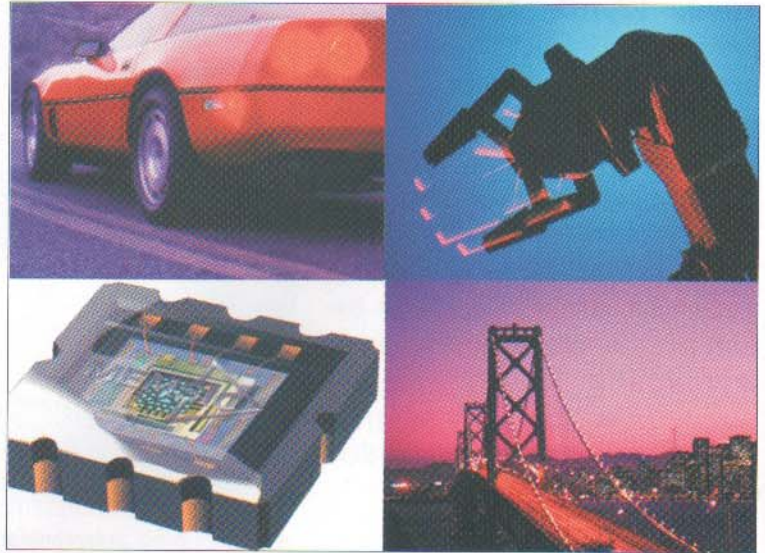


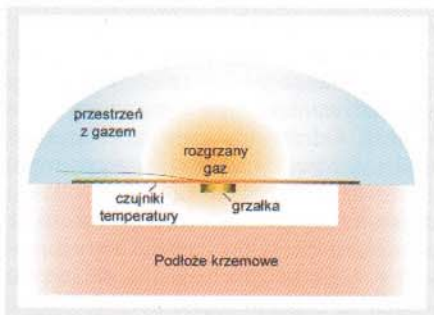
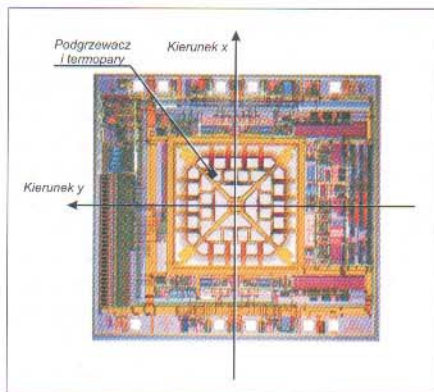
Termiczne czujniki przyspieszenia firmy Memsic

Podczas gdy najwięksi światowi producenci akcelerometrów stosują technologię pojemnościową, firma Memsic z sukcesem wprowadziła na rynek czujniki, których działanie opiera się na zjawisku przepływu ciepła. Masę bezwładnościową stanowi tu bowiem rozgrzany gaz, a jej przemieszczenie, spowodowane zmianą położenia czujnika, jest mierzone za pomocą wielu rozmieszczonych symetrycznie mikrotermopar.

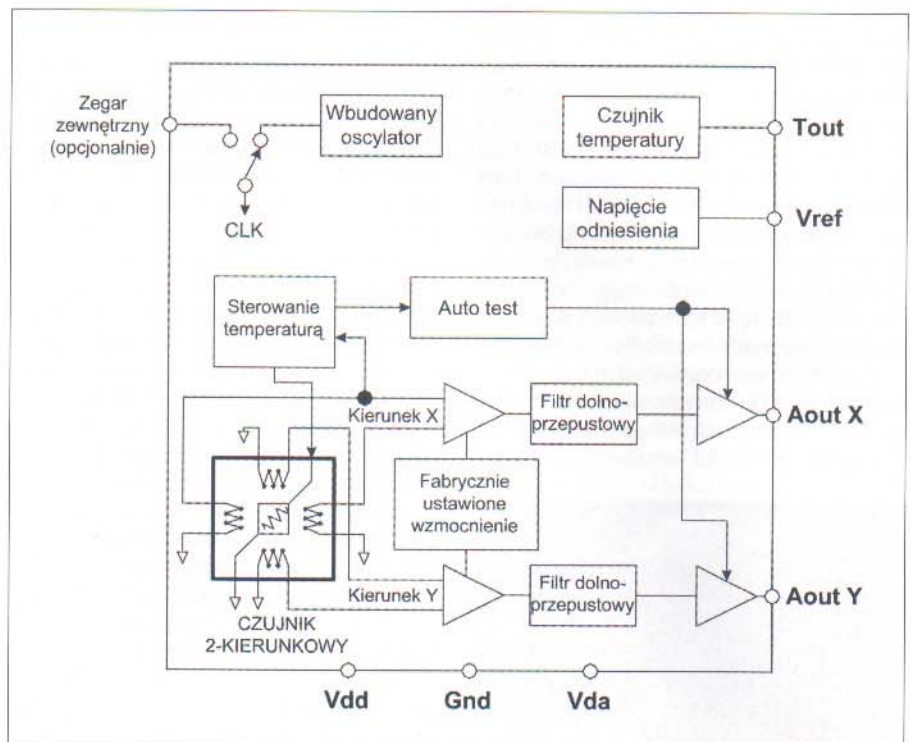
Na środku układu, będącego jednolitą strukturą krzemową CMOS, znajduje się grzałka. W zasilanym urządzeniu tworzy się zatem kula rozgrzanego gazu, a rozkład temperatury jest symetryczny względem osi x i y (rys. 1). Zadziałanie siły powoduje zmianę profilu rozkładu temperatury, co z kolei jest przyczyną powstania różnicy napięć pomiędzy odpowiednimi termoparami. Ponieważ różnica ta jest wprost proporcjonalna do przyspieszenia działającego na układ, staje się możliwe przekształcenie jej w prosty sposób na użyteczny sygnał pomiarowy. Jest to realizowane w dwóch osobnych dla kierunków x i y torach sygnałowych (rys. 2). Ostatecznie, w zależności od modelu czujnika, na wyjściach AoutX i AoutY dostajemy sygnał analogowy (dla serii MXA i MXR), cyfrowy PWM (dla serii MXD) lub zgodny ze standardem I²C (dla serii MXC), przy czym ten pierwszy jest w przypadku układów MXR proporcjonalny do napięcia zasilania. Producent zapewnia standardową gamę zakresów pomiarowych od ±0,5g do ±10g, lecz należy podkreślić, że istnieje możliwość wykonania sen-



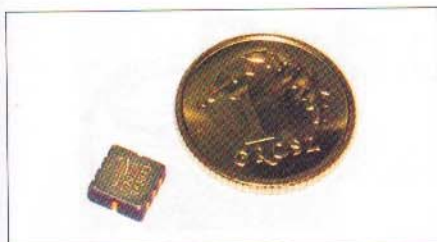
Spośród dostępnych na rynku czujników przyspieszenia na uwagę zasługują produkty amerykańskiej firmy Memsic. Powodem tego jest inna technologia, w jakiej są produkowane.



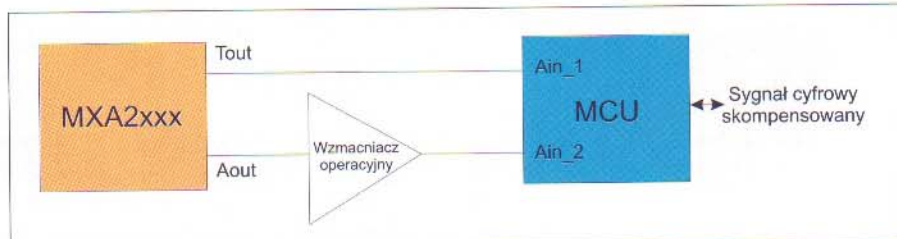
Rys. 1. Budowa i zasada działania dwukierunkowego czujnika Memsic



Rys. 2. Przykładowy schemat blokowy sensora analogowego



Rys. 3. Obudowa LCC-8 o wymiarach 5mmx5mmx2mm stosowana w produkcji układów Memsic



Rys. 4. Schemat blokowy kompensacji z zastosowaniem MCU

sorów na indywidualne zamówienie w zakresach przekraczających 100g. Rozdzielczość pomiaru nie przekracza natomiast 1mg, co jest w ogromnej większości przypadków wartością zadowalającą.

Dzięki zastosowaniu takiej metody pomiaru, tj. pozbawionej ruchomych elementów mechanicznych, stało się możliwe wyeliminowanie szeregu problemów związanych z technologią pojemnościową. Między innymi nie występuje tu zjawisko tarcia statycznego, powszechne w czujnikach pojemnościowych, a powodowane przez siły lepkości, elektrostatyczne i Van der Waalsa, czy też tworzenie się pomiędzy elektrodami tzw. mostków wodorowych. Daje to pewność powtarzalności pomiarów (brak efektu histerezy) nawet dla bardzo małych przyspieszeń czy zmian położenia, niezbędna w wielu zastosowaniach. Ponadto uzyskuje się doskonałą odporność na udary mechaniczne, sięgającą nawet 50 000g, a co za tym idzie dużo mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia układu w czasie montażu, pracy lub transportu, np. w wyniku upadku.

Nie bez znaczenia jest też fakt możliwości zastosowania standardowej technologii produkcji CMOS, co nie pozostaje bez wpływu na koszty.

■ Kompensacja wpływu temperatury otoczenia

Zmiany temperatury otoczenia wpływają w dwojaki sposób na parametry czujników przyspieszenia. Zmieniają ich czułość oraz tzw. offset punktu 0g, czyli położenie układu, w którym wskazuje on zerowe przyspieszenie.

W przypadku czujników Memsic niewyposażonych w zabudowany układ kompensacji, zmiany czułości względem temperatury opisuje równanie:

$$S_p \cdot T_p^\alpha = S_K \cdot T_K^\alpha$$

gdzie: S_p , T_p – odpowiednio czułość i temperatura początkowa, S_K , T_K – odpowiednio czułość i temperatura końcowa, α – współczynnik zależny od rodziny układów (np. dla serii układów niskoszumnych 2,81).

Jak z niego wynika, zmiany czułości są jednakowe dla każdej grupy akcelerometrów, co ułatwia kompensację wpływu zjawiska na pracę urządzenia. Stosując duże uproszczenie można przyjąć, iż czułość waha się od około połowy wartości nominalnej, gdy czujnik pracuje w wysokich temperaturach, do jej dwukrotności przy dolnym zakresie temperatur pracy.

Kompensacja ta nie zawsze jednak jest potrzebna (np. dla urządzeń pracujących w temperaturze pokojowej) lub równanie może być aproksymowane do prostej. Dla wahań temperatury w zakresie 0-50°C przybliżenie takie pozwala utrzymać zmiany czułości w granicach 2,6%.

Dla zastosowań bardziej wymagających jest zalecane zastosowanie jednego z szeroko dostępnych, tanih mikrokontrolerów (np. Atmel serii 51 lub AVR), za pomocą których można ograniczyć zmiany do 1% w szerokim zakresie temperatur pracy. Dodatkowym atutem użycia mikrokontrolera jest możliwość wykorzystania go również do kompensacji offsetu punktu 0g.

Istnieje kilka metod takiej kompensacji, a jedna z nich, wystarczająca do większości zastosowań i jednocześnie tania, zostanie poniżej przybliżona.

Przykładowy schemat blokowy tego rozwiązania przedstawia rysunek 4. Dla czujników z wyjściem analogowym jest nieraz konieczne wzmocnienie sygnału, szczególnie w aplikacjach o niewielkim zakresie zmian przyspieszenia. Ponadto należy pamiętać, aby odpowiednio dobrać przedział pracy przetwornika A/C. Na przykład w zastosowaniu, gdzie zakładana minimalna temperatura pracy układu wynosi -40°C, zakres pracy przetwornika powinien być 2,5

raza większy niż w przypadku pełnego wysterowania akcelerometru w temperaturze pokojowej.

Kiedy wiemy już, jak zapewnić właściwą pracę przetwornika A/C, korekta czułości staje się stosunkowo prosta. Wiemy bowiem, że:

$$A_s = A_{OUT} * (T_{OUT}^{2.67} / T_{OUT(25^\circ C)}^{2.67})$$

Jednakże rozwiązanie powyższego równania na 8-bitowym mikrokontrolerze może pochłonąć znaczną część jego mocy obliczeniowej oraz pamięci, które mogą być potrzebne do innych zastosowań (choćby do kompensacji offsetu punktu 0g). Możemy temu zapobiec, stosując np. tablicę przeglądową lub upraszczając równanie do postaci:

$$A_s = A_{OUT} * (d + e * T_{OUT} + f * T_{OUT} * T_{OUT})$$

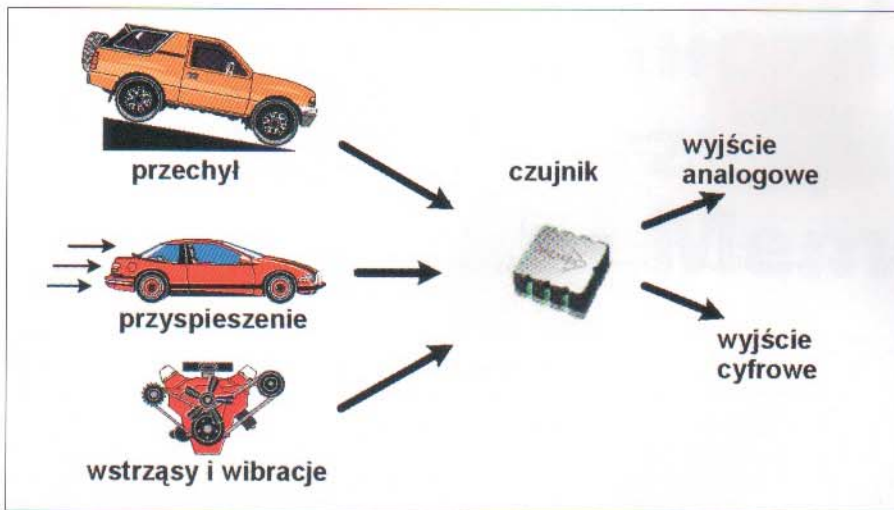
gdzie d, e i f są wyliczonymi uprzednio stałymi zależnymi od rozdzielczości przetwornika A/C i jego napięcia odniesienia oraz kształtu charakterystyki temperaturowej czujnika. Można je skalkulować, używając funkcji doboru krzywej (wyównywania krzywej) powszechnie dostępnej w elektronicznych arkuszach kalkulacyjnych.

Ważne jest również, aby wziąć pod uwagę fakt, iż uzyskanie dokładnych wyników rozwiązania naszego równania na 8-bitowym mikrokontrolerze będzie wymagać zastosowania matematyki zmiennoprzecinkowej.

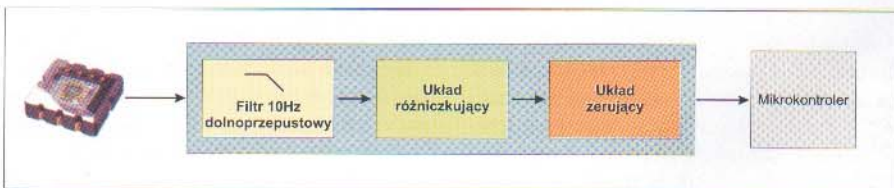
W zastosowaniach, w których przewidywany zakres temperatur pracy jest mocno ograniczony (np. 0... 70°C), powyższe równanie można jeszcze bardziej uprościć pomijając ostatnią jego część (f=0). Oczywiście skutkuje to zwiększeniem błędów korekcji, lecz umożliwia to znaczne zmniejszenie niezbędnej pamięci oraz kosztu mikrokontrolera. Dla lepszego zobrazowania zagadnienia, w tabeli 1 przedstawiono kilka przykładów

Tabela 1. Kilka przykładów uzyskanych wydajności kompensacji temperaturowej w zależności od parametrów przetwornika A/C

Rozdzielczość przetwornika A/C	Napięcie odniesienia	Przewidywany zakres temperatur pracy	Wymagania dla bibliotek MCU	Wyliczone stałe			Błąd czułości po kompensacji
				d	e	f	
12 bitów	2,5V	-40 do +85°C	zmiennoprzecinkowe	0,20933	-1,3843*10 ⁻⁴	1,4889*10 ⁻⁶	0,3%
12 bitów	5,0V	-40 do +85°C	zmiennoprzecinkowe	0,18816	-2,2827*10 ⁻⁴	3,7898*10 ⁻⁷	0,4%
8 bitów	2,5V	0 do +70°C	ustalony punkt pracy	-0,92673	3,7753*10 ⁻²	0	1,9%
8 bitów	5,0V	0 do +70°C	ustalony punkt pracy	-0,90149	1,8691*10 ⁻²	0	2,8%



Rys. 5. Zastosowania



Rys. 6. Przykładowy schemat blokowy rozwiązania alarmu samochodowego

uzyskanych wydajności dla tej metody w zależności od parametrów przetwornika A/C.

Kompensację wpływu temperatury na dryft punktu 0g czujnika można przeprowadzić, stosując następującą zależność:

$$A_s = A_{OUT} - (a + b * T_{OUT} + c * T_{OUT} * T_{OUT})$$

gdzie a, b i c są stałymi charakterystycznymi dla każdego sensora. Aby ustalić ich wartości, należy zbadać zachowanie akcelerometru w trzech temperaturach możliwie równomiernie rozłożonych w jego przewidywanym zakresie pracy. Zebranych danych w postaci A_{OUT0} ; T_{OUT0} ; A_{OUT1} ; T_{OUT1} ; A_{OUT2} ; T_{OUT2} należy następnie użyć do rozwiązania poniższych równań.

$$r0 = A_{OUT0} / ((T_{OUT0} - T_{OUT1}) * (T_{OUT0} - T_{OUT2}))$$

$$r1 = A_{OUT1} / ((T_{OUT1} - T_{OUT0}) * (T_{OUT1} - T_{OUT2}))$$

$$r2 = A_{OUT2} / ((T_{OUT2} - T_{OUT0}) * (T_{OUT2} - T_{OUT1}))$$

$$a = r0 * T_{OUT1} * T_{OUT2} + r1 * T_{OUT0} * T_{OUT2} + r2 * T_{OUT0} * T_{OUT1}$$

$$b = -r0 * (T_{OUT1} + T_{OUT2}) - r1 * (T_{OUT0} + T_{OUT2}) - r2 * (T_{OUT0} + T_{OUT1})$$

$$c = r0 + r1 + r2$$

Obliczenia te można zautomatyzować, np. poprzez użycie komputera, który jest w stanie jednocześnie kontrolować temperaturę w komorze testowej, prowadzić wszystkie obliczenia oraz zapisywać wyniki w pamięci mikrokontrolera. Podobnie jak poprzednio dla zastosowań o zawężonym zakresie temperatur pracy, równanie i sam proces ustalania jego stałych można uprościć, eliminując jego ostatni człon ($c=0$) i uzyskując tym samym zależność liniową wymagającą do jej rozwiązania jedynie dwóch punktów pomiarowych.

Cyfrowa kompensacja wpływu temperatury na punkt 0g pozwala ograniczyć jego offset do kilku mg, co z kolei umożliwia zastosowanie akcelerometrów Memsic

w aplikacjach, gdzie stabilność tego parametru ma bardzo duże znaczenie (np. inklinometr).

Zastosowania

Sensory Memsic, mogące pracować w zakresie temperatur od -40°C do $+105^{\circ}\text{C}$, doskonale nadają się do pomiaru nie tylko przyspieszenia (prędkości), lecz również położenia, przechyłów, drgań czy nawet siły zderzenia. Stąd też znajdują one szerokie zastosowanie w przemyśle telekomunikacyjnym, medycznym, motoryzacji, sprzęcie budowlanym i elektronarzędziach, systemach alarmowych czy różnego rodzaju manipulatorach.

Bez wątpienia jednym z najbardziej popularnych zastosowań jest alarm samochodowy. Można powiedzieć, iż alarm taki powinien sygnalizować zmiany położenia pojazdu wynikłe z próby jego holowania lub



Rys. 7. MXEB-S-003 evaluation board

podnoszenia, a jednocześnie powinien być odporny na zmiany temperatury otoczenia czy podmuchy wiatru. Przykład rozwiązania przedstawia rysunek 5. Ogólnie można przyjąć, że interesuje nas, czy pojazd zmienia swoje nachylenie od momentu zaparkowania o kąt większy niż 5 stopni oraz czy dynamika tych zmian przekracza 0,2 stopnia na sekundę (i trwa kilka sekund). Jeśli tak, alarm jest włączany.

Filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 10Hz pozwala na zmniejszenie szumów do odpowiedniego poziomu. Ponieważ zmiana punktu 0g względem temperatury wynosi, w zależności od wybranego układu, od 2 do $0,5\text{mg}/^{\circ}\text{C}$, został zastosowany układ różniczkujący oraz zerujący mający za zadanie ochronę układu przed wpływem temperatury zewnętrznej. Zakładamy, że w przypadku, gdy samochód będzie podnoszony lub holowany, zmiany w jego nachyleniu będą większe niż 5 stopni lub $75\text{mg}/\text{min}$ ($1,25\text{mg}/\text{s}$). Zatem, za każdym razem gdy dokonywany jest pomiar, jego wynik jest porównywany z poprzednim. Jeżeli zmiany nie przekraczają $1,25\text{mg}/\text{s}$, przyjmujemy, że spowodował je dryft punktu 0g względem temperatury, a co za tym idzie wynik ten przyjmujemy jako „nowy” punkt odniesienia dla kolejnych pomiarów.

Uwagi końcowe

Czujniki Memsic są stosowane przez polskich producentów od ponad roku, a na świecie decyzję o wykorzystaniu ich w swoich produktach podjęły między innymi tak znane firmy, jak Autoliv, IBM, Mitsubishi, Sharp, TomTom czy Texas Instruments. Świadczy to o wysokiej jakości produktów potwierdzonej przez certyfikat ISO/TS-16949. Memsic oferuje swoim klientom nie tylko czujniki, lecz również kompleksowe wsparcie techniczne, szczegółowe karty katalogowe, liczne noty aplikacyjne oraz płytki ewaluacyjne z niezbędnym do ich użycia oprogramowaniem. Wiele wątpliwości czy problemów wyjaśnia lektura bardzo dobrze prowadzonej strony internetowej www.memsic.com.

mgr inż. Tomasz Rojek

Artykuł powstał dzięki materiałom udostępnionym przez firmę JM Elektronik.