



# Sensory i przetworniki MEMS – przegląd rozwiązań rynkowych (2)



*W poprzednim wydaniu EP przedstawiliśmy najbardziej rozpowszechnione w różnych aplikacjach elementy MEMS: akcelerometry i magnetometry. Teraz skupimy się na czujnikach ciśnienia, żyroskopach i mikrofonach. Zajmiemy się także czujnikami wielofunkcyjnymi, integrującymi kilka sensorów w jednej strukturze MEMS.*

Kontynuujemy prezentację sensorów wykonywanych w technologii MEMS, która zrewolucjonizowała wiele rynków zdominowanych do niedawna przez rozwiązania elektromechaniczne, elektrochemiczne, piezoelektryczne i wiele innych - w stosunku do MEMS - prymitywnych technologii.

#### Dobre źródło informacji

Ze względu na różnorodność możliwości oferowanych przez sensory MEMS i ich wyposażenie, bardzo trudne jest znalezienie sensora dokładnie odpowiadającego wymaganiom aplikacji. Pomocny w dobrze może okazać się portal

[www.findMEMS.com](http://www.findMEMS.com)

który – niestety – nie jest od pewnego czasu już rozwijany, ale opracowany przez jego autora katalog jest niezłym źródłem przeglądowych informacji, nie uwzględniającym jedynie najnowszych opracowań.

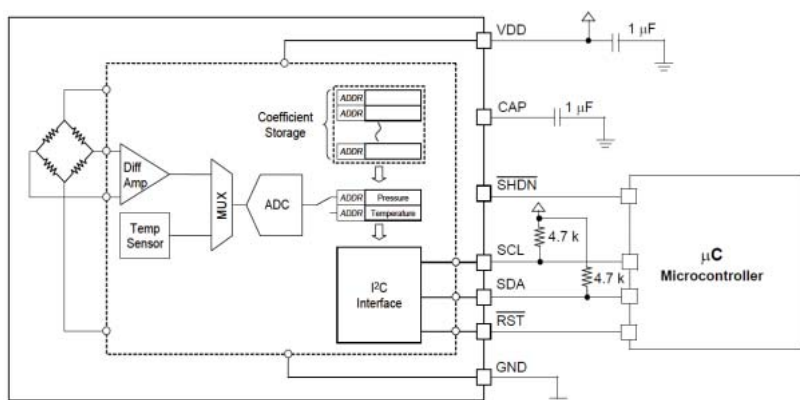
#### Czujniki ciśnienia

Piezoelektryczne czujniki ciśnienia są dostępne na rynku od wielu lat, prekursorem ich produkcji była firma Motorola (obecnie Freescale). Czujniki piezoelektryczne są stopniowo zastępowane przez rozwiązania bazujące na technologiach MEMS (zazwyczaj wykorzystywanych jednocześnie z elementami piezorezystywnymi), dzięki czemu ich parametry są coraz lepsze (przy malejących cenach), wymiary coraz mniejsze, a funkcjonalność – wynikająca z rosnącej skali integracji – coraz większa. Stosunkowo nowe na rynku są czujniki ciśnienia MEMS zintegrowane z torem konwersji A/C, które wyposażono nie tylko w systemy kompensacji termicznej, ale także precyzyjne tory

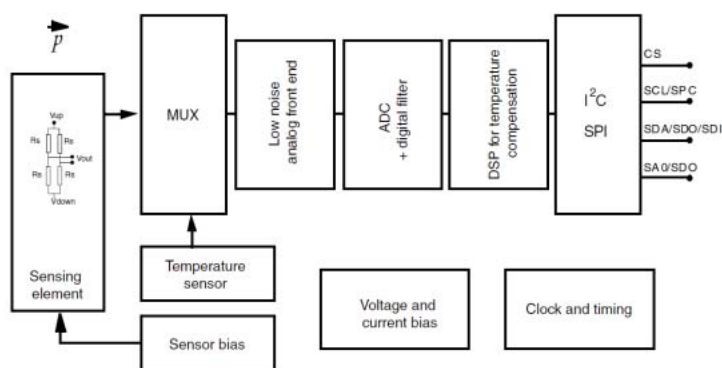
**Dodatkowe materiały na CD/FTP:**  
<ftp://ep.com.pl>, user: 18231, pass: Sawm8742  
 • pierwsza część artykułu

analogowe oraz bloki cyfrowe realizujące zaawansowane obliczenia, które umożliwiają odczyt wartości ciśnienia z dużą precyzją od razu w postaci ramek danych przesyłanych przez interfejsy SPI i/lub I<sup>2</sup>C. Ze względu na nowatorskie technologie zastosowane w czujnikach ciśnienia, ma je w aktualnej ofercie niewielu producentów.

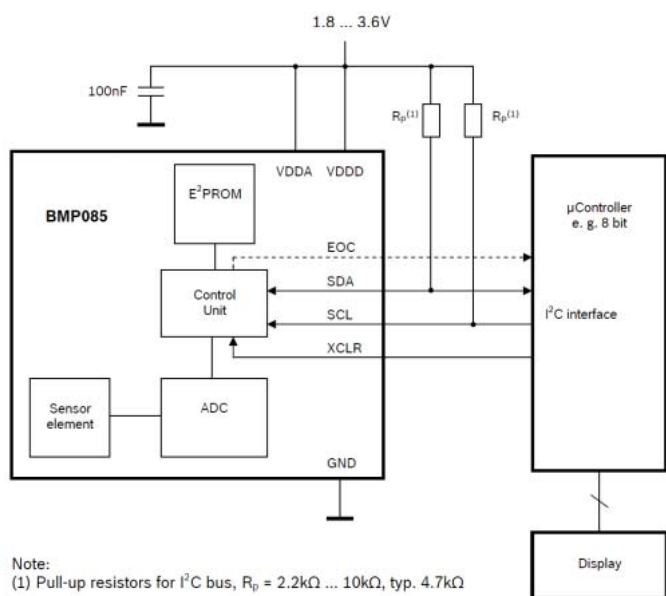
Przykładem nowoczesnego czujnika ciśnienia, bardzo popularnego na wielu rynkach oraz w Polsce, jest dostępny w dwóch wersjach - różniących się interfejsami komunikacyjnymi: I<sup>2</sup>C lub SPI – MPL115A firmy Freescale. Na **rysunku 16** pokazano schemat blokowy i aplikacyjny tego czujnika, ilustrujący łatwość i wygodę jego stosowania w systemach mikroprocesorowych. Na rysunku widać zintegrowany w sensorze czujnik temperatury, który służy ustaleniu współczynników programowej korekcji pomiaru ciśnienia (sposób obliczenia prawidłowej



Rysunek 16. Schemat aplikacyjny czujnika ciśnienia MPL115A



Rysunek 17. Schemat blokowy czujnika LPS331AP



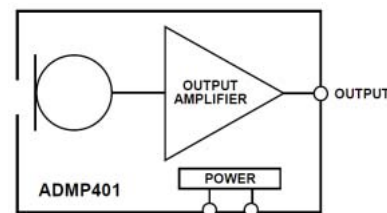
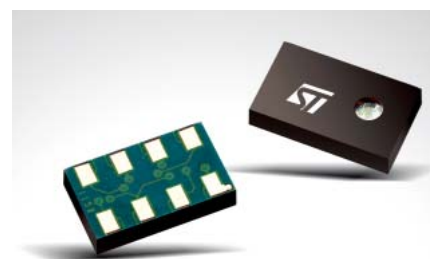
Note:  
(1) Pull-up resistors for I<sup>2</sup>C bus, R<sub>p</sub> = 2.2kΩ ... 10kΩ, typ. 4.7kΩ

Rysunek 18. Schemat aplikacyjny czujnika BMP085

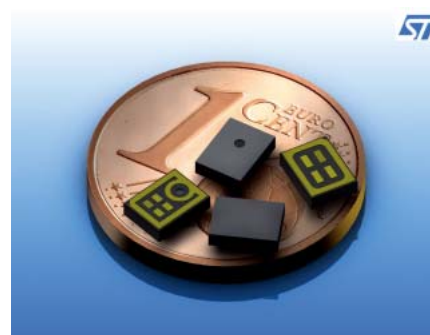
wartości ciśnienia producent podaje w nocie katalogowej).

Zaawansowaną wersją czujnika MPL115A jest nowy w ofercie firmy Freescale sensor MPL3115A, który wyposażono w 20-bitowy przetwornik A/C (zamiast 10-bitowego jak w MPL115A), 32 rejestry FIFO (32-bitowe), a wyniki pomiarów uzyskiwane na wyjściu sensora MPL3115A są mianowane - bez konieczności wykonywania skomplikowanych obliczeń - w Pascalach (w trybie pomiaru ciśnienia) lub metrach (w trybie pomiaru wysokości n.p.m.).

Produkowany przez firmę STMicroelectronics czujnik LPS331AP (jego schemat blokowy pokazano na **rysunku 17**) ma wbudowany 24-bitowy przetwornik A/C oraz przełączany interfejs SPI/I<sup>2</sup>C, dzięki czemu producent zapewnił jego maksymalną elastyczność aplikacyjną. Konceptyjnie czujnik LPS331AP należy do nowej generacji, bowiem gotowe wyniki pomiarów są podawane w rejestrach układu w postaci liczb zakodowanych w U<sub>2</sub>, nie ma więc konieczności wykonywania mniej lub bardziej



Rysunek 19. Schemat blokowy mikrofonu ADMP401



zaawansowanych obliczeń we własnym zakresie.

Kolejnym, dobrze znanym w naszym kraju, producentem czujników ciśnienia MEMS jest firma Bosch Sensortec, produkująca dwa typy sensorów: BMP085 oraz BMP180. Sensor BMP085 jest starszym „bratem” BMP180, charakteryzującym się nieco większymi wymiarami (5×5×1,2 mm vs 3,6×3,8×0,93 mm), dłuższym czasem konwersji (7,5 ms vs 5 ms) i nieco mniejszą dokładnością. Maksymalna częstotliwość taktowania interfejsów komunikacyjnych I<sup>2</sup>C w obydwu sensorach jest taka sama – 3,4 MHz, niemal identyczne są algorytmy przeliczania wyników pomiarów z uwzględnieniem współczynników korygujących na wartości fizyczne (ciśnienie lub wysokość). Schemat aplikacyjny BMP085 pokazano na **rysunku 18**, jest on identyczny z zalecaną aplikacją BMP180.

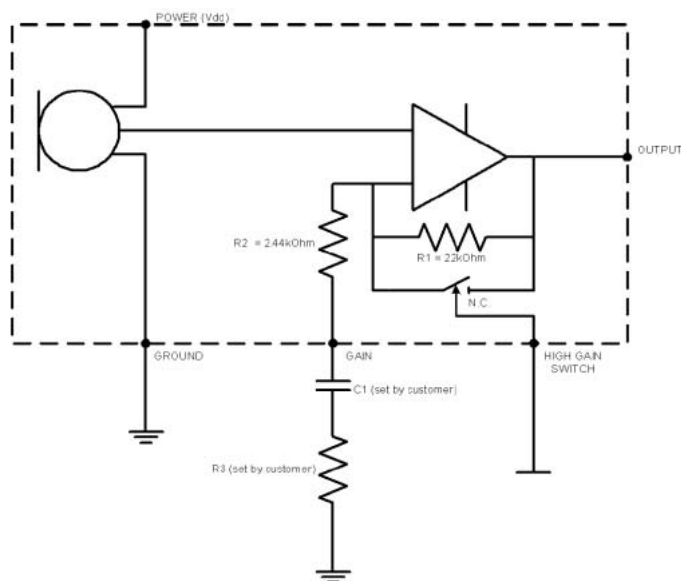
### Półprzewodnikowe mikrofony

Rodzina sensorów o szybko rosnącej popularności są mikrofony MEMS, które są zmodyfikowanymi konstrukcyjnie czujnikami ciśnienia. Modyfikacje miały na celu przede wszystkim poszerzenie pasma czułości do zakresu akustycznego, linearyzację zakresu czułości mikrofonu, a także zapewnienie poziomu czułości zbliżonego do klasycznych mikrofonów. Jako pierwsze do produkcji w kilku producentów trafiły mikrofony

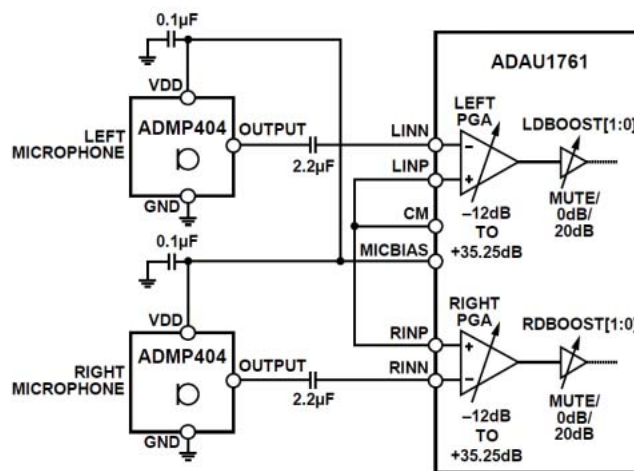


ny analogowe, w których – poza sensorem MEMS – zintegrowano także wzmacniacz audio, którego zadaniem jest maksymalizacja poziomu odstepu sygnału od szumu oraz dopasowanie impedancji mikrofonu do obciążenia. Na **rysunku 19** pokazano schemat blokowy mikrofonu analogowego ADMP401 z oferty firmy Analog Devices, a na **rysunku 20** schemat aplikacyjny dwóch takich mikrofonów dołączonych do kodeka z rodziny SigmaDSP. Podobne rozwiązanie oferuje m.in. firma Epcos, w ofercie której znajduje się mikrofon T4020 SiMic z wyjściem analogowym – jego przekrojącą budowę pokazano na **rysunku 21**. Interesującą ofertę mikrofonów analogowych ma firma Knowles – bezsprzeczny lider tego segmentu rynku – która oferuje także mikrofony analogowe bez wbudowanego wzmacniacza (np. SPA2410LR5H czy SPM0404HE5H), mikrofony z wyjściem symetrycznym (SPM0406HE3H), czy mikrofony zintegrowane ze wzmacniaczami o programowanym wzmocnieniu (jak SPM0407HE3H, którego schemat aplikacyjny pokazano na **rysunku 22**).

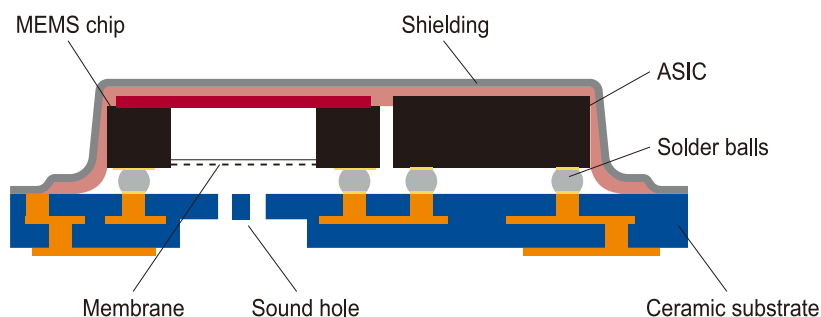
Analogowe mikrofony MEMS są oferowane przez zaledwie kilku znanych producentów, nieco większa ich liczba oferuje mikrofony cyfrowe, w których poza częścią analogową zintegrowano także przetwornik A/C oraz interfejs komunikacyjny – w zależności od modelu – PDM lub I<sup>2</sup>S. Mikrofony tego typu produkuje m.in. STMicroelec-



Rysunek 22. Schemat aplikacyjny mikrofonu SPM-0407HE3H



Rysunek 20. Schemat aplikacyjny dwóch mikrofonów ADMP401



Rysunek 21. Przekrój mikrofonu T4020

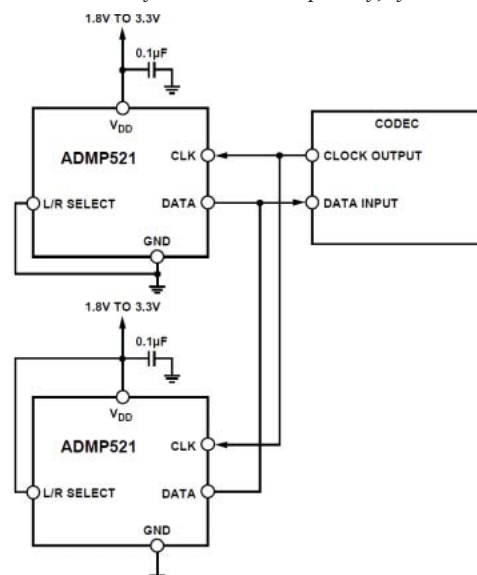
tronics (MP45DT02, MP34Dx01), Wolfson (rodzina TrueMics, np. WM7230x), a także należąca do grupy Bosch firma Akustica (AKU230).

Na **rysunku 23** pokazano schemat toru wejściowego stereofonicznego rejestratora audio z dwoma mikrofonami ADMP541 (Analog Devices), które wyposażono w interfejsy PDM (*Pulse Density Modulation*), a na **rysunku 24** przykład podobnej aplikacji z dwoma mikrofonami ADMP441, które wyposażono w interfejsy komunikacyjne zgodne ze standardem I<sup>2</sup>S.

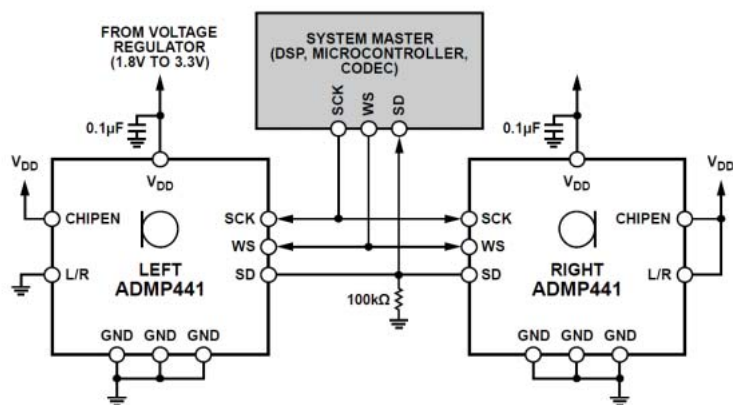
### Czujniki żyroskopowe

Szybko powiększająca się grupą sensorów MEMS są żyroskopy, które w coraz większej liczbie są stosowane m.in. w systemach nawigacyjnych, aplikacjach samochodowych, systemach monitorowania sportowców (także amatorów), robotyce i mechatronice. Obecnie żyroskopy MEMS ma w swojej ofercie większość producentów sensorów MEMS, na przykład:

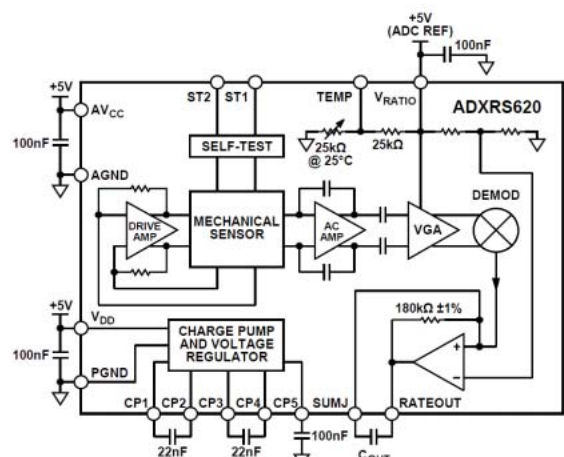
firma Analog Devices, w ofercie której znajduje się 11 typów żyroskopów, których docelowym obszarem aplikacyjnym – ze



Rysunek 23. Schemat stereofonicznego toru wejściowego z dwoma mikrofonami ADMP541

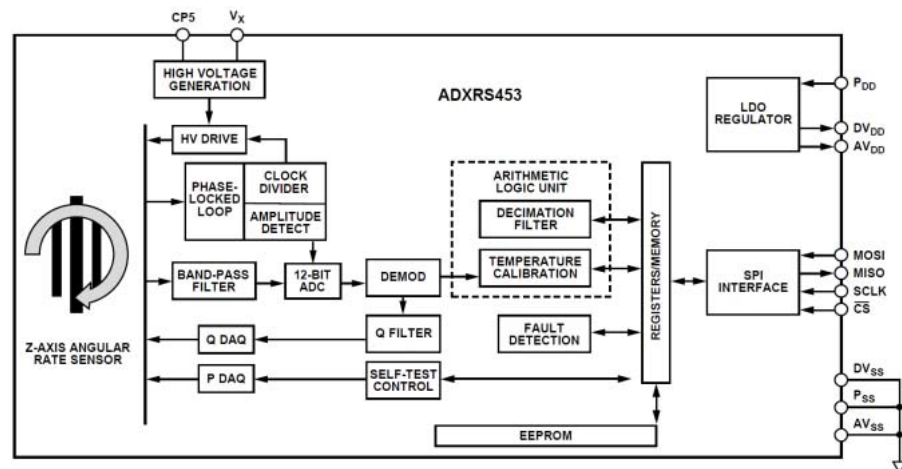


Rysunek 24. Schemat stereofonicznego toru wejściowego z dwoma mikrofonami ADMP441

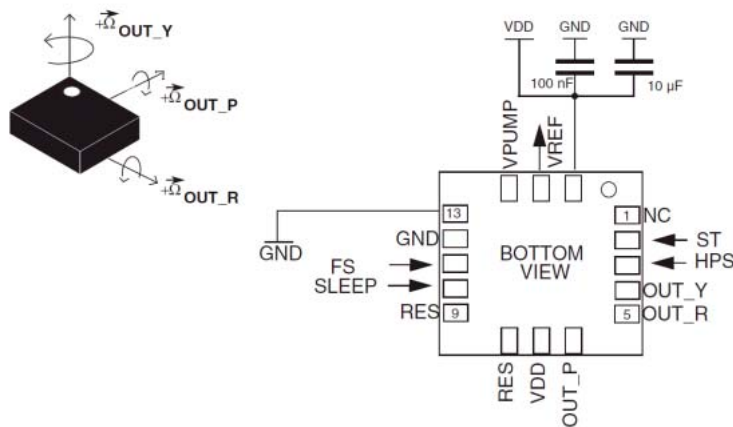


Rysunek 25. Schemat blokowy żyroskopu ADXR620

względem na wysoką dokładność, rozdzielczość, niskie szумы, szerokie pasmo i małą nieliniowość wyników pomiarów, są systemy pomiarowe. W aktualnej ofercie ADI dostępne są wyłącznie żyroskopy jednoosiowe, w wersjach z wyjściami analogowymi (np. ADXR620, schemat blokowy pokazano na rysunku 25) lub cyfrowymi SPI (jak np. ADXR453, schemat blokowy pokazano na rysunku 26).



Rysunek 26. Schemat blokowy żyroskopu ADXR453



Rysunek 27. Schemat aplikacyjny żyroskopu L3G3250A

firmy można znaleźć żyroskopy o dużej odporności na drgania i wibracje, żyroskopy mające skrócony czas startu po włączeniu zasilania (poniżej 3 ms), a także żyroskopy charakteryzujące się innymi cechami niezbędnymi w specyficznych aplikacjach. Ponadto producent oferuje serię wyspecjalizowanych, precyzyjnych żyroskopów *iSensor* (seria ADIS16xxx), wyposażonych (w zależności od typu) m.in. w decymatory wyników, konfigurowalne filtry FIR, konfigurowalne filtry wibracji bazujące na algorytmach Kalmana, struktury MEMS odporne na wysokie przeciążenia i udary itp.

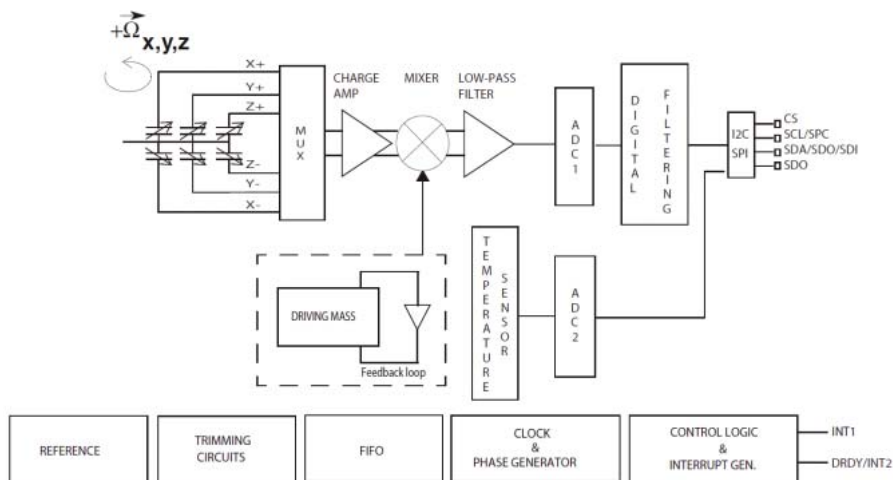
STMicroelectronics, która to firma oferuje 21 typów żyroskopów jedno-, dwu- i trzykierunkowych, wyposażonych w napięciowe wyjścia analogowe (jak na przykład L3G3250A, którego schemat aplikacyjny pokazano na rysunku 27) lub cyfrowe interfejsy komunikacyjne (jak na przykład L3GD20, którego schemat blokowy pokazano na rysunku 28). Żyroskopy z interfejsami cyfrowymi oferowane przez STMicroelectronics są zazwyczaj wyposażane w podwójny, przełączany interfejs komunikacyjny SPI/I<sup>2</sup>C, co zwiększa elastyczność aplikacyjną tych zespołów.

firma Invensense, w której aktualnej ofercie znajdują się scalone systemy z żyroskopami MEMS 2- oraz 3-osiowymi, wyposażone w interfejsy I<sup>2</sup>C lub I<sup>2</sup>C z alternatywnie włączanym SPI (MPU-3300, MPU-6000 lub MPU-6500). Elementy produkowane przez Invensense rozmyślnie zostały nazwane „systemami z żyroskopami”, bowiem każdy z produkowanych obecnie sensorów jest konfigurowalnym procesorem ruchu, wyposażonym w koprocesor *Digital Motion Processor* obsługujący – w zależności od typu sensora – także zewnętrzne sensory MEMS, jak na przykład akcelerometry lub czujniki kompasowe (przykład takiej aplikacji żyroskopu MPU-3000 lub MPU-3500 pokazano na rysunku 29). Procesor DMP upraszcza implementację algorytmów sterowania ruchem (np. stabilizacji ruchu pojazdów i urządzeń latających), rozpoznawanie gestów, minimalizację wpływu drgań ręki użytkownika na jakość pracy elektronicznego kompasu, detekcję charakterystycznych elementów ruchu (jak np. kroki) itp.

Rozwiązania podobne do przedstawionych oferują także nieco mniej znane w Polsce firmy, w tym m.in.: Epson, Melexis i Murata (właściwie fińska firma VTI przejęta przez Muratę), ale pominiemy je w artykule ze względu na niewielką dostępność tych elementów w naszym kraju.

### Czujniki wielofunkcyjne

Czujniki przedstawione dotychczas w artykule charakteryzowały się określoną przez producenta pojedynczą funkcjonalnością, tymczasem na rynku pojawia się coraz



Rysunek 28. Schemat aplikacyjny żyroskopu L3GD20

większa liczba sensorów zintegrowanych, nazywanych przez producentów sensorami 6DoF lub coraz częściej 9DoF, a nawet 10DoF (DoF – Degrees of Freedom). Oznacza to, że w jednej obudowie są montowane 2, 3 lub 4 sensory MEMS (3-osiowe: akcelerometr, żyroskop i czujnik pól magnetycznych oraz – w niektórych modelach – także czujnik ciśnienia), co powoduje że w niewielkiej obudowie można zmieścić zaawan-

sowany pod względem możliwości funkcjonalnych system sensorowy. Funkcjonalne odpowiedniki czujników wielofunkcyjnych można oczywiście samodzielnie poskładać z pojedynczych sensorów MEMS, ale wymiary takiej realizacji oraz pobór mocy nie zawsze będą odpowiadały wymaganiom aplikacji mobilnych.

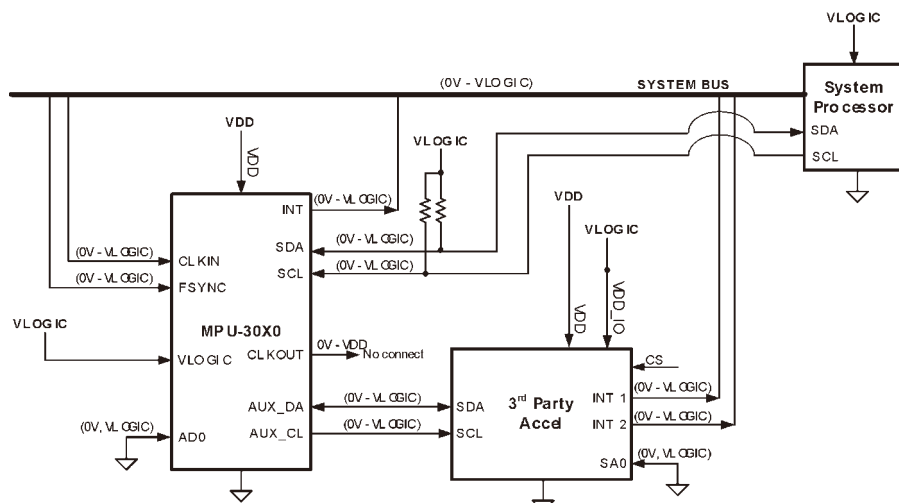
Przykładem rozwiązania zintegrowanego sensora wielofunkcyjnego jest pro-



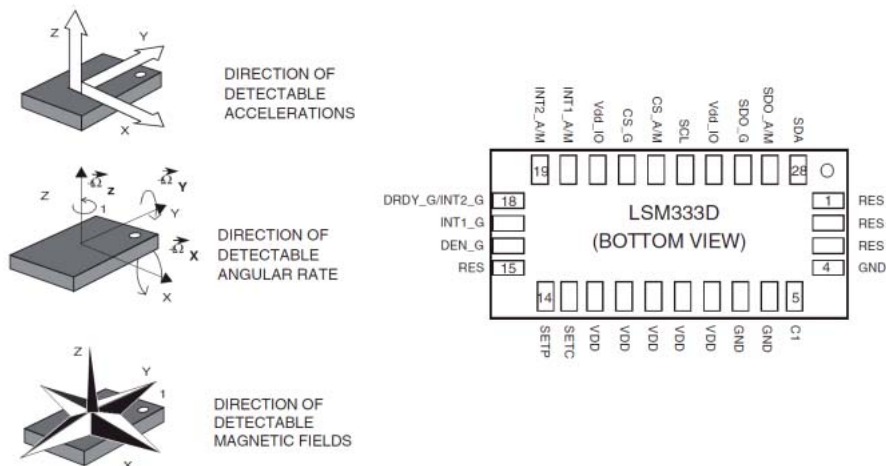
dukowany przez STMicroelectronics sensor 9DoF o nazwie LSM333D oraz inne z serii LSM3xx, które integrują trzy czujniki 3D: kompasowy, akcelerometr oraz żyroskop, wszystko umieszczone w obudowie o wymiarach 4×4×1 mm. Na rysunku 30 pokazano uproszczony widok obudowy tego sensora i kierunki/osie jego czułości.

Nieco prostszy czujnik wielofunkcyjny - BMI055 - oferuje firma Bosch Sensortec (fotografia 31). Zintegrowano w nim 3-osiowe: 12-bitowy akcelerometr oraz 16-bitowy żyroskop, co łącznie daje 6 stopni swobody w obudowie o wymiarach 3×4,5×0,95 mm. Czujnik wyposażono w przełączany interfejs komunikacyjny I<sup>2</sup>C/SPI, korzystanie z niego ułatwiają biblioteki o nazwie Bosch Sensortec's 9°-of-freedom BSX2.0 Fusion-Lib.

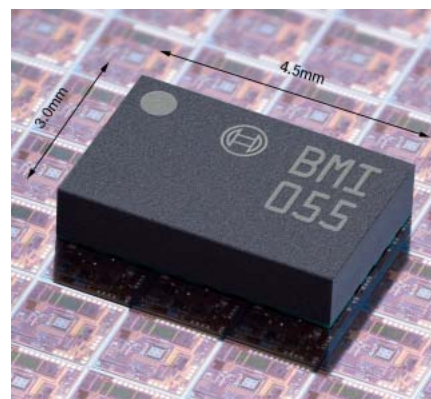
Sensor 9DoF znajduje się w ofercie wspomnianej wcześniej firmy InvenSense, która oferuje zintegrowany procesor ruchu o nazwie MPU-9150 (fotografia 32), w którym – poza 3-osiowymi: żyroskopem, kompasem i akcelerometrem – zastosowano także koprocesor DMP, który wykonuje ob-



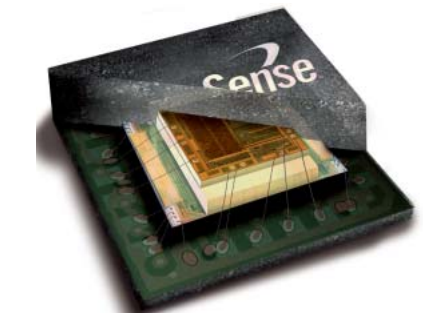
Rysunek 29. Aplikacja żyroskopu MPU-3000 lub MPU-3500



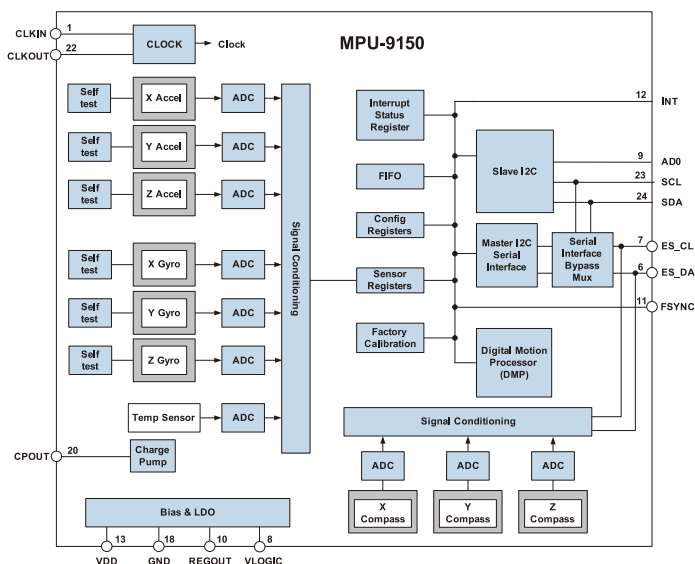
Rysunek 30. Widok obudowy LSM333D i osie jego czułości



Fotografia 31. Czujnik wielofunkcyjny BMI055



Fotografia 32. Czujnik ze zintegrowanym procesorem MPU-9150



Rysunek 33. Schemat blokowy czujnika MPU-9150

liczenia i analizy wartości zmierzonych parametrów, upraszczając implementację sensora w realnych aplikacjach, wymagających filtracji gromadzonych danych. Schemat blokowy tego układu pokazano na **rysunku 33**. Podobnie do opisanych wcześniej żyroskopów produkowanych przez Invensys, także MPU-9150 może samodzielnie współpracować z zewnętrznymi sensorami MEMS wyposażonymi w interfejs I2C, do czego służy drugi sprzętowy interfejs I2C wbudowany w sensor.

Jeszcze bardziej zaawansowane funkcjonalnie i pod względem parametrów czujniki wielofunkcyjne produkuje firma Analog Devices w ramach rodziny IMU (*Inertial Measurement Modules*), elementy te noszą oznaczenia ADIS164xx/ADIS163xx, wygląd jednego z reprezentantów tej serii – ADIS16480 będący elementem 10DoF (z wbudowanym czujnikiem ciśnienia) - pokazano na **fotografii 34**.

### Podsumowanie

W krótkim przeglądzie starałem się zrobić „zdjęcie” aktualnej na jesieni 2012 roku sytuacji na rynku czujników MEMS. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca nie jest to kompletny przegląd typów dostępnych podzespołów pochodzących od różnych producentów, naszym celem było przede wszystkim pokazanie rozwiązań kreujących lub stanowiących obecnie standardy lub najważniejsze nurty dalszego rozwoju tego segmentu rynku. Wkrótce wrócimy do tego tematu, bowiem zapowiedzi nadchodzących nowości są niezwykle obiecujące, na pewno będzie już niedługo o czym pisać i co stosować we własnych opracowaniach.

Piotr Zbysiński, EP



Fotografia 34. Czujnik wielofunkcyjny ADIS16480

Committed to excellence

electronica 2012  
inside tomorrow  
Visit us from 13 to 16 November 2012  
hall A5 – booth 159 & 260

**RENESAS**

Performance. Built in.  
Rutronik and Renesas

**32 Bit MCU-serie – RX63X**

- 165DMIPS operation with DSP functions
- Floating Point Unit
- 100 MHz, zero wait-states code execution
- Dataflash with 100K E/W-cycles
- Up to 2 MB Flash on-chip
- USB, CAN, Ethernet
- TFT Direct Drive

**RUTRONIK**  
ELECTRONICS WORLDWIDE

■ Consult ■ Components ■ Logistics ■ Support  
 Tel: +48 32 4 61 2000 www.rutronik.com