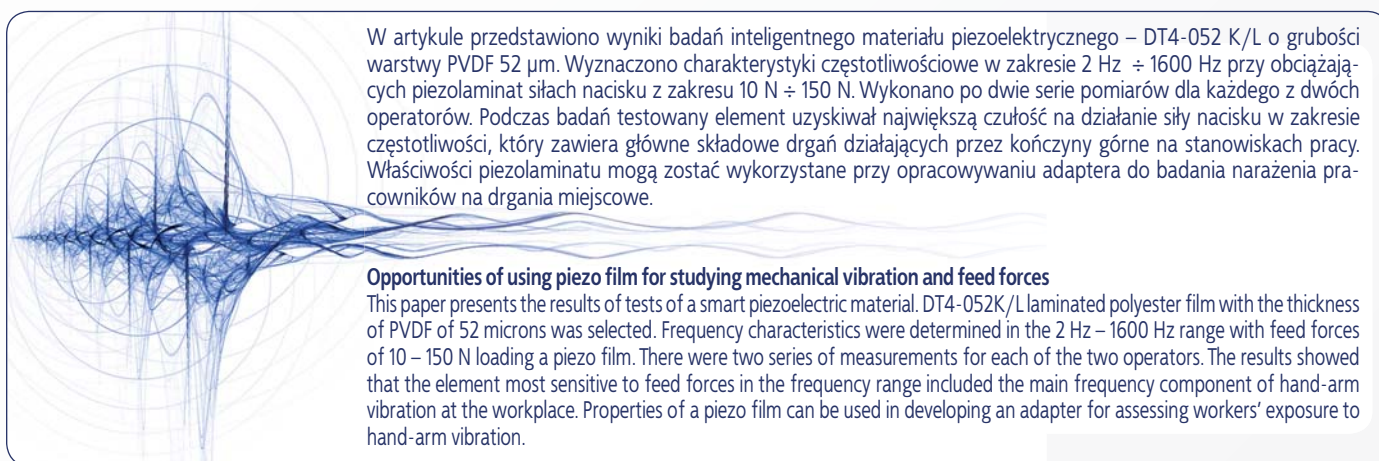


dr inż. PIOTR KOWALSKI  
mgr inż. JACEK ZAJĄC  
Centralny Instytut Ochrony Pracy  
– Państwowy Instytut Badawczy

# Możliwości wykorzystania piezolaminatów do badania drgań mechanicznych oddziałujących przez kończyny górne

Fot. Yurok Aleksandrovich / Bigstockphoto



W artykule przedstawiono wyniki badań inteligentnego materiału piezoelektrycznego – DT4-052 K/L o grubości warstwy PVDF 52  $\mu\text{m}$ . Wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe w zakresie 2 Hz  $\div$  1600 Hz przy obciążających piezolaminat siłach nacisku z zakresu 10 N  $\div$  150 N. Wykonano po dwie serie pomiarów dla każdego z dwóch operatorów. Podczas badań testowany element uzyskiwał największą czułość na działanie siły nacisku w zakresie częstotliwości, który zawiera główne składowe drgań działających przez kończyny górne na stanowiskach pracy. Właściwości piezolaminatu mogą zostać wykorzystane przy opracowywaniu adaptera do badania narażenia pracowników na drgania miejscowe.

## Opportunities of using piezo film for studying mechanical vibration and feed forces

This paper presents the results of tests of a smart piezoelectric material. DT4-052K/L laminated polyester film with the thickness of PVDF of 52 microns was selected. Frequency characteristics were determined in the 2 Hz – 1600 Hz range with feed forces of 10 – 150 N loading a piezo film. There were two series of measurements for each of the two operators. The results showed that the element most sensitive to feed forces in the frequency range included the main frequency component of hand-arm vibration at the workplace. Properties of a piezo film can be used in developing an adapter for assessing workers' exposure to hand-arm vibration.

## Wstęp

W Unii Europejskiej ocena narażenia na drgania mechaniczne działające na pracowników przez kończyny górne dokonywana jest głównie na podstawie metody zawartej w serii PN-EN ISO 5349 [1, 2]. Podana metoda pomiaru i oceny nawiązuje do wymagań Dyrektywy 2002/44/WE dotyczącej minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa pracowników narażonych na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (drganiami) [3]. Mimo że zapisano w niej wymagania dotyczące konieczności uwzględniania czynników otoczenia i charakteru drgań, ich spełnienie nie jest możliwe przy zastosowaniu tradycyjnych przetworników drgań ze względu na ich możliwości pomiarowe, ograniczone do jednego parametru – przyspieszenia bądź prędkości drgań. Badania prowadzone zarówno w CIOP-PIB jak i w innych ośrodkach na świecie potwierdzają, że transmisja drgań w układzie ręka człowieka – narzędzie zależna jest m.in. od sił (nacisku i zacisku) wywieranych przez niego na narzędzie, od kierunku działających drgań oraz od temperatury otoczenia [4, 5, 6]. Parametry te (przeważnie poza temperaturą) zmieniają się podczas wykonywania przez pracownika typowych operacji narzędziem, co jest dodatkowym utrudnieniem przy określaniu ich wpływu. Oznacza to, że przy tej samej amplitudzie wpływ drgań na organizm człowieka może być bardzo różny w zależności od ich charakteru i od wymienionych parametrów środowiska pracy.

Nowe możliwości pomiarowe stwarzają materiały inteligentne (*smart material*), których odmiany wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne mogą być zastosowane jako wielokierunkowe przetworniki zarówno drgań, jak i sił czy temperatury [7-10]. Tzw. proste zjawisko piezoelektryczne, odkryte w 1880 r. przez braci Curie polega na wytwarzaniu ładunku elektrycznego na powierzchniach materiału pod wpływem deformacji jego kształtu na skutek przyłożonej siły. Historycznie najstarszym materiałem, którego właściwości piezoelektryczne zostały wykorzystane w praktyce jest kwarc [11, 12]. Najszerszą grupę wśród nowych materiałów piezoelektrycznych, oprócz piezoceramików, stanowią folie wykonane na bazie polimerów piezoelektrycznych. Najbardziej popularnym polimerem jest polifluorek winylidenu oznaczany skrótem PVDF oraz jego kopolimery [polimery zawierające dwa lub więcej merów i posiadające właściwości fizyczne inne niż (homo)polimery]. Polifluorek winylidenu (PVDF) jest polimerem o wysokim stopniu krystalizacji łączącym dobre właściwości mechaniczne z dużą odpornością cieplną i chemiczną. Dzięki możliwości łatwego kształtowania znajduje

coraz większe zastosowanie jako podstawowy materiał, z którego wykonywane są detektory/czujniki piezoelektryczne [13, 14].

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań inteligentnych materiałów piezoelektrycznych, których celem było wyznaczenie ich parametrów elektrofizycznych w warunkach działania drgań mechanicznych oraz sił nacisku.

## Metoda badań...

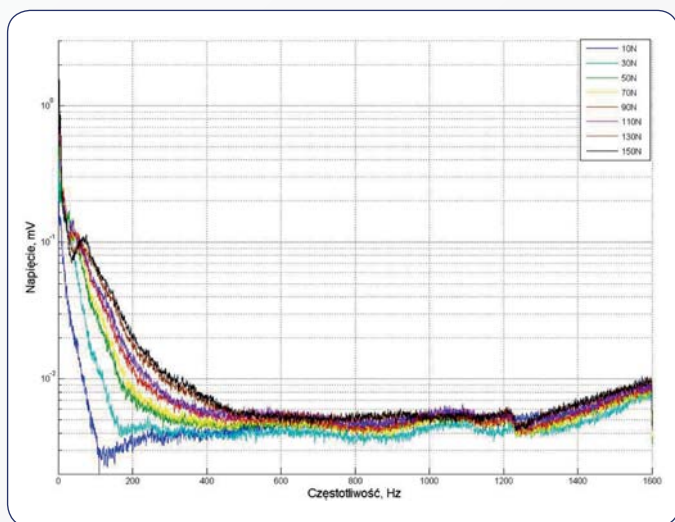
Do testów został wybrany materiał piezoelektryczny posiadający cechy przydatne przy konstrukcji przetwornika-adaptera do pomiarów drgań mechanicznych działających na człowieka przez rękę. Materiał inteligentny w postaci piezolaminatu, którego budowa pozwala na zginanie, umożliwiła dobrą współpracę materiału z dłonią (fot.).

Praktyczne zastosowanie folii PVDF jako przetwornika drgań mechanicznych wiąże się z uwzględnieniem ich czułości na zmiany temperatury oraz wrażliwości na zakłócenia związane z odbieraniem przez nie fal elektromagnetycznych.



Fot. Pasek z piezolaminatu grubości 52  $\mu\text{m}$  (DT4-052K/L)

Photo. DT4-052K/L laminated piezo film with the thickness of PVDF of 52  $\mu\text{m}$



Rys. 1. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe piezopolaminatu w funkcji siły nacisku uzyskane przy udziale operatora 1

Fig. 1. Frequency characteristics of piezo film as a function of feed force for operator 1 - example

Utrzymywanie w laboratorium stałej temperatury pozwoliło zminimalizować efekt wpływu jej zmian na sygnał wyjściowy. Wyniki wstępnych testów potwierdziły wrażliwość folii na zakłócenia wywołane polem elektromagnetycznym pochodzące m.in. od wzbudnika drgań i od sieci energetycznej. Po zastosowaniu ekranowania, uzyskano 99-procentową eliminację zakłóceń elektromagnetycznych.

Badania inteligentnych materiałów piezoelektrycznych polegały na wyznaczaniu charakterystyk częstotliwościowych elementu wykonanego z piezopolaminatu obciążonego układem ręka-ramię przy pobudzeniu szumowym sygnałem drganiowym. Testy z udziałem osób, które poprzez piezopolaminat naciskały dłonią na drgającą rękojeść testową, miały na celu odzwierciedlenie rzeczywistych warunków, w jakich ma zostać wykorzystany badany materiał.

Charakterystyki częstotliwościowe wyznaczano w zakresie częstotliwości:  $2 \div 1600$  Hz, obejmującym składowe o częstotliwościach z zakresu  $5,6 \div 1400$  Hz, który jest analizowany podczas oceny narażenia na drgania działające przez kończyny górne w środowisku pracy [1]. Zakres stosowanych sił obciążających piezopolaminat w badaniach z udziałem osób:  $10 \div 150$  N obejmuje siły wywierane przez operatorów na rękojeści typowych narzędzi ręcznych. Testy prowadzono w temperaturze otoczenia z zakresu:  $21 \div 23$  °C – na specjalnym stanowisku badawczym.

## ...i ich wyniki

Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe wyznaczone dla badanego elementu z piezopolaminatu uzyskane przy udziale dwóch operatorów przedstawiono na rys. 1 i 2.

Na obu charakterystykach można wyróżnić dwa zakresy częstotliwości: od 1 do ok. 600 Hz oraz od ok. 600 do 1600 Hz. W pierwszym zakresie widoczne są wyraźne różnice między charakterystykami wyznaczonymi dla różnych sił nacisku na piezopolaminat. Wraz ze wzrostem wartości siły nacisku napięcie wyjściowe osiąga w tym zakresie coraz większe wartości. W drugim zakresie częstotliwości (od ok. 600 do 1600 Hz) obserwowane różnice między charakterystykami wyznaczonymi dla różnych sił nacisku są zdecydowanie mniejsze. Na wyznaczonych charakterystykach widoczne jest wzmocnienie napięcia wyjściowego w za-

kresie częstotliwości od 1 do ok. 500 Hz (charakterystyki dla sił nacisku  $30 \div 150$  N z wyjątkiem charakterystyki dla 30 N na rys. 1.) oraz w zakresie od 1 do ok. 150 Hz (charakterystyki dla siły nacisku 10 N). Podczas testów, wywieranie siły nacisku 10 N oznaczało w rzeczywistości zaledwie kontakt dłoni operatora z rękojeścią pomiarową, co mogło wpłynąć na kształt uzyskiwanych charakterystyk.

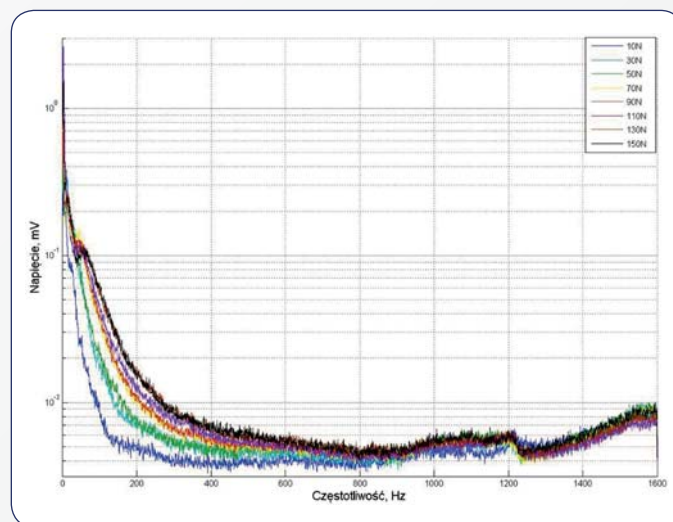
## Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały wrażliwość badanego elementu z piezopolaminatu na działanie siły nacisku działającej podczas pobudzenia go szumowym sygnałem drganiowym. Wpływ siły nacisku na charakterystykę częstotliwościową badanego piezopolaminatu zmienia się w zależności od częstotliwości. Analizując uzyskane charakterystyki można zauważyć, że czułość na działanie siły nacisku badanego piezopolaminatu jest większa w zakresie częstotliwości od 1 do ok. 600 Hz niż w zakresie od ok. 600 do 1600 Hz. Zakres częstotliwości większej czułości elementu zawiera składowe, które dominują podczas pomiarów drgań mechanicznych działających przez kończyny górne na stanowiskach pracy. Wrażliwość inteligentnych elementów piezoelektrycznych zarówno na drgania mechaniczne jak i na działanie sił nacisku daje nowe możliwości przy opracowywaniu adaptera do badania narażenia na drgania miejscowe w środowisku pracy.

Zbadane piezopolaminaty posiadają bardzo korzystne cechy do konstruowania inteligentnych czujników drgań. Ze względu na dużą wrażliwość na zmiany temperatury i działających na nie sił wymagają jeszcze wielu badań. Istniejące rozwiązania z zastosowaniem piezopolaminatów oraz wyniki badań przedstawionych w artykule, potwierdzają jednak potencjalne możliwości konstruowania na ich bazie nowoczesnych czujników drgań nowej generacji.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] PN-EN ISO 5349 – 1:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczenie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 1: Wymagania ogólne*  
 [2] PN-EN ISO 5349 – 2:2004 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczenie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy*



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe piezopolaminatu w funkcji siły nacisku uzyskane przy udziale operatora 2

Fig. 2. Frequency characteristics of piezo film as a function of feed force for operator 2 - example

[3] Directive 2002/44/WE of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration). (Sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC). OJ L177, 06.07.2002

[4] Dong R.G., Rakheja S., Smutz W.P., Schopper A.W., Caporali S. *Dynamic characterization of the simulated tool handle and palm-adaptor used for assessment of vibration performance of gloves*. "Journal of Testing and Evaluation" 31 (2003), p. 234-246

[5] Laszlo H.E., Griffin M.J. *The transmission of vibration through gloves: effects of push force, vibration magnitude and inter-subject variability*. "Ergonomics" 2011, Vol. 54, 5, p. 488-496

[6] O'Boyle M.J., Griffin M.J. *Predicting the effects of push force on the transmissibility of vibration through glove materials to the palm of the hand*. Proceedings of the 10th International Conference on Hand-Arm Vibration, Flamingo Hilton Resort, Las Vegas, Nevada, USA, 7-11 June 2004, p. 417-427

[7] Bowen M., Smith G. *Considerations for the design of smart sensors*. Sensors and Actuators, 46-47 (1995) 516-520

[8] Karki S., Kiiski M., Mantysalo M., Lekkala J. *A PVDF sensor with printed electrodes for normal and shear stress measurements on sole*. XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, September 2009

[9] Makarewicz G. *Materiały inteligentne – zastosowanie w systemach aktywnej redukcji hałasu i drgań*. „Bezpieczeństwo Pracy” 2005, 12 (411), s. 15-19

[10] Nawrocki W. *Sensory i systemy pomiarowe*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006

[11] Schwartz M. *Encyclopedia of Smart Materials Volume 1 and Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc., New York 2002

[12] Ye Zuo-Guang *Handbook of dielectric, piezoelectric and ferroelectric materials. Synthesis, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England 2008

[13] Baudry M., Berry A., Micheau P. *Decentralized active vibration control of a flexible plate using PZT actuator – PVDF sensor pairs*. Proceedings of ACTIVE 04, 20-22 September 2004

[14] Charette F., Guigou C., Berry A. *Development of volume velocity sensors for plates using PVDF film*. Proceedings of ACTIVE 95, 6-8 July 1995, p. 241-252

*Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/ Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*