

Układy scalone MEMS

W artykule omówiono cztery grupy często stosowanych podzespołów wykonanych w technologii mikro-elektro-mechanicznej. Technika ta często przekracza granice wyznaczone przez wyobraźnię przeciętnego człowieka. Subminiaturowe napędy, kondensatory, czujniki oraz inne podzespoły wręcz zdumiewają technologią wykonania. Czasami aż nie chce się wierzyć, że to w ogóle jest możliwe.

Układy scalone wykonane w technologii MEMS zawierają w swojej strukturze obwody elektroniczne, elektryczne oraz powiązane z nimi mikromechanizmy. Do najczęściej stosowanych MEMSów, osiągalnych dla przeciętnego konstruktora elektronika, należą: akcelerometry, żyroskopy, czujniki ciśnienia oraz mikrofony.

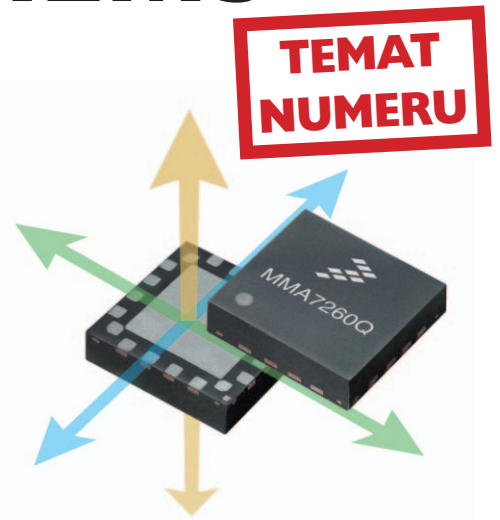
Akcelerometry

Czujniki przyspieszenia wykonane w technologii MEMS oferowane są przez wielu dużych producentów układów elektronicznych. Na rynku można spotkać sensory przeznaczone do różnych zastosowań, przy czym są one podzielone na grupy w zależności od zakresu przyspieszeń, jakie mogą przetwarzać.

Akcelerometry mogą być stosowane do wykrywania zmian sił działających na układ. Pozwalają zaprogramować reakcje urządze-

nia na przechylenie, poruszenie, przesunięcie, wstrząsy lub wibracje. W praktyce stosowane są przede wszystkim w systemach napełniania poduszek powietrznych w samochodach oraz w nowoczesnej elektronice użytkowej. W tym pierwszym przypadku, konieczne jest wykorzystywanie elementów, które są odporne na różnego rodzaju tzw. wibracje pasożytnicze, jakie nie powinny powodować napełnienia poduszek. Powinny być niewrażliwe na pionowe wstrząsy w trakcie jazdy po nierównej nawierzchni lub też np. na trzaśnięcia drzwiami.

Akcelerometry wyposażone są najczęściej w wyjścia analogowe, napięciowe. Spotkać można też układy z wyjściami cyfrowymi w standardzie SPI lub I²C. Wykrywają one przyspieszenia w jednej, dwóch lub trzech osiach. W praktyce, układy przeznaczone do wykrywania większych przyspieszeń mają ograniczoną liczbę osi, w których pracują,



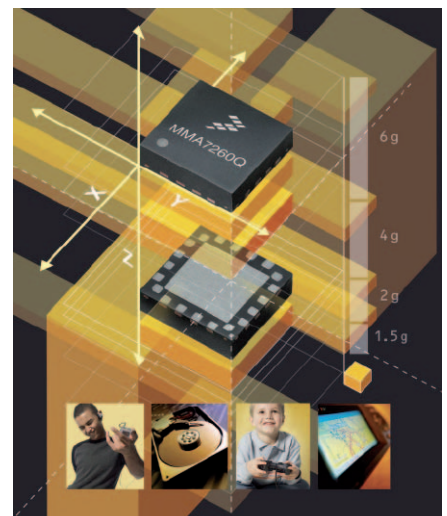
stąd gdyby zaszła konieczność pomiaru przyspieszeń rzędu 200 g w dwóch lub trzech osiach, konieczne byłoby zastosowanie więcej niż jednego czujnika.

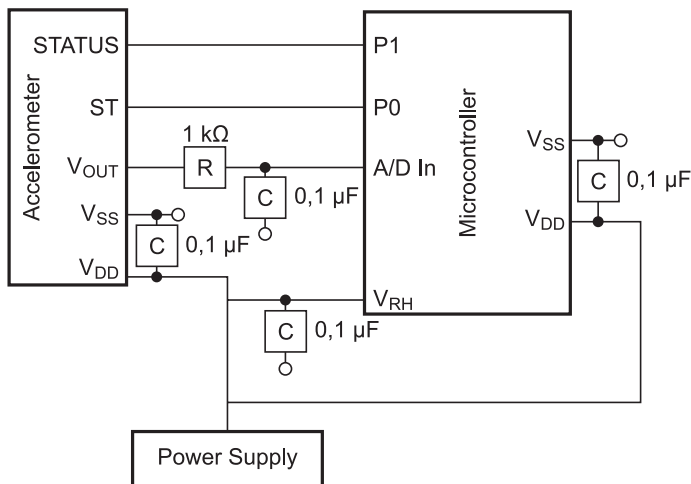
Ważnym parametrem akcelerometrów jest częstotliwość drgań, jaką mogą przetwarzać. Drgania o częstotliwościach wyższych nie zostaną odnotowane przez sensor. Co więcej, niektóre z nich wyposażone zostały w funkcję samotestowania. Aby ją uruchomić należy podać odpowiednie napięcie na wyznaczoną nóżkę układu, co powoduje odchylenie znajdującego się wewnątrz układu elementu elektromechanicznego pod wpływem siły elektrostatycznej. Wychylenie to jest mierzone przez sensor, a wynik pomiaru podawany na wyjście układu. Dzięki temu jednocześnie sprawdzana jest zarówno zdolność elementu mechanicznego do reagowania na pobudzenie, jak i części przetwarzającej wychylenie elementu na sygnał wyjściowy.

Najważniejszym parametrem, z punktu widzenia precyzji pomiaru przyspieszenia, jest czułość sensora. Określa się ją w przypadku wyjść analogowych napięciowych

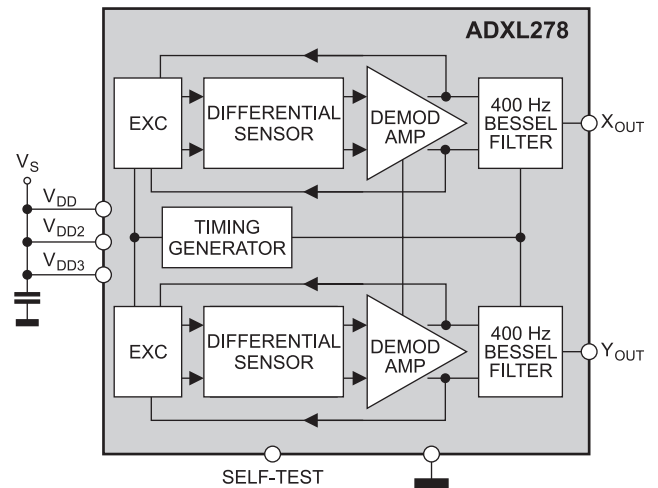
Tab. 1. Akcelerometry z oferty firmy Freescale

Model	Zakres pomiarowy [g]	Wyjście	Osie pracy	Czułość [mV/g]	Częstotliwość graniczna [Hz]
MMA1211	150	analogowe	Z	13	400
MMA2301	200	analogowe	X	10	400
MMA1212	200	analogowe	Z	10	400
MMA1200	250	analogowe	Z	8	400
MMA3201	40	analogowe	XY	50	400
MMA2201	40	analogowe	X	50	400
MMA2202	50	analogowe	X	40	400
MMA3204	30,1	analogowe	XY	–	400
MMA3202	50,1	analogowe	XY	–	400
MMA2204	100	analogowe	X	20	400
MMA1213	50	analogowe	Z	40	400
MMA1210	100	analogowe	Z	20	400
MMA2260	1,5	analogowe	X	1200	50
MMA7361L	1,5	analogowe	XYZ	800	600
MMA7331L	4	analogowe	XYZ	308	400
MMA7261QT	2,5	analogowe	XYZ	480	150
MMA7260QT	1,5	analogowe	XYZ	800	150
MMA1260EG	1,5	analogowe	Z	1200	50
MMA1270EG	2,5	analogowe	Z	750	50
MMA1250EG	5	analogowe	Z	400	50
MMA1220	8	analogowe	Z	250	250
MMA745xL	2	I ² C, SPI	XYZ	–	–
MMA62xx	100	analogowe, SPI	XY	–	400
MMA7660FC	1,5	I ² C	XYZ	–	–

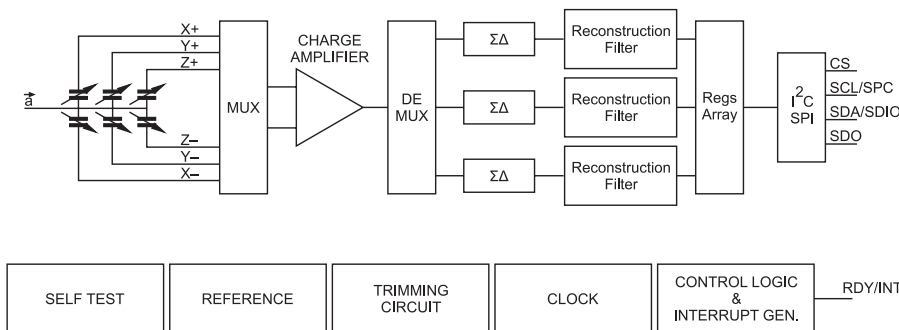




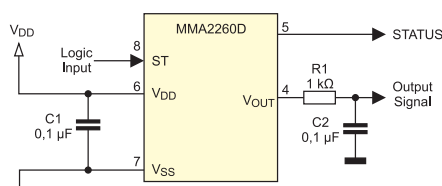
Rys. 1. Przykład podłączenia akcelerometru Freescale



Rys. 2. Schemat budowy akcelerometru ADXL278



Rys. 3. Schemat budowy wewnętrznej 3-osiowego akcelerometru ST LIS3LV02DQ



Rys. 4. Sugerowany sposób podłączenia akcelerometru Freescale

w mV/g. Dla wyjść cyfrowych definiowana jest jako rozdzielczość sygnału. W praktyce, czułość jest tym większa, im mniejszy zakres pomiarowy.

Akcelerometry zasilane są najczęściej pojedynczym napięciem 3,3 lub 5 V, przy czym mniejsze napięcie stosowane jest w przypadku sensorów o małym zakresie pomiarowych. Istnieją także elementy zdolne do pracy już przy napięciu zasilania równym 1,4 VDC.

Świetnym przykładem jest oferta firmy Freescale, w która sprzedaje czujniki wykry-

wające małe, średnie i duże przyspieszenia. Freescale, ma obecnie w ofercie 13 typów układów o małym zakresie pomiarowym, 9 z zakresu od 30 do 100 g i 5, które pozwalają mierzyć przyspieszenia powyżej 100 g. Każdy z tych układów oferowany jest w kilku wersjach obudów i w różnych opakowaniach. Zdecydowana większość podaje na wyjścia sygnały analogowe, a ten najbardziej dokładne cechują się czułością na poziomie 1200 mV/g. Ich ceny wynoszą najczęściej

około 3,5 dol. za sztukę w zakupach hurtowych.

Zastosowania wymienionych czujników zależą głównie od zakresu pomiarowego. Te o największej czułości kierowane są do producentów tzw. elektroniki użytkowej, w celu wykrywania czynności wykonywanych przez użytkownika. Układy o zakresie w okolicach 50 g przeznaczone są do monitorowania wibracji oraz do zabezpieczenia urządzeń elektromechanicznych przed



Tab. 2. Akcelerometry z oferty firmy Analog Devices

Model	Zakres pomiarowy [g]	Wyjście	Liczba osi pracy	Czułość [mV/g]	Częstotliwość graniczna [Hz]
ADXL325	±5	analogowe	3	174	1600
ADXL326	±16	analogowe	3	57	1600
ADXL327	±2	analogowe	3	420	1600
ADXL335	±3	analogowe	3	300	1600
ADXL345	±2/4/8/16	cyfrowe	3	do 256 c/g	1600
ADXL346	±2/4/8/16	cyfrowe	3	do 256 c/g	1600
ADXL321	±18	analogowe	2	57	2500
ADXL103	±1,7	analogowe	1	1000	2500
ADXL203	±1,7	analogowe	2	1000	2500
ADXL213	±1,2	PWM	2	30 %/g	2500
ADXL001	±70	analogowe	1	16	22000
ADXL278	±70	analogowe	2	27	400
ADXL78	±70	analogowe	1	27	400
ADIS16003	±1,7	SPI	2	1.22 mg/c	2250
ADIS16006	±5	SPI	2	3.91 mg/c	2250
ADIS16240	±18	SPI	3	51.4 mg/c	1600
ADIS16204	±70 (X); ±37 (Y)	SPI	2	17.13 mg/c	400

c/g – count per g (stopień rozdzielczości wyjścia na g); mg/c – 0,001 g per count (0,001 g na stopień rozdzielczości wyjścia)



uszkodzeniem, poprzez blokowanie ich mechanicznych elementów, jak tylko wykryte zostanie zbyt duże przyspieszenie. Elementy o najwyższym zakresie pomiarowym, takie jak MMA1200 firmy Freescale, który pozwala na wykrywanie przyspieszeń rzędu 250 g, służą głównie do monitorowania wibracji lub analizowania zderzeń.

Niewiele mniejszą ofertą akcelerometrów pochwalić się może Analog Devices. Firma ta podzieliła swoje produkty na dwie grupy, w zależności od zakresu przyspieszeń, jakie wykrywają. W pierwszej znajdują się układy o zakresie pomiarowym od 1,7 do 18 g. Maksymalne wykrywane przyspieszenia układów z drugiej grupy to 70 g. Ponadto ADI oferuje akcelerometry scalone z dodatkowymi układami przetwarzającymi, czyniąc z nich tzw. inteligentne sensory. Należą one do rodziny iSensor i są wyposażone w interfejs SPI. Są wśród nich podzespoły przeznaczone specjalnie np. do pomiaru uderzeń lub obrotów.

Układy ADI cechują się czułością podobną jak w przypadku Freescale przy czym oprócz elementów z wyjściem napięciowym, cyfrowym I²C lub SPI, dostępny jest także model z wyjściem PWM. Większość układów ADI jest w stanie wykrywać wibracje o częstotliwości 1,6 lub 2,5 kHz. W przypadku zintegrowanych podzespołów z rodziny iSensor, wartość ta wynosi najczęściej 2,25 kHz. Warto też wspomnieć u modelu ADXL001, który może wykrywać drgania o częstotliwości 22 kHz. Jednakże koszt tego elementu w hurcie to aż 37 dol za sztukę.

Z nieco inną ofertą spotkać się można w STMicroelectronics. Przede wszystkim firma ta oferuje czujniki o zakresie pomiarowym nie większym niż 8 g, przy czym w wersji z wyjściem analogowym dostępne są modele o zakresie 2 g i 6 g. Moduły cyfrowe sprzedawane są w wersjach z interfejsem SPI lub I²C i mogą wykrywać do 2 g, 4 g lub 8 g. W porównaniu do układów ADI i Freescale, akcelerometry Freescale cechują się mniejszą maksymalną czułością ale dostępne są w wersjach, które pozwalają na wykrywanie wibracji o częstotliwości do 2 kHz. Podejście STM różni się także w inny sposób, a mianowicie producent ten oferuje jedynie ukła-

Tab. 3. Akcelerometry z oferty firmy STMicroelectronics

Model	Zakres pomiarowy [g]	Wyjście	Liczba osi pracy	Czułość [mV/g]	Częstotliwość graniczna [Hz]
AIS226DS	±2, ±6	cyfrowe	2	14 bitów	640
AIS326DQ	±2, ±6	cyfrowe	3	12 bitów	640
LIS202DL	±2, ±8	cyfrowe	2	8 bitów	200
LIS244AL	±2	analogowe	2	420	2000
LIS244ALH	±2, ±6	analogowe	2	660	2000
LIS2L02AL	±2	analogowe	2	660	2000
LIS2L06AL	±2, ±6	analogowe	2	660	2000
LIS302DL	±2, ±8	cyfrowe	3	8 bitów	200
LIS302DLH	±2, ±4, ±8	cyfrowe	3	12 bitów	500
LIS302SG	±2	analogowe	3	478	2000
LIS331AL	±2	analogowe	3	478	2000
LIS331DL	±2, ±8	cyfrowe	3	8 bitów	200
LIS331DLF	±2, ±4, ±8	cyfrowe	3	6 bitów	200
LIS331DLH	±2, ±4, ±8	cyfrowe	3	12 bitów	500
LIS331DLM	±2, ±4, ±8	cyfrowe	3	8 bitów	200
LIS331HH	±6, ±12, ±24	cyfrowe	3	12 bitów	500
LIS33DE	±2, ±4, ±8	cyfrowe	3	-	200
LIS344AL	±3,5	analogowe	3	300	2000
LIS344ALH	±2, ±6	analogowe	3	660	1,8
LIS352AX	±2	analogowe	3	363	2000
LIS35DE	±2, ±8	cyfrowe	3	-	200
LIS3L02AL	±2	analogowe	3	660	1500
LIS3L02AQ3	±2, ±6	analogowe	3	660	1500
LIS3L06AL	±2, ±6	analogowe	3	660	1500
LIS3LV02DL	±2, ±6	cyfrowe	3	12 bitów	640
LIS3LV02DQ	±2, ±6	cyfrowe	3	12 bitów	640

Tab. 4. Akcelerometry z oferty firmy Memsc

Model	Zakres pomiarowy [g]	Wyjście	Liczba osi pracy	Czułość [mV/g]	Częstotliwość graniczna [Hz]
MXA2050A	20	analogowe	2	50	30 (rozszerzalna do 160)
MXA2050M	3,4	analogowe	2	500	17 (rozszerzalna do 160)
MXA6500M	2	analogowe	2	500	
MXC6202M	4	I ² C	2	512 c/g	
MXD2020E	2	PWM	2	20 %/g	17
MXD6025Q	4	PWM	2	25 %/g	
MXD6125Q	2	PWM	2	12,5 %/g	
MXR2010A	70	ilorazowe	2	10	30 (rozszerzalna do 160)
MXR6150M	4	ilorazowe	2	150	
MXR6400Q	2	ilorazowe	2	400	
MXR6500M	3,4	ilorazowe	2	500	
MXR9150	10	ilorazowe	3	150	
MXR9500	3	ilorazowe	3	500	

c/g – count per g (stopień rozdzielczości wyjścia na g)

dy wykrywające przyspieszenie w dwóch lub trzech osiach. O ile ma w swojej ofercie układy przystosowane do zastosowań w motoryzacji, to próżno w niej szukać układów zdolnych do monitorowania bardzo silnych drgań. Zaletą analogowych czujników przyspieszenia STM jest cena. Kosztują one już od niecałych 2 dol. w handlu detalicznym.

Ważnym graczem na rynku czujników przyspieszenia wykonanych w technologii MEMS jest firma Bosch. Oferuje ona dwie grupy akcelerometrów. Pierwsza z nich to moduły wykonywane przez oddział Bosch

Sensortec. Należą do niej dwa typy sensorów z wyjściem cyfrowym i dwa z wyjściem analogowym, przy czym te pierwsze dostępne są nie tylko w obudowie LGA, ale i QFN. Układy cyfrowe Bosch pozwalają na pomiar przyspieszenia w dwóch osiach, a analogowe w trzech. Ich zakres pomiarowy nie przekracza 8 g i są one przeznaczone przede wszystkim do zastosowań w elektronice użytkowej. Zdecydowanie różnią się one od akcelerometrów oferowanych przez dział motoryzacji firmy Bosch. Te, w zależności od wersji, pozwalają na pomiar przyspieszeń

o wartości nawet do 480 g. Producent oferuje odmiany jedno i dwu-osiowe, zarówno z wyjściami analogowymi, jak i cyfrowymi, przy czym istnieje możliwość zamówienia modelu z wyjściem prądowym. Układy te przeznaczone są głównie do wykrywania zderzeń w motoryzacji. Większość z nich pracuje w paśmie do 400 Hz.

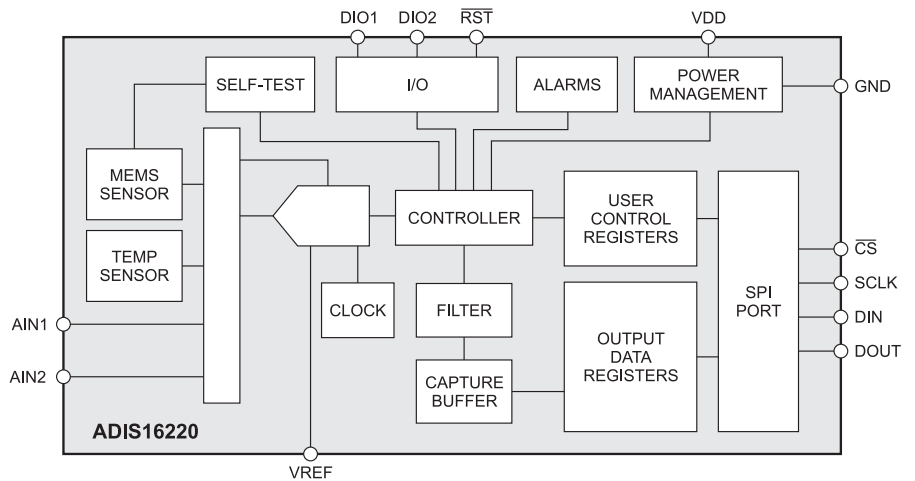
Firmą, która produkuje głównie akcelerometry w technologii MEMS jest Memsic. Oferta Memsic została podzielona na dwie części. Pierwsza z nich zawiera czujniki przyspieszenia przeznaczone do zastosowań w elektronice użytkowej. Druga – czujniki do motoryzacji. Zostały one wyposażone w wyjścia analogowe, cyfrowe (SPI, I²C) i PWM. Maksymalny zakres pomiarowy tych elementów to 70 g, a częstotliwość graniczna wynosi kilkadziesiąt herców. Memsic oferuje przede wszystkim elementy 2-osiowe, a także dwa modele układów pracujących w trzech osiach.

Warto wspomnieć, że pewną ofertę akcelerometrów wykonanych w technologii MEMS mają także firmy Honeywell, Kionix i Delphi. Przy wyborze konkretnych układów należy jednak zwrócić uwagę, w jaki sposób producent podaje zakres pracy elementu. Niektórzy definiują go jako maksymalne wykrywalne przyspieszenie, podczas gdy inni podają jako różnicę pomiędzy maksymalnymi przyspieszeniami wykrywanymi w przeciwne strony, co w praktyce przekłada się na podwojenie wartości przyspieszenia w jedną stronę.

Zarówno Freescale, Analog Devices, jak i STM oferują zestawy ewaluacyjne ułatwiające projektowanie z wykorzystaniem sensorów przyspieszenia. Ponadto Analog Devices na swoich stronach internetowych publikuje multimedialne materiały, które mają pomóc projektantom w zmierzeniu się z tworzeniem urządzeń reagujących na zmiany przyspieszenia.

Żyroskopy

Drugą ważną grupą produktów wykonywanych w technologii MEMS są żyroskopy, czyli czujniki obrotu. Służą one przede wszystkim określeniu położenia i ustawienia urządzenia w przestrzeni i podobnie jak akcelerometry, w praktyce reagują na ruch. Precyzyjnie rzecz ujmując, mierzą one szybkość obrotu wyrażoną w stopniach na sekun-

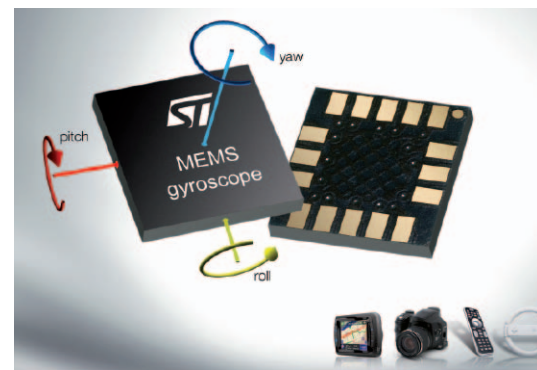


Rys. 5. Schemat budowy czujnika wibracji ADIS16220

dę. Mogą mierzyć obrót w jednej, dwóch lub trzech osiach. Również i one zawierają wbudowane układy samotestujące, a ich najważniejszymi parametrami są czułość oraz graniczna częstotliwość wykrywanego ruchu.

Zastosowania żyroskopów różnią się nieco od typowych aplikacji akcelerometrów. Są one wykorzystywane głównie w elektronice użytkowej, jako sposób realizacji nowoczesnego interfejsu użytkownika, lub też w celu kompensacji wstrząsów w takich urządzeniach jak kamery i aparaty fotograficzne. Ze względu na zbliżoną funkcjonalność oraz uzupełniające się możliwości, wiele firm produkuje zintegrowane czujniki zawierające w sobie zarówno żyroskopy, jak i akcelerometry. Sensory te nazywane są często inercyjnymi, ponieważ umożliwiają wykrywanie dowolnych sił, jakie poruszają urządzeniem.

Czujniki obrotu znajdują się w ofercie takich firm jak Analog Devices i STMicroelectronics. Ta pierwsza oferuje cztery typy układów z wyjściem analogowym, o maksymalnym zakresie pomiarowym od 50 do 300°/s. Ich pasmo przenoszenia wynosi nawet do 3 kHz. W przypadku modułów cyfrowych,



których w ofercie ADI znajduje się 11 rodzajów, maksymalny zakres pomiarowy wynosi do 320°/s a pasmo przenoszenia to albo około 50 albo 330 Hz. Warto przy tym dodać, że układy cyfrowe Analog Devices, o paśmie kilkuset herców są bardzo drogie – ich ceny wynoszą od 300 do ponad 600 dol. za sztukę.

Nieco inaczej skonstruowała swoją ofertę firma STMicroelectronics. Oferuje ona niemal 30 różnych czujników żyroskopowych, przy czym ich maksymalny zakres pomiarowy liczony jest w tysiącach °/s. Wszystkie one zasilane są napięciem z zakresu od 2,7

Tab. 5. Czujniki żyroskopowe z oferty firmy Analog Devices

Model	Zakres pomiarowy [°/s]	Czułość	Częstotliwość graniczna [Hz]	Osie (Y,P,R)
ADIS16060	±80	0,0122 °/s/c	1000	Y
ADIS16080	±80	0,098 °/s/c	40	Y
ADIS16100	±300	0,244 °/s/c	40	Y
ADIS16120	±300	0,2 °/s/mV	320	Y
ADIS16130	±250	0,000042 °/s/c	300	Y
ADIS16250	od ±80 do ±320	0,0183 °/s/c	50	Y
ADIS16251	od ±20 do ±80	0,00458 °/s/c	50	Y
ADIS16255	od ±80 do ±320	0,0183 °/s/c	50	Y
ADIS16260	od ±80 do ±320	0,0183 °/s/c	50	Y
ADIS16265	od ±80 do ±320	0,0183 °/s/c	50	Y
ADXRS610	±300	6 mV/°/s	2500	Y
ADXRS613	±150	12,5 mV/°/s	3000	Y
ADXRS614	±50	25 mV/°/s	1000	Y
ADXRS622	±250	7 mV/°/s	2500	Y

Y – Yaw, P – Pitch, R - Roll

Tab. 6. Czujniki żyroskopowe z oferty firmy STMicroelectronics

Model	Zakres pomiarowy [°/s]	Osie (Y,P,R)
LY3100ALH	±1000	Y
LY3200ALH	±2000	Y
LPY403AL	±30/120	PY
LPY410AL	±100/400	PY
LPY430AL	±300/1200	PY
LPY450AL	±500/2000	PY
LPY4150AL	±1500/6000	PY
LPR403AL	±30/120	PR
LPR410AL	±100/400	PR
LPR430AL	±300/1200	PR
LPR450AL	±500/2000	PR
LPR4150AL	±1500/6000	PR
LY503ALH	±30/120	Y
LY510ALH	±100/400	Y
LY530ALH	±300/1200	Y
LY550ALH	±500/2000	Y
LY5150ALH	±1500/6000	Y
LPY503AL	±30/120	PY
LPY510AL	±100/400	PY
LPY530AL	±300/1200	PY
LPY550AL	±500/2000	PY
LPY5150AL	±1500/6000	PY
LPR503AL	±30/120	PR
LPR510AL	±100/400	PR
LPR530AL	±300/1200	PR
LPR550AL	±500/2000	PR
LPR5150AL	±1500/6000	PR
LYPR540AH	±400/1600	YPR

Y – Yaw, P – Pitch, R – Roll

do 3,6 V, przy czym tylko jeden może mierzyć szybkość obrotu we wszystkich trzech osiach. Wybierając czujnik dwuosiowy, należy koniecznie zwrócić uwagę, w których kierunkach względem obudowy, umożliwi on pomiar szybkości obrotowej. To bardzo istotne, bowiem wybór czujnika o nieodpowiedniej orientacji, może uniemożliwić wykrywanie obrotów, którym poddawane jest urządzenie.

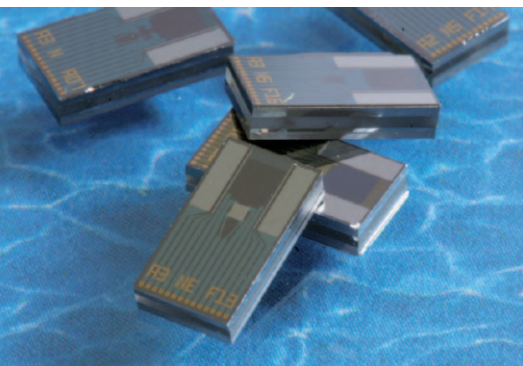


Tabela 7. Czujniki żyroskopowe z oferty firmy Invensense

Model	Czułość [mV/°/s]		Zakres pomiarowy [±°/s]		Osie (Y,P,R)
	Wyjście 1	Wyjście 2	Wyjście 1	Wyjście 2	
IDG-300	2	-	500	-	PR
IDG-400	2	-	500	-	PR
IDG-500	2	9,1	500	110	PR
IDG-650	0,5	2,27	2000	440	PR
IDG-1123	23	-	43	-	PR
IDG-1004	4	-	50	-	PR
IDG-1215	15	-	67	-	PR
IXZ-500	2	9,1	500	110	YP
IXZ-650	0,5	2,27	2000	440	YP
ISZ-500	2	9,1	500	110	Y
ISZ-650	0,5	2,27	2000	440	Y
ISZ-1215	15	-	67	-	Y

Y – Yaw, P – Pitch, R – Roll

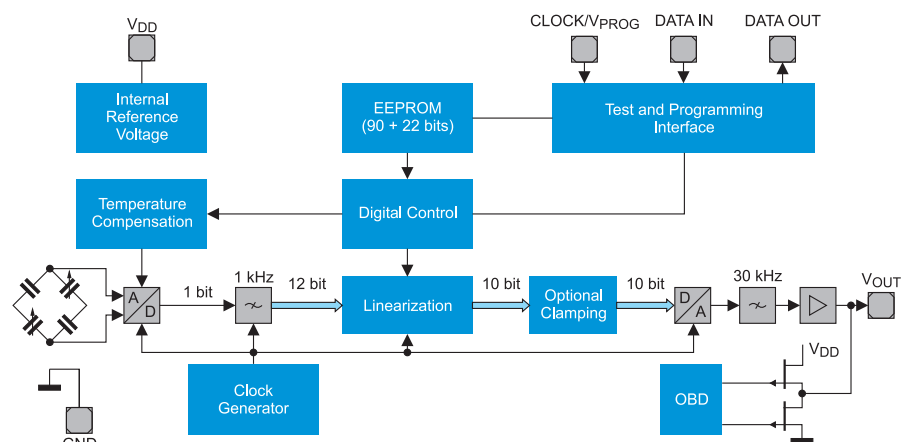
Ciekawą ofertę czujników żyroskopowych można znaleźć w norweskiej firmie Sensoror. Sprzedaje ona tylko kilka modeli sensorów. Najprostsze z nich, SAR10 cechują się zakresem pomiarowym 100°/s lub 250°/s i zostały wyposażone w wyjście SPI, na które podawany jest 10-bitowy sygnał. Nieco bardziej zaawansowane są moduły SAR10Z, które na wyjściu generują dane 12-bitowe. Producent sprzedaje powyższe modele je w obudowach SOIC. W ofercie znajdują się także moduły o zwiększonej stabilności (SAR100), które dostarczane są w ceramicznej obudowie LCC. Do wszystkich czujników żyroskopowych marki Sensoror można dokupić odpowiednie platformy uruchomieniowe, które pozwalają na podłączenie ich do komputera PC za pomocą złącza USB.

Najciekawszym produktem z oferty Sensorora są moduły żyroskopowe SIMU202. Zawierają one jeden, dwa lub trzy czujniki oraz 32-bitowy mikrokontroler ARM wykonane na wspólnej płytce krzemowej. Komunikują się ze światem zewnętrznym za pomocą interfejsu RS422. Charakteryzują się maksymalnym zakresem pomiarowym na poziomie 400°/s oraz bardzo wysoką stabilnością. Dokonują pomiarów z 24-bitową rozdzielczością.

Warto także wspomnieć o firmie Invensense, która specjalizuje się w produkcji MEMS-owych żyroskopów. Ma ona w swojej ofercie kilkanaście produktów, z których większość to układy 2-osiove. Nowością jest ITG-3200, który mierzy szybkość obrotu w trzech osiach i podaje na wyjściu sygnał cyfrowy, zgodny ze standardem I²C. Układ ten może pracować już przy napięciu zasilania równym 2,1 V i jest kierowany przede wszystkim do wbudowywania w multimedialne kontrolery gier oraz w różnego rodzaju urządzenia przenośne. Pobiera niewiele prądu – w trybie uśpienia jest to 5 μA, a czas przejścia do trybu aktywnej pracy wynosi 50 ms.

Czujniki ciśnienia

Kolejną dużą grup układów MEMS są czujniki ciśnienia. Jednym z ich dostawców jest firma Freescale, w której ofercie znajdują się sensory zdolne do pomiaru ciśnień dochodzących do 150 psi (1000 kPa). Wśród nich znaleźć można zarówno czujniki różnicowe, które mierzą różnicę ciśnień pomiędzy dwoma odseparowanymi ośrodkami, jak i czujniki skalibrowane do pomiarów wartości absolutnych, tj. w odniesieniu do próżni. Dostępne są również czujniki, mierzące



Rys. 6. Schemat budowy wewnętrznej czujnika ciśnienia KP21x

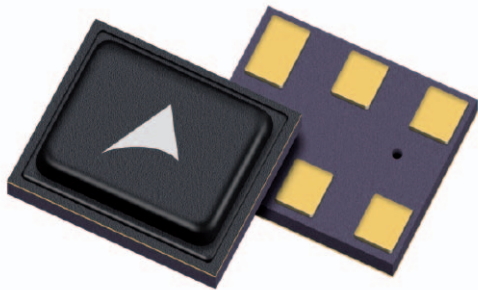
ciśnienie w odniesieniu do ciśnienia otoczenia. Zostały one tak skonstruowane, że wymagają dostępu do ciśnienia atmosferycznego i nie mogą być stosowane jako klasyczne

czujniki różnicowe, mimo że w gruncie rzeczy ich pomiar polega na porównaniu dwóch ciśnień. W ofercie Freescale znaleźć można również sensory przeznaczone do pomiaru

jakości próżni, czyli działające w bardzo niskich ciśnieniach. Dostępne są również modele przystosowane do pomiarów mediów agresywnych.

Tab. 8. Czujniki ciśnienia z oferty firmy Freescale

Model	Typ	Maksymalne ciśnienie [kPa]	Poziom integracji	Błąd pomiaru [%]	Napięcie zasilania [V]
MPX4080	różnicowy	80	zintegrowany	3	5,1
MPX4101	bezwzględny	102	zintegrowany	1,72	5
MPX4105	bezwzględny	105	zintegrowany	-	-
MPX4200	bezwzględny	200	zintegrowany	-	-
MPX4250	atmosferyczny, różnicowy, bezwzględny	250	zintegrowany	1,5	5,1
MPX5100	różnicowy, bezwzględny	100,115	zintegrowany	2,5	5
MPX5500	różnicowy	500	zintegrowany	2,5	5
MPX5700	bezwzględny, atmosferyczny, różnicowy	700	zintegrowany	2,5	5
MPX5999	różnicowy	1000	zintegrowany	2,5	5
MPXA6115A	-	-	-	-	-
MPXAZ6115A	bezwzględny	115	zintegrowany	1,5	5
MPXH6115A	-	-	-	-	-
MPXH6300A	bezwzględny	300	zintegrowany	1,5	5
MPXHZ6115A	bezwzględny	115	zintegrowany	1,5	5
MPXHZ6130A	bezwzględny	130	zintegrowany	1,5	5
MPXV5100	bezwzględny, atmosferyczny	100	zintegrowany	2,5	5
MPXV6115V	próżniowy	115	zintegrowany	-	5
MPXV7007DP	atmosferyczny, różnicowy	7,-7	zintegrowany	5	3,5
MPXV7025DP	atmosferyczny, różnicowy	-25,25	zintegrowany	5	5
MPXx4006	różnicowy, atmosferyczny	6	zintegrowany	5	5
MPXx4100	bezwzględny	115,105	zintegrowany	1,8	5,1
MPXx4115	bezwzględny, próżniowy	115	zintegrowany	1,5	5,1
MPXx5004	atmosferyczny, różnicowy, próżniowy	4	zintegrowany	2,5	5,3
MPXx5010	różnicowy, atmosferyczny	10	zintegrowany	5	5,3
MPXx5050	atmosferyczny, różnicowy, bezwzględny, próżniowy	50	zintegrowany	2,5,5	3,5
MPXx6115	bezwzględny	115	zintegrowany	1,5	5,3
MPXx6250	bezwzględny	250	zintegrowany	1,5	5
MPXx6400	bezwzględny	400	zintegrowany	1,5	5
MPXZ5150	-	-	-	-	-
MPXV7002	różnicowy	-2,2	zintegrowany	2,5	5
MPX230xDT1	atmosferyczny	40	skompensowany	-	6
MPXC2011DT1	-	-	-	-	-
MPXC201xDT1	atmosferyczny	10	skompensowany	-	3
MPXHZ6116	bezwzględny	115	zintegrowany	1,43	5
MPXx2010	różnicowy, atmosferyczny	10	skompensowany	-	10
MPXx2050	atmosferyczny, różnicowy	50	skompensowany	-	10
MPXx2051	atmosferyczny	50	skompensowany	-	10
MPXx2053	różnicowy, atmosferyczny, próżniowy	50	skompensowany	-	10
MPXx2100	próżniowy, bezwzględny, różnicowy, atmosferyczny	100	skompensowany	-	10
MPXx2102	atmosferyczny, bezwzględny, różnicowy, próżniowy	100	skompensowany	-	10
MPXx2200	atmosferyczny, bezwzględny, różnicowy	200	skompensowany	-	10
MPXx2202	bezwzględny, atmosferyczny, różnicowy	200	skompensowany	-	10
MPXx10	atmosferyczny, różnicowy	10	nieskompensowany	-	3
MPXx12	atmosferyczny, różnicowy	10	nieskompensowany	-	3
MPXx53	różnicowy, atmosferyczny	50	nieskompensowany	-	3



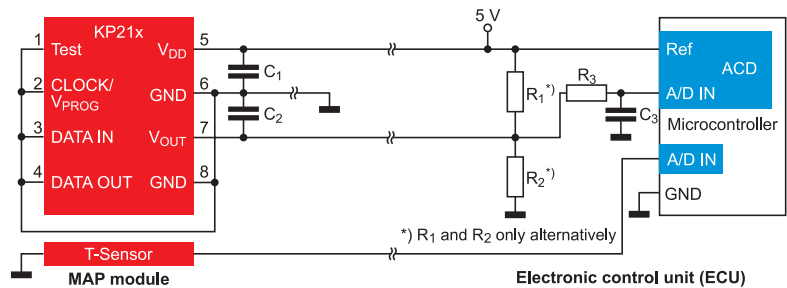
Tab. 9. Czujniki ciśnienia z oferty firmy Infineon

Model	Zakres pomiarowy [kPa]	Wbudowany akcelerometr
SP300V5.0-E106-0	100 - 450	tak
SP300V5.0-E116-0	100 - 900	tak
SP300V5.0-E206-0	100 - 450	nie
SP300V5.0-E216-0	100 - 900	nie
SP30T-00E00-06B	100 - 1600	tak
SP370-03-106-0	100 - 450	tak

Większość z czujników ciśnienia Freescale zasilana jest napięciem 5 V, choć dostępne są również układy, których oznaczenie zaczyna się od MPXx5, a które mogą pracować z napięciem 3 V. W większości są elementami z wbudowaną kompensacją temperaturową, a ponadto mogą pracować w temperaturach od -40 do +125°C, przy czym zakres kompensowany jest znacznie węższy i mieści się w granicach od 0 do 85°C.

Sensory ciśnienia wyposażane są najczęściej w wyjścia napięciowe, przy czym niektóre z nich mają wyjścia różnicowe. Wyprowadzenia mechaniczne czujników zależą od modelu i dostosowane są do konkretnego typu pomiaru. Stąd, niektóre z nich mają dwa porty przyłączeniowe, do których podłącza się badany ośrodek.

W zakresie czujników ciśnienia, pewną grupę produktów można znaleźć w firmie Infineon. Sam pomiar dokonywany jest poprzez badanie zmian pojemności kondensatorów mikro-elektro-mechanicznych. Infineon skoncentrował się na tworzeniu sensorów stosowanych głównie w motoryzacji, przy czym są to zarówno czujniki do pomiaru ciśnienia w oponach samochodowych, jak i sensory zgniatania, które instaluje się w drzwiach pojazdów, celem wykrycia zderzenia bocznego. Pierwsze z nich pozwalają na pomiary ciśnień nawet do 1600 kPa, a dzięki temu że zawierają zintegrowany mikrokontroler, czujnik temperatury i woltomierz, mogą służyć także do pomiaru innych wartości. Co więcej, niektóre z nich wyposażone zostały we wbudowane akcelerometry, które pozwalają na wykrywanie przyspieszeń do 115 g. Pozwala to na realizację wielu zadań pomiarowych za pomocą pojedynczego układu scalonego. Ze względu na wbudowany



Rys. 7. Przykładowy sposób podłączenia czujnika ciśnienia

mikrokontroler, wynik pomiaru dostępny jest w postaci cyfrowej.

Infineon oferuje także kilka różnych czujników ciśnienia atmosferycznego, z których większość pracuje w zakresie od 40 do 115 kPa. Wszystkie one zasilane są napięciem 5 V i różnią się między sobą jedynie precyzją pomiaru. Ich wyjście pomiarowe generuje sygnał analogowy o napięciu proporcjonalnym do badanego ciśnienia. Ponadto wyposażone zostały w interfejs cyfrowy, za pomocą którego możliwa jest konfiguracja i testowanie elementu.

Zbliżony do oferty Infineona wybór czujników ciśnienia MEMS można znaleźć w firmie Bosch. Produkuje ona zarówno czujniki ciśnienia atmosferycznego, detektory zgniecenia montowane w pojazdach, jak i urządzenia do monitorowania ciśnienia opon. Wszystkie one mają wyprowadzenia w postaci analogowych wyjść napięciowych.

Wymieniając producentów MEMS-owych czujników ciśnienia warto wspomnieć o firmach NovaSensor i Silicon Microstructures. Ta pierwsza należy od niedawna do koncernu General Electric i oferuje kilka modeli sensorów. Jednym z ciekawszych jej produktów jest układ NPC-100, przeznaczony do zastosowań medycznych. Mają one wymiary około 2×7×4 mm i przystosowane są do jednorazowego użytku. Pozwalają na pomiar od -0,58 do +5,8 psi i mogą pracować w temperaturach od 15 do 40°C. Ich czas życia to 168 godzin użytkowania, a w magazynie mogą leżeć do 3 lat.

Druga z firm, Silicon Microstructures tworzy czujniki w oparciu o trzy rodzaje układów pomiarowych. Pierwszy z nich pozwala na pomiary ciśnień z zakresu od 0,15 do 3 psi, drugi od 5 do 100 psi, a trzeci od 100 do 300 psi. W środkowym zakresie dostępne są trzy podgrupy o różnej precyzji działania.

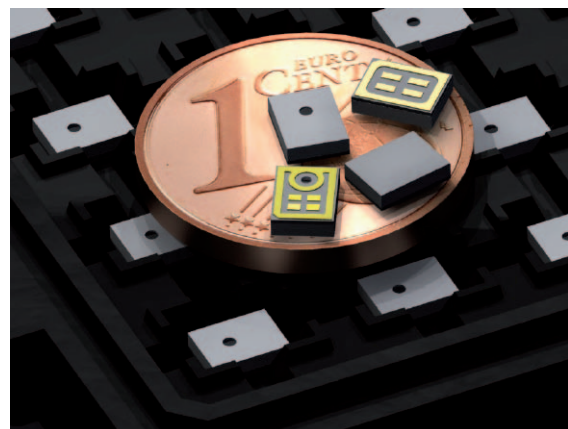
Czujniki ciśnienia ma w swojej ofercie także wcześniej opisywana firma Sensoror, która sprzedaje zarówno układy nieskompensowane temperaturowo, zawierające wyjścia napięciowe analogowe, jak i elementy skompensowane z 12-bitowymi wyjściami cyfrowymi. Trzecią grupę jej produktów stanowią skompensowane sensory ciśnienia otoczenia z wbudowanymi mikrokontrolerami. Precyzja sygnałów wyjściowych zależna

jest wtedy od konfiguracji dokonanej przez użytkownika.

Zarówno Sensoror, jak i Silicon Microstructures oferują same układy przetwornikowe, które stosują w swoich czujnikach. Pozwalają na integrację ich w projektach czujników ciśnienia, opracowywanych przez firmy trzecie.

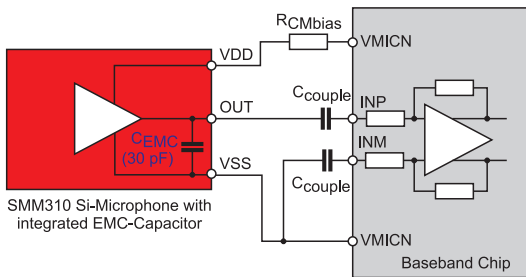
Mikrofony

Czwartą grupą czujników MEMS, wywodzącą się bezpośrednio z sensorów ciśnienia są tzw. mikrofony krzemowe. Ich produkcją zajmują się te same firmy co innymi czujnikami MEMS-owymi, takie jak Analog Devices i Infineon. Grupę tę uzupełniają firmy które powstały po to by tworzyć wysokiej jakości, mikroskopijne scalone mikrofony. Przykładem mogą być firmy Knowles, Wolfson Microelectronics i należąca do Boscha Akustica.



ADI produkuje tylko dwa rodzaje mikrofonów MEMS: analogowy ADMP401 i cyfrowy ADMP421. Charakteryzują się one stosunkiem sygnał-szum na poziomie 62 i 61 dBA oraz czułością -42 dBV w przypadku układu analogowego i -26 dBFS dla ADMP421, mierzoną dla 1 kHz. Ich pasmo przenoszenia wynosi od 100 Hz do 15 kHz, a koszt przy zakupie hurtowym to odpowiednio 1,63 dol. i 2,04 w przypadku ADMP421.

Infineon oferował tylko jeden mikrofon MEMS: SMM310, który obecnie nie jest już produkowany. Charakteryzuje się on stosunkiem SNR równym 59 dBA. Na rynek ten wkroczyła niedawno także firma STMicro



Rys. 8. Sposób podłączenia mikrofonu MEMS Infineon

electronics, która zamierza sprzedawać mikrofony MEMS wykonane z wykorzystaniem technologii firmy Omron.

Znacznie większy wybór mikrofonów MEMS mają firmy specjalizujące się w nich. Knowles oferuje około 20 układów, które różnią się między sobą typem wyjść, wielkością odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne oraz lokalizacją portu, czyli miejsca, przez które dźwięk dociera do czujnika. Znajduje się ona albo na wierzchu (jak w przypadku SMM310) albo pod spodem obudowy, tak jak w produktach ADI. Układy Knowles charakteryzują się stosunkiem SNR na poziomie od 55 do 62 dBA, w zależności od modelu. Najmniejsze z nich mają wymiary 3,76×2,95×1,10 mm. Cyfrowy układ SPM0405HD4H podaje na wyjście sygnał w formacie PCM.

Firma Wolfson Microelectronics ma nieco węższą ofertę. Produkuje dwa rodzaje mikrofonów z wyjściami analogowymi. Różnią się one nie tyle samą czułością, co precyzją jej określenia. Ponadto każdy z nich dostępny jest w dwóch wersjach obudowy: w większej, tj. 4,72×3,76×1,25 mm i mniejszej: 3,76×2,95×1,1 mm. Układy Wolfson Microelectronics zostały niedawno wprowadzone do sprzedaży poprzez firmę Farnell.

Chyba najmniejsze mikrofony na świecie można znaleźć w ofercie firmy Akustica. AKU1126 ma jedynie 2×2×1,25 mm. Zawiera cztery wyprowadzenia, w tym analogowe wyjście napięciowe oraz wejście za pomocą którego można regulować wzmocnienie sygnału w zakresie od -33 do -45 dBV. Układ ten może być zasilany napięciem z zakresu od 1,65 do 3,6 V i w trakcie pracy pobiera 140 µA prądu. Jego współczynnik SNR to 57 dB. Producent chwali się, że struktura półprzewodnikowa tego elementu ma jedynie 1×1 mm, dzięki czemu udało mu się uzyskać tak niewielkie rozmiary. Port wejściowy sygnału dźwiękowego umieszczony został na górze obudowy.



W tym samym miejscu znajduje się port wejściowy cyfrowego mikrofonu firmy Akustica, modelu AKU2002C. Cechuje się on zbliżonymi parametrami, choć ma wyraźnie większe wymiary. Dzięki dodatkowemu wejściu wyboru kanału przystosowany został do pracy w konfiguracji stereofonicznej (jeśli urządzenie wyposaży się w drugi mikrofon) i może być w prosty sposób wyłączany, by ograniczyć zużycie prądu. Producent oferuje także prosty zestaw ewaluacyjny, który ułatwia tworzenie projektów z wykorzystaniem AKU2002C.

Marcin Karbowiczek

R
E
K
L
A
M
A