

Harvesting energii jako metoda bezbateryjnego zasilania zdalnych układów czujnikowych w budynkach z systemem zarządzania BMS

Streszczenie. W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z pozyskiwaniem energii odpadowej w budynkach, transformowaniem jej w energię elektryczną oraz wykorzystaniem na potrzeby zasilania zdalnych, bezbateryjnych platform czujnikowych, wykorzystujących komunikację radiową. Układy czujnikowe instalowane w budynkach najczęściej pozyskują dane dotyczące temperatury oraz wilgotności powietrza, obecności osób w pomieszczeniu, sygnału otwarcia okien, itp. Często są to dane strategiczne, niezbędne do prawidłowej pracy układów automatyki budynkowej i bezpośrednio wpływające na komfort oraz bezpieczeństwo osób przebywających w budynku a także na redukcję zapotrzebowania budynku na energię.

Abstract. The article discusses selected issues related to the acquisition of ambient energy in buildings, its transformation into electricity and use for power supply of remote, battery-free sensor platforms using radio communication. Sensor systems installed in buildings most often acquire data concerning temperature and humidity of air, presence of people in a room, window opening signals, etc. These are often strategic data, necessary for the correct operation of building automation systems and directly influencing not only the comfort and safety of people in the building but also a significant reduction in the building's energy demand. (**Selected issues related to the acquisition of ambient energy in buildings**)

Słowa kluczowe: czujnik, zasilanie bezbateryjne, harvesting energii, automatyka budynkowa, IoT
Keywords: sensor, battery-free supply, energy harvesting, building automation, IoT

Wstęp

Praktycznie wszystkie współcześnie projektowane budynki użyteczności publicznej, zakłady produkcyjne, centra handlowe, szpitale itp. obiekty wielkopowierzchniowe mają rozbudowane systemy automatyki budynkowej (SAB), zapewniające ich użytkownikom nie tylko bezpieczeństwo ale i komfort przebywania. Złożoność obecnie instalowanych SAB oraz potrzeba wymiany danych pomiędzy nimi rodzi – szczególnie w dużych obiektach – konieczność budowy instalacji teletechnicznych o długości niekiedy wielu dziesiątek kilometrów. Sposobem redukcji okablowania w systemach automatyki (nie tylko budynkowej) jest stosowanie komunikacji bezprzewodowej. Niestety najczęściej wiąże się to równocześnie z koniecznością stosowania baterijnego zasilania zdalnych układów czujnikowych, a w konsekwencji z okresową serwisową wymianą baterii. Rozwiązaniem tego problemu techniczno-logistycznego jest zastosowanie bezbateryjnych platform czujnikowych wyposażonych w układy zasilające pozyskujące energię odpadową bezpośrednio ze środowiska, w którym pracują i dokonujące jej przemiany na energię elektryczną – określane jako harvesting energii (*energy harvesting*).

SAB czyli m.in. systemy czujnikowe, systemy zarządzające przepływem energii elektrycznej, realizujące opomiarowanie oraz rozliczanie zużycia mediów, monitorowanie warunków środowiskowych panujących w budynku, sterowanie instalacjami HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning), zintegrowane w jeden nadrzędny, spójny system nazywane są systemami zarządzania budynkiem BMS (*Building Management System*) [1]. Co prawda pierwsze BMSy były instalowane w budynkach już w latach 80 XX. wieku [2] jednak dopiero teraz – wraz z dynamicznym rozwojem techniki – zyskują popularność i są wprowadzane w zdecydowanej większości nowopowstających inwestycji, w szczególności realizujących ideę SmartHouse [3]. Względy finansowe i prawne wymuszają również konieczność instalacji BMS w już istniejących budynkach. Bardzo poważnym utrudnieniem integracji instalacji technicznych w istniejących budynkach jest fakt, że często musi ona odbywać się na „żywym organizmie” budynku. Oznacza to m.in. bardzo ograniczoną możliwość wyłączenia instalacji

i odstawiania urządzeń (np. w szpitalach lub zakładach o działaniu ciągłym), utrudnienia w prowadzeniu okablowania (np. w budynkach zabytkowych) lub utrudnienia logistyczne i ograniczenia w dostępie (np. centra handlowe).

Należy podkreślić, że zasadność realizacji systemu BMS integrującego wszystkie strategiczne instalacje budynkowe wynika nie tyle z potrzeby centralizacji monitoringu i sterowania, ale – przede wszystkim – z realnej możliwości optymalizacji zużycia energii i mediów. W budynkach z prawidłowo funkcjonującym BMS zużycie mediów jest niższe niż w podobnych budynkach bez takiego systemu [4].

Efektywność energetyczna budynków z systemem BMS

Szacuje się na ok. 40 % całej energii wytwarzanej przez ludzkość jest zużywane przez budynki [5]. Tak wysoki udział w całkowitym zużyciu energii wymusza konieczność poprawy efektywności energetycznej budynków nie tylko ze względów ekonomicznych i ekologicznych, ale także ze względu na formalne przepisy międzynarodowe [6] i krajowe regulacje dotyczące efektywności energetycznej [7].

Na poziom efektywności energetycznej budynku, wynikającej z zastosowania systemu BMS, ma wpływ nie tylko niezbędna do jego funkcjonowania część sprzętowa automatyki ale również – a nawet przede wszystkim – jej część programowa, wykorzystująca algorytmy umożliwiające optymalne wykorzystanie dostępnych mediów dla zapewnienia niezbędnego komfortu osób korzystających z budynku. Badając panujące wewnątrz budynku warunki środowiskowe (np. temperaturę i wilgotność powietrza, stężenie CO₂, natężenie oświetlenia) oraz stosując optymalną, ciągłą i automatyczną regulację urządzeń wykonawczych zintegrowanych w spójny, nadrzędny system BMS można osiągnąć znaczną poprawę efektywności energetycznej budynku [8]. Dzięki zastosowaniu SAB integrujących instalacje wewnątrzbudynkowe zapewniające komfort cieplny, wentylację i oświetlenie oraz pozostałe instalacje współistniejące można zredukować ilość zużywanej przez nie energii – w zależności od typu instalacji – o kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt procent [9].

System BMS a struktura systemów IoT

W swojej definicji system Internetu Rzeczy (IoT, *Internet of Things*) zawiera bardzo wiele wspólnych z systemem BMS elementów składowych. System IoT pozyskuje za pośrednictwem sieci rozproszonych czujników duże ilości danych, które są transferowane do urządzeń logicznych, magazynowane w serwerach danych i wizualizowane za pośrednictwem dedykowanych aplikacji. Na bazie uzyskanych w ten sposób i odpowiednio przetworzonych danych realizowane są następnie złożone algorytmy układów automatyki, zapewniające optymalną pracę urządzeń wykonawczych. Tą złożoną architekturę systemu IoT przedstawia się zwykle wg modelu CISCO w formie graficznej (rys. 1) jako siedem elementarnych warstw sprzętowo-funkcjonalnych [10]. Najniższa warstwa sprzętowa zawiera urządzenia pomiarowe zbierające dane oraz układy wykonawcze, realizujące zadania systemu IoT. Wyższa warstwa realizuje komunikację pomiędzy podstawowymi urządzeniami IoT, a układami warstwy trzeciej, w której odbywa się interpretacja i przetwarzanie surowych danych wejściowych. Warstwa czwarta realizuje zapis oraz przechowywanie danych, umożliwiając wykorzystywanie ich przez system w czasie rzeczywistym, jak również w postaci danych historycznych. Złożona akwizycja i zarządzanie danymi odbywa się w warstwie piątej, w której realizowana jest między innymi przypisanie dostępu do danych dla grup użytkowników, redundancja serwerów danych, optymalizacja zapisu danych w pamięci macierzy dyskowych umożliwiając przechowywanie i udostępnianie danych przy wykorzystywaniu możliwie najmniejszych zasobów sprzętowych. W szóstej warstwie realizowane są – przez programy klasy SCADA – zadania wizualizacyjne oraz aplikacje analityczne. Ostatnia, siódma warstwa zapewnia współpracę systemu IoT z innymi systemami i z człowiekiem.



Rys. 1. Model warstwowej architektury systemów IoT (na podstawie [10])

Tak zdefiniowana struktura systemu IoT bezpośrednio koresponduje z hierarchiczną budową systemu BMS, gdyż obie architektury opierają swoje działanie na układach czujnikowych, zapewniających systemom dane niezbędne do ich zaplanowanego i prawidłowego działania. Ponieważ współczesne układy czujnikowe coraz częściej działają zdalnie i przesyłają dane bezprzewodowo więc sposób ich zasilania staje się krytycznie ważny dla prawidłowego i niezaburzonego pozyskiwania, interpretacji i udostępniania danych środowiskowych nadrzędnym systemom automatyki. Dlatego bezobsługowe rozwiązania bezbateryjne, pozyskujące energię odpadową z otoczenia i transformujące ją w energię elektryczną, wykorzystywane przez elektroniczne platformy czujnikowe są tak atrakcyjne nie tylko w odniesieniu do IoT, ale również systemów BMS.

Harvesting energii a systemy IoT i BMS

Czujniki bezprzewodowe są od lat z powodzeniem stosowane w automatyce. Jednak gro tych czujników jest zasilane bateryjne co determinuje albo skończony czas ich

pracy albo wymaga interwałowego serwisowania w celu wymiany baterii. Stały rozwój inżynierii materiałowej oraz mikroelektroniki zapewnia sukcesywną redukcję zużycia energii elektrycznej potrzebnej do wykonania pomiaru wartości fizycznych i przetworzenia zmierzonych wartości, a wraz z nowymi, niskoenergetycznymi ezprzewodowymi protokołami komunikacyjnymi pozwala stanowczo wydłużyć czas eksploatacji baterii w zdalnych układach czujnikowych (obecnie nawet ponad 10 lat). Rozwój nauki i techniki otwiera również zupełnie nowe możliwości projektowania, budowy i uruchamiania sieci zdalnych czujników zasilanych bezbateryjnie w oparciu o mechanizmy odzysku i przetwarzania energii odpadowej, pozyskiwanej z otoczenia, w tym również we wnętrzu budynków czyli w bezpośrednim otoczeniu osób - ich użytkowników [11].

Jednym z problemów związanych z harvestingiem energii w budynkach jest wybór odpowiedniego źródła energii „środowiskowej”, występującej w ekosystemie budynku w zależności od rodzaju zasilanego w ten sposób czujnika i miejsca jego instalacji. Shaikh ze współpracownikami usystematyzował obszary zastosowań harvestingu energii oraz optymalne źródła energii w zależności od miejsca instalacji, wymaganej sprawności oraz mocy wymaganej przez w ten sposób zasilany układ [12]. Autorzy tej pracy podkreślają problematykę użycia zasilania baterijnego w środowisku niekorzystnym dla trwałości baterii (m.in. niska temperatura) i wskazują na wyższość rozwiązań bezbateryjnych, zarówno w kontekście logistycznym (bezserwisowa praca urządzeń i brak okablowania strukturalnego) jak i zastosowań w obszarach niedostępnych rozwiązaniom baterijnym. Na rys. 2 zilustrowano formy, źródła i nośniki energii środowiskowej hipotetycznie dostępne do harvestingu energii we wnętrzu budynków. Należy jednak podkreślić, że dostępność poszczególnych źródeł w warunkach rzeczywistych jest ściśle uwarunkowana nie tylko architekturą i technologią budowy budynku oraz jego wewnętrznymi instalacjami technicznymi ale również rodzajem i lokalizacją samego układu harvestingowego i czujnikowego. W harvestingowym zasilaniu czujnikowych układów automatyki BMS nie ma zatem rozwiązań uniwersalnych i każdy system wymaga odrębnej analizy.

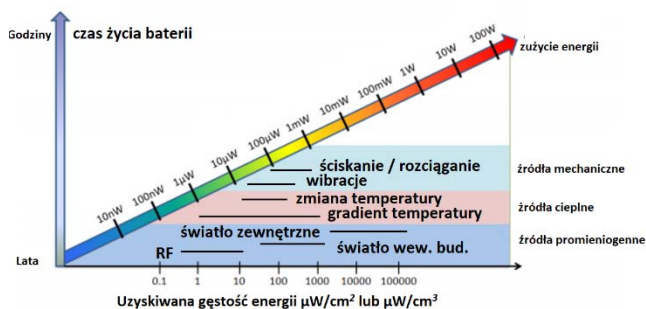


Rys. 2. Systematyka źródeł energii dla urządzeń przetwarzających energię odpadową (na podstawie [12])

Franciscatto w swojej pracy [13] przedstawił oszacowanie zakresów gęstości mocy możliwej do uzyskania w układach harvestingowych korzystających z trzech podstawowych postaci energii w otoczeniu tzn. z promieniowania elektromagnetycznego, ciepła oraz energii mechanicznej, co zilustrowano na rys. 3.

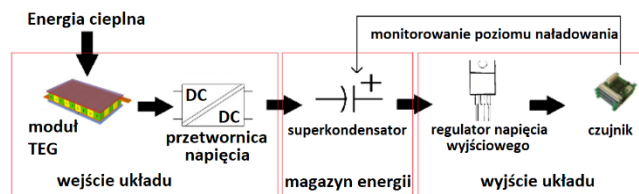
Analizując rys. 3 można stwierdzić, że stosowanie harvesterów energii opartych jedynie o układy fotowoltaiczne jest realne tylko na zewnątrz budynków. Natomiast wewnątrzbudynkowe harvestery energii w celu zapewnienia użytecznej gęstości mocy powinny przetwa-

zać energię cieplną lub mechaniczną lub powinny być to układy hybrydowe, wykorzystujących dodatkowo energię świetlną. W ostatnim przypadku we wnętrzu budynków jest to wykonalne w zasadzie tylko przy zastosowaniu niekrzemowych elementów fotowoltaicznych o spektrum absorpcji dostosowanym do spektrum oświetlenia wnętrza i zapewniających dzięki temu wystarczającą efektywność przetwarzania energii (fotoogniwa barwnikowe, perowskitowe lub na bazie GaAs [14]). Niestety, hybrydowe układy harvestingowe korzystające z kilku rodzajów energii w otoczeniu są jednak – ze względu na swoją komplikację układową – dotychczas rzadko stosowane nawet w rozwiązaniach doświadczalnych.



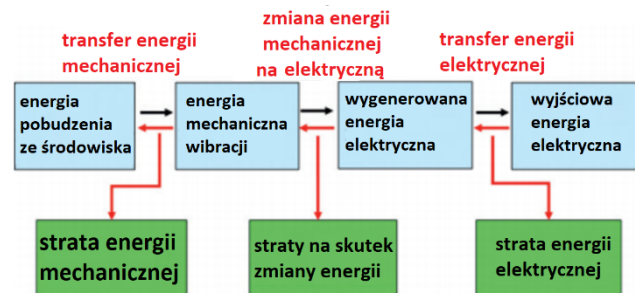
Rys. 3. Szacunkowa gęstość energii pozyskiwanej z otoczenia przez układy harvestingowe (na podstawie [13])

Wang wraz z zespołem w pracy [15] przedstawił harvester termoelektryczny zdolny zasilać moduł bezprzewodowego czujnika, który w dorywczym trybie pracy analizuje temperaturę i wilgotność powietrza, natężenie oświetlenia oraz – poprzez czujki PIR – obecność i ruch osób i przesyła te dane radiowo w technologii ZigBee (rys. 4). Do przetwarzania energii cieplnej wykorzystano generator termoelektryczny (TEG) w postaci 2 termostosów złożonych z 288 par półprzewodnikowych złącz termoelektrycznych Bi_2Te_3 o wartości ZT (*figure of merit*) ok. 0,7 (w temperaturze pokojowej) i współczynniku mocy 36 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Przy biernym chłodzeniu strony zimnej termostosów (temperatura otoczenia ok. 20°C) i przy temperaturze strony gorącej 60°C na bezpośrednio dołączonym dopasowanym impedancyjnie obciążeniu uzyskano moc ok. 4,1 mW. Jednak ze względu na wymagania układu czujnikowego napięcie wyjściowe termostosu było podnoszone do 3,3 V przy użyciu rozbudowanego układu niskonapięciowej pompy ładunkowej i tandemu dwóch przetwornic impulsowych (boost i buck-boost) o wypadkowej sprawności konwersji ok. 25 % co w powyższych warunkach ciepłych zapewniało układowi czujnikowemu już tylko moc ok. 1,1 mW. Energię magazynowano w superkondensatorze o pojemności 2,5 F co w podanych warunkach ciepłych wymagało czasu ok. 150 min do uzyskania roboczego napięcia 3,3 V i rozpoczęcia cyklicznego działania modułu czujnikowego.



Rys. 4. Schemat blokowy ciepłego harvestera energii zasilaającego moduł czujnika bezprzewodowego (na podstawie [15])

Bezbatteryne zasilanie urządzeń IoT realizowane jest także za pomocą harvesterów energii mechanicznej (o ile jest ona dostępna), najczęściej wykorzystujących do przemiany energii zjawisko piezoelektryczne. Priya z zespołem dokonał przeglądu użytecznych w tego typu harvestingu sposobów przekształcania energii mechanicznej w elektryczną, materiałów i technologii produkcji stosowanych do wytwarzania struktur piezoelektrycznych oraz metod pozwalające zwielokrotnić uzyskiwane gęstości mocy m.in. poprzez rezonans mechaniczny [16]. W artykule tym autorzy skupiają się przede wszystkim na piezoelektrycznych harvesterach energii w postaci mikrosystemów MEMS. Układy te o objętości kilku mm^3 zdolne są przekształcić energię wibracji w porcje energii elektrycznej pozwalające na dorywcze zasilanie ultraniskomocowych systemów mikroelektronicznych. Autorzy pracy [16] zwracają uwagę na bardzo ważny – lecz często pomijany w artykułach - aspekt harvestingowych układów piezoelektrycznych (zilustrowanych schematycznie na rys. 5). Są nim straty w przepływie energii w harvesterze piezoelektrycznym występujące zarówno w wyniku złego dopasowania przetwornika piezoelektrycznego do źródła drgań/ruchu jak i przy każdej transformacji postaci energii.



Rys. 5. Przepływ energii przez harvester piezoelektryczny (na podstawie [16])

Przykład wykorzystania piezoelektrycznego harvestera energii w budynku przedstawił zespół Songi [17]. Jest to prototypowy model płytki podłogowej umożliwiającej pozyskiwanie energii elektrycznej z ruchu osób w budynku. Podczas dynamicznego obciążenia urządzenia modelowego przez przechodzącą osobę ważącą 100 kg udało się uzyskać moc ok. 148 mW co odpowiada gęstości mocy ok. 3,7 W/m^2 . Pozyskiwana w ten sposób energia wystarczała do zasilania bezprzewodowego układu czujnikowego.

Innym rozwiązaniem możliwym do zastosowania w budynku jest koncepcja harvestera elektromechanicznego montowanego bezpośrednio (bez przekładni zwiększającej obroty) do osi samozamykacza drzwi (rys. 6), generującego energię podczas ich otwierania i zamykania [18].



Rys. 6. Elektromechaniczny harvester energii zamontowany bezpośrednio na samozamykaczu drzwi

W rozwojowej wersji układu (w stosunku do przedstawionej w [18]) do przetwarzania energii mechanicznej użyto generator elektromagnetyczny w postaci hybrydowego silnika krokowego (200 kroków/obrót) współpracującego z diodowym podwajaczem-prostownikiem napięcia i układem przetwarzającym-nadzorczym oraz zasobnikiem energii o pojemności 0,1F. Zmodyfikowany układ prototypowy w każdym cyklu otwarcia i zamknięcia drzwi wytwarzał energię ok. 9 mJ i stabilne napięcie 2,1 V zasilające układ czujnikowy i mikroprocesorowy. Wystarczyło to do wykonania 15 cykli pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotność powietrza i radiowego transferu tych danych w paśmie 2,4 GHz na odległość kilku-kilkunastu metrów (silnie uzależnioną od lokalizacji ze względu na wykorzystanie niskomocowego układu radiowego nRF24L01+). Bezbaterijny prototyp zainstalowany na drzwiach wewnątrz budynku podczas ciągłej, kilkumiesięcznej eksploatacji wykonywał ponad 20 tysięcy pojedynczych pomiarów i transferów danych tygodniowo co odpowiada średnio ok. 2 pomiarom na minutę. W praktyce przekracza to wymagania częstotliwości pomiarów nakładane przez większości systemów BMS.

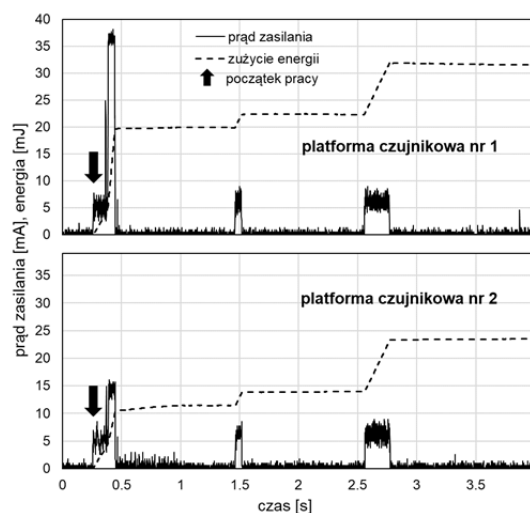
Łączność bezprzewodowa w budynkach wielkopowierzchniowych

Analiza wcześniej przytoczonych publikacji pozwala stwierdzić, że najbardziej energochłonną fazą działania zdalnego czujnika nie zawsze jest radiowy transfer danych gdyż praca układu czujnikowego w stanie uśpienia również może być kosztowna energetycznie. Dane przedstawione m.in. we wspomnianej pracy [15] pozwalają – na przykładzie modułu *Tyndall moth* – na dokonanie reprezentatywnej oceny energochłonności bezprzewodowego modułu czujnikowego wykorzystującego popularny w rozwiązaniach wewnątrzbudynkowych niskoenergetyczny standard transmisji ZigBee. Pojedynczy cykl pomiarowo-transmisyjny tego układu wymaga ok. 5 mJ energii a w czasie uśpienia układ pobiera moc ok. 33 μ W. a zatem pomiar powtarzany co 5 min wymaga łącznie ok. 14,9 mJ - odpowiada to średniej mocy ok. 49,7 μ W. Warto jednak zwrócić uwagę, że prawie 2/3 energii zużywane jest w stanie uśpienia tego modułu.

Z własnych doświadczeń Autorów, zebranych podczas wstępnych testów polowych przeprowadzonych jesienią 2019 r. na terenie jednej z największych galerii handlowych w Europie (m. Wrocław) wynika, iż w praktyce standard ZigBee zupełnie nie nadaje się do zastosowań w takiej lokalizacji ze względu na swój bardzo ograniczony zasięg (kilka-kilkanaście metrów) w budynku o konstrukcji żelbetowo-słupowej. W takich wielkopowierzchniowych, bardzo trudnych pod względem propagacji sygnału radiowego lokalizacjach (żelbetowe słupy, ściany i przegrody kondygnacyjne, metalowe elementy elewacyjne i wykończeniowe) bardzo dobrze sprawdza się natomiast standard łączności LoRa w europejskim pasmie 868 MHz. Zweryfikowano to doświadczalnie zarówno na terenie wspomnianej galerii handlowej jak i w rozległym, trzykondygnacyjnym budynku biurowym o kubaturze ponad 7000 m³. W tych dwóch lokalizacjach od prawie roku ciągle testowane są prototypowe, zdalne moduły (*nody*) czujnikowe, opracowane przez konsorcjum Grupa KMB - Politechnika Wroclawska [19]. Są one wyposażone m.in. w scalony moduł transceiwera LoRa (rodzina SX127X, Semtech), ultraniskomocowy mikrokontroler (rodzina ST32L, ST Microelectronics) oraz wieloparametrowy czujnik środowiskowy (BME280, Bosch). Wszystkie moduły pracują w klasie A (*class A*) z mocą +14dBm i komunikują się z przy użyciu protokołu komunikacyjnego (tzw. stosu) LoRaWAN w implementacji I-CUBE-LRWAN, udostępnianej

na zasadzie open-source przez ST Microelectronics [20]. Dwupoziomowe (na poziomie *MAC payload* oraz *application payload*) programowe szyfrowanie przesyłanych danych algorytmem kryptograficznym AES-CTR (personalizowanym dwoma 128-bitowymi kluczami, wymienianymi podczas procesu rejestracji nodów w sieci LoRa), zapewniają procedury *crypto-engine*, zaimplementowane wprost w użytych stosie LoRa [20, 21]. Ponieważ standard kryptograficzny AES jest zapisany w standardzie LoRa nie ma możliwości zastosowania innej metody szyfrowania a zatem sposób szyfrowania danych (i jego energochłonność) nie jest czynnikiem zmiennym modyfikującym zużycie energii przez moduły czujnikowe. Dane przesyłane przez zdalne moduły czujnikowe zostały zintegrowane z systemem zarządzania budynkiem KMB Chronomatik poprzez dedykowane oprogramowanie skryptowe realizowane albo bezpośrednio przez koncentrator (*gateway*) LoRaWAN, odpowiedzialny za utrzymanie i zarządzanie pracą sieci radiowej albo przez oprogramowanie serwerowe (*open-source LoRaWAN Network Server*), uruchomione na dodatkowym, zewnętrznym mikrokomputerze a zatem również nie wpływały na zużycie energii przez nody.

Lokalizacje w których prowadzono testy sieci modułów wymuszały ich naturalną i ciągłą koegzystencję z typowymi lokalnymi jak i globalnymi sieciami bezprzewodowymi, pracującymi w paśmie 433 MHz (zdalne sterowanie), 900/1800 MHz (telefonia komórkowa), 2,4 GHz (Wifi) i innych (m.in. RFID o nieznannej częstotliwości – nie prowadzono pomiarów widmowego rozkładu mocy sygnałów tła gdyż nie było to tematem omawianych prac badawczych). W tym przypadku niezaprzeczalną zaletą standardu LoRa, pozwalającą na poprawną pracę w środowisku o losowo zmiennym poziomie zakłóceń, była jego fizyczna warstwa obejmująca zarówno sposób modulacji nadawanego sygnału radiowego typu Chirp Spread Spectrum (CSS) jak i kodowanie danych z wyprzedzającą korekcją błędów (*Forward Error Correction FEC*) a także duża czułość odbiorników (do -137 dBm) i wysoki budżet łącza radiowego.



Rys. 7. Przykładowe przebiegi prądu zasilania i zużycia energii podczas pojedynczego pomiaru i transferu danych w zdalnych platformach czujnikowych z komunikacją LoRaWAN

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe przebiegi zużycia energii przez wspomniane zdalne moduły czujnikowe, zarejestrowane w warunkach rzeczywistych podczas pomiaru wewnątrzbudynkowych warunków środowiskowych (temperatura, wilgotności i ciśnienie) i transmisji danych

pomiarowych do nadrzędnego systemu BMS Chronomatik. Pojedynczy akt pomiarowo–nadawczy wymagał 23-32 mJ w zależności od odległości i jakości połączenia pomiędzy modułem czujnikowym a gateway'em LoRaWAN. Przy średniej mocy 14-30 μW pobieranej przez moduły w czasie głębokiego uśpienia 5 minutowy interwał pomiarowy (nakładany przez system zarządzania budynkiem BMS Chronomatik) wymaga w najgorszym przypadku średniej mocy zasilania ok. 140 μW przy czym tylko ok. 22 % energii zużywane jest w czasie bezczynności omawianych modułów czujnikowych LoRaWAN.

Testowano sieci złożone odpowiednio z 21 (galeria handlowa) oraz 15 zdalnych nodów (budynek biurowy), jednak jak pokazały testy ilość modułów (przynajmniej przy takiej liczbie zbudowanych sieci) nie wpływała na zużycie energii przez pojedyncze nody. Wynikało to zarówno z zastosowanej topologii sieci LoRaWAN (topologia gwiazdowa z pojedynczym centralnym gatewayem obsługującym bezprzewodowy transfer danych ze zdalnych nodów czujnikowych) oraz z faktu, iż nody pracowały asynchronicznie tzn. co do zasady nie nadawały jednocześnie. Niewielka ilość współistniejących nodów w testowanych sieciach, długi odstęp czasu pomiędzy transmisjami (5 min) oraz niewielka ilość przesyłanych danych (*payload* o wielkości 50-100 bajtów) wiązała się zatem z niskim stopniem obciążenia transmisyjnego kanału radiowego a zatem z małym prawdopodobieństwem kolizji pakietów danych i koniecznością ich retransmisji.

Przedstawione dane dotyczące zużycia energii przez zdalne moduły podczas pojedynczego aktu pomiarowo-transmisyjnego pozwalają na szacunkowe porównanie energochłonności modułów wykorzystujących standard łączności LoRa z przykładowym, literaturowo opisanym modułem ZigBee i wskazanie w ten sposób „energetycznej” przewagi standardu LoRa w rozległych zastosowaniach wewnątrzbudynkowych i wynikającej z niej szansy na harvestingowe zasilanie tych modułów.

Studium przypadku

Eksperymentalny harvester termoelektryczny opracowany do zasilania układu pomiaru temperatury szyn prądowych w rozdzielnicach SN [22] jest w stanie dostarczyć (przy napięciu wyjściowym 2,5 V) moc ok. 0,1 mW przy biernym chłodzeniu atmosferycznym (temperatura powietrza ok. 26°C) już dla temperatury źródła ciepła ok. 32°C (tzn. dla różnicy temperatur $\Delta T \sim 6^\circ\text{C}$). Natomiast przy temperaturze źródła 41°C i takich samych warunkach biernego chłodzenia tzn. przy $\Delta T \sim 15^\circ\text{C}$ moc takiego harvestera wzrasta do ok. 0,9 mW. Porównując te wartości z mocą zasilania wymaganą przez przedstawione wcześniej prototypowe platformy czujnikowe LoRaWAN można stwierdzić, że zasilanie harvestingowe odpadową energią ciepłą zdalnych układów czujnikowych o zasięgu wystarczającym do obsługi systemu BMS jest realne nawet w wielkopowierzchniowych, wielokondygnacyjnych budynkach o ile tylko dostępne jest źródło ciepła odpadowego zapewniające różnicę temperatur 10-15°C.

Przedstawione powyżej oszacowanie pokazuje, że właściwy dobór technologii łączności bezprzewodowej oraz minimalizacja zużycia energii w czasie jałowego uśpienia zdalnych modułów czujnikowo-radiowych zapewnia niezakłócony transfer danych pomiarowych do centralnego systemu BMS ze zdalnych czujników budynkowych, zlokalizowanych nie tylko na znacznym obszarze ale również w bardzo trudnych warunkach propagacji sygnałów radiowych.

Podsumowanie i wnioski

Ciągły rozwój techniki i oprogramowania umożliwił redukcję energii potrzebnej na pomiar wartości fizycznych, przetworzenie danych pomiarowych oraz przesłanie danych do nadrzędnych elementów systemów budynkowych. Dzięki redukcji zapotrzebowania na energię układów czujnikowych obecnie stosowane komercyjnie rozwiązania zasilane bateryjnie już co prawda zapewniają wieloletnie czasy pracy, niestety niosą za sobą konieczność okresowych prac serwisowych związanych z wymianą baterii. Bardzo atrakcyjną z punktu widzenia zarówno ekologii jak i logistyki alternatywą są zatem układy bezbateryjne wykorzystujące harvestery energii a tego typu zasilanie bezprzewodowych urządzeń IoT współpracujących z systemami BMS ma obecnie szansę na zastosowanie w lokalizacjach wewnątrzbudynkowych, choć wymaga to nadal wielu prac badawczo-wdrożeniowych, a takie alternatywne rozwiązania bezprzewodowe i bezbateryjne są często jedyną alternatywą przy projektowaniu, wykonywaniu oraz wdrażaniu systemów BMS choćby w budynkach zabytkowych, gdzie ze względu na wartość historyczną obiektu niemożliwe jest wykonywanie systemów automatyki w klasyczny sposób wymagający instalacji urządzeń przewodowych.

Autorzy: 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; dr hab. inż. Paweł Żyłka, Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.zylka@pwr.wroc.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] Dechnik M., Moskwa Sz., Smart House – inteligentny budynek – idea przyszłości, Przegląd Elektrotechn., R. 93 NR 9/2017
- [4] 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
- [5] Shaikh P. H., Nor N. B. M., Nallagownden P., Elamvazuthi I., Ibrahi T., A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34 (2014), pp. 409-429
- [6] 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
- [7] Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej, Dz.U. 2016 poz. 831
- [8] Wicakson H., Rogalski S., Kusnady E., Knowledge-based Intelligent Energy Management Using Building Automation System, Proc. 2010 IPEC Conference, doi:10.1109/IPEC.2010.5696994
- [9] Osmaa ., Amadoa L., Villamizara R., Ordoñez ., Building automation systems as tool to improve the resilience from energy behavior approach, *Procedia Engineering*, 118 (2015), pp. 861-868
- [10] Cisco (2014) The Internet of Things Reference Model, http://cdn.iotwf.com/resources/71/loT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf, dostęp 18.02.2021
- [11] Salomon N., Bernacki Ł., Gozdur R., Lisik Z., Skotnicki T., Przegląd metod zasilania alternatywnego w bliskim otoczeniu człowieka, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91 NR 9/2015
- [12] Shaikh F. K., Zeadally S., Energy harvesting in wireless sensor networks: comprehensive review, *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 55 (2016), pp. 1041–1054, doi:10.1016/j.rser.2015.11.010
- [13] Franciscatto B.. Design and implementation of a new low-power consumption DSRC transponder, Ph.D thesis, Université de Grenoble (2016), NNT: 2014GRENT037
- [14] Li M. *et al.*, Indoor Thin-Film Photovoltaics: Progress and Challenges, *Advanced Energy Materials*, 10 (2020) iss. 28, p. 2000641, doi:10.1002/aenm.202000641
- [15] Wang W. *et al.*, Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9 (2013), no. 6, doi:10.1155/2013/232438
- [16] Priya S. *et al.*, a Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits, (2017), De Gruyter, doi:10.1515/ehs-2016-0028.
- [17] Song G. J. *et al.*, Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications, *Applied Energy*, 256 (2019), p. 113916
- [18] Żyłka P., Pocięcha D., Energy harvesting schemes for building interior environment monitoring, *Proc. SPIE* 10161, 14th Intl. Conference on Optical and Electronic Sensors, 1016105 (2016), doi:10.1117/12.2244997
- [19] 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
- [20] User manual: STM32 LoRaWAN® Expansion Package for STM32Cube, ST Microelectronics, UM2073, rev. 11, 2021
- [21] White Paper: LoRaWAN™ security full end-to-end encryption for IoT application providers, , Gemalto/Actility/Semtech, 2017
- [22] Żyłka P., Doliński M., Energy harvesting in high voltage measuring techniques, 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 113 (2016), p. 012024, doi:10.1088/1757-899X/113/1/012024