



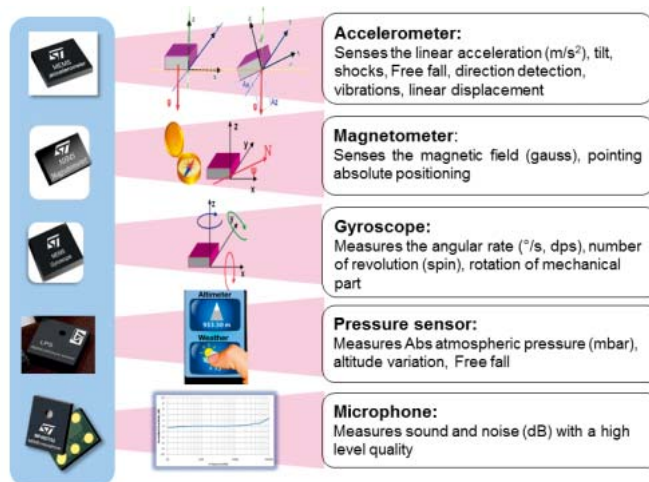
# Sensory MEMS

## w ofercie STMicroelectronics – przegląd oferty

*MEMS-y rewolucyjnie zmieniły nasz świat, umożliwiając ogromnej liczbie otaczających nas urządzeń „samodzielnie” orientować się w przestrzeni. Sensory bazujące na technologii MEMS są stosowane zarówno we współczesnych pojazdach, systemach nawigacyjnych, budownictwie, sprzęcie AGD i RTV, jak i konsolach dla graczy, robotyce, automatyce, smartfonach czy zegarkach naręcznych. STMicroelectronics jest firmą, która jako jedna z pierwszych zauważyła możliwości oferowane przez technologię MEMS i wykorzystała je w praktyce, dzięki czemu dziś jest liderem rynku sensorów tego typu.*

Oferta produkcyjna firmy STMicroelectronics w zakresie sensorów MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) należy do jednej z najbardziej kompleksowych, pośród dostępnych na rynku. Obecnie jedynie ta firma oferuje zarówno wielosiowe akcelerometry i żyroskopy, cyfrowe sensory pola magnetycznego (elektroniczne kompasy), czujniki ciśnienia oraz mikrofony do aplikacji audio – wszystkie wykonane w technologii MEMS. Atutami sensorów MEMS oferowanych przez STMicroelectronics są także ich łatwa dostępność w naszym kraju oraz niskie ceny, które umożliwiają stosowanie tych elementów także w projektach niskobudżetowych.

W artykule przedstawiamy przegląd cech i możliwości wybranych sensorów MEMS produkowanych przez STMicroelectronics (ry-



Rysunek 1. Zestawienie grup sensorów MEMS produkowanych przez STMicroelectronics

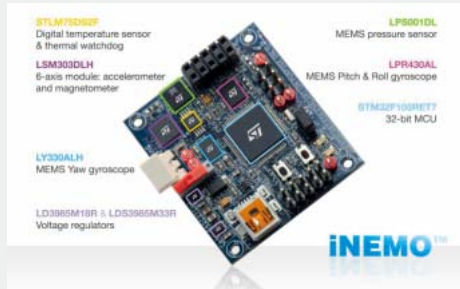
sunek 1), który pozwoli się naszym Czytelnikom szybko i wygodnie zorientować jak je dobierać do własnych aplikacji.

### Akcelerometry

Akcelerometry są największą, najdłużej produkowaną i najpopularniejszą – głównie dzięki uniwersalności funkcjonalnej - grupą sensorów oferowanych przez STMicroelectronics. Producent oferuje obecnie 22 typy sensorów 3D, wyposażonych w wyjścia analogowe lub zintegrowane z przetwornikiem A/C, który komunikuje się

### Programowy filtr Kalmana dla klientów STMicroelectronics

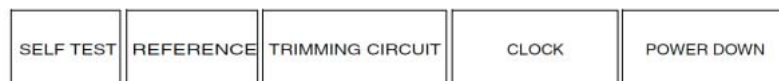
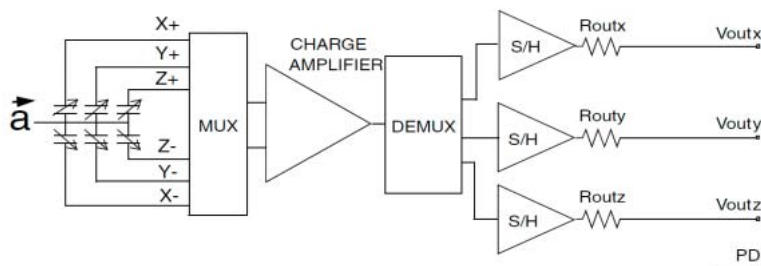
Inżynierowie firmy STMicroelectronics wraz z poszerzeniem oferty czujników MEMS opracowali biblioteki programowe realizujące funkcję filtra Kalmana, ułatwiające stosowanie sensorów w praktycznych aplikacjach. Dzięki temu oferowane przez ST żyroskopy i czujniki przyspieszenia można dość łatwo wykorzystać w aplikacjach sterujących realnymi, złożonymi obiektami dynamicznymi (jak na przykład quadcoptery), co bez zastosowania tak zaawansowanej filtracji praktycznie nie gwarantowało sukcesu.



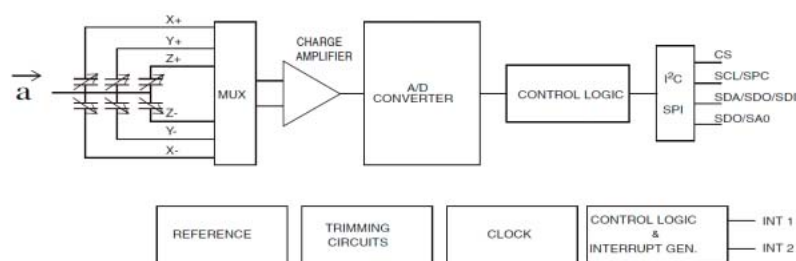
### Zestaw iNEMO (STEVAL-MKI062V2)

Dostępne są (niezbędna wcześniejsza rejestracja pod adresem <http://goo.gl/YmMSZD>) bezpłatnie biblioteka iNEMO Engine Lite umożliwia obsłużenie zarówno wieloosiowych czujników przyspieszenia jak i czujników geomagnetycznych, minimalizując wpływy zakłóceń odczytów wynikających z jakości otoczenia na uzyskane wyniki. Wersja Lite bibliotek jest udostępniana przez producenta w wersji źródłowej dla mikrokontrolerów STM32. Jest ona użyta m.in. w zestawie ewaluacyjnym iNEMO (STEVAL-MKI062V2). W wyniku obliczeń wykonywanych przez bibliotekę iNEMO Engine Lite programista uzyskuje „czyste” (po programowej filtracji Kalmana) informacje o wartości kwaternionów (obiekty matematyczne, które służą do reprezentowania rotacji i orientacji w przestrzeni 3D), wykrywane są rotacje i obliczane ich prędkości, obliczane jest także przyspieszenie liniowe, z którym porusza się czujnik. W wersji Lite biblioteka obsługuje czujniki z częstotliwością do 100 Hz, a jej implementacja w mikrokontrolerze STM32 wymaga 7 kB pamięci Flash i 5 kB pamięci SRAM.

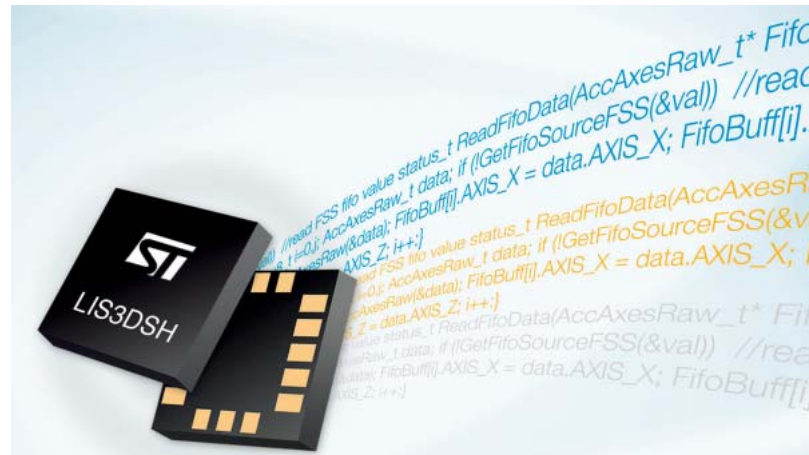
z otoczeniem za pomocą interfejsu I<sup>2</sup>C lub SPI. Dostępne są sensory o zakresach pomiarowych od  $\pm 2g$  aż do  $\pm 400g$ , co pozwala dobrać element odpowiedni dla aplikacji w taki sposób, aby uzyskać maksymalną rozdzielczość i czułość pomiaru. Akcelerometry z wbudowa-



Rysunek 2. Schemat blokowy 3-osiowego sensora LIS332AR, wyposażonego w trzy napięciowe wyjścia analogowe



Rysunek 3. Schemat blokowy 3-osiowego sensora z wbudowanym przetwornikiem A/C (H3LIS331DL), wyposażonym w przełączany interfejs komunikacyjny SPI/I<sup>2</sup>C



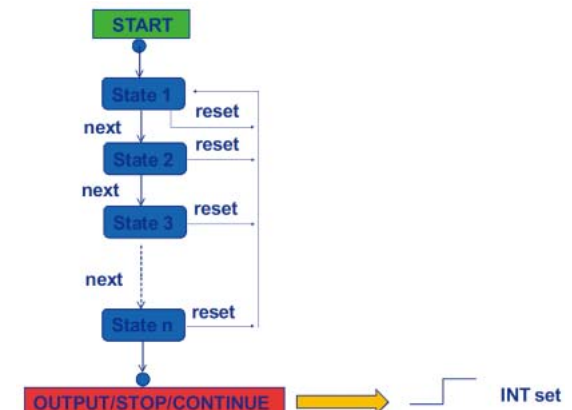
nymi przetwornikami A/C zapewniają rozdzielczość od 8 do 16 bitów, w zależności od typu dane z toru konwersji mogą być buforowane w FIFO lub nie.

Na **rysunku 2** pokazano schemat blokowy akcelerometru z trzema wyjściami analogowymi LIS332AR, a na **rysunku 3** schemat blokowy akcelerometru zintegrowanego z 16-bitowym przetwornikiem A/C H3LIS331DL (sensor o maksymalnym zakresie pomiarowym  $\pm 400g$ ), który jest dostępny dla zewnętrznego mikrokontrolera poprzez interfejs I<sup>2</sup>C lub SPI (użytkownik może wybrać tryb jego pracy).

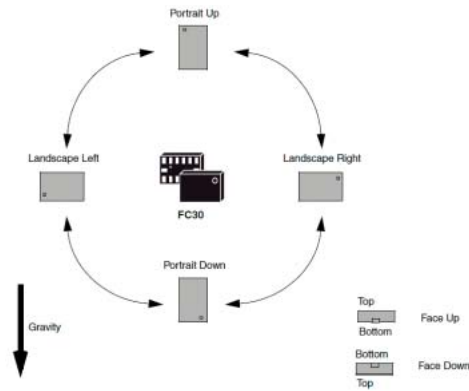
Akcelerometry oferowane przez STMicroelectronics ewoluują, przy czym szczególnie łatwe do zauważenia są trzy trendy:

- zmniejszanie wymiarów obudowy – najnowsza generacja (LIS2) ma wymiary 2 mm×2 mm×1 mm, uchodząca do niedawna za ultra miniaturową poprzednia generacja (LIS3xxx) ma wymiary 3 mm×3 mm×1 mm,
- zmniejszania poboru mocy w trybach realizacji pomiaru, czego przykładami może być m.in.: akcelerometr z 12-bitowym przetwornikiem LIS3DH pobierający zaledwie 2  $\mu A$  podczas realizacji pomiarów z częstotliwością 1 Hz i 11  $\mu A$  podczas realizacji pomiarów z częstotliwością 50 Hz,
- zwiększania możliwości funkcjonalnych sensorów, co polega na

integracji w ich logice programowalnych detektorów podwójnego puknięcia, wykrywania ruchu, wbudowywania czujnika temperatury, czy też integracji w strukturach akcelerometrów programowalnych maszyn stanów (jak np. w LIS3DSH), które można wykorzystać do generowania przerwań sprzętowych na bazie sekwencji wydarzeń zdefiniowanych przez użytkownika (graf przejść takiego automatu pokazano na **rysunku 4**).



Rysunek 4. Graf przejść programowalnego automatu zintegrowanego w akcelerometrze LIS3DSH, który można wykorzystać do generacji przerwań w przypadku wystąpienia zadanej sekwencji wydarzeń



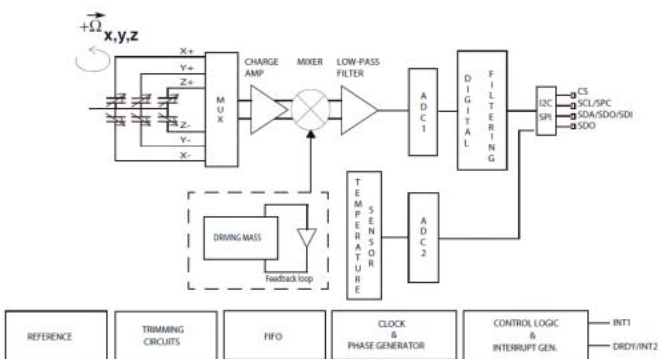
Rysunek 5. Sposób działania sensora położenia FC30



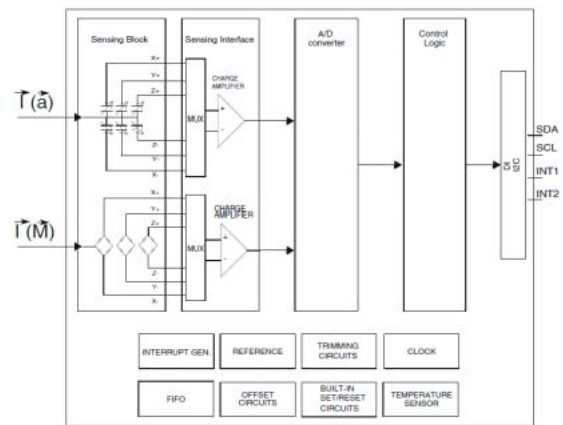
Osobliwym przypadkiem w rodzinie akcelerometrów oferowanych przez STMicroelectronics jest 3-osiowy sensor FC30, który wykrywa swoje położenie względem powierzchni Ziemi dwustanowo w każdej osi (6 pozycji) jak pokazano na **rysunku 5**. Sposób działania tego sensora predestynuje go m.in. do sterowania wyświetlaniem obrazu na wyświetlaczu LCD w urządzeniach mobilnych oraz innych aplikacjach, w których ma znaczenie jednoznaczne określenie położenia obiektu względem powierzchni Ziemi bez konieczności wykonywania obliczeń. Prezentowany element można wykorzystać także do wykrywania podwójnych puknięć, co zwiększa funkcjonalność docelowego urządzenia bez konieczności aplikowania dodatkowych układów logicznych lub mikrokontrolera.

### Żyroskopy

Firma STMicroelectronics szybko rozwinęła rodzinę produkowanych przez siebie żyroskopów MEMS, obecnie liczy ona 21 typów sensorów, zarówno 1-/2- jak i 3-osiowych. Producent oferuje żyroskopy o zakresach pomiarowych od  $\pm 30^\circ/s$  do  $\pm 2000^\circ/s$ , w zależności od typu mogą być wyposażone w wyjścia analogowe lub mają zintegrowane „pokładowe” przetworniki A/C. Tak wyposażone żyroskopy



Rysunek 6. Schemat blokowy 3-osiowego żyroskopu L3GD20



Rysunek 7. Schemat blokowy czujnika kompasowego zintegrowanego z akcelerometrem (oba 3D) - LSM303DLHC

oferują rozdzielczość konwersji każdego kanału wynoszącą 16 bitów, podobnie do wcześniej przedstawionych akcelerometrów dostęp do danych można uzyskać za pomocą interfejsu I<sup>2</sup>C lub SPI (do wyboru, w zależności od preferencji użytkownika – **rysunek 6**).

Tendencje rozwojowe w rodzinie żyroskopów oferowanych przez STMicroelectronics są podobne do wspomnianych przy okazji akcelerometrów: zmniejszane są ich wymiary (domyślny trend to wymiary 4×4×1 mm oraz 3×3×1 mm), zwiększa się także liczba funkcji pomocniczych zintegrowanych w obudowach sensorów (jak na przykład czujnik temperatury, konfigurowalny bufor FIFO dla danych), a także minimalizacja poboru energii – zarówno poprzez zabiegi technologiczne zmniejszające prądy upływu jak i rozwiązania układowe zmniejszające pobór prądu podczas normalnej pracy sensora.

### e-kompasy

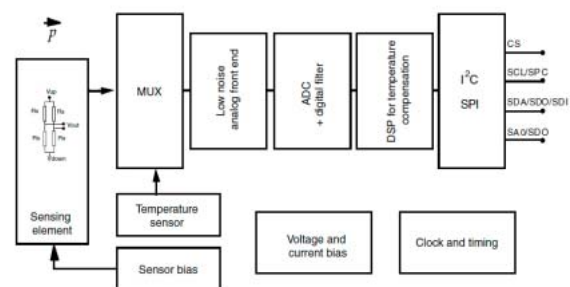
W skład rodziny kompasowych czujników MEMS oferowanych przez STMicroelectronics wchodzi obecnie dwa rodzaje elementów:

- 3-osiowe czujniki pola magnetycznego zintegrowane z 3-osiowymi akcelerometrami – tworzące rodzinę LSM303xxx, charakteryzujące się zakresem pomiarowym pola magnetycznego od  $\pm 1,3$  do  $\pm 16$  Gs i zakresem pomiaru przyspieszenia od  $\pm 2$  g do  $\pm 16$  g, w zależności od typu sensora. Schemat blokowy czujnika tego typu (LSM303DLHC) pokazano na **rysunku 7**.
- 3-osiowy czujnik pola magnetycznego bez żadnych dodatkowych funkcji, czego przykładem jest jedyny w ofercie STMicroelectronics sensor tego typu oznaczony symbolem LIS3MDL.

Wszystkie prezentowane czujniki kompasowe mają cyfrowy interfejs SPI/I<sup>2</sup>C lub wyłącznie I<sup>2</sup>C (LSM303DLHC), są oferowane w ultra miniaturowych obudowach o wymiarach 2×2×1 mm (LIS3MDL oraz LSM303C), 3×3×1 mm (LSM303D) lub 3×5×1 mm (LSM303DLHC). Rozdzielczość konwersji wyników pomiarów wynosi do 16 bitów.

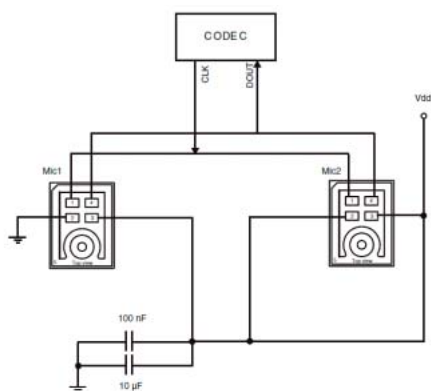
### Czujniki ciśnienia

gorącą nowością w ofercie STMicroelectronics są MEMS-owe czujniki ciśnienia. Obecnie produkowany jest jeden typ takiego sensora – LPS331 – pozwalający dokonywać pomiarów ciśnienia powie-

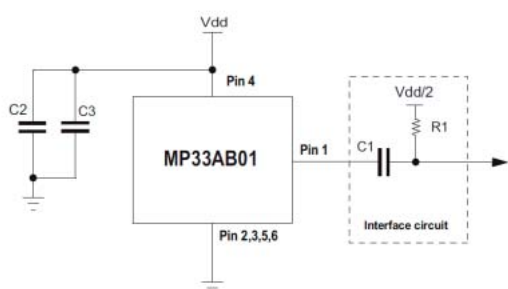


Rysunek 8. Schemat blokowy czujnika ciśnienia LPS331AP





Rysunek 9. Mikrofony z wyjściami cyfrowymi mogą pracować w konfiguracjach stereofonicznych



Rysunek 10. Schemat aplikacyjny analogowego mikrofonu MEMS

trza w zakresie 260-1260 mbar z maksymalną rozdzielczością 24 bitów (co daje wartość kwantu 20  $\mu$ bar).

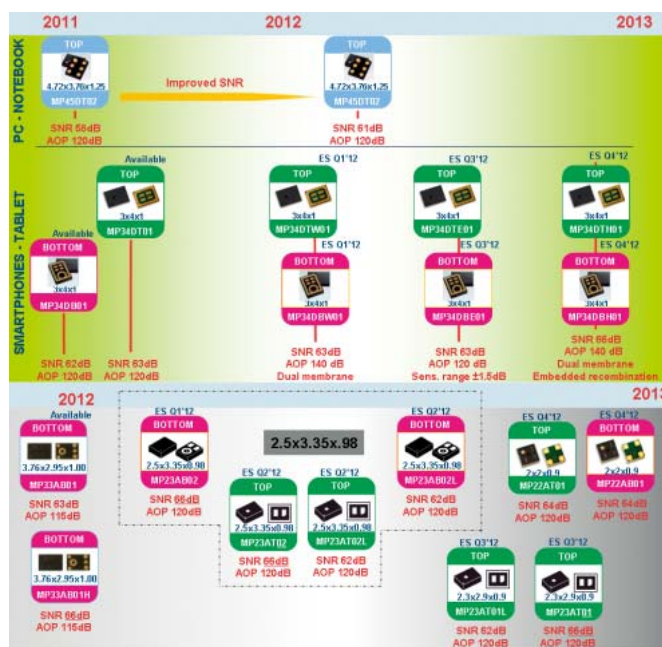
Schemat blokowy ilustrujący budowę LPS331 pokazano na **rysunku 8**. Jak widać jest to układ zaawansowany konstrukcyjnie, bowiem wynik odczytywany poprzez interfejs SPI/I<sup>2</sup>C jest poddawany obróbce obliczeniowej, w skład której wchodzi nie tylko eliminacja błędów wynikających z warunków pomiarów, ale także składowa temperatury, która wpływa na parametry mostka pomiarowego Wheatstone'a. Maksymalna częstotliwość odczytu danych wynosi 25 Hz, a płytka czujnikowa jest w stanie wytrzymać przeciążenia ciśnieniowe o wartości do 20-krotności zakresu pomiarowego. Wymiary obudowy LPS331AP wynoszą 3×3×1 mm, pobór prądu w trybie o niskiej rozdzielczości konwersji (kwant pomiaru 160  $\mu$ bar) przy częstotliwości powtarzania pomiarów 1 Hz wynosi zaledwie 5,5  $\mu$ A.

Producent planuje wdrożenie w najbliższym czasie drugiego sensora oznaczonego symbolem LPS25H, którego parametry i cechy funkcjonalne są bardzo podobne do LPS331AP, ale wymiary mniejsze: wynoszą zaledwie 2,5×2,5×1 mm.

## Mikrofony

Wykorzystując opracowane przez siebie zaawansowane technologie MEMS producent wdrożył do produkcji rodzinę mikrofonów dla aplikacji audio, w której są dostępne elementy z wyjściem analogowym (napięciowym) lub cyfrowym (PDM). Mikrofony z wyjściami cyfrowymi (np. MP34Dx01 lub MP45DT02) mogą pracować w konfiguracji stereofonicznej (**rysunek 9**), mikrofony z wyjściami analogowymi są aplikacyjnymi odpowiednikami mikrofonów pojemnościowych zintegrowanych z przedwzmacniaczami (**rysunek 10**).

Charakterystyki częstotliwościowe mikrofonów zależą od typu: są dostępne modele o paśmie analogowym od 100 Hz do 10 kHz (MP33AB01) oraz od 20 Hz do 20 kHz (MP34DT01/DB01) i czułości od -38 dB<sub>FS</sub> do -26 -38 dB<sub>FS</sub>. W standardowej ofercie są dostępne mikrofony z otworami powietrznymi od spodu obudowy (*bottom port*) lub w jej górnej części (*top port*), co znajduje odzwierciedlenie w środkowej części oznaczenia typu (np. MP34DT oznacza mikrofon MEMS w obudowie 3×4 mm, z wyjściem cyfrowym i otworem od góry).



Rysunek 11. Przegląd mikrofonów MEMS firmy STMicroelectronics i planowanych wdrożeń (górna część rysunku - mikrofony cyfrowe, dolna - mikrofony analogowe)

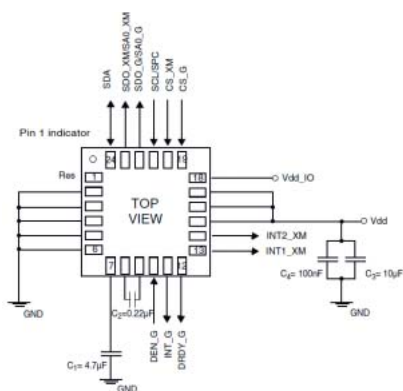
Producent w szybkim tempie rozwija rodziny mikrofonów MEMS, opracowując szereg rozwiązań poprawiających ich parametry: szerokość pasma, liniowość charakterystyki przenoszenia, wymiary obudowy, zmniejszenie poboru mocy, wartość odstępu sygnału od szumu, poziom przesterowania sygnałem akustycznym AOP (*Acoustic Overload Point*), na **rysunku 11** pokazano planowane przez STMicroelectronics w najbliższym czasie wdrożenia w tym zakresie.

## Czujniki zintegrowane

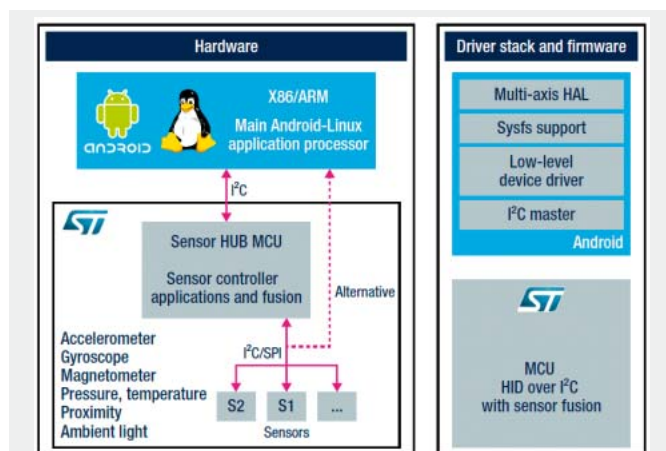
Firma STMicroelectronics dostrzegając konieczność zwiększania integracji sensorów MEMS wprowadziła do produkcji układy z serii iNEMO z serii LSM330, w których zintegrowano struktury akcelerometru LIS3DH oraz żyroskopu L3GD20, które umieszczono w trzech typach obudów LGA o wymiarach 3,5 mm×3 mm×1 mm (LSM330), 3 mm×5,5 mm×1 mm (LSM330D) oraz 4 mm×5 mm×1,1 mm (LSM330DLC).

Zaawansowaną alternatywą dla sensorów LSM330 jest nowy w ofercie producenta zintegrowany sensor 9DoF (*degrees of freedom*), o nazwie LSM9DS0, składający się z trzech sensorów MEMS 3D:

- akcelerometru,
- czujnika pola magnetycznego,
- żyroskopu.



Rysunek 12. Schemat aplikacyjny nowego sensora 9DoF z oferty STMicroelectronics - LSM9DS0



Producent sensorów prezentowanych w artykule nie zostawił konstruktorów sam-na-sam z problemami związanymi z obróbką uzyskanych danych. Przygotował zarówno wspomniane wcześniej biblioteki z filtrem Kalmana, aplikację umożliwiającą rejestrację danych na komputerze poprzez wirtualny port COM, dostępne są także kompletne sterowniki dla Windows 8 oraz Androida/Linuksa, co pozwala na łatwą i szybką integrację czujników w komputerach bazujących na tych systemach operacyjnych.



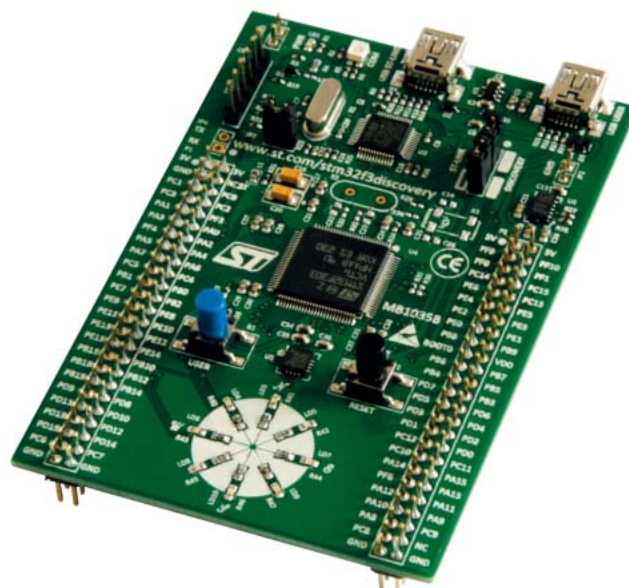
Fotografia 13. Wygląd zestawu STEVAL-MKI119V1

Nowy sensor ma zintegrowany 16-bitowy przetwornik A/C, komunikujący się z otoczeniem za pomocą interfejsu I²C lub SPI, wspomaganego przez wyjścia przerwań. Dane przetwarzane w torze A/C mogą przesyłane za pomocą 32-poziomowego bufora FIFO.

Podstawowy schemat aplikacyjny sensora LSM9DS0 pokazano na rysunku 12.

### Zestawy ewaluacyjne z sensorami MEMS

Z myślą o konstruktorach lubiących samodzielnie zweryfikować katalogowe obietnice, producent sensorów prezentowanych w artykule przygotował zestawy narzędziowe i ewaluacyjne, pozwalające szybko rozpocząć własne badania. Przykładem takiego jest bazujący na mikrokontrolerze z rodziny STM32 zestaw STEVAL-MKI119V1 (foto-



Fotografia 14. Wygląd zestawu STM32F3DISCOVERY, w którym zastosowano dwa sensory MEMS: żyroskop L3GD20 oraz kompas z akcelerometrami LSM303DLHC

grafia 13), w którym zastosowano dwa sensory tworzące zespół 9DoF: żyroskop L3GD20 oraz kompas z akcelerometrami LSM303DLHC.

Interesującym – zarówno ze względu na możliwości, jak i cenę – jest zestaw STM32F3DISCOVERY (fotografia 14), w którym zastosowano mikrokontroler z rodziny STM32F3 (rdzeń Cortex-M4F) i sensory MEMS: LSM303DLHC i L3GD20, podobnie jak w zestawie STEVAL-MKI119V1.

Producent przygotował także zestawy dla konstruktorów zainteresowanych mikrofonami MEMS: STEVAL-MKI116V1 (z MP34DB01), STEVAL-MKI117V1 (z MP34DT01), STEVAL-MKI117V2 (z MP45DT02), dla których interesującą alternatywą jest STM32F4DISCOVERY (fotografia 15) z mikrofonem MP45DT02.

### Podsumowanie

Co do tego, że współczesna elektronika bez sensorów MEMS funkcjonować nie może, nie mają żadnych wątpliwości nie tylko elektronicy, ale także szerokie rzesze użytkowników systemów nawigacyjnych, smartfonów, tabletów, notebooków, pralek, lodówek i wielu innych urządzeń powszechnego użytku. Łatwy do zaobserwowania trend integracji funkcjonalnej sensorów, szybkiej poprawy ich parametrów, a także coraz niższe ceny, umożliwiają ich stosowanie w coraz bardziej banalnych aplikacjach, które jeszcze kilkanaście lat temu nie istniały lub ich funkcjonalność była znacząco słabsza niż obecnie. Precyzyjne MEMS-y cierpliwie zdobywają nowe obszary aplikacyjne, zapewniając wygodę, komfort i bezpieczeństwo. O tym co będziemy mogli za ich pomocą robić w przyszłości decyduje wyłącznie wyobraźnia konstruktorów, a tej – na szczęście – nie brakuje!

Piotr Zbysiński, EP



Fotografia 15. Wygląd zestawu STM32F4DISCOVERY z mikrofonem MP45DT02