

Paweł Tomczyk*

Marek Niemas**

STANOWISKO POMIAROWE DO BADAŃ SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ MATERIAŁÓW SPRĘŻYSTYCH STOSOWANYCH W PŁYWAJĄCYCH PODŁOGACH

W artykule opisano prace wykonane przy modernizacji stanowiska pomiarowego do określania sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach. Zaprezentowano zmodyfikowaną procedurę pomiarową, a także wyniki pomiarów testujących zmodernizowane stanowisko do określania sztywności dynamicznej.

1. Stan zagadnienia

Sztywność dynamiczna jest jednym z parametrów określających izolację przeciwdźwiękową pływających podłóg w budynkach. Znając sztywność dynamiczną można określać przydatność materiałów do tłumienia dźwięków uderzeniowych w podłogach pływających [1], [2].

Sztywność dynamiczna określa stosunek siły dynamicznej do przemieszczenia dynamicznego odniesiony do jednostki powierzchni, zgodnie ze wzorem:

$$s' = \frac{F}{S \Delta d} \quad (1)$$

gdzie: S – powierzchnia badanej próbki,

F – siła dynamiczna działająca prostopadle na badaną próbkę, N

Δd – wynikowa zmiana dynamiczna grubości materiału sprężystego, m.

Efektem końcowym pomiaru jest wartość sztywności dynamicznej przypadającej na jednostkę powierzchni zastosowanego w podłodze materiału sprężystego s' , obliczana jako suma sztywności dynamicznej na jednostkę powierzchni badanej próbki s'_i i sztywno-

* mgr inż. – specjalista w ITB

** dr inż. – adiunkt w ITB

ści dynamicznej powietrza zamkniętego w materiale na jednostkę powierzchni materiału s_a' , według wzoru:

$$s' = s_i' + s_a', \quad \text{N/m}^3 \quad (2)$$

Wartość pozomej sztywności dynamicznej przypadającej na jednostkę powierzchni badanej próbki s_i' określa się metodą rezonansową przez pomiar częstotliwości rezonansowej podstawowego pionowego drgania systemu sprężyna – masa, gdzie sprężyną jest próbka badanego materiału sprężystego, a masą – płyta obciążająca, i oblicza się z zależności:

$$s_i' = 4 \pi^2 m_i' f_r^2, \quad \text{N/m}^3 \quad (3)$$

w której: m_i' – całkowita masa obciążająca próbkę materiału sprężystego zastosowana podczas badań, kg/m^2 (200 kg/m^2),
 f_r – częstotliwość rezonansowa, Hz.

Wartość sztywności dynamicznej powietrza zamkniętego w materiale przypadającej na jednostkę powierzchni materiału s_a' oblicza się ze wzoru:

$$s_a' = \frac{\rho_0}{d \varepsilon}, \quad \text{N/m}^3 \quad (4)$$

gdzie: ρ_0 – ciśnienie atmosferyczne, N/m^2
 d – grubość badanej próbki pod obciążeniem statycznym, m
 ε – porowatość badanej próbki.

W przypadku materiałów o dużej oporności przepływu powietrza, tj. przy $r \geq 100 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$

$$s' = s_i' \quad (5)$$

W przypadku materiałów o średniej oporności przepływu $100 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2 > r \geq 10 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$ sztywność dynamiczną wyznacza się według wzoru (2).

W przypadku materiałów o małej oporności przepływu $r < 10 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$, jeżeli sztywność dynamiczna powietrza jest mała (pomijalna) w porównaniu z pozorną sztywnością badanej próbki, wówczas sztywność dynamiczną materiału można wyznaczać według zależności (5).

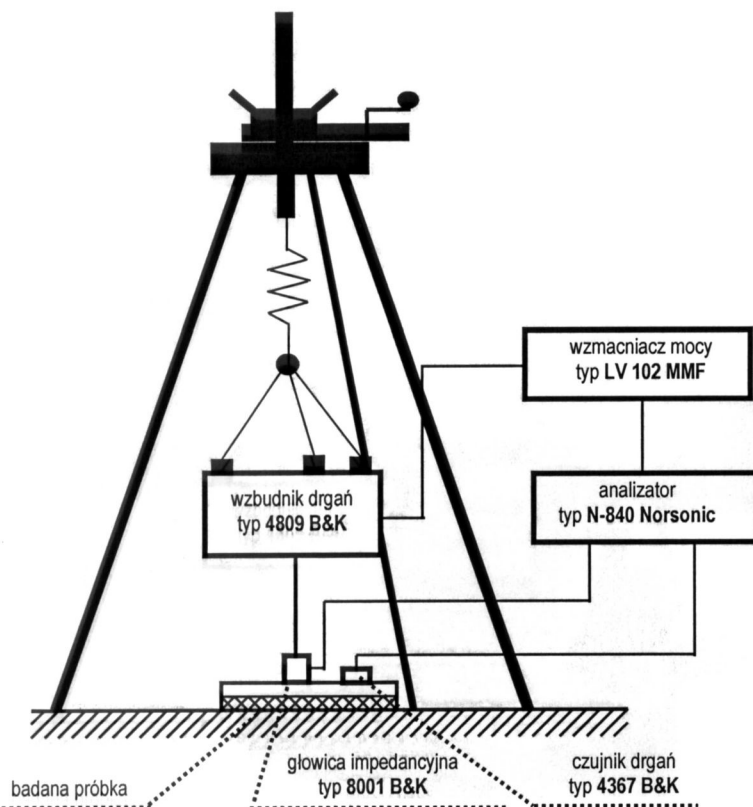
2. Modernizacja stanowiska badawczego do pomiaru sztywności dynamicznej

Przyjęta w Laboratorium Akustycznym ITB procedura pomiarowa określania sztywności dynamicznej materiałów sprężystych stosowanych w podłogach pływających jest oparta na pomiarach częstotliwości rezonansowej podstawowego drgania pionowego badanej próbki i płyty obciążającej traktowanej jako układ o jednym stopniu swobody, tzw. SDOF (single degree of freedom) przy wykorzystaniu wymuszenia układu sygnałem sinusoidalnym (przemiatanym sinusem). Układ pomiarowy poprzez zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego, czyli kompensacji sygnału, pozwala zachować stałą amplitudę siły wymuszającej [1], [2]. Metoda ta w przypadku coraz częściej stosowanych jako materiały podpodłogowe bardzo cienkich mat z polietylenu, styropianu oraz materiałów

charakteryzujących się dużym tłumieniem wewnętrznym (pilśni, korka zwulkanizowanego) nie pozwala na jednoznaczne określenie częstotliwości rezonansowych tych materiałów. Również konstrukcja stanowiska pomiarowego, zwłaszcza sposób zawieszenia wzbudnika drgań i utrudniona możliwość bazstratnego ruchu układu w kierunku pionowym, koniecznego szczególnie w przypadku niezbyt wyraźnych (rozmytych) rezonansów, utrudnia wiarygodne określenie częstotliwości rezonansowych próbek badanych materiałów. Dlatego zdecydowano się przeprowadzić prace zmierzające do modyfikacji stanowiska pomiarowego, jak również modyfikacji stosowanej procedury pomiarowej.

Po przeanalizowaniu wyników prac przedstawionych w opracowaniu [3] stwierdzono, że stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej, którym dysponuje Zakład Akustyki, wymaga jeszcze kilku przeróbek konstrukcyjnych. Wprowadzone zmiany obejmowały:

- wykonanie nowego fundamentu,
- zaprojektowanie i wykonanie nowego statywu do podwieszenia wzbudnika drgań (przy współpracy z Zakładem Mechanicznym ITB),
- zmianę sposobu pobudzania wzbudnika drgań oraz analizy mierzonych sygnałów.

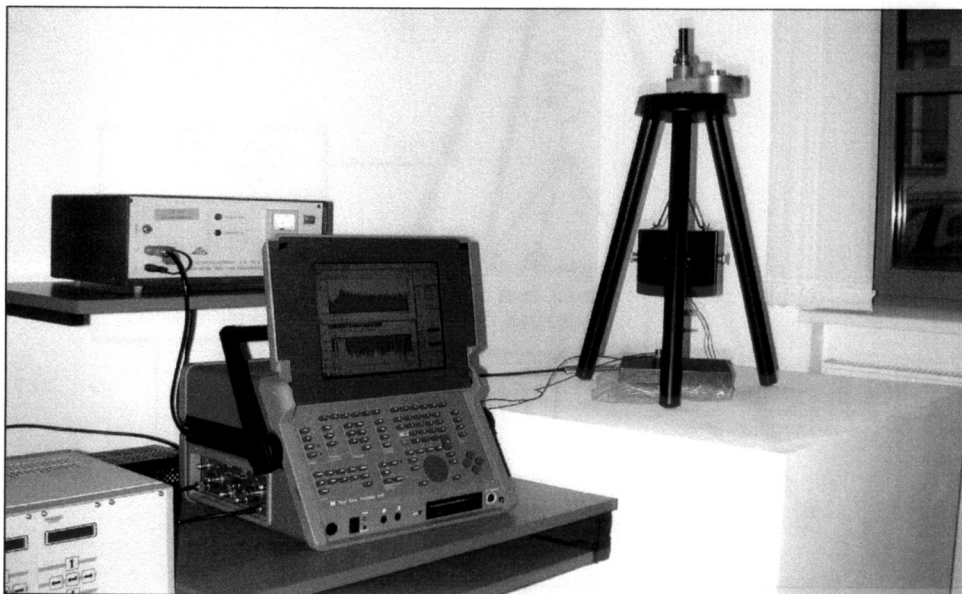


Rys. 1. Schemat pomiarowy zmodyfikowanego stanowiska do pomiaru sztywności dynamicznej
Fig. 1. The measurement diagram of the site for measurement of dynamic stiffness

Zdecydowano się na przeniesienie nowego stanowiska do pomiaru sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach z pomieszczenia w piwnicy do pokoju pomiarowego znajdującego się w nowej części Zakładu Akustyki. W tym celu został wykonany blok fundamentowy o wymiarach (80 × 80 × 120) cm posadowiony bezpośrednio na podłożu gruntowym 40 cm poniżej poziomu podłogi i oddylatowany całkowicie od warstw posadzki płytami z włókna szklanego grubości 2 cm. Blok ten został wykonany z betonu klasy B30 bez zbrojenia. Blok fundamentowy stanowi integralną część stanowiska jako baza pomiarowa niwelująca wpływ otoczenia na wyniki pomiarów.

Wzbudnik drgań został swobodnie podwieszony na 3 ciężkich umocowanych centralnie w jednym punkcie za pomocą sprężyny do specjalnie w tym celu zaprojektowanego i wykonanego statywu. Taki sposób mocowania umożliwi swobodny ruch układu pomiarowego (wzbudnika, płyty dociażającej i próbki) w kierunku pionowym i naturalne wypionowanie osi wzbudnika. Nowy statyw ma większą masę w celu przesunięcia częstotliwości drgań własnych układu pomiarowego poniżej 10 Hz oraz umożliwi pomiar częstotliwości rezonansowej próbek o grubości do 50 mm. Szczegóły konstrukcyjne statywu do podwieszenia wzbudnika drgań zamieszczono w załączniku 1 opracowania [4].

Po przeprowadzeniu wielu badań testujących zdecydowano się pozostać przy wymuszeniu sinusoidalnym, lecz rozszerzono górny zakres do 195 Hz ze względu na dużą różnorodność badanych materiałów. Poza tym brak wyraźnych rezonansów w przypadku materiałów o wysokim tłumieniu wewnętrznym spowodował konieczność określania funkcji przejścia pomiędzy sygnałem wymuszającym a sygnałem odpowiedzi układu, co z kolei wymogło zastosowanie analizy FFT.



Rys. 2. Zmodyfikowane stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach

Fig. 2. Site for measurement of the dynamic stiffness of materials used for floating floors

Tablica 3. Wyniki badań testujących zmodyfikowane stanowisko pomiarowe
 Table 1. Results of the tests of modernized measurement site

Rodzaj próbki	Laboratorium lub stanowisko	Numer próbki	f_r , Hz	s' , MN/m ³
Maty z polietylenu (gr. 6 mm)	VUPS, Praga	1	65,5	33,8
		2	65,8	34,1
		3	64,8	33,1
		średnia	65,4	33,7
		odchyl. stand.	0,5	0,5
	ITB (dotychczasowe stanowisko)	1	64,0	32,3
		2	64,8	33,1
		3	63,7	32,0
		średnia	64,2	32,5
		odchyl. stand.	0,6	0,6
	ITB (stanowisko zmodyfikowane, 1999 r.)	1	64,00	32,3
		2	65,88	34,2
		3	69,80	38,4
		średnia	66,56	35,0
		odchyl. stand.	2,96	3,1
	ITB (stanowisko zmodyfikowane, 2000 r.)	1	63,25	31,6
		2	64,00	32,3
		3	64,50	32,8
		średnia	63,92	32,2
odchyl. stand.		0,63	0,6	
Płyta z włókna szklanego (gr. 30 mm)	VUPS, Praga	1	18,4	2,7
	ITB (stanowisko dotychczasowe)	1	18,2	2,6
	ITB (stanowisko zmodyfikowane, 1999 r.)	1	17,53	2,3
	ITB (stanowisko zmodyfikowane, 2000 r.)	1	18,25	2,6

Wybrany zakres pomiarowy umożliwia pomiar w całym zakresie częstotliwości rezonansowych materiałów stosowanych w podłogach pływających. Zastosowany do pomia-

rów przenośny analizator częstotliwości N-840 firmy NORSONIC w module analizy FFT ma wbudowany generator sygnału sinusoidalnego w każdym przyjętym do analizy zakresie częstotliwości (w naszym przypadku od 0 Hz do 195 Hz). Zastosowany do pomiarów sposób pobudzenia układu do drgań i przyjęcie analizy korelacyjnej metodą FFT umożliwiła określenie przesunięcia fazowego funkcji H1 pomiędzy sygnałem wymuszającym (pomiar siły wymuszenia) a sygnałem odpowiedzi układu (pomiar przyspieszenia drgań układu „masa dociążająca z próbką”). W praktyce określenie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy mierzonymi sygnałami pozwala wyznaczyć częstotliwość rezonansową układu dla niejednoznacznych przypadków (np. rozmyty rezonans lub duże tłumienie wewnętrzne w badanym materiale).

Schemat pomiarowy zmodyfikowanego stanowiska pomiarowego do określania sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach przedstawiono na rysunku 1, natomiast widok stanowiska na rysunku 2.

W celu sprawdzenia poprawności rozumowania przy modyfikacji stanowiska do określania sztywności dynamicznej (częstotliwości rezonansowej) materiałów stosowanych w pływających podłogach przeprowadzono serię pomiarów kilku materiałów o znanych wartościach częstotliwości drgań własnych, zarówno na dotychczasowym stanowisku, jak i na zmodyfikowanym stanowisku pomiarowym – w celu porównania otrzymanych wyników oraz określenia ich dokładności, a następnie odniesiono je do wyników uzyskanych w VUPS w Pradze. Wyniki pomiarów testujących zestawiono w tablicy 3.

3. Modyfikacja procedury pomiarowej

Przeprowadzona modyfikacja stanowiska do pomiaru sztywności dynamicznej (częstotliwości rezonansowej) materiałów stosowanych w pływających podłogach oraz wynikająca z tego zmiana sposobu pomiaru i analizy mierzonych sygnałów spowodowały konieczność określenia postępowania przy wykonywaniu pomiarów oraz analizy rejestrowanych sygnałów. Zasadnicze zmiany w dotychczasowej procedurze pomiarowej stosowanej w akredytowanym laboratorium akustycznym dotyczą:

- przygotowania próbki do badań,
- mierzonych parametrów,
- przyjętej analizy mierzonych sygnałów.

W celu przygotowania próbki do badań należy wyciąć pas folii o wymiarach 210 mm × 430 mm. Na uprzednio wyciętą próbkę o wymiarach 200 mm x 200 mm nałożyć warstwę folii, tak aby przykryć próbkę pozostawiając z trzech stron około 5 mm. Następnie na folii pokrywającej próbkę należy rozprowadzić równomiernie warstwę wazeliny technicznej o grubości od 3 mm do 5 mm, na powstałą w ten sposób warstwę nałożyć wolną część folii, tak aby ją całkowicie przykryć. Po przygotowaniu warstwy pośredniczącej należy położyć na niej płytę dociążającą i docisnąć ją do próbki, eliminując powietrze oraz zapewniając ścisłe przyleganie płyty dociążającej do badanej próbki,

W celu rozszerzenia możliwości pomiaru częstotliwości rezonansowych na niejednoznaczne przypadki (rozmyty rezonans lub duże tłumienie wewnętrzne w badanym materiale) przyjęto, że pomiar będzie obejmował dwa parametry: pomiarom będzie poddany sygnał wymuszający ruch układu oraz odpowiedź układu na zadane wymuszenie. Przy czym

pomiar będzie się odbywał jednocześnie na dwóch kanałach: kanał wejściowy będzie obejmował pomiar siły wymuszającej za pomocą głowicy impedancyjnej, natomiast na kanale wyjściowym będzie rejestrowane przyspieszenie drgań pionowych płyty dociażającej.

Przyjęta dwukanałowa rejestracja sygnałów wymuszającego ruch układu oraz sygnału odpowiedzi układu przy zastosowaniu analizy FFT pozwala na określenie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy mierzonymi sygnałami. Parametr ten pozwala w przypadku materiałów sprężystych na jednoznaczne określenie częstotliwości rezonansowej układu. Ze względu na konieczność sterowania sygnałem wymuszającym oraz rejestrowania – w tym samym czasie – wymienionych wyżej sygnałów zdecydowano, że pomiar będzie się odbywał z wykorzystaniem przenośnego analizatora częstotliwości N-840 firmy NORSONIC, który w module analizy FFT ma wbudowany generator sygnału sinusoidalnego w każdym przyjętym do analizy zakresie częstotliwości (w naszym przypadku od 0 Hz do 195 Hz).

Poniżej przedstawiono sposób postępowania podczas badań sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływakających podłogach oraz elementy składowe opracowanej procedury pomiarowej.

Cel badań

Celem badań jest określenie sztywności dynamicznej materiałów sprężystych stosowanych w pływakających podłogach (parametru wejściowego do określania izolacyjności przeciwdźwiękowej podłóg pływakających).

Przedmiot badań

Przedmiotem badań są wartości pozornej sztywności dynamicznej przypadającej na jednostkę powierzchni badanej próbki materiału sprężystego.

Zakres stosowania

Niniejszą procedurę stosuje się do badań sztywności dynamicznej materiałów sprężystych stosowanych w pływakających podłogach.

Dokument odniesienia

PN-ISO 9052:1994 Akustyka. Określanie sztywności dynamicznej. Część 1: Materiały stosowane w pływakających podłogach w budynkach mieszkalnych

Miejsce i warunki stosowania procedury

Procedura jest stosowana do wykonywania badań w warunkach laboratoryjnych na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku pomiarowym.

Wyposażenie pomiarowe i badawcze wraz z osprzętem

- płyta podstawy (blok betonowy),
- statyw z układem mocującym do swobodnego podwieszenia wzbudnika drgań,
- wzbudnik drgań typu 4809 firmy B & K,
- wzbudnik kalibracyjny typu 4294 firmy B & K,
- stalowa płyta dociażająca o masie $m = 200 \text{ kg/m}^2$,
- głowica impedancyjna typu 8001 firmy B & K,
- przetwornik drgań typu 4367 firmy B & K,
- wzmacniacz mocy typu LV 102 firmy MMF,

- dwukanałowy analizator częstotliwości z generatorem typu N-840 firmy Norsonic,
- wazelina techniczna wraz z wodoodporną cienką folią z tworzywa sztucznego.

Wzorcowanie wyposażenia pomiarowego i badawczego

Przed wykonaniem pomiaru należy sprawdzić poprawność toru pomiarowego i wykonać kalibrację przetworników stosując wzбудnik kalibracyjny typu 4294 firmy B & K. Podczas kalibracji należy postępować zgodnie z instrukcją stosowania wzbudnika kalibracyjnego.

Wybór i przygotowanie próbki do badań

KSZTAŁT I WYMIARY

Badana próbka powinna odpowiadać wymiarom płyty obciążającej, tzn. powinna być kwadratowa o wymiarach $(200 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}) \times (200 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm})$.

LICZBA BADANYCH PRÓBEK

Należy wybrać co najmniej 3 partie materiału i z każdej wyciąć 3 próbki do badań.

Metoda i procedura badań

Metoda przyjęta do przeprowadzenia pomiarów częstotliwości rezonansowej jest oparta na pomiarach dwukanałowych: siły wymuszającej (za pomocą głowicy impedancyjnej) oraz przyspieszenia drgań płyty dociążającej (za pomocą przetwornika drgań). Jako sygnał wymuszenia należy stosować sygnał sinusoidalny w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 195 Hz. W przypadku takiego zakresu częstotliwości pomiar trwa 2 s. Stosując korelacyjną analizę sygnałów metodą FFT należy określić przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem odpowiedzi układu (przyspieszenie drgań płyty dociążającej) a sygnałem wymuszenia (siła nacisku na układ masa – próbka).

Podczas badań należy postępować według poniższej kolejności:

- wyciąć 3 próbki z badanego materiału o wymiarach $(200 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}) \times (200 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm})$,
- wyciąć pas folii o wymiarach $210 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$,
- na wyciętą próbkę o wymiarach $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ nałożyć warstwę folii, tak aby przykryć próbkę, pozostawiając z trzech stron około 5 mm,
- na folii pokrywającej próbkę rozprowadzić równomiernie warstwę wazeliny technicznej o grubości od 3 mm do 5 mm,
- po rozprowadzeniu wazeliny technicznej nałożyć na powstałą w ten sposób warstwę wolną część folii, tak aby ją całkowicie przykryć,
- położyć na tak przygotowanej warstwie wazeliny płytę dociążającą i docisnąć ją do próbki, eliminując powietrze oraz zapewniając ścisłe przyleganie płyty dociążającej do badanej próbki,
- umieścić układ próbka – masa dociążająca pod wzbudnikiem drgań (w osi wzbudnika) i spręgnąć wzbudnik z płytą dociskową (w razie potrzeby regulując wysokością podwieszenia wzbudnika), tak aby wzbudnik znajdował się we własnym położeniu równowagi,
- przeprowadzić pomiar właściwy.

Metoda pomiarów

Podczas określania sztywności dynamicznej jest mierzona częstotliwość rezonansowa podstawowego drgania pionowego układu masa obciążająca – badana próbka za

pomocą określania kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałem odpowiedzi układu a sygnałem wymuszenia, przy wykorzystaniu analizy korelacyjnej FFT.

Metoda obliczeń

Wartość pozornej sztywności dynamicznej przypadającej na jednostkę powierzchni badanej próbki oblicza się z następującej zależności:

$$s_1' = 4 \pi^2 m_1' f_1^2, \quad \text{N/m}^3 \quad (6)$$

gdzie: m_1' – wartość całkowitej masy przypadającej na jednostkę powierzchni, zastosowana podczas badań, kg/m^2 ,

f_1 – zmierzona częstotliwość rezonansowa układu, Hz.

Analiza niepewności wyników pomiarów i obliczeń

W celu określenia niepewności otrzymywanych wyników pomiarów oraz obliczeń przyjęto, że niepewność rozszerzona pomiaru jest zależna od zastosowanej analizy: $U_{f_1} = 0,25$ Hz.

Stosując zasadę sumowania wariancji, przy założeniu, że pomiary były wykonywane według zasad opisanych w niniejszej procedurze, na wyniki pomiarów miały wpływ tylko błędy przypadkowe mające rozkład normalny (takie założenie jest możliwe, jeśli wyniki otrzymywano na drodze eksperymentalnej), można przeprowadzić analizę niepewności pomiaru i obliczeń sztywności dynamicznej.

Obliczenia wartości niepewności uzyskania sztywności dynamicznej dokonuje się za pomocą następującej zależności:

$$U_r = \sqrt{\left(\frac{\partial s_1'}{\partial f_1}\right)^2} U_{f_1}^2 = \sqrt{64 \pi^4 m_1'^2 f_1 0,25^2} = 0,016 f_1 10^6, \quad \text{N/m}^3 \quad (7)$$

4. Podsumowanie

W ramach tematu badawczego NA-26 zrealizowanego w Zakładzie Akustyki wykonano następujące prace:

- Przy współpracy z Zakładem Mechanicznym ITB opracowano projekt i wykonano nowy statyw do podwieszenia wzbudnika drgań na stanowisku do pomiaru sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach.
- Wykonano pomiary testujące zmodyfikowanego układu pomiarowego stanowiska do pomiaru sztywności dynamicznej.
- Zmodyfikowano procedurę pomiarową pomiaru sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w pływających podłogach do zastosowania w akredytowanym laboratorium akustycznym.

Bibliografia

- [1] Mirowska M.: Koncepcja stanowiska do pomiaru oporności przepływu powietrza i wyniki badań testujących stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej. Temat badawczy ITB, NA-26/97, opracowanie wynikowe nr 1, maszyn., biblioteka ITB

- [2] Mirowska M.: Badania testujące metodykę i procedurę pomiaru sztywności dynamicznej materiałów stosowanych w podłogach pływających. Temat badawczy ITB, NA-26/98, opracowanie wynikowe nr 2, maszyn., biblioteka ITB
- [3] Niemas M.: Modernizacja stanowiska do pomiaru sztywności dynamicznej oraz projekt stanowiska do pomiaru oporności przepływu powietrza. Temat badawczy ITB, NA-26/99, opracowanie wynikowe nr 3, maszyn., biblioteka ITB
- [4] Niemas M.: Budowa stanowiska do pomiaru oporności przepływu powietrza i przeprowadzenie pomiarów testujących. Temat badawczy ITB, NA-26/2000, opracowanie wynikowe nr 4, maszyn., biblioteka ITB
- [5] PN-ISO 9052-1 Akustyka. Określenie sztywności dynamicznej. Materiały stosowane w pływających podłogach w budynkach mieszkalnych

MEASUREMENT SITE FOR ESTIMATING DYNAMIC STIFFNESS OF MATERIALS USED FOR FLOATING FLOORS

Summary

In this paper presented the works for modernization the site for estimating dynamic stiffness of materials using for floating floors are presented. We have presented the survey tests, the modernized measurement procedure and the results of the survey tests of modernized site for estimating dynamic stiffness.

Praca wpłynęła do Redakcji 6 VII 2001