

## Synchroniczna, niskomocowa bezprzewodowa sieć sensorowa do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono najważniejsze cechy standardu IEEE 802.15.4-TSCH oraz opisano metodę adaptacji stosu komunikacyjnego, stworzonego przez grupę roboczą IETF 6TiSCH do wymagań środowiska przemysłowego w paśmie sub-GHz. Przedstawiono również dwa rodzaje modułów radiowych dopasowanych do różnych aplikacji, które mogą być zastosowane w monitorowaniu procesów produkcyjnych i zużycia mediów, oraz budowę toru radiowego pozwalającą na spełnienie rygorystycznych wymagań kategorii 1 wg ETSI.

**Abstract.** The article presents the key characteristics of IEEE 802.15.4-TSCH standard, and adaptation of IETF 6TiSCH network stack to the industrial requirements in sub-GHz bands. The article also presents two radio modules suited for various application requirements, that can be used in monitoring of industrial production processes and media usage, and describes their RF circuits that conforms with ETSI Category 1 device requirements. **Synchronous lowpower wireless sensor network for monitoring of industrial processes**

**Słowa kluczowe:** IIoT, 6TiSCH, komunikacja radiowa, Internet Rzeczy.

**Keywords:** IIoT, 6TiSCH, radiocommunication, Internet of Things.

### Wstęp

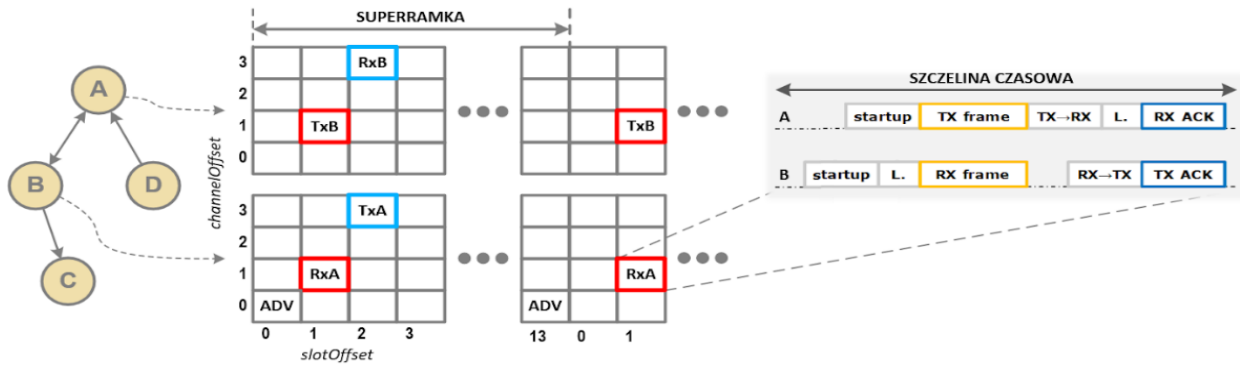
Rosnące potrzeby związane z optymalizacją procesów produkcyjnych wymagają stosowania nowych rozwiązań w obszarze zdalnego dostępu do urządzeń pomiarowych i wykonawczych. Rynek aplikacji przemysłowych jest obecnie jednym z głównych odbiorców technologii tzw. Internetu Rzeczy, a na jego potrzeby opracowywane są specjalne rozwiązania. Obejmują one m.in. nowe metody łączności bezprzewodowej, stanowiące pomost łączący elementy z grupy OT (ang. Operational Technology) [1], monitorujące i sterujące pracą fizycznych podzespołów wykorzystywanych w procesach przemysłowych z rozwiązaniami IT (ang. Informational Technology), odpowiedzialnymi za agregację, obróbkę i prezentację danych, niejednokrotnie połączonych z zaawansowanym wnioskowaniem. Obie te grupy odróżnia kontekst wykorzystania - OT stanowi narzędzia wykonawcze, natomiast IT kwalifikujemy do narzędzi zarządzających. Obecne rozwiązania IT w zakresie komunikacji bazują głównie na protokole IP (ang. Internet Protocol), który w postaci warstwy transportowej TCP/IP, stał się standardem komunikacyjnym tworzącym współczesny Internet. Niestety, jego wykorzystanie w szerokiej gamie urządzeń OT jest trudne, ze względu na bariery techniczne i ekonomiczne. Powoduje to widoczną segmentację, która znacząco utrudnia integrację usług. Poziomy OT i IT najczęściej komunikują się dziś przez różnego rodzaju bramy i punkty dostępowe, dokonujące translacji protokołów i danych aplikacyjnych. Ich skuteczna integracja może zaistnieć dzięki adaptacji przez technologie OT protokołu IP [2], przy czym w zastosowaniach przemysłowych wymagana jest dodatkowo wysoka niezawodność i jakość komunikacji (QoS - ang. Quality of Service) oraz deterministyczne działanie [3]. Wdrażane rozwiązanie musi być też skalowalne, gdyż doskonalenie procesów produkcyjnych idzie w parze z rosnącą liczbą komunikujących się ze sobą urządzeń, co nie może skutkować degradacją funkcji komunikacyjnych. Sam proces instalacji nowych systemów musi być też w dużej mierze zautomatyzowany a zestawianie połączeń bezprzewodowych oparte na zasadach samoorganizacji. Istotnym wymogiem jest również zapewnienie możliwie dużego zasięgu łączności.

W niniejszym artykule przedstawiono rozwiązanie sieci bezprzewodowej spełniającej ww. wymagania aplikacji IIoT [4]. Opiera się ono na autorskiej platformie sprzętowej, w

postaci wysokiej jakości modułów radiowych oraz adaptacji do potrzeb przemysłowych nowego stosu komunikacyjnego, opracowywanego obecnie przez organizację IETF o nazwie 6TiSCH. Stos ten integruje warstwę TSCH zgodną z IEEE 802.15.4, działającą w paśmie 863-870 MHz oraz warstwę 6LoWPAN, która natywnie wspiera protokół IPv6 w sieciach LLN (ang. Low Power and Lossy Networks). Prezentowane rozwiązanie tworzy niezawodną, niskomocową sieć kratową, przystosowaną do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych.

### Istniejące rozwiązania

Temat standaryzacji sieci LLN jest od kilku lat podejmowany zarówno przez organizacje standaryzujące, m.in. IETF oraz IEEE, jak również konsorcja korporacyjne. Poza wykorzystaniem technologii komunikacyjnych opracowanych z myślą o rynku konsumenckim, jak np. WiFi, LTE czy Bluetooth, istnieje kilka komercyjnych stosów sieciowych, lepiej dopasowanych do potrzeb przemysłowych. Wśród nich wymienić należy WirelessHART, ISA100.11a, Thread oraz ZigBee. Bazują one na standardzie IEEE 802.15.4, definiującym warstwę fizyczną (PHY, ang. Physical Layer) pracującą z przepływnością 250 kb/s w 16 kanałach w paśmie 2,4 GHz oraz warstwę dostępu do kanału (MAC, ang. Medium Access Control), umożliwiając łączność w sieciach o topologii kratowej. ISA100.11a oraz Thread posługują się natywnie protokołem IPv6, podczas gdy WirelessHART oraz ZigBee narzucają własne warstwy transportowe i interfejsy dla aplikacji. Zasadnicza różnica między nimi wpływająca na niezawodność sieci uwidacznia się już w sposobie dostępu do kanału radiowego. Thread oraz ZigBee wykorzystują dostęp oportunistyczny CSMA/CA (ang. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Jego główną wadą jest utrudnione skalowanie - w przypadku dużej gęstości aktywnie komunikujących się urządzeń, kolizje pakietów i retransmisje narastają lawinowo. WirelessHART oraz ISA100.11a wykorzystują wielodostęp w trybie TDMA (ang. Time-Division Multiple Access), silnie redukujący kolizje pakietów w sieci. Z punktu widzenia zasięgu wszystkie ww. standardy posiadają dodatkowo jedną wadę - oferują łączność tylko w paśmie 2,4 GHz, co ze względu na uzyskiwanie małych zasięgów łączności i niską zdolność do penetracji przeszkód sygnałem radiowym stanowi jedną z istotnych barier ich stosowania w środowisku przemysłowym.



Rys. 1. Schemat prezentujący alokację zasobów w sieciach TSCH.

	Klasyczny stos sieciowy	6LoWPAN	6TiSCH
warstwa aplikacji	HTTP FTP SSH itd.	CoAP MQTT	CoAP MQTT
warstwa transportowa	TCP UDP	UDP	UDP
warstwa sieciowa	IPv4 IPv6 ICMP RIP OSPF BGP	IPv6 ROLL ICMPv6 (dostosowany)	IPv6 ROLL ICMPv6 (dostosowany)
warstwa adaptacyjna		6LoWPAN	6LoWPAN
planista (Logical Link Control)			6top/6TiSCH
warstwa łącza danych	IEEE 802.3 MAC IEEE 802.11 MAC	IEEE 802.15.4 MAC	IEEE 802.15.4e MAC
warstwa fizyczna	IEEE 802.3 PHY IEEE 802.11 PHY	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 PHY

Rys. 2. Porównanie klasycznego stosu sieciowego, stosu 6LoWPAN i 6TiSCH w modelu ISO/OSI.

### Sieci TSCH i stos 6TiSCH

Rosnące wymagania dotyczące niezawodności, zwłaszcza w systemach przemysłowych, doprowadziły do opracowania nowej warstwy MAC opartej na technikach TDMA oraz FDMA (ang. Frequency-Division Multiple Access) [5]. TSCH, który jest połączeniem synchronicznego szczerelinowania czasowego oraz pseudolosowego wyboru kanału na każdą kolejną transmisję pakietów, okazał się być odporny na wąskopasmowe zakłócenia i zaniki związane z efektem wielodrogowości [6], a tym samym dobrze dopasowany do pracy w środowisku przemysłowym. Ideę rozwiązania przedstawiono na rysunku 1. W sieciach TSCH węzły działają we wspólnej domenie czasowej. Synchronizacja zachodzi podczas każdej interakcji dwóch węzłów, między którymi istnieje relacja rodzic-potomek. Wszystkie węzły sieci działają według wspólnego harmonogramu, w danej szczelinie czasowej węzeł może nadawać, odbierać lub mieć wyłączony interfejs radiowy.

Pobór energii w sieciach TSCH jest silnie związany z okresem aktywności układu radiowego oraz koordynacją transmisji w sieci kratowej. Redukcja domeny kolizyjnej i rezerwacja ilości szczelin, odpowiadająca zapotrzebowaniu wybranej aplikacji, pozwala zminimalizować zużycie energii [7]. Można wymienić wiele przykładów potwierdzających sukces sieci kratowych wykorzystujących technikę TSCH w przemyśle metalurgicznym, petrochemicznym, chemicznym, morskim oraz w aplikacjach monitorujących sterujących [8][9][10]. Postępująca integracja sieci LLN z siecią Internet jest ważnym kierunkiem rozwoju, pozwalającym budować aplikacje w oparciu o sprawdzone technologie internetowe, takie jak stos TCP/IP. Prace w tym kierunku zostały podjęte przez dwie grupy robocze IETF 6LoWPAN i 6TiSCH. Zestawienie opracowanych stosów w standardzie ISO/OSI zostało zaprezentowane na rysunku 2.

Natywne wsparcie dla TCP/IP w sieciach typu LLN jest rozwiązaniem pożądanym w IIoT, które w niedalekiej przyszłości ma szansę zdominować obecnie stosowane standardy komunikacyjne, oferując większą interoperacyjność.

Standard IEEE 802.15.4-TSCH zdefiniował warstwę PHY oraz MAC, bez rozwiązywania kwestii przydzielania zasobów łącza. Powołana w tym celu grupa robocza 6TiSCH zaproponowała tzw. konfigurację minimalną (podstawowy mechanizm asocjacji węzłów i utrzymania połączenia) oraz interfejs planisty rezerwującego zasoby łącza (6top/6P). Planista tworzy harmonogram komunikacji węzłów, przyporządkowując im odpowiednie wartości slotOffset oraz channelOffset (rysunek 1). Można wyróżnić dwie podstawowe grupy algorytmów planisty, rozproszone oraz centralne z elementem PCE (ang. Path Computation Entity). Tematyka badań planisty jest obecnie poruszana w wielu publikacjach [11]. 6TiSCH WG proponuje bazowy algorytm rozproszony nazywany MSF (ang. Minimal Scheduling Function). Każdy węzeł, zaczynając od koordynatora sieci, wysyła pakiety typu beacon z arbitralnie przyjętymi liczbami slotOffset i channelOffset determinującymi szczelinę rozgłaszającą oraz z pozostałymi parametrami MAC. Są one jednakowe dla całej sieci. Wspólna szczelina pozwala na inicjowanie komunikacji wyższym warstwom, takim jak RPL ROLL (ang. Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) i 6top/6P. Ze względu na ograniczone zasoby sprzętowe, podstawową konfiguracją trasowania jest budowanie ścieżki w koordynatorze, tzw. source routing. W sieci 6TiSCH każdy węzeł może brać udział w trasowaniu pakietów mogąc być przy tym zasilany bateryjnie co zwiększa jej możliwości aplikacyjne.

## Opracowana platforma sprzętowa

W ramach prac opracowano dwie nowe platformy sprzętowe, kompatybilne ze stosem 6TiSCH, w postaci modułów radiowych mogących znaleźć zastosowanie w różnego typu produktach. Pierwszy z nich, moduł *Low-Cost*, to kompaktowy układ przeznaczony do aplikacji wrażliwych cenowo oraz produktów z zasilaniem bateryjnym. Zawiera on tylko niezbędne elementy sugerowane przez producenta układu scalonego oraz podzespoły, które zapewniają odpowiedni poziom odporności na wyładowania ESD i zaburzenia RF. Staranny projekt pozwolił osiągnąć kategorię odbiornika 1.5 wg normy ETSI 300 220 (Tabela 1). Drugi moduł, *High-Quality*, opracowano z myślą o zapewnieniu wysokiej jakości transmisji danych w aplikacjach specjalnych, np. przy budowie krytycznej infrastruktury opartej o sieci radiowe. Spełnia on wymagania odbiornika kategorii 1, tj. może być wykorzystywany w systemach, od których zależy bezpieczeństwo ludzi i maszyn. Oba moduły bazują na układach EZR32WG330F256R69G firmy Silicon Labs, które integrują dobrej jakości układ radiowy pracujący w zakresie sub-GHz oraz mikrokontroler z rdzeniem ARM Cortex-M4. Oba moduły pomyślnie zbadano na zgodność z wymaganiami dyrektywy RED, w tym kompatybilnością ze standardem ETSI 300 220 w pełnym zakresie temperatur pracy i napięć zasilania. Zdjęcia modułów przedstawiono na rysunku 3, natomiast podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1. Moduł *High-Quality* jest ponadto wyposażony w tzw. mechanizm „antenna diversity”, służący do automatycznego wyboru anteny (jednej z dwóch) o silniejszym sygnale. Zalety tego mechanizmu w omawianym paśmie zostały przedstawione w pracy [12].



Rys. 3. Zdjęcia opracowanych modułów radiowych: *Low-Cost* (po lewej) i *High-Quality* (po prawej).

Tabela 1. Zestawienie parametrów opracowanych modułów.

Parametr	High Quality	Low Cost
Kategoria odbiornika (wg ETSI)	Category 1	Category 1.5
Graniczna czułość (15% PER)	-107 dBm	-100 dBm
Moc nadawcza	+13 dBm	+13 dBm
Pasma pracy	863 MHz – 870 MHz	863 MHz - 870 MHz
Zakres temperatur pracy	-10st.C...+55st.C	-10st.C...+55st.C
Wymiary	33 mm x 49 mm	18 mm x 20 mm
Interfejsy I/O	GPIO, U(S)ART, SPI, I2C, ADC, DAC, Timer	

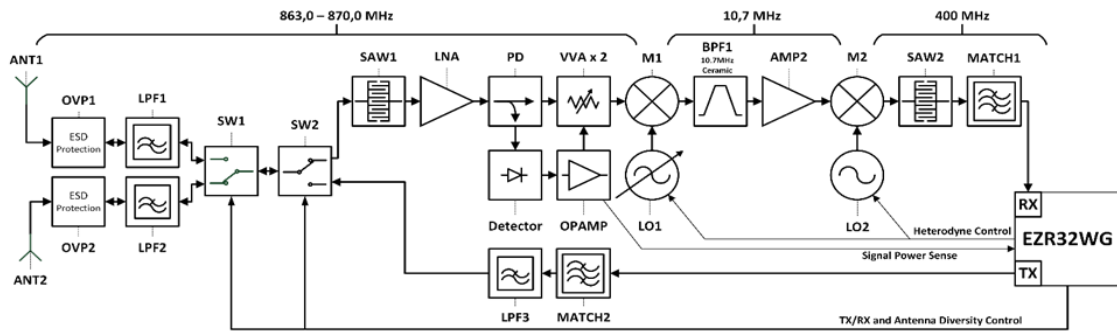
### Opis rozwiązania toru radiowego

W systemach radiowych kluczowymi parametrami determinującymi zasięg oraz jakość działania są czułość oraz odporność na sygnały niepożądane pojawiające się w sąsiednich kanałach lub poza pasmem. Istnienie silnych sygnałów niepożądanych jest szczególnie częste w

środowisku przemysłowym, w którym pracują inne systemy radiowe lub urządzenia dużej mocy, emitujące zaburzenia radioelektroniczne. Sygnały takie mogą ulec mieszanii w nieliniowych elementach toru radiowego i efektywnie powiększyć poziom szumów, tym samym pogarszając stosunek sygnału do szumu (S/N). Występujące niejednokrotnie duże poziomy zaburzeń mogą dodatkowo spowodować nasycenie się i przesterowanie podzespołów aktywnych w torze radiowym. W obu powyższych scenariuszach rezultatem może być brak łączności radiowej, dlatego w środowisku przemysłowym podstawą niezawodnych systemów bezprzewodowych są układy radiowe o odpowiednio wysokiej odporności na wyżej wymienione zaburzenia.

Projekt modułów zakładał wykorzystanie dostępnego na rynku scalonego układu nadawczo-odbiorczego i wyposażenie go układem elektroniki front-end poprawiający jego parametry użytkowe. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy toru radiowego zastosowanego w module *High-Quality*. Jest to odbiornik superheterodynowy z podwójną przemianą częstotliwości. Na schemacie blokowym można wyróżnić 3 sekcje toru radiowego. Pierwsz z nich obejmuje układy zabezpieczeń, filtracji i wzmocnienia pracujące w paśmie od 863 MHz do 870 MHz, które z kolei jest podzielone na 69 kanałów - każdy o szerokości 100 kHz. Następnie w pierwszym stopniu przemiany częstotliwości mieszacz M1 dokonuje konwersji z częstotliwości środkowej poszczególnych kanałów do częstotliwości pośredniej wynoszącej 10,7 MHz. Dalej sygnał jest filtrowany i wzmacniany, przy czym następuje tutaj również ograniczenie jego amplitudy. Drugi z mieszaczy (M2) konwertuje sygnał z częstotliwości pośredniej 10,7 MHz do częstotliwości 400 MHz, na której prowadzony jest odbiór w scalonym układzie odbiorczym. Zastosowanie takiej architektury wymaga, aby układ radiowy pracował dwuzakresowo, czyli nadawanie jest realizowane na częstotliwości docelowego kanału, natomiast odbiór zachodzi zawsze na częstotliwości 400MHz. Analogiczne rozwiązanie można zastosować w innych systemach radiowych wykorzystujących scalone układy radiowe różnych producentów poprawiając na tyle ich parametry użytkowe żeby mogły spełnić nawet wymagania odbiornika kategorii 1.

Aby zmniejszyć wpływ zjawiska wielodrogowości i selektywnych zaników sygnału zastosowano mechanizm „antenna diversity” składający się z podwójnych torów antenowych wybieranych przełącznikiem SW1. W takim zastosowaniu układ radiowy podejmuje decyzję o wyborze anteny w czasie trwania preambuły pakietu, wybierając tę z większym sygnałem użytecznym. Każde wejście antenowe zostało zabezpieczone przeciwko wyładowaniom ESD diodami TVS o bardzo małej pojemności pasożytniczej (OVP1 i OVP2). Znajdują się tam również ceramiczne filtry dolnoprzepustowe o paśmie odcięcia ok. 915 MHz (LPF1 i LPF2) tłumiące sygnały od systemów pracujących na wyższych częstotliwościach, takich jak GSM oraz Wi-Fi. Przełącznik SW2 przełącza tor antenowy w zależności od tego czy prowadzony jest nastuch czy nadawanie. Tor nadawczy składa się z układu dopasowującego impedancję wzmacniacza mocy (pracującego w klasie E) oraz podwójnego filtra dolnoprzepustowego typu  $\pi$ , zbudowanego na elementach dyskretnych, który tłumi wyższe harmoniczne. Filtr SAW1 w torze odbiorczym jest filtrem pasmowo-przepustowym o częstotliwości środkowej 866 MHz i paśmie około 14 MHz. Wymienione elementy obecne w torze radiowym od anteny do stopnia LNA wprowadzają łączne tłumienie wynoszące ok. 4 dB.



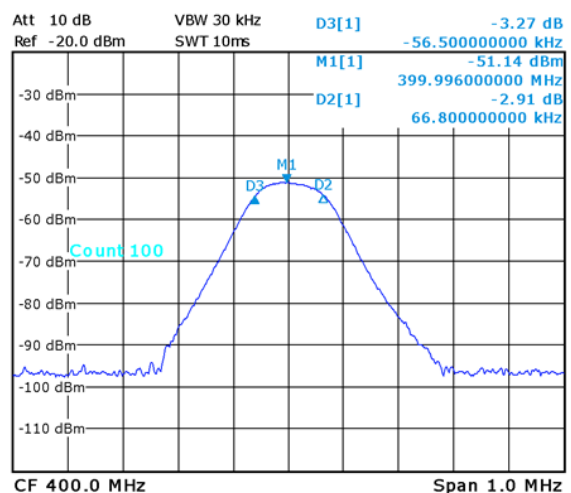
Rys. 4. Schemat blokowy toru radiowego modułu *High-Quality*.

Aby zapewnić dostateczny poziom sygnału wejściowego oraz zwiększyć dopuszczalną dynamikę sygnału wejściowego zastosowano wysokopoziomowy wzmacniacz LNA (ang. Low Noise Amplifier) wraz z obwodem AGC (ang. Automatic Gain Control). Uwzględniając straty wtrąceniowe poszczególnych podzespołów, wzmocnienie LNA wraz z AGC zawiera się w przedziale od +8 dB do -42 dB. Sprężenie zwrotne AGC zaprojektowano w taki sposób, aby sygnał wyjściowy nie przekraczał -50 dBm. Detektor mocy w obwodzie AGC działa szerokopasmowo, zatem punktem odniesienia jest jakikolwiek sygnał w paśmie pracy detektora, które zawiera się w przedziale od 863 MHz do 870 MHz. Pozwala to uniknąć przesterowania mieszacza M1 nawet przy silnych sygnałach sąsiadujących z sygnałem użytecznym. Sygnał sterujący tłumkiem jest próbkowany przez przetwornik ADC mikrokontrolera celem wprowadzenia poprawki do wskaźnika mocy sygnału RSSI (ang. Received Signal Strength Indicator) wykorzystywanego w oprogramowaniu. Dzięki odpowiedniemu doborowi charakterystyki pracy, obwód AGC nie zakłóca pracy systemu „antenna diversity”, którego działanie polega na pomiarze mocy sygnału przez układ radiowy w czasie trwania preambuły. Mieszacz M1 konwertuje odebrany sygnał radiowy do częstotliwości pośredniej wynoszącej 10,7 MHz. Heterodyna LO1 realizuje przełączanie kanałów pracując dwuzakresowo. W przedziale od kanału 0 do 25 sygnał heterodyny ma niższą częstotliwość od częstotliwości wejściowej, natomiast w przedziale kanałów od 26 do 68 jej częstotliwość jest wyższa od sygnału wejściowego. Pozwala to efektywniej odfiltrować jej sygnał przez filtr SAW1, przez co w mniejszym stopniu przenika ona do złącza antenowego. Następnie sygnał o częstotliwości pośredniej trafia na filtr ceramiczny o nominalnym paśmie 110 kHz i jest wzmacniany w pojedynczym stopniu wzmacniacza tranzystorowego. W mieszaczu M2 sygnał jest konwertowany do częstotliwości 400 MHz tak, aby był możliwy jego odbiór przez scalony układ nadawczo-odbiorczy. Filtr SAW2 ma pasmo ok. 600 kHz i przy częstotliwości środkowej wynoszącej 400 MHz skutecznie tłumi przesłuchy, mogące pojawić się w układzie. Wybór tej częstotliwości odbiorczej jest podyktowany znacznym przesunięciem częstotliwości pracy sygnału trafiającego do odbiornika od innych sygnałów w torze radiowym, w tym ich harmonicznych i subharmonicznych, co zwiększa odporność toru na interferencje radiowe.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę przejściową układu front-end modułu *High-Quality* przy mocy wejściowej równej -65dBm i zakresie częstotliwości sygnału wejściowego od 868,0 do 869,0MHz. Na rysunku wyznaczono pasmo przenoszenia (3 dB), które wynosi 122 kHz. Na częstotliwościach oddalonych o  $\pm 150$  kHz od

częstotliwości środkowej, względne tłumienie wynosi co najmniej 20dB. Moduł został poddany badaniom typu pre-compliance wg wytycznych normy ETSI 300 220. Norma ta definiuje m.in. zestaw testów kwalifikujących moduł radiowych do najwyższej kategorii 1. W stosunku do pozostałych, niższych kategorii od układów najwyższej klasy wymaga się dodatkowo:

- wysokiej selektywności sąsiednio-kanałowej (ang. adjacent channel selectivity), rozumianej jako zachowanie nominalnej czułości w obecności silnych sygnałów (co najmniej -44dBm) w kanale sąsiednim,
- odporności na nasycenie wysokim poziomem sygnału w kanale sąsiednim (ang. receiver saturation at adjacent channel), rozumianej jako zachowanie zdolności do odbioru sygnału radiowego w obecności bardzo silnych sygnałów (co najmniej -10dBm) w kanale sąsiednim,
- tłumienie odbioru niepożądanego (ang. spurious response rejection), rozumiane jako zachowanie nominalnej czułości w obecności sygnałów charakterystycznych (o mocy co najmniej -34dBm), na które ze względu na konstrukcję, odbiornik radiowy jest szczególnie wrażliwy,
- odporność na blokowanie (ang. blocking), rozumiane jako zachowanie nominalnej czułości w obecności silnych sygnałów poza-pasmowych (o mocy co najmniej -20dBm).



Rys. 5. Charakterystyka przejściowa układu front-end modułu *High-Quality* przy mocy wejściowej równej -65dBm i zakresie częstotliwości sygnału wejściowego od 868,0 do 869,0MHz.

W tabeli 2 zawarto zestaw wybranych parametrów omawianego modułu wraz z wartością graniczną wynikającą z ww. normy, decydujących w szczególności o spełnieniu wymagań kategorii 1.

Tabela 2. Zestawienie wybranych parametrów radiowych modułu *High-Quality* decydujących o kategorii 1 wg ETSI.

Parametr	Wartość	Limit
Adjacent channel selectivity	-37 dBm	-44 dBm
Receiver saturation at adjacent channel	-4 dBm	-10 dBm
Spurious response rejection	-15 dBm	-34 dBm
Blocking +/- 2MHz	-17 dBm	-20 dBm
Blocking +/- 10MHz	-3 dBm	-20 dBm
Blocking +/- 43MHz	-3 dBm	-20 dBm

### Adaptacja stosu 6TiSCH do wymagań IIoT

Uruchomienie stosu 6TiSCH na ww. platformach sprzętowych wymagało znacznych prac adaptacyjnych. Aby spełnić wysokie wymagania dot. zasięgu łączności, a także odporności na zakłócenia ze strony innych systemów zdecydowano się na wykorzystanie warstwy fizycznej standardu IEEE 802.15.4 w trybie SUN PHY Operation Mode #1, pracującej z przepływnością 50 kb/s. Wykorzystuje ona 69 kanałów o szerokości 100 kHz w paśmie 863 MHz – 870 MHz. Z zastosowaniem nowej warstwy fizycznej wiązało się wyznaczenie i przetestowanie nowych parametrów czasowych warstwy łącza (transmisja w szczelinie czasowej, synchronizacja i usypianie). Długość pojedynczej szczeliny czasowej wynosi 35 ms, przy zastosowaniu ramek o długości 127 B.

Prezentowane rozwiązanie oparto na projekcie OpenWSN, który jest projektem o otwartym kodzie źródłowym, implementującym tryb TSCH oraz protokoły 6LoWPAN, 6top/6P i UDP. Oprogramowanie to zostało przeniesione na opisaną wyżej platformę sprzętową i zamknięte w postaci użytecznej biblioteki. Finalny stos komunikacyjny posiada interfejs aplikacyjny zgodny z Berkeley Socket Abstraction, a każdy węzeł identyfikowany jest przez unikalny adres IPv6. Aplikacje komunikują się przez gniazda (ang. *sockets*) korzystając z warstwy transportowej UDP. Kompatybilność warstwy transportowej sprawia, że aplikacja po stronie węzła sieci 6TiSCH nie różni się od tych implementowanych na węzłach korzystających z klasycznego stosu sieciowego.

W ramach prac opracowano także model poboru energii pozwalającego wyznaczyć podstawowe parametry energetyczne i czasowe węzłów sieci. Wykonano badania mające na celu sparametryzowanie modelu i wykazanie że istnieje możliwość pracy węzła z zasilaniem baterijnym. Przy bardzo dużej aktywności węzła, tj. zakładając że moduł komunikuje się ze swoim rodzicem, do którego trasuje ramki od 3 potomków, w sieci obecny jest ruch utrzymaniowy, a pakiety z danymi są generowane co około 10 sekund przez każdy węzeł, czas pracy modułu Low-Cost wynosi 65 dni na każde 1000 mAh ładunku (zasilanie 3,3 V). Przyjmując, że liczba szczelin czasowych w superramce wynosi 53 (dając okres sieci wynoszący 1,855 s) oraz ograniczając liczbę kanałów dla szczeliny rozgłaszającej do 3, czas dołączenia węzła wynosi średnio 92 sekund. Parametry te mogą ulec poprawie na etapie dalszych prac nad algorytmem planisty.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono rezultat budowy niskomocowej platformy komunikacyjnej do monitorowania przemysłowych procesów produkcyjnych w oparciu o aktualnie opracowywany standard 6TiSCH, zaadaptowany do pracy w środowisku przemysłowym. Zaprojektowano, wykonano i przetestowano dwa wysokiej klasy moduły radiowe, działające w atrakcyjnym, ze względu na walory

propagacyjne paśmie 863-870 MHz. Ich parametry potwierdzono testami typu pre-compliance na zgodność z normami ETSI. Zaprezentowano także główne cechy systemu radiowego pracującego z wielodostępem w trybie TSCH. Finalne rozwiązanie ma duże szanse znaleźć zastosowanie w produktach z segmentu automatyki przemysłowej i opomiarowania mediów.

*Praca powstała w ramach projektu „Innowacyjny system niskoenergetycznej, radiowej sieci sensorowej dedykowanej dla środowisk przemysłowych i komercyjnych, wspierający usługi monitorowania procesów produkcyjnych i optymalizacji zużycia mediów”, współfinansowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014-2020, oś priorytetowa 1. Nowoczesna gospodarka, Działanie 1.2. Badania, rozwój i innowacje w przedsiębiorstwach, nr umowy UDA RPSL.01.02.00-24-0664/16-00.*

**Autorzy:** mgr. inż. Jan Macheta\*, E-mail: [macheta@agh.edu.pl](mailto:macheta@agh.edu.pl); mgr inż. Mateusz Kubaszek, E-mail: [kubaszek@agh.edu.pl](mailto:kubaszek@agh.edu.pl); dr inż. Łukasz Krzak \*, E-mail: [krzak@agh.edu.pl](mailto:krzak@agh.edu.pl); dr inż. Cezary Worek\*, E-mail: [worek@agh.edu.pl](mailto:worek@agh.edu.pl); mgr inż. Szymon Zawora\*\*, E-mail: [szymon.zawora@zamel.pl](mailto:szymon.zawora@zamel.pl).

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, Katedra Elektroniki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

\*\* Zamel Sp. z o.o., ul. Zielona 27, 43-200 Pszczyna

### LITERATURA

- [1] Palattella M.R., Thubert P., Vilajosana X., Wattenye T., Wang Q., Engel T., 6TiSCH Wireless Industrial Networks: Determinism Meets IPv6, Smart Sensors, *Internet Of Things, Measurement and Instrumentation*, 9 (2014), s.111-141, 2014
- [2] Gaillard G., Barthel D., Theoleyre F., Valois F., Service Level Agreements for Wireless Sensor Networks: a WSN Operator's Point of View, *IEEE/IFIP NOMS – Network Operations and Management Symposium*, Poland, 2014
- [3] Dujovne D., Wattenye T., Vilajosana X., Thubert P., 6TiSCH: Deterministic IP-Enabled Industrial Internet (of Things), *IEEE Communications Magazine - Communications Standards Supplement*, 2014, s. 36-41
- [4] Palattella M. R., Accettura N., Vilajosana X., Wattenye T., Standardized Protocol Stack for the Internet of (Important) Things, *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 15, no. 3, 2013, s. 1389-1406
- [5] Pister K. S. J., Doherty L., TSMP: Time Synchronized Mesh Protocol, *Internal Symposium on Distributed Sensor Networks*, 2008
- [6] Wattenye T., Mehta A., Pister K., Reliability through frequency diversity: Why channel hopping makes sense, *Proceedings of ACM Symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks (PEWASUN)*, 2009, s. 116–123
- [7] Juc I., Alphan O., Guizzetti R., Favre M., Duda A., Energy Consumption and Performance of IEEE 802.15.4e TSCH and DSME, *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, kwiecień 2016
- [8] Endress+Hauser, First Applications of WirelessHART Networks in the Steel Industry, *Endress+Hauser, Tech. Rep.*, sierpień 2010
- [9] Endress+Hauser, Monitoring System of the Farm Storage Tank at Grupo Petroquimico Beta (GPB), Coatzacoalcos, Mexico, *Endress+Hauser, Tech. Rep.*, lipiec 2012
- [10] Minamizato K., Furuya H., Tanaka N., Yamaguchi T., Verification of Characteristics of Wireless Instruments installed in Plant Facilities, *Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD*, Japan, 2015
- [11] Hermeto R.T., Gallais A., Theoleyre F., Scheduling for IEEE802.15.4-TSCH and Slow Channel Hopping MAC in Low Power Industrial Wireless Networks: A Survey, *Computer Communications*, 2017.
- [12] Kubaszek M., Macheta J., Zapart M., Krzak Ł., Worek C., Evaluation of Antenna Diversity Scheme for 868MHz Narrowband Communication Systems, *International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, 2018