

Przykład zastosowania sieci LoRaWAN do monitorowania parametrów środowiskowych w budynku wielkopowierzchniowym

Streszczenie. W artykule omówiono testową implementację sieci czujników LoRaWAN w budynku wielkopowierzchniowym. Krótko scharakteryzowano zasadę działania niskomocowej sieci rozległej LoRaWAN, a następnie podano sposób implementacji tego rozwiązania w opisywanym przypadku. Opisano budowę zaprojektowanego węzła sieci w postaci uniwersalnej platformy czujnikowej, a także wyniki pomiarów poboru energii tego węzła pracującego w warunkach rzeczywistych. Zastosowane rozwiązanie pozwala stwierdzić, że sieć czujnikowa LoRaWAN może być stosowana w budynkach wielkopowierzchniowych i pozwala na długoletnią pracę czujników zasilanych bateryjnie.

Abstract. The article discusses the test implementation of the LoRaWAN sensor network in a large-scale building. The principle of operation of the LoRaWAN low-power wide area network was briefly characterized, and then the method of implementation of this solution in the described case was given. The structure of the designed network node in the form of a universal sensor platform was described, as well as the results of measurements of energy consumption of this node operating under real conditions. The applied solution allows to conclude that the LoRaWAN sensor network can be used in large-area buildings and allows for long-term operation of battery-powered sensors. (An example of using the LoRaWAN network to monitor environmental parameters in a large-scale building).

Słowa kluczowe: LoRaWAN, czujnik, automatyka budynkowa, IoT

Keywords: LoRaWAN, sensor, building automation, IoT

Wstęp

Obecnie prawie wszystkie nowobudowane obiekty użyteczności publicznej, zakłady produkcyjne, centra handlowe, szpitale, obiekty wielkopowierzchniowe itp. wyposażone są w rozbudowane systemy automatyki budynkowej zapewniającej użytkownikom komfort oraz bezpieczeństwo przebywania. Rozbudowana infrastruktura techniczna obiektów niesie za sobą konieczność integracji systemów automatyki w spójny, nadrzędny system zarządzania budynkiem BMS (*Building Management System*) [1]. Pierwsze systemy BMS były uruchamiane już w latach 80 XX wieku [2], jednak dopiero wraz z dynamicznym rozwojem techniki zyskały szereg funkcjonalności bezpośrednio wpływających także na wzrost wydajności energetycznej tych budynków.

Szacuje się, że ok. 40 % całkowitej energii wytwarzanej przez ludzkość jest konsumowana przez budynki [3]. Największym wyzwaniem we współczesnych systemach BMS jest zwiększenie efektywności energetycznej budynków w nie wyposażonych, redukcja zużycia wszystkich mediów oraz redukcja generowanego przez te budynki śladu węglowego. Wymagania stawiane budynkom mają podłoże nie tylko ekologiczne – ekonomiczne, ale także prawne [4].

Wśród wszystkich instalacji teletechnicznych w budynku największy udział w konsumpcji energii mają instalacje HVAC (*heating, ventilation, air conditioning*), których udział wynosi aż około 55 % [5]. Ze względu na ten fakt, to właśnie wśród instalacji HVAC należy szukać największych możliwych oszczędności związanych z konsumpcją energii. Przy koherentnej współpracy części sprzętowej oraz programowej systemu BMS możliwe jest optymalne sterowanie instalacjami HVAC, a w efekcie zredukowanie zużycia energii konsumowanej przez budynek bez pogorszenia warunków środowiskowych panujących w obiekcie.

Opis Problemu

W istniejących, wielkopowierzchniowych budynkach użyteczności publicznej system BMS steruje instalacją HVAC dążąc do zapewnienia optymalnych warunków

środowiskowych panujących w obiekcie. Precyzyjna regulacja temperaturą, wilgotnością, a także wielkością udziału świeżego powietrza możliwa jest przez zastosowanie czujników w centralach wentylacyjnych. W dużych budynkach, o skomplikowanej architekturze oraz z dużą ilością jednostek wentylacyjnych trudnym zadaniem jest doregulowanie układu znając tylko parametry zmieszanego powietrza wyciąganego z pomieszczeń, gdzie w układzie wszystkie czujniki zainstalowane są w sekcjach wyciągowych central wentylacyjnych. W omawianym studium przypadku problem braku precyzyjnych danych dotyczących jakości powietrza w poszczególnych obszarach obiektu dotyczył pewnej galerii handlowej w Europie. Przed modernizacją złożony układ wentylacji pracował z dużym wydatkiem zapewniając w całym budynku ponad wymaganą jakość powietrza.

W celu optymalizacji systemu wentylacji obiekt został doposażony w 21 platform czujnikowych mierzących wartość temperatury, wilgotności oraz stężenia CO₂. Ze względu na wymagające aspekty estetyczne oraz trudne do okablowania miejsca montażu czujników zdecydowano zastosować bezprzewodowe platformy czujnikowe pracujące w sieci LoRaWAN. Dane zbierane z platform czujnikowych pozwalają na regulację systemu HVAC w sposób optymalny unikając znacznego przewymiarowania jego wydajności.

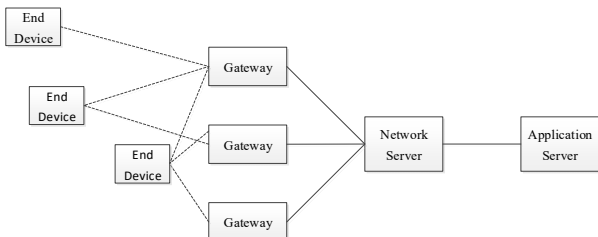
Architektura sieci LoRaWAN

LoRa jest systemem komunikacji bezprzewodowej dalekiego zasięgu o małej mocy (*LPWAN*) [6]. LoRa wykorzystuje wolne od licencji pasma częstotliwości radiowych, w Europie 868 MHz. System wspierany jest przez organizację LoRa Alliance, zrzeszającą ponad 500 członków.

W warstwie radiowej LoRa wykorzystuje techniki modulacji z widmem rozproszonym CSS (*Chirp Spread Spectrum*), co zapewnia bardzo dużą odporność na zakłócenia oraz bardzo dobrą propagację, dzięki czemu zasięg mierzony jest w kilometrach, także w warunkach miejskich czy przemysłowych.

W warstwie sieciowej można wykorzystać jeden z protokołów definiujących protokół komunikacyjny i architekturę systemu dla sieci – LoRaWAN, utrzymywany przez LoRa Alliance. LoRaWAN odpowiada również za zarządzanie częstotliwościami komunikacji i szybkością transmisji danych [7,8].

Sieć LoRaWAN ma topologię gwiazdy rozszerzonej, w której bramy (*Gateway*) przekazują komunikaty między urządzeniami końcowymi (*End Device*), a centralnym serwerem sieciowym (*Network Server*). W tej konfiguracji urządzenia końcowe komunikują się za pomocą komunikacji bezprzewodowej z jednym przeskokiem do jednej lub większej liczby bram, które z kolei są połączone z centralnym serwerem sieciowym za pośrednictwem standardowych połączeń IP [9].



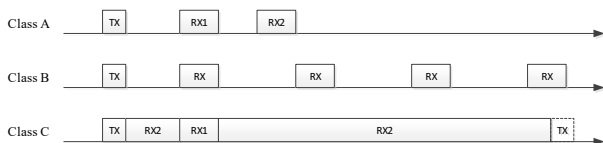
Rys.1. Architektura sieci LoRaWAN

Urządzenia końcowe pracują w jednej z trzech klas energetycznych. Klasa A zapewnia największą oszczędność energii. Urządzenia w tej klasie domyślnie są w trybie uśpienia, oszczędzając energię elektryczną. Urządzenie zgodnie z algorytmem sporadycznie wybudza się, przeprowadza pomiar, uruchamia moduł radiowy i wysyła dane pomiarowe, a następnie w dwóch oknach czasowych przechodzi w tryb nasłuchu. W trybie tym wysłanie danych do urządzenia końcowego jest możliwe jedynie wtedy, kiedy urządzenie to jest wybudzone i zainicjowało transmisję.

Klasa B zapewnia komunikację radiową w interwałach czasowych (tryb *beacon*). W tym trybie określono dokładne odstępy czasowe, w których urządzenie może wysyłać i/lub odbierać dane. Klasa B jest rozwinięciem klasy A z dodaną funkcjonalnością komunikacji w interwałach czasowych. Cykliczne przechodzenie w tryb nasłuchu znacznie zwiększa zapotrzebowanie na energię elektryczną.

Klasa C umożliwia ciągły nasłuch, a tym samym odbieranie danych wysłanych w prawie dowolnym momencie czasu, przechodząc sporadycznie w tryb nadawania, gdy są dostępne do wysłania dane pomiarowe. Klasa ta nie zapewnia oszczędności energii i w praktyce nadaje się dla urządzeń końcowych z zasilaniem stałym.

W opisywanym przypadku zaprojektowane urządzenia końcowe (uniwersalne platformy pomiarowe) pracują w klasie A.

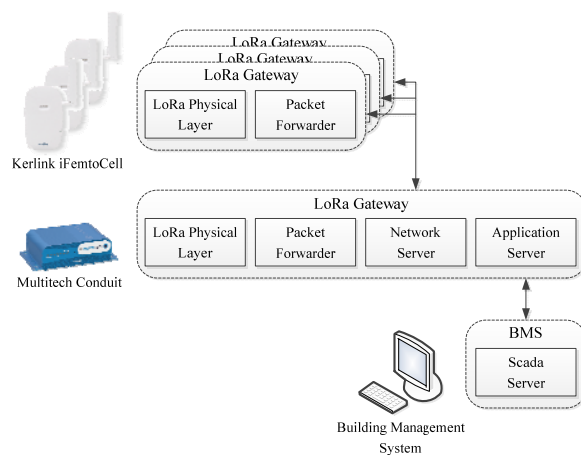


Rys.2. Okna czasowe nadawania i odbioru dla węzłów końcowych pracujących w różnych klasach

Dane transmitowane w sieciach LoRaWAN są zabezpieczone algorytmem szyfrującym AES, kluczem 128 bitowym, przy czym szyfrowanie występuje tu na dwóch poziomach: w warstwie sieciowej oraz w warstwie aplikacji [10]. W związku z tym każdy węzeł końcowy musi posiadać dwa 128-bitowe klucze. Klucze te można udostępnić na

dwa sposoby. Pierwszy sposób to dostarczanie kluczy na etapie produkcji urządzenia, drugi to dostarczenie w momencie dołączania do sieci. W opisywanym przypadku zastosowano tą drugą metodę. Dodatkowo każdy węzeł końcowy musi posiadać swój unikalny numer. Bramy komunikują się tylko urządzeniami, których numery znają.

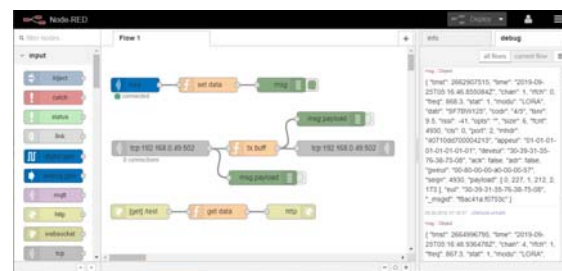
W oparciu o opisywane wyżej mechanizmy zbudowano testową sieć czujnikową LoRaWAN. Głównym elementem tej sieci jest Multitech Conduit, który działa nie tylko jako klasyczna brama LoRa, ale także jako centralny serwer sieciowy, a także serwer aplikacji (*Application Server*). Zasięg komunikacji bezprzewodowej został osiągnięty za pomocą dołączenia większej liczby bram Kerlink iFemtoCell, rozstawionych w obiekcie. Bramy te zostały skonfigurowane tak, żeby komunikowały się z adresem IP bramy Multitech (rys.3).



Rys.3. Architektura sieci LoRaWAN zastosowana w opisywanym rozwiązaniu

Konfiguracja bramy Multitech odbywa się poprzez interfejs www. Oprócz konfiguracji części radiowej, konfiguruje się także klucze, dołączone dodatkowe bramy, oraz obsługiwane urządzenia końcowe.

W oprogramowaniu bramy Multitech dostępna jest także aplikacja Node-RED, narzędzie umożliwiające szybkie tworzenie aplikacji pośredniczących między siecią LoRa a siecią Internet.



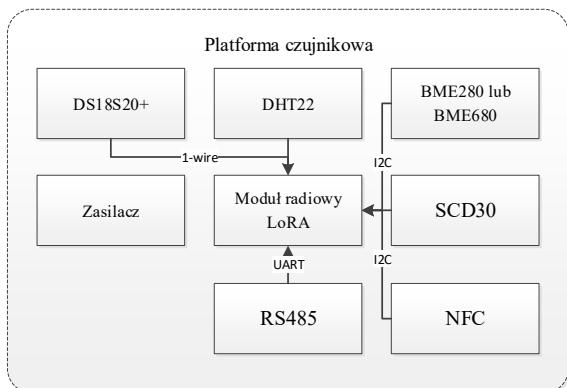
Rys.4. Strona www z konfiguracją ustawień aplikacji Node-RED

Uniwersalna platforma czujnikowa

Aby zapewnić działanie opisywanej wyżej sieci oprócz infrastruktury sieciowej potrzebne są również urządzenia końcowe, których zadaniem jest bezpośredni pomiar określonych parametrów, a następnie przesłanie ich do odpowiedniej aplikacji. Aby spełnić to wymaganie została zaprojektowana i wykonana autonomiczna platforma czujnikowa, której schemat blokowy przedstawiono na rysunku 5 [11].

Głównym elementem platformy pomiarowej jest moduł radiowy CMWX1ZZABZ-078 firmy Murata[12]. W module

tym zastosowano układ SX1276 firmy Semtech oraz niskomocowy mikrokontroler STM32L082 firmy ST Microelectronics. Główną zaletą opisywanego modułu jest możliwość wykorzystania zastosowanego tu mikrokontrolera do pisania własnych aplikacji – nie ma więc potrzeby stosowania kolejnego mikrokontrolera komunikującego się z czujnikami. Dodatkowo moduł posiada certyfikaty dopuszczające go do stosowania na rynku europejskim. Moduł wyposażono również w pełni funkcjonalny tor radiowy. Wymagane jest tylko dołączenie anteny. W przypadku opisywanej platformy zastosowano antenę drutową. Antena ma strukturę typu IFA (ang. Inverted F Antenna) – antena w postaci odwróconej litery F. Ramię unipola biegnie wzdłuż krawędzi płytki PCB.

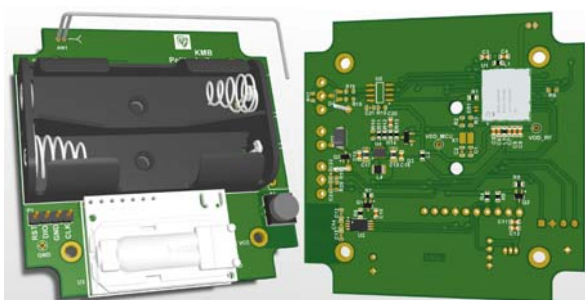


Rys.5. Schemat blokowy platformy pomiarowej pracującej w sieci LoRaWAN

Platforma zasilana jest z dwóch połączonych szeregowo baterii Li-ion LiSoCL2 o napięciu znamionowym 3,6 V i wielkości AA (typu LS-14500, prod. Saft) poprzez przetwornicę DC-DC TPS62745 [13] (prod. TI), na wyjściu której wytwarzane jest napięcie 3,3 V.

W platformie zastosowano również układ NFC-RFID ST25DV04K [14], który wraz z anteną cewkową pozwala przekazywać do platformy podstawowe parametry konfiguracyjne (klucze szyfrujące).

Płytkę PCB została zaprojektowana tak aby mieściła się w obudowie Z123 firmy Kradex. Widok płytki przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Widok poglądowy autonomicznej platformy czujnikowej z czujnikiem SCD30

W opisywanej platformie przewidziano możliwość stosowania zamiennie różnych czujników parametrów środowiskowych. W opisywanym przypadku zastosowano czujniki CO₂ typu SCD30 [15] (prod. Sensirion), umożliwiające dodatkowo pomiar temperatury i wilgotności, oraz czujnik temperatury DS18B20 [16].

Dla opracowanych węzłów końcowych wykonano oprogramowanie pozwalające na pomiar wybranych parametrów środowiskowych i przesyłanie ich w sposób bezprzewodowy w sieci LoRaWAN. Platforma ma również możliwość przesyłania danych w sposób przewodowy (RS485), ale ta możliwość nie została wykorzystana.

Oprogramowanie platformy wykorzystuje implementację stosu I-CUBE-LRWAN udostępnioną na zasadzie open-source przez ST Microelectronics [17].



Rys. 7. Widok prototypu autonomicznej platformy czujnikowej z czujnikiem temperatury DS18B20 zabudowanej w obudowie Z123

Wstępne pomiary wydajności energetycznej zaprojektowanych platform

Przed uruchomieniem sieci LoRaWAN w budynku galerii handlowej dokonano oceny wydajności energetycznej zaprojektowanej platformy. Wykonano pomiary prądów zasilających w warunkach zbliżonych do rzeczywistych dla różnych wariantów zasilania.

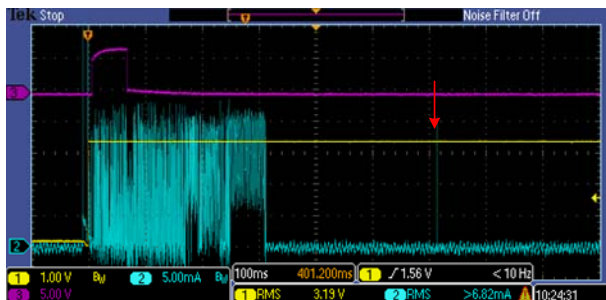
Wstępne pomiary przeprowadzono w temperaturze pokojowej (21°C) w pomieszczeniach zlokalizowanych w budynku użyteczności publicznej ze ścianami o budowie mieszanej (cegła i okładziny ceramiczne/metalowe) oraz ze zbrojonymi żelbetowymi przegrodami międzykondygnacyjnymi (bud. C14 Politechniki Wrocławskiej). Układy testowe, wyposażone we wbudowany czujnik temperatury DS18B20, zasilano ze stabilizowanego impulsowego zasilacza laboratoryjnego (U8001A, Keysight Technologies) lub bateryjnie (2 baterie LS-14500, prod. Saft). Pomiary prowadzono przy pomocy oscyloskopu cyfrowego Tektronix MSO2014 z sondami 1:10 (Tektronix P2221), bezkontaktowej sondy prądowej Tektronix A6302 ze wzmacniaczem AM503 oraz precyzyjnego multimetru True RMS Fluke 289.

Pomiary te wykonano zasilając losowo wybrane prototypowe platformy czujnikowe stabilizowanym napięciem stałym z zasilacza laboratoryjnego; zastosowano napięcie odpowiadające napięciu znamionowemu dwóch połączonych baterii (7,2 V), napięciu obniżonemu do napięcia baterii w końcowym okresie ich eksploatacji (6 V) oraz napięciu zbliżonemu do napięcia minimalnego (4,0 V).

Ślad żółty na oscylogramach to napięcie VDD zasilające moduł radiowy oraz czujniki (znamionowo 3,3 V), ślad niebieski to prąd zasilania pobierany z baterii IBAT, ślad fioletowy to napięcie VBAT na wyjściu VIN_SW układu TPS62745 (układ posiada wewnętrzny przełącznik pozwalający mierzyć napięcie zasilania) lub na wejściu ADC_IN0 modułu CMWX1ZZABZ-078.

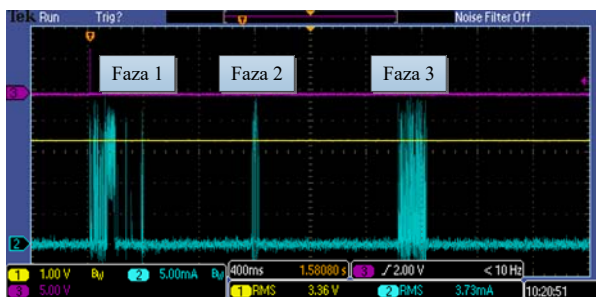
Na rysunku 8 pokazano przebieg napięć i prądów podczas zimnego startu losowo wybranej platformy dla VBAT=7,2 V. Cykl startu i konfiguracji układu mikroprocesorowo-radiowego trwa ok. 320 ms i towarzyszy mu szczytowy pobór prądu ok. 21-22 mA. Po jego zakończeniu układ przechodzi w tryb uśpienia, podczas którego w sygnale prądu zasilającego pojawiają się tylko rzadkie (nie częściej niż co 300 ms) impulsy szpilkowe (zaznaczone na rys. 8 strzałką), związane z działaniem przetwornicy dc-dc w trybie PFM. Pojawienie się napięcia na wejściu VIN_SW przy starcie układu oraz jego stosunkowo wolny narost (ok. 50 ms) wiąże się z istnieniem stanu nieustalonego na pinie mikrokontrolera sterującego EN_VIN_SW (załączenie wewnętrznego przełącznika), w

ok. 65 ms po starcie układu sygnał ten zostaje wyłączony. Cykl startu wiąże się ze zużyciem ok. 19,2 mJ energii przy średnim prądzie zasilania 11,8 mA (wart. rms).



Rys. 8. Zmiany napięć VDD, VIN_SW oraz prądu IBAT podczas zimnego startu platformy (VBAT=7,2 V)

Podstawowy cykl pomiarowo-nadawczy (zilustrowany na rys. 9) składa się z 3 faz, pobór prądu IBAT dochodzi chwilowo również do ok. 22 mA (przy VBAT=7,2 V). Faza 1 wiąże się ze zużyciem 11,1 mJ energii, faza 2 wymaga ok. 2,4 mJ a faza 3 to ok. 8,4 mJ a zatem cały cykl pomiarowo-nadawczy zużywa ok. 21,9 mJ energii przy średnim prądzie rms ok. 4,7 mA.



Rys. 9. Zmiany napięć VBAT, VDD oraz prądu IBAT podczas cyklu pomiarowo-nadawczego platformy (VBAT=7,2 V)

W czasie braku aktywności platform (tzn. w czasie ich uśpienia) prąd IBAT ma wartość 1,3-2,8 μ A (wartość uśredniona w okresie 300s pracy platform w uśpieniu to ok. 2,1 μ A).

Podobne pomiary wykonano również dla pozostałych napięć zasilania przyjętych do wykonania testu. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Po analizie uzyskanych wyników można stwierdzić, że „zimny” start platform (z wysłaniem sygnału „join” do bramy) wymaga zużycia maksymalnie ok. 28 mJ energii, w czasie uśpienia platformy pobierają z baterii prąd o wartości średniej ok. 2,1 μ A, a pojedynczy cykl pomiarowo-nadawczy (z pomiarem napięcia baterii, ale bez obsługi żadnego czujnika) wymaga zużycia maksymalnie ok. 26 mJ energii.

Tabela 1. Pobór energii przez testową platformę dla różnych napięć zasilania

Napięcia zasilania [V]	Zimny start platformy		Cykl pracy platformy		Prąd jałowy [μ A]
	Energia [mJ]	Prąd baterii [mA]	Energia [mJ]	Prąd baterii [mA]	
7,2	19,2	11,8	21,9	4,7	2,1
6,0	18,8	12,7	26,5	5,0	2,0
4,0	28,3	16,9	20	5,9	2,1

Przeprowadzono również podobne pomiary dla platform zasilanych przy pomocy 2 nowych baterii litowych o znamionowym napięciu 3,6 V. Pomiary prowadzono w

stanie, gdy platformy uzyskały akceptację bramy LoRa (tzw. „join”). Na pokazanych oscylogramach ślad żółty to napięcie baterii VBAT (znamionowo 7,2 V), ślad niebieski to prąd zasilania pobierany z baterii IBAT, ślad fioletowy to napięcie VBAT na wejściu ADC_IN0 modułu CMWX1ZZABZ078. Na rysunku 10 pokazano przebiegi napięć VBAT i ADC_IN0 oraz prądu IBAT podczas cyklicznej pracy trzech losowo wybranych platform.



Rys. 10. Zmiany napięć VBAT i ADC_IN0 oraz prądu IBAT podczas cyklicznej pracy trzech platform zasilanych z baterii

Na przedstawionych śladach doskonale widoczne są 4 fazy pracy platformy: wybudzenie procesora i pomiary, jego uśpienie oraz 3 fazy transmisji danych LoRa (nadawanie i 2 okna odbiorcze), w których procesor już nie bierze udziału. Widoczne są również różnice pomiędzy poszczególnymi platformami w wielkości prądu pobieranego podczas fazy nadawania – od ok. 14 mA do ok. 38 mA; wiąże się to jednak bezpośrednio z mocą transmisji radiowej, wynegocjowanej przez bramę LoRa z daną platformą. Średnie prądy rms w czasie całego okresu aktywnej pracy platform to od ok. 3,4 mA do 6,0 mA w zależności od mocy emitowanego sygnału radiowego natomiast energia niezbędna to wykonania pełnego cyklu pomiarowo-nadawczego to od ok. 22,5 mJ do ok. 32,5 mJ. Platformy różnią się również pod względem prądu pobieranego w stanie uśpienia – minimalny pobór w tym wypadku to od ok. 1,6 μ A do ok. 2,5 μ A natomiast pobór maksymalny to od ok. 2,8 μ A do ok. 4,0 μ A.

W chwili poboru zwiększonego prądu z baterii (związanego zarówno z wybudzeniem procesora jak i – przede wszystkim - fazami transmisji danych LoRa) widoczne są zapady jej napięcia (o ok. 0,2-0,4 V; do ok. 0,8 V przy transmisji z poborem prądu 38 mA) jednak nie są one groźne dla układu zasilania platformy. Rzucającą się w oczy różnicą w stosunku do poprzednich pomiarów jest również praktyczny brak zakłóceń wysoko-

częstotliwościowych (pochodzących poprzednio prawdopodobnie od zastosowanego sieciowego zasilacza impulsowego).

Biorąc pod uwagę wyznaczone doświadczalnie w warunkach rzeczywistych maksymalne wartości prądu pracy jałowej platform (dochodzące do ok. 4,0 μ A przy średnim napięciu zasilania ok. 7,0 V) oraz energii niezbędnej do wykonania pełnego pojedynczego cyklu pomiarowo-nadawczego (ok. 33 mJ), a także realną (tzn. uwzględniającą impulsowy pobór zwiększonego prądu podczas fazy nadawania) pojemność 2 baterii Li-SOCl₂ przewidzianych do zasilania platform (katalogowa pojemność baterii LS-14500 to 9,36 Wh \approx 33,7 kJ; na podstawie katalogowych charakterystyk rozładowania tej baterii można założyć iż ok. 75 % tej pojemności będzie dostępne przy dorywczym rozładowaniu baterii impulsowym prądem 33 mA co daje dostępną energię ok. 50,5 kJ) można oszacować, że platforma czujnikowa wykonująca pomiary temperatury (tzn. wyposażona w czujnik temperatury DS18B20) co 5 min (288 pomiarów/dobę) może pracować przez okres ponad 11,5 roku.

Zastosowanie czujnika CO₂ typu SCD30, zużywającego ok. 100 mJ energii na pojedynczy pomiar stężenia CO₂, temperatury i wilgotności pozwala – ponownie przy założeniu pomiarów prowadzonych z interwałem 5 min (12 pomiarów/h) – na baterijną pracę platformy przez ok. 53 miesiące. Wydłużenie interwału pomiaru do 12 minut (6 pomiarów/h) pozwala na wydłużenie czasu pracy do ponad 8 lat.

Wszystkie przeprowadzone oszacowania czasu baterijnej pracy platform zakładają działanie w temperaturze zbliżonej do pokojowej – obniżenie temperatury może skrócić ten czas nawet o ok. 50 % ze względu na temperaturowy spadek pojemności baterii Li-SOCl₂ (szczególnie silnie widoczny dla wyższych wartości prądu rozładowania).

Integracja platform czujnikowych w systemie BMS w galerii handlowej

Opisywana wcześniej sieć 21 platform pomiarowych została dołączona do systemu BMS galerii handlowej. Dane do tego systemu wystawiane są za pomocą aplikacji Node-Red działającej na bramie LoRa firmy Multitech MTCDT Series. Gateway LoRa pracuje w sieci Ethernet w funkcji Modbus TCP/IP slave. Serwer SCADA w funkcji Modbus TCP/IP Master odczytuje wszystkie dane z czujników w postaci holding registers. Każdy czujnik reprezentowany jest przez 4 rejestry 16-bitowe przedstawiające wartości temperatury, wilgotności, stężenia dwutlenku węgla oraz rejestr statusowy zawierający podstawowe informacje o statusie pracy czujnika, a także wartość napięcia baterii.

THC-0.1 23.7°C 55.0 % 508.3ppm	THC-0.6 24.1°C 49.0 % 495.1ppm	THC-1.1 24.5°C 49.0 % 572.8ppm	THC-2.1 24.1°C 55.0 % 505.2ppm	THC-3.1 24.2°C 58.0 % 408.6ppm
THC-0.2 24.0°C 48.0 % 418.5ppm	THC-0.7 24.2°C 48.0 % 475.6ppm	THC-1.2 23.1°C 55.0 % 396.5ppm	THC-2.3 23.6°C 56.0 % 488.1ppm	
THC-0.3 23.8°C 49.0 % 593.1ppm	THC-0.9 25.8°C 49.0 % 624.8ppm	THC-1.3 24.2°C 48.0 % 527.2ppm	THC-2.4 25.4°C 49.0 % 575.5ppm	
THC-0.4 23.9°C 51.0 % 517.5ppm	THC-0.10 23.0°C 60.0 % 441.0ppm	THC-1.5 24.6°C 49.0 % 559.7ppm	THC-2.5 24.3°C 52.0 % 509.7ppm	
THC-0.5 23.2°C 46.0 % 412.2ppm	THC-0.11 24.1°C 51.0 % 534.3ppm	THC-1.6 24.6°C 51.0 % 396.5ppm	THC-2.6 24.6°C 48.0 % 518.2ppm	

Rys. 11. Tabela zbiorcza platform czujnikowych

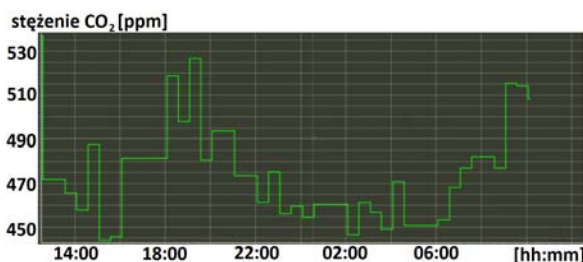
Czujniki zostały zwizualizowane w systemie w tabeli zbiorczej (rys. 11). Poza tabelą czujniki zostały rozmieszczone na rzutach galerii w postaci ikon.

Każda ikona czujnika jest jednocześnie przyciskiem otwierającym okno - stację danego czujnika (rys. 12). Poza realizacją algorytmów automatyki, dane z czujników wykorzystywane są także wprost z poziomu wizualizacji, umożliwiając obsłudze obiektu ustawienie granicznych progów zadziałania mechanizmów alarmowania o przekroczonym stężeniu dwutlenku węgla w danym obszarze budynku, a także zbyt wysokiej i zbyt niskiej wartości temperatury powietrza.



Rys. 12. Przykładowa stacja czujnika

Każda dana przedstawiona w stacji jest jednocześnie przyciskiem umożliwiającym wyświetlenie szybkiego dobowego wykresu (rys. 13). Wykres ten jest generowany na bazie danych zgromadzonych w bazie danych systemu BMS, a narzędzie obsługujące generowanie wykresów umożliwia swobodne zmiany podstawy czasu, a także zakres wyświetlanej zmiennej.



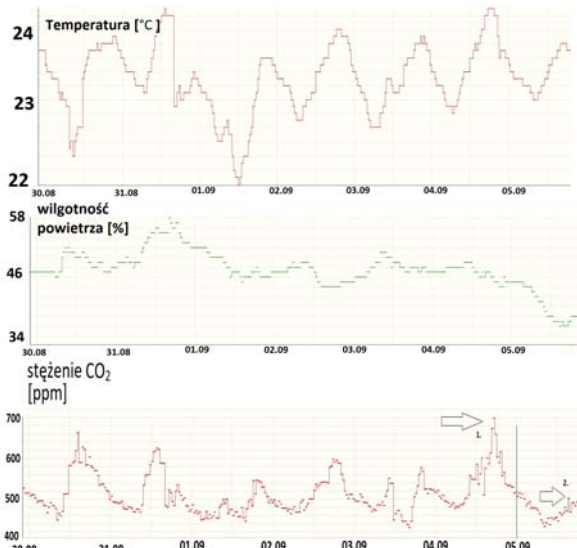
Rys.13. Przykładowy wykres przedstawiający dobowe zmiany stężenia CO₂ w powietrzu utworzony przez narzędzie generowania wykresów systemu BMS

Analiza danych pozyskiwanych przez system

Wszystkie dane zapisywane są w bazie danych systemu BMS. Można je pobrać z systemu w postaci plików csv. Poniżej zaprezentowano serię wykresów przedstawiających dane z jednego z czujników (rys. 14).

Widoczny trend cyklicznych zmian stężenia mierzonych parametrów warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność, stężenie dwutlenku węgla) w powietrzu jest efektem wzmoczonego użytkowania obiektu przez znaczną liczbę ludzi w godzinach popołudniowych w dniach od poniedziałku do piątku (30.08 - 03.09). Dla parametru opisującego stężenie dwutlenku węgla w powietrzu największe stężenie zarejestrowane zostało w sobotę – pkt. 1 rys. 14. najmniejsze natomiast w niedzielę – (dzień zamknięcia sklepów - czynne tylko kino i gastronomia) –pkt. 2 rys. 14. Przykładowy przebieg wygenerowany został na podstawie danych pozyskiwanych przez czujnik zainstalowany w jednym z pasaży handlowych. Dane te wskazują na poprawną pracę układów pomiarowych, a także na stałe, stabilne wskazania wartości zmierzonych.

Wszystkie platformy czujnikowe pracują nieprzerwanie 9 miesięcy. Znotowano, że średnie zużycie baterii dla 21 platform wynosi około 12%. Szacowany czas życia baterii w czujnikach realizujących pomiar stężenia dwutlenku węgla przewidywany jest na 6 lat z założeniem realizacji pomiaru oraz wysyłaniu danych do serwera co 15 minut. To wartość mniejsza niż wynikająca z poprzednich oszacowań. Zwiększony pobór energii może wynikać z gorszych warunków propagacyjnych – żelbetowa konstrukcja galerii. W tych gorszych warunkach platformy komunikują się z bramami przy wykorzystaniu większej mocy oraz wyższego współczynnika rozpraszania w modulacji LoRa [18], co wpływa na zwiększony pobór energii.



Rys.14. Zmiany temperatury, wilgotności i stężenia CO₂ w powietrzu w zestawieniu tygodniowym

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych oraz implementacji w warunkach rzeczywistych można stwierdzić, że bezprzewodowe sieci czujnikowe pracujące w oparciu o protokół LoRaWAN mogą być stosowane w budynkach wielkopowierzchniowych.

Zaprojektowane i wykonane prototypowe platformy pomiarowe wraz z infrastrukturą sieciową stanowią proste w implementacji narzędzie służące do monitoringu różnego rodzaju parametrów środowiskowych. Narzędzie szczególnie przydatne w miejscach gdzie nie można zastosować połączeń przewodowych. Prostota implementacji tego rozwiązania wynika z zaimplementowania w nim protokołu Modbus TCP/IP powszechnie stosowanego w instalacjach budynkowych.

Dane o zużyciu energii przez czujniki pracujące w rzeczywistym systemie pomiarowym w galerii handlowej pozwalają na oszacowanie pracy czujników bez wymiany baterii na około 6 lat przy wykonywaniu pomiarów co 15 minut. Możliwe jest wydłużenie czasu życia baterii poprzez zwiększenie czasu między pomiarami. Czas życia baterii oszacowany w rzeczywistych warunkach jest krótszy od czasu oszacowanego dla warunków laboratoryjnych. Wynika to z gorszych warunków propagacyjnych, dla których węzły końcowe stosują wyższą moc oraz większy współczynnik rozpraszania co zwiększa czas trwania ramki z danymi.

Autorzy: dr inż. Sławomir Sambor, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: slawomir.sambor@pwr.edu.pl; dr inż. Jarosław Emilianowicz, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jaroslaw.emilianowicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Rafał Owczarczak, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław oraz KMB Grupa Sp. z o.o. Sp. K., ul. Wołowska 18, 51-116 Wrocław, E-mail: rafal.owczarczak@kmb-serwis.pl;

LITERATURA

- [1] Popescu D. E., Prada M. F., Some Aspects about Smart Building Management Systems - Solutions for Green, Secure and Smart Buildings, Proc. Conference on Recent Advances in Environmental Science, Lemesos, Cyprus, March 2013, 7 (2013), doi:10.13140/RG.2.1.3057.8644
- [2] Wang S., Intelligent Buildings and Building Automation, 1st ed., Taylor & Francis, London/New York, 2009
- [3] Sullivan G. P., Pugh R., Melendez A. P., Hunt W. D., Operations & Maintenance Best Practices - a Guide to Achieving Operational Efficiency (Release 3), Pacific Northwest National Lab. (2010), doi:10.2172/1034595
- [4] Energy Efficiency Plan 2011, Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2011), document COM/2011/0109_final, 52011DC0109
- [5] Yifan Liu. A process model for heating, ventilating and air conditioning systems design for advanced energy retrofit projects. June 2012 10.13140/RG.2.2.30071.88487
- [6] Raza, U.; Kulkarni, P.; Sooriyabandara, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2017, 19, 855–873.
- [7] LoRa Alliance. LoRaWAN v1.1 Specification; LoRa Alliance: 3855 SW 153rd Drive Beaverton, OR 97003
- [8] Semtech Corporation. LoRa Modulation Basics; AN1200.22; Semtech Corporation: Camarillo, CA, USA, 2015.
- [9] Ertürk M.A., Aydin M.A., Büyükakkaslar M.T., Evirgen H., A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies, October 2019 Future Internet 11(10):216 DOI:10.3390/fi11100216
- [10] Oniga, B.; Dadarlat, V.; Poorter, E.D.; Munteanu, A. Analysis, design and implementation of secure LoRaWAN sensor networks. In Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), Cluj-Napoca, Romania, 7–9 September 2017; pp. 421–428
- [11] Projekt POIR.02.03.02-02-0002/18 (2018-19): Opracowanie innowacyjnej platformy czujnikowej z łącznością bezprzewodową LPWAN zunifikowanej z systemem zarządzania inteligentnym budynkiem BMS Chronomatik
- [12] Sub-G Module Data Sheet, MP Part Number: CMWX1ZZABZ-078 CMWX1ZZABZ-091 Specification Number : BP-ABZ-C, Murata
- [13] Datasheet: TPS62745, TPS627451. TPS62745 Dual-cell Ultra Low IQ Step Down Converter for Low Power Wireless Applications. REVISED JUNE 2015
- [14] Datasheet: ST25DV04K ST25DV16K ST25DV64K. Dynamic NFC/RFID tag IC with 4-Kbit, 16-Kbit or 64-Kbit EEPROM, and fast transfer mode capability
- [15] Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module CO₂, humidity, and temperature sensor, Preliminary version 0.8 – D1 – January 2018, Sensirion AG
- [16] Datasheet: DS18B20 Programmable Resolution 1Wire Digital Thermometer, Maxim Integrated, 2008
- [17] User manual: STM32 LoRaWAN® Expansion Package for STM32Cube, ST Microelectronics, UM2073, rev. 11, 2021
- [18] Ayele, E.D.; Hakkenberg, C.; Meijers, J.P.; Zhang, K.; Meratnia, N.; Havinga, P.J.M. Performance analysis of LoRa radio for an indoor IoT applications. In Proceedings of the International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC), Funchal, Portugal, 10–13 July 2017; pp. 1–8.