

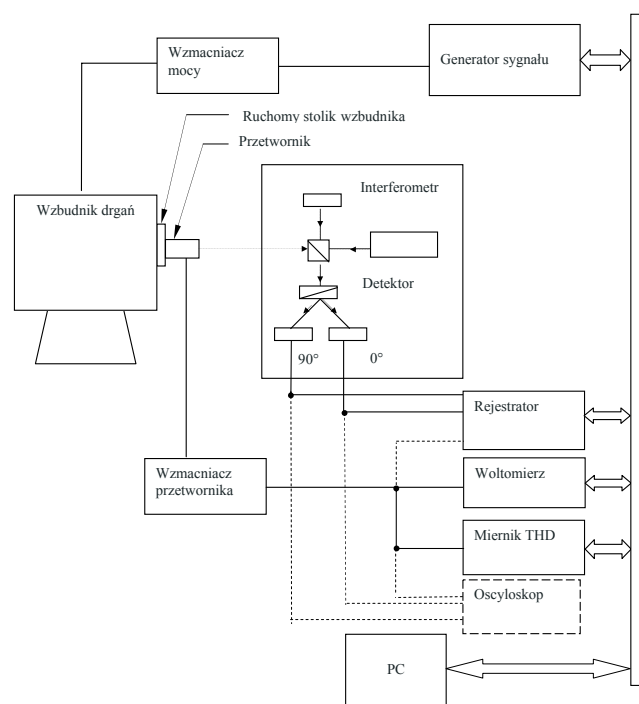
Wzorzec podstawowy jednostek wielkości drgań mechanicznych

Bezwzględne metody wzorcowania przetworników drgań mechanicznych

Bezwzględne metody wzorcowania przetworników drgań mechanicznych przedstawione zostały w normie ISO 16063-11:1999 (*Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry*). Stosuje się je do wzorcowania przetworników drgań mechanicznych, z zastosowaniem interferometrii laserowej, w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 10 kHz i zakresie przyspieszenia od 0,1 m/s² do 1000 m/s², przy czym zakres częstotliwości i przyspieszenia zależy od wybranej metody pomiaru. Metody wzorcowania to:

- 1) metoda zliczania prążków interferencyjnych (FCM) – stosowana dla wyznaczenia amplitudy czułości przetwornika (kalibracja amplitudowa) w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 800 Hz,
- 2) metoda punktów minimum (MPM) – stosowana dla wyznaczenia amplitudy czułości przetwornika w zakresie częstotliwości od 800 Hz do 10 kHz,
- 3) metoda aproksymacji sinusowej (SAM) – stosowana do wyznaczenia zarówno amplitudy (kalibracja amplitudowa), jak i przesunięcia fazowego (kalibracja fazowa) zespolonej czułości przetwornika w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 10 kHz.

Najczęściej wykorzystywaną metodą jest metoda aproksymacji sinusowej, stosowana przez większość światowych instytucji metrologicznych utrzymujących wzorce drgań mechanicznych.



Podstawowy układ pomiarowy w metodzie aproksymacji sinusowej

Schemat stanowiska umożliwiającego wzorcowanie metodą SAM ze zmodyfikowanym interferometrem Michelsona (z wyjściowymi sygnałami kwadraturowymi tzn. przesunięty- mi względem siebie o 90° i dwoma detektorami światła odbierającymi sygnały z interfero- metru) przedstawiono na rysunku (na stronie poprzedniej).

Teoretyczne podstawy metody SAM wg normy 16063-11

Zespolona czułość przetwornika przyspieszenia (akcelerometru) S_a wyraża się wzo- rem

$$S_a = \hat{S}_a \exp j(\varphi_u - \varphi_a)$$

$$\hat{S}_a = \frac{\hat{u}}{\hat{a}}$$

gdzie

\hat{S}_a – czułość amplitudowa przetwornika,

\hat{u} – napięcie wyjściowe z przetwornika,

\hat{a} – amplituda przyspieszenia drgań,

φ_u – początkowy kąt fazowy napięcia wyjściowego,

φ_a – początkowy kąt fazowy przyspieszenia a ,

$\Delta\varphi = (\varphi_u - \varphi_a)$ – przesunięcie (opóźnienie) fazowe zespolonej czułości.

Amplitudę i fazę przyspieszenia można otrzymać z amplitudy przemieszczenia \hat{s} , czę- stotliwości f (częstość kątowna $\omega = 2\pi f$) i początkowego kąta fazowego przemieszczenia φ_s na podstawie wzorów

$$\hat{a} = \omega^2 \cdot \hat{s}$$

$$\varphi_a = \varphi_s + \pi$$

Gdy wzbudnik drgań generuje sinusoidalne przemieszczenie $s = \hat{s} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_s)$, wówczas sygnał wyjściowy z akcelerometru opisany jest zależnością

$$u = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_u)$$

Wielkość wyjściową z pierwszego detektora można przedstawić jako

$$u_1(t) = \hat{u}_1 \cdot \cos\varphi_{\text{MOD}}(t) = \hat{u}_1 \cdot \cos[\varphi_0 + \hat{\varphi}_M \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_s)]$$

gdzie modulowana faza

$$\varphi_{\text{MOD}} = \varphi_0 + \hat{\varphi}_M \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_s)$$

składa się z kąta fazy początkowej φ_0 sygnału z fotodetektora i składnika modulacji φ_M , któ- rego amplituda $\hat{\varphi}_M$ jest proporcjonalna do przemieszczenia

$$\varphi_M = \hat{\varphi}_M \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_s)$$

gdzie

$$\hat{\varphi}_M = \frac{4 \cdot \pi \cdot \hat{s}}{\lambda}$$

Zakłada się tu, że nie ma przesunięcia fazowego pomiędzy przemieszczeniem $s(t)$ i sinusoidalnym składnikiem fazowym $\varphi_M(t)$. Wielkość wyjściowa z drugiego fotodetektora, przesunięta w fazie o 90° , ma postać

$$u_2(t) = \hat{u}_2 \cdot \sin\varphi_{\text{MOD}}(t) = \hat{u}_2 \cdot \sin[\varphi_0 + \hat{\varphi}_M \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_s)]$$

gdzie $\hat{u}_2 = \hat{u}_1$. Oba sygnały są próbkowane podczas pomiaru w równych odstępach czasowych $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$. Serie wartości pomiarowych $u_1(t_i)$ i $u_2(t_i)$ próbkowane w czasie $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ mają przedział próbkowania $\Delta t = t_i - t_{i-1} = \text{const}$. Sukcesywnie, z obu przesuniętych w fazie sygnałów w czasie pomiaru, wyliczane są wartości fazy $\varphi_{\text{Mod}}(t_i)$ przy zastosowaniu zależności

$$\varphi_{\text{Mod}}(t_i) = \arctan \frac{u_2(t_i)}{u_1(t_i)} + n \cdot \pi$$

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$. Wymagane dalej procedury, zwłaszcza wyliczenie funkcji arcus tangens, są standardowymi procedurami w cyfrowym przetwarzaniu sygnału. Rozwiązując układ $N + 1$ równań, można wyliczyć parametry $\hat{\varphi}_M$ i φ_s składnika modulacji fazy, proporcjonalnego do przemieszczenia

$$\varphi_{\text{Mod}}(t_i) = A \cdot \cos \omega t_i - B \cdot \sin \omega t_i + C$$

gdzie $i = 0, 1, 2, \dots, N$. Układ jest liniowy w odniesieniu do parametrów A , B i C , gdzie: $A = \hat{\varphi}_M \cdot \cos\varphi_s$, $B = \hat{\varphi}_M \cdot \sin\varphi_s$, C to stała, a $N + 1$ oznacza liczbę próbek pobieranych synchronicznie w czasie pomiaru. Parametry A , B i C wyliczane są przy zastosowaniu metody sumy najmniejszych kwadratów (aproksymacji sinusowej). Z ich wartości można otrzymać amplitudę fazy modulacji $\hat{\varphi}_M$ i fazę przemieszczenia φ_s , stosując zależności

$$\hat{\varphi}_M = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\varphi_s = \arctan \frac{B}{A}$$

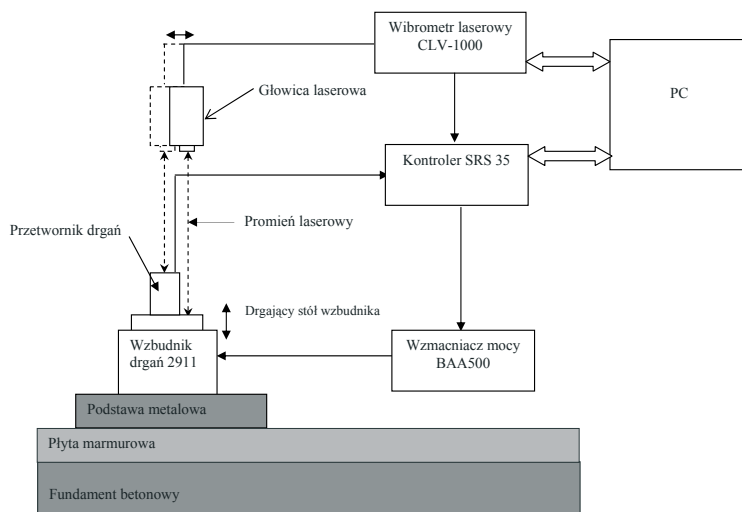
Aby określić amplitudę przyspieszenia, można zastosować następujący wzór

$$\hat{a} = \pi \cdot \lambda \cdot f^2 \cdot \hat{\varphi}_M$$

Amplitudę \hat{u} i fazę φ_u można wyznaczyć tę samą drogą jak odpowiednie parametry fazy modulacji $\hat{\varphi}_M$ i φ_s , poprzez aproksymację sinusową serii próbkowanych wartości wielkości wyjściowych $u(t_i)$ i na tej podstawie wyliczyć moduł \hat{S}_a i przesunięcie fazowe $\Delta\varphi$ czułości akcelerometru.

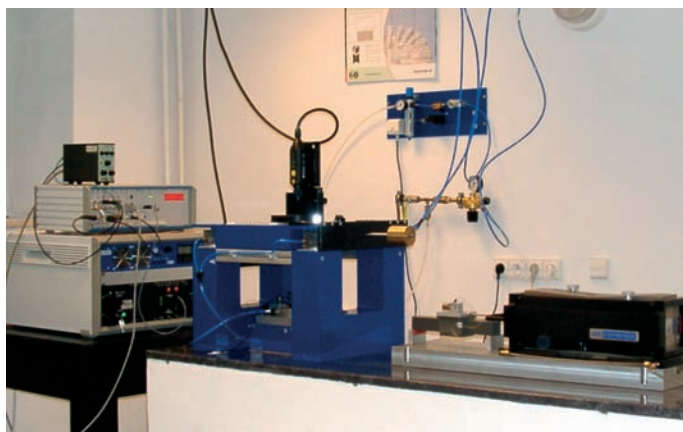
Budowa i zasada działania stanowiska wzorca podstawowego

W oparciu o zasady przedstawione w normie ISO 16063-11 (metoda SAM) zbudowane zostało w GUM wzorcowe stanowisko do kalibracji przetworników drgań metodą bezwzględną, którego zasadniczym elementem jest system CS18P (wytwórca SPEKTRA, Niemcy).



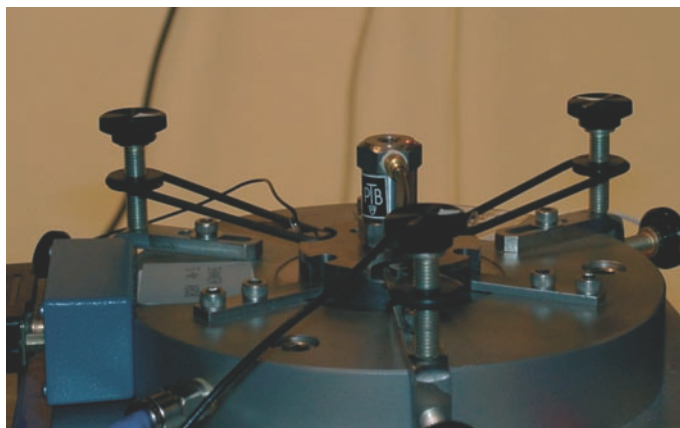
Schemat blokowy stanowiska ze wzбудnikiem 2911

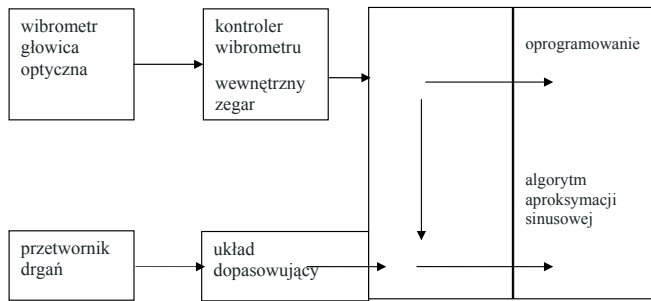
Stanowisko jest wzorcem podstawowym jednostek wielkości drgań mechanicznych (przyspieszenie, prędkość, przemieszczenia). Umożliwia wzorcowanie przetworników drgań metodą bezwzględną w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 10 kHz. Ograniczenie zakresu częstotliwości od dołu spowodowane jest właściwościami zastosowanego wzбудnika drgań 2911.



Widok ogólny stanowiska wzorca podstawowego jednostek wielkości drgań mechanicznych

Wzorcowy przetwornik drgań 8505 zamocowany na stole drgającym wzбудnika 2911





Schemat blokowy układu taktowania

Drgania, wytwarzane w układzie ich wytwarzania (wzbudnik drgań – wzmacniacz mocy – kontroler), mierzone są za pomocą wibrometru laserowego CLV-1000 (Polytec), wykorzystującego zasadę Dopplera i interferometru Macha-Zehndera.

Promień światła laserowego

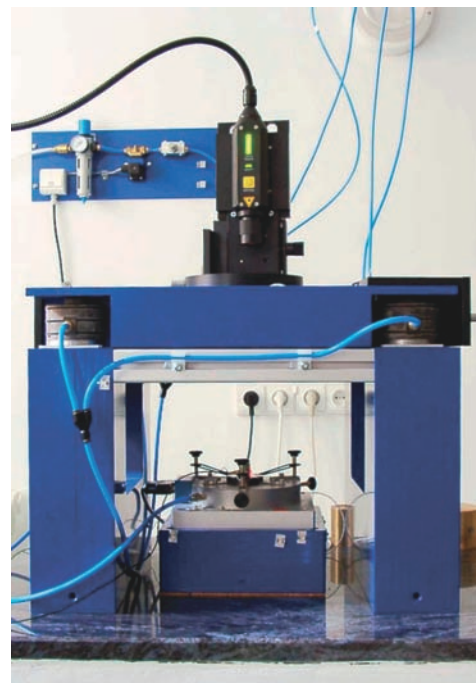
może zostać skierowany i odbijać się od górnej powierzchni przetwornika drgań lub od miejsca przy jego podstawie – zależnie od konstrukcji i zastosowania przetwornika drgań. Powierzchnie, na które pada promień światła laserowego powinny być specjalnie przygotowane, aby umożliwić interferencję promieni: odniesienia i pomiarowego. Można to uzyskać przez wypolerowanie lub naklejenie folii odbijającej.

Sygnał wychodzący z wibrometru jest sygnałem cyfrowym uzyskiwanym w sposób ciągły. Próbkę (sygnały z interferometru i z przetwornika drgań) pobierane są i przetwarzane w równych odstępach czasu. Schemat układu zarządzającego sposobem pobierania próbek przedstawiono na rysunku powyżej.

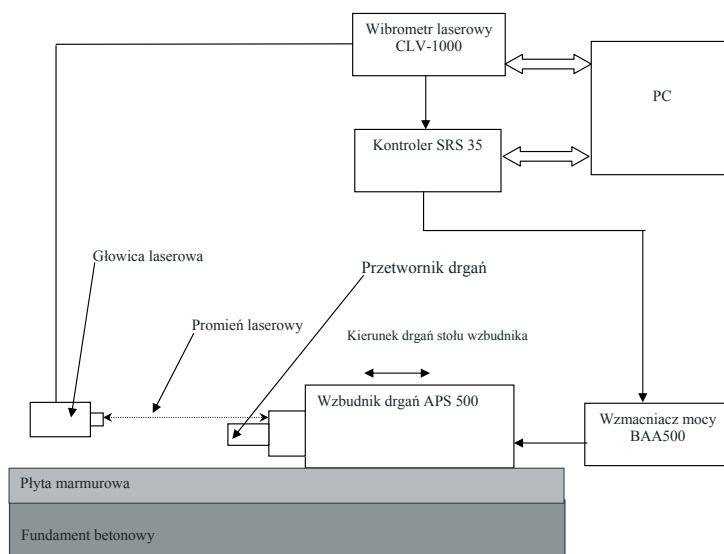
Cyfrowy sygnał reprezentujący prędkość drgań jest dekodowany metodą arcus tangens i numerycznie przetwarzany. Wibrometr jest zsynchronizowany z kontrolerem. Realizowane jest to poprzez zastosowanie impulsów zegarowych służących do szeregowej transmisji danych z wibrometru do kontrolera, w celu wytwarzania impulsu zegarowego do taktowania konwersją A/D w analogowych częściach wibrometru. Ponieważ ten impuls zegarowy pochodzi z wibrometru, gdzie jest wewnętrznie wykorzystywany do pobierania próbek i obliczeń, występuje ścisłe powiązanie między pomiarami sygnałów elektrycznych i mechanicznych. Cyfrowy sygnał wyjściowy z wibrometru i przetwornik analogowo-cyfrowy (AD) są taktowane przez ten sam generator impulsów.

W celu zapewnienia izolacji od zakłócających drgań przekazywanych z podłoża, wzbudnik zamocowano na ciężkiej marmurowej płycie posadowionej na betonowej podstawie. Na tej samej marmurowej płycie posadowiona jest pozycjonująca podstawa, wsparta na konstrukcji izolowanej od drgań wytwarzanych przez wzbudnik poprzez izolatory powietrzne. Głowica lasera jest zamocowana do wspornika posadowionego na łożyskowej powietrznie podstawie wibroizolacyjnej.

Ze względu na planowane włączenie w stanowisko niskoczęstotliwościowego wzbudnika drgań APS500, stanowisko zostało tak skonstruowane i oprogramowane przez firmę



Fragment stanowiska ze wzbudnikiem 2911



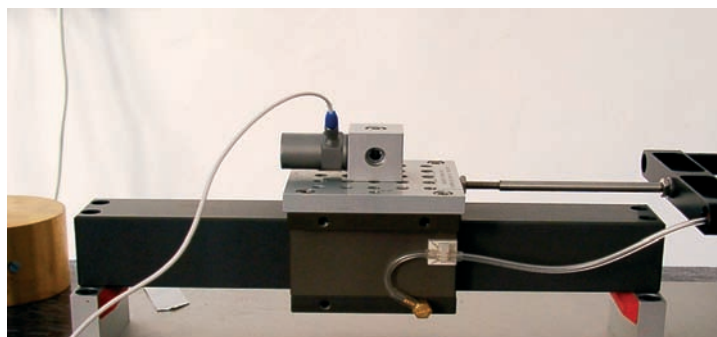
Schemat blokowy stanowiska ze wzbudnikiem APS 500

SPEKTRA, aby po dokonaniu niezbędnych zmian w zamocowaniu głowicy laserowej wibrometru i wybraniu odpowiedniej opcji programu, możliwe było wzorcowanie przetworników drgań w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 10 kHz. Głowicę laserową można mocować na dwa sposoby: pionowo – tak, aby promień światła laserowego padał na powierzchnię stołu drgającego lub przetwornika zamocowanego na wzbudniku 2911 albo poziomo – tak, aby sygnał był odbierany z powierzchni stolika wzbudnika APS 500. Pozwoli to na rozszerzenie częstotliwościowego zakresu wzorcowania metodą bezwzględną w stronę niskich częstotliwości do 1 Hz (ograniczeniem staje się teraz oprogramowanie). Schemat stanowiska w wersji niskoczęstotliwościowej przedstawiono na rysunku powyżej.



Fragment stanowiska ze wzbudnikiem APS

Ruchomy stółik wzbudnika APS 500 z zamocowanym wzorcowanym przetwornikiem drgań



Podczas wzorcowania wzorcowany przetwornik podlega drganiom o kierunku poziomym; promień lasera jest zogniskowany na elemencie mocującym jak najbliżej podstawy przetwornika.

Oba wzbudniki (2911 i APS 500) są łożyskowane powietrznie. Taki rodzaj łożyskowania części drgającej wzbudnika zapewnia, że przetwornik poddany jest drganiom sinusoidalnym o kierunku zgodnym z osią wzbudnika i osią zamocowania przetwornika drgań, a drgania poprzeczne (w płaszczyźnie prostopadłej do osi wzbudnika) oraz wszelkie drgania giętne są jak najmniejsze.

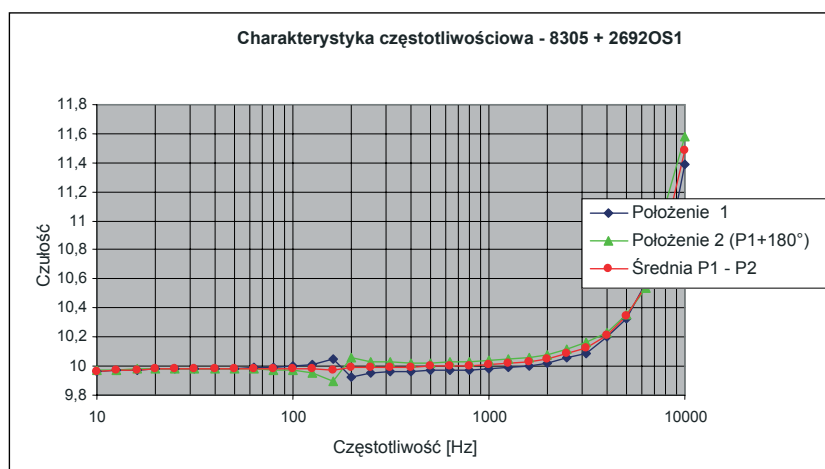
Uśrednianie wyniku

Aby wyznaczyć czułość przetwornika drgań metodą bezwzględną konieczne jest zogniskowanie wiązki laserowej na odbijającej górnej powierzchni wzorcowanego przetwornika drgań lub na odbijającej powierzchni wzbudnika drgań jak najbliżej podstawy przetwornika poddawanego drganiom. Wybór pozycji plamki laserowej zależy od konstrukcji przetwornika drgań (back-to-back lub single-ended) i jego zastosowania oraz od ewentualnego stosowania masy dodatkowej.

Ze względu na mechaniczne właściwości wzbudników drgań (poprzeczne, wahliwe, giętne ruchy głowicy wzbudnika) drgania nie są identyczne w każdym punkcie płaszczyzny stołu wzbudnika. Najlepiej byłoby mierzyć je w punkcie będącym środkiem geometrycznym głowicy, ale najczęściej nie jest to możliwe ze względu na zamocowanie przetwornika drgań. W praktyce konieczne jest więc wykonanie pomiarów w kilku punktach, co najmniej w trzech, równomiernie rozłożonych na drgającej powierzchni i uśrednienie uzyskanych wyników. Konieczne jest przy tym zachowanie następujących warunków:

- sygnał drganiowy musi być powtarzalny,
- drgania muszą być stabilne w dłuższym czasie, umożliwiającym wykonanie pomiarów,
- ciśnienie powietrza w łożyskach powietrznych wzbudnika musi być stabilne.

Tylko przy zachowaniu ww. warunków wykonanie pomiarów kolejno w kilku punktach pomiarowych, równomiernie rozłożonych na powierzchni drgającej, i obliczenie na



Wyniki pomiarów czułości przetwornika uzyskane dla dwóch przeciwległych położeń plamki laserowej

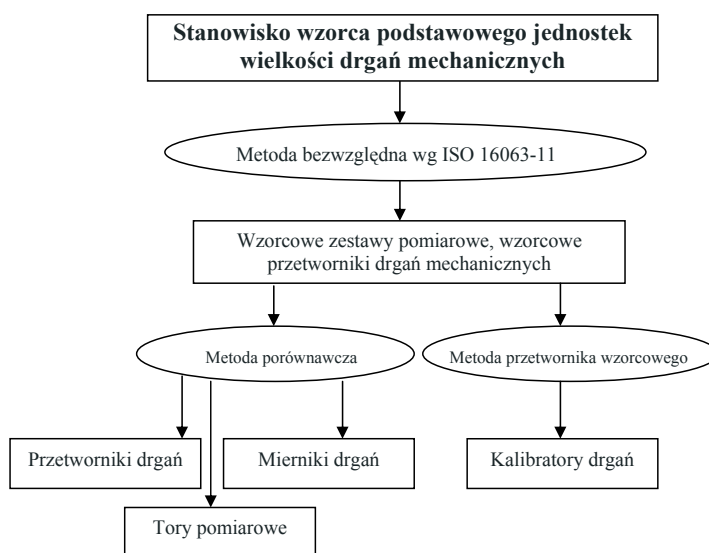
tej podstawie wiarygodnej wartości średniego przyspieszenia drgań, pozwoli na obliczenie czułości wzorcowanego przetwornika drgań z akceptowalną niepewnością.

Niepewność rozszerzona wzorcowania na stanowisku wzorca podstawowego jednostek wielkości drgań mechanicznych (przy poziomie ufności ok. 95 % i współczynniku rozszerzenia $k = 2$), zależnie od częstotliwości sinusoidalnego sygnału drganiowego, przy której wykonuje się wzorcowanie, została oszacowana na:

- 0,6 % – częstotliwość od 10 Hz do 16 Hz
- 0,5 % – częstotliwość od 20 Hz do 4 kHz
- 0,6 % – częstotliwość 5 kHz
- 1,1 % – częstotliwość od 6,3 kHz do 8 kHz
- 1,4 % – częstotliwość 10 kHz.

Spójność pomiarowa i porównania międzynarodowe

Stanowisko wzorca podstawowego jednostek wielkości drgań mechanicznych reprezentuje najwyższy poziom dokładności w Polsce i jest źródłem spójności pomiarowej w dziedzinie drgań mechanicznych. Schemat zapewnienia spójności pomiarowej i przekazywania jednostek wielkości drgań mechanicznych przedstawiono na rysunku poniżej.



Schemat zapewnienia spójności pomiarowej w dziedzinie drgań mechanicznych

Potwierdzenie parametrów metrologicznych stanowiska wzorcowego miało miejsce poprzez udział – z pozytywnym wynikiem – w porównaniu kluczowym EURAMET.AUV.V-K1 w 2003 r., dotyczącym wyznaczenia czułości amplitudowej przetworników drgań. W 2007 r. stanowisko uczestniczyło w porównaniu kluczowym COOMET.AUV.V-K1 (raport końcowy nie jest jeszcze gotowy). W 2010 r. planowany jest udział GUM w porównaniu kluczowym CCAUV.V-K2, którego zakres będzie obejmował, poza wyznaczeniem czułości amplitudowej przetworników drgań, również wyznaczenie fazy.

Joanna Kolasa
Zakład Mechaniki i Akustyki