

Mikroelektroniczne i mikromechaniczne czujniki i układy pomiarowe

Tadeusz Goszczyński *

Ten znaczący postęp technologiczny wiąże się z udostępnianiem do powszechnego wykorzystania technologii opracowanych w trakcie realizacji różnych programów kosmicznych. Na przykład, w Niemczech, wprowadzono specjalny program INTRA mający na celu wdrażanie tych technologii i zanotowano już ponad 150 wdrożeń zakończonych sukcesem. Najwięcej technologii wdrożono w przemyśle samochodowym i w urządzeniach medycznych, ale wiele też w konstrukcji maszyn, sprzęcie przemysłowym, a nawet w urządzeniach domowego użytku. W relacji z ubiegłorocznych targów hanoverskich (PAR 5/2004) opisałem kilka takich wdrożonych technologii m.in. bardzo cienkie foliowe czujniki-przetworniki naprężeń, które wbudowane na powierzchni sworzni tworzą system ciągłego pomiaru naprężeń, „elektroniczny nos” wykrywający i odróżniający konkretne zapachy groźne dla człowieka oraz mikromechaniczne zawory ze „swobodnie poruszającą się kulą” umożliwiające precyzyjny pomiar najmniejszych nawet ilości gazu.

* mgr inż. Tadeusz Goszczyński
– Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów PIAP
Warszawa

W ostatnich kilku latach nastąpił gwałtowny postęp w konstrukcjach czujników różnych wielkości fizycznych i teraz jesteśmy świadkami wkraczania tych nowych czujników nie tylko we wszystkie dziedziny automatyki, ale także do urządzeń powszechnego użytku. Podstawowe przyczyny liczebności nowych zastosowań czujników tkwią w ich niezwykłej miniaturyzacji i możliwościach zdalnego przekazywania wyników pomiaru, a w niektórych wypadkach nawet w wyeliminowaniu konieczności zasilania ich z baterii.

Technologie „mikro” i „nano”

Powstanie miniczujników było możliwe w wyniku rozwoju dwu nowych gałęzi techniki: systemów mikroelektromechanicznych zwanych MEMS oraz nanotechnologii. MEMS łącząc układy mikroelektroniczne i mikromechaniczne, pozwalają na umieszczenie w małym krzemowym chipie urządzenia o dużej funkcjonalności i wielkiej niezawodności. Natomiast nanotechnologia jest nauką badającą możliwości konstruowania z atomów i cząsteczek urządzeń o wymiarach w nanometrach, reagujących na zewnętrzną stymulację. Wykorzystanie technologii MEMS oraz wykorzystanie nauki materiałoznawstwa – nanotechnologii umożliwia inżynierom tworzenie nowych miniaturowych czujników i miniaturowych urządzeń wykonawczych. W nowoczesnych systemach z czujnikami współpracują na ogół specjalizowane układy mikroelektroniczne, zwane ASIC. Ich schematy elektryczne są wykonywane według wymagań klienta i są optymalizowane pod względem funkcjonalności i poboru mocy. Jednak wraz z rozwojem mikrotechnologii wzrosły także wymagania miniaturyzacji i minimalizacji poboru mocy tych układów, a to z kolei spowodowało gwałtowny wzrost kosztu wykonania masek litograficznych. Obecnie przy wymiarach maski 90 nm koszt ten wzrósł z 100 tys. do

1 miliona dolarów. Według niektórych szacunków obecnie tylko jeden na dziesięć opracowanych układów ASIC zwraca koszt opracowania w rozsądnym czasie. Dlatego firmy, które nie przewidują masowego zastosowania swoich czujników wracają do znanych już uniwersalnych układów programowalnych, które mają też coraz nowocześniejsze rozwiązania układowe. Kolejne nowe możliwości dla systemów monitorowania powstają dzięki nowej technologii oprogramowania komputerów, tzw. *Multisensor Data Fusion*, realizującej proces ciągłego przetwarzania informacji z wielu czujników i wykorzystującej korelację, związki i kombinacje występujące pomiędzy zbieranymi danymi. Ta nowa technologia jest stosowana do diagnostyki maszyn: wykrywania błędów i przewidywania przyszłych awarii, a także do prowadzenia autonomicznych pojazdów, diagnozowania w medycynie, sterowania instalacjami w inteligentnych budynkach, a w wojsku do automatycznego rozpoznawania celu i pola walki. Nowe czujniki są teraz często łączone w jednej obudowie z miniaturowymi systemami przesyłania informacji za pomocą fal radiowych, dzięki czemu mogą być montowane w miejscach niedostępnych w trakcie eksploatacji, np. w oponach samochodu. Niektóre z nich nie wymagają w dodatku baterii zasilających – czerpią energię ze swojego otoczenia.

Czujniki do monitorowania warunków otoczenia

Jedną z gałęzi wykorzystującą te nowe technologie są systemy monitorowania warunków otoczenia, a w szczególności warunków przechowywania i transportu produktów oraz miniaturowe czujniki wielkości charakterystycznych dla otoczenia: temperatury, wilgotności, przyspieszenia oraz położenia. W produkcji miniaturowych czujników przodują firmy amerykańskie, które pierwsze uzyskały dostęp do technologii kosmicznych i dysponują odpowiednio dużymi środkami finansowymi.

Interesującym przykładem wykorzystania miniaturowych czujników wilgotności jest przetwornik SC-500 amerykańskiej firmy Ohmic Instruments zamontowany techniką montażu powierzchniowego na płycie drukowanej wielkości monety. Przeznaczony jest on do wbudowywania w dowolne urządzenie np. w regulator parametrów otoczenia lub system zbierania danych. Miniaturowy czujnik UPS-500 zmienia swoją impedancję według odwrotnej logarytmicznej charakterystyki w funkcji wilgotności. Przetwornik zawiera ponadto oscylator RC dający sygnał sinusoidalny 3,8 kHz o wartości skutecznej 150 mV, stabilizator amplitudy, wzmacniacz logarytmiczny i układ kompensacji temperaturowej. Przetwornik zawiera 3-stykowe złącze (zasilanie, sygnał, zero sygnałowe) i wytwarza liniowy sygnał wyjściowy o zakresie 1...3 V w zakresie pomiarowym wilgotności względnej 20–90 % (bez kondensacji). Niepewność pomiaru wynosi 2 %, a wymiary przetwornika: 18x35x17 mm. Zasilany jest on napięciem 5 V i pobiera prąd ok. 5 mA.

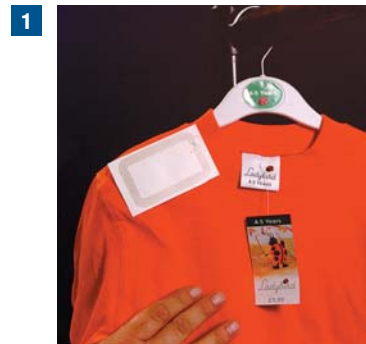
W dziedzinie czujników temperatury ciekawym rozwiązaniem jest „jednoprzewodowy cyfrowy termometr o programowanej rozdzielczości” typu DS18B20 amerykańskiej firmy DALLAS SEMICONDUCTOR. Układ ten umieszczony w tranzystorowej obudowie TO-92 realizuje cyfrowy pomiar temperatury z programowaną rozdzielczością od 9 do 12 bitów i jednocześnie realizuje funkcję alarmu z progra-

mowanymi wartościami górnego i dolnego poziomu alarmowania. Przetwornik zawiera układ realizujący specjalny protokół transmisji typu 1-Wire z jednym sygnałem sterującym, za pomocą którego może komunikować się z komputerem około 20 termometrów dołączonych do tej samej dwuprzewodowej linii. Przetwornik ten może być zasilany napięciem zewnętrznym przez trzeci przewód lub w trybie zasilania „pasożytniczego” z linii danych, z której ładowany jest kondensator zasilający. Każdy egzemplarz ma wewnętrzny niepowtarzalny 64-bitowy numer kodowy, co pozwala na obsługiwanie przez jeden kontroler wielu termometrów dołączonych do kilku linii. Funkcję interfejsu może pełnić dowolny mikrokontroler z zegarem 1,8 MHz lub komputer np. PC, z układem transmisji szeregowej (UART) 115,2 kbit/s. Termometr ma zakres pomiarowy od -55°C do $+125^{\circ}\text{C}$, a niepewność pomiaru w zakresie od -10°C do $+85^{\circ}\text{C}$ wynosi 0,5 $^{\circ}\text{C}$.

Kilka firm amerykańskich specjalizuje się w opracowywaniu urządzeń do systemów monitorowania z bezprzewodową transmisją danych, według wymagań klienta. Urządzenia te wykonują jako podzespoły do wmontowania w urządzenie produkowane przez klienta lub jako kompletne systemy. Te podzespoły to tzw. inteligentne czujniki (*smart sensors*), czujniki z bezprzewodową transmisją danych przeznaczone dla systemów telemetrii i do zbierania danych. Firmy te zapewniają kompletne usługi inżynierskie i projektowe włącznie z zarządzaniem projektem, badaniami, budową prototypu itd. Można od nich uzyskać płytki z zestawami uruchomieniowymi dla nowych czujników i oprogramowanie komputerowe do zbierania danych. Firmy takie zapewniają także wsparcie w projektach wykonywanych przez klienta, organizują współpracę z dostawcami niezbędnych materiałów oraz dają wsparcie przy uruchamianiu produkcji. Ostatnio producenci systemów monitorowania w sposób szczególny interesują się i rozwijają technologie związane z systemami RFID (*Radio Frequency Identification*) zarówno aktywnymi jak i biernymi. Systemy

te służą do nadzoru produkcji w trakcie całego jej procesu od dostarczania materiałów i części aż do transportu gotowych wyrobów. Połączenie oprogramowania nadzorującego z technologią bezprzewodowego zbierania danych zapewnia zmniejszenie strat wynikających z niewłaściwego transportu wyrobów. Systemy te obejmują zarówno nadzór nad produkcją i zarządzaniem jak i nad fizycznymi środkami transportu: ciężarówkami i pociągami oraz nad załadunkiem i magazynowaniem.

W celu uzyskania w takim systemie kontroli nad wyrobami stosuje się etykiety identyfikacyjne (RFID tag) umieszczane na wyrobach, opakowaniach lub paletach i rozpoznawane zdalnie przez specjalne czytniki. Biernie etykiety, takie jak przedstawiona na rys. 1, są zasilane



przez pole elektromagnetyczne czytnika i mogą przekazać tylko minimalną ilość danych w celu rozpoznania towaru. Natomiast aktywne elementy RFID mające baterie zasilające mogą przekazywać różnorodne dane na odległość aż do 30 m od czytnika. Umożliwia to automatyczne rejestrowanie towarów dostarczanych lub wywożonych z magazynów, hurtowni lub nawet sklepów. Opracowywane są także specjalne czujniki przeznaczone do integracji z aktywnymi elementami RFID. Czujniki takie umożliwiają przekazywanie do czytników danych dotyczących bieżących warunków transportu np. wartości temperatury, wilgotności i drgań. Dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu przeznaczonemu do rozpoznawania zdarzeń jest możliwe też określenie rodzaju awarii po jej wykryciu. Są to na razie systemy zamknięte opracowywane na zamówienie wielkich

sieci handlowych, ale przewiduje się ich rozpowszechnienie w najbliższych latach w wersjach otwartych do powszechnego użytku.

Przykłady oferowanych systemów monitorowania

Jednym z oferowanych na rynku systemów do nadzorowania transportu jest system Transense firmy Signal-Quest. Zapewnia on monitorowanie uderzeń, drgań, zmian położenia towaru (przesunięcia), temperatury i wilgotności. Pomiary są wykonywane okresowo, a wyniki zapisywane i, gdy nastąpi przekroczenie dopuszczalnych warunków przechowywania danego towaru, wysyłane drogą radiową do komputera. Program zainstalowany na komputerze PC umożliwi bieżące przeglądanie wyników pomiarów. System zapewnia 3-osiowy pomiar przyspieszenia z zapisem z częstotliwością od 1 Hz do 1 kHz, przy czym próg zadziałania jest ustalany na wartości z zakresu od 0,1 do 9g. Razem z każdym zapisem wyników pomiaru zapisywany jest też znacznik czasu. Temperatura jest rejestrowana z programowanym okresem pomiarów (typowo 1 pomiar/10 min), przy czym zapis może też następować tylko w przypadku przekroczenia zaprogramowanych wartości granicznych. Kąt przechylenia towaru przekraczający 5° powoduje automatyczny zapis tej wartości. Okresowo rejestrowana jest wilgotność względna powietrza, a dodatkowo kontrolowane i rejestrowane jest każde zamoczenie i zalanie czujnika wodą lub innym płynem. Procesor pomiarowy ma funkcję analizy pomiarów w celu rozpoznawania zdarzeń takich jak uderzenia, zderzenie samochodu transportowego, stoczenie się itp. i wykonuje zapis, gdy zdarzenie odpowiada jednemu z zaprogramowanych wzorów. System może być wykonany w różnych wersjach dla różnych sposobów transmisji oddalonej i lokalnej (m.in. Bluetooth, 802.11, Active RFID, IRDA i w paśmie częstotliwości 400 MHz – 2,4 GHz). Podstawowe dane techniczne systemu Transense przedstawiono w tablicy 1.

Amerykańska firma MicroStrain oferuje kilka podsystemów monitorowania z zastosowaniem miniaturowych czujników bezprzewodowych.

System zbierania danych V-Link zawiera układ z wejściem analogowym dla różnych czujników, przeznaczony do współpracy z szybką siecią bezprzewodową oraz 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy pracujący metodą kolejnych przybliżeń. Ponadto układ ten zawiera: obwody zasilania czujników, mostek oraz wzmacniacz z programowanym wzmocnieniem i strojeniem „zera”. Układ, przedstawiony na rys.2, realizuje wejścia różni-



cowe lub ze wspólnym punktem oraz zapewnia dwukierunkową

komunikację w paśmie radiowym o zasięgu do 60 m.

System charakteryzuje programowana liczba kanałów wejściowych od 1 do 7, w tym 4 kanały różnicowe i 3 ze wspólnym punktem. Stałe kanały pomiarowe to: kanał pomiaru temperatury w zakresie od -25 °C do +70 °C i niepewności pomiaru 4 °C oraz kanał pomiaru przyspieszenia o zakresach: 50g, 100g, 200g lub 500g.

Możliwe są 3 tryby wykonywania pomiarów:

- tryb ciągłych pomiarów i transmisji do stacji bazowej z częstotliwością próbkowania 1 kHz dla 3 kanałów
- pojedyncze pomiary i przesłanie danych na żądanie ze stacji bazowej
- samowyzwalanie transmisji po przekroczeniu określonej przez użytkownika wartości mierzonej.

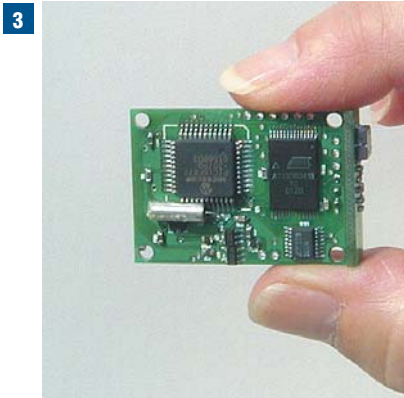
Wąskopasmowa transmisja danych jest realizowana w paśmie 916 MHz z szybkością 19 200 bod.

System pomiaru przyspieszenia G-Link wykorzystuje systemem V-Link z dołączonym do niego przetwornikiem przyspieszenia

Tablica 1. Podstawowe dane techniczne systemu Transense

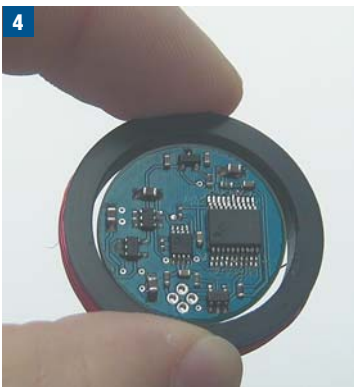
Pojemność pamięci	standardowa duża wielka	7 kbit 1 Mbit 4 Mbit
Przyspieszenie	zakres niepewność	10g lub 50g 0,1g lub 0,5g
Temperatura	zakres niepewność	-40 °C do +85 °C 2 °C
Kąt pochylenia	zakres niepewność	360° x, y, z 2°
Czas i data	zakres niepewność	automatyczny 3 min/miesiąc
Wilgotność względna	zakres niepewność	1 - 99 % 5 %
Zamoczenie	czas reakcji	2 s
Pobór mocy	średni przy pomiarze	0,1 mA 5,0 mA
Czas życia baterii	2 szt. typu AA	1 - 2 lat
Wymiary	obudowa	3,75x6,25x1,25 mm

wykonanym w technologii MEMS, przedstawionym na rys. 3.



System ten realizuje szybki pomiar przyspieszenia w 3 osiach. Ma on wbudowany przetwornik trzosiowy przyspieszenia typu Analog Device ADXL2XXJE o zakresie pomiarowym 2g lub 10g i dopuszczalnym przyspieszeniu 500g. Pomiar może być wyzwalany ze stacji bazowej z odległości do 30 m lub automatycznie z programowaną częstotliwością i zapisywany w pamięci, a następnie transmitowany na żądanie stacji bazowej do komputera PC.

Firma oferuje ponadto system EmbedSense, przedstawiony na rys. 4,



w wykonaniu przewidzianym do wbudowania w urządzenie klienta. Zawiera on czujnik, nadajnik i system akwizycji danych zintegrowane na jednej miniaturowej płytce drukowanej. Urządzenia te nie wymagają zasilania z baterii – mogą być zasilane przez zewnętrzne pole magnetyczne i wytrzymują wysokie temperatury oraz ekstremalne przyspieszenia, dzięki czemu mogą dostarczać wyniki pomiarów z miejsc dotychczas niedostępnych. Mogą też odczytywać dane z różnego typu zewnętrznych czujników temperatury i ciśnienia.

Najważniejsze dane techniczne EmbedSense:

- 4 wejścia różnicowe (opcjonalnie 12)
- czujniki: piezorezystancyjna folia, półprzewodnikowe czujniki ciśnienia absolutnego, przetworniki ciśnienia, termoelementy
- wzmacniacz pomiarowy o tłumieniu sygnału wspólnego 110 dB i o programowanym sprzętowo wzmacnieniu od 1 do 1000
- częstotliwość pomiarów: od 20 Hz/kanal do 200 Hz/kanal
- zasilanie mostka pomiarowego: 3 V
- komunikacja z systemem: kluczowana rezystancja, synchroniczna modulacja szerokości impulsu, port szeregowy RS-232
- pobór mocy: 200 μ A dla 3 V.

System Wireless Web Sensor Network, wykorzystując różnego typu czujniki i mikroprocesorowy system transmisyjny z techniką TDMA, łączy duże sieci pomiarowe i odległe nadajniki w jedną całość. Odbiornik systemu zawiera komputer jednopłytkowy wyposażony w Ethernet i w protokoły internetowe XML i HTML. Serwer sieci odpytuje odbiorniki za pomocą standardowej przeglądarki (Microsoft Internet Explorer lub Netscape Navigator), uzyskując dane pomiarowe z wieloczujnikowej sieci pomiarowej.

Ceny wyżej omawianych urządzeń firmy MicroStrain wynoszą od ok. 300 USD za czujnik przeznaczony do wbudowania do ok. 600 USD za moduł do monitorowania.

Nowe systemy europejskie

Ostatnio także w Europie powstają nowe opracowania miniaturowych czujników i systemów wykorzystujących mikrotechnologie kosmiczne. Na zeszłorocznych targach w Hanowerze kilka takich opracowań zdobyło nagrody targów. Firma EnOcean uzyskała nominację do nagrody za system transmisji radiowej krótkiego zasięgu dla czujników z własnym zasilaniem. System oparty na transmisji w wolnym od opłat paśmie 868,3 MHz jest przeznaczony dla czujników i innych elementów automatyki łączonych z magistralami.

System ten odróżnia od znanych już systemów, np. Bluetooth, świadoma prostota w celu uzyskania znacząco niższych cen. Protokół transmisji EnOcean umożliwia przesyłanie telegramów tylko 6-bajtowych. Firma ifm electronic uzyskała nominację za pierwszy na świecie czujnik drgań umożliwiający zintegrowaną diagnostykę maszyn. Mikromechaniczny czujnik przyspieszenia połączony z analizatorem częstotliwości tworzy niewielkie urządzenie nazywane *efector octavis*. Programuje się je z komputera PC, a następnie tym samym czujnikiem bada warunki drgań w łożyskach przy poprawnej pracy maszyny. Następnie to samo urządzenie w sposób ciągły bada poziom drgań w maszynie i w przypadku zmian mogących spowodować jej uszkodzenie wysyła odpowiednie sygnały ostrzegawcze.

Wspomniana firma EnOcean opracowała technologię wytwarzania przetworników z transmisją radiową krótkiego zasięgu, nie wymagających stosowania baterii ani zewnętrznego zasilacza. Nowością jest rozwiązanie zasilania elementów systemu z miniaturowej baterii słonecznej lub wykorzystanie energii mechanicznej i cieplnej. Na rys. 5 przedstawiono moduł tego systemu sfotografowany na drzewie, co ma podkreślać jego w pełni bezobsługowy charakter.



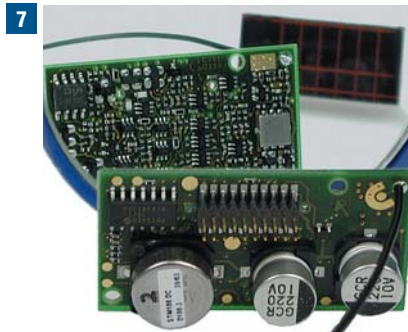
Specjalny zintegrowany system magazynowania energii pozwala na kilkudniowe działanie takich czujników w całkowitej ciemności. Możliwe jest to dzięki trybowi *sleep* rozbudowanemu o funkcje *wake pin*, cykliczny *wake up* oraz funkcję kontrolną: „sygnał obecności”. Tą technologią realizowane są m.in. proste przełączniki oraz czujniki oświetlenia i temperatury, używane w systemach alarmowych

i telemetrii. Są to moduły bezobsługowe, proste w instalacji, niewymagające okablowania ani źródła zasilania, umożliwiające tworzenie wielofunkcyjnych inteligentnych przetworników opartych na specjalizowanych pasywnych czujnikach. Mogą one tworzyć systemy monitorowania pozycji, temperatury, ciśnienia, oświetlenia, a także prądu i napięcia. Energia potrzebna do zapewnienia transmisji radiowej jest pobierana, zależnie od wersji, bezpośrednio z różnych procesów fizycznych: naciśnięcia przycisku, wibracji, ruchu, temperatury lub strumienia światła. Przełączniki z transmisją radiową EnOcean generują pole elektromagnetyczne o 100-krotnie mniejszym natężeniu od typowych nadajników wykorzystywanych w podobnych aplikacjach i o 10 tys. razy mniejszym natężeniu od nadajników telefonii komórkowej. Na rys. 6 pokazano budowę nadajnika wielofunkcyj-



nego PTM 100 zawierającego wewnętrzną antenę i 8 przycisków funkcyjnych. Energia potrzebna do zapewnienia transmisji jest pobierana z piezogeneratora uruchamianego naciśnięciem lub zwolnieniem dowolnego z przycisków. W zależności od numeru przycisku, akcji (wciśnięcie lub zwolnienie klawisza) oraz niepowtarzalnego, 32-bitowego numeru seryjnego modułu następuje wysłanie paczki danych odpowiedzialnej za aktywowanie odpowiedniego procesu w urządzeniu odbiorczym. Zasięg transmisji wynosi do 30 m wewnątrz budynku i do 300 m w wolnej przestrzeni. Moduł PTM 100 wykorzystuje do transmisji pasmo 868,3 MHz z modulacją ASK przy maksymalnej mocy wyjściowej 10 mW. Firma ta oferuje także 3 podstawowe rodziny

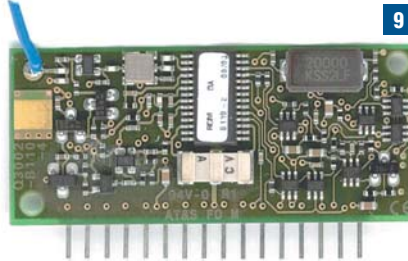
modułów transmisji przeznaczone do współpracy z czujnikami: moduły nadajników STM 100, moduły odbiorników RCM 100 i moduły retransmisji TCM 100. Przedstawiony na rys. 7 nadajnik STM 100 zawiera



baterię słoneczną, trzy 8-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe i 4 wejścia cyfrowe, co pozwala, przy współpracy z odpowiednimi czujnikami, na monitorowanie temperatury, natężenia światła, ciśnienia lub innych wielkości fizycznych. Moduł retransmisji TCM 110 to prosty powtarzacz retransmitujący sygnał radiowy np. do odbiorników umieszczonych za skrzyżowaniem korytarza, moduł TCM 120 zawiera dodatkowo interfejs do portu szeregowego, a przedstawiony na rys. 8 moduł TCM 130, który można



montować w odpowiednim złączu na płytce klienta, ma parametry programowane zdalnie przez użytkownika. Moduł odbiornika RCM 110 przedstawiono na rys. 9.



Firma Thermokon Sensortechnik GmbH przyjęła ten system pomiarowy i oferuje gotowe produkty czujników z transmisją radiową

w cenie od 100 do 260 euro, przeznaczone przede wszystkim do automatyzacji budynków. Na rys. 10



przedstawiono czujnik SR65 VFG zainstalowany na rurociągu centralnego ogrzewania, przetwarzający energię cieplną na elektryczną niezbędną do jego zasilania, a na rys. 11 podobny czujnik w wykonaniu zamkniętym SR65 AKF. Czujnik zamknięcia okna SRW 01 z zasilaniem za pomocą baterii słonecznej przedstawiono na rys. 12.



Ponadto firma oferuje: czujnik temperatury pokojowej – SR04, czujnik temperatury i wilgotności – SR04 rH, odbiornik z protokołem RS-485 – SRC RS-485 Gateway i odbiornik z interfejsem Ethernet – SRC Ethernet.

Podsumowanie

W najbliższych latach można spodziewać się znacznego wzrostu zastosowań czujników mikromechanicznych i mikroelektronicznych także w europejskich firmach. W 3. numerze biuletynu użytkowników technologii EnOcean Perpetum, wymieniono już 14 firm europejskich oferujących takie produkty, m.in. firmy: WAGO, PEHA, BECKHOFF, BALLUFF, OSRAM, WIELAND, STEUTE i wspomnianą także w tym artykule firmę THERMOKON.

Literatura (linki)

www.signalquest.com
www.microstrain.com
www.thermokon.de
www.enocean.com