

# Energy Harvesting w sensorach bezprzewodowych

## – jak skutecznie pobierać energię z otoczenia?


**MICROCHIP**

**Korzystanie z technik Energy Harvestingu do zasilania bezprzewodowych czujników nie musi być ani skomplikowane, ani kosztowne. Staranny wybór protokołu komunikacyjnego, przepustowości transmisji danych oraz wykorzystanie funkcji oszczędzania energii, dostępnych w najnowszych układach radiowych mogą zdecydowanie ograniczyć pobór mocy sensorów. A to prowadzi do tworzenia czujników bezprzewodowych, które mogą pracować praktycznie nieskończenie długo bez lub z minimalną obsługą ze strony człowieka.**

Techniki omówione w niniejszym artykule nie są skomplikowane. Jednocześnie pozwalają na stworzenie bezobsługowych czujników bezprzewodowych, które bez ponoszenia dużych kosztów mogą komunikować się z siecią w aplikacjach takich jak inteligentne budynki, automatyka domowa i komunikacja M2M. Trzeba też pamiętać, że o ile oczywiście koszty realizacji sieci bezprzewodowej wynikają przede wszystkim z kosztu sprzętu, pod uwagę trzeba też brać inne czynniki. Należą do nich opłaty za badania i certyfikację zgodności z wybranymi standardami, takimi jak ZigBee i Bluetooth oraz opłaty licencyjne.

### Źródła energii

Ilość energii, która może być pobrana z otoczenia przez czujnik bezprzewodowy jest zazwyczaj ograniczona przez jego koszt i rozmiar. Dlatego kluczowe jest upewnienie się, że ilość energii zużywana przez sam czujnik i jego bezprzewodowy nadajnik jest mniejsza, niż energia dostarczana z otoczenia.

Istnieje wiele źródeł, z których można pobierać energię. Najbardziej popularną z nich jest energia słoneczna. Panele słoneczne są oferowane w rozmiarach począwszy od wielkich ekranów, złożonych z wielu ogniw, a kończąc na małych panelach, zasilających kalkulatory i zabawki.

Inne źródła energii obejmują fale radiowe, które można odbierać za pomocą anten i przetwarzać na energię elektryczną oraz np. energię

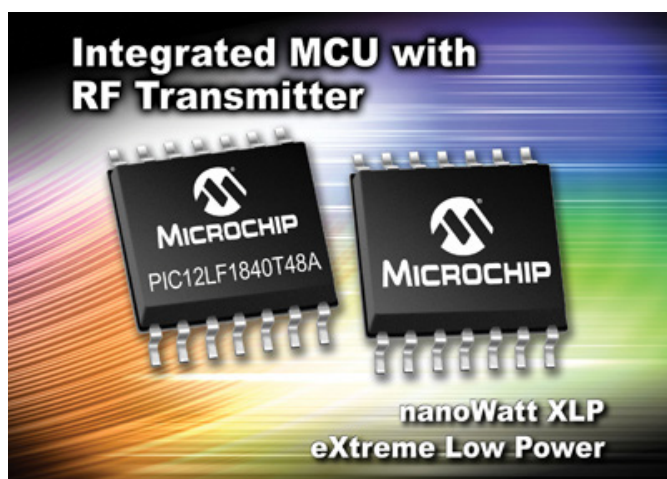
elektro-mechaniczną, która pobierana jest z magnesu poruszającego się w pobliżu cewki. Można również skorzystać z gradientów temperatury, a więc wykorzystać energię termoelektryczną, pobieraną w oparciu o zjawisko Seebecka.

### Kompatybilność

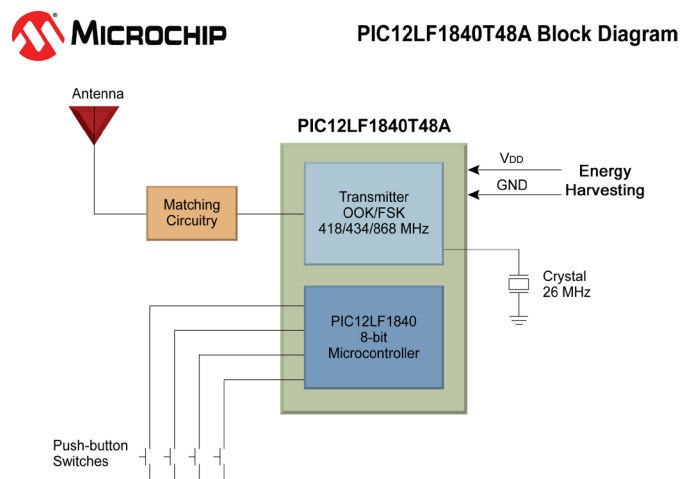
Powszechne protokoły komunikacji bezprzewodowej, takie jak ZigBee i Bluetooth prawdopodobnie jako pierwsze przychodzą do głowy czytelnikom w temacie łączności radiowej na potrzeby projektów wykorzystujących energy harvesting. Jednakże nie wszystkie projekty wymagają ponoszenia kosztów i godzenia się na złożoność tych standardowych protokołów. Wybór powinien zostać dokonany przede wszystkim w oparciu o oczekiwaną kompatybilność tworzonego urządzenia. Przykładowo, bezprzewodowy zestaw słuchawkowy do telefonu bezprzewodowego praktycznie na pewno będzie musiał być kompatybilny z popularnymi standardami, natomiast sterowanie za pomocą fal radiowych można wykonać bez konieczności kosztownego upewniania się, że produkt będzie kompatybilny z urządzeniami firm trzecich.

### Koszt certyfikacji

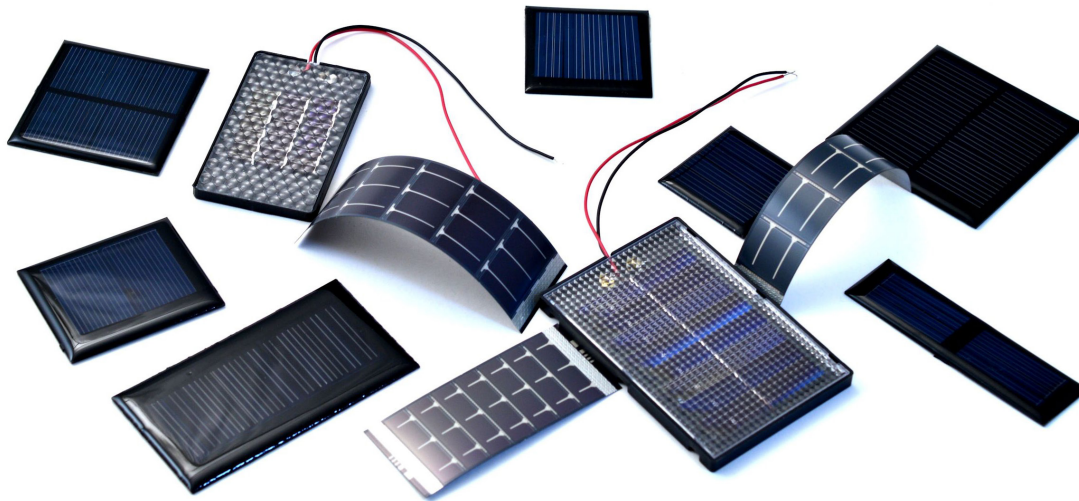
Każde urządzenie, które zawiera czujnik bezprzewodowy będzie wymagało certyfikacji odpowiedniej dla danego rynku, na którym jest oferowane. W USA będzie to FCC, a w Europie – CE. Jednakże przygotowanie



Rysunek 1. Układ Microchip PIC12LF1840T48A



Rysunek 2. Schemat blokowy układu PIC12LF1840T48A



**Fotografia 3. Małe ogniwa fotowoltaiczne**

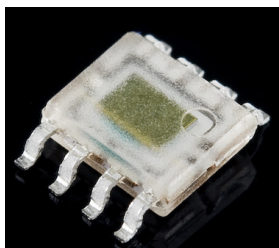
urządzenia, które będzie zgodne także z konkretnymi standardami komunikacji radiowej będzie wymagało dodatkowej certyfikacji, która najczęściej jest droższa niż w przypadku certyfikatów FCC i CE.

Całkowity koszt implementacji standardu bezprzewodowego zdecydowanie wykracza poza koszt sprzętu i oprogramowania. Nawet przed samym procesem badania zgodności, projekt powinien przejść wstępne testy. Na zachodzie koszt wynajęcia sprzętu na potrzeby takich testów mieści się w granicach około 750 dolarów na miesiąc. Do tego trzeba doliczyć opłaty za właściwy proces certyfikacji, a więc za finalne testy zgodności, sprawdzanie poprawności profili komunikacyjnych oraz za kolejne narzędzia. W sumie typowo koszt certyfikacji sprowadza się mniej więcej do 3000 dolarów w przypadku standardu ZigBee. Trzeba też pamiętać o opłatach licencyjnych, które naliczane są zarówno w skali roku, za samą przynależność do odpowiedniego stowarzyszenia oraz za każdy wyprodukowany układ.

Wpływ kosztu certyfikacji na finalną cenę urządzenia będzie oczywiście zależał od woluminu produkcyjnego. Weźmy pod uwagę przykład urządzenia, które ma być wyprodukowane w 10 tysiącach sztuk. Założmy że podzespoły, wraz z samym projektem, kosztują od 1 do półtora dolara w przeliczeniu na sztukę. Sam koszt certyfikacji FCC może wynieść kolejne 10 tysięcy USD, praktycznie dwukrotnie zwiększając opłaty ponoszone na wyprodukowanie jednego urządzenia. W końcu doliczyć trzeba testowanie zgodności z konkretnym standardem radiowym, co z łatwością może przekroczyć dalsze 10 tysięcy dolarów. W efekcie, końcowy koszt produkcji sprzętu jest 3-krotnie większy niż koszt samego projektu i podzespołów.

### Optymalizacja poboru mocy

Innym czynnikiem, kluczowym dla bezprzewodowych sensorów, zasilanych technikami energy harvesting jest efektywne zarządzanie zużyciem mocy. Dużą uwagę należy poświęcić konfiguracji nadajnika radiowego, tak by uniknąć niepotrzebnego marnowania energii. Trzeba rozważyć sposób modulacji, szybkość transmisji oraz moc sygnału przekazywanego do anteny. Oczywiście, im krótszy jest czas aktywnej transmisji, tym mniejszy będzie średni pobór mocy. Dlatego bardzo istotne jest by upewnić się, że każdy element projektu, począwszy od diod LED, a kończąc na mikrokontrolerach i nadajnikach, jak największą część czasu są w stanie o najmniejszym poborze mocy.



**Fotografia 4. Miniaturowe ogniwo fotowoltaiczne w obudowie SMD**

### Moc a szybkość transmisji

Bardzo ciekawą kwestią jest wpływ szybkości transmisji – przepustowości – na średnie zużycie mocy. Korzystanie z interfejsów o większej przepustowości wymaga większego poboru mocy w trakcie transmisji, ale jednocześnie sam czas transmisji jest krótszy, dzięki czemu urządzenie może dłużej przebywać w trakcie uśpienia. To, jaki sposób transmisji będzie lepszy zależy od konkretnego przy-

padku, ale w ogólności dosyć często okazuje się, że korzystniej jest szybko, ale przez krótki czas przesyłać dane.

Znaczenie ma też zastosowana modulacja. Kluczowanie ASK lub OOK pozwala używać mniej energii, gdyż w pierwszym przypadku w trakcie nadawania są momenty, w których moc sygnału radiowego jest zmniejszona, a w drugim nawet zerowa. Pomimo że średni pobór prądu w trakcie nadawania będzie niższy w przypadku modulacji ASK, w praktyce korzystniejsze okazuje się zazwyczaj użycie FSK, która pozwala zwiększyć przepustowość, a więc skrócić cały proces transmisji.

Jeśli w projekcie wystarczy jednokierunkowa transmisja, wystarczy skorzystać z nieskomplikowanego nadajnika radiowego. Jeśli jednak celem jest sprawienie, by urządzenie było zgodne z takim standardem jak np. IEEE 802.15.4, wtedy warto użyć specjalizowany kontroler. Jako przykład może posłużyć Microchip PIC12LF1840T48A. Jest to mikrokontroler ze zintegrowanym nadajnikiem, obsługującym transmisję o przepustowości do 10 kb/s z modulacją OOK lub do 100 kb/s z modulacją FSK. Z powyższych warunków jasno wynika, że czas potrzebny na transmisję z użyciem FSK jest 10-krotnie krótszy niż w przypadku zastosowania modulacji OOK w tym mikrokontrolerze. Co więcej, wyższa przepustowość pozwala urządzeniu także skrócić czas odbierania i dekodowania sygnałów przychodzących.

### Zarządzanie zużyciem energii

Do obniżenia poboru energii użyteczne jest skorzystanie z odpowiednich trybów pracy mikrokontrolera. Częstotliwość, z jaką sensor będzie musiał transmitować dane będzie zależała od czasu aktualizacji danych w konkretnej aplikacji. Im dłuższe okresy, tym dłużej mikrokontroler może pozostawać w trybie uśpienia – najlepiej przy tym, by znajdował się on w trybie o najniższym poborze mocy.

Pobór prądu będzie też zależało od rodzaju danych, z jakimi pracuje sensor. Wykorzystanie wzmacniaczy operacyjnych do kondycjonowania sygnału dla czujnika będzie wymagać relatywnie dużego prądu, w porównaniu do tego, jaki jest potrzebny w trakcie transmisji danych drogą radiową.

### Obliczanie zużycia energii

Na potrzeby praktycznego potwierdzenia powyższych stwierdzeń posłużymy się przykładowym projektem, bazującym na mikrokontrolerze PIC12LF1840T48A. Układ ten zawiera wbudowany nadajnik o maksymalnej przepustowości 100 kb/s. Przyjmijmy, że transmisja odbywa się za pomocą małych pakietów danych z 16-bitową preambułą, 16 bitami synchronizacji oraz 32 bitami danych. Łącznie daje to 64 bity, których transmisja trwa 640  $\mu$ s. Energia wyrażona w dżulach wymaga – oprócz znajomości czasu transmisji – podania także napięcia i pobieranego prądu:



**Fotografia 5. Superkondensatory. Mniejszy z przedstawionych jest w stanie zgromadzić energię 0,99 J przy napięciu 3 V, 2,75 J przy napięciu 5 V i 3,33 J przy napięciu znamionowym (5,5 V). Nawet jeśli wykorzystywać tylko energię pełnego kondensatora, ale przy założeniu że napięcie na nim nie może być niższe niż 3 V, wystarczyłaby ona na 22330 cykli pomiarów w przedstawionym przykładzie, a więc na 15 dni pracy (bez zewnętrznego źródła energii) z przesyłaniem wyników co 1 minutę**

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} * 1 \text{ s} = 1 \text{ V} * 1 \text{ A} * 1 \text{ s}.$$

Nasz układ jest zasilany napięciem 3 V, a z dokumentacji wynika, że będzie on pobierał w trakcie normalnej pracy 10,5 mA prądu. Łączną energię potrzebną do podtrzymania pracy mikrokontrolera w czasie nadawania jednego pakietu można więc obliczyć następująco:

$$E = 3 \text{ V} * 10,5 \text{ mA} * 640 \mu\text{s} = 31,5 \text{ mW} * 640 \mu\text{s} = 20,16 \mu\text{J}.$$

Dodatkowo, należy uwzględnić czas potrzebny na ustabilizowanie się oscylatora przed transmisją. Ten wynosi zazwyczaj 650  $\mu\text{s}$  i wymaga poboru prądu na poziomie 5 mA. Oznacza to, że proces wybudzania układu przed transmisją zużywa 9,75  $\mu\text{J}$  energii, co zostało obliczone w następujący sposób:

$$E_1 = 3 \text{ V} * 5 \text{ mA} * 650 \mu\text{s} = 9,75 \mu\text{J}.$$

Ponieważ mikrokontroler w trakcie transmisji nie tylko przetwarza dane, ale też przesyła odpowiednio mocny sygnał do anteny, w kalkulacji energii potrzebnej do samej transmisji należy również uwzględnić samą moc nadajnika. Przy transmisji radiowej ze standardową mocą, na częstotliwości nośnej 868 MHz przy zastosowaniu modulacji FSK pobierane jest 12 mA prądu. Tak jak wcześniej ustalono, transmisja ta trwa 640  $\mu\text{s}$ , a więc zużywana energia to:

$$E_2 = 3 \text{ V} * 12 \text{ mA} * 640 \mu\text{s} = 23,04 \mu\text{J}.$$

Gdyby korzystać z transmisji z inną modulacją, ograniczającą przepustowość do 10 kb/s ograniczylibyśmy pobór prądu do 7,5 mA, ale potrzeba byłoby 10 razy więcej czasu, a pobierana energia wynosiłaby:

$$E_2 = 3 \text{ V} * 7,5 \text{ mA} * 6,4 \text{ ms} = 144 \mu\text{J}.$$

Wyraźnie widać, że jest to wynik znacznie większy – niższa szybkość transmisji powoduje ponad 6-krotne zwiększenie zużycie energii.

Układ PIC12LF1840T48A ma funkcję automatycznego przechodzenia do trybu obniżonego poboru mocy (shutdown) po wysłaniu ostatniego bitu danych. Następuje to po 2 ms oczekiwania, co oznacza, że do zakończenia transmisji potrzebne będzie jeszcze 72  $\mu\text{J}$  energii:

$$E_3 = 3 \text{ V} * 12 \text{ mA} * 2 \text{ ms} = 72 \mu\text{J}.$$

Powyższe obliczenia pozwalają obliczyć łączną energię potrzebną do transmisji pojedynczego pakietu danych. Wynosi ona:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 9,75 \mu\text{J} + 23,04 \mu\text{J} + 72 \mu\text{J} = 104,79 \mu\text{J}.$$

## Obliczanie zbieranej energii

Na rynku dostępne są małe ogniwa słoneczne, pracujące z napięciem 3 V. W przypadku ogólnie dostępnych modeli o wymiarach

rzędu 100 mm×40 mm, dostarczany prąd przy dobrym nasłonecznieniu wynosi ok. 50 mA. Oznacza to, że w przeliczeniu na 1 mm<sup>2</sup> powierzchni ogniwa produkowane jest 1,25  $\mu\text{A}$  prądu. Na rynku znaleźć można też ogniwa do miniaturowych aplikacji typu energy harvesting, umieszczone w przezroczystych obudowach SMD. Tanie ogniwo o wymiarach około 8 mm×4 mm (32 mm<sup>2</sup>) jest już w stanie dostarczyć 40  $\mu\text{A}$  prądu przy napięciu 3 V, a więc 120  $\mu\text{W}$  mocy w dobrych warunkach:

$$3 \text{ V} * 40 \mu\text{A} = 120 \mu\text{W}.$$

Łatwo policzyć ile czasu potrzeba na uzyskanie z takiego ogniwa energii wymaganej do transmisji jednego pakietu danych. Okazuje się, że jest to 0,87 s:

$$T = 104,79 \mu\text{J} / 120 \mu\text{W} = 0,87 \text{ s}.$$

Oznacza to, że sensor może transmitować pakiety przynajmniej co 0,87 sekundy, przy założeniu że ogniwo słoneczne ma cały czas dobry dostęp do światła słonecznego. W rzeczywistych warunkach światło jest oczywiście dostępne tylko w dzień, dlatego okresy pomiędzy transmisją należy obliczyć uwzględniając brak zewnętrznego źródła energii w nocy oraz pojawianie się chmur. Konieczne jest też doliczenie niewielkiej energii potrzebnej na zasilenie procesora w trybie uśpienia oraz energii używanej do realizowania samych pomiarów za pomocą sensora. Niemniej, aby bezprzewodowy czujnik mógł faktycznie działać i by mikrokontroler nie resetował się co jakiś czas, konieczne jest magazynowanie zbieranej energii.

## Gromadzenie energii

Istnieje wiele sposobów magazynowania energii zbieranej metodami energy harvesting. Najkorzystniejsze wydaje się użycie superkondensatorów, ale tańsze będzie używanie akumulatorów niklowo-wodorkowych, ładowanych bezpośrednio z ogniwa słonecznego. W prowadzonych wcześniej obliczeniach należy uwzględnić upływność elementów gromadzących ładunek oraz straty związane z samym procesem ładowania. Oczywiście mogą istnieć zastosowania, w których odpowiednio duże ogniwo będzie w stanie dostarczać wystarczająco dużo prądu przez cały czas, kiedy jest konieczna praca urządzenia, na przykład, gdy ma ono działać tylko za dnia, przy dobrej pogodzie.

## Podsumowanie

Zastosowanie technologii energy harvesting ma duże znaczenie nie jako sposób na zmniejszenie kosztów produkcji urządzenia, ale jako ograniczenie kosztów utrzymania w długiej perspektywie czasowej. Dotyczy to przede wszystkim tych aplikacji, gdzie czujniki komunikujące się bezprzewodowo są rozmieszczone w odległych lokalizacjach lub gdy ich liczba jest bardzo duża. W obu przypadkach zasilanie czujników poprzez pobieranie energii z otoczenia sprawia, że urządzenia te mogą pracować niemal nieskończenie długo, bez jakiegokolwiek interwencji ze strony człowieka.

Ponadto techniki energy harvesting stają się coraz bardziej wyrafinowane i skuteczne. Są bardzo użyteczne tam, gdzie korzysta się z komunikacji radiowej opartej o nieskomplikowane interfejsy komunikacyjne, a nie o zestandaryzowane protokoły, takie jak ZigBee czy Wi-Fi. Warto też zwrócić uwagę na różnorodne dostępne źródła energii. Poza światłem może to być ciepło, fale radiowe, energia mechaniczna, a ostatnio nawet cukier znajdujący się we krwi.

Pomyślna implementacja technik energy harvesting do zasilania bezprzewodowych czujników wymaga starannej kontroli średniego poboru mocy przez cały czas pracy urządzenia. Dlatego warto skorzystać z narzędzi i podzespołów, które ułatwiają to zadanie. Dobrym przykładem jest użycie mikrokontrolerów zaprojektowanych z myślą o tego typu aplikacjach, takich jak wspomniany w artykule układ Microchip PIC12LF1840T48A.

**Cristian Toma,**  
**Microchip Technology Inc.**