CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXI, z. 61 (2/14), kwiecień-czerwiec 2014, s. 81-93

Roman LEWANDOWSKI[1]
Mieczysław SŁOWIK[2]

MODELOWANIE MECHANICZNEGO ZACHOWANIA CIECZY UŻYWANEJ W TŁUMIKACH DRGAŃ

W pracy rozważa się możliwość zastosowania tzw. ułamkowych modeli reologicznych do opisu dynamicznego zachowania cieczy o bardzo dużej lepkości. Ciecz ta jest często stosowana w pasywnych tłumikach drgań. Bierze się pod uwagę ułamkowe modele reologiczne o trzech i czterech parametrach. Posłużono się rezultatami własnych badań w procedurze identyfikacji parametrów modeli. Dyskutuje się wpływ temperatury cieczy i wpływ amplitudy drgań na wartości parametrów modeli. Wykazano, że ułamkowy, trójparametrowy model Maxwella umożliwia wystarczająco dokładny opis dynamicznego zachowania rozpatrywanej cieczy.

Słowa kluczowe: ciecz lepkosprężysta, badania eksperymentalne, ułamkowe modele reologiczne, identyfikacja parametrów

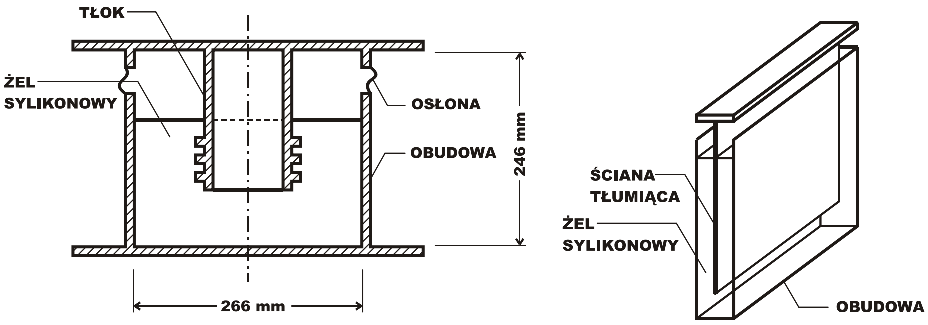
1. Wprowadzenie

Ciecze o bardzo dużej lepkości są często stosowane do budowy lepkosprężystych, cieczowych tłumików drgań. Istnieje wiele typów takich tłumików. W firmie GERB zaprojektowano tłumik schematycznie pokazany na rys. 1. Jest on używany do redukcji drgań rurociągów i jako element układu izolacji sejsmicznej. Cylinder jest wypełniony żelem silikonowym; cieczą o bardzo dużej lepkości**.** Ruch tłoka powoduje odkształcenia cieczy i dyssypację energii. Innym typem tłumika cieczowego jest tzw. ściana tłumiąca, pokazana schematycznie na rys. 1. W tym rozwiązaniu funkcję tłoka pełni stalowa płyta poruszająca się w swej płaszczyźnie i zanurzona w wąskim stalowym kontenerze wypełnionym cieczą o dużej lepkości. Urządzenie to jest zwykle umieszczone na stropie budynku, przy czym płyta stalowa jest przymocowana do stropu górnej kondygna-

[1] Autor do korespondencji/corresponding author: Roman Lewandowski, Politechnika Poznańska, Instytut Konstrukcji Budowlanych, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 5, tel. (61) 665 2472, e-mail: roman.lewandowski@put.poznan.pl
[2] Mieczysław Słowik, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 5, tel. (61) 665 2487, e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl

cji, a pojemnik do stropu dolnej kondygnacji. Względne ruchy obu stropów powodują ruch ściany tłumiącej względem kontenera, ścinanie cieczy i rozpraszanie energii. Lepkość cieczy powinna być bardzo duża, aby efekty tłumienia były znaczące. Właściwości cieczy używanych w tego typu tłumikach w istotny sposób zależą od częstości wymuszenia i temperatury cieczy.

Właściwości tłumików cieczowych zazwyczaj określa się wykonując odpowiednie badania dynamiczne tłumików [1], a ich zachowanie opisuje się za pomocą różnorodnych modeli reologicznych [2 - 4]. Podejście to wymaga wykonania żmudnych i kosztownych badań doświadczalnych, które należy wykonać dla każdego rodzaju tłumika. Zwykle badania te można przeprowadzić dla niskich częstości wymuszenia, a kontrola temperatury w trakcie badań jest bardzo utrudniona.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie cieczowych tłumików drgań

Fig. 1. Schematic view of fluids dampers

W kilku pracach podjęto próbę numerycznego modelowania zachowania cieczowego tłumika drgań [5, 6]. To podejście stwarza możliwość ograniczenia zakresu badań doświadczalnych tłumików. Wymagana jest jednak znajomość właściwości cieczy używanych do wykonania omawianych tłumików. Badania cieczy o bardzo dużej lepkości, dla dużego zakresu częstości wymuszenia oraz precyzyjnie ustalonej temperatury cieczy można w standardowy sposób przeprowadzić przy użyciu reometru. Wyniki tak przeprowadzonych badań mogą być użyte w numerycznym modelu zachowania tłumika.

Ciecze o bardzo dużej lepkości stosowane w tłumikach drgań, są tzw. cieczami nienewtonowskimi, a ich równania konstytutywne często zawierają pochodne ułamkowego rzędu [7, 8].

W pracy omawia się rezultaty badań cieczy o bardzo dużej lepkości, z użyciem reometru dynamicznego ścinania. Przedstawiono również wyniki identyfikacji modelu reologicznego i jego parametrów i na tej podstawie ustalono równanie konstytutywne badanej cieczy. Badaniom poddano ciecz o nazwie polydimethylsiloxane (C_2H_6OSi) często używaną do wykonania tłumików cieczowych.

2. Opis przeprowadzonych badań

Badania omawianej cieczy zostały przeprowadzone w Laboratorium Badawczym Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej w 2011 roku. Badania wykonano za pomocą reometru dynamicznego ścinania DSR (ang. Dynamic Shear Rheometer) typu Physica MCR 101 produkcji niemieckiej firmy Anton Paar Germany GmbH. Reometr DSR zastosowany w badaniach ma następujące parametry: zakres momentu obrotowego: od 0,5 μNm do 125 mNm; zakres prędkości obrotowej: od 10^{-4} min^{-1} do $3{\cdot}10^{3}$ min^{-1}, zakres częstości wymuszenia: od 10^{-4} Hz do 10^{2} Hz.

W badaniach wykorzystano układ pomiarowy składający się z dwóch metalowych płyt równoległych o średnicy $\varnothing$ = 25 mm. Próbki badanego materiału umieszczano w szczelinie pomiędzy dwiema płytami, której szerokość przyjmowano równą 1,0 mm. W napędzie układu pomiarowego zastosowane jest łożysko powietrzne, dzięki czemu zostały zminimalizowane opory tarcia podczas ruchu oscylacyjnego płyty ruchomej.

Przeprowadzano badania cieczy w różnych temperaturach. Temperatura badanej cieczy była równa: 20°C oraz 50°C i była utrzymywana z tolerancją ±0,1°C.

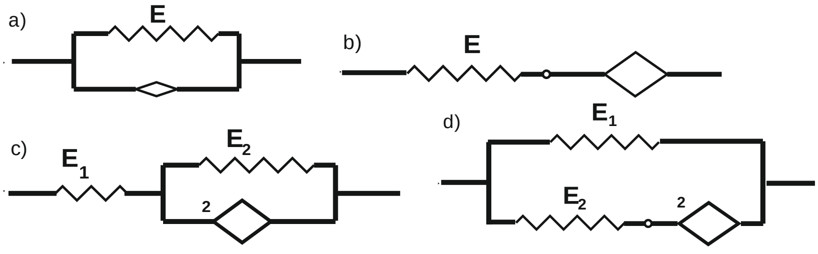
Ciecz pobudzano do ruchu oscylacyjnego, sinusoidalnie zmiennego wywołując przemieszczenia kątowe płyty ruchomej. Wykonano badania przyjmując różne amplitudy przemieszczeń kątowych płyty. Amplitudy te były równe: 0,01 mrad; 0,1 mrad; 1 mrad; 10 mrad; 20 mrad oraz 100 mrad. Przy ustalonej temperaturze i zadanej amplitudzie wymuszenia wykonywano badania dla różnych częstotliwości wymuszenia wziętych z przedziału 10^{-1} – 10^{2} Hz. Reometr mierzy szereg wielkości fizycznych, z których najistotniejsze znaczenie dla dalszych rozważań mają: zespolony moduł ścinania $|G^*|$ oraz kąt przesunięcia fazowego φ.

3. Opis ułamkowych modeli reologicznych

Istnieje szereg modeli reologicznych opisujących właściwości cieczy o dużej lepkości. Modele te można podzielić na klasyczne modele reologiczne i tzw. ułamkowe modele reologiczne [3, 4]. Tych ostatnich używa się do opisu właściwości omawianej cieczy. Analizowano możliwości użycia czterech ułamkowych modeli reologicznych: a) trójparametrowego modelu Kelvina (K3), b) trójparametrowego modelu Maxwella (M3), c) czteroparametrowego modelu standardowego (S4) i d) czteroparametrowego modelu Zenera (Z4).

Schematy mechaniczne omawianych modeli pokazano na rys. 2, na którym za pomocą rombu przedstawiono tzw. element sprężysto-tłumiący (the spring-pot element). Równanie konstytutywne tego elementu ma postać:

$$\sigma(t) = \eta D_t^{\alpha} \varepsilon(t)\,, \tag{1}$$



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie ułamkowych modeli reologicznych, a) trójparametrowy model Kelvina (K3), b) trójparametrowy model Maxwella (M3), c) czteroparametrowy model standardowy (S4), d) czteroparametrowy model Zenera (Z4)

Fig. 2. Schematic view of fractional rheological models, a) three-parameter Kelvin model (K3), b) three-parameter Maxwell model (M3), c) fourth-parameter standard model (S4), d) fourth-parameter Zener model (Z4)

gdzie $\sigma(t)$ jest naprężeniem ścinającym, $\varepsilon(t)$ odkształceniem postaciowym, η jest lepkością dynamiczną. Symbol t oznacza czas, a symbol $D_t^\alpha x(t)$ pochodną ułamkową Riemanna-Liouville'a rzędu α , $0<\alpha\le 1$, zdefiniowaną w następujący sposób:

$$D_t^\alpha x(t) \equiv \frac{d^\alpha x(t)}{dt^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{d}{dt}\int_0^t \frac{x(s)}{(t-s)} ds \quad , \tag{2}$$

gdzie symbolem Γ oznaczono funkcję specjalną gamma, (patrz [10]).

Równania trójparametrowych modeli Kelvina i Maxwella mają odpowiednio postać:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + E\tau^\alpha D_t^\alpha \varepsilon(t) \;, \quad \sigma(t) + \tau^\alpha D_t^\alpha \sigma(t) = \tau^\alpha E D_t^\alpha \varepsilon(t) \;, \tag{3}$$

gdzie E jest modułem sprężystości, a $\tau^\alpha = \eta / E$.

Zachowanie modeli czteroparametrowych jest opisane równaniem:

$$\sigma(t) + \tau^\alpha D_t^\alpha \sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + \tau^\alpha E_\infty D_t^\alpha \varepsilon(t) \;, \tag{4}$$

W modelu standardowym $E_0 = E_1 E_2 /(E_1 + E_2)$, $E_\infty = E_1$, $\tau^\alpha = \eta_2 /(E_1 + E_2)$, a w modelu Zenera $E_\infty = E_1 + E_2$, $\tau^\alpha = \eta_2 / E_2$, $E_0 = E_1$. Znaczenie symboli E_1 i E_2 objaśniono na rys. 2.

Ważnymi charakterystykami modeli reologicznych jest dynamiczny moduł sprężystości $E'(\lambda)$ i moduł rozpraszania energii $E''(\lambda)$. Moduły te wyznacza się zakładając, że zmiany naprężenia i odkształcenia w czasie opisują funkcje $\sigma(t) = \sigma_0 \exp(i\lambda t)$, $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \exp(i\lambda t)$, gdzie λ jest częstością drgań. Po wykonaniu stosownych przekształceń otrzymuje się następujące zależności:

$$E'(\lambda)=\frac{E_0+(E_0+E_\infty)(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+E_\infty(\tau\alpha)^{2\alpha}}{1+2(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(\tau\alpha)^{2\alpha}}\ , \tag{5}$$

$$E''(\lambda)=\frac{(E_\infty-E_0)(\tau\alpha)^\alpha\sin(\alpha\pi/2)}{1+2(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(\tau\alpha)^{2\alpha}}\ , \tag{6}$$

w przypadku modeli czteroparametrowych oraz

$$E'(\lambda)=E+E(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)\ ,\quad E''(\lambda)=E(\tau\alpha)^\alpha\sin(\alpha\pi/2)\ , \tag{7}$$

$$E'(\lambda)=E(\tau\alpha)^\alpha\frac{(\tau\alpha)^\alpha+\cos(\alpha\pi/2)}{1+2(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(\tau\alpha)^{2\alpha}}\ , \tag{8}$$

$$E''(\lambda)=E(\tau\alpha)^\alpha\frac{\sin(\alpha\pi/2)}{1+2(\tau\alpha)^\alpha\cos(\alpha\pi/2)+(\tau\alpha)^{2\alpha}}\ , \tag{9}$$

w przypadku odpowiednio trójparametrowego modelu Kelvina i Maxwella (patrz [4]).

W zastosowanej procedurze identyfikacji parametrów modeli reologicznych istotna jest znajomość rozwiązania problemu drgań ustalonych cieczy. Stan ustalony drgań harmonicznie zmiennych cieczy opisywany jest równaniami (patrz [4]):

$$\sigma(t)=\sigma_c\cos\lambda t+\sigma_s\sin\lambda t\ ,\quad \varepsilon(t)=\varepsilon_c\cos\lambda t+\varepsilon_s\sin\lambda t\ , \tag{10}$$

a zależności między współczynnikami σ_c, σ_s, ε_c i ε_s mają postać:

$$\sigma_c=E'(\lambda)\varepsilon_c+E''(\lambda)\varepsilon_s\ ,\quad \sigma_s=-E''(\lambda)\varepsilon_c+E'(\lambda)\varepsilon_s\ , \tag{11}$$

4. Ogólny opis metody identyfikacji

Zastosowano procedurę identyfikacji parametrów szczegółowo opisaną w [11]. Tutaj pokrótce omawia się sformułowanie problemu identyfikacji jako zadania optymalizacji. Zakłada się, że dysponuje się, dla zadanej amplitudy odkształceń i temperatury, ciągiem wartości modułów $E'_{ei}(\lambda_i)$ i $E''_{ei}(\lambda_i)$ wyznaczonych doświadczalnie dla zbioru częstości wymuszenia λ_i $((i=1,2,...,n)$.

Parametry modeli reologicznych (E_0, E_∞, τ i α w przypadku modeli czteroparametrowych oraz E, τ i α w przypadku modeli trójparametrowych) dobiera się tak, aby zminimalizować wartość funkcjonału o postaci:

$$J=\sum_{i=1}^{n}\left[(E'_{ei}(\lambda_i)-E'_i(\lambda_i))^2+(E''_{ei}(\lambda_i)-E''_i(\lambda_i))^2\right], \tag{12}$$

przy ograniczeniach

$$0 < \alpha \le 1 \ , \quad \tau > 0 \ , \quad E_\infty > E_0 > 0 \ , \tag{13}$$

jeżeli rozpatruje się modele czteroparametrowe lub z ograniczeniami

$$0 < \alpha \le 1 \ , \quad \tau > 0 \ , \quad E > 0 \ , \tag{14}$$

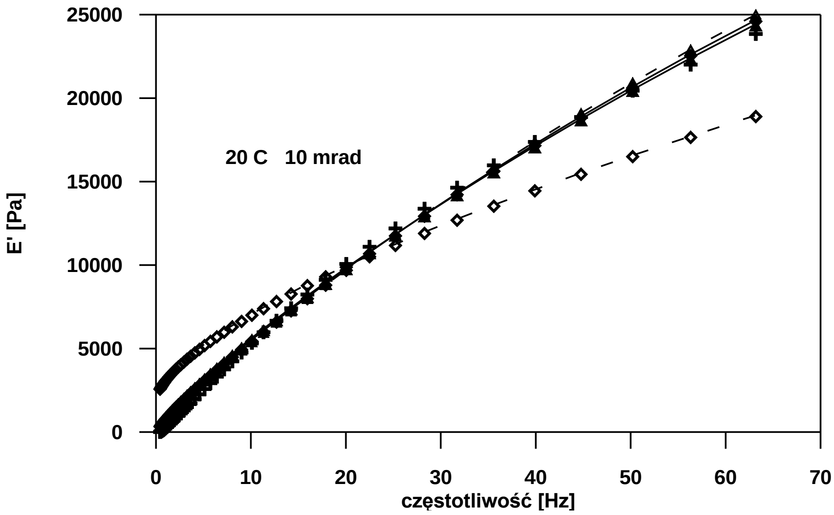
jeżeli rozpatruje się modele trójparametrowe.

Powyższe zadanie optymalizacji rozwiązano metodą roju cząstek (the particle swarm optimization method) opisaną np. w pracach [11, 12]. Każde zadanie optymalizacji rozwiązywano 50 razy. W obliczeniach zastosowano rój liczący 20 cząstek. Każda cząstka roju poszukiwała optymalnego zbioru parametrów identyfikacji zmieniając 500 razy swoje położenie. Jako rozwiązanie problemu przyjmowano najlepsze ze wszystkich otrzymanych położeń cząstek roju, tzn. takie położenie, dla którego wartość funkcjonału (12) była najmniejsza i równocześnie były spełnione ograniczenia (13) lub (14).

5. Wyniki identyfikacji

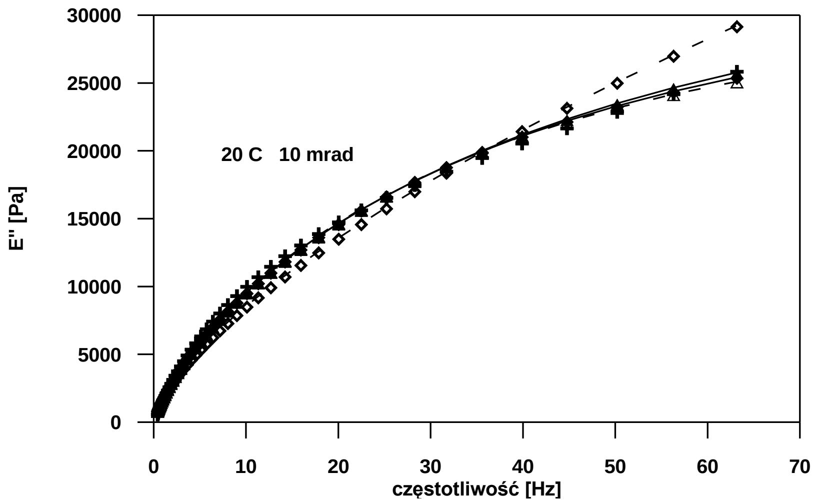
Typowe wyniki identyfikacji przedstawiono na rys. 3 i 4, na których pokazano moduły E' (rys. 3) i E'' (rys. 4) w zależności od częstotliwości wymuszenia λ. Na wspomnianych rysunkach wartości modułów E' i E'' otrzymane z pomiarów zaznaczono krzyżykami ($+$), wartości tych modułów wyznaczone za pomocą modeli reologicznych przy pomocy nie zaczernionych rombów (◇, model K3), nie zaczernionych trójkątów (△, model M3), zaczernionych rombów (◆, model S4) i zaczernionych trójkątów (▲, model Z4). Wyniki doświadczalne dotyczą badania wykonanego w temperaturze 20°C. Amplituda drgań skrętnych wynosiła 10 mrad, a dane doświadczalne otrzymano dla częstotliwości z przedziału od 0,3 Hz do 63,0 Hz. Widać, że trójparametrowy, ułamkowy model Kelvina nie opisuje poprawnie właściwości omawianej cieczy. Pozostałe modele opisują te właściwości w sposób zadawalający. Wobec tego w dalszej części pracy opisano wyniki identyfikacji uzyskane dla ułamkowych modeli Maxwella, standardowego i Zenera.

Wartości parametrów tych modeli zestawiono w Tabeli 1. Z tego zestawienia wynika, że właściwości omawianej cieczy mogą być opisane za pomocą trójparametrowego, ułamkowego modelu Maxwella. Wartości lepkości dynamicznej (η lub η_2) we wszystkich modelach są zbliżone (maksymalne różnice około 3%), ponadto w modelu standardowym moduł sprężystości $E_2 = 0$, a w modelu Zenera $E_1 = 0$. Oznacza to, że modele czteroparametrowe redukują się do trójparametrowego modelu Maxwella. Różnice między wartościami modułów sprężystości E wynoszą około 8%. Wartości parametru α (rzędu pochodnej ułamkowej) różnią się od siebie o mniej niż 3%.



Rys. 3. Porównanie wyników identyfikacji – zależność modułu E' od częstotliwości wymuszenia, wyniki doświadczalne (+), model Kelvina (K3) (◇), model Maxwella M3 (△), model standardowy S4 (◆), model Zenera Z4 (▲)

Fig. 3. Comparison of identification results – modulus E' vs. Excitation frequency, experimental results (+), Kelvin model (K3) (◇), Maxwell model M3 (△), standard model S4 (◆), Zener model Z4 (▲)



Rys. 4. Porównanie wyników identyfikacji – zależność modułu E'' od częstotliwości wymuszenia, wyniki doświadczalne (+), model Kelvina (K3) (◇), model Maxwella M3 (△), model standardowy S4 (◆), model Zenera Z4 (▲)

Fig. 4. Comparison of identification results – modulus E'' vs. Excitation frequency, experimental results (+), Kelvin model (K3) (◇), Maxwell model M3 (△), standard model S4 (◆), Zener model Z4 (▲)

Tabela 1. Wartości stałych różnych modeli cieczy

Table 1. Values of parameters of different models of fluids

Model	E lub E_1 [Pa]	η lub η_2 $[\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s}^{\alpha}]$	E_2 [Pa]	α [-]
Maxwella	85931,0	2060,9	-	0,7500
Standardowy	92931,0	2129,4	0,0	0,7369
Zenera	0,0	2067,8	88898,4	0,7301

W Tabeli 2 zestawiono wartości parametrów modelu Maxwella oraz modelu standardowego dla trzech różnych amplitud drgań skrętnych reometru. Widać, że w analizowanym przedziale amplitud drgań wartości parametrów są w przybliżeniu stałe.

Tabela 2. Zależność wartości parametrów od amplitudy drgań skrętnych reometru

Table 2. Dependence of parameter values on amplitudes of torsion vibration of rheometer

Amplituda [mrad]	Model Maxwella			Model standardowy			
	E [Pa]	η $[\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s}^{\alpha}]$	α [-]	E_1 [Pa]	E_2 [Pa]	η $[\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s}^{\alpha}]$	α [-]
0,10	80614,7	2038,84	0,7544	80362,8	168,4	1999,2	0,7595
1,00	87876,0	2095,16	0,7470	96591,5	187,4	2172,0	0,7325
10,0	85931,0	2060,90	0,7500	92931,0	0,0	2129,4	0,7369

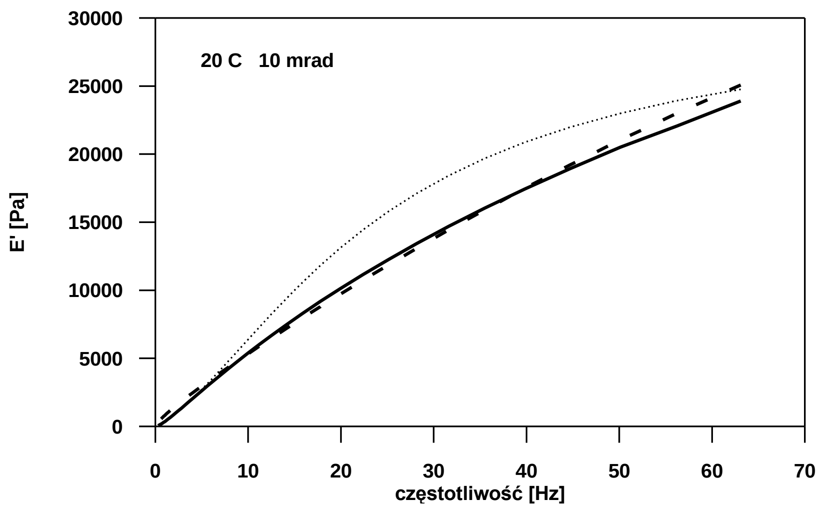
W Tabeli 3 pokazano zmiany wartości parametrów modelu Maxwella w zależności od zmiany przedziału częstotliwości wymuszenia, dla którego wykonuje się badania eksperymentalne. Obliczenia wykonano dla drgań o amplitudzie 10 mrad wykonywanych w temperaturze $20^{0}\mathrm{C}$. Widać istotne różnice w wartościach parametrów modelu ułamkowego Maxwella. Oznacza to, że wyników identyfikacji nie można zbytnio rozszerzać poza przedział częstotliwości wymuszenia, dla którego wykonano badania doświadczalne. Podobne uwagi można znaleźć w opracowaniach dotyczących identyfikacji parametrów klasycznych modeli reologicznych.

Na rys. 5 i 6 pokazano, w jaki sposób omawiane różnice wartości parametrów ułamkowego modelu Maxwella wpływają na przebieg funkcji $E'(\lambda)$ i $E''(\lambda)$. Na wspomnianych rysunkach linią ciągłą pokazano wartości modułów $E'(\lambda)$ i $E''(\lambda)$ otrzymane na podstawie wyników badań, linią kreskowaną krzywe $E'(\lambda)$ i $E''(\lambda)$ wyznaczone przy użyciu wartości parametrów modelu

Tabela 3. Zależność wartości parametrów od przedziału częstotliwości wymuszenia

Table 3. Dependence of parameter values on a range of excitation frequencies

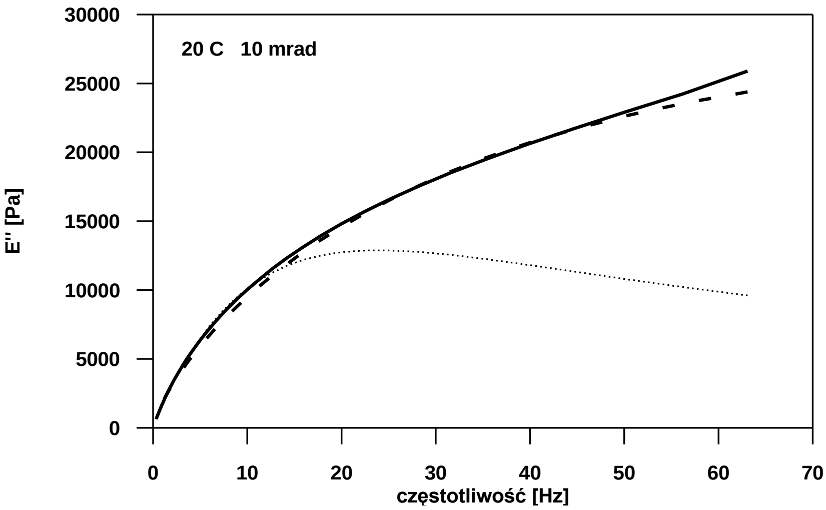
Przedział częstotliwości [Hz]	Model Maxwella		
	E [Pa]	η [$\mathrm{Pa \cdot s^{\alpha}}$]	α [-]
0,3 – 63,0	80614,7	2038,8	0,7544
0,3 – 50,0	75925,2	1992,2	0,7676
0,3 – 43,0	68786,9	1941,9	0,6009
0,3 – 28,0	60248,8	1885,1	0,8033
0,3 – 20,0	52960,2	1843,2	0.8229
0,3 – 10,0	40452,7	1793,3	0,8602
0,3 – 5,0	30474,4	1781,8	0,8937



Rys. 5. Przebieg funkcji $E'(\lambda)$ dla różnych wartości parametrów modelu Maxwella M3

Fig. 5. Course of function $E'(\lambda)$ for different values of parameters of the Maxwell model M3

Maxwella wziętych z pierwszego wiersza Tabeli 3, a linią kropkowaną krzywe $E'(\lambda)$ i $E''(\lambda)$ wyznaczone przy użyciu wartości parametrów wziętych z ostatniego wiersza Tabeli 3. Widać, że nie można stałych modelu wyznaczonych na



Rys. 6. Przebieg funkcji $E''(\lambda)$ dla różnych wartości parametrów modelu Maxwella M3

Fig. 6. Course of function $E''(\lambda)$ for different values of parameters of the Maxwell model M3

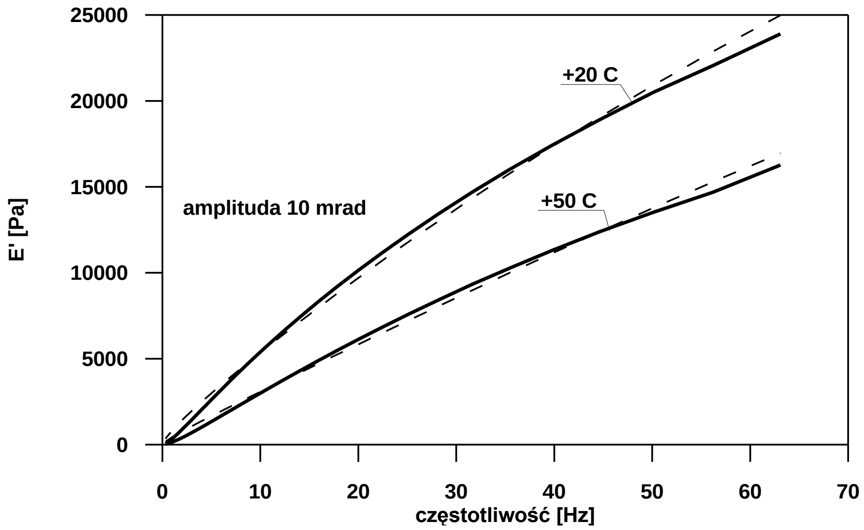
podstawie badań wykonanych w małym przedziale częstotliwości wymuszenia używać do obliczania omawianych modułów poza tym przedziałem. Dotyczy to zwłaszcza modułu $E''(\lambda)$.

Z wykresów pokazanych na rys. 7 i 8 wynika, że właściwości badanej cieczy w istotny sposób zależą od jej temperatury w trakcie badania. Na wspomnianych rysunkach linią ciągłą pokazano wyniki badań, a linią przerywaną wartości funkcji $E'(\lambda)$ lub $E''(\lambda)$ wynikające z ułamkowego modelu Maxwella. Wartości parametrów ułamkowego modelu Maxwella zestawiono, dla różnych temperatur w Tabeli 4. Widać, że zmiana temperatury ma największy wpływ na stałą η, dynamiczny współczynnik lepkości. Zakres przeprowadzonych badań nie pozwala jednak na zaproponowanie modelu, który uwzględniałby wpływ temperatury badanej cieczy.

Tabela 4. Zależność wartości parametrów od temperatury

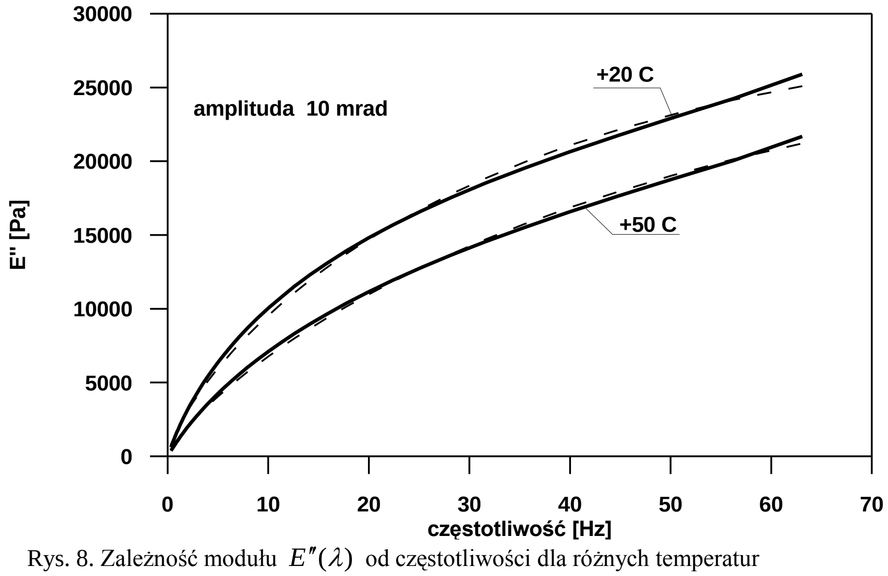
Table 4. Dependence of parameter values on temperature

Temperatura [°C]	Model Maxwella		
	E [Pa]	η [$\mathrm{Pa \cdot s^{\alpha}}$]	α [-]
20,0	80614,7	2038,8	0,7544
50,0	77141,4	1260,3	0,7865



Rys. 7. Zależność modułu $E'(\lambda)$ od częstotliwości dla różnych temperatur

Fig. 7. Dependence of storage modulus $E'(\lambda)$ on frequency for different temperatures



Rys. 8. Zależność modułu $E''(\lambda)$ od częstotliwości dla różnych temperatur

Fig. 8. Dependence of storage modulus $E''(\lambda)$ on frequency for different temperatures

6. Uwagi końcowe

W pracy opisano wyniki badań eksperymentalnych cieczy o bardzo dużej lepkości używanej w pasywnych, cieczowych tłumikach drgań. Zaproponowano trójparametrowy, ułamkowy model reologiczny Maxwella do opisu dynamicznego zachowania omawianej cieczy. Wykazano, że model ten wystarczająco dokładnie opisuje właściwości cieczy o bardzo dużej lepkości dla dużego przedziału częstotliwości wymuszenia. Pokazano, ze stałe modelu w istotny sposób zależą od temperatury cieczy. Wykazano również, że wyniki identyfikacji stałych wystarczająco dobrze opisują zachowanie cieczy tylko w tym przedziale częstotliwości wymuszenia, dla którego dysponuje się danymi eksperymentalnymi.

Podziękowania

Część pracy wykonano w ramach programu badań sponsorowanego przez Narodowe Centrum Nauki (Projekt Nr 2013/09/B/ST8/01733), prowadzonego w latach 2014-2016.

Literatura

[1] T.T. Soong, G.F. Dargush, *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, Chichester, Wiley 1999.

[2] N. Makris, M.C. Constantinou, Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers, *Journal of Structural Engineering,* **117**, 2708 – 2724, 1991.

[3] Park S.W., Analytical modeling of viscoelastic dampers for structural and vibration control, *International Journal of Solids and Structures,* **38**, 8065 – 8092, 2001.

[4] R. Lewandowski, B. Chorążyczewski, Identification of the parameters of the Kelvin-Voigt and the Maxwell fractional models, used to modeling of viscoelastic dampers, *Computers and Structures*, **88,** 1-17, 2010.

[5] C.Y. Hou, Fluids dynamics and behavior of nonlinear fluid dampers, *Journal of Structural Engineering,* **134**, 56-63, 2008.

[6] C. Frings, J.C. De La Llera, Multiphysics modeling and experimental behavior of viscous damper, G. De Roeck, G. Degrande, G. Lambert, G. Muller eds. *The 8th International Conference on Structural Dynamics, (EURODYN 2011)*, Leuven, Belgium, July 4-6, 2011.

[7] D. Tong, Y. Liu, Exact solutions for the unsteady rotational flow of non-Newtonian fluid in an annular pipe, *International Journal of Engineering Science*, **43**, 281–289, 2005.

[8] P. Yang, Y. Lam, K. Zhu Constitutive equation with fractional derivatives for the generalized UCM model, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics,* **165**, 88–97, 2010.

[9] Z. Osiński, Tłumienie drgań mechanicznych, PWN, Warszawa 1979.

[10] I. Podlubny, *Fractional differential equations.* Academic Press, 1999.

[11] R. Lewandowski, Identification of the parameters of the fractional rheological models of viscoelastic dampers using particle swarm optimization, *Proceedings of the 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics*, May 9-12, Warsaw, Poland, 2011

[12] R.E. Perez, K. Behdinan, Particle swarm approach for structural design optimization, *Computers and Structures*, **85**, 1579-1588, 2007.

MODELLING OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF FLUID USED IN DAMPERS

Summary

In the paper the possibility of using the fractional rheological models to description of dynamic behavior of fluid of high viscosity is discussed. The considered high viscosity fluid is often used in the passive dampers. The fractional rheological models with three and fourth parameters are taken into account. The experimental data taken from our own experiments are used in the identification procedure. The influence of temperature of fluid and the influence of amplitude of vibration on values of model parameters are also presented and discussed. It was found that the fractional Maxwell model with three parameters is able to sufficiently well describe the dynamic behavior of considered fluid.

Keywords: viscoelastic fluid, experimental study, fractional rheological models, parameters identification

DOI:10.7862/rb.2014.31

Przesłano do redakcji: 27.03.2014 r.
Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.