

Akcelerometr typu MEMS z możliwością precyzyjnej auto-kalibracji

Przedmiotem wynalazku jest akcelerometr typu MEMS (ang. Micro-Electro-Mechanical Systems) o strukturze umożliwiającej precyzyjną auto-kalibrację podczas jego działania.

Powszechnie wiadomym jest, że jedną z najłabszych cech akcelerometrów typu MEMS jest ich mała dokładność, wynikająca m.in. z niestabilności ich parametrów użytkowych, powodowana przykładowo dryfami termicznymi i czasowymi oraz skutkami starzenia się struktury akcelerometru. Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność kalibrowania akcelerometru typu MEMS przed jego użyciem w przypadku, gdy pożądana jest większa dokładność jego wskazań, kiedy to nie można korzystać z uśrednionych wartości parametrów użytkowych podawanych w katalogach. Właśnie dlatego zaproponowano różne rozwiązania techniczne usprawniające i ułatwiające proces kalibrowania akcelerometrów typu MEMS przez użytkownika. Np. przedmiotem polskiego zgłoszenia patentowego nr P.425929 jest czujnik odchylenia od pionu, wykorzystujący trójosiowy akcelerometr typu MEMS, którego obudowa wykorzystywana jest do kalibrowania zastosowanego akcelerometru.

Innym podejściem jest rozbudowa mechanicznej struktury krzemowej samego akcelerometru. Znane są już od dawna akcelerometry posiadające np. wbudowane sensory temperatury, umożliwiające kompensacje błędów termicznych. Zaproponowano także zastosowanie zewnętrznych mikro-grzejników umożliwiających utrzymanie stałej-podwyższonej temperatury całego akcelerometru. Niektóre firmy stosują przechowywanie w pamięci akcelerometru uśrednionych charakterystyk prognozujących skutki starzenia się struktury akcelerometru w celu wyeliminowania błędów związanych z tym zjawiskiem. Kolejną propozycją, zasugerowaną przez autora wniosku w jednej z publikacji naukowych, jest zastosowanie dodatkowych akcelerometrów pracujących statycznie i o stałej orientacji, których sygnały służą do wyznaczania parametrów użytkowych akcelerometru roboczego; jednak wielką trudnością jest tutaj znalezienie kilku akcelerometrów typu MEMS o zbliżonych właściwościach, a główną wadą znaczne skomplikowanie urządzenia pomiarowego. Jeszcze inną propozycją jest wbudowanie funkcji autotestowania (ang. "self-test"), umożliwiającej zasymulowanie działania przyspieszenia zewnętrznego w celu przetestowania prawidłowości reakcji akcelerometru na działanie takiego przyspieszenia. Niestety funkcja autotestowania

47413/21/OCZ

nie jest realizowana z wystarczająco wysoką precyzją i dlatego nie nadaje się do dokładnej kalibracji akcelerometru bez dodatkowych modyfikacji.

Wynalazek przedstawia koncepcję zmodyfikowanej mechanicznej struktury krzemowej pojemnościowego akcelerometru typu MEMS o dowolnej liczbie osi czułości - przy założeniu, że możliwe jest rozbudowanie każdej osi czułości o dodatkowe detektory (omówione w dalszej części opisu) - umożliwiającą realizację precyzyjnej auto-kalibracji akcelerometru podczas jego działania. Oś czułości to kierunek działania mierzonego przyspieszenia; ponieważ przyspieszenie jest wielkością wektorową trzeba je mierzyć w konkretnej osi. Aby dokonać pomiaru dowolnie zorientowanego wektora przyspieszenia, w ogólnym przypadku konieczne są 3 kartezjańskie osie czułości. Liczba osi czułości (zazwyczaj 1 do 3) jest jednym z podstawowych parametrów metrologicznych akcelerometru.

Kalibracja jest możliwa dzięki zastosowaniu dodatkowych detektorów położenia masy sejsmicznej. W przypadku produkcji masowej znamiennej dla mikrouządzeń typu MEMS, zaproponowana modyfikacja nieznacznie zwiększy koszt wyprodukowania akcelerometru, jednak umożliwi dużą poprawę dokładności jego wskazań. Oprócz tego, możliwe będzie także wyeliminowanie niektórych obwodów elektronicznych akcelerometru (np. rezygnacja z układów kompensacji błędów temperaturowych, poprawek na efekty starzenia), co w przypadku uruchomienia produkcji całkiem nowego typu akcelerometru może wręcz obniżyć sumaryczny koszt jego produkcji.

W przypadku tanich akcelerometrów typu MEMS proces ich kalibracji musi przeprowadzać sam użytkownik. Z kolei w przypadku akcelerometrów fabrycznie skalibrowanych rośnie ich cena, a oprócz tego istnieje duże ryzyko, że uśrednione wartości fabrycznych parametrów wzorcowania nie zawsze pokrywają się z wartościami rzeczywistymi, co powoduje spadek dokładności wskazań akcelerometru. Idea działania zmodyfikowanego akcelerometru polega na tym, że podczas jego standardowej pracy wykorzystuje się moment chwilowego zajęcia przez masę sejsmiczną wyszczególnionych położenia określanych z dużą dokładnością, dzięki zastosowaniu dodatkowych detektorów (działających np. na zasadzie zjawiska prądu tunelowego). Odczytanie sygnału wyjściowego akcelerometru przypisanego do danej osi czułości w tych wyszczególnionych położeniach umożliwia jego auto-kalibrację z bardzo dużą dokładnością. W przypadku, gdy masa sejsmiczna wykonuje drgania (co ma miejsce zazwyczaj) o odpowiednio dużej amplitudzie (nie mniej niż np. 50% zakresu pomiarowego) auto-kalibracja może być powtarzana z dużą częstotliwością, a dzięki temu

47413/21/OCZ

można wyeliminować wiele istotnych błędów wskazań akcelerometru (dryfy czasowe, dryfy termiczne, efekty starzenia). W celu zwiększenia prawdopodobieństwa zajęcia przez masę sejsmiczną odpowiedniego położenia wykorzystywanego do autokalibracji, można zastosować większą liczbę proponowanych detektorów wyszczególnionych położzeń, które mogą być rozmieszczone w różnych częściach zakresu pomiarowego, włącznie z położeniem centralnym. Budowa detektorów musi być dostosowana do konstrukcji mechanicznej struktury akcelerometru. Odpowiednie ich skonstruowanie umożliwi dokładną detekcję wyszczególnionego położenia w każdym przypadku, pomimo rozrzutu parametrów elektrycznych i mechanicznych poszczególnych akcelerometrów w wyprodukowanej serii. Proponowana modyfikacja daje możliwość uzyskania bardzo dużej dokładności wskazań akcelerometrów typu MEMS. Dodatkowo umożliwia wyeliminowanie wybranych obwodów elektronicznych.

Akcelerometr typu MEMS zawierający masę sejsmiczną w kształcie podłużnej warstwy na której przeciwległych końcach zamocowano zawieszenie sprężyste trwale połączone z nieruchomą podstawą akcelerometru w punktach połączenia, jednocześnie do warstwy masy sejsmicznej dołączono ruchomą okładkę pomiarową, a po obu stronach ruchomej okładki pomiarowej umieszczono nieruchome okładki pomiarowe, charakteryzuje się tym, że

do warstwy masy sejsmicznej dołączono ruchomą elektrodę detekcyjną a do nieruchomej podstawy akcelerometru dołączono pierwszą nieruchomą elektrodę detekcyjną tworząc z ruchomą elektrodą detekcyjną pierwszy detektor wykrywania centralnego położenia masy sejsmicznej, oraz

do nieruchomej podstawy akcelerometru dołączono drugą nieruchomą elektrodę detekcyjną i umieszczono w pobliżu pierwszej nieruchomej elektrody detekcyjnej, przy czym druga nieruchoma elektroda detekcyjna tworzy z elektrodą detekcyjną drugi detektor wykrywania wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej,

przy czym ruchoma elektroda detekcyjna i nieruchome elektrody detekcyjne mają wydłużony kształt i zaostrzoną końcówkę.

Korzystnie, do nieruchomej podstawy akcelerometru dołączono trzecią nieruchomą elektrodę detekcyjną i umieszczono ją w pobliżu pierwszej nieruchomej elektrody detekcyjnej przy czym trzecia nieruchoma elektroda detekcyjna tworzy z elektrodą detekcyjną trzeci detektor wykrywania wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej, przy czym nieruchoma elektroda detekcyjna ma wydłużony kształt i zaostrzoną końcówkę.

47413/21/OCZ

Korzystnie, do nieruchomej podstawy akcelerometru dołączono kolejne nieruchome elektrody detekcyjne i umieszczono je równolegle względem siebie w pobliżu pierwszej nieruchomej elektrody detekcyjnej, przy czym każda kolejna nieruchoma elektroda detekcyjna tworzy z ruchomą elektrodą detekcyjną kolejny detektor wykrywania wyszczególnionego

5 położenia masy sejsmicznej.

Korzystnie, do warstwy masy sejsmicznej dołączono kolejne ruchome elektrody detekcyjne a do nieruchomej podstawy akcelerometru dołączono kolejne nieruchome elektrody detekcyjne tworzące z tymi kolejnymi ruchomymi elektrodami detekcyjnymi

10 dodatkowe detektory wykrywania wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej.

Korzystnie, wyszczególnione położenie masy sejsmicznej stanowi 50% zakresu pomiarowego akcelerometru.

Korzystnie, zawiera układ kalibracji do którego dołączony jest pierwszy detektor wykrywania centralnego położenia masy sejsmicznej, drugi i trzeci detektor wykrywania wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej.

15

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania jest uwidoczniony na rysunku na którym fig. 1 przedstawia schemat struktury mechanicznej akcelerometru,

fig. 2 - zajęcie wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej pod działaniem przyspieszenia (a) skierowanego w lewo,

fig. 3 - zajęcie wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej pod działaniem przyspieszenia (a) skierowanego w prawo a

20

fig. 4 – schemat blokowy przedstawiający główne moduły akcelerometru.

Do realizacji procesu autokalibracji konieczne jest zastosowanie odpowiedniej struktury mechanicznej akcelerometru, jak na Fig. 1.

25

Standardowa struktura akcelerometru typu MEMS składa się z masy sejsmicznej (1), zawieszenia sprężystego (2a) i (2b), trwale połączonego z nieruchomą podstawą akcelerometru w punktach (3a), (3b), ruchomej okładki pomiarowej (4) i nieruchomych okładek pomiarowych (5a) i (5b), tworzących układ różnicowego kondensatora pomiarowego, umożliwiającego analogowy pomiar położenia masy sejsmicznej (1), a dzięki temu pomiar

30

działającego na nią przyspieszenia liniowego. W punktach 3a i 3b występuje trwałe zespolenie masy sejsmicznej i zawieszenia sprężystego z podstawą; w pozostałym obszarze masa

47413/21/OCZ

sejsmiczna i zawieszenie sprężyste są ponad podstawą, a pomiędzy tymi elementami istnieje szczelina powietrzna. W rozwiązaniu według wynalazku, standardową strukturę rozbudowano o jedną ruchomą elektrodę detekcyjną (6) oraz trzy nieruchome elektrody detekcyjne (7a), (7b), (7c), tworząc w ten sposób trzy detektory wyszczególnionych położenia masy sejsmicznej (1), tzn.: 1. położenia centralnego - elektroda (6) i (7a); 2. położenia odpowiadającego np. 50% zakresu pomiarowego - elektroda (6) i (7b) albo (6) i (7c). Wskazana wartość 50% zakresu pomiarowego to przykładowa wartość kalibracyjna. Zastosowanie większej liczby nieruchomych i ruchomych elektrod detekcyjnych pozwala na zwiększenie dokładności i efektywności kalibracji.

10

Pomiar przyspieszenia liniowego a polega na wykorzystaniu następującej zależności: $a = (U-SS)/WS$, gdzie U jest napięciem pomiarowym wynikającym z chwilowych wartości pojemności kondensatora różnicowego składającego się z okładek nieruchomych (5a) i (5b) oraz ruchomej (4), SS jest składową stałą napięcia pomiarowego wyrażoną w voltach [V], WS jest współczynnikiem skalowania napięcia pomiarowego wyrażonym w voltach na g [V/g], gdzie g oznacza przyspieszenie ziemskie (około 10 m/s^2). Parametry SS i WS wyznaczone są podczas kalibracji lub autokalibracji akcelerometru typu MEMS.

15

Zasada działania detektorów wyszczególnionych położenia masy sejsmicznej polega na tym, że wykrywają one jedynie sytuację, gdy odpowiednia nieruchoma elektroda detekcyjna: (7a) lub (7b) lub (7c), znajdują się bardzo blisko ruchomej elektrody detekcyjnej (6). Taki efekt można uzyskać np. wykorzystując występowanie prądu tunelowego. Inaczej mówiąc, umożliwiają one precyzyjne wyznaczenie trzech wyszczególnionych położenia masy sejsmicznej, odpowiadających działaniu znanej wartości mierzonego przyspieszenia liniowego. W przypadku, gdy masa sejsmiczna znajdzie się w jednym z tych trzech wyszczególnionych położenia, odczytywane i zapamiętywane jest wskazanie akcelerometru realizowane za pomocą ruchomej okładki pomiarowej (4) i nieruchomych okładek pomiarowych (5a) i (5b), tworzących układ różnicowego kondensatora pomiarowego. Na podstawie zapamiętanych wskazań akcelerometru dla dwóch różnych wyszczególnionych położenia masy sejsmicznej możliwe jest dokonanie autokalibracji akcelerometru, polegającej na obliczeniu dwóch kluczowych parametrów użytkowych: składowej stałej SS oraz współczynnika skalowania WS sygnału wyjściowego. Zakładając, że detektor (7a) odpowiada działaniu przyspieszenia o zerowej wartości, a detektory (7b) i (7c) odpowiadają działaniu przyspieszenia równego 50% zakresu

25

30

47413/21/OCZ

pomiarowego ZP akcelerometru (wyrażonego jako wielokrotność g , gdzie g oznacza przyspieszenie ziemskie - około 10 m/s^2), to parametry SS i WS obliczamy według zależności:

1. w przypadku gdy zapamiętano wskazanie akcelerometru U_b odpowiadające pokryciu się elektrod (6) oraz (7b) - co przedstawiono na Fig. 3 i wskazanie akcelerometru U_a odpowiadające pokryciu się elektrod (6) i (7a) - co przedstawiono na Fig. 1: $SS = U_a$ i $WS = 2(U_b - U_a)/ZP$;
2. w przypadku gdy zapamiętano wskazanie akcelerometru U_c odpowiadające pokryciu się elektrod (6) oraz (7c) - co przedstawiono na Fig. 2 oraz wskazanie akcelerometru U_a odpowiadające pokryciu się elektrod (6) i (7a) - co przedstawiono na Fig. 1: $SS = U_a$ i $WS = 2(U_a - U_c)/ZP$;
3. w przypadku gdy zapamiętano wskazanie akcelerometru U_a odpowiadające pokryciu się elektrod (6) oraz (7b) - co przedstawiono na Fig. 3 oraz wskazanie akcelerometru U_c odpowiadające pokryciu się elektrod (6) i (7c) - co przedstawiono na Fig. 2: $SS = (U_b + U_c)/2$ i $WS = (U_b - U_c)/ZP$.

Autokalibracja umożliwia kalibrację osi czułości akcelerometru typu MEMS podczas jego działania bez dodatkowych przyrządów.

- 15 Zasada działania detektorów wyszczególnionych położen masy sejsmicznej polega na tym, że w momencie, kiedy na akcelerometr działa ustalone wcześniej przyspieszenie o ściłej wartości (np. równe np. 50% zakresu pomiarowego), to dany detektor generuje maksymalną wartość sygnału wyjściowego w wyniku wystąpienia minimalnej odległości pomiędzy elektrodą ruchomą i odpowiednią elektrodą nieruchomą – jest to np. maksymalna wartość prądu tunelowego. W momencie wygenerowania takiego sygnału odczytywane jest napięcie generowane przez główny przetwornik elektroniczny akcelerometru i zapisywane w pamięci układu autokalibracji. Następnie w sposób rekurencyjny, przy zastosowaniu przytoczonych wcześniej wzorów i wykorzystaniu wartości odpowiednich napięć zapamiętanych w poprzednim kroku, w układzie autokalibracji obliczane są wartości parametrów SS (składowa stała) i WS (współczynnik skalowania) i przesyłane do układu przetwarzania i kalibracji sygnału wyjściowego, gdzie są one przechowywane w pamięci tego układu w celu wyznaczenia wartości mierzonego przyspieszenia z większą precyzją.

- 25 Schemat budowy warstwy elektronicznej akcelerometru przedstawiono na Fig. 4. W głównym torze pomiarowym akcelerometru mierzone przyspieszenie a zamieniane jest na przemieszczenie masy sejsmicznej s , potem to przemieszczenie na zmianę pojemności kondensatorów różnicowych C , z kolei pojemność na napięcie U , które jest odpowiednio przetwarzane, konwertowane i kalibrowane. Mierzone przyspieszenie a oddziałuje także na

47413/21/OCZ

detektory wyszczególnionych położeń masy sejsmicznej, które generują maksymalną wartość sygnału wyjściowego (np. prądu) w sytuacji, kiedy przyspieszenie przyjmie ściśle ustaloną wartość.

5 W przypadku, kiedy akcelerometr będzie pracował w warunkach termicznych odmiennych od tych, dla których ustalono wartość przyspieszenia odpowiadającego generowaniu maksymalnego sygnału przez detektory wyszczególnionych położeń masy sejsmicznej, niezbędne jest skonstruowanie sprężystego zawieszenia masy sejsmicznej w taki sposób, żeby jego sztywność była niezależna od temperatury. Można to uzyskać dzięki kompensacji temperaturowej tego elementu konstrukcyjnego polegającej na takim doborze 10 kształtu, wymiarów oraz materiału zawieszenia sprężystego masy sejsmicznej, żeby zmiany wartości modułu sprężystości kompensowane były zmianami wymiarów zawieszenia. Tak skonstruowane zawieszenie sprężyste masy sejsmicznej cechuje się stałą wartością sztywności w wystarczająco szerokim zakresie zmian temperatury.

Opcjonalnie, w celu przeprowadzenia procesu autokalibracji wykorzystać można 15 zmodyfikowaną funkcjonalność autodiagnostyki (ang. "self-test"), cechującą się tym, że napięcie doprowadzane do siłownika elektrostatycznego narasta na tyle wolno, że możliwe jest zarejestrowanie maksymalnego sygnału z któregoś z detektorów wyszczególnionego położenia masy sejsmicznej z dużą precyzją. Dzięki takiej modyfikacji proces autokalibracji można wykonać na żądanie w dowolnym momencie, pod warunkiem, że w danej osi czułości 20 nie działa przyspieszenie o wartości powodującej pracę poza wyszczególnionym położeniem masy sejsmicznej, np. większe niż 50% zakresu pomiarowego ZP.

47413/21/OCZ

Lista oznaczeń odsyłających

| | |
|------------|---|
| 1 | Masa sejsmiczna |
| 2a, 2b | Zawieszenie sprężyste |
| 3a, 3b | Punkty połączenia zawieszenia sprężystego z nieruchomą podstawą akcelerometru |
| 4 | Ruchoma okładka pomiarowa |
| 5a, 5b | Nieruchome okładki pomiarowe |
| 6 | Ruchoma elektroda detekcyjna |
| 7a, 7b, 7c | Nieruchome elektrody detekcyjne |