

doi:10.15199/48.2016.11.16

Konstrukcja węzła bezprzewodowej sieci czujnikowej wykorzystującego Energy Harvesting

Streszczenie. W artykule przedstawione są założenia oraz wyniki prac, dotyczące budowy energetycznie autonomicznego węzła pomiarowego bezprzewodowej sieci czujnikowej. Elementem centralnym węzła jest mikrokontroler MSP430 cechujący się bardzo niskim zużyciem energii modemu radiowym pracującym w paśmie 2,4 GHz oraz blok energetyczny składający się z ogniw fotowoltaicznych oraz termogeneratora TEG wraz z układem zarządzania i magazynowania energii oraz blok sensorów konfigurowalny w zależności od potrzeb. W trybie przesłania informacji pomiarowej raz na minutę węzeł potrzebuje 40 mJ energii co jest możliwe do zgromadzenia w ciągu 57 sekund przy zastosowaniu amorficznego panelu solarnego o wymiarach 30×50 mm pracującego w warunkach oświetlenia na poziomie 900 lux.

Abstract. Outline of construction of new, autonomous wireless sensor node is presented in this paper. Central point of the node is built around MSP430FR microcontroller that is characterised with extremely low energy consumption. Additional elements of the node are radio communication module working in 2.4 GHz band, power supply section consisting of photovoltaic panels and thermoelectric generator with necessary regulators and sensors block configured due to specific needs. During typical measurement process node need 40 mJ per minute, what can be obtained per 57 seconds, using amorphous solar panel 30×50 mm operating on 900 lux insulation (**Construction of wireless sensor node utilizing energy harvesting**).

Słowa kluczowe: WSN, sieci bezprzewodowe, rozproszone systemy pomiarowe.

Keywords: WSN sensor networks, energy harvesting.

Wstęp

Bezprzewodowe sieci czujnikowe pozwalają na obserwowanie różnych wielkości pomiarowych na obszarach zróżnicowanych pod względem wielkości, zaludnienia, czy wyposażenia w infrastrukturę techniczną. Wykorzystując definicje przedstawione w pracy Hacia [1] i Dulmana [2] można powiedzieć, że bezprzewodowa sieć czujnikowa to sieć składająca się z węzłów pomiarowych obdarzonych pewnym stopniem autonomiczności i komunikujących się w sposób bezprzewodowy, rozlokowanych na danym terenie w celu realizacji wspólnego zadania pomiarowego. Podobnych definicji można znaleźć wiele, i chociaż różnią się one między sobą w wielu aspektach, to w każdej podstawowym elementem tworzącym sieć jest węzeł pomiarowy.

W zależności od zastosowań i wymagań węzły pomiarowe różnią się od siebie: paletą wielkości mierzonych, częstością wykonywania pomiarów, masą, wymiarami, możliwościami obliczeniowymi czy zastosowanym kanałem transmisji danych. Jednym z podstawowych parametrów węzła jest jego średni czas życia, który jest ściśle związany z zapotrzebowaniem energetycznym węzła i konstrukcją bloku zasilania. Nie zawsze istnieje możliwość podłączenia urządzeń do zewnętrznej sieci zasilającej. Większość sieci WSN monitorujących środowisko naturalne, co jest głównym przedmiotem zainteresowania autorów niniejszego artykułu, zazwyczaj nie ma takiej możliwości. W takich przypadkach wybór podzespołów, sprzętowa konstrukcja węzła i jego oprogramowanie są w dużej mierze podporządkowane wydajności energetycznej i możliwościom pozyskiwania energii ze środowiska.

Energy harvesting

Pod pojęciem Energy Harvesting (EH) kryje się szereg metod wykorzystujących naturalne zjawiska fizyczne pozwalające na przetwarzaniem różnych postaci energii na mikro i mili dawki energii elektrycznej. Energia elektryczna uzyskana z takich źródeł po zastosowaniu odpowiedniego kondycjonowania może być wykorzystana do zasilania różnorodnych układów pomiarowych. Metody pozyskiwania energii możemy podzielić ze względu na typ źródła pozyskiwania energii. Wtedy możemy wyróżnić:

- źródła o wydajności stałej takie jak mikroinstalacje wodne;
- źródła o wydajności okresowo-zmiennej do których można zaliczyć panele fotowoltaiczne;
- źródła o wydajności impulsowej którymi są głównie przetworniki energii kinetycznej na elektryczną bazujące na przetwornikach piezoelektrycznych.

Z punktu widzenia użyteczności zjawisk w zastosowaniu do EH prym wiodą zjawiska fotowoltaiczne, termiczne, piezoelektryczne, biochemiczne. W tabeli 1 zamieszczono przegląd aktualnie dostępnych technik energy harvesting.

Tabela 1. Wydajność aktualnie stosowanych metod energy harvesting [3–6]

Źródło energii	Elementy	Typowa gęstość energii
Promieniowanie słoneczne	Panele fotowoltaiczne	1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (oświetlenie 1 kW/m^2)
Fala mechaniczna (ruch, wibracje)	Turbina wiatrowa	3,5 mW/cm^2
	Turbina wodna	500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Różnica temperatur	Element piezoelektryczny	4,0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	Przetwornik elektromagnetyczny	3,8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Różnica temperatur	Moduł Peltiera TEG	40–100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$)
Fala elektromagnetyczna	Przetwornik RF/AC	20 mW (915 MHz, Pwej = 100 mW)

Do zasilania projektowanego węzła użyto przetworników fotowoltaicznych i termoelektrycznych.

Źródła fotowoltaiczne

Zjawisko fotowoltaiczne polega na powstaniu siły elektromotorycznej w ciele stałym (styk półprzewodników typu p oraz typu n lub na styku złącza m-s metal-półprzewodnik) pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego. W przypadku złącz p-n zjawisko przebiega wskutek pochłonięcia energii świetlnej tworząc tym samym dodatkowe nośniki prądu tj. elektrony i dziury. Kolejno następuje proces samorzutnego rozpręstrzenia się dziur do obszaru p, a elektronów do obszaru n co powodują powstanie potencjału elektrycznego na granicy obszarów. W przypadku efektu Dembera powstanie potencjału jest również możliwe w wyniku oświetlenia jednorodnego półprzewodnika.

Zjawisko fotowoltaiczne szeroko wykorzystywane jest do produkcji energii elektrycznej, głównie ze względu na stosunkowo wysoką sprawność (5–22%) oraz łatwa dostępność do źródła energii (światło słoneczne). W tabeli 2 przedstawiono zestawienie najczęściej wykorzystywanych technologii ogniw fotowoltaicznych.

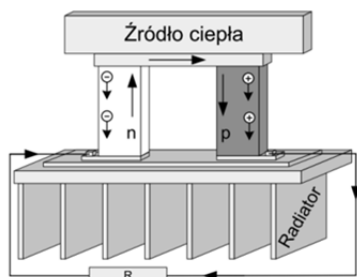
Warto zwrócić uwagę że sprawność finalna układu zasilającego zależy nie tylko od sprawności samego ogniwa ale również od warunków nasłonecznienia w miejscu pracy węzła pomiarowego. I tak dla węzła pracującego na szerokości geograficznej odpowiadającej Polsce, lub w warunkach nie bezpośredniego oświetlenia (tereny leśne, nienasłoneczone elewacje budynków) korzystniej jest zastosować panel polikrystaliczny gdyż jest on czulszy na promieniowanie odbite i załamane, niż cechujący się wyższą sprawnością panel monokrystaliczny.

Tabela 2. Wydajność ogniw fotowoltaicznych [7, 8]

Rodzaj	Sprawność	Technologia
Mono krystaliczne	18–22%	Wykonane z monokryształu krzemu, charakteryzują się ciemnym jednolitym kolorem
Poli krystaliczne	14–18%	Wykonane z wykrystalizowanego krzemu, mają niebieski kolor z wyraźnie widocznymi kryształami krzemu
CdTe	12–14%	Wykonane z tellurku kadmu w technologii cienkowarstwowej charakteryzują się ciemnym jednolitym kolorem
CIGS	10–12%	Wykonane z mieszanin miedzi, indu, galu, selenu są brązowe szare lub ciemne
Perowskit	8–15%	Wykonany z kryształów CaTiO ₃ , możliwość stworzenia cienkiej elastycznej przezroczystej powłoki
Amorficzne	6–10%	Wykonane z niewykrystalizowanego krzemu mają ciemno-bordowy kolor

Termogeneratory TEG

Podstawą działania generatora termoelektrycznego jest efekt Seebeck'a, który opisuje migrację mobilnych nośników ładunku elektrycznego w materiale na skutek poddaniu tego materiału działaniu nierównego gradientu temperatury.



Rys.1. Struktura przykładowego generatora termoelektrycznego

Umieszczenie struktury półprzewodnikowej (obszarów typu n i obszarów typu p) w polu temperatury o nierównym gradientcie, powoduje, że ładunki (większościowe dla danego obszaru) z cieplejszego końca struktury migrują do końca zimniejszego, co powoduje powstanie różnicy potencjału pomiędzy oboma końcami. Powstała różnica potencjałów może być zapisana zależnością

$$(1) \quad U = \alpha \Delta T$$

gdzie: α jest współczynnikiem Seebecka.

Najlepszymi materiałami termoelektrycznymi są silnie domieszkowane półprzewodniki. Współczynnikiem określającym jakość danego materiału pod kątem wykorzystania w budowie generatorów termoelektrycznych jest tzw. współczynnik dobroci zT (figure of merit), który definiowany jest zależnością (2).

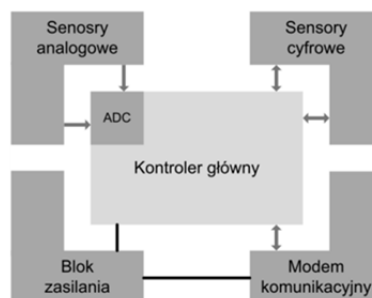
$$(2) \quad zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa}$$

gdzie: α jest współczynnikiem Seebecka, T – temperatura absolutna, ρ – rezystywność elektryczna, κ – konduktywność termiczna materiału.

Typowy generator termoelektryczny wykorzystuje wiele par typu n i p, które elektrycznie połączone są szeregowo a termicznie równolegle. Struktura przykładowego generatora termoelektrycznego przedstawiona jest na rys. 1.

Struktura węzła pomiarowego

Tendencje w budowie węzłów sieci czujnikowych zmierzają do miniaturyzacji tych rozwiązań pod względem zarówno wymiarów jak i masy. Drugim istotnym trendem jest ograniczenie zużycia energii zarówno chwilowej jak i średniej, co pozwala na wydłużenia czasu pracy węzła. Oba te kierunki zmian wiążą się z optymalizacją doboru podzespołów.



Rys.2. Struktura węzła bezprzewodowej sieci sensorów

Autorzy do budowy węzła wykorzystali mikrokontroler MSP430FR6989. Mikrokontrolery MSP430 są znane i stosowane w urządzeniach pomiarowych od wielu lat [9]. Jednak te z serii FR zostały wprowadzone na rynek stosunkowo niedawno i jeszcze nie znalazły swego miejsca w modułach WSN. Nadają się do tego doskonale, gdyż bazują na pamięci typu FRAM, czyli nieulotnej pamięci ferroelektrycznej. Główną zaletą tego typu pamięci jest bardzo mały pobór energii co jest kluczową cechą ze względu na konstrukcje i wymagania węzłów WSN. Cechuje się ona dużą trwałością rozumianą jako możliwość wielokrotnych zapisów. Lista wad pamięci FRAM jest równie duża co zalet ale z punktu widzenia konstrukcji węzłów WSN wady te nie mają znaczenia lub mają znaczenie marginalne. Główne ograniczenia to prędkość dostępu limitująca jej taktowanie do 8 MHz oraz relatywnie duża cena. Węzły WSN już ze swej natury są dość ograniczone w zasobach dlatego parametry takie jak taktowanie czy wielkość pamięci nie są istotnym problemem.

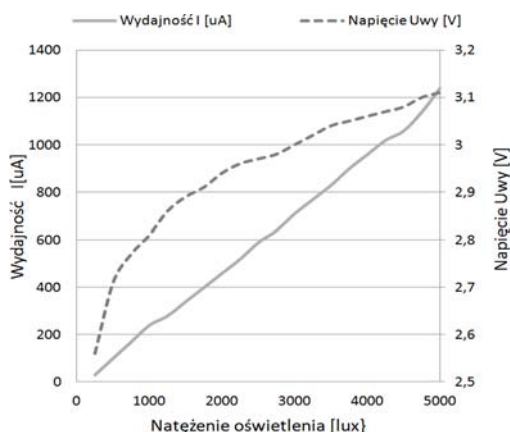
W przypadku MSP430FR6989 pamięci FRAM jest aż 128 kB co nie jest małą pojemnością w porównaniu na przykład z układem ATmega2560 stosowanym w popularnym Arduino Mega, gdzie do dyspozycji programisty jest 256 kB pamięci nieulotnej. W zakresie pamięci RAM układy te oferują odpowiednio 130 kB oraz 8 kB. Oba układy zawierają 16-kanalowy przetwornik ADC, jednak w przypadku MSP430FR6989 rozdzielczość jest wyższa bo 12-bitowa. Ponadto dostępne jest sprzętowe szyfrowanie algorytmem AES256. Wadą i barierą w zastosowaniu MSP430 może być dotychczasowa mniejsza popularność tych układów co przekłada się na mniejszą i bardziej hermetyczną społeczność programistów oraz mniejszą liczbę przykładowych projektów w porównaniu z popularnym i równie tanim środowiskiem Arduino.

W rozwoju węzłów WSN można zaobserwować trend w ramach, którego integruje się mikrokontrolery i jednostki komunikacyjne. Jednak w ramach obecnych technologii i dostępnych rozwiązań układowych brakuje takiej integracji z układami opartymi o FRAM. Dlatego w opisanym tutaj rozwiązaniu zdecydowaliśmy się pozostać w tradycyjnym modelu, gdzie układ radiowy jest osobnym elementem włączanym na życzenie. Powodem dla tego podejścia jest fakt iż przez większą część czasu węzeł sieci WSN, który nie posiada zasilania sieciowego ani nawet baterijnego, pozostaje w uśpieniu. Układ MSP430FR6989 dysponuje siedmioma trybami uśpienia. W przeprowadzonych testach udało się uzyskać ograniczenie zużycia prądu do poziomu około 0,2 μA przy zasilaniu napięciem 3,3 V. W przypadku aktywności pobór prądu wynosił około 3 μA .

Układ MSP430 w czasie aktywności węzła i tylko gdy jest to potrzebne włącza zasilanie dla transceivera nRF24L01+. Ten transceiver bazuje na znanym standardzie IEEE 802.15.4, powszechnie stosowanym w WSN. Układ komunikacyjny pobiera prąd o wielkości do 13,5 mA przy zasilaniu 3,3 V. Jest to wartość nieduża w typowych aplikacjach, jednak dla bezbaterijnego węzła sieci czujnikowej taka wielkość jest znaczna i stąd opisana kontrola zasilania tego układu poprzez mikrokontroler główny. W trybie nieaktywnym z głębokim uśpieniem („power down”) nRF24L01 pobiera prąd niemal 1 μA . Jak widać z porównania z mikrokontrolerem głównym jest to duża wartość i jej dalsze zmniejszenie ma istotny sens a ponieważ czas startu wynosi zaledwie 1,5 ms jest możliwa do praktycznej realizacji.

Blok zasilania

W prezentowanym węźle źródło zasilania oparte jest na dwóch układach energy harvesting. W celu zobrazowania wydajności energetycznej każdego z układów, testy zostały przeprowadzone dla każdej techniki oddzielnie. Amorficzne ogniwo fotowoltaiczne o wymiarach 30×50 mm jest podstawowym elementem dostarczającym energię potrzebną do zasilania węzła. Energia z ogniwa podawana jest na dedykowany układ zarządzania energią bazujący na konwerterze napięcia LTC3459 i regulatorze LTC2935-4. Natomiast buforem energii jest elektrolityczny kondensator o pojemności 100 μF . Konfiguracja ta pozwala na uzyskanie źródła napięciowego o znamionowej wartości 3,3 V i wydajności prądowej zależnej od warunków oświetlenia.

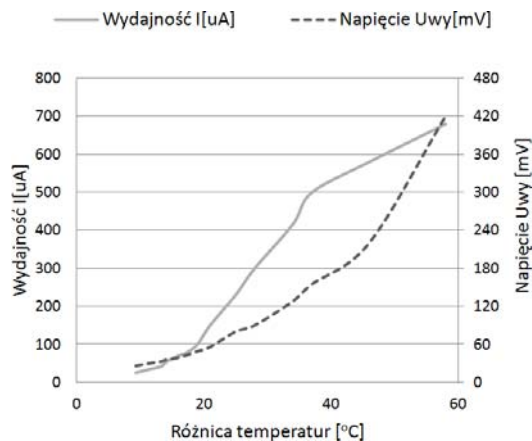


Rys.3. Charakterystyki pracy ogniwa fotowoltaicznego

W przypadku pracy węzła wewnątrz budynków gdzie natężenie oświetlenia wynosi 250–500 lux wydajność prądowa powyższego źródła waha się w granicach od 30 do 100 μA w pracy ciągłej. Daje to możliwość uzyskania 19,8 mJ w ciągu minuty pracy. Sytuacja ulega znacznej poprawie gdy węzeł pracuje na zewnątrz budynków. Przy

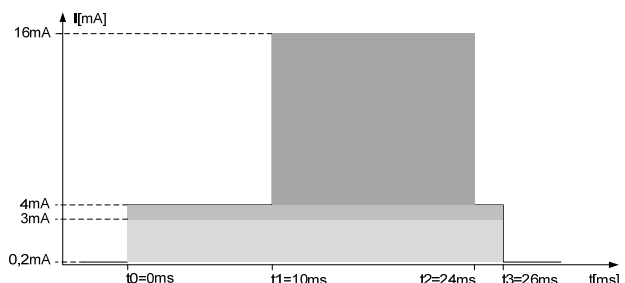
typowych wartościach oświetlenia słonecznego (2500 lux – pochmurny dzień, lub obszary zacienione, 5000 lux – pogodny dzień) wydajność prądowa układu wzrasta do 1200 μA . Umożliwia to wygenerowanie 237 mJ w ciągu jednej minuty pracy. Szczegółowa charakterystyka wydajności źródła bazującego na ogniwie fotowoltaicznym przedstawiona jest na rysunku 3. Widzimy że w rozpatrywanym zakresie zmian natężenia oświetlenia wydajność prądowa narasta liniowo natomiast napięcie mierzone bezpośrednio na ogniwie narasta eksponentalnie do wartości 3,1 wolta (Wartość $V_{\text{open circuit}} = 3,3\text{V}$)

Termogenerotor TEG o wymiarach 45×45 mm (wymiarzy radiatora 50×50×18 mm) współpracuje z konwerterem i regulatorem napięcia LTC3108 i buforem energetycznym w postaci kondensatora elektrolitycznego 100 μF . Taka konstrukcja układu ma stosunkowo niewielką wydajność energetyczną. W przypadku różnicy temperatur między powierzchnią podgrzewaną a radiatorem, na poziomie 10°C wydajność prądowa wynosiła około 35 μA co przy napięciu wyjściowym 3,3 V pozwala na zmagazynowanie w ciągu jednej minuty 7 mJ. Natomiast gdy różnica wynosiła 50°C wydajność prądowa wzrosła do 600 μA . W takich warunkach w ciągu minuty układ zmagazynuje 125 mJ. Szczegółowe charakterystyki pracy zastosowanego termogeneratora przedstawione są na rysunku 4.



Rys.4. Charakterystyki pracy termogeneratora TEG

Warto zauważyć że wartości gradientów temperaturowych możliwych do uzyskania w czasie pracy węzła w środowisku naturalnym wahają się w granicach od kilku do kilkunastu stopni Celsjusza. Znacznie ogranicza to wydajność powyższego źródła, a co za tym idzie użyteczność w projektowanej aplikacji



Rys.5. Zapotrzebowanie energetyczne węzła w czasie wykonywania pomiarowych i transmisji danych (nominalne napięcie zasilające węzeł $U_z = 3,3\text{V}$)

Zapotrzebowanie energetyczne typowego procesu pomiarowego węzła przedstawione jest na rysunku 5. Proces zaczyna się w chwili to od wyprowadzenia układu kontrolera ze stanu uśpienia, Do czasu t1 wykonywana jest sekwencja pomiarów oraz formatowanie danych do

wysłania. W chwili t1, zostaje uruchomiony modem radiowy i pakiet danych jest wysyłany. Po wysłaniu danych, modem zostaje wprowadzany w stan uśpienia – czas t2. Po sprawdzeniu poprawności wykonania się procedur zostaje uruchomiony proces odpowiadający za wprowadzenie mikrokontrolera w stan uśpienia (LMP) i wybudzenia po ustalonym czasie. W chwili t3 cały węzeł przechodzi w stan oszczędzania energii. Na wykonanie jednego cyklu pomiarowego potrzeba 0,9 mJ. Dodatkowo źródło energii musi mieć chwilową wydajność prądową na poziomie 16 mA. Maksymalna moc pobierana przez węzeł w czasie transmisji danych wnosi 53 mW. W czasie uśpienia zapotrzebowanie energetyczne węzła spada drastycznie i wnosi 0,66 mW. Oznacza to że w ciągu jednej minuty węzeł zużywa 39,6 mJ energii.

Typowe częstotliwości wykonywania pomiarów parametrów środowiska naturalnego wahają się w przedziale od 1 pomiar na minutę do 1 pomiar na 5 minut. Częstotliwości te związane są z dynamiką procesów naturalnych. Zakładając takie częstotliwości pomiarów można zauważyć, że energia pobierana przez węzeł w czasie jednej godziny, przy wykonaniu i przestaniu jednego cyklu pomiarowego na minutę wynosi 2460 mJ. Gdy zmniejszymy częstotliwość pomiarów pięciokrotnie energia pobierana przez węzeł w rozpatrywanym czasie wyniesie 2390 mJ. Tak więc dla prezentowanego węzła zmniejszenie częstotliwości pomiarów nie wpływa znacząco na zapotrzebowanie energetyczne. Spowodowane jest to głównie możliwością bardzo szybkiego przejścia ze stanu uśpienia do stanu aktywnego zarówno kontrolera głównego jak i modułu radiowego. Proces ten trwa około 110 μ s.

Tabela 3. Wydajność zastosowanych źródeł energii

Układ zasilania warunki pracy	Energia wygenerowana w ciągu 1h	Liczba cykli pomiarowych (minut pracy)
Panel Fotowoltaiczny 900 lux słabe oświetlenie dzienne – duże zachmurzenie, zacinienie	2610 mJ	63
Panel Fotowoltaiczny 3000 lux pogodny dzień	8430 mJ	205
Termogenerator $dT = 10^{\circ}C$ typowe warunki termiczne	320 mJ	7
Termogenerator $dT = 20^{\circ}C$ warunki trudne do uzyskania w środowisku naturalnym	1780 mJ	43

W tabeli 3 przedstawiony został maksymalny czas pracy węzła przy wykonaniu jednego cyklu pomiarowego na minutę, w odniesieniu do wydajności energetycznej bloków zasilających bazujących na układach energy harvesting pracujących w różnych warunkach klimatycznych. Analizując dane widzimy, że autonomiczna pod względem energetycznym, praca węzła możliwa jest przy wykorzystaniu paneli fotowoltaicznych. Realizacja bloków zasilających bazujących tylko na termogeneratorach nie zabezpieczy potrzeb energetycznych węzła.

Wnioski

Prezentowany węzeł jest prostym układem pomiarowym. Głównym jego celem było przetestowanie możliwości energetycznych, układów zasilania wspomaganych technikami energy harvesting. Z przedstawionych rozważań wynika że zastosowanie energooszczędnego układu: mikrokontrolera MSP430FR, układu radiowego nRF24L01 oraz cyfrowych sensorów temperatury i wilgotności względnej, pozwala zbudować węzeł pomiarowy pobierający w stanie maksymalnej aktywności 53 mW. Natomiast w czasie uśpienia pobór mocy spada poniżej 1 mW.

Pomimo tak niskiego zapotrzebowania energetycznego przy pracy węzła w środowisku naturalnym, energia uzyskana z termogeneratora jest nie wystarczająca do autonomicznej pracy węzła. Gdy użyjemy układu zasilania bazującego na ogniwie fotowoltaicznym to w warunkach słabego oświetlenia zewnętrznego (900–1000 lux) jesteśmy w stanie zagwarantować ciągłą pracę węzła.

Problemem pozostaje praca węzła w warunkach braku oświetlenia. W takich warunkach (nocnych) energia uzyskiwana z paneli fotowoltaicznych spada do zera, ale również obniża się sprawność termogeneratorów (brak nagrzewania okładziny przez promieniowanie słoneczne). Więc zastosowanie nawet obu testowanych konwerterów energii nie przyniesie spodziewanego rezultatu. Problem ten można rozwiązać stosując znacznie większe bufony energii zbudowane na superkondensatorach z jednoczesnym zwiększeniem powierzchni paneli solarnych. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie harwesterów piezoelektrycznych lub magnetostrykcyjnych, wykazujących duże uzyski energii w środowisku gdzie występują drgania mechaniczne [10]. Niemniej rozwiązania te pociągają za sobą znaczne zwiększenie gabarytów i masy węzła pomiarowego, oraz wykluczają niektóre lokalizacje.

Aktualnie wszystkie elementy węzła zostały sprawdzone indywidualnie w warunkach laboratoryjnych. Planowane jest zespolenie wszystkich podzespołów na jednej płycie pcb i sprawdzenie węzła w środowisku naturalnym. Mimo napotkanych trudności przedstawiona konstrukcja jest przykładem tego, jak za pomocą najnowszych technologii dostępnych na rynku, można w praktyce zbudować bezbaterijny węzeł sieci czujnikowej.

Autorzy: dr inż. Bogdan Dziadak, E-mail: bogdan.dziadak@ee.pw.edu.pl, dr inż. Lukasz Makowski, E-mail: lukasz.makowski@ee.pw.edu.pl, prof. dr hab. inż. Andrzej Michalski, E-mail: andrzej.michalski@ee.pw.edu.pl, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

LITERATURA

- [1] Hać A., *Wireless Sensor Network Designs*, Wiley (2003)
- [2] Zurawski R. (editor), Dulman S. and all, *Embedded Systems Handbook*, Chapter 31 – Introduction to Wireless Sensor Networks, Taylor and Francis (2006)
- [3] Calhoun B.H., Daly D.C., Verma N., Finchelstein D.F., Wentzloff D.D., Wang A., Cho S., Chandrakasan A.P., Design considerations for ultra-low energy wireless microsensor nodes, *IEEE Transactions on Computers*, 54 (2005), n.6, 727-740
- [4] Wan Z.G., Tan Y.K., Yuen C., Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Technology* (2011), 317-362
- [5] Tan Y.K., Panda S.K., Self-autonomous wireless sensor nodes with wind energy harvesting for remote sensing of wind-driven wildfire spread, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60 (2011), n.4, 1367-1377
- [6] Tuna G., Gungor V.C., Ch2 – Energy harvesting and battery technologies for powering wireless sensor networks, *Industrial Wireless Sensor Networks*. Woodhead Publishing (2016), 25-38
- [7] Luque A., Hegedus S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Wiley (2011)
- [8] International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Serie S Volume 1: Power Sector Solar Photovoltaics* (2012), 4/5
- [9] Hörmann L. B., Glatz P. M., Steger C., Weiss R., A wireless sensor node for river monitoring using MSP430® and energy harvesting, *4th Education and Research Conference (EDERC)* (2010), 140-144
- [10] Mech R., Kaleta J., Lewandowski D., Wiewiorski P., Energy harvester based on Terfenol-D for low power devices, *Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences*, II/1 (2014), 8-12