

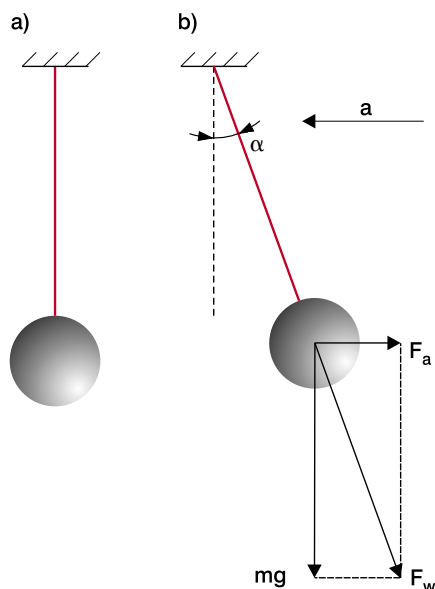
iMEMS-owe żyro

Firma Analog Devices należy do światowych liderów producentów czujników przyspieszenia, inklinometrów i żyroskopów. Są to podzespoły, których zasada działania jest oparta na elementarnej wiedzy, jaką uzyskujemy co najmniej na poziomie licealnym, z drugiej zaś strony przełożenie teorii na grunt praktyki wiąże się ze stosowaniem niezwykle wyrafinowanej technologii.

Czujniki przyspieszenia, żyroskopy i inklinometry produkowane przez firmę Analog Devices zaliczamy do grupy iMEMS (Integrated Micro Electro-Mechanical Systems – nazwa zarejestrowana przez AD). Technologia zastosowana do produkcji tych elementów jest niezwykła, polega na połączeniu w jednym kawałku struktury półprzewodnikowej elementów mikromechanicznych z czysto elektronicznymi. O akcelrometrach pisaliśmy już w EP, w tym artykule zajmiemy się żyroskopami – elementami stosunkowo mało u nas znanymi i rzadko stosowanymi. Do pełnego poznania zasady ich działania konieczne będzie przypomnienie sobie zjawisk fizycznych, na jakich jest oparta ich budowa.

Szkolny eksperyment

O przyspieszeniu uczyliśmy się w szkole średniej. To wtedy kazano nam wykuć na pamięć formułkę: $F=m \cdot a$, która teraz po latach okaże się bardzo przydatna. Jest to matematyczna interpretacja II Zasady Dynamiki, która mówi, że jeżeli na ciało o masie m działa siła F (w ogólnym przypadku może to być wypadkowa wielu sił), to ciało to porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym, z przyspieszeniem a . Proste, nieprawdaż. Miłośnik fizyki o zacięciu eksperymentatorskim,



Rys. 1. Budowa eksperymentalnego „akcelrometru” a) podczas bezruchu, b) podczas ruchu z przyspieszeniem a

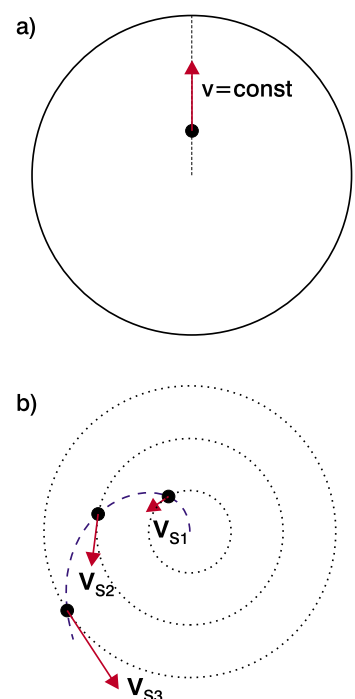
bez większego namysłu zbuduje własny akcelrometr. Będzie nim np. stalowa kulka zawieszona do sztywnego korpusu na niesprężystej nitce. Jeśli taki układ (rys. 1a) pozostawimy w spoczynku, kulka będzie wisiła swobodnie niczym pion murarski, jeśli jednak całość wprawimy w ruch jednostajnie przyspieszony, to kulka na skutek siły bezwładności F odchyli się od pionu o kąt α proporcjonalny do wartości przyspieszenia (rys. 1b). Wprawdzie w doświadczeniu tym sprytnie zamieniliśmy przyczynę ze skutkiem z podanej wyżej definicji II Zasady Dynamiki, ale relacje obowiązują oczywiście nadal, więc nie popełniamy tu żadnego nadużycia. Opisany układ pozwoli nam obliczyć wartość przyspieszenia, jakiemu ulega nasz „akcelrometr”. Z prostych rachunków wynika, że jest ono równe: $a=g \cdot \tan \alpha$, gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, α – kąt odchylenia kulki. Eksperyment można łatwo wykonać, np. w samochodzie. Do zbudowania iMEMS-owego akcelrometru jest już prosta doga, wystarczy tylko naszą kulkę zmniejszyć do rozmiarów takich, że będzie ją można dostrzec tylko za pomocą mikroskopu. No nie, to nie wszystko. Trzeba jeszcze naszą kulkę zastąpić ruchomą masą, której nadamy kształt grzebienia, i którą podwiesimy platynowymi drucikami do sztywnego, nieruchomego korpusu, również w kształcie grzebienia. Robimy to tak, aby oba grzebienie ząbały się wzajemnie, otrzymując tym samym dość specyficzny kondensator. Jego pojemność będzie zależała od wzajemnego położenia okładzin – ząbków obu grzebieni, a to jak już wiemy będzie się zmieniać w zależności od odchylenia masy. Ostatecznie, mierząc pojemność tak zbudowanego kondensatora i znając współczynnik sprężystości sprężynek podtrzymujących ruchomą masę, możemy określić przyspieszenie, jakiemu podlega nasz czujnik.

No dobrze, ale mieliśmy mówić o żyroskopach, nie o akcelrometrach. Pewnym usprawiedliwieniem takiego ujęcia tematu są podobne rozwiązania technologiczne zastosowane zarówno w akcelrometrze, jak i w żyroskopie. Oczywiście obie konstrukcje będą musiały różnić się między sobą, są bowiem wykorzystywane do pomiarów różnych, mimo wszystko, wielkości fizycznych. Przypomnijmy zatem: akcelrometr mierzy przyspieszenie liniowe, żyroskop natomiast mierzy prędkość kątową. O ile do budowy

akcelrometru wystarczyło zastosowanie bezwładnego odchylenia masy doznającej przyspieszenia, to żyroskop, z racji zjawisk zachodzących w ruchu po okręgu, będzie urządzeniem bardziej skomplikowanym. Do tego, aby mógł spełnić zwoje zadanie, oprócz zastosowania bezwładnej masy konieczne będzie wykorzystanie pewnego efektu, o którym niby wszyscy uczyliśmy się w szkole, ale mało kto pamięta o nim po latach. Będzie się z tym wiązała pewna modyfikacja budowy czujnika, ale na to jesteśmy chyba gotowi. Cofnijmy się zatem znowu do lat szkolnych, do lekcji, na których uczyliśmy się o istnieniu pewnej siły, która powoduje np. to, że wiry w rzekach kręcą się zawsze w prawo na półkuli północnej i w lewo na południowej.

Efekt Coriolisa

Działanie siły Coriolisa najlepiej sprawdzić na sobie podczas wizyty w wesołym miasteczku. Eksperyment jednak będzie dość subtelny, więc jeśli wynik kogoś nie przekona, będzie musiał przyjąć go na wiarę. Konieczne będzie zainwestowanie w bilet na karuzelę, ale taką z konikami, która umożliwi przemieszczanie się po obracającej się powierzchni wzdłuż promienia. Karuzela z krzeselkami na łańcuchu nie będzie przydatna. Przed uruchomieniem karuzeli stajemy jak najbliższej jej osi. Gdy zostanie wprawiona w ruch i nabierze stałej prędkości obrotowej, zaczynamy się przemieszczać ruchem jednostajnym prostoliniowym wzdłuż promienia od



Rys. 2. Trajektorja ruchu obiektu w układzie związanym z: a) karuzelą, b) z ziemią

Matematyczny opis obiektu poruszającego się ruchem po okręgu

Do opisu matematycznego obiektu będącego w ruchu po okręgu najwygodniej będzie zastosować współrzędne biegunowe. Równanie ruchu ma postać:

$$z = r e^{j\varphi} \quad (1)$$

W ogólnym przypadku zarówno r jak i φ są funkcjami czasu.

Do obliczenia prędkości w ruchu po okręgu musimy różniczkować równanie (1), otrzymamy:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dr}{dt} e^{j\varphi} + jr \frac{d\varphi}{dt} e^{j\varphi} \quad (2)$$

Zróżniczkowanie równania (2) da nam ogólną zależność na przyspieszenie (w nawiasach kwadratowych umieszczono różniczki poszczególnych składników równania (2)):

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \left[\frac{d^2r}{dt^2} e^{j\varphi} + j \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} e^{j\varphi} \right] + \left[j \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} e^{j\varphi} + jr \frac{d^2\varphi}{dt^2} e^{j\varphi} - r \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 e^{j\varphi} \right] \quad (3)$$

Założymy teraz, że obiekt porusza się ze stałą prędkością kątową ω i jednocześnie przemieszcza się wzdłuż promienia ruchem jednostajnym prostoliniowym z prędkością v . Konsekwencją tego założenia są poniższe równania:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega = \text{const} \Rightarrow \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dr}{dt} = v = \text{const} \Rightarrow \frac{d^2r}{dt^2} = 0 \quad (5)$$

Ostatecznie (korzystając z równań (3), (4) i (5)) przyspieszenie obiektu dla powyższych założeń jest opisane równaniem (6):

$$\frac{d^2z}{dt^2} = j2v\omega e^{j\varphi} - r\omega^2 e^{j\varphi} \quad (6)$$

Drugi składnik dobrze znamy, jest to składowa dośrodkowa przyspieszenia, zaś pierwszy składnik jest składową wynikającą z efektu Coriolisa. Zauważmy, że przy braku przemieszczenia się wzdłuż promienia ($v=0$), składowa ta jest równa zero.

środku do zewnątrz. W układzie związanym z karuzelą naszym śladem będzie linia prosta (rys. 2a), natomiast w układzie związanym z Ziemią pozostawimy ślad jak na rys. 2b. Zauważmy, że nasza prędkość względem ziemi będzie się zwiększała w miarę zwiększania się promienia, co widać na rys. 2b. Jednocześnie zawsze podczas wędrówki wzdłuż promienia będziemy odczuwać pewną siłę, która będzie nas spychała w kierunku prostopadłym do kierunku marszu (do promienia). Siła ta będzie zanikała, jeśli tylko choćby na chwilę przystaniemy, mimo że karuzela będzie się nadal kręciła. To właśnie ta siła jest „odpowiedzialna” za zwiększanie naszej prędkości względem Ziemi, nadaje więc naszemu ciału przyspieszenie (zgodnie z II ZD). Zjawisko to zauważył francuski matematyk Gaspard Coriolis (1792–1843) i jego nazwiskiem nazwano opisany wyżej efekt.

Jeśli karuzela obraca się z prędkością ką-

tową ω , to prędkość styczna, dla promienia r , jest równa $v_s = \omega \cdot r$. Założymy teraz, że promień r zmienia się z prędkością $v = \text{const}$. Przyspieszenie styczne będzie równe $a = \omega \cdot v$ i stanowi połowę przyspieszenia Coriolisa. Istnieje jeszcze drugi, identyczny co do wielkości składnik tego przyspieszenia, wynikający ze zmiany kierunku prędkości stycznej. Ostatecznie przyspieszenie Coriolisa jest równe $a_c = 2 \cdot \omega \cdot v$. Dokładne wyliczenie tej wielkości z zastosowaniem rachunku różniczkowego przedstawiono w ramce.

Siła Coriolisa jest siłą pozorną, podobnie jak siła odśrodkowa, która siłę Coriolisa będzie trochę maskowała, więc czy ją pocujemy czy nie, będzie trochę zależało od naszej wyobraźni.

Coriolis a żyroskop

Żyroskopy iMEMS wykorzystują opisany wyżej efekt. Rolę człowieka przemieszczającego się po karuzeli z naszego eksperymentu pełni w czuj-

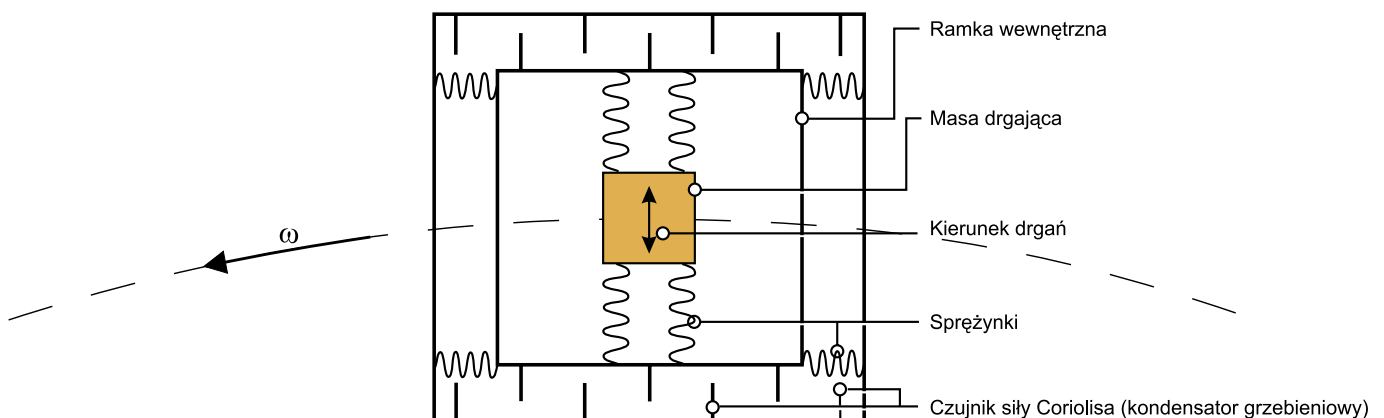
niku odpowiednio dobrana masa polikrzemowa zawieszona na polikrzemowej ramce.

Wszystko, jak już wiemy, niemal niewidoczne gołym okiem, podobnie jak w akcelerometrach. Konstrukcja mechaniczna umożliwi drgania masy tylko w jednym kierunku – wzdłuż promienia (rys. 3), natomiast ramka, do której masa ta jest podwieszona może się odchylać tylko w kierunku prostopadłym, czyli zgodnym z kierunkiem siły Coriolisa. Symulację ruchu masy wzdłuż promienia uzyskuje się poprzez elektrostatyczne wprowadzenie jej w drgania. Ramka stanowi jedną elektrodę kondensatora grzebieniowego, druga jest nieruchoma – wykonano ją w korpusie żyroskopu. Do uzyskania miarodajnego wyniku pomiaru potrzebna jest znajomość współczynnika sprężystości zastosowanych mikrosprężynek, ale warunek ten jest spełniony na etapie produkcji żyroskopu. Założymy, że współczynnik ten jest równy k . Przesunięcie ramki z masą m wywołane siłą Coriolisa będzie równe $2\omega m v/k$.

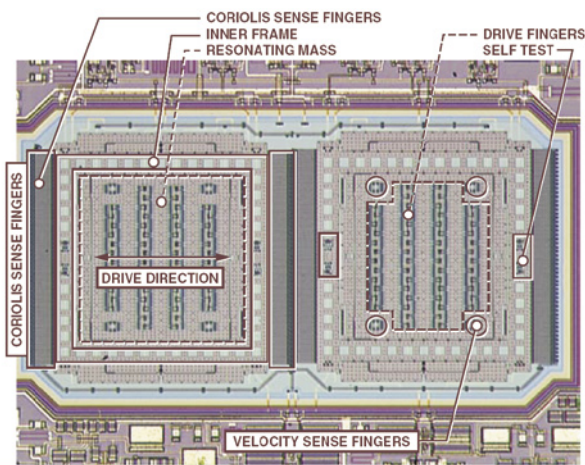
To robi wrażenie

Budowę żyroskopu już znamy. Układ pomiarowy składa się z dwóch identycznych kondensatorów pracujących różnicowo. Znacząc ich pojemność całkowitą oraz wymiary, korzystając z podanych wcześniej zależności matematycznych, można określić związek pomiędzy prędkością obrotową, a pojemnością różnicową. Prędkość ta jest równa $2\omega m v/dk$, gdzie: d – odległość między okładkami, a v można uzyskać na podstawie częstotliwości drgań masy i wymiarów przestrzeni, w której drga.

Teraz proszę zaprzeć się dobrze na krzesłach. W żyroskopach mogą być rozpoznawane niewiarygodnie małe różnice pojemności wynikające z równie mikroskopijnych przemieszczeń części ruchomej sensora. Rozpoznawane są zmiany pojemności rzędu pojedynczych fF (femto Faradów, $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$). Ruchoma ramka widoczna na rys. 3 jest wykonana z ultracienkiej folii o masie $4 \mu\text{g}$ i szerokości $1,7 \mu\text{m}$. Została umieszczona w „komorze” wypełnionej powietrzem. Jest to konieczne do zabezpieczenia konstrukcji przed mechanicznym zniszczeniem w przypadku gwałtownych przeciężeń. Taka, swego rodzaju, poduszka powietrzna z jednej



Rys. 3. Konstrukcja mechaniczna żyroskopu



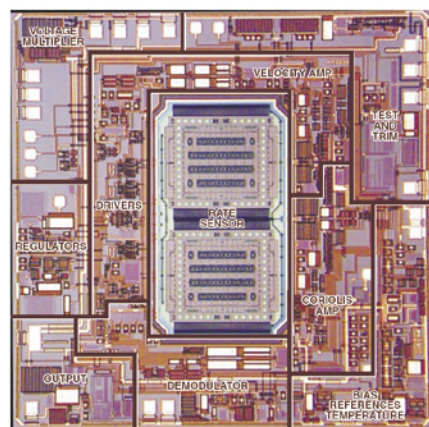
Fot. 4. Fotografia sensora stosowanego w żyroskopach ADXRS, widać dwie struktury pracujące różnicowo, co zabezpiecza przed szokiem przeciążeniowym i eliminuje wibracje

strony wystarczająco spełnia swoje zadanie ochronne, z drugiej jednak strony zmniejsza czułość pomiarową sensora. Jeszcze raz trzeba tu wspomnieć o subminiaturowej konstrukcji czujnika, nie można już więc pomijać zjawisk zachodzących na poziomie niemal pojedynczych atomów. Na przykład naturalny ruch molekuł powietrza wprawia w ruch strukturę, a wynikający z tego szum ogranicza zdolność pomiaru jeszcze mniejszych sygnałów niż jest to aktualnie osiągnięte. Dla lepszego uzmysłowienia sobie, jak to wszystko jest wykonane przedstawiamy fotografię sensora zastosowanego w żyroskopach ADXRS (fot. 4), a na fot. 5 pokazano, jak wygląda cała struktura półprzewodnika żyroskopu

z wyraźnie widoczną częścią mechaniczną. Całość jest zamknięta w obudowie BGA o wymiarach 7x7 mm i 3 mm wysokości z 32 wyprowadzeniami. Układ pobiera moc 30 mW.

Na zakończenie trzeba dodać, że w większości układów praktycznych żyroskop nie służy do określania prędkości kątowej, lecz kąta obrotu. Przykładowym rozwiązaniem może być system złożony z żyroskopu i serwomechanizmu, wykorzystywany do wspomagania sterowania śmigłowcem. Żyroskop pomaga pilotowi utrzymać kurs bez względu na przechyły spowodowane podmuchami wiatru i turbulencjami. Każdy przechył lub odchylenie od kierunku lotu jest natychmiast automatycznie korygowany przez serwomechanizm.

Innym często spotykanym zastosowaniem żyroskopu jest wspomaganie systemów nawigacyjnych opartych na GPS, w sytuacjach utraty widoczności satelitów (gęste obszary zabudowane, tunele itp.). Rozwiązania takie umożliwiają ponadto podejmowanie nawigacji bezpośrednio po włączeniu urządzenia, bez straty czasu niezbędnego do zlokalizowania satelitów przez odbiornik GPS.



Fot. 5. Fotografia całej struktury żyroskopu ADXRS, widoczny sensor mechaniczny i elektroniczne bloki kondycjonowania sygnału

W aplikacjach, w których podawana jest liczbowo wartość kąta obrotu, konieczne jest całkowanie wskazań żyroskopu. Najczęściej robi się to metodą numeryczną wykorzystując odpowiednio oprogramowany system mikroprocesorowy lub bezpośrednio w programie komputerowym. Tu jednak bez stosowania specjalnych trików czyha niebezpieczeństwo kumulowania się błędów sumowania, które w dłuższym czasie mogą powodować znaczne odchyłki wskazań.

Źródło: John Geen, David Krakauer, „New iMEMS Angular-Rate-Sensing Gyroscope” – „Analog Dialogue”, Volume 37, Number 1, 2003.

Jarosław Doliński, EP
jaroslaw.dolinski@ep.com.pl

R E K L A M M A

AVT 2849

TINY clock - niewielki, niezwykle funkcjonalny zegar

Wyposażony w czytelny wyświetlacz LED, wygodną klawiaturę. Bogaty jest też zakres funkcji; oprócz tradycyjnego wskazywania czasu dostępny jest stoper, minutnik, budzik a także termometr pokojowy. Ułatwieniu obsługi sprzyja możliwość zaprogramowania własnych skrótów klawiaturowych – zupełnie jak w dużych, poważnych urządzeniach komputerowych. Dostępna jest też sygnalizacja dźwiękowa.

- wyświetlacz: 4 cyfry, LED
- praca w trybie 24-godzinny
- automatyczna i manualna regulacja jasności
- budzik z funkcją powtarzania
- stoper i minutnik
- różne rodzaje sygnalizacji pełnej godziny
- odczyt temperatury w pokoju
- pamięć ustawień i skróty klawiszowe
- zasilanie: 12...15 VDC

Dostępne wersje:
 A - płytką drukowaną: 26zł
 B - komplet elementów: 38zł
 C - układ zmontowany: 70zł

AVT-Korporacja Sp. z o.o.
 03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11
 tel. 022 257 84 50, fax 022 257 84 55
 e-mail: handlowy@avt.pl

www.sklep.avt.pl