

Techniki bezprzewodowe w utrzymaniu ruchu

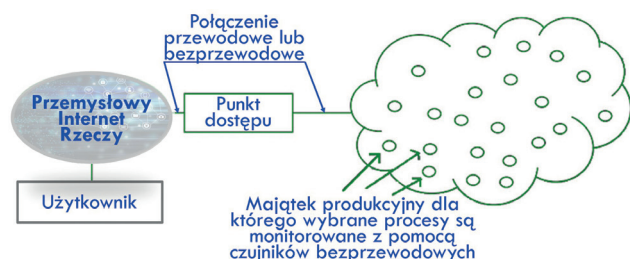
Ryszard Nowicki

1. Wprowadzenie

Technologie bezprzewodowe upowszechniają się jako standard komunikacyjny we wciąż zwiększającej się liczbie aspektów ludzkiej działalności i w szeregu przypadków wypierają aplikacje swoich dotychczasowych przewodowych poprzedników. Ten proces transformacji jest możliwy dzięki znaczącemu spadkowi kosztów ich implementacji, w połączeniu za znacznie prostszą instalacją, wzrostem szeroko rozumianego bezpieczeństwa oraz wzrostem atrakcyjności procedur użytkowania. Konsekwencją przybywających aplikacji jest zwiększanie się „gęstości” transmisji bezprzewodowej w przedsiębiorstwie, co prowadzi do potencjalnego zagrożenia wzajemnego zakłócania się urządzeń znajdujących się w obszarze współpracy.

Problematyka utrzymania ruchu (UR), w szczególności dla maszyn krytycznych, ale także tych wszystkich innych, które mają istotne znaczenie dla realizowanego procesu produkcyjnego, jest nierozdzielnie związana z potrzebą oceny stanu technicznego środków produkcji. Ich remonty realizowane są coraz rzadziej przez służby przedsiębiorstwa, w którym maszyny pracują, a coraz częściej na warunkach outsourcingu, co powoduje zmniejszenie kontroli nad niektórymi szczegółami realizacji.

Czujniki bezprzewodowe są stosowane w celu monitorowania pracy i diagnostyki stanu maszyn, urządzeń i systemów w miejscach, w których doprowadzenie przewodów jest trudne lub kosztowne. W związku z tym coraz częściej są one wykorzystywane tam, gdzie z powodów ograniczeń fizycznych lub ekonomicznych wdrożenie jakichś pomiarów uważane było wcześniej za niemożliwe. Z drugiej strony techniki bezprzewodowe umożliwiają transmisję danych z wielu lokalizacji, w których pomiary odbywają się, czy to w oparciu o czujniki przewodowe czy być może także bezprzewodowe (np. kilka pompowni wody na dużym osiedlu mieszkaniowym) do centrum zainteresowanego ich stanem technicznym. Na rys. 1 pokazano zbiór czujników bezprzewodowych pracujących na rzecz kontroli procesu produkcyjnego i/lub stanu technicznego majątku produkcyjnego podłączonych do Przemysłowego Internetu Rzeczy.



Rys. 1. Grupa czujników bezprzewodowych podłączona do Przemysłowego Internetu Rzeczy

Przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT¹ – utożsamiany jest współcześnie szerzej z PRZEMYSŁEM 4.0) to wykorzystanie inteligentnych technologii do usprawnienia procesów produkcyjnych i przemysłowych. Wykorzystuje on dane, gromadzone od dłuższego czasu dla majątku produkcyjnego (w chmurze lub na serwerach przedsiębiorstwa) wykorzystując przy tym moc inteligentnych maszyn i analitykę prowadzoną w czasie rzeczywistym. Jeśli koncentrujemy się na danych będących zbiorem pomiarów symptomatycznych dla stanu technicznego, to w ramach PRZEMYSŁU 4.0 ograniczamy się do UTRZYMANIA RUCHU 4.0.

Równolegle z terminem „czujnik bezprzewodowy” używane jest pojęcie „sieć bezprzewodowa”. Jest to grupa połączonych ze sobą urządzeń, które komunikują się ze sobą bezprzewodowo, a niekoniecznie muszą być czujnikami.

Próby aplikacji czujników bezprzewodowych wiążą się bądź to z nadmiernym optymizmem (i np. zawartymi w SIWZ’ach absurdalnymi wymaganiami), bądź też z mniej czy bardziej uzasadnioną niechęcią aplikacyjną. Znanе są bowiem przypadki, że w atrakcyjnie prezentowanych rozwiązaniach sieciowych zdarzają się nie tylko od czasu do czasu opóźnienia w przekazaniu gromadzonych danych (lub sygnałów), ale bywa także, że wysłane dane nie dochodzą do adresata.

Trzy najważniejsze powody niechęci (rozpoznane w wyniku ankietowania) do wykorzystywania czujników bezprzewodowych to:

I. obawy co do prawdziwości podawanej w dokumentacji technicznej informacji o zasięgu oraz faktycznej odporności na zakłócenia (ponad 60% respondentów);

II. obawy o efektywność pracy baterii i w konsekwencji potrzebę dodatkowej pracochłonności związanej z koniecznością kontroli ich stanu oraz z koniecznością wymieniaania (prawie 60% respondentów);

III. świadomość kosztów inwestycyjnych, bowiem ze względów oczywistych czujnik z dodatkowym podzespołem umożliwiającym transmisję radiową musi być droższy od czujnika bez tego dodatkowego podzespołu (ponad 40%); czasami ten wyższy koszt jest spowodowany także przez inne podzespoły zlokalizowane w czujniku, jak np. pamięci umożliwiające gromadzenie danych w „dłuższym” czasie, filtry, które w określony sposób wstępnie przetwarzają sygnał dynamiczny, detektor przekroczenia programowanej na etapie konfiguracji wartości granicznej pomiaru; ta ostatnia funkcjonalność jest wdrażana w systemach, które minimalizują transmisję pomiarów (tym samym przyczyniając się do wydłużenia żywotności baterii), a więc nie informują użytkownika o ich bieżących wartościach, a początek komunikacji, tzn. alarm, ma miejsce po wystąpieniu przekroczenia.

W przypadku sieci przemysłowych (niezależnie od tego, czy przewodowych, czy bezprzewodowych) wymaga się, aby były one tak zaprojektowane, żeby zapewnić w miarę możliwości działanie w czasie rzeczywistym, także w zakresie potrzeb transmisji dużej liczby danych. Z tego względu już wdrażane na początku lat 90-tych systemy diagnostyki (wtedy przede wszystkim dla maszyn krytycznych) były na tyle rozbudowane, na ile umożliwiały kompletne gromadzenie danych diagnostycznych w przypadku najbardziej krytycznej sytuacji awaryjnej.

Współcześnie projektowanie sieciowych aplikacji bezprzewodowych wciąż winno uwzględniać wymienione kryterium, tzn. wykorzystywane czujniki i techniki transmisji winny być dostosowane do krytycznych wymagań aplikacji lub ukierunkowane na rozpoznawanie określonego typu uszkodzeń.

2. Postęp w upowszechnieniu sieci

Pół wieku temu czujniki bezprzewodowe pracowały przede wszystkim na częstotliwościach nie przekraczających 1 GHz. W latach 80. doszło do uwolnienia kilku pasm częstotliwości (w tym 2,4 GHz i 5 GHz) z przeznaczeniem do ich wykorzystywania w przemyśle, nauce, życiu prywatnym, etc. Krok ten dał możliwość myślenia jak transmisja bezprzewodowa, możliwie najlepiej, może być wykorzystana w wymienionych obszarach i zaczęto realizować pierwsze wdrożenia. Już w kolejnej dekadzie sieci bezprzewodowe były wykorzystywane dość powszechnie w przemyśle. Natomiast wadą wykorzystywanych wtedy rozwiązań była wciąż mała szybkość transmisji oraz całkowity brak bezpieczeństwa transmisji.

Do naruszenia cyberbezpieczeństwa może dochodzić różnymi metodami. Jedną z furtek ku temu mogą stanowić sieci bezprzewodowe wykorzystywane w UR. W [1], [2] opisano kilka przykładów naruszeń – w tym także poprzez ingerencję w transmisję bezprzewodową. Tak więc w ciągu minionego ćwierćwiecza opracowano kilka standardów najpierw zdecydowanie zwiększających niezawodność transmisji radiowej, a następnie także jej cyber-bezpieczeństwo. W konsekwencji, w przypadku uwzględniania wymogów najnowszych standardów możliwe jest zapewnienie bezpieczeństwa transmisji bezprzewodowej w aplikacjach zarówno wspomagających UR, jak i monitorujących proces.

Standaryzowane łącze radiowe jest obecnie tanim i bezpiecznym sposobem monitorowania i sterowania urządzeń w różnych obszarach aplikacji – w tym w przemyśle. Biorąc pod uwagę liczbę dostępnych standardów bezprzewodowej transmisji danych należy zadać sobie dwa pytania: (i) jak dalece sieć bezprzewodowa może być atrakcyjna dla wspomagania pracy UR oraz (ii) jeśli tak, to który z dostępnych standardów jest najlepszy dla potencjalnie rozważanego zastosowania.

3. Zróżnicowanie strategii UR

Wiadomo, że dla maszyn różnej ważności mogą być wykorzystywane różne podejścia w ich UR. Tu ograniczymy się do wymienienia podstawowych:

- praca do awarii,
- prewencyjne UR, w którym prowadzi się remonty po pracowaniu określonego czasu lub przekroczeniu kryterialnej liczby stanów przejściowych, tzn. uruchomień i odstawień,
- UR bazujące na bieżącym stanie technicznym; w tym

przypadku jego ocena może być prowadzona pod kątem:

- zagrożenia integralności mechanicznej,
- stwierdzenia, że nastąpiło obniżenie sprawności termodynamicznej poniżej przyjętego progu granicznego,
- preskryptywne UR [3].

W [4] pokazano jakie komponenty systemu nadzoru stanu technicznego winny być wdrożone, tak aby mogły być realizowane w/w formy UR.

Takie charakterystyki agregatów jak moc ich napędów lub liczba węzłów łożyskowych pozostają na ogół w skorelowaniu z ich krytycznością: tzn. wyższa moc i większa liczba łożysk oznacza na ogół wyższą ważność dla realizowanego procesu produkcyjnego.

W przypadku wielu maszyn krytycznych dla ich zabezpieczenia niezbędne jest stosowanie systemów On-Line. Dla dobrego i wiarygodnego rozpoznania przyczyny degradacji stanu technicznego wymagane jest prowadzenie analiz fazowych. Wymóg ten pociąga za sobą konieczność stosowania systemów umożliwiających współfazową akwizycję sygnałów dla wybranych grup czujników podłączonych do systemu monitorowania – co nie jest rozwiązaniem tanim.

W przypadku agregatów o niewielkiej krytyczności na ogół nie jest konieczne identyfikowanie przyczyny odpowiedzialnej za pogorszenie stanu technicznego. W pełni satysfakcjonujące dla UR może być rozpoznanie pojawienia się anomalii w funkcjonowaniu, a w szeregu przypadków (tzn. takich, w których pogarszanie stanu technicznego następuje powoli, a więc jest procesem długotrwałym) dla uzyskanie takiego celu całkowicie wystarczające jest zastosowanie systemu skaningowego. W przypadku agregatów łożyskowych tocznie i napędzanych silnikami elektrycznymi rozpoznawanie anomalii w działaniu jest możliwe zarówno z pomocą metod sprzętowych [5] jak i czysto programowych [6]. Metody sprzętowe najczęściej opierają się na monitorowaniu sygnałów drgań mechanicznych lub drgań elektrycznych ekstrahowanych z zasilania silników. Sygnały są generowane przez czujniki, które kiedyś były łączone z systemem monitorującym (dokonującym pomiarów symptomów stanu technicznego) przewodowo, a współcześnie ma miejsce możliwość wyboru między transmisją przewodową lub bezprzewodową.

W ramce #1 opisano działanie klasycznego skaningowego systemu monitorowania stanu technicznego, w którym symptomatyczne sygnały są pozyskiwane przez system diagnostyki drogą przewodową. W wersji alternatywnej wykonywanie podobnych pomiarów jest możliwe przez zrezygnowanie z kabla systemowego i zastąpienie tradycyjnych czujników przewodowych wraz z ich TIM'ami przez czujniki bezprzewodowe.

4. Zróżnicowanie systemów pomiarów bezprzewodowych

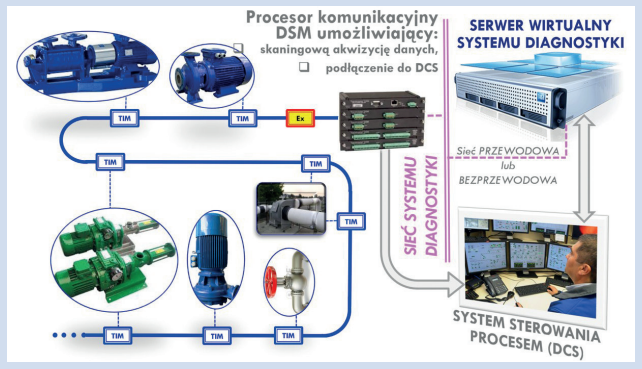
Zastosować można szereg kryteriów do scharakteryzowania zróżnicowania sieci bezprzewodowych wykorzystywanych do transmisji danych z czujników. Do najważniejszych z nich należą pasmo częstotliwości i wykorzystywany protokół transmisji danych.

W Europie do transmisji danych, w zdecydowanej większości przypadków, są wykorzystywane następujące pasma częstotliwości:

Ramka #1 - Przewodowy system monitorowania anomalii

W przypadku maszyn łożyskowych tocznie postępujący proces uszkodzenia rozwija się na ogół tygodniami, a nawet miesiącami. Współcześnie nie ma większych problemów natury technicznej związanych z takim poprawnym oprzyrządowaniem maszyn łożyskowych tocznie, aby skutecznie wychwycić pogarszanie stanu technicznego na długo przed wystąpieniem większości awarii. W tym celu od lat są wykorzystywane przewodowe systemy skanujące. Przykładem takiego systemu jest system TRENDMASTER, wykorzystywany m.in. przez kilka przedsiębiorstw w Polsce. Wymaga on zastosowania specyficznego czteroprzewodowego kabla systemowego, w którym jedna para przewodów służy indywidualnemu zasilaniu czujników, a druga jest wykorzystywana do transmisji sygnału z czujnika do procesora komunikacyjnego (Dynamic Scanning Module), który zarządza skanowaniem i próbkowaniem. System umożliwia połączenie

do pojedynczego kabla systemowego nawet kilkuset różnego typu czujników. DSM daje możliwość podłączenia do 8 kabli systemowych. Czujniki są podłączane do kabla systemowego poprzez moduły interfejsowe zwane TIM-ami (Transducer Interface Module), które oprócz zadania zasilania czujnika oraz transmisji sygnału umożliwiają także identyfikację czujnika w systemie. Pierwszą interesującą cechą tego systemu jest fakt, że czujnik wraz z jego TIM'em jest zasilany z DSM'a tylko w chwilach, w których są one wykorzystywane do akwizycji sygnału. Drugą interesującą cechą systemu jest możliwość jego aplikacji w strefach Ex, bowiem dzięki zastosowaniu jedynie dwóch barier (zlokalizowanych między DSM a strefą Ex) dla pojedynczego kabla systemowego (co na rysunku pokazano z pomocą prostokąta opisanego „Ex”) można bezpiecznie realizować pomiary z kilkudziesięciu czujników znajdujących się już w strefie niebezpiecznej.



- a. 868 MHz (865 ... 870 MHz),
- b. 2,4 GHz (2400 ... 2483 MHz)²,
- c. 5 GHz (tu mamy dwa nie zachodzące na siebie pasma: 5150 ... 5350 oraz 5470 ... 5725 MHz)³.

Pasma te są z reguły podzielone na pewną liczbę podpasm, dla których mogą obowiązywać różne ograniczenia dotyczące czy to dopuszczalnej mocy sygnału⁴ (co będzie wpływać na maksymalny zasięg hipotetycznie możliwej transmisji), czy też czasu zajętości wykorzystywanego pasma przez system (co będzie wpływać na ograniczenia dotyczące liczby danych diagnostycznych transmitowanych w ciągu doby).

Każde z wymienionych pasm posiada swoje wady i zalety, które winny być rozważone przez inwestora w kontekście

planowanej do wdrożenia aplikacji mającej wspomagać UR. Jedną z ważniejszych jest zasięg bezproblemowej transmisji danych w warunkach przemysłowych⁵.

Rozwiązania bezprzewodowe krótkiego zasięgu obejmują następujące technologie:

- **Wi-Fi⁶**: bazuje na standardach z grupy IEEE 802.11 dedykowanych komunikacji sieciowej wykorzystującej protokół TCP/IP. Standard został sformułowany w końcu miniego wieku i wciąż podlega rozwojowi. Skrót Wi-Fi jest stosowany do identyfikacji urządzeń Wireless Local Area Network (WLAN). Standard wykorzystuje różne częstotliwości, w tym między innymi pasma 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz i 60 GHz, a kolejne jego rewizje prowadzą do coraz to wyższych prędkości transmisji danych (vide tabela 1) oraz do zwiększenia zasięgu – na początku był on na poziomie dekametrów, a współcześnie dochodzi nawet do kilkudziesięciu kilometrów.
- **Bluetooth**: bazuje na międzynarodowym standardzie IEEE 802.15.1 i pracuje w dostępnym na całym świecie bez koncesji i pozwoleń paśmie 2,4 GHz. Umożliwia zasięg od 1 do 100 m w zależności od mocy⁷; od początku tego wieku rozpoczęto trwające prawie dekadę prace w kierunku wdrożenia Bluetooth'a niskoenergetycznego, co zaowocowało pierwszymi wdrożeniami od początku drugiej dekady wieku Bluetooth Low Energy (BLE). BLE to rodzaj Bluetooth, który zużywa znacznie mniej energii – około 10% w porównaniu do klasycznego Bluetooth. Dzieje się tak dlatego, że ten ostatni został stworzony jedynie z myślą o transmisji danych. W tabeli 2 scharakteryzowano wybrane parametry

Tabela 1. Zalety i wady różnych standardów

Standard	Zalety	Wady
Wi-Fi	Największa szybkość transmisji sięgająca 600 Mb/s w przypadku 802.11n. Stałe kanały 25 MHz lub szersze. Obsługa pasm 2,4 i 5 GHz. Rozbudowane funkcje zabezpieczające. Najbardziej rozbudowany stos protokołu	Krótszy zasięg przy większych szybkościach transmisji dla pasma 5 GHz. Nieadekwatne rozwiązania dla czujników zasilanych bateryjnie
Bluetooth / BLE	Bardzo mały pobór mocy. Szeroki zakres zastosowań. Bardzo dobre parametry w środowiskach o dużym zagęszczeniu nadajników i dużym poziomie zakłóceń. Łatwość użytkowania, brak konieczności planowania zakresów częstotliwości i pokrycia terenu	Szybkość transmisji do 2 Mb/s
ZigBee	Bardzo mały pobór mocy. Ustalone kanały pomiędzy kanałami Wi-Fi w paśmie 2,4 GHz. Obsługa pasm poniżej 1 GHz	Skomplikowana sieć kratowa. Maksymalna szybkość transmisji 250 kb/s

najnowszych wersji BLE, co pokazuje jaki uzyskano postęp przy przejściu z generacji #4 do generacji #5. Technologia BLE podlega ciągłemu rozwojowi. W 2021 opublikowana została wersja 5.3 tego standardu.

Standard Bluetooth nadaje się doskonale do przesyłania danych via Ethernet i Profinet lub sygnałów I/O do i od ruchomych (np. wirujących) elementów maszyn⁸.

- **ZigBee:** sieć ta rozwijana jest w oparciu o standard IEEE 802.15.4. Jest to uniwersalny standard radiowy dla urządzeń małej mocy. Standard ten zapewnia obsługę wielu protokołów, między innymi ISA100, WirelessHART i 6LoWPAN. Na różnych kontynentach ZigBee wykorzystuje różne pasma częstotliwości. Umożliwia transmisję na dystansie do 10...30 (...100) m. Prędkość transmisji nie jest wysoka i dochodzi do 250 kb/s. Jest wykorzystywany m.in. w sieciach kratowych (z angielska zwanych sieciami mesh) czujników bezprzewodowych małej mocy, pracujących w systemach monitorowania pokrywających duży obszar.
- **NFC (Near Field Communication)** jest siecią wykorzystującą komunikację bliskiego zasięgu. NFC działa w ogólnodostępnym i nielicencjonowanym paśmie częstotliwości radiowej ISM (13,56 MHz) i oferuje prędkość transmisji danych do 424 kb/s. NFC jest typowo wykorzystywane do łączności na odległości centymetrowe (różne źródła różnie określają maksymalną odległość komunikowania się; na ogół jest to wartość z przedziału 4...20 cm) oraz metrowe (w przedziale 1...50 m).

Tabela 2. Wybrane cechy różnych standardów Bluetooth

Parametr	BLE ver. 4.2	BLE ver. 4.2	miara
Zasięg w przestrzeni zamkniętej	10	40	[m]
Zasięg w przestrzeni otwartej	40	200	[m]
Prędkość transmisji	1	2	[Mb/s]
Ramka danych	~32	255	[bajty]

W tym drugim przypadku do komunikowania wykorzystywana jest technologia ultraszerokopasmowa (UWB = Ultra-wideband) w paśmie częstotliwości 3,1...10,6 GHz oferująca prędkość transmisji danych 4...675 Mb/s. Obie wymienione sieci nie doczekały się dotychczas jakichś spektakularnych aplikacji dedykowanych nadzorowi stanu technicznego, natomiast mogą go wspomagać. Wykorzystując NFC mogą być np. oznaczone i w konsekwencji identyfikowane punkty pomiarowe, w których gromadzi się dane z pomocą przyrządów przenośnych.

- **GSM:** Do transmisji bezprzewodowej mogą być również wykorzystywane sieci GSM. Sieć komórkowa może być szczególnie przydatna w środowiskach, których infrastruktura nie stwarza możliwości wykorzystania do transmisji danych z czujników do jakiegoś centralnego systemu

Ramka #2 - Z historii technik bezprzewodowych

Wi-Fi. Prekursorem tego rozwiązania jest firma ALOHAnet, która w 1971 roku połączyła Wyspy Hawajskie bezprzewodową siecią pakietową UHF. ALOHAnet i protokół ALOHA są wczesnymi prekursorami Ethernetu, które później doprowadziło do sformułowania protokołów IEEE 802.11. Pierwsza wersja tego protokołu została opublikowana w 1997 roku i zapewniała prędkość łącza do 2 Mb/s i podlegała gwałtownemu unowocześnianiu. Z tego samego roku pochodzi rewizja 5.3 Standardu IEEE 802.11.

GSM. W 1979 roku japońska firma Nippon Telegraph and Telephone po raz pierwszy zaprezentowała mieszkańcom Tokio możliwość komunikowania się z pomocą sieci w standardzie 1G. Do 1984 roku sieć pierwszej generacji obejmowała już całą Japonię, co uczyniło ją pierwszym na świecie krajem z takim poziomem wdrożenia. Na początku tego wieku (rok 2001) weszła do użytku technologia GPRS (=General Packet Radio Service) umożliwiająca pakietowe przesyłanie danych w sieciach komórkowych 2G. Umożliwiała ona transfer danych teoretycznie z prędkością do 114 kb/s, natomiast praktycznie osiągnięto 30...80 kb/s. W końcu tej dekady uzyskano

poprawienie dzięki wprowadzeniu EDGE (=Enhanced Data Rates for GSM Evolution), w ramach którego prędkość transmisji wzrosła hipotetycznie do 384 kb/s, a w EDGE Evolution dochodziła nawet do 1,3 Mb/s. Następnie obie wymienione technologie zostały w większości wyparte przez sieci 3G i 4G LTE. Sieć 3G charakteryzowała się przepływnością danych na poziomie trochę ponad 200 kb/s i także powoli przechodzi do historii - w Polsce została wyłączona w roku 2023.

ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector) definiuje „prawdziwą” sieć 4G jako taką, która umożliwia uzyskanie przepływności 1 Gb/s. W praktyce w sieci GSM 4G osiąga się przepływność 100 Mb/s dla pobierania i 25 Mb/s dla wysyłania pakietów.

Znaczący postęp w zakresie przepływności stwarza współcześnie coraz bardziej upowszechniająca się sieć GSM 5G. Wynosi dla pobierania pakietów 20 Gb/s i dla ich wysyłania 10 Gb/s. Przewiduje się, że do 2025 roku jedno na pięć połączeń mobilnych będzie działać w sieci 5G. Upowszechnienie sieci 5G ma miejsce nie tylko na poziomie komunikacji interludzkiej, bowiem także przedsiębiorstwa

zaczynają korzystać z segmentowania sieci z obsługą 5G dla zadań takich jak obliczenia brzegowe i usługi o niskim opóźnieniu (np. pomiary procesowe oraz pomiary wspomagające nadzór stanu technicznego).

Bluetooth. Idea Bluetooth narodziła się w roku 1994. Ale dopiero w roku 1999 została opublikowana pierwsza specyfikacja Bluetooth, nazwana Bluetooth 1.0. W ślad za nią, w roku 2001, pojawił się na rynku pierwszy telefon z tą funkcjonalnością. Pierwsza specyfikacja standardu niskoenergetycznego została opublikowana w roku 2006 i doczekała się implementacji w standardzie Bluetooth 4.0 w grudniu 2009 pod nazwą Bluetooth Low Energy. Na rynku funkcjonuje także marketingowa nazwa BLE: Bluetooth Smart.

ZigBee. Samoorganizujące się cyfrowe sieci radiowe w stylu ZigBee powstały w latach 90-tych. Specyfikacja IEEE 802.15.4-2003 ZigBee została ratyfikowana 14 grudnia 2004, a pół roku później, tzn. 13 czerwca 2005 roku sojusznicy ZigBee ogłosili dostępność specyfikacji 1.0, zwanej żargonowo „ZigBee 2004”.

NFC. Forum NFC powstało w 2004 r. Natomiast w 2006 r. forum opracowało pierwszy zestaw specyfikacji tagów NFC.

tradycyjnych środków łączności, takich jak przewody i Wi-Fi. Współcześnie stosowanie technologii G4 i G5 dominuje na świecie i pokrywa ponad 70% zapotrzebowania indywidualnych abonentów, a znaczenie technologii G2 i G3 systematycznie maleje. Technologie takie jak 5G i LTE zapewniają elastyczność i mobilność niezbędną przy wzroście zaawansowania w wykorzystywaniu technik charakterystycznych dla PRZEMYSŁU 4.0 także w obszarze UR 4.0. 5G (także w wydaniu prywatnym) doskonale może wspomagać gromadzenie danych dotyczących majątku produkcyjnego na rzecz UR bazującego na stanie technicznym. Rozwiązanie takie pozwala na monitorowanie w czasie rzeczywistym mierzonych parametrów stanu z dowolnego miejsca dzięki możliwości efektywnego przesyłania danych (co stało się możliwe poczynając już od modemów w standardzie G3).

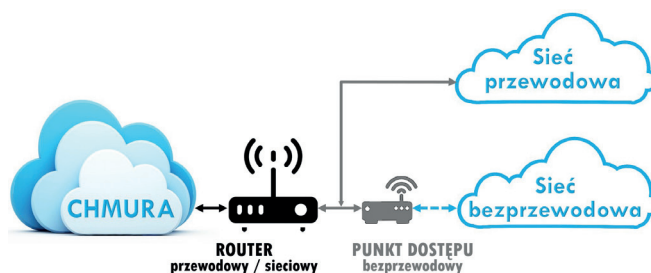
W ramce #2 opisano historię rozwoju omawianych powyżej rodzajów transmisji bezprzewodowej i zamieszczono wybrane informacje o postępie w zakresie przepływności danych.

Docelowo służby UR będą wykorzystywały dane – także te pozyskiwane z pomocą technik bezprzewodowych – zgromadzone w chmurze (lub na serwerach przedsiębiorstwa, jeśli wykorzystywanie chmury ogólnodostępnej nie jest w nim akceptowane, wtedy może być wykorzystywana jej wersja prywatna). Analiza danych będzie podstawą do formułowania decyzji co do optymalnego działania UR z punktu widzenia priorytetów oraz dostępnych zasobów. Tak więc w chmurze będzie znajdować się centralna baza danych, która winna być zasilana coraz to nowymi pomiarami symptomów stanu technicznego. Dane te mogą być pozyskiwane z pomocą lokalnie tworzonych w skali przedsiębiorstwa aplikacji sieciowych. W tym celu wykorzystywane są routery i punkty dostępowe.

Router to urządzenie, które jest używane do łączenia różnych sieci, zarówno lokalnych (LAN) jak i szeroko dostępnych (WAN) oraz zarządzania ruchem danych między tymi sieciami. Router jest odpowiedzialny za ustanowienie połączenia internetowego i dystrybucję ruchu danych pomiędzy różnymi urządzeniami w sieci. Wiele routerów realizuje także funkcjonalność zabezpieczeń, tzn. pracuje jako zaporę sieciową, chroniąc sieć przed zagrożeniami zewnętrznymi.

Punkt dostępu (AP = Access Point) to urządzenie służące do zwiększania zasięgu sieci bezprzewodowej. Umożliwia on urządzeniom łączenie się z siecią bez konieczności stosowania kabli. Do połączeń wykorzystywane są różne technologie, które zostaną omówione dalej. Punkty dostępowe mogą tworzyć sieć szkieletową i dzięki temu mogą być wykorzystywane do organizowania podsieci.

Na rys. 2 pokazano dwie aplikacje. Ta zobrazowana wyżej bazuje na połączeniach przewodowych i może być podłączona do chmury (może to być także chmura prywatna) poprzez router. Ta pokazana poniżej bazuje na połączeniach bezprzewodowych, które łączą się z punktem dostępu, a ten z kolei przewodowo lub bezprzewodowo z routerem dostępu sieciowego, który umożliwia także dostęp do bazy danych zorganizowanej w ww. chmurze.



Rys. 2. Router umożliwiający gromadzenie w chmurze danych z aplikacji przewodowych i bezprzewodowych

Oprócz ww. czynników (rodzaj sieci i rodzaj protokołu) jest wiele innych kwestii, które winny być wzięte pod uwagę przy formułowaniu wymagań dla koncepcji wdrożenia wykorzystującego pomiary bezprzewodowe. Są to m.in.:

- obszar (czasami przestrzeń), który winien być pokryty przez aplikację bezprzewodową; jego wielkość oraz odległości między czujnikami mogą wpływać na dobór rodzaju rozwiązania sieciowego;
- posiadane doświadczenie przedsiębiorstwa w zakresie wykorzystywania technik łączności bezprzewodowej; jeśli miały już miejsce wdrożenia na tę okoliczność w innych obszarach działania przedsiębiorstwa, to być może jest możliwe i celowe zachowanie dotychczas wykorzystywanego standardu przy tworzeniu sieci bezprzewodowej mającej wspomagać UR; jeśli natomiast przedsiębiorstwo nie posiada doświadczeń własnych, to dobrze jest skorzystać z niezależnego specjalistycznego wsparcia outsourcingowego;
- wymagania środowiskowe: być może winien być wykorzystywany sprzęt spełniający potrzeby aplikacji ze względu na spełnienie jakichś wymagań fizycznych, np. pole temperatur, zawilgocenie etc.;
- środowiskowe wymagania formalne: czasami winien być wykorzystywany sprzęt posiadający jakąś odpowiednio silną certyfikację, np. na okoliczność zastosowania w strefie Ex lub w strefie promieniowania radioaktywnego (czujniki bezprzewodowe bywają na świecie również stosowane w energetyce jądrowej);
- sprzętowe wymagania aplikacyjne: podobnie jak w przypadku czujników wykorzystywanych w technikach pomiarów przewodowych również czujniki bezprzewodowe charakteryzują się pewnymi ograniczeniami, które wymagają ich sprawdzenia w kontekście potrzeb aplikacyjnych; np. dla czujników drgań celowe jest sprawdzenie takich cech jak: masa i gabaryty czujnika z punktu widzenia możliwości jego podłączenia do maszyny, dopuszczalna dynamika sygnału z punktu widzenia zmienności poziomu drgań generowanych przez maszynę, częstotliwościowe pasmo pomiarowe z punktu widzenia możliwości rozpoznania pewnych ważnych dla maszyny uszkodzeń etc.;
- programowe wymagania aplikacyjne: system czujników bezprzewodowych wymaga zastosowania jakiegoś oprogramowania systemowego; może być ono dedykowane wyłącznie tej aplikacji bezprzewodowej lub alternatywnie oprogramowanie może posiadać właściwości umożliwiające także współpracę z aplikacjami On-Line'owymi dedykowanymi maszynom

krytycznym, a może także z Off-Lineowymi wymaganiami dla przenośnego zbieracza danych;

- bezpieczeństwo cybernetyczne: na rynku dostępne są systemy posiadające jakąś certyfikację na okoliczność bezpieczeństwa cybernetycznego lub takiej certyfikacji nie posiadające; tak więc dobrze jest być świadomym jakiego dokonuje się wyboru;
- świadomość zróżnicowania czujników i pomiarów dostarczanych przez pojedynczego producenta.

5. Szczególna przewaga czujników bezprzewodowych

Ocena stanu technicznego maszyn wirnikowych typowo bazuje na czujnikach, które są przytwierdzone do korpusu maszyny. W tym celu mogą być oczywiście wykorzystywane zarówno czujniki przewodowe jak i bezprzewodowe. Natomiast czujniki bezprzewodowe równie dobrze mogą być utwierdzone na elementach ruchomych, który to rodzaj aplikacji nie jest możliwy z pomocą czujników przewodowych. Znane są aplikacje bezprzewodowych czujników drgań instalowanych np. na wirnikach maszyny. Oczywiście w takim przypadku muszą być wzięte pod uwagę różne ograniczenia, jak np. masa czujnika dołączanego do wirnika.

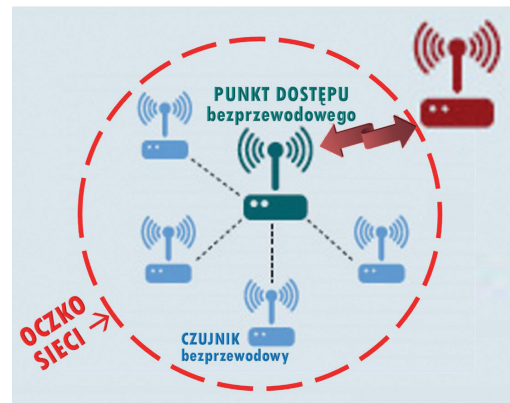
6. Zróżnicowanie funkcjonalne czujników

Czujniki bezprzewodowe wykorzystywane w UR, ze względu na transmisję radiową, możemy kategoryzować w dwóch grupach: (i) realizujące transmisję bezpośrednio do punktu dostępu (tak jak to zostało pokazane na rys. 3) oraz (ii) takie, które w transmisji do punktu dostępu wykorzystują pośrednictwo innych czujników (tak jak to zostało pokazane na rys. 4).

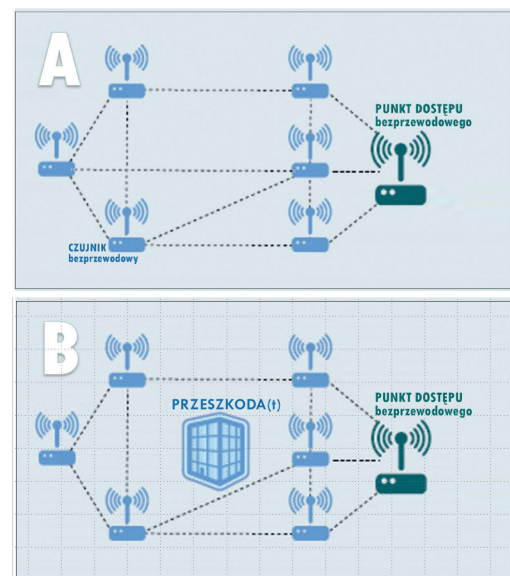
Zróżnicowanie przestrzeni, w której występuje potrzeba gromadzenia danych jest uzależnione od możliwości wzajemnego komunikowania się punktu dostępu z czujnikami bezprzewodowymi.

Jeśli jest możliwe takie usytuowanie punktu dostępu bezprzewodowego (WAP = Wireless Access Point), aby mogły z nim kontaktować się bezpośrednio wszystkie czujniki bezprzewodowe, to wykorzystywana jest topologia gwiazdowej sieci bezprzewodowej. Została ona pokazana na rys. 3, na którym czerwonym kołem zaznaczono granicę zasięgu pracy WAP. Czujniki wykorzystywane w takim rozwiązaniu realizują jedynie nadawanie sygnału. Dalsza transmisja danych (np. do chmury) może być realizowana bądź to drogą bezprzewodową bądź przewodową.

Na rys. 4 pokazano zorganizowanie sieci kratowej. Z pomocą takiej sieci uzyskuje się zwiększenie dystrybucji sieci bezprzewodowej Wi-Fi na dużych obszarach (na dużych w rozumieniu: większych od pokrytego przez możliwy do uzyskania zasięg punktu dostępu pokazanego na rys. 3). O ile w przypadku sieci typu gwiazda wystarczające jest wykorzystywanie czujników bezprzewodowych, które posiadają jedynie zdolność emisji sygnału, o tyle w sieci typu mesh czujniki muszą dodatkowo posiadać zdolność przyjmowania transmisji danych z innych czujników i przekazywania tych danych w kierunku punktu dostępu. Tak więc w sieci kratowej przekazywanie danych odbywa się z wykorzystaniem kolejnych (pośrednich) skoków. W praktyce zaleca się jednak taką topologię sieci mesh, aby liczba skoków była ograniczona – uruchamianie



Rys. 3. Wszystkie czujniki komunikują się bezpośrednio z bezprzewodowym punktem dostępowym



Rys. 4. Samoorganizacja sieci kratowej (A) bez struktury zakłócającej (B) i po jej pojawieniu się

funkcjonalności czujników bezprzewodowych na okoliczność retransmisji danych pozyskanych przez inne czujniki wymaga energii, a zatem skraca żywotność baterii wykorzystywanych w czujnikach bezprzewodowych tym bardziej, im są one zlokalizowane bliżej punktu dostępu. Sieć kratowa zapewnia kilka korzyści, takich jak:

- zwiększony zasięg: sieć mesh zapewnia zasięg na dużych obszarach, co jest szczególnie przydatne w przypadku instalacji przemysłowych, dla których zasięg zwykłej sieci Wi-Fi jest ograniczony;
- większa nadmiarowość: w przypadku awarii któregoś z wykorzystywanych czujników, sieć mesh może automatycznie przekierować transmisję na inne czujniki zapewniając ciągłość działania;
- stabilność połączenia: sieć mesh zapewnia stabilne połączenie, ponieważ urządzenia mobilne łączą się z najbliższym punktem dostępowym, co zwiększa pewność ciągłości działania poprawnie zaprojektowanej sieci; dla przykładu: pojawienie się w przestrzeni transmisji sieci mesh (pierwotnie

zaprojektowanej jak na rys. 4A) jakiejś przeszkody (jak pokazana na Rys. 4B) pozwala na jej samo przeorganizowanie prowadzące do zachowania ciągłości w przekazywaniu danych;

- możliwość rozbudowy: sieć mesh można łatwo rozbudować, dodając kolejne czujniki bezprzewodowe, co zapewnia zasięg na jeszcze większych obszarach.

7. Protokół transmisji

W rozwiązaniach tradycyjnych sygnał generowany przez czujnik transmitowany jest do monitora drogą przewodową (typowo z pomocą kabli dwu- lub trójprzewodowych). Najczęściej jest to sygnał napięciowy lub prądowy. Bywa jednak również, że jest to sygnał przetworzony do postaci cyfrowej. W tym przypadku wymagany jest standard komunikacji zrozumiały dla odbiornika (monitora). Niezbędne jest zatem zdecydowanie się na wykorzystywanie jakiegoś protokołu parowania. Protokół ten organizuje ramkę danych, która jest przesyłana od czujnika do modułu odbiorczego. Na ramkę mogą się składać różne dane, jak np. numer/nazwa czujnika, stan czujnika (oczekiwanie na pomiar/pomiar/inne) oraz dane zebrane z czujnika. Czujnik może być jednofunkcyjny (pomiar temperatury, pomiar drgań np. w estymacji RMS etc.) lub wielofunkcyjny (np. pomiar temperatury i drgań na określonym kierunku lub pomiar drgań w trzech kierunkach). Coraz częściej czujniki dokonują cyfryzacji sygnału dynamicznego, który następnie jako „waveform cyfrowy” jest transmitowany do systemu monitorowania bezprzewodowo celem dalszego przetwarzania.

W celu parowania wykorzystywane mogą być różne standardowe interfejsy komunikacyjne, jak np. Wireless LAN, Bluetooth, WirelessHART, RFID, Profibus PA, Profibus DP, Foundation Fieldbus. Może się także zdarzyć, że producent bezprzewodowego systemu monitorowania wykorzystuje w tym celu swój własny (tzn. niestandardowy) interfejs. Przykładem może być firma Phoenix Contact, która specjalnie do zastosowań przemysłowych opracowała technologię bezprzewodową Trusted Wireless 2.0. Technologia ta umożliwia przesyłanie małych i średnich sekwencji danych na stosunkowo duże odległości (od kilkuset metrów do kilku kilometrów). Różne protokoły różnią się swoimi właściwościami, takimi jak m.in. zawartość i długość ramki, szybkość transmisji, bezpieczeństwo transmisji.

8. Uniezależnienie od zasilania

Podstawową wadą układów pomiarowych wykorzystujących transmisję bezprzewodową jest uzależnienie ich pracy od zasilania i w konsekwencji możliwe naruszenie ciągłości pracy w przypadku wyczerpania się baterii lub akumulatora. Kontrola stanu tych ostatnich wiąże się również z pewną trudnością – w szczególności wtedy, gdy czujniki bezprzewodowe są zainstalowane w miejscach trudno dostępnych. Do rozwiązania tego problemu dąży się poprzez rozwój technologii pozyskiwania energii (TPE), co w przypadku czujników bezprzewodowych umożliwia np. skrócenie kroku czasowego w przekazie danych, zwiększenia ciągu jednorazowo przekazywanych danych co umożliwia odejście od transmisji pomiarów do transmisji sygnałów dynamicznych etc.

Od wielu lat maszynami wymagającymi zastosowania licznych i zróżnicowanych czujników są hydroespoły. W tym

przypadku czujniki instaluje się nie tylko na elementach stacjonarnych konstrukcji, ale niektórzy użytkownicy są zainteresowani instalacją pewnych pomiarów także na wirnikach generatorów. Dla pozyskania energii dla pracy tych pomiarów oraz dla bezprzewodowej ich transmisji wykorzystywana bywa „kradzież energii” transmitowanej do wirnika celem jego wzbudzenia. Kradzież jest niewielka, tak więc nie zakłóca pracy generatora.

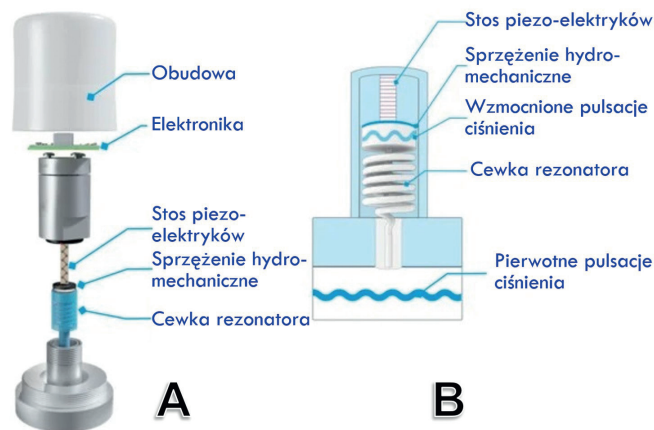
Od wielu lat wykorzystywana jest TPE bliskiego zasięgu dla pomiarów temperatury łożysk ślizgowych pozostających w ruchu (bezprzewodowy system monitorowania temperatury SENTRY jest oferowany przez firmę KONGSBERG), tzn. takich z jakimi mamy do czynienia przy połączeniu np. korbowodu z wałem korbowym w przypadku silników czy sprzężarek [8]. Rozwiązanie to jest aplikowane również w przypadku niektórych innych bezprzewodowych pomiarów temperatury, jak np. na przekładniach hydraulicznych.

Dla czujników bezprzewodowych zamiast baterii bywają również wykorzystywane układy pozyskiwania energii z tzw. procesów resztkowych. Już wiele lat temu dla czujników drgań mechanicznych były realizowane próby generowania energii niezbędnej do realizowania funkcji celu (pomiar, transmisja, ...) poprzez zastosowanie generatorów energii elektrycznej wykorzystujących energię drgań mechanicznych obiektu, do którego czujnik bezprzewodowy jest zamocowany. W ostatnich latach ta sama idea została wykorzystana dla bezprzewodowych czujników ciśnienia medium.

Na rys. 5A pokazano główne komponenty takiego czujnika, natomiast na rys. 5B ideę działania układu generującego energię elektryczną niezbędną do zasilania czujnika: pulsacje medium ulegają wzmocnieniu w układzie rezonansowym, a znajdująca się na jego wyjściu fala ciśnienia oddziałuje na element piezoelektryczny, który jest źródłem energii elektrycznej.

9. Zaszłości – pomiary procesowe

Wykorzystanie czujników bezprzewodowych do wspomagania nadzoru stanu technicznego może być realizowane jako całkowicie niezależne zadanie lub też może w tym celu wykorzystywać środowisko aplikowane już wcześniej w celach prowadzenia różnych pomiarów procesowych i środowiskowych – także z pomocą czujników bezprzewodowych. Aby było to możliwe potrzebna jest kompatybilność techniczno-programowa.



Rys. 5. Bezprzewodowy czujnik ciśnienia z własnym zasilaniem (A) elementy składowe (B) ogólna zasada działania generatora energii

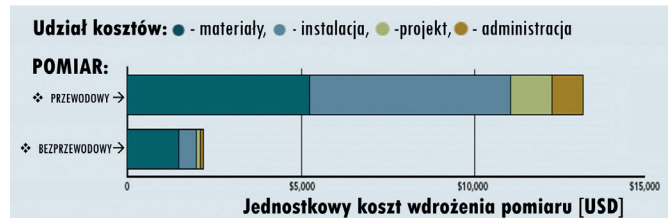
Przykłady wybranych zadań realizowanych w przedsiębiorstwie z pomocą sieci bezprzewodowej wraz z jej podłączeniem do sieci przewodowej pokazano na rys. 6.

Pokazany na rysunku system wielozadaniowy wykorzystuje zróżnicowane media i protokoły transmisji dostępne w ramach sieci bezprzewodowej przedsiębiorstwa. Sieć ta jest przyłączona do sieci przewodowej (co pokazano w górnej części rysunku), w której następuje przekazywanie pomiarów:

- procesowych do komputerów współuczestniczących w sterowaniu procesem;
- informujących o stanie technicznym (najczęściej są to drgania i temperatury) do sieci LAN, w której pomiary te udostępniane są w pierwszej kolejności specjalistom ze służb UR; mogą nimi być także zainteresowani operatorzy maszyn, bowiem mogą one ostrzegać ich o zbliżającej się awarii stanowiącej zagrożenie dla ciągłości procesu produkcyjnego;
- z innych systemów, jak np. z systemów bezpieczeństwa.

10. Koszty

Zastosowanie w projekcie systemu kontroli procesu technologii bezprzewodowej eliminuje wiele typowych aktywności związanych z projektowaniem, testowaniem i wdrażaniem tradycyjnych rozwiązań przewodowych (np. wymagane sprawdzenie pętli przewodowych). Na rys. 7 pokazano takie porównawcze oszacowanie kosztów (właściwych dla rynku amerykańskiego) implementacji czujników przewodowych i bezprzewodowych instalowanych celem kontroli realizacji procesu produkcyjnego.

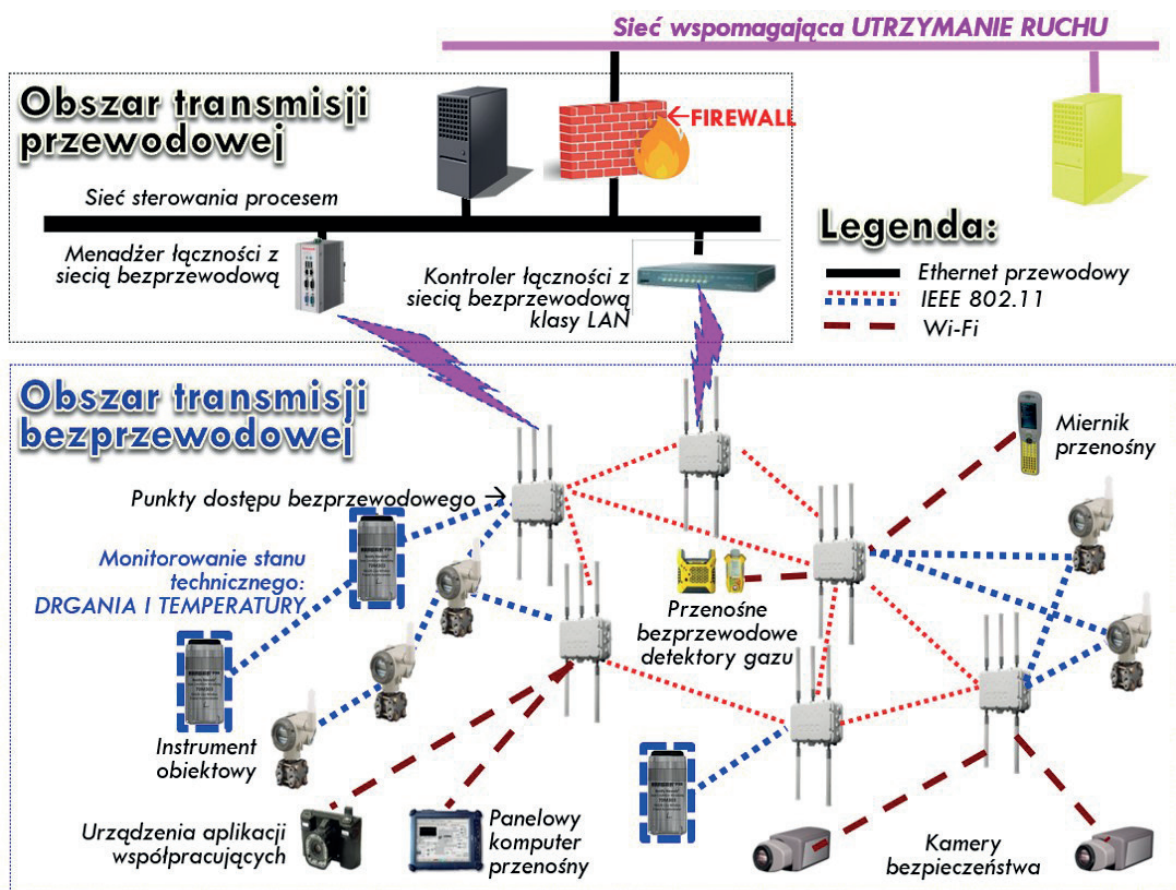


Rys. 7. Koszty jednostkowego wdrożenia pomiaru procesowego z pomocą czujnika przewodowego (u góry) i bezprzewodowego (na dole)

W analizie uwzględniono koszty materiałowe, prac projektowych, prac instalacyjnych oraz administrowania projektem. Oczywiście koszty jednostkowe są nieadekwatne dla Europy Centralnej, w której jedynie koszty materiałowe pozostają na podobnym poziomie, natomiast pozostałe (projekt, instalacja, administrowania) są niższe niż w USA. Mimo tego, z tej statystycznej analizy płyną dwa najważniejsze wnioski:

- w przypadku czujników przewodowych koszty materiałowe stanowią co najmniej 40% całkowitych kosztów związanych z ich wdrożeniem;
- całkowity koszt wdrożenia czujnika bezprzewodowego kształtuje się na poziomie co najmniej 20% kosztów dotyczących czujnika przewodowego.

Współcześnie w różnych krajach szacuje się, że koszt wdrożenia samoorganizującej się sieci bezprzewodowej (czyli sieci typu mesh) o topologii zapewniającej niezawodność odpowiadającą niezawodności systemu przewodowego, kształtuje się na poziomie ~40% kosztów wdrożenia systemu tradycyjnego.



Rys. 6. Bezprzewodowa sieć wielozadaniowa

Przytoczone powyżej szacunkowe koszty dotyczą sieci bezprzewodowych dedykowanych kontroli realizacji procesu produkcyjnego. Natomiast można z dużym prawdopodobieństwem założyć, że są one również reprezentatywne dla nakładów związanych z implementacją przewodowych i bezprzewodowych systemów monitorowania stanu technicznego.

11. Zróźnicowanie maszyn

Na zróźnicowanie maszyn można patrzeć z punktu widzenia różnych kryteriów. W przypadku poruszanej tematyki pierwotnie najbardziej interesująca winna być klasyfikacja krytyczności środków produkcji dla realizowanego procesu produkcyjnego i w konsekwencji przypisanych im form UR w zależności od zróźnicowania zaszerogowania.

Krytyczność jest oceniana z perspektywy:

- zagrożenia bezpieczeństwa ludzi,
- znacznego obniżenia możliwości realizacji założonych celów biznesowych,
- niekorzystnego wpływu na poziom jakości realizowanej produkcji,
- naruszenia norm środowiskowych obowiązujących dla organizacji biznesowej.

W wielu przypadkach wyróżnić można grupy maszyn, które charakteryzują się niską krytycznością, ale dla których wciąż jest pożądane śledzenie za zmianą ich stanu technicznego. Przykładem mogą być grupy pomp pracujących w bezobsługowych pompowniach, czy grupy wentylatorów – w obu przypadkach maszyny robocze mogą być napędzane silnikami o stosunkowo niewielkiej mocy. Maszyny takie są łożyskowane tocznie i to najczęściej właśnie ich uszkodzenie stanowi dominujący udział w zachodzących awariach. Typowo, uszkodzenie łożyska tocznego (jeśli się zainicjuje) rozwija się w ciągu kilku tygodni, a nawet miesięcy. Tak więc wdrożenie systemu monitorowania stanu dynamicznego takich maszyn równoległe do już istniejącego systemu nadzoru procesowego i sterowania, systemu, który będzie dokonywał pomiarów drgań „raz na jakiś czas” – np. raz na dobę, może stanowić znaczącą wartość dodaną wspomagającą działanie służb UR.

12. Wielozadaniowe sieci komunikacyjne klasy LAN w UR

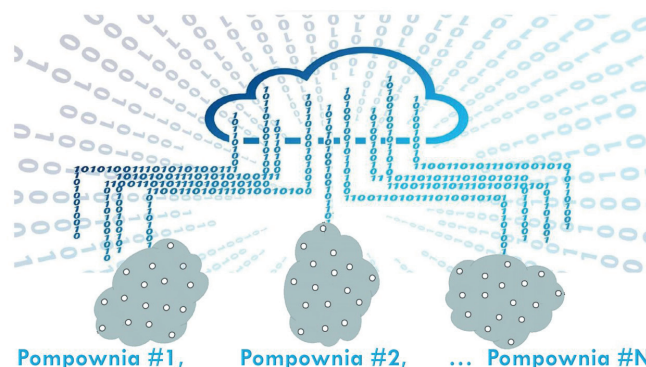
Poniżej zostaną opisane dwa przykładowe scenariusze wykorzystywania sieci wielozadaniowych, tzn. takich, które są stosowane zarówno do kontroli procesu jak i do nadzoru stanu technicznego.

- **SCENARIUSZ #1:** Są przedsiębiorstwa, które nie wykorzystują maszyn krytycznych, a więc takich, które w sposób istotny współdecydują o ich wyniku finansowym. W przedsiębiorstwach tych wykorzystywane są maszyny nie wymagające tak silnych systemów monitorowania stanu technicznego jak stosowane dla maszyn krytycznych. Na rysunku w RAMCE #1 pokazano przewodowy system skaningowy, dedykowany nadzorowi majątku niekrytycznego (czyli tzw. maszynom pomocniczym). W tym przypadku bezprzewodowość mogła się sprowadzać do komunikacji między systemem pomiarowym a serwerem akwizycji danych. Rozwiązanie takie może być wykorzystywane np. w pompowniach pozostających w zainteresowaniu jednego

administratora. W przeszłości w każdej pompowni był zainstalowany lokalny przewodowy system monitorowania (lub ocena stanu była realizowana z pomocą sprzętu przenośnego), z którego dane były przekazywane do jednego serwera diagnostyki zlokalizowanego u tegoż administratora. Natomiast współcześnie, w takich niewielkich systemach skaningowych, coraz częściej wykorzystywane są czujniki bezprzewodowe, a gromadzenie danych odbywa się najczęściej w sposób pokazany na rys. 3.

W przypadku większych pompowni oczywiście może być wykorzystywana sieć kratowa jak pokazana na rys. 4.

W tychże pompowniach mogły być również realizowane pomiary procesowe i w takiej sytuacji ich wyniki były transmitowane do administratora z pomocą tego samego punktu dostępowego, tzn. wykorzystywanego dla obu opisanych zadań. Rolą administratora jest w tym przypadku dokonanie wyboru takiego rozwiązania sieciowego, które w możliwie najlepszy sposób będzie wspomagać działanie służb UR oraz w sposób wysoce niezawodny i bezpieczny realizować funkcjonalność transmisji danych. Współcześnie administrator może gromadzić wszystkie pozyskane tą drogą dane w chmurze – tak jak pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Gromadzenie danych procesowych oraz charakteryzujących stan techniczny z wielu pompowni w chmurze

- **SCENARIUSZ #2:** Są przedsiębiorstwa, które wykorzystują w procesie produkcyjnym maszyny krytyczne, które zgodnie z zasadami sztuki są nie tylko wyposażone w systemy monitorowania i zabezpieczenia On-Line stanu technicznego, ale także w odpowiednio silne systemy diagnostyki umożliwiające realizację UR bazującego na stanie technicznym (predykcyjne UR / prognostyczne UR). Schemat takiego systemu jest zaprezentowany po lewej stronie rys. 9. Na rysunku jako system diagnostyki wymieniono system firmy BENTLY NEVADA SYSTEM 1 Evo, który jest wykorzystywany na wielu blokach w krajowej energetyce, a także w wielu krajowych przedsiębiorstwach z obszaru O&G. W prawej dolnej części rysunku pokazano wiele czujników bezprzewodowych RANGER PRO. Czujniki te pracują w sieci mesh (dopuszczającej do trzech skoków do punktu dostępowego), a sieć ta może być zorganizowana bazując wyłącznie bądź to na punktach dostępowych dedykowanych SYSTEMOWI 1 Evo, bądź też może wykorzystywać istniejącą już bezprzewodową strukturę sieci pomiarów procesowych (na rysunku pokazano wykorzystywane

urządzenia sieciowe firm HONEYWELL i YOKOGAWA¹⁰ pracujące w standardzie ISA100a, natomiast czujnik ten może być również wykorzystywany w sieciach pracujących w standardzie WirelessHART obsługiwanych przez bramy sieciowe firmy EMERSON, jak np. 1410S, 1410A/B/D, 1420).

W przypadku scenariusza #2 wielozadaniowość ma dwa wymiary. Po pierwsze wykorzystywana jest wspólna infrastruktura dla pomiarów procesowych oraz dedykowanych nadzorowi stanu technicznego, a po drugie ten sam system diagnostyki posiada funkcjonalność umożliwiającą pracę zarówno na rzecz monitorowania On-Line dla maszyn krytycznych jak i monitorowania skaningowego (jak przewodowy pokazany na rysunku w RAMCE #1 oraz bezprzewodowy jak zilustrowany na rys. 6)¹¹.

Natomiast realizacja takich różnych funkcjonalności może być realizowana w sposób pokazany na rys. 6 – tzn. z pomocą sieci wielozadaniowej. W przypadku niewielkich aplikacji (jak np. rzeźzone pompownie), częścią wspólną takiej sieci wielozadaniowej jest jedynie punkt dostępu.

13. Bezpieczeństwo cybernetyczne

Bezpieczeństwo jest ważnym kryterium, ponieważ komunikacja między dwoma urządzeniami musi być bezpieczna. Jeśli komunikacja jest podsłuchiwana, może dojść do celowego zmanipulowania danych.

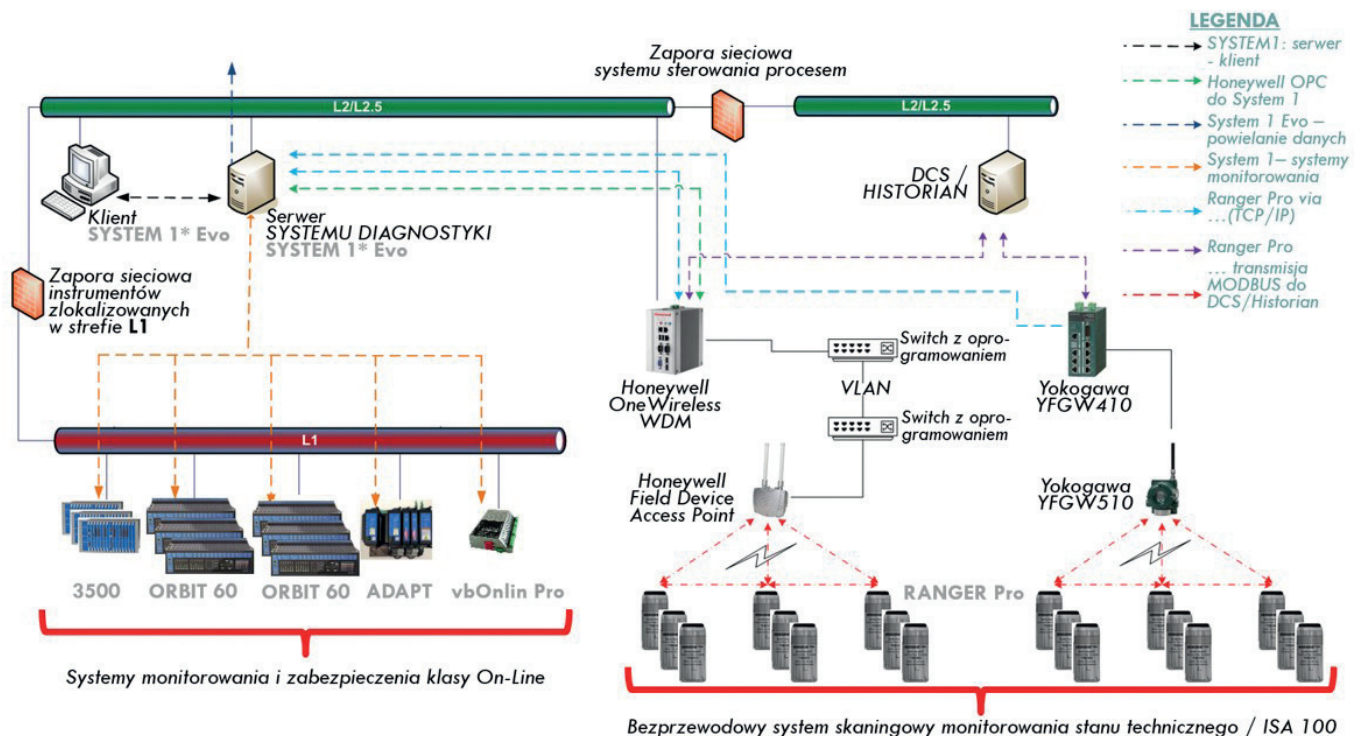
W przeszłości miały już miejsce takie przypadki, kiedy z pomocą wirusów zmanipulowano systemy nadzoru stanu technicznego. Także miał miejsce poważny przypadek naruszenia bezpieczeństwa poprzez włamanie do systemu bezprzewodowego. Tą drogą doprowadzono do poważnego uszkodzenia rurociągu Baku/Azerbejdżan-Tbilisi/Gruzja-Ceyhan/Turcja. Bezpośrednią przyczyną było przeciążenie ciśnieniowe rurociągu. Doszło do niego w wyniku przejścia kontroli nad

sterowanymi bezprzewodowo zaworami stacji przesyłowej gazu w pobliżu miejscowości Erzincan (wschodnia Turcja) przez osoby znajdujące się poza terytorium stacji, w którym to celu został wykorzystany komputer przenośny. Na zdarzenie to można spojrzeć przez pryzmat koincydencji w czasie z początkiem wojny w Osetii Południowej (zaczęła się kilkadziesiąt godzin po eksplozji rurociągu).

Podobnie jak w przypadku transmisji przewodowej, również w przypadku transmisji bezprzewodowej możliwe jest wykorzystywanie różnych protokołów. Poczynając od WTP i WAP, kończąc na ISA 100.11a i Wireless HART. Stosowane protokoły transmisji bezprzewodowej winny zapewniać nie tylko integralność transmitowanych danych, ale także cyberbezpieczeństwo transmisji.

Protokół ISA 100.11a jest pierwszym protokołem transmisji bezprzewodowej, który został stworzony z myślą o zapewnieniu cyberbezpieczeństwa na odpowiednio wysokim poziomie. Inne, stosowane wcześniej protokoły, nie posiadały pierwotnie takiej właściwości. I tak WirelessHART dopiero od wersji 4 uzyskał certyfikat Achillesa [7] dla strefy 1.

Na bezpieczeństwo cybernetyczne należy spojrzeć również przez pryzmat zaawansowania technologii pozasieciowych wykorzystywanych dla nadzoru stanu technicznego. Przedsiębiorstwo rozważające wdrożenie takiego systemu winno rozważyć nie tylko jakie są jego cechy, ale także jaki jest do niego stosunek producenta. Znane są przypadki, w których systemy monitorowania najpierw otrzymywały w/w certyfikat Achillesa, po czym, w konsekwencji postępu metod prowadzenia cyberataków go utraciły i dopiero unowocześnienie ich konstrukcji umożliwiło ponowne uzyskanie certyfikacji. Na przypadki takie należy spojrzeć przez pryzmat dojrzałości i konsekwencji w dążeniu do doskonałości produktu przez producenta systemu monitorowania. Na rynku jest bowiem bardzo dużo firm,



Rys. 9. Systemy nadzoru stanu technicznego dedykowane maszynom o różnej krytyczności

które rozpoczynają sprzedaż jakiegoś produktu i starają się go sprzedawać możliwie długo bez wprowadzania unowocześnień.

Wracając do przykładu systemu diagnostyki wymienionego na rys. 9. SYSTEM 1 został wprowadzony do sprzedaży na przełomie wieków i podlegał w przeszłości wielokrotnie unowocześnieniu nie tylko ze względu na funkcjonalności diagnostyczne, ale także ze względu na bezpieczeństwo cybernetyczne. Przy okazji jednego z bardziej znaczących unowocześnień zmienił nazwę na SYSTEM 1 Evo. System ten w dalszym ciągu podlega ewolucji, a firma publikuje, co około pół roku, kolejne wersje oprogramowania. Software zapewnia całkowity poziom cyberbezpieczeństwa pracy serwera akwizycji danych mimo tego, że możliwy jest dostęp odległy do danych gromadzonych przez system.

14. Wymagania Ex

W przypadku niektórych aplikacji może wystąpić potrzeba zastosowania czujników bezprzewodowych w strefach zagrożenia wybuchowego czy to z atmosferą zagrożenia wybuchem gazu, czy też pyłu. W takich przypadkach wymagane jest nie tylko stosowanie czujników z wymaganą certyfikacją, ale także niezbędne jest wykorzystywanie infrastruktury Wi-Fi (anten i punkty dostępowe) z certyfikacją ATEX stosowaną dla wymagań strefy.

I tak np. wymienione na rys. 9 czujniki bezprzewodowe RANGER PRO posiadają certyfikację ATEX dla stref: (i) I M1 Ex ia I Ma, (ii) II 1G Ex ia IIC T4 Ga oraz (iii) II 1D Ex ia IIIB T135 °C Da.

15. Zalety systemów czujników bezprzewodowych

Wyróżnia się następujące zalety sieci WSN (Wireless Sensor Network, czyli Sieci Czujników Bezprzewodowych):

- A. Komunikacja bezprzewodowa:** sieci WSN eliminują potrzebę połączeń przewodowych, które mogą być kosztowne i trudne w instalacji. Sieci przewodowe wymagają zaprojektowania, a to wiąże się ze znacznie wyższymi kosztami niż projekt dla sieci bezprzewodowej. Komunikacja bezprzewodowa umożliwia elastyczne wdrażanie i rekonfigurację sieci – np. związaną z dodaniem kolejnych czujników do istniejącej już sieci.
- B. Łatwość instalacji:** bezprzewodowe systemy monitorowania i transmisji danych eliminują potrzebę stosowania rozległego okablowania, dzięki czemu proces instalacji jest prostszy, szybszy i w konsekwencji tańszy.
- C. Skalowalność:** sieci WSN można łatwo skalować w górę lub w dół; można szybko przeprowadzić rozbudowę systemu poprzez dodawanie nowych czujników lub też łatwo zdemontować czujniki zainstalowane czasowo celem lepszego nadzoru pracy maszyny zagrożonej awarią; czujniki te mogą być łatwo skonfigurowane dla innego obiektu znajdującego się w zasięgu punktu dostępu. Ta elastyczność sprawia, że systemy bezprzewodowe mogą być bezproblemowo wykorzystywane zarówno dla małych, małych rozproszonych oraz rozległych aplikacji.
- D. Efektywność energetyczna:** sieci WSN mogą wykorzystywać urządzenia i protokoły o niskim poborze mocy mając na celu oszczędzanie energii; w konsekwencji będą

umożliwiać długoterminową pracę bez konieczności częstej wymiany baterii.

- E. Monitorowanie w czasie rzeczywistym:** sieci WSN umożliwiają monitorowanie w czasie quasi-rzeczywistym zjawisk fizycznych w środowisku – w tym także zmian stanu technicznego; dostarczanie z pożądanym krokiem czasowym aktualnych danych umożliwia podejmowanie przez służby UR decyzji właściwych dla bieżącego stanu technicznego majątku produkcyjnego.
- F. Niski koszt:** całkowity koszt sieci WSN jest niższy od kosztu sieciowych rozwiązań przewodowych, co czyni je atrakcyjnym rozwiązaniem dla wielu aplikacji wymagających pomiarów różnych wielkości fizycznych.
- G. Mobilność:** bezprzewodowe czujniki są bardziej mobilne niż przewodowe, co pozwala na ich stosowanie w miejscach, gdzie doprowadzenie przewodów jest trudne lub kosztowne.
- H. Niezawodna komunikacja:** dzięki postępowi w technologii bezprzewodowej nowoczesne systemy zapewniają solidną i wysoce niezawodną komunikację między komponentami. Sygnały są przesyłane bezpiecznie, minimalizując ryzyko zakłóceń.
- I. Zdalny dostęp i monitorowanie:** bywają bezprzewodowe systemy monitorowania umożliwiające zdalny dostęp do czujników i ich rekonfigurację.
- J. Ulepszone funkcje bezpieczeństwa:** współczesne systemy monitorowania bezprzewodowego prezentują zaawansowane funkcje bezpieczeństwa dzięki szyfrowaniu komunikacji.

16. Wady systemów czujników bezprzewodowych

Wyróżnia się następujące wady sieci WSN:

- A. Ograniczony zasięg:** zasięg komunikacji bezprzewodowej jest ograniczony, co może stanowić wyzwanie w przypadku wdrożeń na dużą skalę lub w środowisku, w którym znajdują się przeszkody powodujące zakłócanie propagacji fal radiowych.
- B. Zależność od baterii:** czujniki oraz niektóre panele sterujące czy poszczególne moduły bezprzewodowego systemu monitorowania zasilane są bateriami, co oznacza, że konieczne jest regularne sprawdzanie poziomu naładowania baterii i ich wymiana. Jeśli o obsłudze zapomnimy, może to doprowadzić do spadku wydajności systemu lub nawet zaprzestania jego działania w przypadku wyczerpania baterii.
- C. Ograniczona moc obliczeniowa:** sieci korzystają z czujników o niskim poborze mocy; w konsekwencji czujniki mają ograniczoną moc obliczeniową i niewielką pamięć; taki stan rzeczy utrudnia wykonywanie złożonych obliczeń i obsługę niektórych bardziej wymagających aplikacji.
- D. Bezpieczeństwo danych:** nie wszystkie sieci charakteryzują się wysokim poziomem bezpieczeństwa cybernetycznego i w konsekwencji mogą być podatne na jego zagrożenie; w związku z tym może dochodzić do manipulowania danymi i stanowić zagrożenie pierwotnie dla monitorowanego majątku produkcyjnego, a wtórnie także dla środowiska.

E. Ograniczony zasięg: bezprzewodowe systemy monitorowania mają ograniczony zasięg działania w porównaniu z systemami przewodowymi.

F. Podatność na zakłócenia: mimo postępów w technologii bezprzewodowej, istnieje nadal ryzyko zakłóceń sygnału. Czynniki takie jak zakłócenia elektromagnetyczne (zakłócenia pochodzące od innych urządzeń bezprzewodowych lub sygnałów radiowych), metalowe przeszkody, grube ściany lub odległość mogą wpływać na jakość transmisji między poszczególnymi komponentami systemu. W warunkach przemysłowych zakłócenia mogą posiadać charakter czasowy (pojawienie się dużych pojazdów, kontenerów, dźwigów, etc.). Zakłócenia nie tylko przyczyniają się do obniżenia jakości transmisji danych, ale w skrajnych przypadkach mogą prowadzić do całkowitej utraty sygnału.

17. Bezprzewodowość w analizatorach przenośnych

Techniki bezprzewodowe wkraczają również do systemów przenośnych wspomagających UR. Cztery lata temu firma BENTLY NEVADA wprowadziła na rynek pierwszy z przyrządów przenośnych serii SCOUT 200. Oferują one specjalistyczną aplikację do analizy drgań, a także zapewniają takie standardowe funkcjonalności urządzenia przenośnego jak kamera, wideo i możliwość współpracy bezprzewodowej z przemysłowym smartfonem lub tabletem. Przyrządy te działając w sieci jak pokazana na Rys. 6 mogą przesyłać dane do serwera SYSTEM 1 Evo takimi drogami jak: Wi-Fi, USB, sieć GSM pracująca w standardzie 4G lub 5G. Dodatkowo, korzystając z systemu komunikacji zdalnej firmy BN, możliwe jest zapewnienie bezpiecznej transmisji danych z dowolnego miejsca na świecie za pomocą sieci WAN lub połączenia internetowego.

To nie koniec. Rok później inną nowinkę bezprzewodową w ofercie podobnej klasy instrumentów zaoferowała firma ACOEM wprowadzając do sprzedaży przyrząd FALCON, który wykorzystuje bezprzewodowy 3-kierunkowy czujnik przyspieszeń drgań.

18. Zakończenie

Świadomość specjalistów służb UR w zakresie możliwości i poprawności wykorzystania technik bezprzewodowych do nadzoru stanu technicznego w wielu przypadkach nie jest wystarczająca. Autorowi zdarzyło się otrzymać opublikowany SIWZ dedykowany wstrząsarce, dla której użytkownik był zainteresowany nadzorem stanu technicznego jej wybranych węzłów z pomocą techniki bezprzewodowej. Zastosowanie tej techniki jest atrakcyjną alternatywą w stosunku do monitorowania wykorzystującego czujniki z przewodami. Technika bezprzewodowa eliminuje bowiem problem z ruchliwością kabla biegnącego od czujnika zlokalizowanego na poruszającej się maszynie do stacjonarnych elementów systemu monitorowania znajdującego się już poza maszyną. Natomiast w SIWZ'ie tym wskazywano także (!!!) na określony typ bezprzewodowego czujnika drgań, którego dynamika pracy ... nie pokrywała potrzeb aplikacji na wstrząsarce: jej drgania w dobrym stanie technicznym znacznie przekraczały określone w dokumentacji pole (częstotliwość – poziom drgań) dopuszczalnej aplikacji.

Jeśli stroną generującą SIWZ był wyłącznie inwestor, to potwierdza to wyżej postawioną tezę o słabym przygotowaniu specjalistów UR do wdrażania technik bezprzewodowych. Natomiast jeśli stało się to przy współudziale dostawcy systemu, to wskazuje na brak jego profesjonalizmu, bowiem gdyby był profesjonalnym dostawcą, to winien był sprawdzić jak dalece jego produkt może być poprawnie zaaplikowany.

Tak więc doprowadzenie do wdrożenia scharakteryzowanego w SIWZ'ie rozwiązania skutkowałoby poniesieniem kosztów przez inwestora, z których nie miałby on żadnego zysku. Jedynym wygranym (?) byłby sprzedawca systemu.

W wielu przypadkach bezprzewodowe czujniki drgań realizują dodatkowo pomiar temperatury. W przypadku ich stosowania dobrze jest zastanowić się przez chwilę jak dalece pomiary realizowane z pomocą sensora temperatury zainstalowanego w węźle łożyskowym są skorelowane z pomiarami temperatury powierzchni obudowy łożyskowej

w punkcie, w którym umieszczony jest bezprzewodowy czujnik mający mierzyć pierwszoplanowo drgania. Warto także sprawdzić jak dalece zmienność pola temperatury w otoczeniu monitorowanej maszyny może mieć wpływ na zmianę temperatury tej powierzchni.

Przystępując do realizacji jakiegoś projektu mającego wspomagać UR dobrze jest skorzystać ze wspomaganie kogoś, kto ma nie tylko wiedzę o produkcie, ale także doświadczenie aplikacyjne.

Przypisy

- [1] IIoT = Industrial Internet of Things. Historia IIoT rozpoczęła się wraz z wynalezieniem programowalnego sterownika logicznego (PLC) przez Richarda E. Morleya w 1968 r., który zastosowała firma General Motors w dziale produkcji automatycznych skrzyń biegów. Milowym krokiem w rozwoju IIoT było wprowadzenie sieci Ethernet (1980), co umożliwiło realizację koncepcji sieci tzw. inteligentnych urządzeń.
- [2] W Polsce pasmo to jest podzielone na 13 kanałów.
- [3] Pierwsze z pasm jest w Europie (zgodnie z regulacjami ESTI) dedykowane aplikacjom w przestrzeniach zamkniętych i jest podzielone na 8 kanałów, drugie natomiast aplikacjom w środowisku zewnętrznym i oferuje 11 kanałów. W tym drugim przypadku dopuszczalna moc promieniowania wynosi 1W.
- [4] Dla przykładu w paśmie 868 MHz w czterech podpasmach ograniczenie mocy wynosi 25 mW, a w dwóch pozostałych jest to tylko 10 mW i aż 500 mW.
- [5] Można przyjąć jako pewnik, że podawane w dokumentacji systemowej zasięgi dotyczą warunków idealnych i w praktyce przemysłowej, przy podejmowaniu decyzji co do architektury docelowego systemu oraz jego topologii, nie popełni się dużego błędu zakładając, że skuteczna transmisja jest na poziomie ~30% odległości podawanej w materiałach marketingowych producenta systemu.
- [6] Nazwa jest skrótem od „Wireless Fidelity”.
- [7] Są trzy główne klasy Bluetooth:
 - Klasa 1: nadaje z mocą 100 mW i umożliwia zasięg do 100 metrów.
 - Klasa 2: nadaje z mocą 2,5 mW / zasięg 10 metrów.
 - Klasa 3: nadaje z mocą 1 mW / zasięg poniżej 10 metrów (nominalnie: 1 m)
- [8] Swoją odporność na zakłócenia Bluetooth zawdzięcza transmisji danych odbywającej się z wykorzystaniem metody rozpraszania widma w systemach szerokopasmowych FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum). W tłumaczeniu wprost jest to „skakanie” sygnału po częstotliwościach w kolejnych odstępach czasu, w dostępnym paśmie, polegającej na zmianie kanału transmisji po każdym przesłaniu danych. Przeskok ten odbywa się nawet 1600 razy na sekundę. Dzięki takiej redundancji obejmującej

nawet 79 kanałów transmisji Bluetooth wyróżnia się doskonałą odpornością na zakłócenia w zatłoczonym paśmie częstotliwości 2,4 GHz. Standard Bluetooth obejmuje też skuteczny mechanizm koegzystencji. Kiedy dwa urządzenia są połączone realizowana jest specyficzna technika zwana adaptacyjnym przeskakiwaniem częstotliwości (AFH = Adaptive Frequency Hopping), która niezawodnie wykrywa kanały wykorzystywane przez WLAN o zajętości od 10% do 15% i w konsekwencji automatycznie pomija pasma zajęte przez inne urządzenia.

- [9] Np. ISA 100Wireless dopuszcza ich 3, gdy tymczasem WirelessHART tylko 1 [7]
- [10] Rodzaj wykorzystywanej struktury sieciowej, a dokładniej bramy sieciowej, może współdecydować o liczbie czujników bezprzewodowych pracujących w takiej sieci. I tak np. bazując na Yokogawa® YGFW można gromadzić dane poprzez 4 punkty dostępowe, natomiast bazując na Honeywell OneWireless® z 8 punktów dostępowych. W obu przypadkach każdy punkt dostępowy może obsługiwać do 40 czujników.
- [11] Dodajmy, że SYSTEM 1 Evo umożliwia również obsługę danych gromadzonych z pomocą wybranych wielokanałowych przenośnych zbieraczy danych diagnostycznych jak np. SCOUT.

Literatura

- [1] Nowicki R., *Problemy bezpieczeństwa cybernetycznego w zakresie stosowania systemów nadzoru stanu technicznego majątku produkcyjnego*, „Napędy i Sterowanie” Nr 7/8 Lipiec – Sierpień 2016, str. 106 – 116
- [2] Nowicki R., *Na celowniku cyberprzestępców*, Kierunek Wod-Kan, Nr 1/2022, 30...36
- [3] Nowicki R., *Preskryptywne utrzymanie ruchu*, Chemia Przemysłowa, 4/2020 (756), str. 6 – 10
- [4] Nowicki R., *Utrzymanie ruchu a Przemysł 4.0*, „Napędy i Sterowanie” Nr 9 (257), Wrzesień 2020, str. 52 – 77
- [5] SONG J., Nowicki R., Duyar A.: *Sprzętowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*, „Napędy i Sterowanie” Nr 1, Styczeń 2014, str. 96 – 106
- [6] Nowicki R., Bate M.: *Programowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*, „Napędy i Sterowanie” Nr 12, Grudzień 2013, str. 24 – 31
- [7] Costa M.S., Amaral J.L.M., *Analysis of Wireless Industrial Automation Standards: ISA-100.11a and WirelessHART*, <https://blog.isa.org/analysis-wireless-industrial-automation-standards-isa-100-11a-wirelesshart>
- [8] Nowicki R., *Pomiary temperatury łożysk (cz. II): Szczegóły dotyczące poprawności instalacji czujników*, „Inżynieria i Utrzymanie Ruchu Zakładów Przemysłowych”, Nr 4, 07 – 08 2016, str. 64 – 75

 Ryszard Nowicki