

BADANIA EKSPERYMENTALNE REZONANSOWEGO PRZETWORNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO TYPU "UNIMORPH"

Lukasz SIENKIEWICZ¹, Grzegorz KOSTRO², Mieczysław RONKOWSKI³

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 26-48, e-mail: lukasz.sienkiewicz@pg.gda.pl
2. tel.: 58 347 11-57, e-mail: grzegorz.kostro@pg.gda.pl
3. tel.: 58 347 20-87, e-mail: mieczyslaw.ronkowski@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule opisano badania eksperymentalne piezoelektrycznego rezonansowego przetwornika zastosowanego do pomiaru właściwości mechanicznych tkanek miękkich. Po krótkim wstępie w kolejnych punktach przedstawiono opis stanowiska pomiarowego oraz metody pomiaru odkształceń prototypów, przesunięć częstotliwości rezonansowej, impedancji elektro-mechanicznej i parametrów schematów zastępczych. W dalszej części przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla dwóch prototypów przetworników unimorph. Artykuł kończy podsumowanie dotyczące otrzymanych wyników pomiarów.

Słowa kluczowe: piezoelektryczność, pomiar impedancji elektro-mechanicznej, rezonans, przetwornik unimorph.

1. WPROWADZENIE

Przetwornik przedstawiony w artykule został zaprojektowany oraz wykorzystany do pomiaru właściwości mechanicznych tkanek miękkich. Rezonansowy, zginający przetwornik piezoelektryczny, nazywany dalej "przetwornikiem typu unimorph" został wybrany z uwzględnieniem różnych topologii piezoelektrycznych przetworników zginających na podstawie stopnia spełnienia sformułowanych wymagań: odpowiedniej głębokości penetracji tkanek miękkich, odpowiedniego zakresu częstotliwości, generowanej siły nacisku, kompaktowych wymiarów i stosunkowo prostej struktury elektro-mechanicznej [1].

Innowacyjność projektu polega na zwiększeniu dokładności dynamicznej metody wgłębienia przez zastosowanie przetwornika unimorph jako wgłębniaka (ang. indentation device) [2]. Takie rozwiązanie pozwala wykorzystać szereg atrakcyjnych właściwości elektromechanicznych przetworników piezoelektrycznych (wysoka czułość, możliwość generacji wibracji w szerokim zakresie częstotliwości, kontrola warunków pomiaru przez zmianę trybu pracy przetwornika, możliwość opisu układu pomiarowego metodami impedancji elektromechanicznej).

Główne założenie naukowe zostało sformułowane w następujący sposób: podstawowe właściwości mechaniczne medium lepko-sprężystego, przypominającego ludzką skórę, takie jak sztywność, moduł Young'a i lepkość mogą być określone poprzez pomiar zmienności impedancji elektromechanicznej przetwornika piezoelektrycznego będącego w kontakcie z testowanym materiałem. W celu

zweryfikowania powyższej tezy przeprowadzono pełny cykl badawczy obejmujący: badania analityczne, analizę numeryczną (symulacje MES), wykonanie prototypu i eksperymentalną weryfikację rozważanych piezoelektrycznych przetworników. W artykule opisano procedurę pomiarową badanego rezonansowego przetwornika piezoelektrycznego.

2. STANOWISKO POMIAROWE

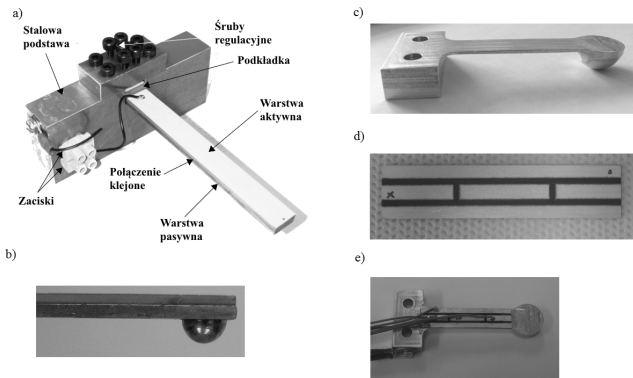
Badania eksperymentalne dotyczyły dwóch prototypów przetwornika unimorph. Jest to rodzaj rezonansowego przetwornika zginającego składającego się z dwóch warstw: aktywnej (najczęściej ceramiki piezoelektrycznej) i pasywnej (materiału elastycznego). Na końcach obu przetworników zamocowana była półkula wgłębniaka.

Prototyp I widoczny na rysunku 1a posiada warstwę aktywną z ceramiki P1-89 oraz przyklejoną do niej mosiężną warstwę pasywną. Półkolista wgłębniak (rys. 1b) jest wykonany ze stali 100C6. Wymiary geometryczne są następujące: długość - $l_1 = 0,1 m$, szerokość - $l_2 = 0,012 m$, wysokość warstwy aktywnej - $h_a = 0,002 m$ i pasywnej $h_s = 0,003 m$ i promień wgłębniaka - $r = 0,005 m$. Prototyp II posiada warstwę pasywną zintegrowaną z wgłębniakiem i podstawą (rys. 1c). Całość jest wykonana z jednego bloku aluminium techniką CNC. Aktywna warstwa została wykonana z ceramiki piezoelektrycznej Noliac NCE-40 (rys. 1d). Wymiary są o 40% mniejsze w porównaniu z pierwszym prototypem. Grubość warstwy czynnej została zmniejszona do $h_a = 0,0005 m$, warstwy pasywnej - $h_s = 0,001 m$. Z drugiej strony promień wgłębniaka jest zwiększony do $r = 0,008 m$.

Dane materiałowe (współczynniki sztywności, stałe piezoelektryczne i dielektryczne oraz gęstość) ceramiki piezoelektrycznej użytej do budowy prototypów są zamieszczone w tabelicy 1. Do badań eksperymentalnych wykorzystano dwie grupy próbek materiałowych. Były to polimery o właściwościach mechanicznych porównywalnych z właściwościami skóry ludzkiej. Próbki oraz dane materiałowe (sztywność, lepkość, moduł Younga) zostały dostarczone przez Laboratorium Trybologii w Lyonie (LTDS).

Oba prototypy zostały zamontowane na regulowanej w trzech osiach podstawie, aby umożliwić kontrolowane

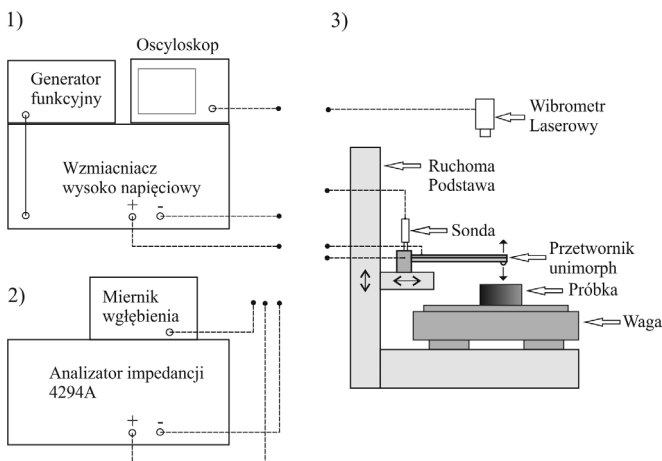
warunki kontaktu między wgłębniem przetwornika i badanym materiałem. Testowane próbki zostały umieszczone na wadze elektronicznej w celu pomiaru siły działającej w kierunku normalnym do ich powierzchni. Schematyczny szkic stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Przetwornik piezoelektryczny typu unimorph:
a), b) – prototyp I; c), d), e) – prototyp II

Tablica 1. Dane materiałowe ceramiki piezoelektrycznej

Właściwość	P1-89	NCE-40
$C_{11}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	15,37	11,7
$C_{12}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	8,23	5,83
$C_{13}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	8,05	5,44
$C_{33}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	13,04	9,25
$C_{44}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	4,59	3,18
$C_{66}^E / [10^{10} \cdot N / m^2]$	3,56	3,31
$d_{31} / [10^{-10} \cdot m / V]$	-1,08	-1,40
$d_{33} / [10^{-10} \cdot m / V]$	2,40	3,20
$d_{15} / [10^{-10} \cdot m / V]$	2,80	5,00
$\epsilon_{11}^S / \epsilon_0$	1550	1550
$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$	1150	1250
$\rho / [kg / m^3]$	7650	7750



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe: 1) pomiar odkształceń 2) pomiar impedancji 3) podstawa przetwornika i próbki polimerów

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

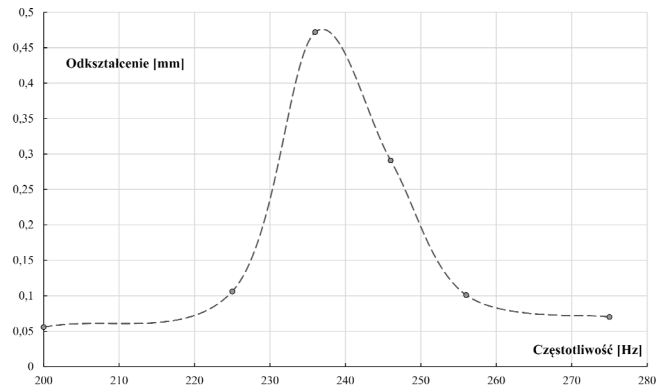
3.1. Odkształcenia maksymalne

Pierwszy etap pomiaru obejmował pomiar częstotliwości rezonansowych prototypu I i odpowiadających im maksymalnych odkształceń na swobodnym (nie zamocowanym) końcu przetwornika. Ten etap przeprowadzono dla przetwornika nieobciążonego, co oznacza brak kontaktu pomiędzy wgłębniem i badanym materiałem. Odkształcenia (wibracje) mierzono za pomocą laserowego wibrometru Polytec CLV. Generator funkcyjny Tektronix AFG320 stanowił źródło sinusoidalnego sygnału napięciowego, który był następnie wzmocniony przez wysokonapięciowy wzmacniacz PI E-472. Warstwę aktywną przetwornika zasilano napięciem o amplitudzie 200 V i regulowanej częstotliwości. Częstotliwość drgań rejestrowanych przez wibrometr była demodulowana do napięcia U proporcjonalnego do prędkości drgań v , więc wartość przemieszczenia można było obliczyć z zależności:

$$\delta = \frac{U \cdot Cal}{2\pi f} \quad (1)$$

gdzie: U - napięcie proporcjonalne do prędkości drgań, zmierzone na oscyloskopie [V], Cal - poziom kalibracji [$mm/s/V$], f - częstotliwość pracy [Hz].

Zarejestrowane drgania, odpowiadające maksymalnym wychyleniom prototypu I (na jego swobodnym końcu) dla jego pierwszej częstotliwości rezonansowej, przedstawiono na rysunku 3. Warunki rezonansu osiągnięto (dla podstawowego trybu przetwornika - ruch zginający) dla częstotliwości 236 Hz. Maksymalne odkształcenia dla tej częstotliwości wyniosły $\delta_0 = 0,472$ mm.



Rys. 3. Odkształcenia maksymalne prototypu I dla częstotliwości rezonansowej

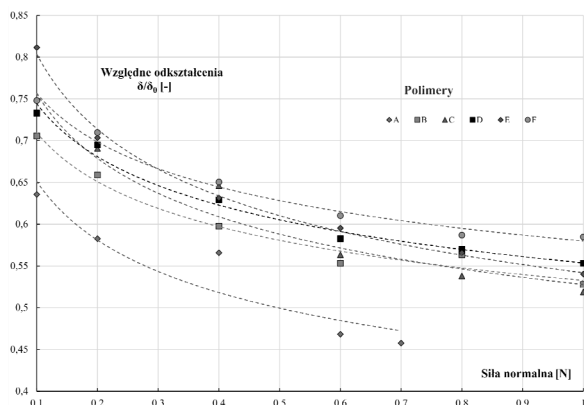
2.2. Zmiana częstotliwości/odkształcenia względne

Kolejnym etapem badań eksperymentalnych był pomiar przesunięcia częstotliwości rezonansowej przetwornika w wyniku zetknięcia się wgłębniaka z powierzchnią materiału. Wartość siły F_N działającej na materiał obliczono stosując masę struktury rejestrowaną na wadze elektronicznej. Dla każdego materiału i siły, została zarejestrowana nowa częstotliwość rezonansowa. Charakterystyki częstotliwości i odkształceń otrzymane dla każdej badanej próbki porównane zostały z wynikami nieobciążonego przetwornika unimorph. Porównanie to, wykorzystano do rozróżniania właściwości mechanicznych badanych materiałów. Charakterystyki przesunięć częstotliwości mierzono dla prototypu I. Wgłębniak

umieszczono w kontakcie z sześcioma próbkami polimerów. Siłę normalną F_N utrzymywano w zakresie od $< 0,1$; $1 > N$.

Uzyskano podobne zmiany częstotliwości dla każdej z próbek polimerów, co mogło być wynikiem warunków styku półkolistego wgłębnika z próbką. Wytlumaczenie można również znaleźć w obwodzie zastępczym przetwornika piezoelektrycznego zaproponowanym pierwotnie przez W.P. Mason'a [3]. Częstotliwość rezonansu i anty-rezonansu są zależne od parametrów tego obwodu (od pojemności C_1 i indukcyjności L_1). Jeśli stosunek tych wielkości pozostaje stały, częstotliwości rezonansu nie zmieniają się [4].

Oprócz zmian częstotliwości w tym pomiarze możliwa jest obserwacja względnych wartości odkształceń przetwornika (w porównaniu z odkształceniami nieobciążonego przetwornika $\delta_0 = 0,472 \text{ mm}$). Na rysunku 4 przedstawiono względne odkształcenia prototypu I, w zależności od siły F_N i zastosowanej próbki polimeru. Różnice nie są duże, jednak możliwe jest rozróżnienie od siebie badanych materiałów, szczególnie dla $F_N = 0,1 \text{ N}$ i $0,6 \text{ N}$.



Rys. 4. Względne odkształcenia prototypu I w funkcji siły normalnej F_N dla 6 próbek polimerów

2.3. Pomiar impedancji

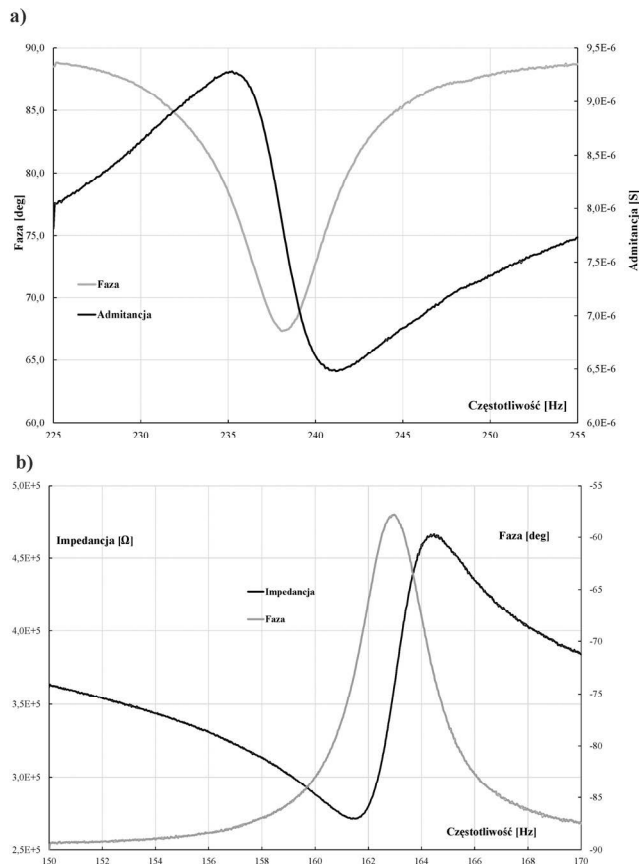
Ostatnią część analizy eksperymentalnej stanowił pomiar impedancji elektromechanicznej obu prototypów przetwornika unimorph. Szczególnie interesujące były zmiany impedancji między nieobciążonym a obciążonym (w kontakcie z próbką materiału) stanem przetwornika. Zmiany te są funkcją fizycznych właściwości kontaktu:

- sztywności kontaktu, zależnej od zastosowanej siły i badanego materiału,
- siły tarcia na styku wgłębnika i materiału (warunki kontaktu: kula / płaszczyna).

Do pomiaru charakterystyk wykorzystano analizator impedancji Agilent 4294A. Zarejestrowane wyniki wykorzystano do obliczenia parametrów opisujących elektromechaniczny obwód zastępczy przetwornika w kontakcie z materiałem. Odpowiedź przetwornika została zarejestrowana dla każdej z próbek testowych i działających na nie sił normalnych.

Pomiar impedancji prototypów I i II rozpoczęto analizą trybów pracy w pożądanym paśmie częstotliwości. Wyniki te posłużyły do ustalenia najodpowiedniejszych częstotliwości rezonansowych przetworników dla opisu próbek polimerów. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki impedancji (admitancji) oraz charakterystyki fazowe dla częstotliwości w pobliżu pierwszego rezonansu obu prototypów. Biorąc pod uwagę zastosowaną metodę był

to główny tryb pracy przetwornika. Swobodny koniec prototypów poruszał się w sposób quasi-normalny w odniesieniu do powierzchni badanego materiału. Ponadto, amplituda drgań dla pierwszej częstotliwości rezonansowej była najwyższa w porównaniu z trybami pracy wyższych rzędów (dla wyższych częstotliwości rezonansowych).



Rys. 5. Charakterystyka Bodego dla przetworników unimorph: a) prototypu I, b) prototypu II

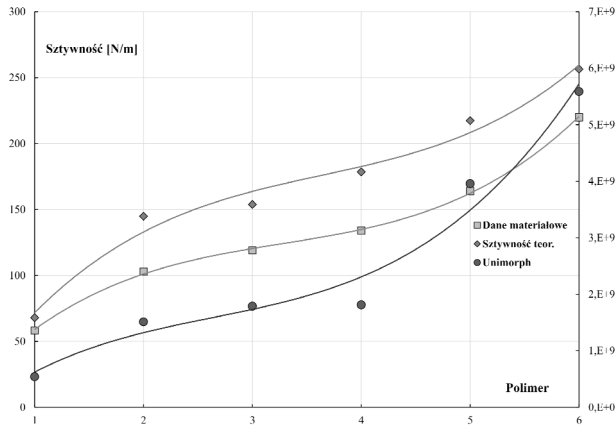
Parametry badanych materiałów otrzymano przez porównanie wyników dla nieobciążonego prototypu I i w kontakcie z próbkami. Dwa z nich były szczególnie interesujące: rezystancja R_M modelująca straty tarcia wynikające z kontaktu i pojemność C_M odwzorowująca sztywność kontaktu [5]. Pomiar parametrów obwodu zastępczego R_M i C_M zrealizowano przy dwóch różnych częstotliwościach rezonansowych. Wyznaczanie parametru określającego tarcie (opór R_M) przeprowadzono dla częstotliwości $f_R = 236 \text{ Hz}$, natomiast sztywność kontaktu odwrotnie proporcjonalną do pojemności C_M zmierzono dla $f_R = 24,76 \text{ kHz}$.

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie sztywności dla sześciu próbek polimerów wyznaczonych dla siły $F_N = 0,1 \text{ N}$ i częstotliwości $f_R = 24,76 \text{ kHz}$ z wartościami danych materiałowych uzyskanych od laboratorium LTDS i sztywnością teoretyczną K_{Teor} , obliczaną na podstawie równania:

$$K_{Teor} = \frac{F_N}{\delta} \quad (2)$$

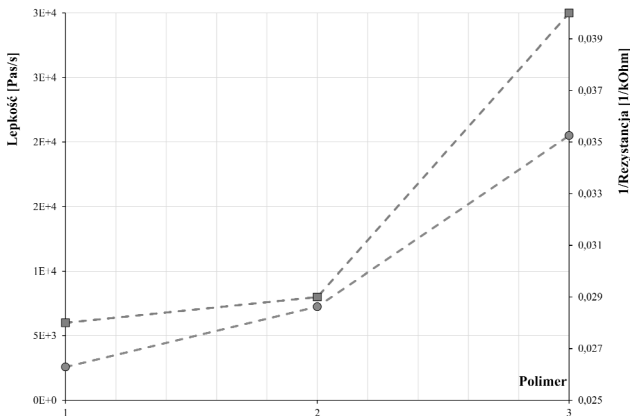
Charakterystyki uzyskane z danych materiałowych i na podstawie obliczeń analitycznych dostarczają porównywalne wartości sztywności. Z drugiej strony, charakterystyka otrzymana przez pomiar impedancji prototypu I pokazuje

podobne zachowanie i rozwój sztywności polimerów, ale o różnych wartościach bezwzględnych.

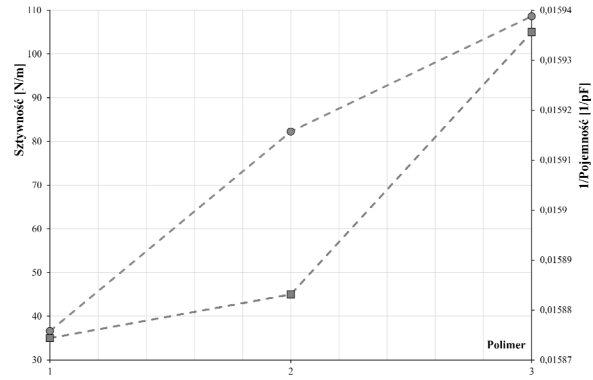


Rys. 6. Porównanie sztywności otrzymanej z danych materiałowych (kwadrat), obliczeń analitycznych (romb) i przetwornika unimorph (koło)

Na rysunkach 7 i 8 przedstawione zostały porównania między rezystancją obwodu zastępczego prototypu I R_M i lepkością polimerów oraz pojemnością obwodu zastępczego C_M i sztywnością polimerów dla siły $F_N = 0,05 N$ i grupy 3 próbek polimerów.



Rys. 7. Porównanie rezystancji R_M (koło) z lepkością dla 3 polimerów (kwadrat)



Rys. 8. Porównanie pojemności C_M (koło) z sztywnością dla 3 polimerów (kwadrat)

4. PODSUMOWANIE

Główny wniosek dotyczący badań eksperymentalnych piezoelektrycznego przetwornika typu unimorph można sformułować w następujący sposób: na tym etapie badań, przetwornik może być używany w celu prezentacji zmian właściwości mechanicznych badanych materiałów (poddanych różnym warunkom zewnętrznym). Właściwości mechaniczne polimerów mogą być wyrażone jakościowo, ale nie ilościowo, chyba że zastosuje się próbkę odniesienia. Niemniej, wyniki pomiarów są bardzo obiecujące i mogą stanowić podstawę do dalszych badań w przyszłości. W szczególności kompletnej analizy eksperymentalnej prototypu II przetwornika unimorph.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Sienkiewicz L., Rouchon J-F., Ronkowski M., Kostro G., Ryndzionek R.: Identification of the mechanical properties of the skin by electromechanical impedance analysis of resonant piezoelectric actuator. IECON 2013, s. 3940-3945, 2013.
2. Pailler-Mattei C., Zahouani H.: Analysis of adhesive behavior of human skin in vivo by an indentation test. Tribology International 39, 2006, s. 12–21.
3. Mason W. P.: An Electromechanical Representation of a Piezoelectric Crystal Used as a Transducer. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 10, 1935, s. 1252-1263
4. Budinger M.: Contribution à la conception et à la modélisation d'actionneurs piézoélectriques cylindriques à deux degrés de liberté de type rotation et translation. Rozprawa doktorska, INP Toulouse, 2003, s. 27-28.
5. Nogarede B.: Moteurs piézoélectriques. Techniques l'Ingénieur, traite Génie électrique, 1996, s. 16-18.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF UNIMORPH REZONANT PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

The subject of this paper was the experimental verification of the resonant piezoelectric transducer used to measure the mechanical properties of soft tissues. The two prototypes of a bending transducer of unimorph type were presented. The description of the measurement methods and the test bench are presented. Finally, presented are the results of experimental analysis for two unimorph prototypes. The results covered measurement of maximal deformations at the free end of the unloaded transducer working at first resonance frequency and the detection of the electromechanical impedance characteristics of both prototype unimorph transducers. The variation of impedance between the unloaded and loaded (in contact with the sample) unimorph transducer was verified in terms of contact conditions assessment, and finally the mechanical properties of tested polymer samples. The article concludes with a brief summary and commentary of the results.

Keywords: piezo-electricity, electro-mechanical impedance measurement, resonance, unimorph transducer.