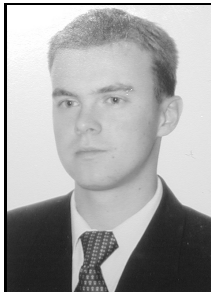


**Jakub OLSZYNA, Wiesław WINIECKI**  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT RADIOELEKTRONIKI,  
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

## Metody pozyskiwania energii dla autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych

Mgr inż. Jakub OLSZYNA

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych PW, specjalności Radiokomunikacja i Techniki Multimedialne. Obecnie doktorant w Instytucie Radioelektroniki, członek IEEE. Autor lub współautor 15 publikacji naukowych. Aktualne obszary zainteresowań: rozproszone systemy pomiarowo-sterujące, sieci czujnikowe, arytmetyka modułowa w kryptografii klucza publicznego.



e-mail: J.Olszyna@ire.pw.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Wiesław WINIECKI

Prof. nzw. na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych PW. Kierownik zespołu Komputerowej Techniki Pomiarowej. Członek Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, wiceprezes POLSPAR, członek IEEE. Autor lub współautor 4 książek i ponad 170 publikacji naukowych. Obszary zainteresowań: systemy pomiarowe, przyrządy wirtualne, nowoczesne technologie komunikacyjne i programowe w skupionych i rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych.



e-mail: W.Winiecki@ire.pw.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono metody pozyskiwania energii dla autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych. Pozyskiwanie energii w takich systemach odbywa się za pomocą dedykowanych układów, w niektórych przypadkach źródłem energii może być sam obiekt pomiarowy. Źródła energii odpowiednie dla ww. zastosowań możemy przyporządkować do jednej z kategorii: ruch i wibracje, różnica temperatur, promieniowanie świetlne i fale radiowe.

**Słowa kluczowe:** rozproszone systemy pomiarowe, autonomiczne bezprzewodowe sieci czujnikowe, pozyskiwanie energii.

### Energy harvesting methods for autonomous wireless sensor networks

#### Abstract

The paper presents energy harvesting methods suitable for autonomous wireless sensor networks. The average power demand of a typical sensor is between 20-100  $\mu\text{W}$  [1]. In such systems energy is harvested via dedicated circuits. In some cases a measured object can be an energy source. Energy sources adequate for the abovementioned applications can be assigned to one of the categories: movement and vibration, temperature differences, light radiation, radio-frequency waves [1, 2, 3]. An analysis of available solutions in terms of power density or dimensions of power harvesting circuit is required for each energy source. Another important issue is the energy source power characteristic and whether it is controllable. If harvested energy is not stored (battery), a key parameter becomes the average power. In the paper we take a close look at energy harvesting approaches, along with the underlying physics and the power output. The achievable power ranges from 0,1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  to 15  $\text{mW}/\text{cm}^2$  (depending on the size of the energy harvesting unit). The highest power can be achieved with photovoltaic cells under direct exposure to the sunlight.

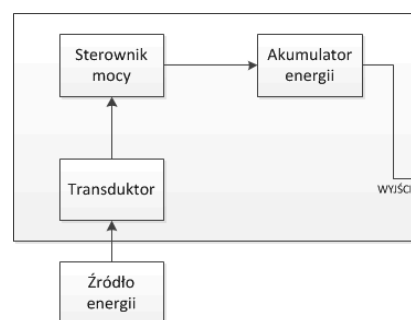
**Keywords:** distributed measurement systems, autonomous wireless sensor networks, power harvesting.

## 1. Wprowadzenie

Bezprzewodowe sieci czujnikowe (ang. *Wireless Sensor Networks*) charakteryzują się ograniczonymi zasobami, niewielkie wymiary węzłów ograniczają wybór i pojemność stosowanych baterii. Ponadto elementy sieci mogą być rozmieszczone w sposób losowy (*ad hoc*) [4]. Niewielkie wymiary urządzeń ograniczają pojemność baterii, przez co zwiększają się koszty i trudność utrzymania, a zmniejsza się żywotność urządzeń. Jednocześnie niektóre zastosowania wymagają pracy w trudnym środowisku, co dodatkowo utrudnia proces wymiany baterii. Powyższe utrudnienia doprowadziły do powstania koncepcji autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych (ang. *Autonomous Wireless Sensor Networks*), która zakłada pobór energii z otoczenia, a także efektywne zarządzanie zasobami systemu [1, 5].

Powyższe założenia prowadzą do zmniejszenia zużycia energii w systemie, co skutkuje niższymi kosztami instalacji i utrzymania, uproszczoną konfiguracją i utrzymania, a także uproszczoną konfiguracją i zwiększoną skalowalnością (zachowaniem wydajności systemu przy zwiększaniu liczby jego elementów). Obszary zastosowań autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych to m.in. ochrona i monitoring zdrowia, przemysł motoryzacyjny, inteligentne budynki czy testowanie i utrzymanie budowli (mostów, budynków, tuneli).

Pozyskiwanie energii dla autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych wymaga analizy dostępnych rozwiązań pod kątem osiągalnego poziomu mocy czy wymiarów układów pozyskujących energię [1, 2, 3]. Schemat ideowy typowego układu pozyskiwania energii zamieszczono na rysunku 1. Najważniejszym elementem jest transduktor, który odpowiada za przetwarzanie energii ze źródła zewnętrznego na energię elektryczną. Kluczowym parametrem jest sprawność konwersji  $\eta$ , która oznacza stosunek mocy pobranej ze źródła do mocy prądu elektrycznego na wyjściu. Sterownik mocy transformuje napięcie do poziomu odpowiedniego dla akumulatora energii (baterii), który może przechowywać jej nadmiar do późniejszego wykorzystania.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pozyskiwania energii z otoczenia  
Fig. 1. Schematic diagram of the energy harvesting unit

Akumulator jest niezbędny w przypadku, gdy chwilowa moc pozyskiwana ze źródła jest niższa niż potencjalne zapotrzebowanie, średnie zapotrzebowanie na moc typowego czujnika (pomiar-transmisja-tryb uśpienia) zawiera się w granicach 20 – 100  $\mu\text{W}$  [1]. Istotnym zagadnieniem jest też charakterystyka źródła, która określa dostępny poziom mocy oraz czy źródło jest przewidywalne i kontrolowalne, tzn. czy dostępna gęstość energii może być przewidywana, a ilość energii wykorzystywanej do konwersji kontrolowana i regulowana w dowolnym momencie [2]. Źródłem energii może być sam sygnał pomiarowy, co prowadzi do integracji układu poboru mocy z układem czujnika.

Źródła energii odpowiednie dla zastosowań w autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych możemy przyporządkować do jednej z kategorii, w zależności od leżącego u podstaw zjawiska fizycznego:

- Ruch i wibracje
- Różnica temperatur
- Promieniowanie świetlne
- Fale radiowe

Analiza mocy teoretycznej i dostępnej w praktycznych aplikacjach, w odniesieniu do każdego z powyższych źródeł energii jest przedstawiona w kolejnych rozdziałach.

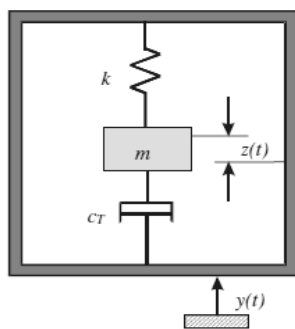
## 2. Ruch i wibracje

Energia ruchu lub wibracji może zostać przetworzona do postaci energii elektrycznej za pomocą jednego z mechanizmów:

- Transduktor elektrostatyczny (prąd powstały w wyniku zmiany odległości pomiędzy okładkami kondensatora),
- Transduktor elektromagnetyczny (prąd powstały w wyniku ruchu magnesu w solenoidzie)
- Transduktor piezoelektryczny (ładunek powstały w wyniku naprężeń lub odkształceń materiałów piezoelektrycznych) [7].

Schemat ideowy układu pozyskiwania energii z wibracji przedstawiono na rysunku 2. Przedstawiony układ zawiera drgającą masę, sprężynę i tłumik, co stanowi mechaniczny odpowiednik obwodu RLC. Maksymalna moc  $P_{max}$  zależy od amplitudy drgań  $z_{max}$  masy  $m$ , częstotliwości drgań  $f_{res}$  oraz amplitudy drgań zewnętrznych  $Y$  i może być wyrażona wzorem [6]

$$P_{max} = 4\pi^3 m f_{res}^2 Y z_{max} \quad (1)$$



Rys. 2. Schemat ideowy układu pozyskiwania energii wibracji [6]  
Fig. 2. Schematic diagram of vibration energy harvesting [6]

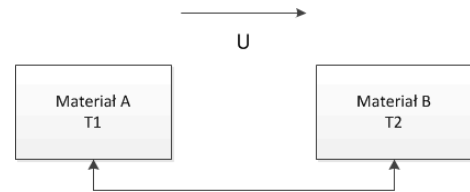
Częstotliwość drgań musi odpowiadać podstawowej składowej częstotliwości drgań zewnętrznych. Teoretycznie wszystkie mechanizmy konwersji pozwalają wykorzystać całą moc określoną równaniem (1). Najpowszechniej stosowane są transduktory piezoelektryczne. W takim przypadku dostępna moc wynosi 100 – 150  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  [8].

## 3. Różnica temperatur

Energia różnicy temperatur może być przetworzona na energię elektryczną dzięki efektowi Seebecka. Efekt ten opisuje zjawisko termoelektryczne polegające na powstaniu siły termoelektrycznej na styku dwóch przewodników lub półprzewodników (rys. 3). Wartość napięcia jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatur spoiny oraz wolnych końców. Maksymalna moc jest określona zależnością

$$P_{max} = \frac{(2\alpha\Delta T)^2}{4R_{TEG}} \quad (2)$$

gdzie  $\alpha$  określa współczynnik Seebecka materiału,  $\Delta T$  różnicę temperatur, a  $R_{TEG}$  zastępczą rezystancję elektryczną.



Rys. 3. Schemat ideowy układu pozyskiwania energii różnicy temperatur  
Fig. 3. Schematic diagram of temperature difference energy harvesting

Sprawność konwersji zależy od charakterystyki danego materiału, w szczególności od parametru  $ZT$  danego wzorem:

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho\lambda} \quad (3)$$

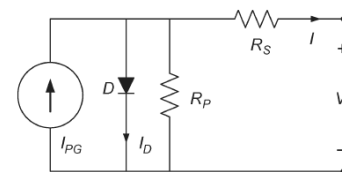
gdzie  $\rho$  oznacza rezystywność elektryczną, a  $\lambda$  przewodność cieplną materiału. Najpopularniejszym materiałem stosowanym w praktyce jest bizmutek telluru ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) o wartości  $ZT$  równej 0,9. Sprawność konwersji wynika z prawa Carnota i może być wyliczona zgodnie z zależnością

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_l}{T_h}} \quad (4)$$

gdzie  $T_l$  i  $T_h$  oznaczają odpowiednio temperaturę chłodniejszego i cieplejszego z materiałów. Moc osiągnięta w praktyce wynosi 2,8  $\text{mW}/\text{cm}^2$  dla różnicy temperatur rzędu 10 K [9].

## 4. Promieniowanie świetlne

Ogniwa fotowoltaiczne konwertują energię fotonów na energię elektryczną. Energia może pochodzić zarówno od światła słonecznego jak i od sztucznych źródeł oświetlenia. Ogniwo fotowoltaiczne może być rozpatrywane jako źródło prądowe, elektryczny schemat zastępczy ogniwa przedstawiono na rysunku 4.



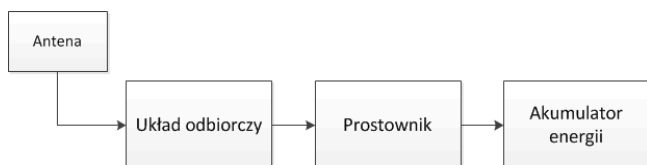
Rys. 4. Schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego [10]  
Fig. 4. Equivalent circuit of a photovoltaic cell [10]

Najpowszechniej stosowanym materiałem do konstrukcji ogniw fotowoltaicznych jest krzem (monokryształ, polikryształ lub amorficzny). Maksymalna moc zależy od poziomu luminancji, który wynosi od kilku (w przypadku oświetlenia wewnątrz budynków) do kilkudziesięciu tysięcy luksów (w przypadku ekspozycji na światło słoneczne). Teoretyczna maksymalna sprawność konwersji jest określona przez limit Shockleya-Queissera i wynosi ok. 33% (w praktyce wynosi ok. 10% dla polikrystalicznego krzemu). Praktycznie dostępna moc wynosi 10 – 15  $\text{mW}/\text{cm}^2$  dla światła słonecznego oraz 10 – 100  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  dla oświetlenia sztucznego wewnątrz budynków [10].

## 5. Fale radiowe

Fale radiowe są wszechobecne w postaci transmisji telewizyjnych, radiowych, sieci telefonii komórkowej czy WLAN. Fale

radiowe są interesującym źródłem energii także dlatego, że pozwalają zarówno na pozyskiwanie energii aktywnych transmisji rozszewczonych [11] jak i bezprzewodową transmisję energii na określonych częstotliwościach [12]. Najczęściej spotykanymi częstotliwościami są 474 – 858 MHz (DVB-T), 900/1800 MHz (GSM), 2 MHz (UMTS) i 2,4 GHz (WLAN). W kontakcie z przewodnikiem (anteną) fale radiowe wywołują przepływ prądu (efekt naskórkowy). Schemat ideowy układu pozyskiwania energii fal radiowych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat ideowy układu pozyskiwania energii fal radiowych  
Fig. 5. Schematic diagram of radio waves energy harvesting

Maksymalna moc jaką można pozyskać określona jest wzorem Friisa, który określa stosunek mocy transmitowanej do mocy odebranej pomiędzy dwiema antenami [1]

$$P_{\max} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R^a} \cdot \gamma \quad (5)$$

gdzie  $P_T$  określa moc anteny nadawczej,  $G_T$  i  $G_R$  zyski anten (odpowiednio nadawczej i odbiorczej),  $a$  oznacza tłumienie ośrodka ( $a=2$  w przypadku braku strat związanych z odbiciami),  $\gamma$  określa straty związane z niedopasowaniem anten, polaryzacją itp. ( $\gamma=1$  w przypadku braku strat),  $R$  odległość pomiędzy anteną nadawczą a odbiorczą, a  $\lambda$  długość fali. Sprawność konwersji energii zależy od typu anteny.

W przypadku pozyskiwania energii z istniejących transmisji największym utrudnieniem jest mała gęstość mocy malejąca wraz z odległością (rzędu 0,1 – 10 mW/cm<sup>2</sup> dla odległości 25 – 100 m od stacji bazowej GSM). Dostępna w praktycznych rozwiązaniach moc wynosi jedynie 0,1 μW/cm<sup>2</sup> w przypadku przechwytywania transmisji sygnału telewizji cyfrowej [11] oraz 1 – 10 μW/cm<sup>2</sup> w przypadku przechwytywania sygnału GSM [12]. W przypadku transmisji energii drogą radiową nadajnik i odbiornik powinny znajdować się w niewielkiej odległości [13], dla emitowanej mocy 1 W około 10 mW może zostać pozyskane w odległości 5 m [12]. Układ pozyskujący energię może być w całości wytworzony w technologii VLSI, z wykorzystaniem układu Villarda [14]. Głównym ograniczeniem jest konieczność pracy na ustalonej częstotliwości i przy ustalonym poziomie mocy wejściowej, co może ograniczać elastyczność układów [12]. Architektury układów konwersji energii fal radiowych do postaci DC zostały przedstawione w [15].

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd metod pozyskiwania energii dla autonomicznych bezprzewodowych sieci czujnikowych. Rozważane źródła energii należą do jednej z kategorii: ruch i wibracje, różnica temperatur, promieniowanie świetlne i fale radiowe. Spośród przedstawionych źródeł energii promieniowanie świetlne pozwala na zasilanie urządzeń o największej mocy. Dzięki zastosowaniu ogniw fotowoltaicznych i w przypadku bezpośredniej ekspozycji na światło słoneczne można pozyskać 10 – 15 mW/cm<sup>2</sup> [10]. Alternatywę dla pozyskiwania energii z otoczenia może stanowić bezprzewodowa transmisja energii za pośrednictwem fal radiowych, co pozwala na pozyskanie 10 mW/cm<sup>2</sup> (dla odległości rzędu 3 – 5 m od anteny nadawczej) [12]. Przykładowe wartości mocy pozyskiwanej w praktycznych rozwiązaniach zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Moc pozyskiwania z różnych źródeł energii  
Tab. 1. The power harvested from different energy sources

Źródło energii	Ruch i wibracje	Różnica temperatur	Promieniowanie świetlne		Fale radiowe
			Na zewnątrz	wewnątrz	
Moc [μW/cm <sup>2</sup> ]	100 – 150	2800 (ΔT=10K)	15 000	10 – 100	1 – 10

Praca została częściowo sfinansowana ze środków Samorządu Województwa Mazowieckiego w ramach stypendium 36/ES/ZS-II/W-2151.1/11 oraz przez Fundację Wspierania Rozwoju Radiokomunikacji i Technik Multimedialnych.

## 7. Literatura

- [1] Vullers R. J. M., Schaijk R. V., Visser H. J., Penders J., Hoof C. V.: Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks, IEEE Journal of Solid-State Circuits, t. 2 (2), s. 29–38, 2010.
- [2] Ando B., Baglio S., Trigona C.: Autonomous sensors: From standard to advanced solutions [Instrumentation notes], IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, t. 13 (3), s. 33–37, 2010.
- [3] Sudevalayam S., Kulkarni P.: Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, t. 13 (3), s. 443–461, 2011.
- [4] Akyildiz F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E.: A survey on sensor networks, Communications Magazine, t. 40 (8), s. 102– 114, 2002.
- [5] Boniewicz M., Zieliński M.: Pomiarowa sieć radiowa o niskim zużyciu energii, PAK, t. 2011 (12), s. 1515–1517, 2011.
- [6] Beeby S. P., Tudor M. J., White N. M.: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, Meas. Sci. Technol., t. 17 (2006), s. R175–R195, 2006.
- [7] Zasada K., Krawczuk M.: Uzyskiwanie energii za pomocą materiałów piezoelektrycznych, PAK, t. 2010 (5), s. 445–449, 2010.
- [8] Hande A., Bridgelall R., Zoghi B.: Vibration Energy Harvesting for Disaster Asset Monitoring Using Active RFID Tags, Proc. of the IEEE, t. 98 (9), s. 1620–1628, 2010.
- [9] Bottner H., Nurnus J., Schubert A., Volkert F.: New high density micro structured thermogenerators for stand alone sensor systems, Proc. 26th International Conference on Thermoelectrics, s. 306–309, 2007.
- [10] Nasiri A., Zabalawi S. A., Mandic G.: Indoor Power Harvesting Using Photovoltaic Cells for Low-Power Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, t. 56 (11), s. 4502–4509, 2009.
- [11] Sample A., Smith J. R.: Experimental results with two wireless power transfer systems, Proc. IEEE Radio and Wireless Symposium, s. 16–18, 2009.
- [12] Marian V., Allard B., Vollaie C., Verdier J.: Strategy for Microwave Energy Harvesting From Ambient Field or a Feeding Source, IEEE Transactions on Power Electronics, t. 27 (11), s. 4481–4491, 2012.
- [13] Riviere S., Douyere A., Alicalapa F., Luk J. D. L. S.: Study of complete WPT system for WSN applications at low power level, IEEE Electronics Letters, t. 46 (8), s. 597–598, 2010.
- [14] Jabbar H., Song Y. S., Jeong T.T.: RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices, IEEE Transactions on Consumer Electronics, t. 56 (1), s. 247–253, 2010.
- [15] Reinisch H., Gruber S., Wiessflecker M., Unterassinger H., Hofer G., Pribyl W., Holweg G.: An electro-magnetic energy harvester with 190nW idle mode power consumption for wireless sensor nodes, Proceedings of the ESSCIRC, s. 234–237, 2010.

otrzymano / received: 02.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.09.2012

artykuł recenzowany / revised paper