90 ms) i dla protokołu ZigBee (opóźnienia mieściły się w przedziale 50-130 ms). Największy rozrzut czasów opóźnienia uzyskano dla sieci Bluetooth Mesh (opóźnienia mieściły się w przedziale 20-220 ms). Wyniki badania opóźnień dla dużych sieci (w testowanej sieci były 192 węzły) pokazał, że również w przypadku dużych sieci typu mesh, najlepsze wyniki uzyskano dla protokołu Thread (opóźnienia mieściły się w przedziale 30-130 ms). W przypadku protokołu ZigBee opóźnienia mieściły się w przedziale 40-190 ms, a dla protokołu Bluetooth opóźnienia mieściły się w przedziale 20-280 ms. Wszystkie węzły w sieci Bluetooth Mesh pracowały w konfiguracji kratowej i nie były ręcznie optymalizowane. Zapewne optymalizacja (filtrowanie rozgłoszeń) pracy tych węzłów wpłynęłaby na uzyskanie lepszych wyników testu.

Wybór sieci na potrzeby IoT zależy od rodzaju aplikacji i specyfiki projektowanego systemu. Decydowanie o tym, które protokoły mesh w IoT należałoby wdrożyć, zależy od konkretnej aplikacji lub sposobu funkcjonowania przedsiębiorstwa. Rozmiar sieci, dopuszczalne opóźnienie, pożądana przepustowość i ogólna niezawodność ostatecznie określają, który protokół sieci zostanie wybrany. Z perspektywy topologii siatki protokoły w dużej mierze działają w ten sam sposób. Nawet protokół warstwy fizycznej dla Zigbee i Thread jest taki sam - każdy używa standardu IEEE 802.15.4 jako bazowego. Różnice pomiędzy protokołami zarysowują się dopiero w warstwach wyższych i związane są z tym, w jakim stopniu każdy z nich spełnia wymagania w obszarach bezpieczeństwa, przepustowości, poboru mocy, opóźnień, skalowalności i łączności IP. Sposób implementacji sieci Zigbee, Thread i Bluetooth może mieć wpływ na wydajność systemu. Wszystkie te standardy są zaprojektowane z myślą o transmisji bezprzewodowej o małej mocy w paśmie radiowym, dzięki czemu można uruchamiać urządzenia typu baterijnego, co daje możliwość komunikowania się na dużych obszarach. W tabeli 3 przedstawiono wybrane energooszczędne technologie bezprzewodowe krótkiego i średniego zasięgu umożliwiające użycie Smart Lighting jako platformy dla wybranych aplikacji Smart City.

Tabela 3. Zestawienie wybranych energooszczędnych technologii bezprzewodowych krótkiego i średniego zasięgu.

Technologia	Thread	ZigBee 3.0	Bluetooth Mesh	IEEE 802.11ah
Topologie	Siatka	Drzewo, Siatka	Siatka	Gwiazda hierarchiczna
Przepływność	250 kb/s	250 kb/s	250 kb/s	Zależne od szerokości kanału (150 kb/s – 78 Mb/s)
Częstotliwości	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	868/915 MHz
Zasięg	100 m	100 m	1 km	1 km
Poziom dojrzałości technologicznej	W użyciu komercyjnym	W fazie rozwoju	W fazie rozwoju	W fazie rozwoju
Zastrzeżone warstwy	Standard otwarty	Sieciowa + Aplikacji	Cały stos	Standard otwarty
Adresacja urządzeń	6LoWPAN	Własna, IP ready	6LoWPAN	IP/IPv6
Liczba urządzeń na jedną bramę Ruter/End Point	32/511	Definiowane przez użytkownika	Brak limitu	8192
Szyfrowanie	AES-128	AES-128	Własne, AES-128	Zabezpieczenia jak dla sieci WiFi
Opóźnienie	90 ms	Brak danych	220 ms	Zależne od przepływności (< 60 ms) [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.]

Zestawienie obejmuje dwa standardy z grupy IEEE 802.15.4, Thread i ZigBee, oraz standardy z grupy Bluetooth: SIG, Bluetooth Mesh i IEEE 802.11ah. Trzy pierwsze potrafią funkcjonować w strukturze siatki, ale możliwość użycia hierarchii w 802.11ah również pozwala na zbudowanie efektywnie funkcjonującej sieci. Zasięgi transmisji można uznać za porównywalne, gdyż zależą one od dostępnej oferty producenta układów radiowych i struktury organizacji sieci. W tym aspekcie nie można wyróżnić żadnej technologii. Podobnie jest z częstotliwościami pracy. Chociaż pasmo Sub-GHz pozornie wydaje się mniej zatłoczone, to jednak mocno wpływa na nie technologia LTE użytkująca pasmo 700 MHz. Wpływ ten może być osłabiany dzięki zaproponowaniu przez IEEE wiele różnych sposobów modulacji, które mogą być wykorzystywane zależnie od potrzeb. Wszystkie trzy standardy spełniają zalecenia odnośnie jednoznacznej identyfikacji węzłów, niezbędnej w systemach Internetu Rzeczy. Każda z technologii wspiera adresację IPv6 w postaci pełnej (IEEE 802.11ah) czy też lekkiej, opartej na zaleceniu 6LoWPAN (Thread, BL Mesh). Kolejne trzy parametry: oferowana przepływność, opóźnienie oraz poziom dojrzałości technologicznej istotnie różnią się dla opisywanych technologii. Bluetooth Mesh i Thread nie są w stanie dorównać na tym polu IEEE 802.11ah, ponieważ IEEE 802.11ah jest siecią jedno-hopową. IEEE 802.11ah może zmieniać swoją przepływność w zakresie od 150 kb/s do 78 Mb/s, która bezpośrednio na opóźnienia w procesie transmisji danych. Problemem jednak jest poziom dojrzałości technologicznej. Na tym polu zdecydowanym liderem są standardy Thread i ZigBee, natomiast Bluetooth Mesh oraz IEEE 802.11ah są jeszcze rozwiązaniami niszowymi pomimo podobnej karencji na rynku technologicznym.

Dla obiektów takich jak oświetlenie uliczne, o dużym rozproszeniu węzłów, z poziomu projektanta sieci i z komunikacyjnego punktu widzenia istotna jest topologia sieci oraz rodzaje dostępnych węzłów. Biorąc pod uwagę te cechy rozważanych w artykule standardów komunikacyjnych najkorzystniej prezentuje się standard Thread. Standard ten oferuje cztery rodzaje węzłów: routery graniczne (ang. Border Routers), routery, urządzenia końcowe REED kwalifikujące się do funkcji routera (ang. REED-Router-Eligible End Devices) oraz uśpione węzły końcowe (ang. Sleepy End Devices). Router graniczny jest specyficznym typem routera, który zapewnia łączność z siecią IEEE 802.15.4 z sieciami o innych warstwach fizycznych (np.: Wi-Fi i Ethernet). W strukturze sieci Thread może zostać użyty jeden lub więcej routerów granicznych, co jest niezwykle istotne dla zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności, w przypadku awarii jednego z routerów brzegowych. Węzły typu router zapewniają usługi routingu dla urządzeń sieciowych, usługi bezpieczeństwa i dołączania do sieci z automatycznym przydziałem adresów logicznych skompresowanego IPv6. Routery mogą obniżyć swoją funkcjonalność i stać się węzłami typu REED. Sieć Thread zarządza urządzeniami typu REED, które stają się routerami, jeśli jest to konieczne, bez użytkownika. Uśpione węzły końcowe to urządzenia typu host, które komunikują się tylko przez router nadrzędny i nie mogą przekazywać wiadomości do innych urządzeń. W sieci Thread wszystkie węzły routera utrzymują trasy routingu i zapewniają łączność ze sobą, dzięki czemu siatka jest stale utrzymywana i połączona. Rozmiar sieci Thread jest ograniczony do 32 aktywnych routerów a każdy z routerów może obsłużyć do 64 węzłów. Wszystkie urządzenia w sieci Thread obsługują komunikaty o błędach bazując na protokole ICMPv6, co jest ważne podczas prac wdrożeniowych i serwisowych.

Bezprzewodowe technologie energooszczędne dalekiego zasięgu

W sieciach dalekiego zasięgu LP-WAN (ang. Low Power Wide Area Networks) dominuje architektura gwiazdy. Technologie operują na tak dużych dystansach, że nie ma wręcz potrzeby stosowania innych konfiguracji. Taki sposób organizacji sieci sprawia, że urządzenia mogą być bardzo proste i tanie, a przy tym, w pełni funkcjonalne. Niemal każdy z opisywanych standardów umożliwia komunikację dwukierunkową, a to oznacza, że urządzenia końcowe mogą uczestniczyć nie tylko w procesach związanych z dostarczaniem informacji, ale także jako urządzenia sterujące. Mankamentem w tym przypadku może być czas zwłoki, liczony od momentu wydania polecenia, do jego faktycznego zaistnienia. Niemal każda z opisywanych technologii jest przystosowana do pracy w chmurze, w której z jednej strony gromadzone są dane, a z drugiej - może pośredniczyć w komunikacji z urządzeniem. Taki sposób organizacji ma negatywne konsekwencje w postaci wydłużonych procesów dostarczenia informacji do węzłów końcowych, gdyż informacja zanim dotrze do miejsca przeznaczenia musi przejść przez szereg warstw pośrednich począwszy od chmury, przeważnie zlokalizowanej w sieci Internet, poprzez sieć dostępową, a następnie sieć macierzystą. Jeżeli do tego uwzględnimy możliwość usypiania urządzeń końcowych i tylko okresowego ich wybudzania, to zwłoka może być liczona nierzadko nawet w dziesiątkach sekund a nawet minut. Oczywiście istnieje wiele aplikacji, Smart City a także w obszarze Smart Lighting, w których takie opóźnienia są bez problemu tolerowane, ale projektanci aplikacji powinni mieć świadomość z jakiego rzędu opóźnieniami będą mieli do czynienia.

Sieci LP-WAN poprzez swój duży zasięg transmisji oraz niskie zużycie energii w dużym stopniu spełniają wymagania systemów IoT. Analizy przeprowadzone przez firmę Frost & Sullivan [7,8] wskazują, iż technologie LP-WAN są najbardziej odpowiednie do stosowania na dużych obszarach w miejscach często niedostępnych dla celów monitorowania środowiska, pomiarów wykonywanych w sieciach energetycznych oraz gazowniczych, a także obrzeżach inteligentnych miast, gdzie nie docierają inne technologie lub ich wdrożenie jest nieuzasadnione kosztowo.

Do jednej z najpopularniejszych dziedzin, w których stosowane są sieci LP-WAN, należą inteligentne rozwiązania dla miast. Usprawnienia w organizacji parkingów, monitorowania środowiska miejskiego oraz gospodarowania odpadami, to tylko przykładowe aplikacje możliwe do realizacji przy użyciu sieci małych przepływnościach. Przyjmując jako kryterium wyboru użycie klasy rozwiązań Smart Lighting i w dłuższej perspektywie Smart Lighting, jako platformy dla aplikacji Smart City, wydaje się, że z pośród wielu technologii dostępnych na rynku, na szczególną uwagę zasługują trzy z nich: LoRaWAN, Weightless i Dash7. Syntetyczną charakterystykę podstawowych parametrów tych bezprzewodowych technologii komunikacyjnych przedstawiono w tabeli 4.

Każda ze wspomnianych technologii cechuje się krótkim, jak na sieci LP-WAN, czasem opóźnień wystarczającym na uruchamianie aplikacji Smart Lighting. Liderem w tym przypadku jest standard Dash7. Z analizy wyników testów dostępnych w pracach [1,27], Dash7 może konkurować z technologią Bluetooth Mesh, gdy weźmie się pod uwagę podobną liczbę węzłów końcowych. Tak mały poziom opóźnień w sieci Dash7 jest konsekwencją odpowiedniej przepływności oraz jego architektury. Możliwość pracy w topologii drzewa i gwiazdy to

dodatkowe atuty tego rozwiązania. Za słaby punkt należy uznać zasięg wynoszący w tym przypadku jedynie 5 km, ale tworząc strukturę 2-hopową prawdopodobnie można ją zwiększyć. Wszystkie opisywane technologie obejmują rozwiązania otwarte lub zastrzegające jedynie warstwę fizyczną (LoRa) i umożliwiają masową obsługę podłączonych urządzeń. Na uwagę w tym względzie zasługuje technologia LoRaWAN, w której informacja wysyłana z urządzenia końcowego może być odbierana przez wiele stacji bazowych. W rezultacie zwiększa się niezawodność dostarczenia informacji. Wszystkie dyskutowane technologie pracują w paśmie ISM Sub-1GHz, ale modulacja LoRa może być stosowana na dowolnej częstotliwości. Każda z opisywanych technologii zapewnia też wymagany poziom bezpieczeństwa, zarówno w aspekcie zabezpieczenia transmisji danych, jak i odporności na zakłócenia, czy ataki.

Tabela 4. Zestawienie wybranych energooszczędnych technologii bezprzewodowych dalekiego zasięgu.

Technologia	LoRaWAN	N-Wave (Weightless)	Dash7
Topologie	Gwiazda	Gwiazda	Gwiazda, Drzewo (2 hop)
Maksymalna przepływność	27 kb/s	100 kb/s	167 kb/s
Zasięg	15 km	30 km	5 km
Zastrzeżone warstwy	Fizyczna	Standard otwarty	Standard otwarty
Liczba urządzeń na jedną bramę	> 1 miliona	ok 1 miliona	Brak limitu, komunikacja bezpołączeniowa
Szyfrowanie	AES-128/256	AES-128/256	AES-ccm
Opóźnienie	1-10 s (Class C) 10-30 min (Class B)	8-12 s	1 s

Poszukując rozwiązań energooszczędnych dalekiego zasięgu należy również brać pod uwagę możliwości oferowane przez sieci komórkowe. Klasyczne rozwiązania jak sieci GSM czy LTE nie kojarzą się z energooszczędnością, często stanowią jej zaprzeczenie. Nowoczesne sieci komórkowe 5G i kolejna generacja 6G są projektowane z myślą o rozwiązaniach IoT, dzięki czemu mogą spełniać te wymagania i zapewniać zarówno wysoki poziom energooszczędności jak i duży zasięg. Do czasu wydania Release-13 przez organizację 3GPP, nieustannie dążono do zwiększania przepływności w sieciach komórkowych, tak aby zaspokoić potrzeby rynku konsumenckiego w tym aspekcie. Wraz z rozwojem rynku Internetu Rzeczy, pojawiła się luka, którą 3GPP postanowiło wypełnić [14]. Zrobiono to przez modyfikację już istniejących technologii i dopasowania ich do nowych potrzeb rynku. Dotychczasowe plany taryfowe skutecznie zniechęcały przemysł do masowego stosowania technologii komórkowych do transmisji danych z urządzeń IoT. Wraz z pojawieniem się nowych możliwości technicznych związanych z usprawnianiem już istniejących instalacji, operatorzy powinni przedstawić nowe plany taryfowe uwzględniające specyfikę rynku IoT. Z pośród opisywanych technologii każda ma swoje zalety i wady, i trudno jest tu wyróżnić jakąkolwiek z nich. Na rynku europejskim, najszybciej wdrożona została technologia NB-IoT, która jest obecnie wdrażana także w Polsce. Pozostałe technologie w różnych krajach są dopiero w fazie wdrażania. Dużym atutem technologii EC-GSM-IoT jest największe pokrycie obszarowe sieci GSM. Podstawowe parametry opisywanych technologii komórkowych przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wybranych energooszczędnych technologii sieci komórkowych

Technologia	NB-IoT (LTE CAT NB)	LTE-M (LTE CAT M)	EC-GSM-IoT
Topologie	Gwiazda	Gwiazda	Gwiazda
Maksymalna przepływność	250 kb/s	1 Mb/s	490 kb/s
Częstotliwości	LTE	LTE	GSM
Zasięg	10 km	10 km	15 km
Zastrzeżone warstwy	Cały stos	Cały stos	Cały stos
Liczba urządzeń na jedną bramę	> 50 tys (Rel 13) > 800 tys (Rel 14)	> 50 tys (Rel 13) > 800 tys (Rel 14)	> 50 tys (Rel 13) > 800 tys (Rel 14)
Szyfrowanie	128-256 bit 3GPP	128-256 bit 3GPP	128-256 bit 3GPP
Poziom dojrzałości technologii	W użyciu komercyjnym	W użyciu komercyjnym	W fazie wdrażania
Opóźnienie	0,3-10 s	0,2-10 s	0,6-10 s

Inteligentne oświetlenie uliczne i zarządzanie oświetleniem

Na najbardziej podstawowym poziomie sterowanie oświetleniem zapewnia takie działania jak zdalne włączanie/wyłączanie funkcji sterowania, ściemniania i planowania. Istnieje również szeroki zakres zaawansowanych funkcji, które mogą być realizowane przez inteligentne systemy sterowania oświetleniem. Do tych funkcjonalności zaliczamy:

- Monitorowanie i rozliczanie energii: informacje na temat zużycia energii elektrycznej są ważne w kontekście wykrywania anomalii, szacowania i obniżania kosztów zużycia energii. Z uwagi na to, że oświetlenie uliczne jest częścią mikrosieci elektroenergetycznej i systemu elektroenergetycznego, dokładne i aktualne informacje o zużyciu energii mogą zostać wykorzystane do celów strojenia algorytmów zarządzania siecią lub mikrosiecią elektroenergetyczną, która staje się ważnym elementem inteligentnych sieci elektroenergetycznych tzw. Smart Grid.

- Monitorowanie oprav oświetleniowych: jedna z podstawowych funkcji Smart Lighting, pozwalająca na zdalne monitorowanie uszkodzonych oprav. Eliminuje to czas potrzebny na nocne patrolowanie lub oczekiwanie na zgłoszenia mieszkańców w celu identyfikacji wadliwie działających świateł i zapewnia wymianę uszkodzonych oprav w krótkim czasie.

- Kontrola koloru: wspólnie instalowane diody LED można regulować tak, aby wybrać odpowiednią temperaturę barwową światła białego zapewnianą przez lampy uliczne, dostosowując oświetlenie do potrzeb użytkowników publicznych, w celu podniesienia bezpieczeństwa, dopasowania do potrzeb handlu detalicznego lub dzielnic biznesowych. Najnowsze osiągnięcia w zakresie pełnego dostrajania kolorów pozwalają na precyzyjną kontrolę oświetlenia, umożliwiając duży zakres wyboru kolorów i temperatur.

- Oświetlenie adaptacyjne: Na podstawie czujników monitorujących warunki panujące w otoczeniu mogą być włączane takie tryby pracy lamp, które dostosowują jasność oświetlenia ulicznego stosownie do potrzeb. Połączenie sterowania oświetleniem z natężeniem ruchu może zapewnić znaczne oszczędności energii. Czujniki ruchu pozwalają na sterowanie poziomami jasności oświetlenia w zależności od aktywności na ulicy. Czujniki pogodowe mogą również umożliwiać adaptację do panujących warunków atmosferycznych.

- Sytuacje kryzysowe: systemy inteligentnego oświetlenia ulicznego można wykorzystać do podniesienia efektywności działania służb ratunkowych i porządkowych.

- Inne aplikacje obejmują wykorzystanie adaptacyjnych elementów sterujących światłem w celu zapewnienia

ostrzeżeń kierowcom o objazdach, o szkolnych strefach bezpieczeństwa itp.

Poza możliwościami zaawansowanego sterowania oświetleniem, infrastrukturę sieci komunikacyjnych zbudowanych na potrzeby zarządzania oświetleniem ulicznym można wykorzystać do wdrożenia aplikacji dla inteligentnych miast bazujących na technologii Internetu Rzeczy. Do aplikacji możliwych do zastosowania w inteligentnych miastach, a które można realizować wykorzystując platformę komunikacyjną inteligentnego oświetlenia ulicznego miast można zaliczyć: monitorowanie jakości środowiska / powietrza, monitorowanie ruchu, inteligentny parking, wykrywanie hałasu i lokalizacja, sterowanie sygnalizacją świetlną, inteligentne zarządzanie odpadami, smart metering, tablice informacyjne, cyfrowe oznakowanie, nadzór wideo w wysokiej rozdzielczości (HD).

Zintegrowanie działań związanych z instalacją Smart Lighting i planowanych w przyszłości aplikacji Smart City wykorzystujących platformę komunikacyjną utworzoną na potrzeby Smart Lighting może zmniejszyć koszty ogólne, zwiększyć wydajność i funkcjonalność zaawansowanego sterowania oświetleniem ulicznym, uproszczyć i przyspieszyć wdrażanie przyszłych aplikacji Smart City [2,25].

Wybór właściwego sposobu postępowania podczas wdrażania inteligentnej platformy na potrzeby oświetlenia ulicznego może w stosunkowo szybki i prosty sposób pomóc władzom miast w rozwiązywaniu problemów takich jak przestępczość oraz zachowania antyspołeczne, bezpieczeństwo pieszych i kierowców oraz rewitalizacja obszarów miejskich. Osiągnięcie efektu synergii działań w tym obszarze wymaga, aby miasta posiadały lub pracowały nad długoterminowymi celami i priorytetami zanim zdecydują się na wybór sposobu rozwiązania Smart Lighting. Zarządzający miastami, powinni również zdawać sobie sprawę z tego, że właściwym może być rozwiązanie heterogeniczne tzn. takie, w którym wykorzystuje się więcej technologii komunikacyjnych dedykowanych dla różnych zastosowań; na przykład technologie średnio-pasmowe dla większości aplikacji i dedykowane włókno światłowodowe lub Pt2Mpt (ang. Point-to-Multipoint) dla kamer bezpieczeństwa lub potrzeb zarządzania transportem.

W środowisku, które zależy od wszechobecnego dostępu do zasilania i łączności, uliczna sieć oświetleniowa jest bardzo cennym atutem. Oprócz poprawy efektywności energetycznej, zaawansowanych funkcji sterowania oświetleniem, świadcząc nowe usługi miejskie w ramach Smart City na platformie komunikacyjnej Smart Lighting, takie rozwiązanie może stać się źródłem nowych dochodów zarówno dla operatora systemu oświetleniowego, jak i dla miasta.

Nie ma prostej odpowiedzi na pytanie, która technologia komunikacyjna lub, która architektura systemu jest najlepsza dla Smart Lighting jako platformy dla Smart City. Wybór wdrażanego rozwiązania zależy będzie od aktualnych wymagań i planowanych inwestycji, priorytetów średnioterminowych oraz długoterminowych, które wpływają na kształtowanie priorytetów potrzeb każdego konkretnego miasta. Wymagania te muszą być oceniane łącznie z potencjalnymi rozwiązaniami w zakresie stosowanych technologii komunikacyjnych do budowy infrastruktury sieciowej. Ocena tego, czy proponowane rozwiązania sieci komunikacyjnych oferują wymaganą przepustowość, elastyczność i funkcjonalność, aby spełnić stawiane przez aplikacje wymagania zawarta została w niniejszym artykule. Oceny te bazują na przedstawionych charakterystykach technicznych poszczególnych technologii, ale mają charakter względny odniesiony do wiodących technologii. Rezultatem tych względnych ocen jest matryca przydatności technologii (Tab. 6).

Tabela 6. Matryca przydatności technologii dla wybranych aplikacji Smart City

		APLIKACJE														
		Inteligentne oświetlenie		Inteligentne miasto												
		Podstawowe sterowanie oświetleniem	Zaawansowane sterowanie oświetleniem	Monitorowanie środowiska	Monitorowanie ruchu	Inteligentny parking	Zarządzanie odpadami	Sygnalizacja świetlna	Informacje publiczne	Cyfrowe oznakowanie	Detekcja hałasu	HD CCTV	e-mobilność	Autonomiczne pojazdy	Smart metering	
Technologia		Przydatność według zastosowania														Przydatność ogólna
LoRaWAN		xxxxxx								xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	LoRaWAN
DASH7								xxxxxx								DASH7
NB-IoT												xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	NB-IoT
LTE-M												xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	LTE-M
IEEE 802.11ah												xxxxxx		xxxxxx		IEEE 802.11ah
Bluetooth Mesh												xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx		Bluetooth Mesh
Thread												xxxxxx	xxxxxx			Thread
ZigBee												xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx		ZigBee
4G - LTE																4G - LTE
5G - profil eMBB															xxxxxx	5G - profil eMBB
Ethernet/PT2MPt	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx			xxxxxx	xxxxxx			xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx		xxxxxx	xxxxxx	Ethernet xxxxxx

bardzo przydatna
 przydatna
 mało przydatna
 nie przydatna

Podsumowanie

Rozwój technologii IoT i jej wdrażanie, stanowi zarówno dla rozwiązań Smart Lighting, jak i Smart City dobrą okazję do poprawy wydajności i jakości usług miejskich przy jednoczesnym obniżeniu kosztów funkcjonowania miasta i zużycia energii. Pomimo prostoty architektury IoT, jej strona techniczna jest dość złożona, zwłaszcza na etapie jej wdrażania, i najczęściej wymaga w scenariuszu aplikacyjnym ewolucyjnego podejścia, na co zwrócono uwagę w części opisowej technologii IoT. Kluczowym i krytycznym komponentem architektury IoT jest IoT Gateway, który ze względu na realizowane funkcje, a zwłaszcza na przewidywane wdrożenie analityki obrotowej z elementami sztucznej inteligencji (głównie uczenia maszynowego) i zapewnieniu interoperacyjności semantycznej będzie miał duży wpływ na jakość pracy całego systemu Smart Lighting i Smart City. Ponadto, nie jest łatwo porównać alternatywne rozwiązania do potrzeb konkretnego miasta. Wyzwaniem dla miast jest realna ocena krótko-, średnio- i długoterminowych wymagań powiązana z kosztami i korzyściami możliwymi do osiągnięcia przy wdrażaniu różnych opcji technologicznych.

Systemowe podejście do analizy technologii komunikacyjnych i aplikacji dla Smart Lighting i Smart City pozwala na tworzenie rozwiązań najlepiej dostosowanych do potrzeb inteligentnych miast przyszłości, w taki sposób, by jak najpełniej uwzględniać rozwój tych miast, ich cele średnio- i długookresowe oraz wykorzystywać sieć stworzoną przez infrastrukturę oświetleniową.

Problematyka Smart Lightingu oraz Smart City została podjęta przez spółkę technologiczną Grupy Kapitałowej LUG – BIOT Sp. z o.o., która w latach 2017 – 2020 realizowała projekt naukowo – badawczy pn. „Inteligentne układy sensoryczne do zarządzania oświetleniem w rozwiązaniach od smart lighting do smart city. Badania i prototypowanie.”(Nr Umowy RPLB.01.01.00-08-0009/17-01).

Głównym celem projektu było utworzenie systemów i rozwiązań z zakresu Internetu Rzeczy, tj. platformy do zarządzania oświetleniem ulicznym z możliwością włączania różnych układów sensorów. Efektem projektu było daleko idące rozwiązanie, zmierzające do użytkowania wielorakich, zintegrowanych systemów, obniżenie kosztów inwestycji w oświetlenie i inne systemy monitorujące, kosztów eksploatacji poprzez tzw. konserwację predykcyjną (ang. predictive maintenance), a także ograniczenie emisji CO₂. Projekt realizowano w ramach Osi Priorytetowej

1. Gospodarka i innowacje, Działania 1.1 Badania i innowacje Regionalnego Programu Operacyjnego – Lubuskie 2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. W efekcie realizacji projektu badawczego – rozwojowego uzyskano zakładane rezultaty: opracowano i przygotowano do wdrożenia 6 innowacji produktowych oraz 3 europejskie zgłoszenia patentowe, głównie związane z rozwiązaniami w zakresie smart lightingu.

Autorzy: dr inż. Emil Michta, dr inż. Dariusz Eljasz, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra, E.Michta@imei.uz.zgora.pl, D.Eljasz@imei.uz.zgora.pl mgr inż. Wojciech Lewandowski, BIOT Sp. z o.o., Nowy Kisielin – Nowa 7, 66-002 Zielona Góra, Wojciech.Lewandowski@lug.com.pl

LITERATURA

- [1] Ayoub W., Samhat A., Nouvel F., Mroue M., Prévotet J.. Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility. 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT), Jun 2018, St. Malo, France.
- [2] Dey N., et al.: Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence. Wyd. Springer, 2018.
- [3] Elberg R., Woods E.: Smart Street Lighting as a Smart City Platform Applications and Connectivity. Navigant Research, 2017.
- [4] Eremia M., Toma L., Sanduleac M.: The Smart City Concept in the 21st Century. Proc. Engineering, Vol. 181, 2017, pp. 12-19.
- [5] Figueiredo e Silva P., Kaseva V., Simona-Lohan E., "Wireless Positioning in IoT: A Look at Current and Future Trends", in Sensors, 18(8):2470, 2018.
- [6] Finnerty B., Tratz-Ryan B.: Hype Cycle for Smart City Technologies and Solutions. Gartner Research, August 2018.
- [7] Frost&Sullivan. Smart City. <https://ww2.frost.com/wp-content/uploads/2019/01/SmartCities.pdf>
- [8] Frost & Sullivan White Paper, Growing Industry Applications of LPWAN Technologies. Murata, 2017.
- [9] Gaur A., Scotney B., Parr G., McClean S.: Smart City Architecture and its Applications Based on IoT. Elsevier, Procedia Computer Science, Volume 52, 2015, pp. 1089-1094.
- [10] Happich J.: ETSI' ontology specifications to define Smart Cities, Industry 4.0 and Smart Agriculture, June 24, 2019. <https://www.eenewseurope.com/news/etsi-ontology-specifications-define-smart-cities-industry-40-and-smart-agriculture>
- [11] IETF: <http://ietfreport.isoc.org/ids-wg-6lowpan.html>;
- [12] Intel. The Intel IoT Platform. Architecture Specification
- [13] IoT Analytics, Saverio R.: Smart City IoT Projects. March, 2019. <https://iotanalytics.com/tag/smart-city/>.

- [14]ITU-R: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation. ITU-R M.2083-0 (09/2015).
- [15]Lucintel Research Raport. Growth Opportunities for Global Smart Lighting Market - <https://www.lucintel.com/smart-lighting-market-2017-2022.aspx>
- [16]Mesh Working Group: Mesh Model Bluetooth® Specification. Revision: v1.0, Revision Date: 2017-Jul-13. <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications/>
- [17]Markowski A., Michta E., Szulim R.: Internet rzeczy. Architektura i model referencyjny. Systemy Pomiarowe w Badaniach Naukowych i w Przemysle - SP 2018: XII Konferencja Naukowa, Łagów, Polska, Zielona Góra: Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2018, s. 83-86.
- [18]Montenegro G., et al.: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, Sep 2007
- [19]Sam Solutions Inc. Top Seven IoT Platforms for 2018. Feb 20 2018. <https://www.sam-solutions.com/blog/top-7-iot-platforms/>
- [20]Silicon Labs.: AN1138: Zigbee Mesh Network Performance. <https://www.silabs.com/documents/login/application-notes/an1138-zigbee-mesh-network-performance.pdf>
- [21]Silicon Labs.: AN1141: Thread Mesh Network Performance. <https://www.silabs.com/documents/login/application-notes/an1141-thread-mesh-network-performance.pdf>
- [22]Silicon Labs.: AN1142: Mesh Network Performance Comparison. <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1142-mesh-network-performance-comparison.pdf>
- [23]Silicon Labs: AN1137: Bluetooth Mesh Network Performance. <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1137-bluetooth-mesh-network-performance.pdf>
- [24]Slijivo, D. Kerkhove, L. Tian, J. Famaey, A. Munteanu, I. Moerman, J. Hoebeke, and E. De Poorter. 2018. Performance Evaluation of IEEE 802.11ah Networks With High-Throughput Bidirectional Traffic. *Sensors* 18, 2/2018.
- [25]Syed A., Sierra-Sousa D., Kumar A., Elmaghraby A.: IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges. *Smart Cities* 4/2021, pp.429-475; <https://doi.org/10.3390/smartcities4020024>.
- [26]Veiga A., Abbas C.: Proposal and Application of Bluetooth Mesh Profile for Smart Cities Services. *Smart Cities* 2019,vol. 2, pp. 1–19.
- [27]Weyn M., Ergeerts G., Berkvens R., Wojciechowski B., and Tabakov Y.: Dash7 Alliance Protocol 1.0: Low-power, mid-range sensor and actuator communication. Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015.
- [28]ZigBee Document 053474r22, May 25, 2018, ZigBee Alliance.