



System monitorowania zagrożeń pyłowych i akustycznych w zakładach przemysłowych wykorzystujący mierniki niskokosztowe¹

The monitoring system of dust and noise hazards in an industrial facility based on low-cost environmental sensors¹

dr inż. TOMASZ JANKOWSKI
<https://orcid.org/0000-0003-3620-9407>
e-mail: tojan@ciop.pl

dr inż. PRZEMYSŁAW OBERBEK
<https://orcid.org/0000-0002-5225-3523>

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
<https://orcid.org/0000-0003-3534-3284>

mgr inż. GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI
<https://orcid.org/0000-0003-0390-1624>

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, Warsaw, Poland

Streszczenie

Spośród czynników szkodliwych związanych ze środowiskiem pracy największe zagrożenie stanowią hałas i pyły. Skutecznym rozwiązaniem tego problemu może być ciągle monitorowanie parametrów środowiska pracy umożliwiające szybkie wykrycie obszarów o dużej emisji hałasu i stężeniu pyłów oraz ich źródeł. Dzięki proponowanemu rozwiązaniu służby BHP otrzymają narzędzie do szybkiego reagowania na przekroczone wartości dopuszczalne narażenia na czynniki szkodliwe dla zdrowia. Takie rozwiązanie ułatwi także ocenę stanu technicznego instalacji, ponieważ nadmierna emisja pyłów i/lub wysokie poziomy narażenia na hałas mogą być efektem rozszczelnień lub wadliwej pracy urządzeń. Wyniki prototypu miernika dla stężeń pyłów zawieszonych PM2.5 są zadowalające. Pomiary porównawcze poziomów dźwięku A dla różnych poziomów sygnału testowego potwierdziły małe różnice w stosunku do miernika referencyjnego. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że prototyp można stosować jako narzędzie do szybkiego i skutecznego reagowania na przekroczone wartości dopuszczalne narażenia na pyły i hałas w zakładzie przemysłowym. Zakres tematyczny artykułu obejmuje zagadnienia zdrowia oraz bezpieczeństwa i higieny środowiska pracy będące przedmiotem badań z zakresu nauk o zdrowiu oraz inżynierii środowiska.

Słowa kluczowe: pyły, hałas, system monitorowania, mierniki niskokosztowe, nauki o zdrowiu, inżynieria środowiska.

¹ Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej. Zadanie nr 2.SP.15 pt. „Opracowanie systemu monitorowania zagrożeń pyłowych i akustycznych w czasie zbliżonym do rzeczywistego, opartego na bezprzewodowym przesyłaniu danych i przenośnych stacjach pomiarowych w środowisku pracy”. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

This paper is published and based on the results of a research task carried out within the scope of the fifth stage of the National Programme “Improvement of safety and working conditions” supported within the scope of state services by the Ministry of Family and Social Policy. Task no. 2.SP.15 entitled “Development of a system for monitoring dust and acoustic hazards in close to real time, based on wireless data transmission and portable measuring stations in the work environment”. The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme’s main co-ordinator.

Abstract

Among the harmful factors related to the work environment, noise and dust poses the greatest threat. Continuous monitoring of working environment parameters may be an effective solution to this problem, enabling the quick detection of areas with high noise emissions and dust concentration and their sources. Thanks to the proposed solution, OSH services will receive a tool for a quick response to exceeded exposure limit values for factors harmful to health. Such solution will also facilitate the assessment of technical conditions of installation, because excessive dust emission and/or high levels of exposure to noise may be the result of unsealing, or faulty operation of devices. The results of the meter prototype for PM_{2.5} concentrations of suspended dust are satisfactory. Comparative measurements of A-sound levels for different test signal levels confirmed small differences in relation to the reference meter. It was found that the prototype can be used as a tool for a quick and effective response to exceeded exposure limit values for dust and noise in an industrial plant. This article discusses the problems of occupational safety and health, which are covered by health sciences and environmental engineering.

Keywords: dust, noise, monitoring system, low-cost sensors, health sciences, environmental engineering.

WPROWADZENIE

Zgodnie z danymi GUS z 2018 r. spośród czynników związanych ze środowiskiem pracy największe zagrożenie stanowił hałas, którym zagrożonych było 186,3 tys. osób (58,9% wszystkich zatrudnionych w warunkach zagrożenia związanych ze środowiskiem pracy). Drugim pod względem częstości występowania czynnikiem szkodliwym były pyły, na które było narażonych 50,4 tys. osób (15,9%), (GUS 2019).

Nadmierna ekspozycja na hałas może spowodować ubytek słuchu, który jest jedną z najczęściej występujących chorób zawodowych w Polsce. Przy niższych natężeniach hałas jest również czynnikiem uciążliwym, pogarszającym możliwości prawidłowego wykonywania prac wymagających koncentracji uwagi (w tym prac związanych ze sterowaniem procesami przemysłowymi). Hałas przeszkadza w codziennym wykonywaniu czynności związanych z pracą, wpływa na pracę układu hormonalnego i krążenia, wywołuje stres oksydacyjny. Jest także czynnikiem ryzyka nadciśnienia tętniczego (Ising, Kruppa 2004; Münzel i in. 2018). Hałas komunikacyjny (drogowy, lotniczy, szynowy) i przemysłowy (instalacyjny) to najbardziej uciążliwe rodzaje hałasu, przy czym hałas instalacyjny jest najbardziej różnicowany.

Narażenie pracowników na wysokie stężenie pyłów w powietrzu oprócz wywołania poczucia dyskomfortu może powodować także utratę zdrowia. Według Światowej Organizacji Zdrowia pyły zawieszane w powietrzu odpowiadają

w Polsce za skrócenie średniej długości życia o 6 ÷ 12 miesięcy. Nawet krótkotrwała ekspozycja na wysokie stężenia pyłu o wielkościach mikrometrycznych powoduje zwiększenie liczby zgonów spowodowanych chorobami układu oddechowego i krążenia. Cząstki frakcji gruboziarniste (PM₁₀, frakcja wdychalna) mogą przenikać do płuc, ale głównie akumulują się w górnym odcinku dróg oddechowych, skąd są wydalane. Pył zawieszony drobny (PM_{2.5}, frakcja respirabilna) wnika głęboko do układu oddechowego: osiada na ściankach pęcherzyków płucnych, akumuluje się i utrudnia wymianę gazową. Skutki zdrowotne działania pyłów uwidaczniają się zwykle po okresie utajenia w postaci chorób dróg oddechowych, w tym nowotworów, zapalenia górnych dróg oddechowych, pylic oraz patologicznego rozrostu tkanki łącznej (Więcek 2011). Wysokie stężenia i natężenia czynników szkodliwych, takich jak hałas i pyły, może również wpływać na obniżenie wydajności pracy, a także obniżyć dobrobyt osób zatrudnionych, który przekłada się na funkcjonowanie zakładu pracy oraz zamożność społeczeństwa.

Aby zapobiegać występowaniu zagrożeń pyłowych i akustycznych stosuje się różne organizacyjne środki kontroli (m.in. przerwy w pracy, rotację pracowników, robotyzację i automatyzację w celu odsunięcia pracownika od źródeł zagrożeń itd.), środki ochrony zbiorowej (m.in. oparte na eliminacji, ograniczeniu lub obudowie źródeł czynników szkodliwych)

i indywidualnej (stosowanie odpowiednich ochron osobistych). Pomimo regularnych pomiarów czynników szkodliwych w środowisku pracy, do których zobowiązują przepisy prawa pracy, zdarza się, że pracownicy, służby BHP oraz pracodawcy nie są świadomi wszystkich występujących w zakładzie zagrożeń. Natężenia i stężenia czynników szkodliwych mogą również podlegać zmianom z powodu zużycia lub uszkodzenia maszyn, zmian logistycznych w zakładzie, błędów ze strony pracowników itp. Im większy zakład pracy, tym większe tempo i dynamika tych zmian, a jednocześnie bardziej utrudniona kontrola nad nimi, co zwiększa poziom zagrożenia dla pracowników. Wyzwaniem jest także określenie wartości narażenia pracowników, którzy w trakcie zmiany w nie-

regularnych odstępach czasu przemieszczają się pomiędzy stanowiskami.

Skutecznym rozwiązaniem tego problemu może być ciągle monitorowanie parametrów środowiska pracy umożliwiające szybkie wykrycie obszarów o dużej emisji hałasu i dużym stężeniu pyłów oraz ich źródeł. W średnich i dużych zakładach pracy ze względu na dynamiczny charakter narażenia na te czynniki i znaczny teren obiektów najkorzystniejsze wydaje się zastosowanie bezprzewodowego transferu danych.

Zakres tematyczny artykułu obejmuje zagrożenia zdrowia oraz bezpieczeństwa i higieny środowiska pracy będące przedmiotem badań z zakresu nauk o zdrowiu oraz inżynierii środowiska.

BEZPRZEWODOWE SIECI SENSOROWE W MONITORINGU PARAMETRÓW ŚRODOWISKOWYCH

Nowoczesne systemy monitoringu w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego łączą pracę wielu czujników – od geotechnicznych, fizycznych, meteorologicznych po geodezyjne – sterują ich pracą oraz umożliwiają odczytywanie danych i przesyłanie ich do baz akwizycyjnych (serwerów gromadzących dane). Obecny postęp techniki, w szczególności związanej z automatyką, elektroniką i sensorami, umożliwił rozwój tzw. bezprzewodowych sieci sensorowych (WSN, Wireless Sensor Network), (Benini i in. 2006; Bensaleh i in. 2020; Gupta, Kumar 2013; Yang 2014).

Bezprzewodowe sieci sensorowe to grupa specjalistycznych sensorów oraz urządzeń wykonawczych wraz z infrastrukturą do komunikacji bezprzewodowej. Przeznaczone są one do monitorowania stanu układów fizycznych w różnych lokalizacjach, a często także sterowania nimi. W takich sieciach przekazywane są informacje i polecenia sterujące. Urządzenia będące częścią sieci sensorowych nazywa się węzłami sieci, przy czym każdy węzeł jest połączony z co najmniej

jednym innym węzłem. Węzły sieci mogą pełnić w niej różne funkcje, w tym: układów wykonawczych, sensorów, routerów, repeaterów, bram sieciowych itd. Węzły zbudowane są m.in. z przetworników, mikrokontrolerów i układów bezprzewodowego transferu danych. Połączenie WSN z siecią Internet umożliwia przesyłanie danych do odpowiednich programów lub chmur obliczeniowych (w celu ich przetwarzania i analizy), a ich użytkownikom daje zdalny dostęp do danych, nadzorowanie układu i wydawanie poleceń całej sieci sensorowej. Połączenie bezprzewodowych sieci sensorowych z Internetem zapoczątkowało tzw. Internet Rzeczy (IoT, Internet of Things), w którym maszyny komunikują się z maszynami (Advances... 2014; Gubbi i in. 2013; Miorandi i in. 2012). Rozwój WSN oraz IoT, a także ich zastosowanie w przemyśle doprowadziły do zmian określanych jako czwarta rewolucja przemysłowa lub Przemysł 4.0 (Brettel i in. 2014; Lasi i in. 2014).

BEZPRZEWODOWY TRANSFER DANYCH

Transfer (transmisja) jest procesem przesyłania wiadomości (danych) pomiędzy nadawcą (nadajnikiem) a adresatem (odbiorcą) za pomocą określonej metody, zrozumiałej dla obu stron, i po określonej drodze (tzw. medium transmisyjnym). Bezprzewodowy transfer danych może być prowadzony z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych lub dźwięku. W bezprzewodowych sieciach sensorowych jako medium transmisyjne wykorzystuje się fale elektromagnetyczne. Do telekomunikacji na podstawie częstotliwości różni się: podczerwień (IR), światło widzialne, ultrafiolet (UV), częstotliwości radiowe (RF) i mikrofal. W przypadku standardu IrDA wykorzystuje się fale w zakresie podczerwieni, jednak z uwagi na szereg ograniczeń jest to obecnie mało popularna metoda transferu danych. W przypadku mikrofal najczęściej stosowane są dwie częstotliwości: 2,4 GHz oraz 5 GHz. Pasma częstotliwości 2,4 GHz wykorzystuje standard Bluetooth (Bluetooth [BT] i Bluetooth Low Energy [BLE lub Bluetooth Smart]). To rozwijana obecnie przez Bluetooth Special Interest Group rodzina protokołów bazujących na standardzie IEEE 802.15.1, wykorzystywanych głównie do komunikacji na małej odległości. Z częstotliwości 2,4 GHz korzysta również standard ZigBee – bazujący na standardzie IEEE 802.14.4, stosowany w sieciach sensorowych WPAN, pracujący z małą przepustowością i małym zużyciem energii. Sieć Wi-Fi (*wireless fidelity*) jest zestawem standardów 802.11 stworzonych do budowy bezprzewodowych sieci komputerowych i działa w paśmie

częstotliwości 2400 ÷ 2485 MHz (2,4 GHz) lub 4915 ÷ 5825 MHz (5 GHz), (Clark 2001; Lee 1993). Wi-Fi bazuje na standardach IEEE 802.11a/b/g/n, które są podstawą współczesnych lokalnych sieci komputerowych cechujących się dużą przepustowością danych.

Do powszechnie stosowanych protokołów komunikacji bezprzewodowej należą także: Z-Wave, opracowany przez duńską firmę Zensys (nadzorowany przez Z-Wave Alliance), przeznaczony m.in. do zastosowania w automatyce domowej, Thread, bazujący na standardzie 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks), stosowany w sieciach sensorowych WLAN, oraz standard IEEE 802.15.6, cechujący się niezwykle małym poborem mocy i wysokim poziomem ochrony prywatności.

Do bezprzewodowego transferu danych na większe odległości lub do tworzenia sieci rozległych (WAN) w sieciach sensorowych coraz powszechniej wykorzystuje się protokół komunikacji bezprzewodowej LoRa (Long Range; inna nazwa LoRaWAN – LoRa Wide Area Network). Protokół do przesyłania danych wykorzystuje subgigahercowe pasma radiowe ISM: 169 MHz, 433 MHz i 868 MHz. Protokół umożliwia transfer z niewielką szybkością (0,3 ÷ 37,5 kb/s), ale za to na duże odległości (10 ÷ 15 km pomiędzy stacjami bazowymi).

LOKALIZACJA OBIEKTÓW W PRZESTRZENI

Lokalizacja w przestrzeni, czyli pozycjonowanie obiektów, jest wyzwaniem znacznie trudniejszym niż bezprzewodowy transfer danych i pomiar czynników szkodliwych w środowisku pracy. Możliwe jest opisanie pozycji tylko względem niektórych punktów odniesienia. Punktami odniesienia mogą być konkretne miejsca, niektóre satelity na niebie, a nawet gwiazda północna. Do precyzyjnego pozycjonowania stosuje się tzw. kotwice (*anchors*). Za pomocą trzech kotwic można opisać

dwuwymiarowy układ współrzędnych, w którym określamy pozycję obiektu. Do pozycjonowania trójwymiarowego potrzeba czterech kotwic.

Do popularnych sposobów lokalizacji (wraz ze stosowanymi punktami odniesienia) można zaliczyć:

- triangulację za pomocą kotwic; względem odległości od nadajników określonej na podstawie mocy sygnału (z nadajników Bluetooth czy Wi-Fi),

- triangularyzację z zastosowaniem GPS (Global Positioning System) za pomocą kotwic; względem odległości od nadajników (satelit) określanej na podstawie czasu dotarcia sygnału,
- obraz wideo rejestrowany przez kamerę z określoną orientacją,
- kompas cyfrowy bazujący na wektorze pola magnetycznego,
- nawigację zliczeniową (inercyjną), w której pozycję ustala się przez obliczenie przebytej drogi lub kroków od ostatniej pozycji obserwowanej (z uwzględnieniem przyspieszenia i prędkości kątowej).

ZASTOSOWANIE I PRZYKŁADY WSN

Obecnie bezprzewodowe sieci sensorowe znajdują szereg zastosowań, np. w planowaniu i nadzorowaniu przepływu towarów, automatyzacji i monitorowaniu procesów przemysłowych, a także monitorowaniu stanu pacjentów, środowiska czy też hodowli i upraw. Włączenie WSN do Internetu Rzeczy pozwala na sterowanie pojazdami, temperaturą, wilgotnością, oświetleniem i wentylacją pomieszczeń oraz zarządzanie ruchem w miastach (Bensaleh 2020; Jovašević-Stojanović i in. 2015; Yang 2014).

Do przykładów bezprzewodowych sieci sensorowych należą: układ nadajników i odbiorników RFID (*radio-frequency identification*) wykorzystujących fale radiowe do przesyłania danych do monitoringu środowiskowego (Kantareddy i in. 2018), społecznościowe sieci miejskiego monitoringu

powietrza przesyłające dane z mobilnych mierników środowiskowych za pomocą sieci Wi-Fi do wspólnego serwera danych (Jovašević-Stojanović i in. 2015), sieci monitoringu hałasu wykorzystujące radiowy transfer danych (Mydlarz i in. 2017; Wessels, Basten 2016), niskokosztowe mobilne sensory toksycznych gazów połączone siecią telefoniczną (Lin, Swager 2018), flota dronów wykorzystująca technologię RFID do kontroli stanu magazynów (Hardesty 2017) oraz układ beaconów BLE (Bluetooth Low Energy) ułatwiający osobom niewidomym poruszanie się wewnątrz budynków dzięki aplikacji do smartfonów (Nauka w Polsce 2018).

MATERIAŁ TESTOWY

Problemem podejmowanym w niniejszym artykule jest regularne monitorowanie szkodliwych czynników (stężenia pyłów i natężenia hałasu) w średnim lub dużym zakładzie przemysłowym. Podczas monitoringu niezbędne jest ustalenie poziomów zagrożenia, czyli warunku monitoringu, oraz ustalenie sposobu informowania o zagrożeniu. System powinien składać się minimum z dwóch podsystemów: obserwacyjnego i ostrzegawczego. Ponieważ celem jest przygotowanie systemu monitoringu dużego terenu (zakładu pracy), najważniejszymi kryteriami są niski koszt sensorów (mierników) układu pomiarowego oraz dokładność pomiarów i stabilność pracy w dużym zakresie wilgotności bezwzględnej i temperatury powietrza. Znaczenie

mają również niski koszt urządzeń lokalizacyjnych (których ilość zależy od wielkości zakładu i liczby miejsc strategicznych, wyznaczonych np. przez służby BHP), sprawny transfer danych na duże odległości, bezpieczeństwo transferu danych oraz odpowiedni program do wizualizacji danych (mapowania zagrożeń).

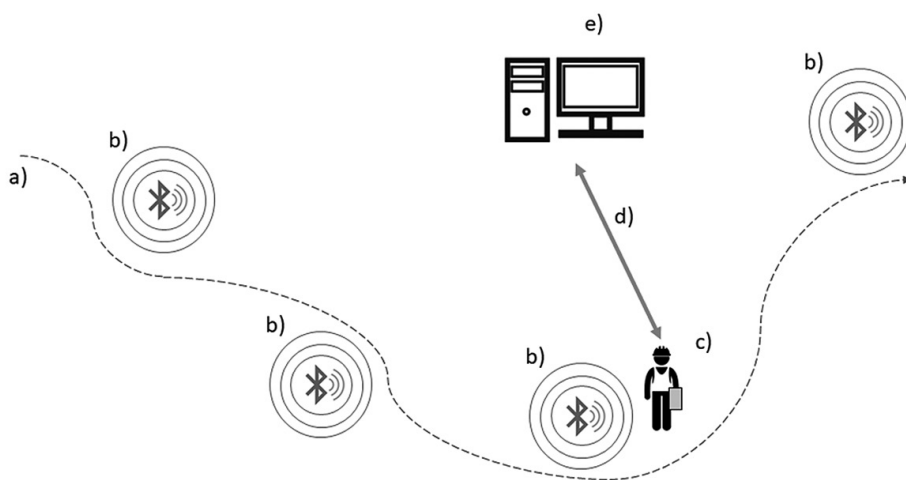
Proponowane rozwiązanie składa się z dwóch podsystemów: obserwacyjnego i ostrzegawczego. Struktura systemu została w sposób uproszczony przedstawiona na rycinie 1.

Podsystem obserwacyjny składa się z dwóch podstawowych elementów: przenośnej stacji pomiarowej z miernikami środowiskowymi i beaconów Bluetooth LE.

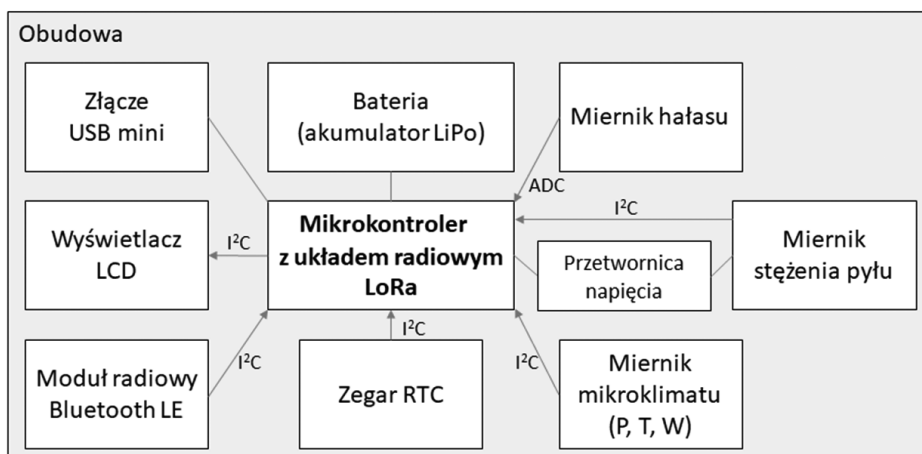
Stacja pomiarowa ma zapewnić pomiar stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy, przesyłanie wyników pomiarów do centrali, odczyt sygnałów z beaconów w celu oceny położenia oraz informowanie (na wyświetlaczu) pracownika w czasie rzeczywistym o wartościach narażenia. Przenośna stacja pomiarowa zawiera sensory czynników środowiskowych (miernik stężenia liczbowego pyłu zawieszonego, miernik mikroklimatu, mikrofon) oraz dodatkowe układy peryferyjne zapewniające jego funkcjonowanie jako całości. Najważniejszymi kryteriami wyboru mierników jest ich niski koszt przy relatywnie wysokiej dokładności pomiarów i stabilności pracy w dużym zakresie wilgotności bezwzględnej oraz temperatury powietrza. Miernik pyłu wybrano na podstawie

przeglądu literatury (AQ-SPEC 2021; Clements i in. 2017; Jerrett i in. 2005; Jovašević-Stojanović i in. 2015; Lewis i in. 2016; McKercher i in. 2017) i badań własnych (Jakubiak i in. 2019), zaś miernik hałasu wybrano na podstawie własnego doświadczenia i prowadzonych wcześniej prac naukowych. Podstawowy schemat blokowy przenośnej stacji pomiarowej wraz ze sposobem łączenia elementów przedstawiono na rycinie 2.

Funkcję odbierania i archiwizacji danych pełni jednostka akwizycyjna podsystemu ostrzegawczego. Wyniki są zbierane przez serwer korzystający z systemu Raspberry Pi4, a następnie nakładane na mapę w odpowiednim programie wizualizacji danych pełniącym funkcję informacyjno-ostrzegawczą.



Rycina 1. Podstawowa struktura systemu monitorowania zagrożeń pyłowych i akustycznych: a) trasa obchodu pracownika, b) beacony BLE, c) pracownik podczas obchodu wyposażony w przenośną stację pomiarową, d) połączenie bezprzewodowe LoRa, e) serwer oraz komputer z programem interpretującym dane



Rycina 2. Schemat blokowy przenośnej stacji pomiarowej

METODY BADAWCZE

Badanie miernika pyłu przeprowadzono pod względem rejestrowania rozkładów wymiarowych drobnych cząstek PM1 oraz PM2.5. Miernik testowano z zastosowaniem trzech rozmiarów cząstek testowych (monodispersyjne, sferyczne cząstki lateksowe o średnicach: 0,404; 1,1 oraz 3,0 μm ; Particle Counter Size Standards, Duke Scientific Corporation certyfikowane w NIST), które w wodnej zawieszynie wprowadzano osobno dla każdego testu do nebulizatora. Pomiary prowadzono przez co najmniej 20 min dla każdego z wymiarów cząstek testowych. Następnie przez nebulizator przepuszczono czyste powietrze porywające cząstki testowe wraz z kropelkami wody. Taki aerozol był prowadzony do pieca usuwającego wilgoć ze strumienia. Miernik stężenia pyłów Sensirion SPS30 znajdował się w komorze poboru pyłów.

Schemat stanowiska do testowania miernika stężenia pyłów Sensirion SPS30 pod względem rozkładu wielkości cząstek testowych przedstawiono na rycinie 3.

Do testów miernika hałasu przyjęto, że układ pomiarowy do oszacowania zagrożenia hałasem w środowisku pracy powinien umożliwiać pomiar poziomu dźwięku w zakresie co najmniej 75 ÷ 115 dB. Na rycinie 4 przedstawiono schemat blokowy analogowego układu pomiarowego hałasu. W układzie zastosowano mikrofon elektretowy typu ABM-713-RC. Sygnał z mikrofonu pomiarowego jest wzmacniany, a następnie podlega korekcji częstotliwościowej z zastosowaniem pasywnego filtra korekcyjnego o charakterystyce częstotliwościowej A. Ze względu na znaczące tłumienie filtra pasywnego sygnał na jego wyjściu jest wzmacniany w układzie wzmacniacza

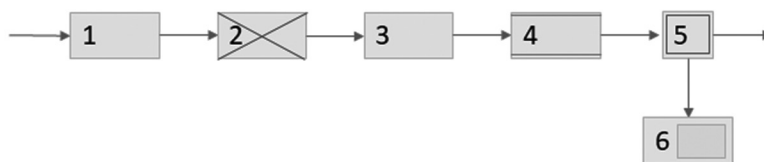
sygnału, po czym wyznaczana jest jego wartość skuteczna z zastosowaniem scalonego przetworznika wartości skutecznej (RMS) typu LTC1966. Ostatni z bloków układu to dolnoprzepustowy aktywny filtr wyjściowy, realizujący uśrednianie sygnału wyjściowego ze stałą czasową 1 s. Wartość napięcia na wyjściu układu pomiarowego jest proporcjonalna do wartości ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A. Na jego podstawie można wyznaczyć interesującą nas wartość poziomu dźwięku A zgodnie z zależnością (1):

$$L_{pA} = 20 \log \left(\frac{U_w / s_m}{p_0} \right) = 20 \log \left(\frac{U_w}{p_0 \cdot s_m} \right) \quad (1)$$

gdzie U_w jest wartością napięcia wyjściowego z układu w mV, s_m stałą dla danego układu skutecznością przetwarzania ciśnienie–napięcie, wyrażoną w mV/Pa, a p_0 wartością ciśnienia odniesienia równą $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Ponieważ p_0 i s_m są wartościami stałymi, powyższą zależność można przekształcić do postaci (2):

$$L_{pA} = 20 \log \left(\frac{U_w}{p_0 \cdot s_m} \right) = 20 \log(U_w) + 20 \log \left(\frac{1}{p_0 \cdot s_m} \right) = 20 \log(U_w) + L_s \quad (2)$$

Wartość korekty związanej ze skutecznością przetwarzania L_s jest dla danego układu pomiarowego stała i zależy m.in. od skuteczności mikrofonu oraz od wzmacnień w torze przetwarzania. Wartość ta powinna być wyznaczona w procesie kalibracji układu pomiarowego. Analogowy układ pomiarowy o stałym zakresie pomiarowym kalibrowano

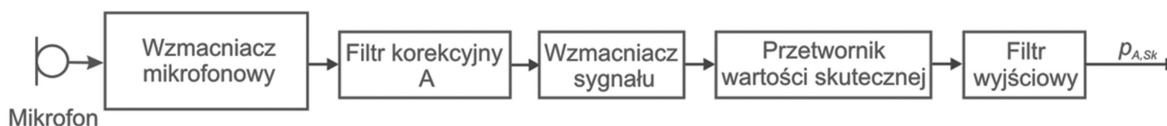


Rycina 3. Schemat stanowiska do testowania miernika stężenia pyłów pod względem rozkładu wielkości cząstek testowych: 1) kontroler objętościowego natężenia przepływu wprowadzanego powietrza, 2) filtr HEPA, 3) nebulizator z wodną zawieszyną cząstek testowych, 4) piec, 5) komora poboru aerozolu wraz z miernikiem stężenia pyłów, 6) laptop rejestrujący wyniki z miernika stężenia pyłów

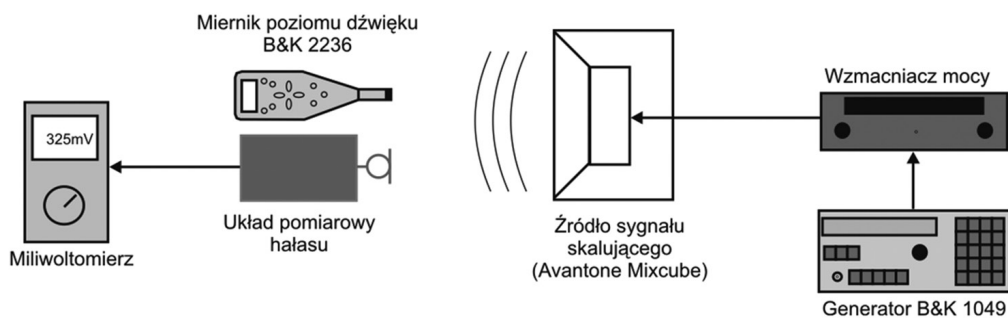
i badano w układzie pomiarowym, którego schemat przedstawiono na rycinie 5.

W układzie do kalibracji i badań układu pomiarowego hałasu generowano dźwięki testowe (w postaci szumu białego) o różnym poziomie ciśnienia akustycznego. Do generowania dźwięków testowych wykorzystano zestaw złożony z generatora Brüel & Kjær 1049, wzmacniacza mocy i głośnika Avantone Mixcube. W trakcie

badania mierzone z zastosowaniem miliwoltomierza napięcia na wyjściu układu pomiarowego hałasu i wyznaczano na jego podstawie poziom dźwięku A zgodnie z zależnością (2). Wyniki porównywano ze wskazaniem całkowitego miernika dźwięku klasy 1 typu Brüel & Kjær 2236 (wartość referencyjna), którego mikrofon umieszczono w pobliżu mikrofonu układu pomiarowego hałasu.



Rycina 4. Schemat blokowy analogowego układu pomiarowego hałasu o stałym zakresie pomiarowym



Rycina 5. Schemat układu pomiarowego do skalowania i badań układu pomiarowego hałasu

WYNIKI TESTU MIERNIKA PYŁU

Pomiary przeprowadzono względem czystego powietrza (z pominięciem nebulizatora) oraz cząstek testowych o wielkościach: 0,404; 1,1 i 3,0 μm . Miernik Sensirion SPS30 przedstawia stężenia liczbowe dla pięciu zakresów: 0,3 ÷ 0,5 μm (PM0.5); 0,3 ÷ 1 μm (PM1); 0,3 ÷ 2,5 μm (PM2.5); 0,3 ÷ 4 μm (PM4); 0,3 ÷ 10 μm (PM10), (May 2019). Podczas analizy wyników rozdzielono te zakresy (odejmując

od siebie poszczególne frakcje) na kanały wymiarowe: 0,3 ÷ 0,5 μm ; 0,5 ÷ 1 μm ; 1 ÷ 2,5 μm ; 2,5 ÷ 4 μm ; 4,0 ÷ 10 μm , aby sprawdzić, które z nich zarejestrują cząstki. Ponieważ stężenia były zmienne w czasie, wyniki znormalizowano do zakresu 0-1, przy czym 0 pokazywało brak w danym kanale zliczeń, a 1 oznaczało zliczenia tylko w tym kanale. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Rozkład wielkości cząstek w pięciu kanałach wymiarowych miernika pyłu dla pięciu wariantów pomiarowych

Aerazol testowy	Rozkład wielkości cząstek; miernik pyłu				
	0,3 ÷ 0,5 μm	0,5 ÷ 1 μm	1 ÷ 2,5 μm	2,5 ÷ 4 μm	4 ÷ 10 μm
Czyste powietrze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,404 μm	0,82	0,16	0,02	0,00	0,00
1,100 μm	0,37	0,39	0,20	0,03	0,00
3,000 μm	0,31	0,43	0,23	0,03	0,00

Podczas przepuszczania czystego powietrza układ nie generował żadnych szumów rejestrowalnych dla miernika, stąd zera w każdym kanale pomiarowym. W przypadku cząstek testowych o wielkości $0,404 \mu\text{m}$ znaczny udział zliczanych cząstek wynoszący 82% zarejestrowano w zakresie $0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$, a pozostały udział 15% zarejestrowano w zakresie $0,5 \div 1 \mu\text{m}$. Ten wynik może świadczyć o szumie ze strony nieodparowanych kropelek wody. Układ reagował na cząstki testowe o wielkości $1,1 \mu\text{m}$ głównie w zakresie $0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$, w którym udział zliczanych cząstek wyniósł 37%; w zakresie $0,5 \div 1 \mu\text{m}$ wyniósł 39%, zaś w zakresie $1 \div 2,5 \mu\text{m}$ wyniósł 23%. W przypadku testowych cząstek o wielkości $3,0 \mu\text{m}$ rozkład był podobny: w zakresie $0,3 \div 0,5 \mu\text{m}$ udział zliczanych cząstek wyniósł 31%, w zakresie $0,5 \div 1 \mu\text{m}$ wyniósł 43%, a w zakresie $1 \div 2,5 \mu\text{m}$ wyniósł 23%. Niewielki udział 3% zarejestrowano w zakresie $2,5 \div 4 \mu\text{m}$. W tym kanale wymiarowym udział powinien być znacznie wyższy.

Wyniki dla cząstek monodispersyjnych odpowiednio reagowały na rosnące stężenia cząstek i uznano je za akceptowalne do zastosowania miernika Sensirion SPS30 w przenośnej stacji pomiarowej.

Wyniki z miernika pyłu Sensirion SPS30 zostały porównane z wynikami spektrometru aerozoli MiniWRAS (Mini Wide Range Aerosol Spectrometer) firmy GRIMM (miernik referencyjny, wzorcowany okresowo). W komorze testowej został umieszczony miernik pyłu w prototypie stacji pomiarowej, spektrometr MiniWRAS oraz generator pyłu zawieszonego. Do wytworzenia pyłu zawieszonego wykorzystano pył ISO 12103-1 A2 Fine.

Stwierdzono wyraźne analogie w kształcie krzywych wartości stężeń pyłów zawieszonych. Oznacza to, że miernik pyłu w prototypie stacji pomiarowej reaguje na zmiany stężeń pyłów w sposób bardzo zbliżony do spektrometru MiniWRAS. Dodatkowo odległość między krzywą stężenia PM2.5 prototypu a krzywą stężenia PM2.5 spektrometru jest w przybliżeniu stała. Oznacza to, że gdy przyjmiemy spektrometr jako urządzenie wzorcowe, błąd procentowy popełniany przez miernik pyłu w prototypie stacji pomiarowej będzie oscylował wokół pewnej procentowej wartości. Po zastosowaniu kalibracji wartości średnich błędów procentowych dla obu testów wyniosły $-2,29 \div 2,29\%$.

WYNIKI TESTU MIERNIKA HAŁASU

W celu kalibracji układu pomiarowego hałasu wygenerowano sygnał testowy o ciśnieniu 1 Pa (94 dB) i na podstawie wskazań miliwoltomierza wyznaczono wartość korekty L_s wynoszącą 57,42 dB. Następnie dokonano pomiarów porównawczych poziomów dźwięku A dla różnych poziomów sygnału testowego. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2 i na rycinie 6.

Jak wynika z przedstawionych danych pomiarowych, różnice wyznaczonych za pomocą

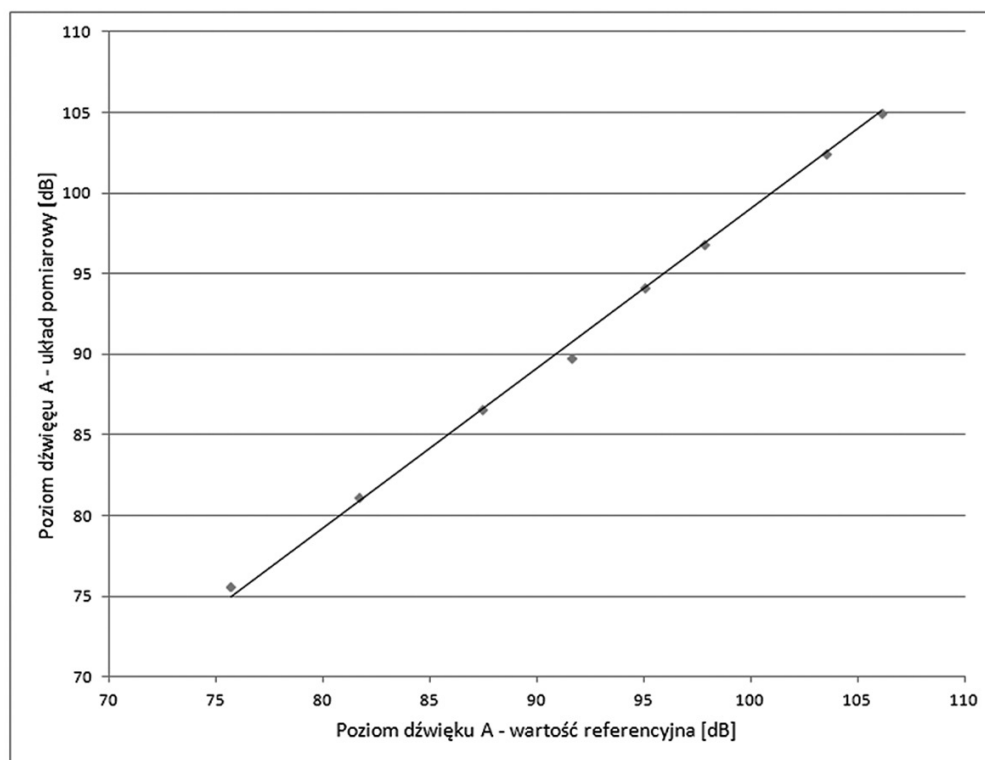
opracowanego układu pomiarowego poziomów dźwięku A w stosunku do miernika referencyjnego były mniejsze niż 1,8 dB. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że prawie wszystkie różnice były ujemne, co oznacza, że w kolejnych etapach zadania można zmniejszyć błąd pomiaru, korygując wartość stałej korekty związanej ze skutecznością przetwarzania L_s .

Tabela 2. Wyniki badań analogowego układu pomiarowego o stałym wzmacnieniu

Wartość referencyjna poziomu dźwięku A L_r , dB	Napięcie wyjściowe układu pomiarowego hałasu U_{wr} , mV	Wyznaczona (zgodnie z zależnością (2)) wartość zmierzonego poziomu dźwięku A L_z , dB	Błąd pomiaru ΔL
75,7	8,2	75,70	0
81,7	15,4	81,17	-0,53
87,4	29	86,67	-0,73

cd. tab. 2

Wartość referencyjna poziomu dźwięku A L_{ref} dB	Napięcie wyjściowe układu pomiarowego hałasu U_{out} mV	Wyznaczona (zgodnie z zależnością (2)) wartość zmierzonego poziomu dźwięku A L_{zr} dB	Błąd pomiaru ΔL
91,6	42	89,89	-1,71
95	68,9	94,19	-0,81
97,8	94	96,89	-0,91
103,5	180	102,53	-0,97
106,1	239	104,99	-1,11



Rycina 6. Wyniki badań układu pomiarowego hałasu

WYNIKI TESTU MIERNIKA MIKROKLIMATU

Test przeprowadzono dwukrotnie: wewnątrz oraz na zewnątrz laboratorium. Dla każdej z godzin wykonano po trzy pomiary w odstępie 1 min. Zestawienie uśrednionych wyników z pomiarów przedstawiono w tabeli 3.

Miernik BME280 wskazał o 0,11 ÷ 0,17% niższe ciśnienie atmosferyczne od wskazań termohi-

grobarometru LB 701 LAB-EL. Różnica we wskazaniach temperatury wyniosła -3,36 ÷ 1,61%. Wilgotność względna powietrza wskazana na mierniku BME280 była w badanych warunkach wyższa o 2,48 ÷ 3,34%.

Tabela 3. Wyniki testu miernika BME280 w odniesieniu do termohigrobarometru LB 701

Badane parametry	Wyniki badania			
	wewnątrz laboratorium		na zewnątrz laboratorium	
	BME280	LB 701	BME280	LB 701
Ciśnienie, hPa	1001,0±0,1	999,9±0,1	1003,1±0,1	1001,4±0,1
Temperatura, °C	22,5±0,2	22,8±0,3	16,4±0,3	15,9±0,1
Wilgotność względna, %	44,6±0,3	45,7±0,4	67,5±0,3	69,8±0,2

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych stwierdzono, że prototyp systemu monitorowania można stosować jako narzędzie do szybkiego i skutecznego reagowania na przekroczone wartości dopuszczalne narażenia na czynniki szkodliwe dla zdrowia (pyły i hałas) w zakładzie przemysłowym. Na obecnym etapie przenośna stacja pomiarowa rejestruje parametry środowiskowe: temperaturę, ciśnienie, wilgotność względną powietrza, stężenie pyłów zawieszonych (głównie PM2.5), poziom dźwięku A oraz datę i godzinę. Dane są wyświetlane na wyświetlaczu LCD stacji pomiarowej i przesyłane za pomocą modułu radiowego LoRa. Następnie są odczytywane przez odbiornik LoRa i wyświetlane po serialu w Arduino IDE. Moduły Bluetooth LE informują o sile sygnału między sobą. Odbiornik BLE jest w stanie programowo sortować nadajniki BLE po ich sile sygnału.

Testy stabilności pomiarów i badanie wpływu warunków środowiskowych (wilgotność

względna, temperatura powietrza) zostaną wykonane w wybranym zakładzie przemysłowym w kolejnym etapie badań.

Dzięki proponowanemu rozwiązaniu służby BHP otrzymają narzędzie do szybkiego i skutecznego reagowania na przekroczone wartości dopuszczalne narażenia na czynniki szkodliwe dla zdrowia, co przełoży się na zmniejszenie liczby osób narażonych i ograniczy liczbę przypadków występowania chorób zawodowych związanych z pyłami i hałasem.

Takie rozwiązanie ułatwi także ocenę stanu technicznego instalacji, ponieważ nadmierna emisja pyłów i/lub wysokie poziomy ekspozycji na hałas mogą być efektem rozszczelnień, nadmiernego ścierania się elementów bądź wadliwej pracy urządzeń mechanicznych. Dzięki wczesnej reakcji na nieprawidłowości w działaniu urządzeń można obniżyć koszty napraw instalacji przemysłowej.

INTRODUCTION

According to the Statistics Poland (GUS) data of 2018, of all the factors related to the working environment, the greatest hazard was posed by noise, with 186.3 thousand people (58.9% of all the employed under hazardous conditions related to the work environment) being endangered by it. The second most common harmful factor was dust, to which 50.4 thousand people (15.9%) were exposed (Statistics Poland, 2019).

Overexposure to noise can cause hearing loss i.e. one of the most common occupational diseases in Poland. At lower levels, noise is also a nuisance factor that impairs the ability to properly perform work requiring the concentration of attention (including work related to the control of industrial processes). Noise interferes with daily work activities, affects the operation of the endocrine and cardiovascular systems, and causes oxidative stress. What is more, it is a risk factor for hypertension (Ising, Kruppa, 2004; Münzel et al., 2018). (Road, air, and rail) transport noise and industrial (machinery) noise are the most burdensome types, with the machinery noise being the most varied.

In addition to causing discomfort, the exposure of workers to high levels of dust in the air can result in the loss of health. According to the World Health Organization, in Poland, airborne dust is responsible for reducing the average life expectancy by 6–12 months. Even short-term exposure to high concentrations of micrometre-sized dust particles increases the number of deaths due to respiratory and cardiovascular diseases. Coarse particulate matter (PM₁₀, the inhalable fraction) can penetrate into the lungs but it mainly accumulates in the upper section of the respiratory tract, from which it is expelled. Fine particulate matter (PM_{2.5}, the respirable fraction) penetrates deep into the respiratory system: it settles on the pulmonary alveolar walls, where it accumulates and impairs gas exchange. The health effects of dust usually become apparent after a latency period in the form of respiratory diseases including tumours, upper respiratory tract inflammations, pneumoconiosis, and the pathological proliferation of the connective tissue (Więcek, 2011). High levels and intensities of harmful factors such as noise

and dust can also contribute to a reduction in labour productivity, and reduce the employees' well-being, which translates into the functioning of the work establishment and the wealth of society.

In order to prevent the occurrence of dust and acoustic hazards, a variety of organisational control measures (e.g. rest breaks, staff turnover, robotic automation to move the worker away from hazard sources, etc.), collective protection measures (e.g. those involving the elimination, reduction, or containment of harmful factor sources) and personal protection equipment (the use of appropriate personal protection measures). Despite regular measurements of harmful factors in the working environment, which are obligatory under the labour law, there are cases when employees, OSH services and employers are not aware of all hazards occurring in the work establishment. The intensities and concentrations of harmful factors may also be subject to change due to machinery wear or damage, logistical changes in the work establishment, personnel errors, etc. The larger the work establishment, the higher the pace and dynamics of these changes, and the more difficult their surveillance is, which increases the level of hazard to the employees. Another challenge is to determine the exposure value for workers who move between positions during the shift at irregular intervals.

This problem can be solved through continuous monitoring of the working environment parameters, which enables the quick detection of areas with high noise emissions and high concentrations of dust and their sources. In medium- and large-sized work establishments, due to the dynamic nature of the exposure to these factors and the significant area of the facilities, wireless data transfer seems to be the most advantageous solution.

This article discusses the problems of occupational safety and health, which are covered by health sciences and environmental engineering.

WIRELESS SENSOR NETWORKS IN THE ENVIRONMENTAL PARAMETER MONITORING

Modern real-time (or near real-time) monitoring systems combine the operation of many sensors, from geotechnical, physical, and meteorological to geodetic ones, to control their operation and enable data reading and transmission to acquisition bases (data collection servers). The current advances in technology, particularly those related to automation, electronics, and sensors, have enabled the development of the so-called wireless sensor networks (WSN) (Benini et al., 2006; Bensaleh et al., 2020; Gupta, Kumar, 2013; Yang, 2014).

Wireless sensor networks are a group of specialised sensors and actuators along with the wireless communication infrastructure, which are designed to monitor the condition of physical systems in various locations, and often to control them as well. In these networks, information and control commands are transmitted. Devices that are part of sensory networks are called network nodes, with each node being connected to at least one other node. The nodes of the network can

perform various functions in it, including those of actuators, sensors, routers, repeaters, gateways, etc. The nodes are built e.g. from transducers, microcontrollers, and wireless data transfer systems. The connection of the WSN to the Internet enables data to be transferred to relevant programs or computing clouds (for their processing and analysis), and provides their users with the remote access to data, surveillance of the system, and issuing commands to the entire sensory network. The connection of wireless sensor networks with the Internet has initiated the so-called Internet of Things (IoT), in which machines communicate with machines (Advances..., 2014; Gubbi et al., 2013; Miorandi et al., 2012). The development of WSN and IoT, and their application in industry have resulted in changes referred to as the fourth industrial revolution or Industry 4.0 (Brettel et al., 2014; Lasi et al., 2014).

WIRELESS DATA TRANSFER

A transfer (transmission) is a process of sending messages (data) between a sender (transmitter) and an addressee (receiver) by a specific method that is understood by both parties, and along a specified path (the so-called transmission medium). Wireless data transfer can be carried out using electromagnetic waves or sound. In wireless sensor networks, electromagnetic waves are used as the transmission medium. For frequency-based telecommunications, the following are distinguished: infrared (IR), visible light, ultraviolet (UV), radio frequencies (RF), and microwaves. As for the IrDA standard, infrared waves are used, but due to numerous constraints, this is currently not a very popular data transfer method. As regards microwaves, two frequencies are used most commonly: 2.4 GHz and 5 GHz. The 2.4 frequency band is used by the Bluetooth standard (Bluetooth [BT] and Bluetooth Low Energy [BLE or Bluetooth Smart]). This is a family of protocols currently

developed by the Bluetooth Special Interest Group, based on the IEEE 802.15.1 standard and used mainly for short-distance communication. The 2.4 GHz frequency is also used by the ZigBee standard based on the IEEE 802.14.4 standard, used in WPAN sensory networks, operating with low bandwidth and low power consumption. The Wi-Fi (wireless fidelity) network is a set of 802.11 standards established for the construction of wireless computer networks, which operates in a frequency band of 2400–2485 MHz (2.4 GHz) or 4915–5825 MHz (5 GHz) (Clark, 2001; Lee, 1993). Wi-Fi is based on IEEE 802.11 a/b/g/n standards which provide the foundation for modern local computer networks characterised by high data throughput.

The commonly used wireless communication protocols also include: Z-wave, developed by a Danish company Zensys (supervised by Z-Wave Alliance), designed e.g. for use in home automation; Thread, based on the

6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) standard, used in WLAN sensory networks; and the IEEE 802.15.6 standard characterised by extremely low power consumption and a high privacy protection level.

For wireless data transfer over longer distances, or for creating wide area networks (WAN) in sensory networks, the LoRa (Long Range; also known as LoRaWAN - LoRa Wide Area Network)

wireless communication protocol is becoming more widely used. For the transmission of data, the protocol uses sub-gigahertz ISM radio bands: 169 MHz, 433 MHz, and 868 MHz. The protocol enables transfer at a low speed ($0.3 \div 37.5$ kb/s) but over long distances (10 ÷ 15 km between base stations).

THE LOCATION OF OBJECTS IN SPACE

The location in space i.e. the positioning of objects is a challenge much more difficult than wireless data transfers or the measurement of harmful factors in the working environment. It is possible to describe a position only in relation to certain reference points which can be specific places, certain satellites in the sky, and even the North Star. The so-called anchors are used for precise positioning. Three anchors can be used to describe a two-dimensional coordinates system in which the position of an object is determined. Four anchors are required for three-dimensional positioning.

Popular location methods (along with the reference points applied) include:

- triangulation using anchors; in relation to the distance from transmitters, determined based on the signal strength (from Bluetooth or Wi-Fi transmitters),

- triangulation using GPS (Global Positioning System) by means of anchors; in relation to the distance from transmitters (satellites), determined based on the signal arrival time,
- a video image recorded by a camera with a specific orientation,
- a digital compass based on a magnetic field vector,
- dead reckoning, or inertial navigation in which the position is determined by calculating the distance covered or the steps from the last observed position (taking into account the acceleration and angular velocity).

THE APPLICATION AND EXAMPLES OF WSN

Currently, wireless sensor networks are used in numerous applications e.g. in the planning and supervising of the flow of goods, automation of and monitoring the industrial processes, and monitoring the condition of patients, the environment, or breeding and crops. The integration of WSN into the Internet of Things enables the control of vehicles, temperature, humidity, lighting and ventilation of rooms, and traffic management in cities (Bensaleh, 2020; Jovašević-Stojanović et al., 2015; Yang, 2014).

Examples of wireless sensor networks include: a system of transmitters and receivers known as RFID (radio-frequency identification), using radio waves

to transfer data to the environmental monitoring (Kantareddy et al., 2018); community-based urban air monitoring networks that transfer data from mobile environmental meters using the Wi-Fi network to a shared data server (Jovašević-Stojanović et al., 2015); noise monitoring networks using radio data transfer (Mydlarz et al., 2017; Wessels, Basten, 2016); low-cost mobile toxic gas sensors connected by a telephone network (Lin, Swager, 2018); a fleet of drones using the RFID technology for inventory inspections (Hardesty, 2017); and a system of BLE (Bluetooth Low Energy) beacons to help blind people move around inside buildings thanks to a smartphone application (Nauka w Polsce, 2018).

TEST MATERIAL

The issue addressed in this article is the regular monitoring of harmful factors (dust concentrations and noise levels) in a medium- or large-sized industrial plant. During the monitoring, it is necessary to determine both the hazard levels i.e. the monitoring condition, and the method of hazard notification. The system should be comprised of at least two subsystems: for the observation and warning purposes. Since the aim is to develop a monitoring system for a large area (work establishment), the most important criteria include the low cost of sensors (meters) of the measuring system as well as the accuracy of measurements and the stability of operation within a wide range of absolute humidity and air temperature. What is also important is the low cost of location devices (the number of which is determined by the size of the work establishment and the number of strategic sites designated e.g. by the OSH services), efficient data transfer over long distances, security of data transfer, and an appropriate program for data visualisation (hazard mapping).

The proposed solution comprises an observation subsystem and a warning subsystem. The structure of the system is presented in a simplified manner in Figure 1.

The observation subsystem consists of two basic components: a portable measuring station

with environmental meters and Bluetooth LE beacons.

The measuring station is intended to ensure the measurement of concentrations and intensities of harmful agents in the working environment, transmission of measurement results to the central unit, the reading of signals from the beacons in order to assess the position, and informing the employee in real time (on the display) about the exposure values. The portable measuring station contains sensors of environmental factors (a particulate matter numerical concentration meter, a microclimate meter, and a microphone) as well as additional peripheral systems to ensure its operation as a whole. The most important criteria for the choice of meters include their low cost along with relatively high measurement accuracy and stability of operation within a wide range of absolute humidity and air temperature. The dust meter was selected based on the literature review (AQ-SPEC, 2021; Clements et al., 2017; Jerrett et al., 2005; Jovašević-Stojanović et al., 2015; Lewis et al., 2016; McKercher et al., 2017) and the authors' own research (Jakubiak et al., 2019), while the noise meter was selected based on own experience and previously conducted scientific work. A basic block diagram of the portable

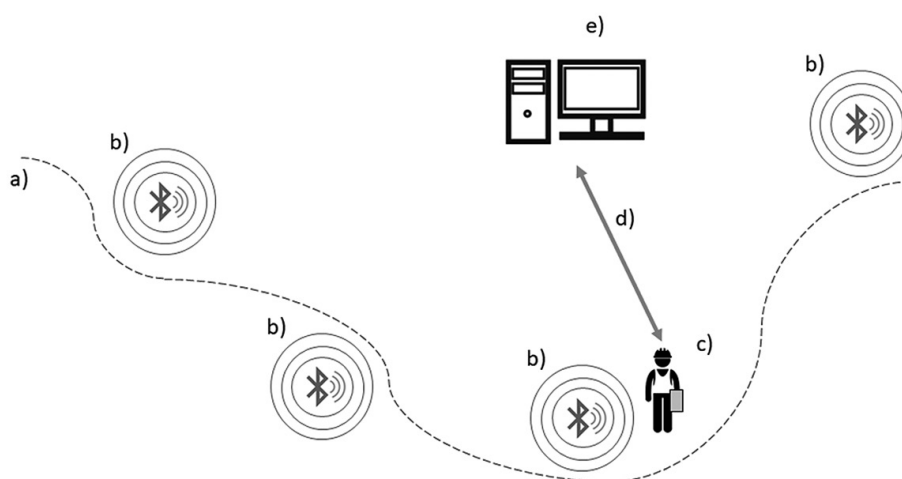


Figure 1. The basic structure of the dust and acoustic hazard monitoring system: a) the employee's round route, b) BLE beacons, c) an employee during the round, equipped with a portable measurement station, d) LoRa wireless connection, e) a server and computer with data interpretation software

measuring system along with the method for connecting components is provided in Figure 2.

The data acquisition unit of the warning subsystem serves the data reception and archiving function. The results are collected by a server using

the Raspberry Pi4 system, and then superimposed on a map in an appropriate data visualisation program serving the information and warning function.

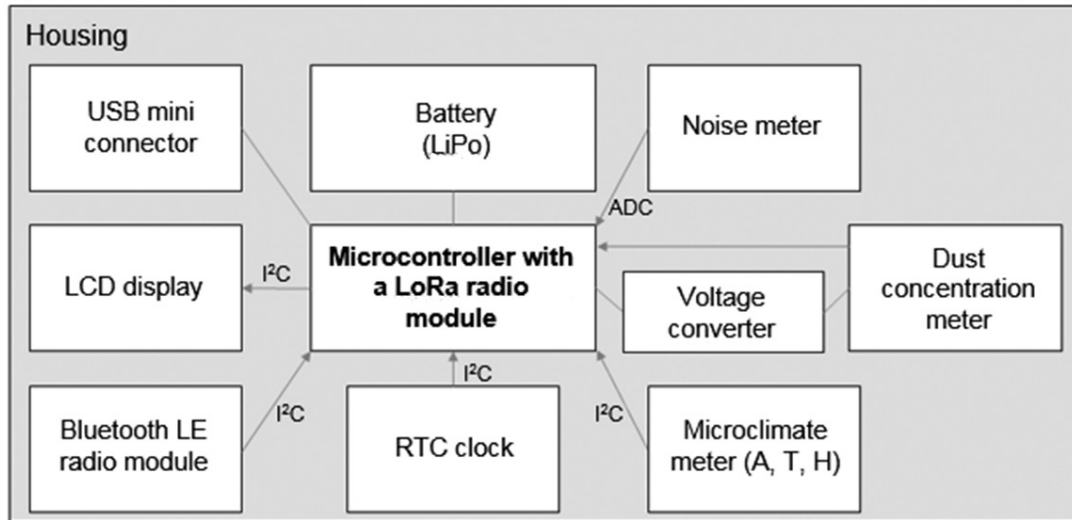


Figure 2. A block diagram of the portable measurement station

TESTING METHODS

The dust meter testing was conducted in terms of recording the dimensional distributions of fine particles PM1 and PM2.5. The meter was tested using three test particle sizes (monodisperse, spherical latex particles with diameters of 0.404; 1.1, and 3.0 μm ; Particle Counter Size Standards, Duke Scientific Corporation certified in NIST), which were introduced in water suspension into the nebuliser, separately for each test. The measurements were carried out for at least 20 minutes for each test particle dimension. Then,

pure air entraining the test particles along with water droplets was passed through the nebuliser. This aerosol was fed to an oven removing moisture from the stream. A Sensirion SPS30 dust concentration meter was located in the dust collection chamber.

A diagram of the bench for testing the Sensirion SPS30 dust concentration meter in terms of the test particle size distribution is shown in Figure 3.

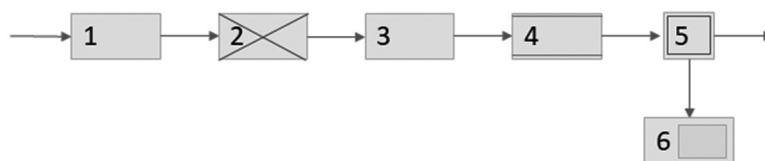


Figure 3. A diagram of the bench for testing the dust concentration meter in terms of the test particle size distribution: 1) incoming air volume flow rate controller, 2) HEPA filter, 3) nebuliser with test particle aqueous suspension, 4) oven, 5) aerosol collection chamber with dust concentration meter, 6) laptop recording the results from dust concentration meter

For the noise meter testing, it was assumed that the measurement system for estimating the noise hazard in the working environment should enable the measurement of noise levels within the range of at least 75–115 dB. Figure 4 shows a block diagram of the analogue noise measurement system. An ABM-713-RC-type electret microphone was used in the system. Signal from the measuring microphone is amplified, and then frequency corrected using a passive correction filter with A-weighted frequency characteristics. Due to the considerable attenuation of the passive filter, the signal at its output is amplified in the signal amplifier system, and its rms value is determined using an integrated LTC1966-type RMS transmitter. The last block of the system is a low-pass active output filter that averages the output signal with a time constant of 1 s. The voltage value at the output of the measurement system is proportional to the A-weighted sound pressure level value. On its basis, the A-weighted sound level value of interest can be determined according to the relationship (1):

$$L_{pA} = 20 \log \left(\frac{U_w / s_m}{p_0} \right) = 20 \log \left(\frac{U_w}{p_0 \cdot s_m} \right) \quad (1)$$

where U_w is the value of output voltage from the system, expressed in mV; s_m is the pressure-voltage conversion efficiency, constant for a particular system, and expressed in mV/Pa; and p_0 is the reference pressure value equal to $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Since p_0 and s_m are constant values, the above relationship can be converted into the form of (2):

$$L_{pA} = 20 \log \left(\frac{U_w}{p_0 \cdot s_m} \right) = 20 \log(U_w) + 20 \log \left(\frac{1}{p_0 \cdot s_m} \right) = 20 \log(U_w) + L_s \quad (2)$$

The value of the correction related to the L_s conversion efficiency is constant for a particular measurement system, and is determined e.g. by the microphone efficiency and the amplifications in the conversion circuit. This value should be determined in the measurement system calibration process. An analogue measurement system with a fixed measuring range was calibrated and tested in the measurement system, the diagram of which is presented in Figure 5.

The system for calibration and testing of the noise measurement system was used to generate test sounds (in the form of white noise) with different sound pressure levels. To generate the test sounds, a set consisting of a Brüel & Kjær 1049 generator, a power amplifier, and an Avantone Mixcube speaker were used. During the tests, the voltage values were measured at the noise measurement system outlet using a millivolt meter, and the sound level A was determined on its basis according to the relationship (2). The results were compared with the indications of a Brüel & Kjær 2236-type, class 1 integrating sound meter (the reference value), the microphone of which was located near the noise measurement system microphone.

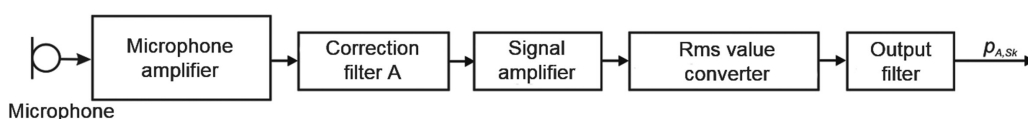


Figure 4. A block diagram of an analogue noise measurement system with a fixed measuring range

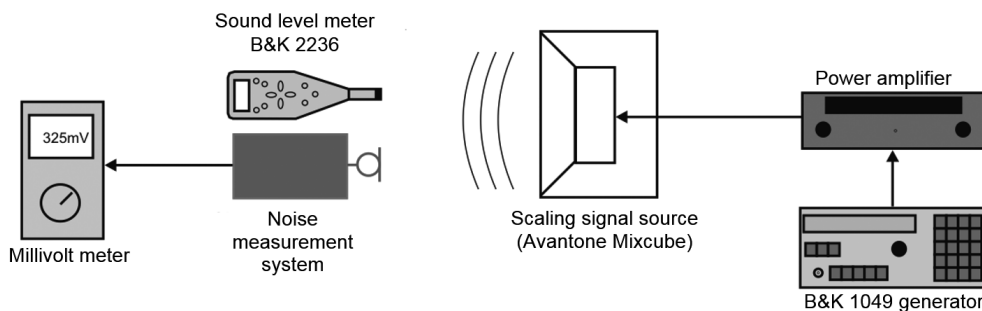


Figure 5. A diagram of the measurement system for the noise measurement system scaling and testing

DUST METER TEST RESULTS

The measurements were performed with respect to clean air (bypassing the nebuliser) and test particles with the following values: 0.404; 1.1; and 3.0 μm . The Sensirion SPS30 meter presents numerical concentrations for five ranges: 0.3–0.5 μm (PM0.5); 0.3–1 μm (PM1); 0.3–2.5 μm (PM2.5); 0.3–4 μm (PM4); 0.3–10 μm (PM10), (May, 2019). During the result analysis, these ranges were separated (by subtracting individual fractions from each other) into dimensional channels: 0.3–0.5 μm ; 0.5–1 μm ; 1–2.5 μm ; 2.5–4 μm ; 4.0–10 μm , to check which of them will record the particles. Since the concentrations were varying over time, the results were standardised to the range of 0-1, with 0 showing no counts in a particular channel, and 1 indicating counts only in this channel. The measurement results are provided in Table 1.

When passing clean air, the system did not generate any noises that the meter was able to record, hence the zeros in each measuring channel. As for test particles with a size of 0.404 μm , a significant (82%) proportion of the calculated particles was recorded within the range of 0.3–0.5 μm , and the remaining proportion of 15% was recorded within the range of 0.5–1 μm . This result may be indicative of noise from unevaporated water droplets. The system responded to test particles with a size of 1.1 μm mostly within the range of 0.3–0.5 μm , in which the percentage of the calculated particles was 37%, while within the range of 0.5–1 μm it was 39%, and within the range of 1–2.5 μm it was 23%. As for test particles with a size of 3.0 μm , the distribution was similar: within the range of 0.3–0.5 μm , the proportion of the calculated particles was 31%, while within the range of 0.5–1 μm , it was 43%, and within the range of 1–2.5 μm , it was 23%. A small percentage of 3%

was recorded within the range of 2.5–4 μm . In this dimensional channel, the proportion should be much higher.

The results for monodisperse particles responded adequately to increasing particle concentrations, and were considered acceptable for the use of a Sensirion SPS30 meter in the portable measurement station.

The results obtained from the Sensirion SPS30 dust meter were compared to the results obtained from a MiniWRAS (Mini Wide Range Aerosol Spectrometer) aerosol spectrometer manufactured by GRIMM (periodically calibrated reference meter). A dust meter in the measurement station prototype, a MiniWRAS spectrometer, and a particulate matter generator were placed in the test chamber. The ISO 12103-1 A2 Fine dust was used to produce the particulate matter.

Clear analogues were found in the shape of the curves of the particulate matter concentration values. This means that the dust meter in the measurement station prototype responds to changes in dust concentrations in a manner very similar to that of the MiniWRAS spectrometer. In addition, the distance between the PM2.5 concentration curve of the prototype and the PM2.5 concentration curve of the spectrometer is approximately constant. This means that when a spectrometer is assumed to be a reference device, the percentage error made by the dust meter in the measurement station prototype will oscillate around a certain percentage value. After applying calibration, the average percentage error values for both tests amounted to -2.29–2.29%.

Table 1. Particle size distribution in five dimensional channels of the dust counter for five measurement variants

Test aerosol	Particle size distribution; dust counter				
	0.3–0.5 μm	0.5–1 μm	1–2.5 μm	2.5–4 μm	4–10 μm
Clean air	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.404 μm	0.82	0.16	0.02	0.00	0.00
1.100 μm	0.37	0.39	0.20	0.03	0.00
3.000 μm	0.31	0.43	0.23	0.03	0.00

NOISE METER TEST RESULTS

In order to calibrate the noise measurement system, a test signal with a pressure of 1 Pa (94 dB) was generated, and based on the millivolt meter indications, the L_s correction value of 57.42 dB was determined. Then, comparative measurements of the A-weighted sound pressure levels were carried out for different test signal levels. The measurement results are provided in Table 2 and Figure 6.

As can be seen from the presented measurement data, the differences of the A-weighted sound

pressure levels determined using the developed measurement system in relation to the reference meter were lower than 1.8 dB. In addition, it should be noted that almost all differences were negative, which means that a measurement error can be reduced at the subsequent stages of the task by correcting the value of the constant correction related to the conversion efficiency L_s .

Table 2. Test results of an analog measurement system with constant gain

Sound "A" level reference value L_r dB	The output voltage of the noise measurement system U_{out} mV	Determined (according to equation (2)) value of the measured sound level „A” $L_{r'}$ dB	Measurement error ΔL
75.7	8.2	75.70	0
81.7	15.4	81.17	-0.53
87.4	29	86.67	-0.73
91.6	42	89.89	-1.71
95	68.9	94.19	-0.81
97.8	94	96.89	-0.91
103.5	180	102.53	-0.97
106.1	239	104.99	-1.11

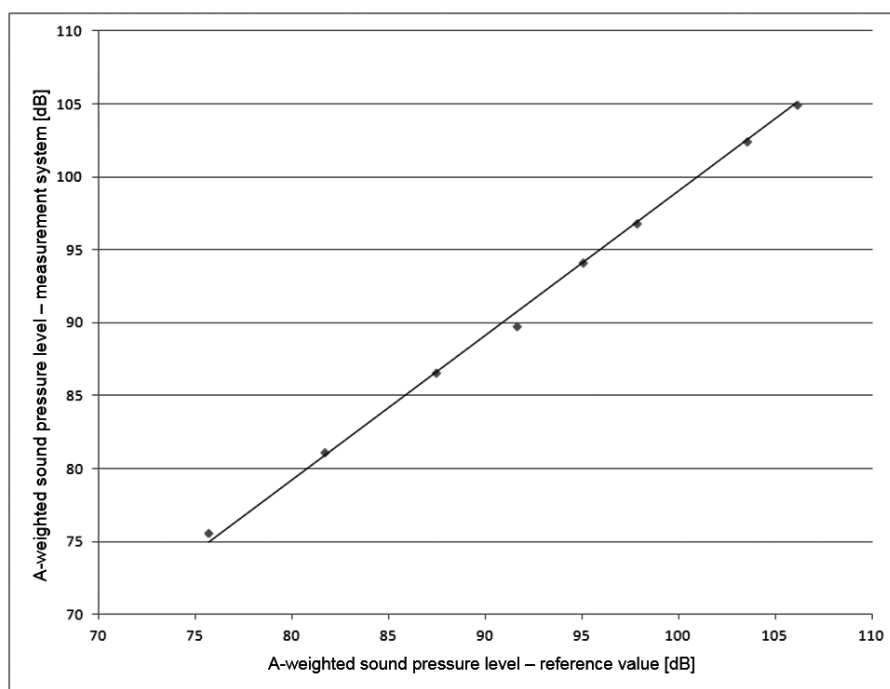


Figure 6. The results of noise measurement system tests

MICROCLIMATE METER TEST RESULTS

The test was conducted twice: inside and outside the laboratory. Three measurements were performed for each hour with a spacing of 1 minute. The list of averaged measurement results is presented in Table 3.

The BME280 meter indicated the atmospheric pressure being lower by 0.11–0.17% than the indications of the LB 701 LAB-EL

thermohygrobarometer. The difference in temperature indications was –3.36–1.61%. The relative air humidity value indicated on the BME280 meter was higher by 2.48–3.34% under the test conditions.

Table 3. Test results of the BME280 meter in relation to the LB 701 thermohygrobarometer

Parameters	Test results			
	inside the laboratory		outside the laboratory	
	BME280	LB 701	BME280	LB 701
Pressure, hPa	1001.0±0.1	999.9±0.1	1003.1±0.1	1001.4±0.1
Temperature, °C	22.5±0.2	22.8±0.3	16.4±0.3	15.9±0.1
Relative humidity, %	44.6±0.3	45.7±0.4	67.5±0.3	69.8±0.2

SUMMARY

Based on the laboratory testing results, it was concluded that the monitoring system prototype could be used as a tool for a rapid and effective response to exceeded limit values of exposure to the factors harmful to health (dust and noise) in an industrial plant. At the present stage, the portable measurement station records the environmental parameters: temperature, pressure, relative humidity of the air, concentration of particulate matter (mainly PM_{2.5}), sound level A, and the date and time. The data are displayed on the LCD screen of the measurement station, and transmitted using the LoRa radio module. Then, they are read by a LoRa receiver and displayed via the serial port in the Arduino IDE. Bluetooth LE modules communicate the strength of the signal between each other. The BLE receiver is capable of programmatically sorting the BLE transmitters according to their signal strength.

The measurement stability tests and a study on the impact of environmental conditions (relative

humidity, air temperature) will be carried out in a selected industrial plant at the next stage of the research.

The proposed solution will provide OSH services with a tool to respond quickly and effectively to exceeded limits of exposure to factors harmful to health, thus reducing both the number of exposed people and the number of cases of occupational diseases associated with dust and noise.

The solution will also facilitate the assessment of the technical condition of the plant, as excessive dust emissions and/or high noise exposure levels may be due to leaks, excessive abrasive wear of components, or malfunctioning mechanical equipment. Early response to equipment malfunctions can reduce the cost of repairing the industrial plant.

PIŚMIENNICTWO / REFERENCES

- Advances onto the Internet of Things: how ontologies make the Internet of Things meaningful (2014). S. Galio, G. Lo Re (eds.). Springer.
- AQ-SPEC, Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (2021). South Coast Air Quality Management District. PM Sensor evaluations, <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/summary-pm> [dostęp/available: 10.11.2021].
- Benini L., Farrella E., Guiducci C. (2006). Wireless sensor networks: enabling technology for ambient intelligence. *Microelectron. J.* 37(12), 1639–1649.
- Bensaleh M.S., Saida R., Hadj kacem Y. i in. (2020). Wireless sensor network design methodologies: a survey. *J. Sens.* 1, 1–13.
- Brettel M., Friederichsen N., Keller M. i in. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an Industry 4.0 perspective. *Int. J. Inform. Commun. Eng.* 8(1), 2014, 37–44.
- Clark M.P. (2001). *Networks and telecommunications: design and operation*. Second Edition. Wiley Communications.
- Clements A.L., Griswold W.G., Rs A. i in. (2017). Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary). *Sensors (Basel)* 17(11), 2478.
- Gubbi J., Buyya R., Marusic S. i in. (2013). Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future Gener. Comp. Sy.* 29(7), 1645–1660.
- Gupta C.P., Kumar A. (2013). Wireless sensor networks: a review. *Int. J. Sens. Wirel. Commun. Contr.* 3(1), 25–36.
- GUS, Główny Urząd Statystyczny [Statistics Poland] (2019). Warunki pracy w 2018 r. [Working conditions in 2018]. Warszawa. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rynek-pracy/warunki-pracy-wypadki-przy-pracy/warunki-pracy-w-2018-roku,1,13.html> [dostęp/available: 10.11.2021].
- Hardesty L. (2017). Drones relay RFID signals for inventory control. MIT News, 25.08.2017, <http://news.mit.edu/2017/drones-relay-rfid-signals-inventory-control-0825> [dostęp/available: 6.12.2021].
- Ising H., Kruppa B. (2004). Health effects caused by noise: evidence in the literature from the past 25 years. *Noise Health* 6(22), 5–13.
- Jakubiak S., Oberbek P., Sobiech P. i in. (2019). Zadanie badawcze I-57 „Wyznaczenie zdolności pomiarowych niskokosztowych czujników pyłu zawieszonego” [Research task I-57 “Determining the measurement capabilities of low-cost particulate matter sensors”]. CIOP-PIB, Warszawa.
- Jerrett M., Arain A., Kanaroglou P. i in. (2005). A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 15(2), 185–204.
- Jovašević-Stojanović M., Bartonova A., Topalović D. i in. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. *Environ. Pollut.* 206, 696–704.
- Kantareddy S.N.R., Bhattacharyya R., Sarma S. (2018). UHF RFID tag IC power mode switching for wireless sensing of resistive and electrochemical transduction modalities. 2018 IEEE International Conference on RFID (RFID), 10-12.04.2018, Orlando, FL, USA. DOI: 10.1109/RFID.2018.8376201.
- Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G. i in. (2014). Industry 4.0. *Bus. Inf. Sys. Engin.* 6(4), 2014, 239–242.
- Lee W.C.Y. (1993). *Mobile communications design fundamentals*. Wiley Communications. John Wiley & Sons.
- Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M. i in. (2016). Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday Discuss.* 189, 85–103.
- Lin S., Swager T.M. (2018). Carbon nanotube formic acid sensors using a nickel bis(ortho-diiminosemiquinonate) selector. *ACS Sens.* 3(3), 569–573.
- May A. (2019). Teardown: Sensirion, 25.04.2019, <https://www.mistywest.com/posts/teardown-sensirion-particle-matter-sensor/> [dostęp/available: 14.09.2021].
- McKercher G.R., Salmond J.A., Vanos J.K. (2017). Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors. *Environ. Pollut.* 223, 102–110.
- Miorandi D., Sicari S., De Pellegrini F. i in. (2012). Internet of things: vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks* 10(7), 1497–1516.
- Münzel T., Sørensen M., Schmidt F. i in. (2018). The adverse effects of environmental noise exposure on oxidative stress and cardiovascular risk. *Antioxid. Redox Signal.* 28(9), 873–908.
- Mydlarz Ch., Salamon J., Bello J.P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. *Appl. Acoust.* 117(Part B), 207–218.
- Nauka w Polsce (2018). Studenci PŁ zaprojektowali aplikację ułatwiającą osobom niewidomym poruszanie się w budynkach [Technical University of Łódź students designed an application that makes it easier for blind people to move around in buildings], 10.07.2018, <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C30189%2Cstudenci-pl-zaprojektowali-aplikacje-ulatwiajaca-osobom-niewidomym> [dostęp/available: 6.12.2021].
- Wessels P.W., Basten T.G.H. (2016). Design aspects of acoustic sensor network for environmental noise monitoring. *Appl. Acoust.* 110, 227–234.

Więcek E. (2011). Kryteria zdrowotne pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy [Health criteria for size-selective aerosol sampling in the working environment]. *Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr.* 2(68), 5–21.

Yang S.-H. (2014). *Wireless sensor networks: principles, design and applications*. Springer, London.

Adres do korespondencji/Contact details:

dr inż. TOMASZ JANKOWSKI
e-mail: tojan@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16
POLAND