

Zastosowanie wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego

Przemysław Cichoń, Michał Stosiak

1. Wprowadzenie

Drgania mechaniczne mierzone są z różnych przyczyn. Przyczyny te pogrupować można w cztery zasadnicze obszary [1]: badania testowe drgań, które mają na celu m.in. określenie odporności maszyny czy urządzenia na drgania występujące w naturalnym środowisku pracy, monitorowanie stanu dynamicznego maszyny, które pozwala na ciągły pomiar drgań maszyny i określenie stopnia jej degradacji na podstawie zmian w widmie drgań maszyny, pomiarowa analiza dynamiczna konstrukcji lub maszyny, wiąże ze sobą równoczesny pomiar siły wymuszającej i odpowiedzi maszyny w postaci widma drgań – analiza modalna, pomiar oddziaływania drgań na człowieka, który nabiera szczególnego znaczenia dla niskich częstotliwości, gdyż znajdują się one w okolicach częstotliwości rezonansowych organów wewnętrznych człowieka [2].

W wielu aspektach przemysłowych eksploatacji obiektów technicznych, maszyn i urządzeń istotnym narzędziem diagnostyki stanu jest pomiar drgań mechanicznych. Uzyskany sygnał, w postaci przebiegu czasowego lub widma amplitudowo-częstotliwościowego, stanowi często źródło informacji o degradacji maszyny czy urządzenia. Metody pomiaru drgań mechanicznych podzielić można na kontaktowe i bezkontaktowe. Do metod kontaktowych zalicza się akcelerometry (piezoelektryczne lub piezoporowe), tensometry oporowe do pomiaru odkształceń, czujniki elektrodynamiczne do pomiaru odkształceń. Do pomiarów bezkontaktowych: czujniki zbliżeniowe wiropędowe, czujniki zbliżeniowe pojemnościowe, czujniki zbliżeniowe indukcyjne, interferometry laserowe, wibrometry laserowe, czujniki optyczne, czujniki zbliżeniowe elektromagnetyczne, czujniki mikrofonowe do pomiaru ciśnienia akustycznego. Z punktu widzenia wiarygodności otrzymywanych wyników pomiarów ważne jest, aby przyrząd pomiarowy nie wpływał na badany obiekt. Nabiera to szczególnie dużego znaczenia w przypadku pomiaru drgań obiektów o małych wymiarach i masach, np. mikrozaworów hydraulicznych [3]. Wtedy to wymaga się zastosowania czujników drgań o jak najmniejszej masie i wymiarach, tzn. miniaturowych akcelerometrów, których masa nie przekracza 3 g. Ponadto w pewnych szczególnych aplikacjach, takich jak pomiar na duże odległości, pomiar ruchu drgającego gorących czy trudno dostępnych powierzchni lub elementów, z którymi kontakt z bliskiej odległości mógłby być szkodliwy (ze względu m.in. na aktywność chemiczną, magnetyczną czy elektryczną) korzystnie jest zastosować bezkontaktowy pomiar drgań. Dokonać tego można za pomocą wibrometru laserowego.

Przeprowadzono zatem pomiary drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego Hydropax ZY25. W celu pomiaru drgań mechanicznych stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego wykorzystano wibrometr laserowy. Ponad-

Streszczenie: W artykule przedstawiono ideę pomiaru drgań mechanicznych z wykorzystaniem toru pomiarowego opartego o głowicę laserową. Wskazano obszar aplikacji wibrometru laserowego oraz jako przykład podano wyniki badań drgań stołu symulatora hydraulicznego. W celu weryfikacji otrzymanych rezultatów dokonano również pomiarów z wykorzystaniem miniaturowego akcelerometru piezoelektrycznego. Po cyfrowej obróbce sygnałów pomiarowych dokonano ich porównania.

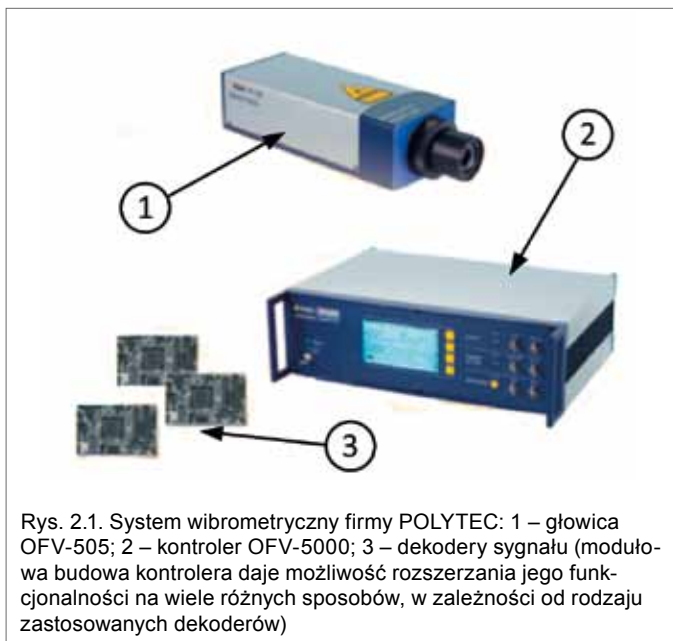
APPLICATION OF LASER VIBROMETER FOR VIBRATIONS MEASUREMENTS OF SIMULATOR OF LINEAR HYDROSTATIC DRIVE

Abstract: The following article is devoted to the idea of measurement of mechanical vibrations as regards the usage of mensurative track based on a laser head. There is denoted the extent of an application of laser vibrometer, as well as the findings concerning the vibrations of hydraulic simulator board are presented. In order to verify the results of the research, the measurements with use of miniature piezoelectric accelerometer have been established. A comparison measurement has been drawn after a digital processing of mensurative signals.

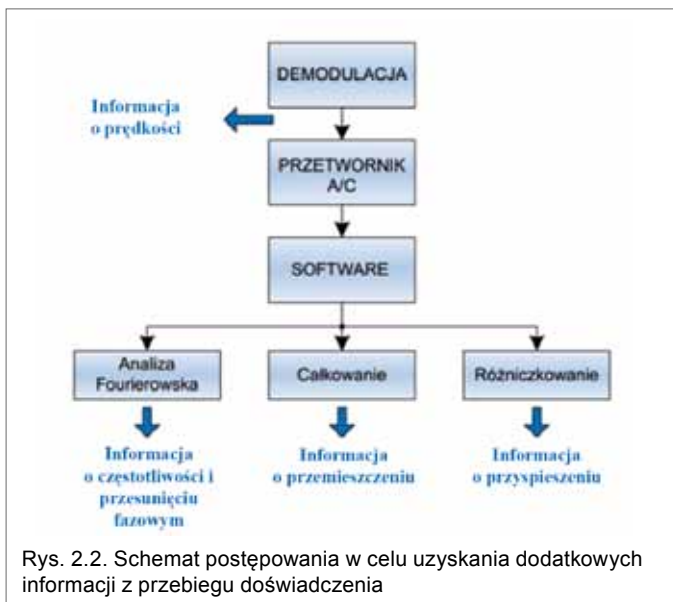
to równocześnie drgania stołu symulatora mierzono miniaturowym akcelerometrem piezoelektrycznym. Zarówno badany obiekt, jak i kompletne toru pomiarowe znajdują się na wyposażeniu Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Symulator pracujący jako generator drgań mechanicznych szerzej opisano w [4, 5].

2. Metoda pomiaru drgań wibrometrem laserowym

Celem niniejszego artykułu jest pokazanie możliwości efektywnego zastosowania wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego oraz porównanie otrzymanych wyników z wynikami dostarczonymi przez akcelerometr piezoelektryczny. Do pomiarów wykorzystano głowicę laserową OFV-505 wraz z modułowym kontrolerem OFV-5000 firmy POLYTEC (rys. 2.1). Głowica wyposażona jest w bardzo wysokiej jakości optykę pozwalającą na zwiększenie rozdzielczości i czułości optycznej. Wyposażona jest w laser drugiej klasy He-Ne (bezpieczne dla oczu widzialne światło o mocy 1 mW i długości fali 632,8 nm). Głowica OFV-505 może automatycznie przeanalizować jakość lasera odbitego od obiektu i dopasować ostrość dla uzyskania



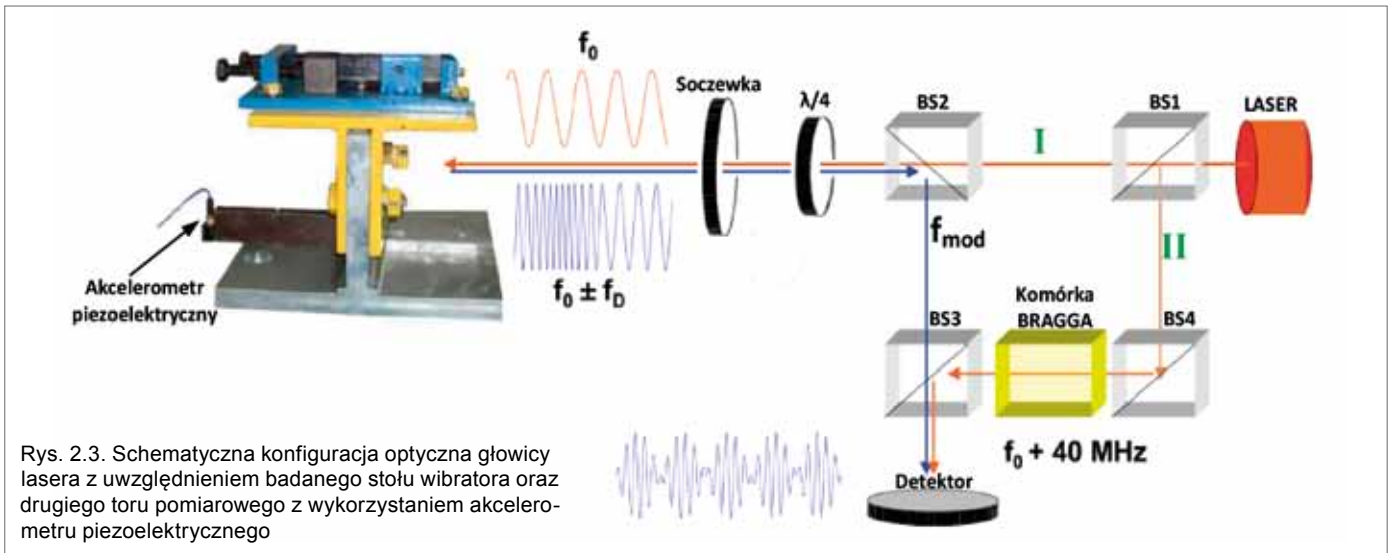
Rys. 2.1. System wibrometryczny firmy POLYTEC: 1 – głowica OFV-505; 2 – kontroler OFV-5000; 3 – dekodery sygnału (moduła budowa kontrolera daje możliwość rozszerzenia jego funkcjonalności na wiele różnych sposobów, w zależności od rodzaju zastosowanych dekodery)



Rys. 2.2. Schemat postępowania w celu uzyskania dodatkowych informacji z przebiegu doświadczenia

optymalnego sygnału. Po podłączeniu głowicy do kontrolera możliwe jest pełne wykorzystanie jego możliwości w zakresie rozdzielczości pomiaru. Dostępny zestaw dekodery umożliwia pomiary prędkości w zakresie ± 10 m/s i przemieszczeń od ułamków nanometrów po metry, a wszystko to w paśmie częstotliwości od składowej stałej do 20 MHz.

Zasada działania wibrometru laserowego polega na porównaniu wiązki lasera odbitej od badanego obiektu i docierającej do fotodetektora ze znanym sygnałem referencyjnym. W sytuacji, gdy źródło fali lub odbiornik porusza się, częstotliwość światła zmienia się w wyniku efektu Dopplera. Częstotliwość fali rośnie (barwa światła przesuwają się w kierunku fioletu) przy wzajemnym zbliżaniu się źródła i odbiornika, a maleje (barwa światła przesuwają się w kierunku czerwieni) podczas oddalania się źródła fali i odbiornika. Mierząc tę różnicę częstotliwości, jesteśmy w stanie bezpośrednio odczytać prędkość badanego obiektu. Dalsza cyfrowa obróbka sygnału (rys. 2.2) pozwala uzyskać informacje o amplitudzie drgań, przyspieszeniu i widmie częstotliwościowym.



Rys. 2.3. Schematyczna konfiguracja optyczna głowicy lasera z uwzględnieniem badanego stołu wibratora oraz drugiego toru pomiarowego z wykorzystaniem akcelerometru piezoelektrycznego

Częstotliwość światła laserowego głowicy wyraża zależność:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \quad (2.1)$$

gdzie:

c – prędkość światła ($3 \cdot 10^8$ m/s);

λ – długość fali lasera głowicy OFV-505 (632,8 nm).

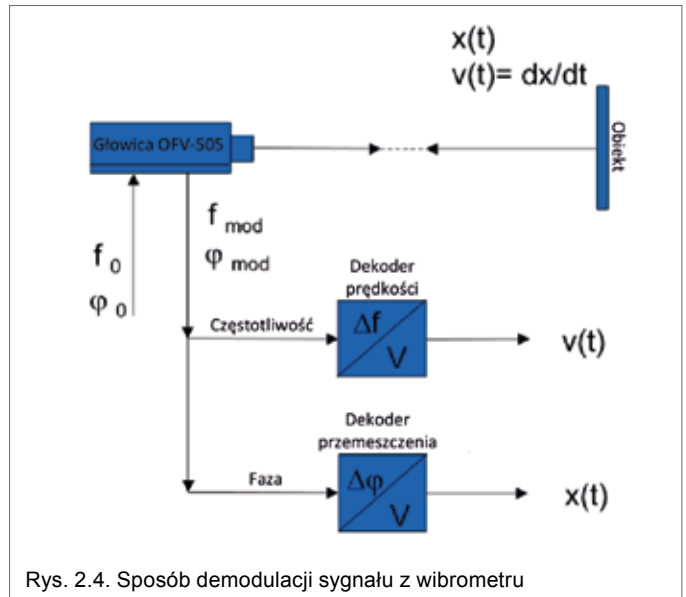
Zależność pomiędzy częstotliwością Dopplera (f_D), długością fali (λ) oraz prędkością obiektu (v) przedstawia się następująco [6]:

$$f_D = 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.2)$$

W wibrometrach POLYTEC pomiar prędkości i przemieszczenia odbywa się za pomocą zmodyfikowanego interferometru Macha-Zehndera (podział promienia świetlnego na dwa promienie, z których każdy przechodzi przez interferometr inną drogą). Konfiguracja optyczna głowicy OFV-505 oraz badany obiekt pokazane zostały na rysunku 2.3. Źródłem światła jest laser helowo-neonowy (He-Ne), który zapewnia liniową polaryzację wiązki. Dzielnik (soczewka półprzepuszczalna) BS1 rozdziela wiązkę źródłową na wiązkę obiektową (I) i wiązkę odniesienia (referencyjną-II). Wiązka obiektowa przechodzi dalej przez kolejny dzielnik BS2 oraz przez ćwierćfalówkę ($\lambda/4$). Dzielnik BS2 wraz z ćwierćfalówką działa jako optyczny sprzęgacz kierunkowy (części mocy fal w torze głównym, biegnących w przeciwnych kierunkach, wyprowadzane są oddzielnymi wrotami) oraz odbija wiązkę obiektową na BS3. Zadaniem soczewki jest skupienie wiązki na obiekcie w postaci plamki o niewielkiej średnicy. Ostateczna różnica ścieżek jest równa podwójnej odległości obiektu od BS2. Komórka Bragga w ścieżce odniesienia interferometru generuje dodatkowe przesunięcie częstotliwości w celu określenia znaku prędkości. Wynikowy sygnał interferencyjny wiązek przekształcany jest w sygnał elektryczny w fotodetektorze, a następnie dekodowany w kontrolerze OFV-5000.

Częstotliwość wynikowa, jaka dociera do fotodetektora f_{mod} wyraża się poprzez [7]:

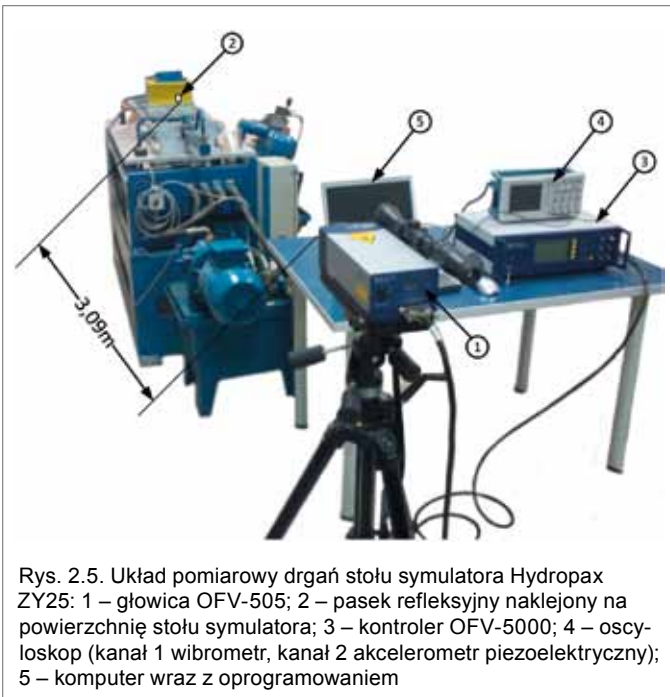
$$f_{mod} = f_B + f_D = f_0 + 40 \text{ MHz} + 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.3)$$



Rys. 2.4. Sposób demodulacji sygnału z wibrometru

Interferometr porównuje fazę ϕ_{mod} oraz częstotliwość f_{mod} z wiązki obiektowej z wielkościami z wewnętrznej wiązki odniesienia (ϕ_0 i f_0). Przesunięcie wyznaczone jest dzięki pomiarowi przesunięcia fazowego, natomiast prędkość przez pomiar częstotliwości (rys. 2.4)

Wibrometr laserowy zapewnia pomiar bezdotykowy drgań, dzięki czemu eliminuje się zakłócenia spowodowane masą czujników pomiarowych (bezwładność), wahaniami temperatur obiektu, sposobem mocowania czujnika itp. W wielu przypadkach zamocowanie czujnika nie jest w ogóle możliwe ze względu na warunki pracy badanych struktur lub z uwagi na ograniczenia techniczno-konstrukcyjne i eksploatacyjne. Innym powodem są niskoczęstotliwościowe drgania. Ich pomiar za pomocą standardowych akcelerometrów, ze względu na niskie pasmo częstotliwości, jest trudny, a często wręcz niemożliwy. Stwarza to konieczność wykorzystania innych narzędzi pomiarowych opartych o bezdotykowe metody realizacji pomiaru. W takich przypadkach laserowe techniki pomiarowe, jako bezdotykowe, spełniają swoje zadanie. Pomiaru mogą być ponadto przeprowadzane z bardzo dużej odległości i według katalogu producenta [7] może to być nawet 300 m w zależno-



Rys. 2.5. Układ pomiarowy drgań stołu symulatora Hydropax ZY25: 1 – głowica OFV-505; 2 – pasek refleksyjny naklejony na powierzchnię stołu symulatora; 3 – kontroler OFV-5000; 4 – oscyloskop (kanał 1 wibrometr, kanał 2 akcelrometr piezoelektryczny); 5 – komputer wraz z oprogramowaniem

ści od rodzaju powierzchni. W celu zwiększenia mocy sygnału (wiązki) odbitej na obiekt został naklejony pasek refleksyjny (po przeciwnej stronie akcelrometru piezoelektrycznego). Zabieg ten, pomimo faktu, iż głowica OFV-505 może automatycznie przeanalizować jakość lasera odbitego od obiektu i do-

pasować ostrość dla uzyskania optymalnego sygnału, miał na celu zapewnienie jak najlepszego odbijania promienia laserowego od badanej powierzchni. Powierzchnia stołu symulatora powinna bowiem odbijać promień laserowy, a nie rozpraszać go. Odległość głowicy od obiektu wyznacza się z równania [7]:

$$l = 234 \text{ mm} + n \cdot 204 \text{ mm} \quad (2.4)$$

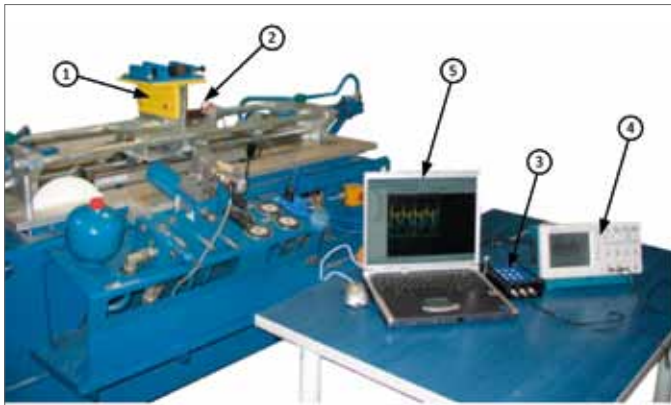
gdzie:

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

W przeprowadzonym eksperymencie obiekt znajdował się w odległości 3,09 m od głowicy laserowej ($n = 14$).

3. Pomiar drgań miniaturowym akcelrometrem

W skład kolejnego, równoległe działającego toru pomiarowego drgań stołu symulatora wchodził miniaturowy akcelrometr piezoelektryczny Piezotronics, typ 340A16, o masie 2 g umożliwiający pomiar przyspieszenia drgań. Podstawowe parametry tego przetwornika wskazują na jego dużą czułość i szerokie pasmo przenoszenia, a to: czułość – $1 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$, zakres częstotliwości 0,7 Hz do 18 kHz, rozdzielczość $0,006 \text{ m}/\text{s}^2 \text{ RMS}$, zakres pomiarowy amplitudy przyspieszenia do $4900 \text{ m}/\text{s}^2$. Ponadto składnikiem toru był kondycjoner sygnału Vibamp PA3000, oscyloskop cyfrowy i komputer przenośny z kompatybilnym oprogramowaniem. Schemat blokowy zestawu aparatury stosowanej przy pomiarach drgań przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schemat blokowy zestawu aparatury do pomiaru drgań z wykorzystaniem miniaturowego akcelerometru: 1 – badany obiekt (stół symulatora); 2 – piezoelektryczny przetwornik drgań PCB ICP; 3 – przenośny kondycjoner sygnału ICP Vibamp PA3000; 4 – czterokanałowy oscyloskop cyfrowy f-my Tektronix, typ TDS 224 wraz z modułem rozszerzającym TDS 2CM; 5 – komputer osobisty PC wraz z oprogramowaniem

Kierunek pomiaru przyspieszeń drgań zgodny był z kierunkiem ruchu stołu symulatora. Sygnał pomiarowy w postaci przebiegu czasowego obserwowany był na ciekłokrystalicznym ekranie oscyloskopu, a następnie rejestrowany na dysku twardego komputera PC, gdzie możliwa była jego obróbka, analiza oraz wydruk. Sygnał pomiarowy analizowany był w dziedzinie czasu i częstotliwości. Tor pomiarowy do pomiaru przyspieszeń drgań mechanicznych został przed pomiarem wykalibrowany sygnałem wzorcowym przyspieszenia o wartości $a_z = 10 \text{ m/s}^2$ RMS i częstotliwości $f_z = 156 \text{ Hz}$, uzyskanym z kalibratora typu 2250 f-my B&K.

4. Cyfrowe przetwarzanie sygnału pomiarowego

Aby uzyskać informację o częstotliwości czy przesunięciu fazowym uzyskane z pomiarów wartości prędkości (rys. 2.2), należy poddać analizie Fourierowskiej. Dyskretna transformata Fouriera (DFT) stosowana jest wtedy, gdy wartości liczbowe sygnału $x(t)$ są określone dla skończonej liczby N wartości zmiennej t (czasu) należącej do pewnego przedziału $[0, T]$. Najczęściej przyjmuje się, że wartości te są równo odległe o jednokowy przedział czasu:

$$\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{1}{f_p} \quad (4.1)$$

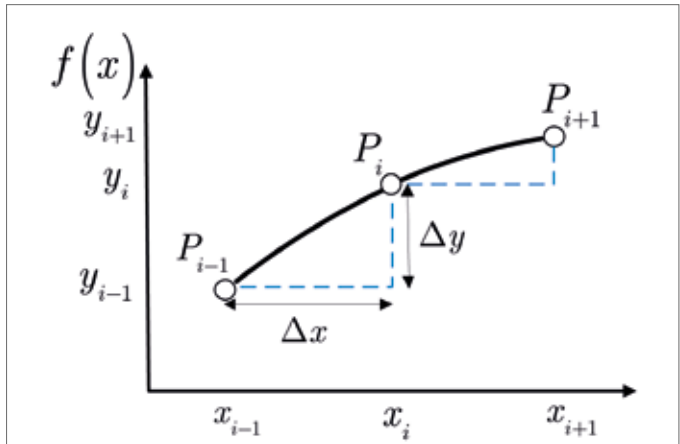
gdzie: f_p – częstotliwość próbkowania.

Sygnał $x(t)$ jest zatem reprezentowany przez skończony ciąg $\{x(n)\}$, gdzie $n = 0, 1, \dots, N-1$ i oznacza ilość próbek sygnału. Obliczenie transformacji Fouriera sygnału sprowadza się do wyznaczenia wartości liczbowych sum dla przekształcenia prostego (czas \rightarrow częstotliwość) [8]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.2)$$

Tab. 4.1. Porównanie złożoności obliczeniowej DFT i FFT dla danej zmiennej N

N	2	4	8	16	32	64	128
DFT	8	32	128	512	2048	8195	32768
FFT	2	8	24	64	160	384	896



Rys. 4.1. Algorytm obliczania pochodnej funkcji w punkcie P_i

gdzie: $W_N^{nk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$

Powyższa transformacja jest operacją czasochłonną i wykonywanie jej na przykład w czasie rzeczywistym dla złożonych sygnałów wymaga dużej mocy obliczeniowej. Jest to związane z funkcją, która wymaga wykonania dużej ilości mnożeń zespolonych $O(N^2)$. Najpopularniejszą wersją FFT jest FFT o podstawie 2, której wektor próbek wejściowych (spróbkowany sygnał) musi mieć długość $N = 2^k$, gdzie k to pewna liczba naturalna. Algorytmy wykorzystywane w programie Origin 7.5 (którym posłużono się podczas obróbki sygnału) obliczające szybką transformację Fouriera bazują na metodzie dziel i zwyciężaj rekurencyjnie dzieląc N -punktowy DFT na $N/2$ -punktowy DFT itd. Złożoność obliczeniowa FFT wynosi $O(N \log_2 N)$, co wprowadza znaczną redukcję operacji w stosunku do DFT (tab. 4.1).

Dzięki istnieniu takiego algorytmu praktycznie możliwe stało się cyfrowe przetwarzanie sygnałów (DSP).

Jak wspomniano, z wibrometru laserowego otrzymywano sygnał w postaci prędkości drgań stołu symulatora. W celu porównania go z sygnałem z akcelerometru (przyspieszenie drgań) należało go poddać procedurze numerycznego różniczkowania (rys. 2.2). Dokonano tego, wykorzystując wbudowane funkcje programu Origin 7.5 Pro. Pochodna funkcji definiowana jest w postaci (4.3), [9]:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (4.3)$$

dla dostatecznie małych h można równanie (4.3) przybliżyć formułą [9]:

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i+h) - f(x_i-h)}{2h} \quad (4.4)$$

W praktyce jednak środowisko programu wykorzystanego do numerycznego różniczkowania sygnału pomiarowego liczy pochodną w punkcie P_i , poprzez branie średniej tangensa kąta nachylenia stycznej do krzywej w dwóch najbliższych, sąsiadujących punktach – rys. 4.1.

Pochodna funkcji – rozumianej jako dyskretny zbiór punktów – opisana jest równaniem:

$$f'(x_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right) \quad (4.5)$$

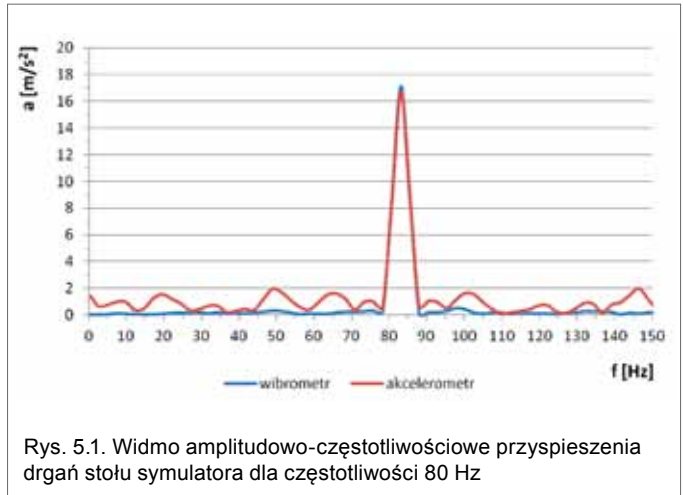
Do wygładzania używana jest metoda Savitzky'ego-Golaya, szerzej opisana w [10, 11, 12]. Funkcja $f(x)$ interpolowana jest w postaci:

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_0 \quad (4.6)$$

wtedy pochodna funkcji $f(x)$, w notacji Lagrange'a, przyjmuje postać:

$$f'(x) = n a_n x^{n-1} + (n-1) a_{n-1} x^{n-2} + \dots + a_1 \quad (4.7)$$

Wykorzystane oprogramowanie pozwala w szybki sposób przeprowadzić przedstawioną procedurę i korzystać z niej na poziomie narzędzia.

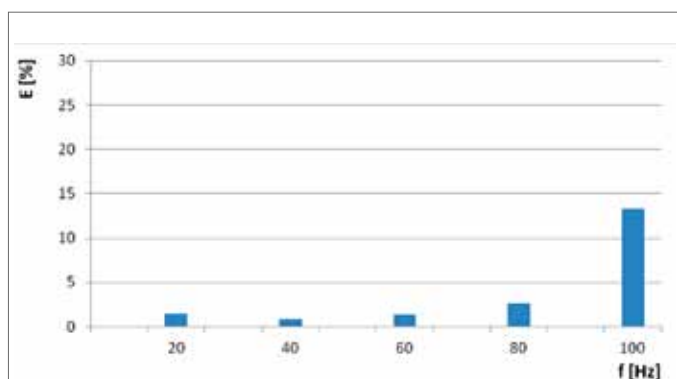


Rys. 5.1. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań stołu symulatora dla częstotliwości 80 Hz

5. Porównanie wyników z wibrometru i akcelerometru

Jednoczesny pomiar prędkości drgań stołu symulatora oraz jego przyspieszenia po numerycznej obróbce porównano i zestawiono na rysunkach 5.1 i 5.2. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca prezentuje się porównanie widma amplitudowo-częstotliwościowego dla wybranej częstotliwości – 80 Hz. Badania wykonano dla częstotliwości drgań stołu symulatora: 20, 40, 60, 80, 100 Hz.

Jako kryterium poprawności wyników pomiarów otrzymanych z wibrometru laserowego zdefiniowano funkcję o postaci:



Rys. 5.2. Wartość funkcji kryterialnej dla poszczególnych częstotliwości drgań stołu symulatora

$$E = \left| \frac{a_{wibr} - a_{akcel}}{a_{akcel}} \right| \cdot 100\% \quad (5.1)$$

gdzie:

a_{wibr} – amplituda przyspieszenia drgań otrzymana z wibrometru [m/s^2],

a_{akcel} – amplituda przyspieszenia drgań otrzymana z akcelerometru [m/s^2].

Przyjęto, że wartość tej funkcji powinna zmierzać do minimum.

Porównanie widm na rys. 5.1 wykazuje, że są one podobne w całym prezentowanym zakresie – do 150 Hz. Występująca różnica w amplitudzie przyspieszenia drgań przy częstotliwości 80 Hz wynosi ok. 3%.

Wartość funkcji kryterialnej (celu) osiąga najmniejsze poziomy dla częstotliwości 40 Hz drgań stołu symulatora. Ponadto w całym zakresie częstotliwości nie przekracza 15%. Jest to wartość bezwzględna różnicy między sygnałem z wibrometru i akcelerometru odniesiona do wartości tego drugiego.

6. Posumowanie i wnioski

Zaprezentowano możliwości zastosowania wibrometru laserowego do pomiaru drgań stołu symulatora liniowego napędu hydrostatycznego. Ogólnie, wielkościami mierzonymi przy pomocy tego przyrządu mogą być przemieszczenie lub prędkość. W artykule zaprezentowano, że względu na ograniczone miejsce, pomiar prędkości drgań stołu. W celu możliwości porównania otrzymanych wyników przy pomocy specjalistycznego oprogramowania dokonano numerycznego różniczkowania przebiegu prędkości, otrzymując przebieg czasowy przyspieszenia drgań. Dokonując szybkiego przekształcenia Fouriera (FFT), porównano wyniki otrzymane przy pomocy wibrometru laserowego oraz miniaturowego piezoelektrycznego akcelerometru. Porównywane widma okazały się zgodne – rys. 5.1 i 5.2 – a występujące różnice w wartościach amplitud przyspieszenia w większości przypadków nie przekraczają kilku procent. Pozwala to na uwiarygodnienie wyników otrzymanych przy pomocy wibrometru oraz po dalszej numerycznej ich obróbce. Należy dodać, że badany obiekt (symulator z drgającym stołem)

posadowiony był na tzw. fundamentach pływających, co zapewniło izolację drgań i zapobiegało przeniesieniu się ich na statyw wibrometru. Ponadto porównanie podstawowych parametrów obu mierników: wibrometru oraz akcelerometru, wskazuje, że ten pierwszy cechuje się znacznie większą rozdzielczością. Posiada on wiele zalet, m.in. pomiar bezkontaktowy, pomiar na duże odległości, dużą dokładność pomiaru, które sprawiają, że w niektórych aplikacjach jest on niezastąpiony. Należy jednak podkreślić, że w obecnej chwili istotnym ograniczeniem jest cena zestawu do pomiaru z wykorzystaniem jednoosiowego wibrometru laserowego. Mankament ten przybiera jeszcze na intensywności w odniesieniu do wibrometrów trójosiowych.

Literatura

- [1] KUCHARSKI T.: *System pomiaru drgań mechanicznych*. WNT, Warszawa 2002.
- [2] ENGEL Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. WNT, Warszawa 2001 r.
- [3] KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Eksperymentalne określenie wpływu drgań mechanicznych na przebiegi ciśnień w wybranych układach mikrohydraulicznych*. [W:] Kollek W. (red.): *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011. ss. 156–187.
- [4] CICHON P., STOSIAK M.: *Symulator liniowego napędu hydrostatycznego w laboratorium hydraulicznym*. „Napędy i Sterowanie”, 11/2011.
- [5] KOLLEK W., KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Symulator liniowego napędu hydrostatycznego źródłem nowych możliwości badawczych*. [W:] *Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne*, 2005. Problemy i tendencje rozwojowe w pierwszej dekadzie XXI wieku. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna, Wrocław, 17–19 maja 2005.
- [6] CRAWFORD F.C.: *Fale*, PNW, Warszawa 1973.
- [7] Karta katalogowa produktu: OFV-505/503 Vibrometer Sensor Head, LM_DS_OFV-505_2005.pdf
- [8] LYONS R.G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKŁ, Warszawa 1999.
- [9] FICHTENHOLZ G.M.: *Rachunek różniczkowy i całkowity. Tom 1*, PWN, Warszawa 1976.
- [10] SAVITZKY A., GOLAY M.J.E.: *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*, „Analytical Chemistry”, 1964, Vol. 36.
- [11] SZABATIN J.: *Podstawy teorii sygnałów*, WKŁ, Warszawa 2007.
- [12] POLANOWSKI S.: *Wyglądanie wykresów indykatorowych ruchomymi obiektami aproksymującymi z więzami łamanymi*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, rok XLVII, nr 1 (164), 2006.

dr inż. Michał Stosiak – kierownik Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska, michal.stosiak@pwr.wroc.pl, 50-371 Wrocław, ul. Łukasiewicza 7/9,
inż. Przemysław Cichon – magistrant w Zakładzie, przemyslaw.cichonn@gmail.com