

Tomasz KULCZAK*
Bartosz SZCZERBO*
Stefan BROCK*

WYKORZYSTANIE AKCELEROMETRU I ŻYROSKOPU MEMS DO POMIARU DRGAŃ W NAPĘDZIE BEZPOŚREDNIM O ZŁOŻONEJ STRUKTURZE MECHANICZNEJ

W pracy przedstawiono koncepcję, projekt i wyniki badań laboratoryjnych układu do pomiaru drgań w napędzie bezpośrednim. W konstrukcji układu wykorzystano wykonane w technologii MEMS akcelerometr i żyroskop (zawarte w układzie scalonym LSM9DS0). Algorytm wykorzystanego do fuzji sygnałów filtru komplementarnego został zaimplementowany na procesorze STM-32. Przeprowadzone zostały testy dla wybranych nastaw filtru komplementarnego. Wyniki badań potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań.

SŁOWA KLUCZOWE: drgania mechaniczne, napęd bezpośredni, filtr komplementarny, żyroskop, akcelerometr

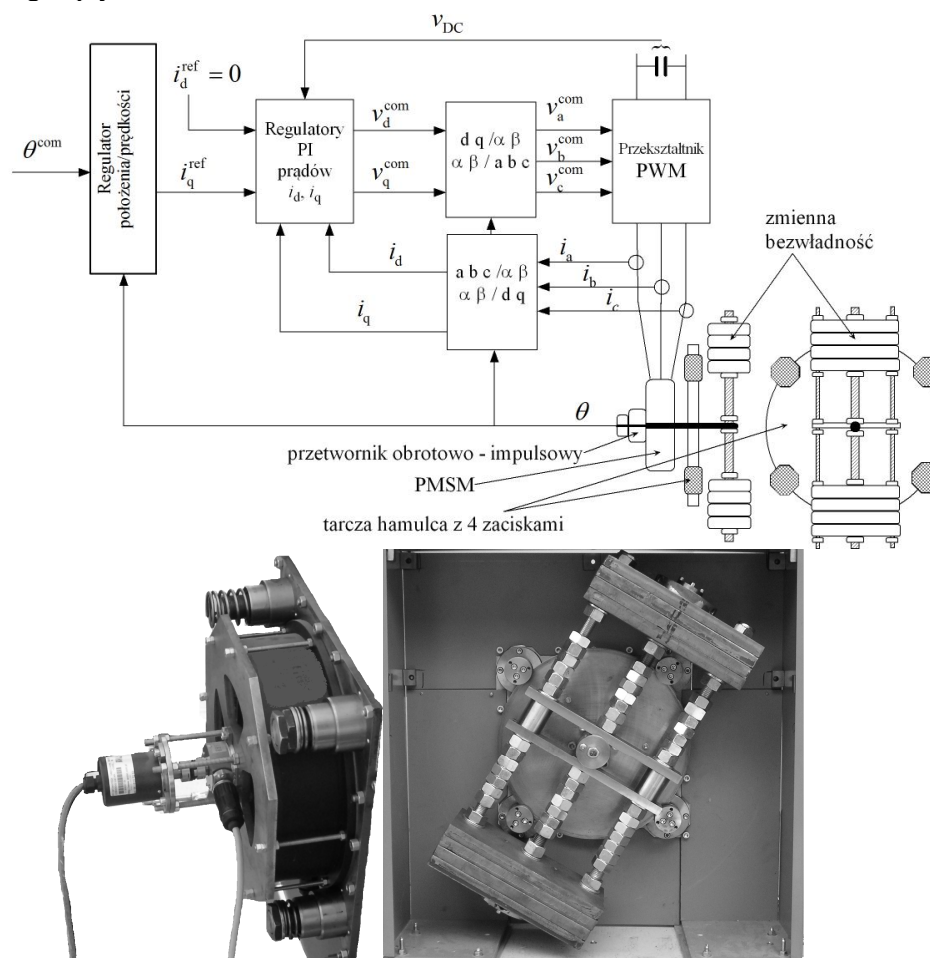
1. WPROWADZENIE

Współcześnie konstruowane maszyny technologiczne, zwłaszcza obrabiarki i roboty muszą spełniać rosnące oczekiwania odbiorców w zakresie szybkości i precyzji pracy. W takich warunkach pracy bardzo często istnieje konieczność uwzględnienia ograniczonej sztywności połączeń mechanicznych, tak by nie dopuścić do wystąpienia drgań rezonansowych konstrukcji. Wymagane jest zatem takie zaprojektowanie układu sterowania, które zapewni czasooptymalny (lub bliskie czasooptymalnemu) ruch urządzenia, nie wzbudzając jednocześnie niepożądanych oscylacji. Do grupy intensywnie rozwijanych metod należy na przykład sterowanie z kształtowaniem sygnału zadanego.

W Laboratorium Instytutu Automatyki i Inżynierii Mechanicznej zbudowane zostało stanowisko badawcze, służące do testowania zaawansowanych algorytmów sterowania ruchem napędu bezpośredniego na potrzeby obrabiarek i robotów. Na rysunku 1 przedstawiony jest szkic oraz widoki czołowy i boczny sta-

* Politechnika Poznańska.

nowiska laboratoryjnego. Konstrukcja mechaniczna składa się z dwóch ramion, na końcach których umieszczone są metalowe płyty. Ramiona napędzane są przez silnik synchroniczny z magnesami trwałymi. Zadanie układu sterowania polega na takim sterowaniu silnikiem, by zminimalizować drgania mechaniczne. Mierzone jest położenie wału silnika, nie ma natomiast możliwości pomiaru drgań płyt na końcach ramion.



Rys. 1. Szkic oraz widoki czołowy i boczny stanowiska laboratoryjnego

Dla oceny poprawności działania algorytmu sterowania zbudowano układ czujników do pomiaru drgań, wykorzystujący mikroczujniki wykonane w technologii układów elektromechanicznych MEMS (ang. *microelectromechanical system*). Są to czujniki wykonywane w skali nie przekraczającej 100 μm .

Postęp technologiczny umożliwił wykonywanie w tej technologii takich czujników jak akcelerometry, żyroskopy i magnetometry.

W rozdziale 2 przedstawiona została koncepcja pomiaru drgań mechanicznych na stanowisku laboratoryjnym. Rozdział 3 przedstawia strukturę opracowanego czujnika, natomiast w rozdziale 4 zawarte są wyniki badań laboratoryjnych.

2. KONCEPCJA POMIARU PRZYSPIESZENIA KĄTOWEGO

Drgania występujące w napędzie bezpośrednim są reprezentowane w postaci przyspieszenia kątownego. Przyspieszenie kątowe ε jest wielkością występującą tylko w ruchu obrotowym. Jest to tzw. pseudowektor leżący na osi obrotu. Jego wartość można wyliczyć korzystając ze wzoru (1):

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad [\text{rad/s}^2] \quad (1)$$

gdzie: ω – wartość prędkości kątownej, α – kąt przesunięcia.

Do pomiarów użyte zostały dwa czujniki mikroelektromechaniczne. Użycie dwóch czujników pozwoli znacząco polepszyć jakość wyników, poprzez wykorzystanie tylko prawidłowych pomiarów z każdego sensora. Do realizacji pracy zostały wybrane sensory mierzące prędkość kątową (żyroskop) oraz przyspieszenie liniowe (akcelerometr).

2.1. Dane z akcelerometru

Akcelerometr jest to czujnik, którego wartością wyjściową jest przyspieszenie liniowe reprezentowane w trzech osiach x , y i z . Akcelerometr najlepsze wyniki pomiarów uzyskuje dla wolno zmiennych wartości. Przy dużych częstotliwościach występują zakłócenia (szumy).

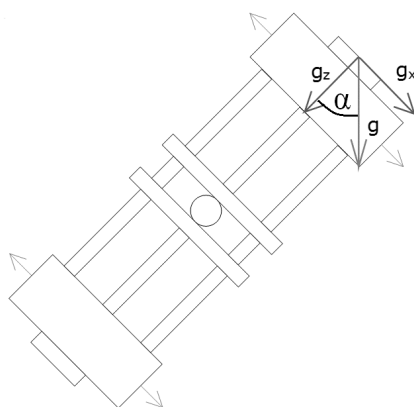
Zachowanie akcelerometru w przypadku, gdy ramiona znajdują się w pozycji 45° przedstawione zostało na rysunku 2. Wektor g oznacza przyspieszenie grawitacyjne, natomiast g_z oraz g_x odpowiednio wektory przyspieszeń rejestrowanych przez akcelerometr. Każda z osi reprezentuje jedną ze składowych wektora grawitacji. Dane, które zostają wysyłane z akcelerometru do nadrzędnego układu sterowania nie są bezpośrednio użyteczne w układzie pomiarowym. Należy je odpowiednio przeliczyć, z układu osi kartezjańskich do układu lokalnego, związanego z ramieniem napędu. Wykorzystanie akcelerometru pozwoli określić aktualne położenie ramion, co zaprezentowano na rysunku 2. Akcelerometr w projekcie odpowiada za wyznaczanie wolnych zmian położenia.

Na podstawie g_z oraz g_x , wykorzystując funkcję cyklometryczną arcus tangens można w prosty sposób wyznaczyć kąt wychylenia układu α (2):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{g_x}{g_z}\right) \quad (2)$$

Na potrzeby pracy musi zostać wyznaczona wartość prędkości kątovej. Dlatego zostaje wyznaczona pochodna po czasie z kąta α przy pomocy wzoru (3):

$$\frac{d\alpha}{dt} \approx \frac{\alpha_k - \alpha_{k-1}}{\Delta t} \quad (3)$$



Rys. 2. Odchylenie obiektu od pionu względem osi Y, g - wektor przyspieszenia ziemskiego, g_z i g_x - składowe wektora przyspieszenia ziemskiego, które są odczytane z akcelerometru

2.2. Dane z żyroskopu

Żyroskop to czujnik, którego wartością wyjściową jest sygnał proporcjonalny do składowych prędkości kątovej zorientowanej w układzie kartezjańskim. W przypadku żyroskopu obserwowany jest tak zwany błąd zera, czyli dryf – zależy on m.in. od temperatury. W związku z tym nie nadaje się on do obserwacji zmian wolno zmiennych. Na potrzeby pracy potrzebna jest wartość prędkości kątovej. Jest to wielkość wyjściowa żyroskopu w związku z tym nie potrzeba poddawać jej obróbce.

2.3. Wykorzystanie filtru komplementarnego do fuzji danych z czujników

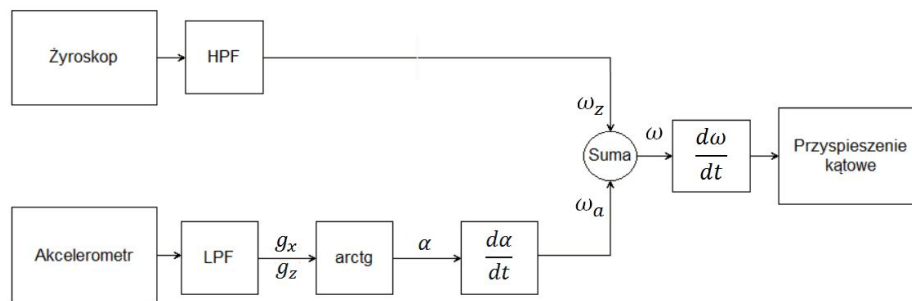
Ideą filtru komplementarnego jest fuzja danych z dwóch różnych czujników, z których każdy jest nieidealny. Zasada działania filtru polega na wzajemnym dopełnianiu lub uzupełnianiu się czujników. Celem takiego działania jest wykorzystanie najistotniejszej informacji jaką niesie dany sygnał, przy jednoczesnym pominięciu tej jego części, w której czujnik jest mało efektywny. Niewątpliwie najważniejszą zaletą tego sposobu fuzji danych jest prostota jej implementacji

oraz niska moc obliczeniową jakiej wymaga. Konstrukcja filtra powinna spełniać ogólną zależność przedstawioną wzorem (4):

$$\sum_{i=1}^N F_i(s) = 1 \quad (4)$$

gdzie: F_i to transmitancje poszczególnych składowych filtru.

W uproszeniu sposób działania wykorzystanego w pracy filtra komplementarnego prezentuje rysunek 3.



Rys. 3. Diagram przedstawiający działanie algorytmu

Stosując filtr komplementarny zostaną wykorzystane dane z akcelerometru oraz żyroskopu [3]. W przypadku akcelerometru, który ma dobre właściwości metrologiczne dla sygnałów wolnozmiennych i gorsze dla sygnałów szybkozmiennych (ponieważ jest zakłócony szumem), wykorzystano filtr dolnoprzepustowy (LPF – ang. *Low Pass Filter*), zaimplementowany w postaci inercji I rzędu (5):

$$LPF = \frac{1}{1 + Ts} \quad (5)$$

gdzie: T jest stałą czasową elementu inercyjnego i określa właściwości dynamiczne filtra. Z drugiego z wymienionych czujników należy wyeliminować składową wolnozmienną, tak aby zlikwidować dryf, zatem wykorzystany zostanie filtr górnoprzepustowy (HPF – ang. *High Pass Filter*). Zgodnie z zasadą komplementarności wynikającą z zależności (4), filtr górnoprzepustowy ma postać (6):

$$HPF = 1 - LPF = \frac{Ts}{1 + Ts} \quad (6)$$

Dla zaimplementowania algorytmu filtra komplementarnego w układzie mikroprocesorowym należało dyskretyzować elementy dynamiczne w dziedzinie czasu. W tym wypadku zostało wykorzystane przybliżenie różniczkowania w czasie ze schematem różnicy wstecznej (ang. *backward Euler method*):

$$s = \frac{\Delta df(t)}{dt} \cong \frac{f(t) - f(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (7)$$

który sprowadza się do uzyskania podstawienia:

$$s = \frac{\Delta}{\Delta t} \frac{1 - z^{-1}}{z} = \frac{1 - z^{-1}}{\Delta t(1 - z^{-1})} \quad (8)$$

gdzie: z^{-1} jest operatorem opóźnienia o jeden okres próbkowania Δt .
Oznaczając jako:

$$LPF = \frac{\hat{\alpha}^A}{\alpha^A} \quad HPF = \frac{\hat{\alpha}^G}{\alpha^G} \quad (9)$$

oraz wstawiając do transmitancji (5) i (6) zależność (8) otrzymuje się dyskretne transmitancje filtrów:

$$\hat{\alpha}_k^G \frac{\frac{T}{\Delta t(1 - z^{-1})}}{(1 + \frac{T}{\Delta t}) - \frac{T}{\Delta t} z^{-1}} \alpha_k^G \quad \hat{\alpha}_k^A \frac{1}{(1 + \frac{T}{\Delta t}) - \frac{T}{\Delta t} z^{-1}} \alpha_k^A \quad (10)$$

Uwzględniając równanie filtru komplementarnego:

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_k^A + \hat{\alpha}_k^G \quad (11)$$

można otrzymać pełen opis, który po przekształceniach i zastosowaniu podstawienia $\xi = T/\Delta t + T$ ma następującą postać (12):

$$\hat{\alpha}_k = (1 - \xi) \alpha_k^A + \xi \alpha_k^G \quad (12)$$

Nie można bezpośrednio zsumować danych z żyroskopu wraz z danymi z akcelerometru ponieważ są to dwie różne wartości fizyczne (prędkość i przyspieszenie ziemskie). Muszą one zostać uprzednio odpowiednio przygotowane. Z akcelerometru pobierane są wartości przyspieszenia liniowego w osiach OX oraz OZ . Następnie przy użyciu funkcji cyklometrycznej arcus tangens obliczane jest położenie kątowne α , z którego pochodna po czasie wyznacza prędkość kątową ω_a wyliczoną na podstawie danych z akcelerometru. Z żyroskopu natomiast pobierana jest prędkość kątowna ω_z w osi OY . Otrzymane prędkości są sumowane według wzoru (13). Współczynnik ξ określa jaki wpływ ma każdy z czujników na ostateczny wynik (13):

$$x_k = \xi \omega_z + (1 - \xi) \omega_a \quad (13)$$

gdzie: ω_a – prędkość kątowna z akcelerometru, ω_z – prędkość kątowna z żyroskopu, ξ – współczynnik wagowy.

Wartością wyjściową z algorytmu jest prędkość kątowna. Aby uzyskać przyspieszenie kątowne, opisujące drgania mechaniczne, należy zrealizować różniczkowanie numeryczne. Dla otrzymania dobrych efektów w pracy został wyko-

rzystany wzór numeryczny na pochodną, który opiera się na trzech punktach (14):

$$x'_{k-1} = \frac{x_k - x_{k-1}}{2\Delta t} \quad (14)$$

3. STRUKTURA SPRZĘTOWA I PROGRAMOWA UKŁADU POMIAROWEGO

3.1. Założenia projektowe

Na potrzeby zadania zaprojektowany został dwuczęściowy układ mikroprocesorowy. Pierwszą częścią jest nadrzędny układ sterowania znajdujący się poza konstrukcją. Nadrzędny układ jest połączony przewodowo z układem MEMS (w skład którego wchodzi przedstawione czujniki), zamocowanym na końcach ramion układu laboratoryjnego. Z nadrzędnego układu sterowania dane w wersji finalnej, poprzez przetwornik cyfrowo-analogowy DAC przesyłane są w postaci napięcia do urządzenia umożliwiającego obserwację i rejestrację.

3.2. Struktura sprzętowa układu pomiarowego

Kluczowym elementem jest nadrzędny układ sterowania, za który będzie odpowiadał zestaw uruchomieniowy STM32VL Discovery. Zestaw ewaluacyjny został wyposażony w mikrokontroler STM32F100RBT6B [2] i stanowi kompletny system, który pozwala na uruchamianie programów oraz obserwację efektów ich działania. Najważniejszym kryterium podczas wyboru tego układu był 32-bitowy rdzeń procesora o taktowaniu na poziomie 24 MHz. Było to uwarunkowane wymaganiami obserwacji drgań z częstotliwością rzędu 600 Hz, dlatego szybkość przetwarzania danych była najważniejszą sprawą.

Kolejnym kluczowym elementem w projekcie jest moduł czujnikowy firmy Adafruit, zawierający czujnik LSM9DS0 [5]. Czujnik jest połączeniem 3-osowego cyfrowego żyroskopu, akcelerometru i magnetometru. Gotowy moduł Adafruit zawiera wspomniany czujnik z wbudowanym konwerterem napięć (współpracuje z 3,3 V oraz 5 V). Czujnik ma wysoką, 16-bitową rozdzielczość oraz szerokie, regulowane zakresy pomiarów:

- przyspieszenia liniowe (akcelerometr) w zakresach: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$,
- prędkości kątowe (żyroskop) w zakresach: ± 245 , ± 500 oraz ± 2000 deg/s.

Obie części układu połączone są 8 żyłowym, ekranowanym przewodem, zakończonym złączami DB-9, co ułatwia łączenie i rozłączanie układu. Przy użyciu przewodu przesyłane są dane z czujnika do nadrzędnego układu sterowania. Komunikacja między częściami układu jest komunikacją szeregową i wykorzystuje interfejs komunikacyjny SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*).

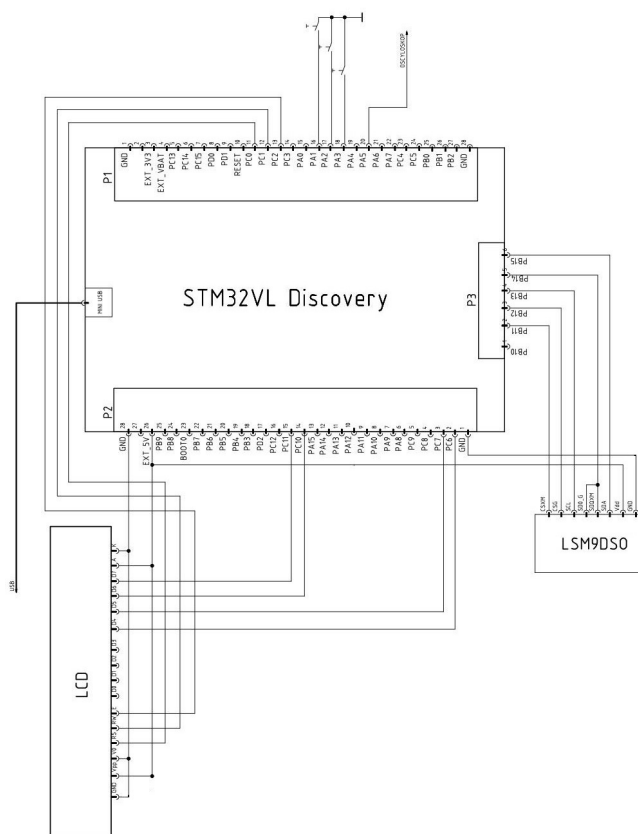
Układ wyposażony jest także w układy interfejsu operatora, takie jak przyciski monostabilne i wyświetlacz, które służą do zmiany parametrów rejestratora drgań. Możliwa jest zmiana dwóch parametrów:

- częstotliwość próbkowania: od 600 Hz do 1400 Hz,
- wzmocnienie reprezentowane w rad/s^2 przypadających na 1 V: od 5000 do 50000.

Schemat ideowy układu znajduje się na rysunku 4.

3.3. Struktura programowa układu pomiarowego

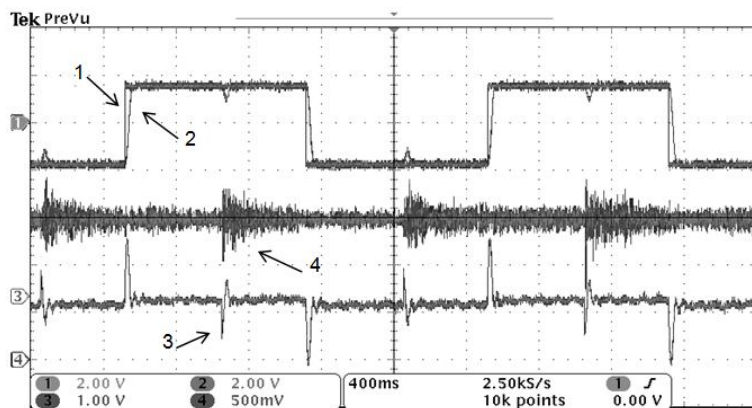
W celu poprawnego funkcjonowania zaprojektowanego układu sporządzono algorytm sterowania oraz zaimplementowano program sterujący. Główny program odpowiada za obsługę układów peryferyjnych, komunikację szeregową z modułem czujnikowym oraz realizację algorytmu filtracji danych. Cały program sterujący i obsługujący układ został opisany szczegółowo w [4].



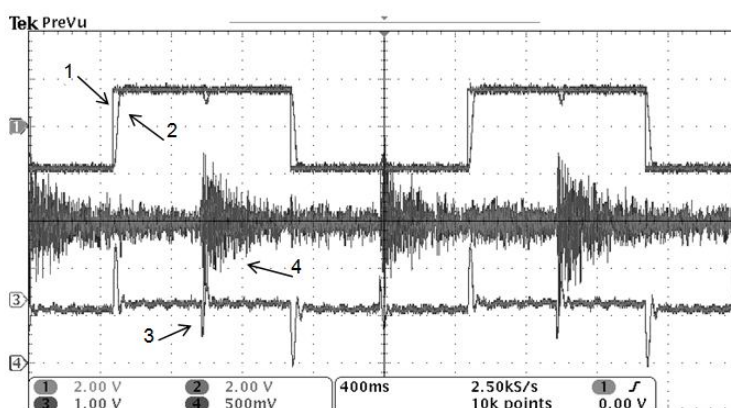
Rys. 4. Schemat ideowy układu

4. WERYFIKACJA LABORATORYJNA DZIAŁANIA UKŁADU

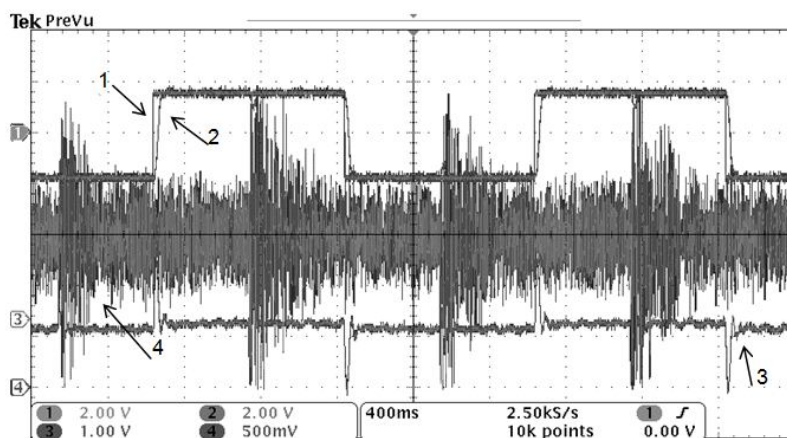
W celu weryfikacji poprawności działania układu należało wykonać testy z uruchomionym napędem bezpośrednim. Podczas jego pracy w odpowiednich chwilach czasu było włączane wirtualne obciążenie, które wprawiało konstrukcję w drgania. Obciążenie było emulowane poprzez skokowe zmiany składowej prądu zadanego silnika. Taki test wywołuje analogiczny efekt do skokowej zmiany momentu obciążenia mechanicznego. Poszczególne przebiegi odznaczone cyframi na każdym rysunku mają to samo znaczenie: 1 – zadana prędkość, 2 – prędkość rzeczywista, 3 – prąd płynący przez silnik oraz 4 – rejestrowane drgania. Na rysunkach 5, 6 i 7 zostały przedstawione przebiegi dla trzech różnych wartości stałej czasowej filtrów T .



Rys. 5. Przebieg wielkości dla stałej czasowej $T = 49$ ms



Rys. 6. Przebieg wielkości dla stałej czasowej $T = 24$ ms

Rys. 7. Przebieg wielkości dla stałej czasowej $T = 9$ ms

Jak można zaobserwować największe drgania występują w chwili włączenia obciążenia, dotyczy to wszystkich rysunków. Z przeprowadzonych testów wynika, iż najbardziej czytelne wartości drgań w postaci przyspieszenia kąowego udało się uzyskać dla stałej czasowej $T = 24$ ms, czyli współczynnik wagowy wynosi $\zeta = 0,96$. W przypadku doboru krótszej stałej czasowej zwiększa się udział szumów w sygnale pomiarowym, natomiast w przypadku dłuższej stałej czasowej istotne, szybkozmienne sygnały drgań zostają nadmiernie stłumione. Dokładna wartość parametru stałej czasowej filtra komplementarnego powinna być zatem dobierana dla konkretnego układu mechanicznego.

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowany w pracy czujnik drgań mechanicznych został zastosowany na stanowisku laboratoryjnym. Dane zebrane przez czujnik posłużą do oceny skuteczności działania algorytmów sterowania z kształtowaniem sygnału zadanego. Przeprowadzone badania potwierdziły prawidłową pracę układu pomiarowego. Jednocześnie trwają prace nad wprowadzeniem sygnału z opracowanego czujnika bezpośrednio w tor sprzężenia zwrotnego układu sterowania. Wymaga to jednak przeprowadzenia dalszych prac, zwłaszcza w zakresie kalibracji.

LITERATURA

- [1] Colton S., The Balance Filter; Colton, Shane, and F. R. C. Mentor. "The balance filter." *Presentation, Massachusetts Institute of Technology* 2007.
- [2] Galewski M., STM32. Aplikacje i ćwiczenia w języku C. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2011.

- [3] Grygiel R., Bieda R., Wojciechowski K., Metody wyznaczania kątów z żyroskopu dla filtru komplementarnego na potrzeby określenia orientacji IMU. Przegląd Elektrotechniczny nr 9/2014, s. 217-224.
- [4] Kulczak T., Szczerbo B, Mikroprocesorowy układ pomiaru drgań dla napędu bezpośredniego – praca zbiorowa, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Poznańska, 2016.
- [5] Witeczak A., Czujnik inercyjny LSM9DS0 oraz jego zastosowanie praktyczne. Elektronika Praktyczka nr 2/2005, s. 39-43.
- [6] Wnuk M., Filtracja komplementarna w inercyjnych czujnikach orientacji. Instytut Informatyki Automatyki i Robotyki Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR nr 3/2014.

**VIBRATION MEASUREMENT OF DIRECT DRIVE
WITH A COMPLEX MECHANICAL STRUCTURE USING
THE MEMS ACCELEROMETER AND GYROSCOPE**

The paper presents the concept, design and results of laboratory tests for the measurement of vibrations in the direct drive. In the system accelerometer and gyroscope MEMS (included in the chip LSM9DS0) has been used. The complementary filter algorithm, used for fusions of the signals, has been implemented on the STM-32 microcontroller. Tests were conducted for the selected complementary filter settings. The results confirmed the appropriateness of the solutions

(Received: 3. 03. 2016, revised: 9. 03. 2016)