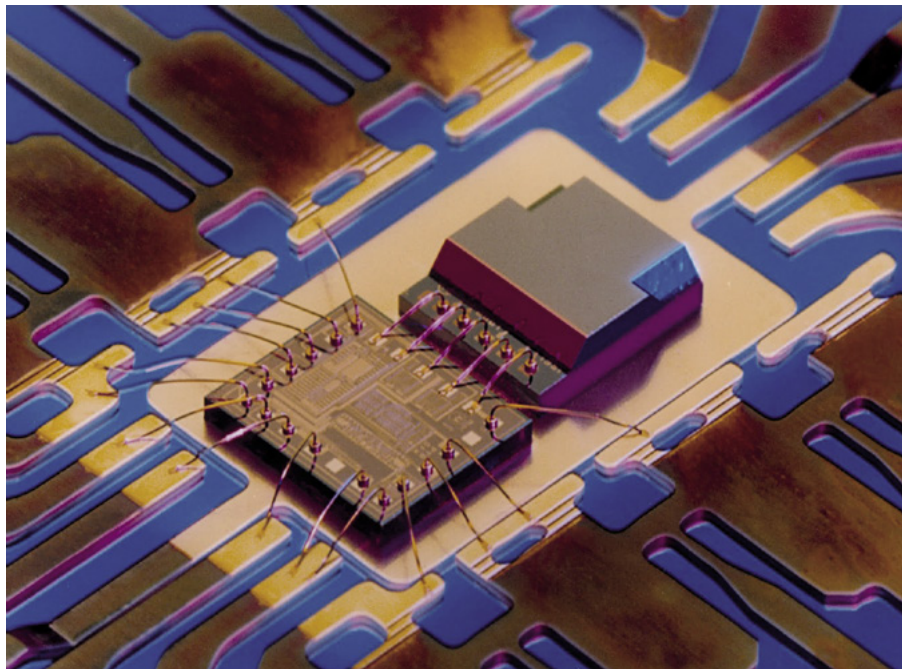


Sensory i przetworniki MEMS – przegląd rozwiązań rynkowych (1)

Podzespoły produkowane w technologii MEMS prezentujemy na łamach EP od kilku lat, uważnie monitorując zmiany zachodzące na rynku. W ostatnich kilkunastu miesiącach nastąpił „wysyp” nowych rodzajów sensorów i przetworników MEMS, dostępnych obecnie „z półki”, których możliwości funkcjonalne - jeszcze do niedawna - należałoby zakwalifikować do kategorii science-fiction.

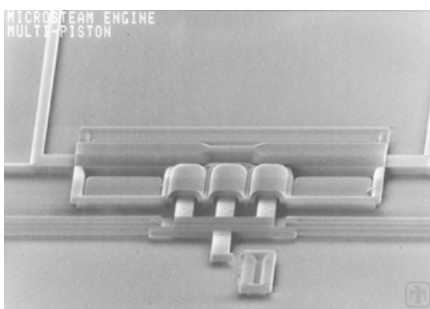
Niewielu użytkowników tabletów, smartfonów lub innego sprzętu przenośnego zdaje sobie sprawę z tego, jak duża część komfortu korzystania z tego sprzętu wynika z zastosowania w nim podzespołów MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), których zasadę działania lepiej wyjaśniają prawa mechaniki niż bliskie sercom większości Czytelników EP prawa Kirchoffa czy też prawo Ohma. Zaawansowanie współczesnych technologii obróbki materiałów półprzewodnikowych pozwala na wykonywanie w skali nano- i mikrometrowej elementów o dowolnych kształtach, dzięki czemu przenieść w świat „mikro” m.in. silniki parowe (na **fotografii 1** pokazano widok 3-cylindrowego silnika parowego), czy też różnego rodzaju przekładnie (przykład konwertera ruchu obrotowego na liniowy pokazano na **fotografii 2**). Na maso-



wą skalę technologia MEMS jest stosowana do produkcji czujników przyspieszenia (jedno- i wieloosiowych akcelerometrów), które są powszechnie stosowane między innymi w sterownikach poduszek gazowych i napinaczach pasów bezpieczeństwa używanych w samochodach, a także w aparatach fotograficznych i kamerach, gdzie odpowiadają za stabilizację obrazu. Akcelerometry są stosowane także w dyskach twardech, w których służą do wykrywania upadku lub silnych

wstrząsów, co umożliwia ochronę przechowywanych na dysku danych. Niektórzy producenci oferują czujniki położenia bazujące na czujnikach przyspieszenia MEMS, wykorzystywane m.in. w telefonach komórkowych, przenośnych odtwarzaczach audio i wideo oraz innych urządzeniach z wyświetlaczami, w których orientacja wyświetlanego obrazu jest zależna od położenia urządzenia względem powierzchni Ziemi.

Urządzenia przenośne (w tym odbiorniki GPS) są także popularnym obszarem aplikacyjnym dla MEMS-owych czujników pola magnetycznego i żyroskopów, które we współpracy z akcelerometrami wspomagają działanie wielu aplikacji, zarówno profesjonalnych jak i gier. Coraz częściej – zwłaszcza w przenośnym sprzęcie audio – są uży-



Fotografia 1. Silnik parowy wykonany w technologii MEMS przez laboratoria Sandia Labs



Fotografia 2. Jedna z wielu możliwych konfiguracji przekładni wykonanej w technologii MEMS

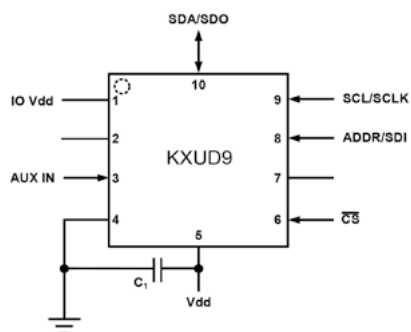
Dobre źródło informacji
 Ze względu na różnorodność możliwości oferowanych przez sensory MEMS i ich wyposażenie, bardzo trudne jest znalezienie sensora dokładnie odpowiadającego wymaganiom aplikacji. Pomocny w dobre może okazać się portal www.findMEMS.com, który – niestety – nie jest od pewnego czasu już rozwijany, ale opracowany przez jego autora katalog jest niezłym źródłem przeglądowych informacji, nie uwzględniającym jedynie najnowszych opracowań.



Fotografia 3. Coraz łatwiej na rynku o mikrofony produkowane w technologii MEMS



Fotografia 4. Wygląd systemu mikroluster DLP stosowanych w projektorach

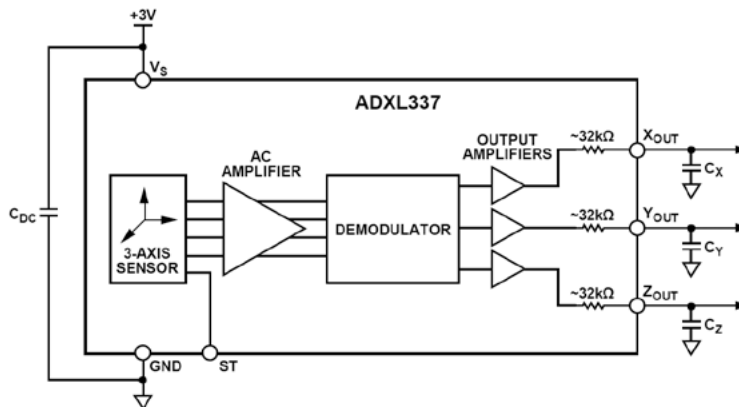
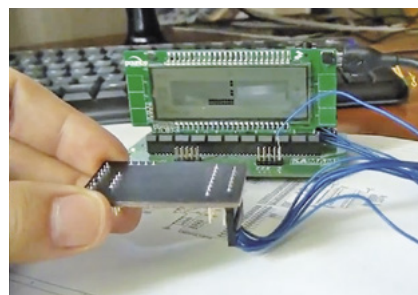


Rysunek 5. Schemat aplikacyjny akcelerometra KXUD9 firmy Kionix, który może spełniać także rolę pokładowego, jednowięściowego przetwornika A/C o rozdzielczości konwersji 16 bitów

wane także miniaturowe mikrofony MEMS (fotografia 3), produkowane w wersjach: analogowej (ze zintegrowanym wzmacniaczem audio) lub cyfrowej (z wbudowanym filtrem antyaliasingowym i przetwornikiem A/C).

Dla praktyków

Przykładowe projekty ilustrujące aplikacje sensorów MEMS we współpracy z mikrokontrolerami są dostępne (wraz z dokładnymi opisami i kodami źródłowymi do pobrania) w portalach: www.STM32.eu (na mikrokontrolery STM32) oraz www.KINETIS.pl (na mikrokontrolery Kinetis)



Rysunek 6. Schemat blokowy akcelerometru 3D ADXL337 (Analog Devices) z wyjściami analogowymi

Elementy produkowane w technologii MEMS zdominowały także systemy projekcji obrazów: zarówno w systemach kina domowego jak i we współczesnych „prawdziwych” kinach, projekcja obrazów odbywa się za pomocą systemów ruchomych mikroluster DMD (*Digital Micromirror Devices*) lub DLP (*Digital Light Processor*) zintegrowanych w jednym układzie scalonym (fotografia 4).

Kolejne dwa obszary aplikacyjne podzespołów MEMS są trudne do „dotknięcia” przez elektroników, ale są przez nich (jak i wielu innych użytkowników) odczuwalne:

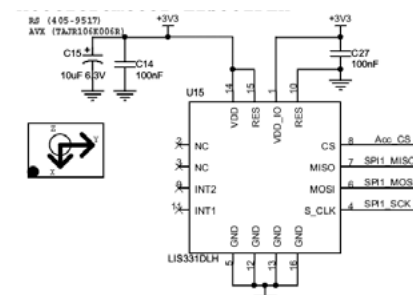
- głowice drukarek atramentowych, w których pompy zapewniające odpowiednie ciśnienie atramentu oraz zawory sterujące natryskiem atramentu są coraz częściej wykonywane w technologii MEMS,
- analizatory biologiczne i chemiczne, a także urządzenia diagnostyki medycznej i lecznictwa. Miniaturowe systemy MEMS są stosowane m.in. w autonomicznych dozownikach leków, pozwalających dobierać ich dawki w sposób optymalny, uwzględniający kondycję organizmu. Powszechnie są stosowane w przenośnych analizatorach krwi stosowanych przez chorych na cukrzycę, pozwalając im na bieżąco określać niezbedną dawkę insuliny, prowadzone są także zaawansowane eksperymenty z MEMS-owymi, bezprzewodowymi endoskopami, zdolnymi do pobierania próbek i wycinków bez konieczności wprowadzania do organizmu człowieka - zazwyczaj podczas zazwyczaj mało komfortowych zabiegów - specjalnych narzędzi.

W dalszej części artykułu skupimy się wyłącznie na podzespołach produkowanych w technologii MEMS, prezentując ich możliwości oraz najważniejsze cechy i parametry, przyjmując za podstawowe kryterium dostępność prezentowanych podzespołów na rynku. W tym wydaniu EP zajmujemy się dwoma grupami sensorów: akcelerometrami i magnetometrami, kolejne - w tym sensory zintegrowane o dużej liczbie stopni swobody DoF - przedstawimy za miesiąc.

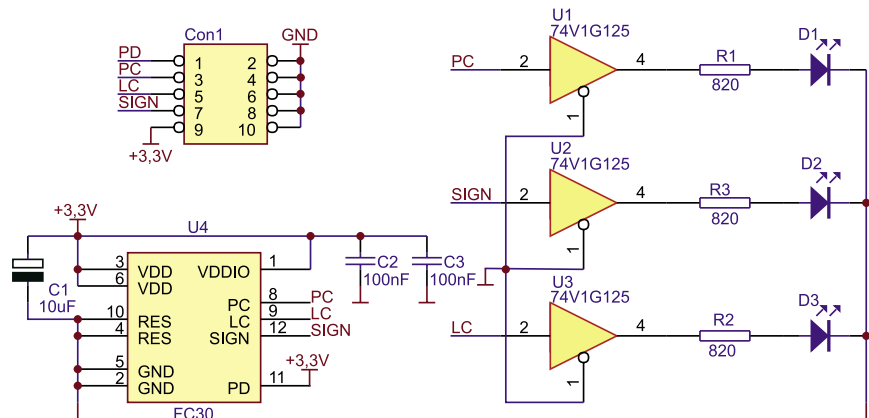
Akcelerometry

Jedną z najliczniejszych grup podzespołów dostępnych na rynku są akcelerometry. Produkuje je wiele firm (najpopularniejsi w naszym kraju producenci, w kolejności alfabetycznej: Analog Devices, Bosch Sensortec, Freescale, STMicroelectronics), w liczbie wariantów pozwalającej precyzyjnie dobrać sensor do wymogów aplikacji. Dostępne są akcelerometry 1-/2- oraz 3-osiowe, wyposażone w zintegrowane układy kondycjonujące i kompensujące wpływ warunków zewnętrznych (zmiany temperatur, zmiany wartości napięć zasilających, niedokładności montażu) na uzyskane wyniki. Większość producentów ma w swoich ofertach akcelerometry MEMS zintegrowane z przetwornikami A/C (rozdzielczość do 24 bitów, zazwyczaj 10...13 bitów), z których dane można uzyskać w postaci cyfrowej poprzez interfejs SPI lub I²C. Niektóre typy sensorów wyposażono w obydwa rodzaje interfejsów, z których w danej chwili aktywny może być jeden, wybrany (za pomocą odpowiedniego stanu logicznego podanego na specjalne wejście) przez użytkownika. Dostępne są także akcelerometry z wyjściem PWM (ADXL212, ADXL213 z oferty Analog Devices), a także rzadko spotykany w aplikacjach „cywilnych” interfejs DSI (np. seria MMA26xx firmy Freescale), przeznaczony do wyrafinowanych aplikacji samochodowych.

Akcelerometry z wyjściami analogowymi są zazwyczaj wyposażane w filtry dolnoprzepustowe Bessela o konfigurowanych (cyfrowo



Rysunek 7. Schemat aplikacyjny czujnika LIS331DLH firmy STMicroelectronics (z interfejsem SPI)



Rysunek 8. Schemat aplikacyjny sensora funkcjonalnego MEMS – FC30

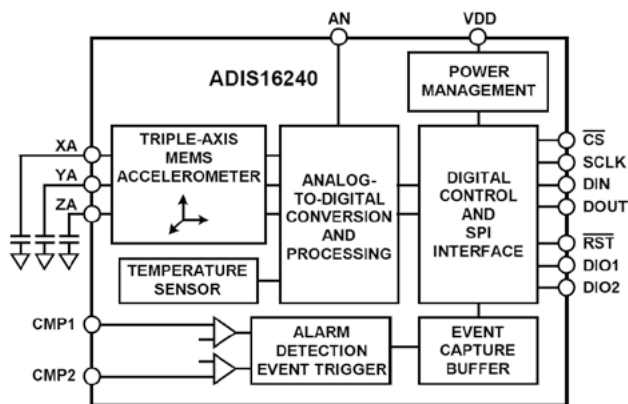
lub za pomocą zewnętrznych elementów RC) charakterystykach i rzędzie dobieranym do specyfiki aplikacji. Niektóre typy akcelerometrów (np. LIS331DLH z oferty STMicroelectronics) wyposażono w konfigurowalne filtry górnoprzepustowe, których zadaniem jest odcięcie składowej stałej pomiaru, co pozwala uniknąć wpływu offsetu mechanicznego na wyniki pomiarów (oczywiście poza zmniejszeniem zakresu pomiarowego w kierunku przechylenia czujnika).

Typowe pasmo czułości (-3 dB) akcelerometrów nie przekracza 400 Hz, ale dostępne są sensory pracujące prawidłowo nawet do 22 kHz (ADXL001 z oferty Analog Devices). Zakresy pomiarowe czujników przyspieszenia ± 250 g (MMA2300KEG z oferty Freescale), a nawet $\pm 312,5$ g (m.in. MMA1631NKW także z oferty Freescale, wyposażony w interfejs DSI stosowany w aplikacjach samochodowych).

Maksymalne czułości osiągane przez akcelerometry będące aktualnie w produkcji dochodzą do 1200 mV/g, przy czym wiele typów spośród produkowanych czujników wyposażono w możliwość przełączania zakresów pomiarowych, co ułatwia ich dynamiczne dostosowywanie do zmieniającej się charakterystyki otoczenia. „Proste” akcelerometry dość często

są wyposażane także w systemy zarządzania energią, pozwalające ograniczyć pobór mocy w aplikacji, w niektórych modelach dostępne są także programowane detektory swobodnego upadku (*free fall*), komparatory progowe sygnalizujące przekroczenie zadanej wartości przyspieszenia przerwaniem, wykrywacze puknięć, a także programowane timery okresowo inicjujące monitorowanie drgań/przechyłów.

Pomimo koncepcyjnego i technologicznego skomplikowania wewnętrznej budowy akcelerometrów, ich typowe aplikacje są nad wyraz proste, czego przykłady pokazano na rysunkach 5, 6 i 7. Wszystkie sensory, których aplikacje pokazano na schematach wymagają do prawidłowej pracy zastosowania zewnętrznego mikrokontrolera, komunikującego się z sensorem poprzez interfejs komunikacyjny z mniej lub bardziej skomplikowanym protokołem. Jeśli w aplikacji wystarczy określenie



Rysunek 9. Schemat blokowy akcelerometra ADIS16240 ze zintegrowanym rejestratorem wyników pomiarów

Programowy filtr Kalmana dla klientów STMicroelectronics

Inżynierowie firmy STMicroelectronics wraz z poszerzeniem oferty czujników MEMS opracowali biblioteki programowe realizujące funkcję Kalmana, ułatwiająca 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. Bezpłatnie dostępne są (niezbędna wcześniejsza rejestracja pod adresem <http://www.st.com/internet/evalboard/product/252510.jsp>): biblioteka iNEMO Engine Lite umożliwia obsłużenie wieloosiowych czujników przyspieszenia oraz czujników geomagnetycznych, minimalizując wpływ 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 jakim 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.

położenia czujnika względem powierzchni Ziemi, bez dokładnego pomiaru kąta nachylenia, można zrezygnować ze stosowania mikrokontrolera i zamiast klasycznych akcelerometrów zastosować tzw. czujnik funkcjonalny, jak np.: FC30 firmy STMicroelectronics. Schemat aplikacyjny tego układu pokazano na rysunku 8, został on użyty w jednym z miniprojektów prezentowanych na łamach EP. FC30 to układ o trzech cyfrowych wyjściach, na których występują stany logiczne określające swoją kombinacją aktualne położenie sensora – sygnalizowana jest 1 z 8 możliwych, intuicyjnych pozycji (typu: *portrait/landscape* itp.).

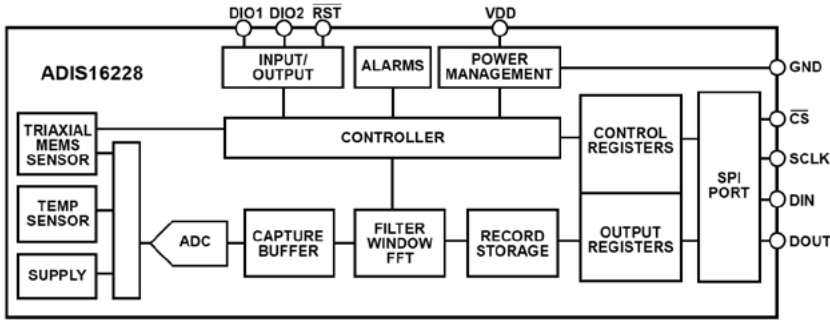
Nieco mniej znane – i zapewne przez to – mniej popularne na rynku są akcelerometry z dodatkowymi funkcjami, w których produkcji wyspecjalizowała się firma Analog Devices. Przykładem takiego ponadstandardowego rozwiązania jest 3-osiowy akcelerometr MEMS zintegrowany z konfigurowalnym rejestratorem zdarzeń ADIS16240 (rysunek 9), który wyposażono w pamięć o organizacji 3×8 kb, w której rejestrowane są zdefiniowane przez użytkownika zdarzenia (z nagłówkiem zawierającym informacje o godzinie, dacie, temperaturze i napięciu zasilania). Wymuszenie zapisu rekordu może odbywać się automatycznie (po przekroczeniu zadanego progu w którymś kanale akcelerometru), może być także wyzwolane z zewnątrz za pomocą dwóch dedykowanych do tego celu wejść.

Jeszcze bardziej interesującym rozwiązaniem bazującym na akcelerometrach MEMS jest scalony sensor wibracji ADIS16228, którego schemat blokowy pokazano na rysunku 10. Jego atutem jest wbudowany sprzętowy system obliczania FFT w trzech kanałach czułości akcelerometru, na bazie 512 próbek w każdym kanale. Użytkownik może definiować okno próbkowania (do wyboru: prostokątne, Hanninga, *flat top*), wynik FFT może być sprzętowo uśredniany (do 255 wyników), a na bazie obliczeń mogą być generowane alarmy sygnalizujące wystąpienie zadanych przez użytkownika drgań lub wibracji. W sensorze ADIS16228 zintegrowano ponadto pamięć Flash, która służy m.in. do przechowywania nastaw konfiguracyjnych oraz rejestrowania wybranych przez użytkownika wyników.

Magnetometri

Stosunkowo nową na rynku grupą sensorów MEMS są magnetometri, określane dość często mianem czujników kompasowych, co wynika z najbardziej efektywnych i najczęściej spotykanych na co dzień obszarów ich stosowania. Pośród sensorów tego typu produkowanych obecnie, najważniejszy jest podział na dwie grupy:

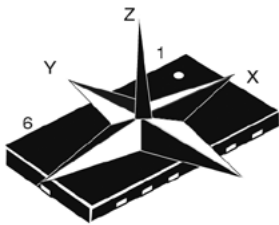
- magnetometri pomiarowe, przeznaczone do pomiaru natężeń pola magnetycznego w otoczeniu. Są to zazwyczaj sensory 3-osiowe, podające niezależne wyniki pomiarów dla każdej z trzech



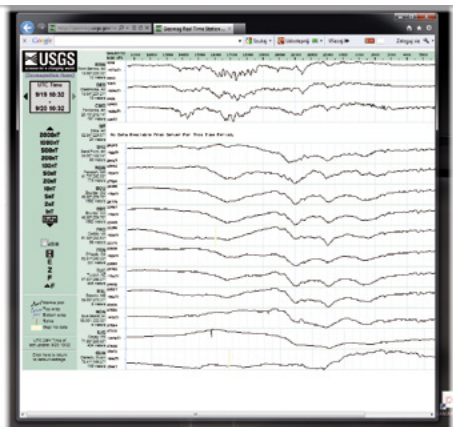
Rysunek 10. Schemat blokowy akcelerometra ADIS16228 ze zintegrowanym analizatorem FFT i rejestratorem wyników pomiarów

osi czułości (rysunek 11). Aplikowanie sensorów tego typu daje użytkownikowi z jednej strony duże możliwości, z drugiej wymaga umiejętnego operowania uzyskanymi danymi, bowiem realizacja funkcji kompasu wiąże się z koniecznością wykonania obliczeń, które są zależne od aktualnego położenia na globie magnetometru (odpowiednie dane udostępni m.in. portal <http://geomag.usgs.gov/> - rysunek 12).

Sensory tego typu produkuje kilka firm, których wyroby są dostępne na naszym rynku, przykładowo (najbardziej popularne): Freescale MAG3110 o zakresie pomiarowym $\pm 1000 \mu T$ w każdym kanale i częstotliwości próbkowania do 80 Hz. Wyposażono go w interfejs I²C, schemat aplikacyjny sensora pokazano na rysunku 13. Honeywell HMC5883 o częstotliwości próbkowania do 160 Hz, który wykonano w mieszanej technologii: MEMS zin-



Rysunek 11. Przykładowe osie orientacji magnetometrów 3D



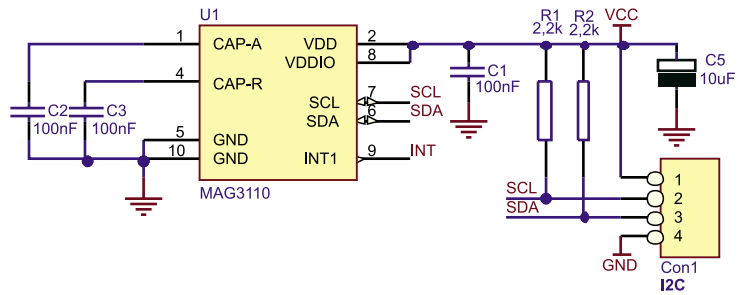
Rysunek 12. Wyniki pomiaru rozkładu pola magnetycznego na powierzchni Ziemi udostępnia portal geomag.usgs.gov

tegowany z polami sensorów magneto-rezystywnych. Komunikuje się on z otoczeniem poprzez interfejs I²C, do pracy wymaga niewiele elementów, co widać na rysunku 14.

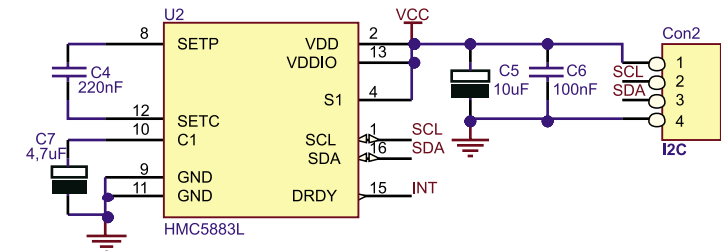
- sensory kompasowe, wyposażone w wewnętrzne bloki obliczeniowe, które zdejmują z użytkownika konieczność wyko-

nywania obliczeń ustalających odchylenie osi czułości kompasu od geograficznej północy. Przykładem popularnego sensora tego typu jest HMC6352 firmy Honeywell, w którym rolę sensorów pola magnetycznego spełniają pola magneto-rezystywnie, ułożone na kratownicach piezoelektrycznych MEMS, które są wykorzystywane do kalibrowania offsetu mechanicznego pól czujnikowych. Dzięki wbudowanemu blokom obliczeniowym, sensor HMC6352 może pracować w trybie heading, w którym współpracujący mikrokontroler odczytuje z rejestrów sensora 16-bitową liczbę podającą azymut z dokładnością do dziesiątych części stopnia. Pomimo zaawansowanych możliwości schemat aplikacyjny układu HMC6352 jest bardzo prosty - rysunek 15.

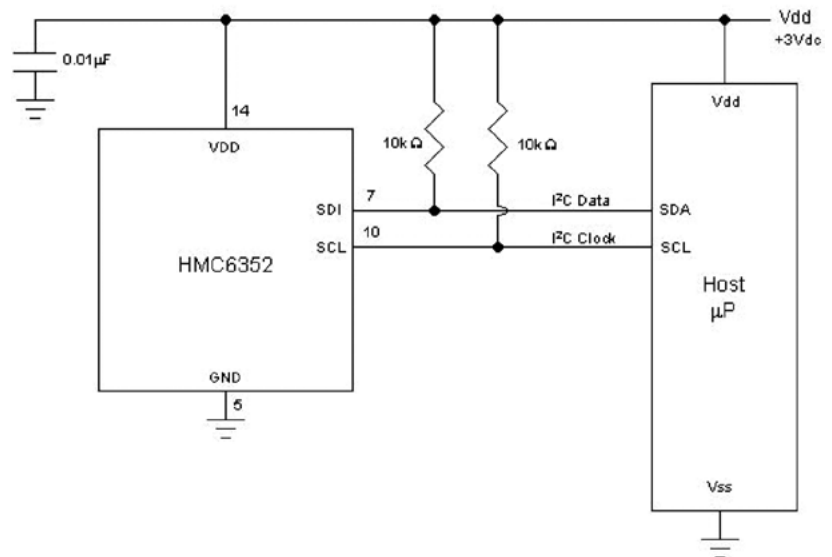
Piotr Zbysiński, EP



Rysunek 13. Schemat aplikacyjny magnetometra MAG3110 (Freescale)



Rysunek 14. Schemat aplikacyjny magnetometra HMC5883 (Honeywell)



Rysunek 15. Schemat aplikacyjny cyfrowego kompasu HMC6352