

Analiza drgań oraz wyważanie urządzeń wirnikowych metodą amplitudowo-fazową z wykorzystaniem czujników i oscyloskopu cyfrowego

Vibration analysis and balancing of rotating devices using amplitude-phase method, with the use of sensor and digital scope

SŁAWOMIR ŁUNIEWSKI *

Materiały z XX SKW PWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.156

Artykuł omawia zagadnienia analizy drgań oraz wyważania urządzeń wirnikowych metodą amplitudowo-fazową z wykorzystaniem wyłączników czujników i oscyloskopu cyfrowego. Wyważaniu poddany został prototyp wirnika wyświetlacza wirującego. Celem badania było zniwelowanie niewyważenia wirnika, jak również potwierdzenie zasadności opracowanego sposobu wyważania.

SŁOWA KLUCZOWE: wyważanie, metoda amplitudowo-fazowa, oscyloskop cyfrowy, szybka transformata Fouriera, wyświetlacz wirujący

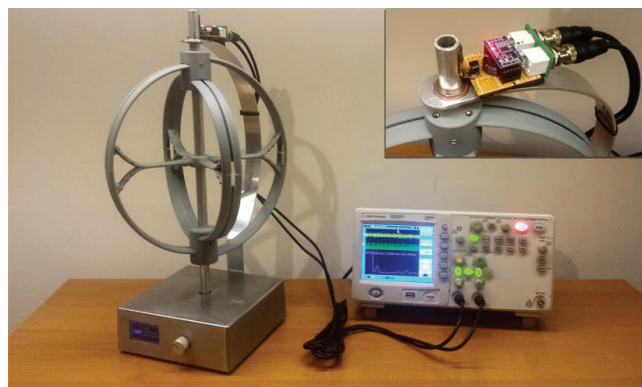
Article deals issues vibration analysis and balancing of rotating devices using amplitude-phase method, with the use only sensors and digital scope. The balancing has been subjected to a prototype rotor of the rotating display. The aim of the study was to overcome the unbalance of the machine, as well as confirmation of the developed balancing method.

KEYWORDS: balancing, method by measuring amplitude and phase, digital scope, fast Fourier transform, rotating display

Każdy mechanik konstruujący urządzenie wirnikowe musi już na etapie projektowania przewidzieć proces wyważania, aby uniknąć późniejszych uszkodzeń podczas eksploatacji maszyny. Wyważanie jest operacją zmniejszania niewyważenia za pomocą korekcji masy wirnika. Zabiegowi podlegają zarówno maszyny produkowane seryjnie, jak również ich prototypy. Metod niwelowania niewyważenia jest wiele, jednak prawie zawsze wymagają korzystania ze specjalistycznych, kosztownych urządzeń, na które często małe pracownie lub laboratoria nie mogą sobie pozwolić. Empiryczna metoda korekcji mas jest czasochłonna i często nie przynosi oczekiwanych efektów. Dodatkowo demontowanie wirników w celu wyważenia jest kłopotliwe lub w niektórych przypadkach niemożliwe ze względu na konstrukcję maszyny. Pracę personelu dokonującego wyważania znacząco ułatwiło wykorzystanie metody amplitudowo-fazowej polegającej na równoczesnym pomiarze amplitudy oraz fazy drgań wirnika. Do niewątpliwych zalet metody należy możliwość wyważania wirnika w łożyskach własnych maszyny jedynie przy dwóch jej uruchomieniach. Bazując na metodzie amplitudowo-fazowej, został opracowany sposób wyznaczenia położenia i wartości masy korekcyjnej dla wirników urządzeń, który wymaga użycia jedynie dwóch czujników pomiarowych oraz oscyloskopu cyfrowego. Pierwszy wykorzystany czujnik – akcelerometr analogowy – umożliwia zbadanie amplitudy drgań, drugi pozwala wyznaczyć ich fazę. Pomiar i wyświetlanie, a także analizę danych z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera umożliwia oscyloskop cyfrowy. Proces wyważania oparty na metodzie amplitudowo-fazowej i wykorzystaniu wspomnianego sposobu zostanie zaprezentowany na prototypowym wirniku wyświetlacza wirującego.

Omówienie metod wyważania

Stanem niewyważenia urządzenia wirnikowego nazywamy stan określony takim rozkładem masy, który w czasie wirowania wywołuje zmienne obciążenia na podporach wirnika i jego zginanie. W przypadku wirników sztywnych, a na takich skupiono się w niniejszym opracowaniu, jest to równoważne z niepokryciem się centralnej głównej osi bezwładności z osią wirnika. Do podstawowych rodzajów niewyważań zaliczamy: statyczne, momentowe, quasi-statyczne oraz dynamiczne. Z niewyważeniem statycznym mamy do czynienia, kiedy osi wirnika i jego centralna, główna oś bezwładności są równoległe. Wyważanie w takim przypadku polega na korekcji masy tylko w jednej płaszczyźnie, przechodzącej przez środek ciężkości. Przesuwana jest wówczas centralna, główna oś bezwładności o wartość mimośrod, aż do jej pokrycia z osią wirnika. Kolejnym rodzajem niewyważenia jest niewyważenie momentowe. Opisuje ono stan, w którym osi wirnika i jego centralna, główna oś bezwładności przecinają się w środku ciężkości wirnika. Niewyważenie momentowe można zrównoważyć parą mas umieszczonych w dwóch płaszczyznach korekcji. W ten sposób centralna, główna oś bezwładności obraca się względem środka ciężkości o odpowiedni kąt, aż do pokrycia się z osią wirnika. Następny typ niewyważenia zwanego quasi-statycznym jest złożeniem niewyważenia statycznego oraz momentowego. Masa niewyważenia w wirniku znajdującym w takim stanie jest umieszczona w płaszczyźnie poprzecznej, nieprzechodzącej przez środek ciężkości wirnika. Niewyważenie quasi-statyczne można usunąć za pomocą wyważenia wirnika w jednej płaszczyźnie poprzecznej, której położenie określone jest na podstawie odpowiednich warunków równowagi momentów niewyważań. Najogólniejszym stanem niewyważenia wirnika jest niewyważenie dynamiczne, w którym osi wirnika i jego centralna, główna oś bezwładności są skośne. Niewyważenie zmniejsza się za pomocą wyważania dynamicznego: jednopłaszczyznowego lub dwupłaszczyznowego.



Rys. 1. Stanowisko do wyważania z badanym urządzeniem wirnikowym

* Mgr inż. Sławomir Łuniewski (slawomir.luniewski@wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna

Proces wyważania dynamicznego można zrealizować za pomocą jednej z trzech metod:

- metodą amplitudową, np. metodą prób lub metodą trzech uruchomień,
- metodą fazową, np. metodą kresek obwodowych,
- metodą amplitudowo-fazową.

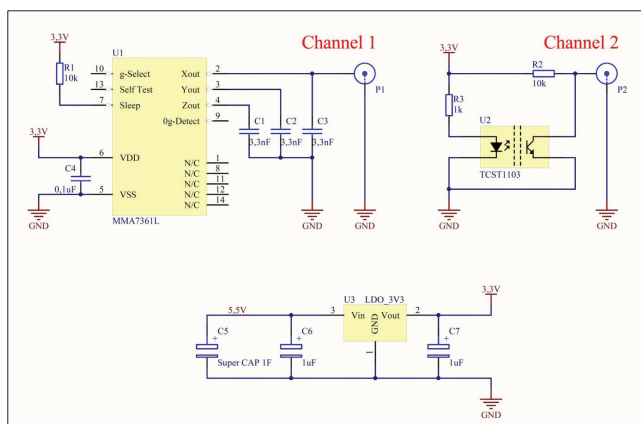
Opis procesu wyważania metodą amplitudowo-fazową z wykorzystaniem układu czujników oraz oscyloskopu cyfrowego

Wyważanie metodą amplitudowo-fazową można przeprowadzić za pomocą dwukrotnego uruchomienia wirnika: pierwszy raz bez masy próbnej i drugi raz z masą próbną. Przy każdym uruchomieniu mierzy się amplitudę i względną zmianę kąta fazowego drgań łożyska znajdującego się najbliższej płaszczyzny korekcyjnej. Przy wyważaniu prototypu wirnika wyświetlacza wirującego wyeliminowano potrzebę stosowania specjalistycznej aparatury. Pomiary wykonano z wykorzystaniem akcelerometru analogowego i transoptora szczelinowego. Analizę wyników umożliwił natomiast oscyloskop cyfrowy wraz z dostępnymi funkcjami matematycznymi.

Do pomiarów amplitudy drgań został wybrany moduł z 3-osiowym akcelerometrem MMA7361L o niskim poborze prądu i zakresie pomiarowym ± 6 g. Jedno z wyjść czujnika, dające informację o przyspieszeniu w osi X, zostało podłączone do pierwszego kanału oscyloskopu.

Drugim zastosowanym czujnikiem był transoptor szczelinowy TCST1103, który zapewnił odczyt położenia kąтового badanego wirnika, co pozwoliło uzyskać kąt fazowy drgań. Wyjście sensora optycznego podłączono z drugim kanałem oscyloskopu.

Do zasilenia układu posłużył superkondensator o pojemności 1 F. Po naładowaniu go do 5,5 V umożliwił pracę czujników przez 10 min. Zastosowanie takiego źródła energii pozwoliło wyeliminować szumy charakterystyczne dla zasilaczy impulsowych, mogące wpłynąć na wyniki pomiarów. Zaletą superkondensatora jest również krótki czas ładowania. Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 2.

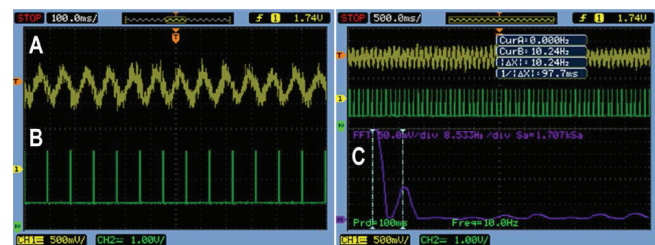


Rys. 2. Schemat ideowy układu pomiarowego

Kluczowym elementem omawianego systemu do wyważania wirników maszyn jest oscyloskop cyfrowy, który umożliwia pełne zobrazowanie stanu niewyważenia modelu. Do badań wykorzystano produkt firmy Keysight Technologies z serii DSO1000A/B. Oscyloskop charakteryzuje się częstotliwością próbkowania na poziomie 2 GSPS i pasmem szerokości 60MHz. Takie parametry w zupełności wystarczają do omawianego typu badań. Ponadto kolorowy, czytelny wyświetlacz umożliwia bezpośrednią analizę danych, natomiast wbudowany interfejs USB pozwala na zapis do pamięci przenośnej oscylogramów i parametrów pomiarów.

Zgodnie z zasadą wyważania jednopłaszczyznowego unieruchomione zostało jedno z łożysk wirnika. Wirnik jako ciało sztywne wykonywał drgania wahadłowe wokół środka unieruchomionego łożyska. Przebieg drgań na bieżąco można było obserwować na ekranie oscyloskopu. Ze względu na dodatkowe drgania i wibracje układu pomiarowego, pochodzące m.in. z silnika napędzającego wirnik, bezpośredni pomiar amplitudy sygnału obarczony był wyraźnym błędem. Rozwiązaniem problemu okazało się zastosowanie funkcji szybkiej transformacji Fouriera – FFT (*Fast Fourier Transform*). Odpowiednia kalibracja umożliwiła wyświetlenie skutecznej wartości napięcia V_{RMS} w odniesieniu do częstotliwości. Znając prędkość obrotową wirnika, należało jedynie dla odpowiedniej jej częstotliwości odczytać wartość napięcia, która jest wprost proporcjonalna do amplitudy drgań.

Pomiar kąta fazowego drgań umożliwiło sprzężenie z oscyloskopem transoptora szczelinowego. Na wirniku została umocowana przesłona, powodująca wygenerowanie impulsu na wyjściu czujnika w chwili, gdy oba elementy znajdowały się naprzeciwko siebie. Zobrazowany na oscyloskopie odstęp czasu między impulsem położenia wirnika a szczytem amplitudy drgań w odniesieniu do okresu obrotu pozwolił określić kąt niewyważenia.

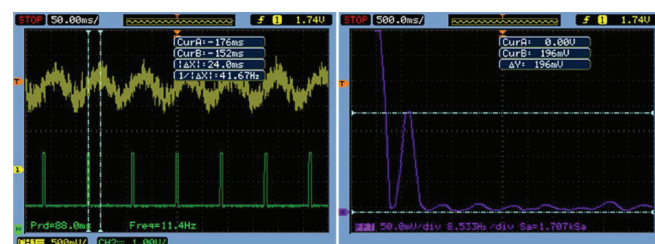


Rys. 3. Oscylogramy przedstawiające przykładowe przebiegi: A – sygnał drgań z akcelerometru analogowego MMA7361L; B – sygnał położenia wirnika z transoptora szczelinowego TCST1103; C – sygnał drgań transformowany w dziedzinę częstotliwości

Wyważenie wirnika wyświetlacza wirującego

Badania polegające na zdiagnozowaniu parametrów niewyważenia oraz korekcji mas zostały przeprowadzone na prototypowym modelu wyświetlacza wirującego. Jego wirujący element składa się z umieszczonej w osi obrotu rury aluminiowej oraz czterech ramion o różnej długości, wykonanych z tworzywa sztucznego. Na ramionach zostały przewidziane miejsca do mocowania mas korekcyjnych. Ze względu na kształt wirnika charakteryzującego się symetrią względem poprzecznej płaszczyzny przechodzącej przez środek ciężkości, przyjęto, że w układzie będzie rozpatrywany stan niewyważenia statycznego.

Procedura jednopłaszczyznowego wyważania wirnika została podzielona na kilka etapów. Na wstępie uruchomione zostało urządzenie i po ustabilizowaniu się prędkości na poziomie 600 obr/min odczytano amplitudę oraz fazę drgań. Wielkości utworzyły wektor \vec{W} , który umieszczony został na wykresie współrzędnych biegunowych. Faza wektora odpowiada kątowi przesunięcia między szczytami amplitudy drgań a impulsami



Rys. 4. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów podczas pierwszego uruchomienia urządzenia (bez masy kalibracyjnej i korekcyjnej)

położenia wirnika, mierzonemu w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wirnika. Amplituda wektora jest natomiast proporcjonalna do amplitudy zmierzonych drgań. Przebiegi sygnałów z zaznaczonymi charakterystycznymi parametrami zostały przedstawione na rys. 4.

Drugim krokiem było zamontowanie na wirniku masy kalibracyjnej oraz określenie jej wpływu na drgania. Masa kalibracyjna, zwana masą próbną, powinna być tak dobrana, aby jej położenie spowodowało zmniejszenie amplitudy drgań lub przynajmniej nie wpłynęło na jej zwiększenie. Wartość masy kalibracyjnej została oszacowana według wzoru:

$$m_c = \frac{0,05 \cdot m_r \cdot g}{r_c \cdot \omega^2} \quad (1)$$

gdzie:

m_r – masa wirnika [g]; dla badanego wirnika przyjęto 500 g,

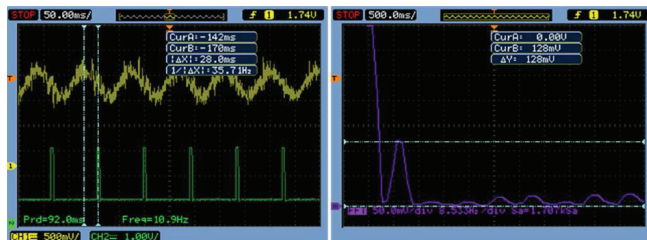
r_c – mimośrodek zamocowania masy kalibracyjnej [m]; przyjęto 0,1 m,

ω – częstość obrotowa wirnika [rad/s]; przyjęto 20π ,

g – przyspieszenie ziemskie $9,81$ [m/s²],

m_c – masa kalibracyjna [g].

Masa próbna oszacowana na 0,6 g została zamocowana po przeciwnej stronie kąta zmierzonego jako faza drgań. Następnie urządzenie zostało uruchomione i po ustabilizowaniu się prędkości obrotowej odczytano na ekranie oscyloskopu charakterystyczne parametry (rys. 5). Wartości amplitudy i fazy drgań utworzyły na wykresie współrzędnych biegunowych wektor \vec{U} . Odejmując od wektora \vec{U} wektor \vec{W} (narysowany na podstawie pierwszego pomiaru), otrzymujemy wektor \vec{Z} , który określa odpowiedź wirnika na dołożoną masę kalibracyjną. Diagram wektorowy przedstawiający wykonane działania został przedstawiony na rys. 6.



Rys. 5. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów podczas drugiego uruchomienia urządzenia (z zamocowaną masą próbną)

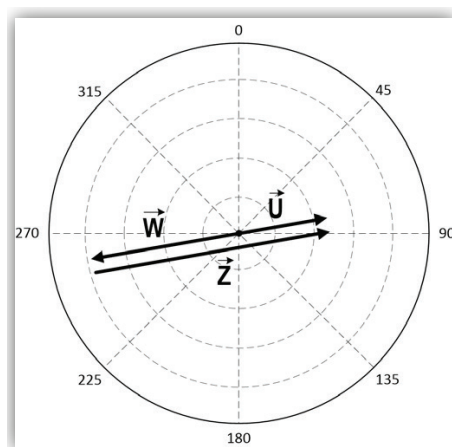
Ostatnim etapem (tzw. sprawdzającym) było obliczenie i zamocowanie masy korekcyjnej. Zmiana drgań spowodowana dołożeniem masy korekcyjnej powinna być równa co do wartości, lecz przeciwna w fazie drganiom zmierzonych w pierwszym przebiegu. Zakładając liniową zależność zmian drgań od wielkości dołożonej masy, można skorzystać ze wzoru:

$$m_k = m_c \frac{|W|}{|Z|} \quad (2)$$

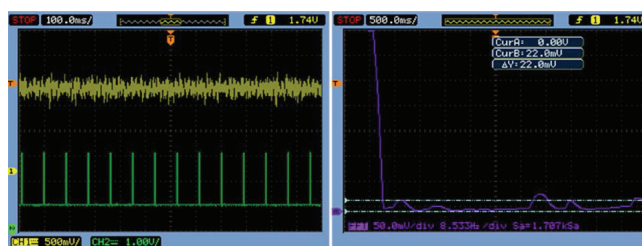
gdzie m_k oznacza masę korekcyjną.

Położenie masy korekcyjnej różni się od położenia masy próbnej o kąt równy kątowi między wektorem \vec{Z} a wektorem \vec{W} . W przypadku badanego obiektu kąt ten wynosił 180° , a masa kalibracyjna 0,36 g. Ze względu na to, że masa próbna oraz korekcyjna nie mogły być dodane w wyznaczonym położeniu, podzielono je proporcjonalnie pomiędzy dwa najbliższe miejsca mocowania.

W celu upewnienia się, że maszyna została właściwie wyważona, zaleca się jej uruchomienie oraz sprawdzenie rezulta-



Rys. 6. Układ współrzędnych biegunowych z naniesionym diagramem wektorowym przedstawiającym niewyważenie wirnika



Rys. 7. Oscylogramy przedstawiające przebiegi sygnałów po zakończeniu wyważania (z zamocowaną masą korekcyjną)

tów, wykonując ostatni pomiar. Dla badanego modelu rejestracja sygnałów przedstawiona na rys. 7 potwierdza poprawność wykonania procesu korekcji mas, a jednocześnie przydatność opracowanego sposobu wyważania, będącego przedmiotem niniejszego artykułu.

Podsumowanie

Zaprezentowany sposób analizy drgań i wyważania metodą amplitudową oraz fazową wykorzystujący oscyloskop cyfrowy, akcelerometr i transoptor jest w stanie konkurować z metodami wymagającymi specjalistycznej, dedykowanej aparatury, a w części przypadków zastąpić. W zależności od potrzeb istnieje możliwość rozbudowania układu o dodatkowy zestaw czujników pomiarowych. W ten sposób możliwe stałyby się przeprowadzenia wyważania dynamicznego, polegającego na dodatkowym badaniu wzajemnego wpływu niewyważenia w dwóch płaszczyznach korekcji. Dobre sensory pomiarowe nie wykluczają użycia innych, kompatybilnych czujników. Zastosowany oscyloskop cyfrowy umożliwił przedstawienie pełnego stanu niewyważenia wirnika oraz zapewnił pomiar i analizę poszczególnych parametrów. Badanie danych pochodzących z akcelerometru ułatwiłoby zapewne wąskopasmowe filtrowanie sygnału. Funkcja filtru cyfrowego w wykorzystywanym oscyloskopie była niestety niedostępna.

LITERATURA

1. Łączkowski R. „Wyważanie elementów wirujących”. Warszawa: WNT, 1979.
2. Rzeszuciński P. „Diagnostyka maszyn wirujących”. *Przegląd Mechaniczny*, 11/2013.
3. Dobrowolski A. „Dyskretne przekształcenie Fouriera”. *Elektronika Praktyczna* 2/2006, 97÷100.
4. Venkatachalam R. „Mechanical Vibrations”. New Delhi: Asoke K. Ghosh PHI Learning Private Ltd, 2014.
5. Nota katalogowa MMA7361L, Freescale Semiconductor. Rev 0, 04/2008.