

BADANIA LABORATORYJNE WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH PRÓBEK KOMPOZYTÓW POLIMEROWO-METALOWYCH IPMC

Janusz KWAŚNIEWSKI*, Ireneusz DOMINIK*

*Katedra Automatykacji Procesów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

kwa_j@agh.edu.pl, dominik@agh.edu.pl

Streszczenie: Polimery elektroaktywne to polimery, które pod wpływem napięcia elektrycznego zmieniają swój rozmiar lub kształt. Pojawiły się w latach '90 XX wieku i szybko okazały się przydatnymi w wielu dziedzinach techniki. Polimery elektroaktywne cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem środowiska naukowego w Europie i na świecie. Liczba członków organizacji ESNAM zwiększyła się niemal dwukrotnie. W Polsce jedyną placówką na liście jest Politechnika Warszawska. Nie zajmuje się ona jednak polimerami IPMC – Ionic Polymer-Metal Composite, czyli materiałem kompozytowym złożonym z polimeru przewodzącego jony, pokrytego warstwą metalu szlachetnego. W artykule przedstawiono badania podstawowe nad próbkami kompozytów polimerowo-metalowych IPMC, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyk statycznych, dynamicznych, czasowych oraz częstotliwościowych wraz z ich opisem matematycznym.

1. WSTĘP – JONOWE POLIMERY PRZEWODZĄCE

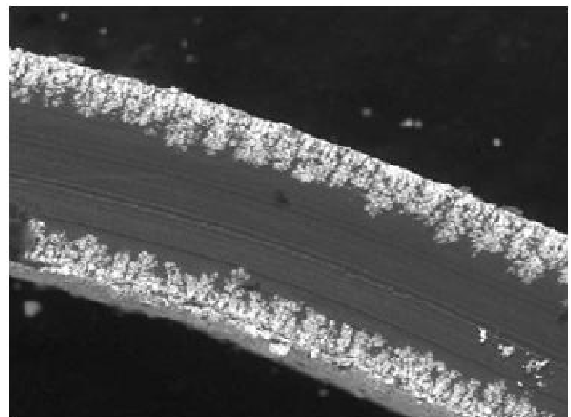
Polimery (z gr. *πολυ* – wiele, *μέρος* – część) są to związki wielkocząsteczkowe składające się z powtarzających się elementów zwanych merami. Daje to polimerom unikalne właściwości, np. zanik ostrych przejść fazowych. Budowa usieciowana sprawia, że materiał jest nietopliwy i nierozpuszczalny, oraz bardziej wytrzymały mechanicznie i odporny na działanie związków chemicznych (Farinholt, 2005).

Polimery elektroaktywne to polimery, które pod wpływem napięcia elektrycznego zmieniają swój rozmiar lub kształt. Pojawiły się w latach '90 XX wieku i szybko okazały się przydatnymi w wielu dziedzinach techniki. Organizacja ESNAM (*European Scientific Network for Artificial Muscles*) dzieli polimery elektroaktywne (EAC – *ElectroActive Polymers*) następująco: jonowe EAC (polimery przewodzące, żele polielektrolityczne, IPMC, nanorurki węglowe) oraz elektroniczne EAC (elastomery dielektryczne, polimery piezoelektryczne, polimery elektrostrykcyjne, elastomery ciekłokrystaliczne).

Polimery elektroaktywne cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem środowiska naukowego w Europie i na świecie. Liczba członków organizacji ESNAM w której prowadzi się m.in. badania nad polimerami, zwiększyła się niemal dwukrotnie. W Polsce jedyną placówką na liście jest Politechnika Warszawska. Nie zajmuje się ona jednak polimerami IPMC – *Ionic Polymer-Metal Composite*, czyli materiałem kompozytowym złożonym z polimeru przewodzącego jony, pokrytego warstwą metalu szlachetnego. W artykule przedstawiono badania podstawowe nad próbkami kompozytów polimerowo-metalowych IPMC, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyk statycznych, dynamicznych, czasowych oraz częstotliwościowych wraz z ich opisem matematycznym.

1.1. Budowa i zasada działania kompozytów IPMC

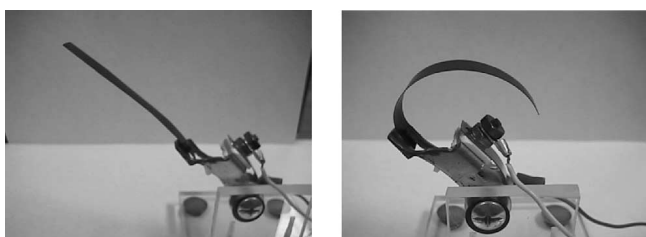
Idea przetwornika jonomerowego zaczęła się pojawiać w latach '30 XX w. Samo określenie „jonomer” (ang. *ionomer*) pojawiło się w 1965 roku, a ścisła definicja powstała w 1990 roku, brzmiąc „polimer, którego własności zależą od oddziaływań pomiędzy jonami wewnątrz materiału. W 1949 roku zauważono, że pewien rodzaj żelu polimerowego (*copolymerized methacrylic acid* – kopolimer kwasu metakrylowego) ulega deformacji mechanicznej, jeśli zmieni się pH w jego wnętrzu, czyniąc z niego przetwornik energii chemicznej w mechaniczną. W 1992 r. Oguro odkrył, że cienka membrana z polimeru przewodzącego jonowo pokryta metalem wykazuje duże odkształcenia pod wpływem niskiego napięcia.



Rys. 1. Widok IPMC w przekroju. Widoczna jest dendrytyczna penetracja membrany przez metal – wynik wielokrotnego powtarzania reakcji redukcji jonów (Nemat-Nasser, 2003)

Przekrój przez kompozyt IPMC jest przedstawiony na Rys. 1. Składa się z membrany i pokrywających ją z obu stron warstw metalu szlachetnego. Jako membrana wymieniająca jony może być zastosowany opisany wyżej polimer perfluorowanego kwasu sulfonowego, polimery kwasu karboksylowego. Najpopularniejszym materiałem stosowanym na membrany jonomerowe jest Nafion (nazwa jest zastrzeżonym znakiem towarowym firmy DuPont, producenta m.in. teflonu). Materiał ten był także pierwszym jonomerem dostępnym komercyjnie.

IPMC są standardowo produkowane w formie folii o grubości $0,2 \div 0,3$ mm, którą można pociąć na odpowiednie fragmenty. Zwykle do badań używa się prostokątnych próbek o wymiarach kilka na kilkadziesiąt milimetrów. Przykładowy ruch aktuatora IPMC przedstawiono na Rys. 2, a jego własności w Tab. 1.



Rys. 2. Wygięcie paska o wymiarach $10 \times 80 \times 0,34$ mm pod wpływem napięcia 4V (Richardson i inni, 2003)

Tab. 1. Własności kompozytów polimerowo-metalowych wg danych z: Byungkyu (2002), Bańś (2003), Norgen i inni (2000)

Moduł Younga E	100÷1500 MPa, w zależności od obecności rozpuszczalnika, pod wpływem napięcia następuje zwiększenie E
Moduł Kirchoffa G	50÷750 MPa
Współczynnik Poissona ν	0,3÷0,4
Gęstość energii	1,5÷1500 J/kg
Maksymalna siła	Próbki o wymiarach $20 \times 5 \times 0,2$ mm utwierdzone z jednej strony, generują siłę ok. 40 razy większą od masy próbki
Maksymalne przemieszczenie	Maksymalne wydłużenie względne liniowe $\epsilon=4\%$ W postaci utwierdzonej belki następuje zginanie, powodujące przemieszczenie wolnej końcówki bliskie długości całej belki
Charakterystyka częstotliwościowa	Charakter filtra dolnoprzepustowego, generowane wibracje do 1000Hz, w działaniu jako czujnik do kilku kHz
Rozdzielczość	Możliwość sterowania przemieszczeniem do μm , częstotliwością do mHz, materiał może pracować jednocześnie, jako napęd i czujnik pozycji do sprzężenia zwrotnego
Sprawność (termodynamiczna)	Jako napęd: 25% Jako czujnik: 90% (obie wielkości zależne od częstotliwości)
Gęstość	$1,9 \div 2,3 \text{ g/cm}^3$
Inne cechy	Zwłoka czasowa podczas pracy jako czujnik rzędu μs . Koszt produkcji: ok. 1USD/cm ² Duża żywotność.

2. BADANIA LABORATORYJNE PRÓBEK

Celem badań laboratoryjnych jest wstępne określenie własności mechanicznych i elektrycznych próbek kompozytu polimerowo-metalowego IPMC. Przedmiotem badań jest 8 próbek, dostarczonych przez firmę Environmental Robots Inc. Wymiary próbek to: długość: $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$; szerokość: 3mm; grubość: $0,2 \div 0,3 \text{ mm}$

Do badań niewymagających dużej dokładności otrzymanych wyników ani dużej częstotliwości odczytywania wyników wykorzystano prosty system wizyjny, którego głównym elementem jest Panasonic Lumix FZ18. Wykorzystano możliwość rejestracji filmów w jakości VGA (rozdzielczość 640×480 pikseli) z prędkością 10 fps. Wynikający z tego czas między klatkami filmu to 100 ms. Badania z użyciem systemu wizyjnego, a także bezpośredni odczyt pozycji końcówki próbki do wyznaczenia charakterystyk statycznych odbywa się po zamocowaniu jej na tle papieru milimetrowego. Płaszczyzna ruchu próbki jest równoległa do płaszczyzny papieru. Odległość próbki od papieru równa ok. 1 mm oraz jej ustawienie krawędzią do obserwatora eliminuje błąd paralaksy. Do dokładniejszych badań charakterystyk czasowych i częstotliwościowych został użyty czujnik laserowy przemieszczenia LG5B65PI firmy Banner. Czujnik jest wyposażony w analogowe wyjście prądowe o zakresie $4 \div 20 \text{ mA}$. Mierzony był spadek napięcia na rezystorze 470Ω , co zgodnie z prawem Ohma daje zakres napięć 1,88 V do 9,4 V. Z powodu tolerancji rezystora wynoszącej 5% i innych niepewności pomiarowych dodatkowo została wyznaczona zmiana napięcia na wyjściu czujnika pod wpływem przemieszczenia 1 mm w stronę czujnika. Zmiana napięcia wynosi 0,53 V, co daje czułość przetwornika $S=0,53 \text{ V/mm}$. Z powodu ciemnej barwy materiału do próbki został przyklejony fragment białego papieru, aby polepszyć parametry odbić (Rys. 3).

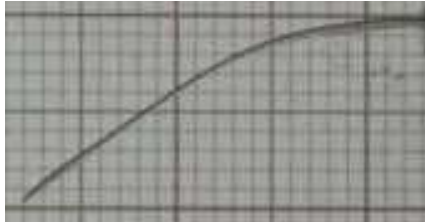


Rys. 3. Próбка IPMC przystosowana do badań czujnikiem laserowym

2.1. Obserwacje makroskopowe

Po przyłożeniu napięcia 3 V, bez opóźnienia następuje wygięcie próbki w stronę katody przez ok. 10 s. Maksymalne przemieszczenie końcówki wynosi ok. 10mm. Po kilku sekundach następuje relaksacja i próbka zaczyna ruch powrotny. Po ok. 30s znajduje się w odległości 3 mm od punktu początkowego, zaś po 60s osiąga punkt początkowy i przekracza jego pozycję. Najlepsza odpowiedź jest generowana przy napięciu ok. 4 V. Pobór prądu w początkowej fazie ruchu wynosi wtedy ok. 60 mA, następnie stopniowo maleje.

Próbka po wygięciu pod wpływem przyłożonego napięcia ma nieregularny kształt, często pojawiają się zagięcia, co skutkuje różnym promieniem krzywizny w zależności od badanego punktu na próbce. Pomimo tych problemów kształt wygiętej próbki został przebadany za pomocą *Image Acquisition Toolbox* i *Curve Fitting Toolbox* programu Matlab.

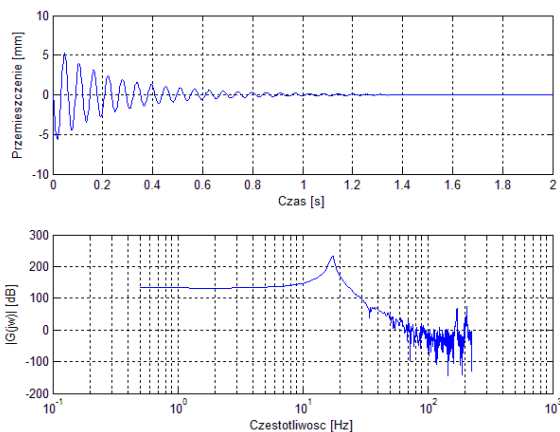


Rys. 4. Obraz poddany analizie w programie Matlab

Za pomocą poniższego kodu otrzymano przebieg jak na Rys. 4.

```

RGB = imread('P1130247.jpg'); %załadowanie pliku z obrazem
I = rgb2gray(RGB); %przetworzenie obrazu do skali szarości
threshold = 0.37; %ustalenie progu binaryzacji
BW = im2bw(I,threshold); %binaryzacja
imshow(BW) %wyświetlenie obrazu po binaryzacji
[yksz,xksz,wart] = find(BW<1); %odczytanie współrzędnych wartości 0
xksz0 = (xksz - max(xksz))*-1; %modyfikacja krzywej, aby zaczynała się w (0,0)
yksz0 = yksz - min(yksz);
plot(xksz0,yksz0)
    
```



Rys. 5. Przebieg czasowy i widmo sygnału – odpowiedź na wymuszenie mechaniczne impulsem Diraca

Następnie użyto interpolacji funkcją kwadratową. Krzywa utworzona przez belkę jest opisana równaniem (1) z dokładnością 96%.

$$y = 0,002923x^2 - 0,01163x + 2,25 \quad (1)$$

Kształt belki jest łatwo rozpoznawany przez narzędzia programu Matlab, dopasowanie nie jest obciążone dużym błędem, więc proces ten można przeprowadzić w pełni

automatycznie, uzyskując np. przebieg zmienności kształtu belki na podstawie analizy klatek filmu. Po przyłożeniu napięcia zwiększa się zauważalnie sztywność materiału IPMC. Może to mieć wpływ np. na częstotliwość rezonansową próbki przy różnych wartościach sygnału sterującego, a także na zmianę amplitudy wychylenia w zależności od czasu pracy.

2.2. Własności mechaniczne

Za pomocą czujnika laserowego zmierzono odpowiedź próbki zamocowanej, jako belka utwierdzona. Odległość między punktem zamocowania a punktem pomiaru $h_0=25$ mm. Zarejestrowana została odpowiedź na mechaniczne wymuszenie impulsem Diraca.

Ruch punktu na belce, w którym dokonuje się pomiaru czujnikiem laserowym opisuje równanie (2).

$$x(t) = Ae^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (2)$$

gdzie: x – przemieszczenie, t – czas, A, α – współczynniki linii obrysu, ω – częstość oscylacji.

Po identyfikacji obrysu przebiegu czasowego za pomocą toolboxa *Curve fitting* programu Matlab uzyskano następujące wartości współczynników: $A = 6,379$ i $\alpha = -4,358$. Z charakterystyki częstotliwościowej na rysunku 5 odczytano częstość oscylacji równą $f_{osc} = 17,5$ Hz. Wartość ω oblicza się wg wzoru (3).

$$\omega = 2\pi f_{osc} \quad (3)$$

gdzie: $\omega=109,96$ rad/s

Wartości te po podstawieniu do równania (2) dają postać ruchu (4).

$$x(t) = 6,379e^{-4,358t} \sin 109,96t \quad (4)$$

Transmitancja odpowiedzi mechanicznej $D(s)$ występuje w modelu Kanno-Tadokoro. Jest to transmitancja układu oscylacyjnego postaci (5). Zbadana odpowiedź impulsowa ze współczynnikami niezbędnymi do zapisania tej transmitancji ma postać (6).

$$G(s) = \frac{K}{T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1} \quad (5)$$

$$x(t) = \frac{1}{T\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \frac{t}{T}} \sin t \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{T} \quad (6)$$

gdzie: T – stała czasowa, ζ – współczynnik tłumienia, K – wzmacnienie.

Wartości T i ζ wylicza się ze wzorów (7) i (8).

$$\zeta = \sqrt{\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \quad (8)$$

Wartości liczbowe to: $\zeta = 0,0396$ i $T = 0,0091$.

Transmitancja wyliczona tą metodą ma postać (9)

$$G(s) = \frac{1}{82,81 \cdot 10^{-6}s^2 + 720,72 \cdot 10^{-6}s + 1} \quad (9)$$

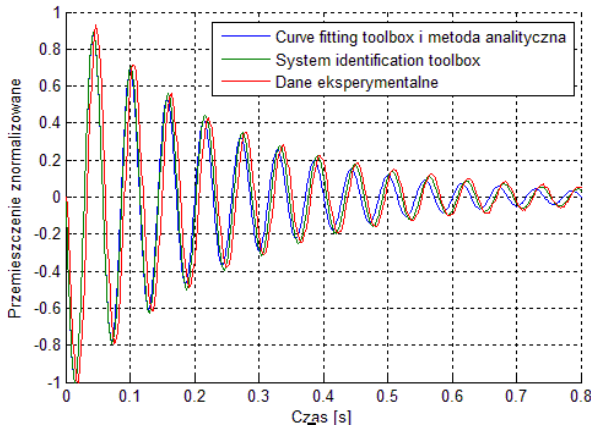
Te same współczynniki transmitancji (3.6) określono za pomocą *System Identification Toolbox* programu Matlab – metodą estymacji *Process models*. Dokładność wyniosła

91,88%. Otrzymane wartości współczynników to: $\zeta = 0,036824$ i $T = 0,0092148$

Końcową postać transmitancji przedstawia wzór (10).

$$G(s) = \frac{1}{84,91 \cdot 10^{-6} s^2 + 678,65 \cdot 10^{-6} s + 1} \quad (10)$$

W obu przypadkach przyjęto $K=1$, ponieważ niemożliwe jest jego wyznaczenie z charakterystyki impulsowej.

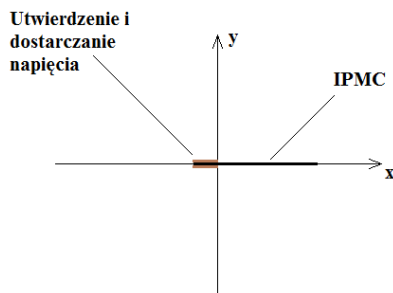


Rys. 6. Porównanie odpowiedzi impulsowej obliczonych modeli z danymi z eksperymentu

Z powodu pominięcia wzmocnienia K przemieszczenie zostało znormalizowane – amplituda pierwszego okresu oscylacji jest równa -1. Najlepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych wykazuje wynik uzyskany za pomocą *System Identification Toolbox*. Transmitancja opisana wzorem (10) może być wykorzystana w przyszłym modelowaniu próbek IPMC.

2.3. Charakterystyki statyczne

Poniżej przedstawiono analizę zachowania próbek IPMC pod wpływem napięć stałych. Próbka została zamocowana w sposób pokazany na Rys. 7.



Rys. 7. Mocowanie IPMC – badane są współrzędne końca próbki

Badania zostały przeprowadzone następująco:

- odczytanie współrzędnych położenia wyjściowego;
- przyłożenie napięcia zasilającego;
- odczytanie współrzędnych maksymalnego wychylenia,
- odczekanie na pełną relaksację z przyłożonym napięciem zasilającym;
- odczytanie współrzędnych po relaksacji z przyłożonym napięciem zasilającym;

- odłączenie napięcia zasilającego;
- odczytanie współrzędnych po relaksacji bez napięcia zasilającego.

Kroki b-g były powtarzane dla napięć zasilających $0,5 \div 4V$ z krokiem co $0,5V$.

Przemieszczenie na charakterystykach statycznych jest całkowitym przemieszczeniem względnym, wyliczanym według wzoru (11).

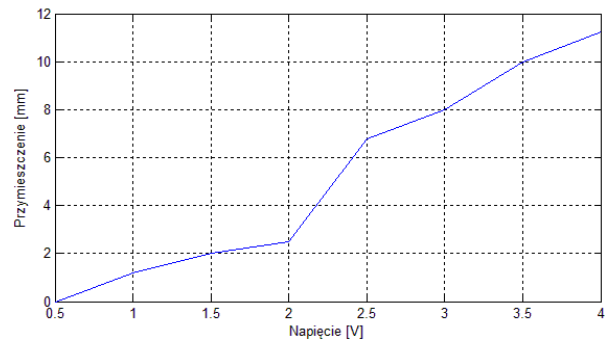
$$\Delta s = \sqrt{(x_U - x_0)^2 + (y_U - y_0)^2} \quad (11)$$

gdzie: Δs – całkowite przemieszczenie względne, x_U, y_U – współrzędne po przyłożeniu napięcia zasilającego, x_0, y_0 – współrzędne przed przyłożeniem napięcia zasilającego.

Przebadano trzy konfiguracje przyłożonego napięcia zasilającego, aby zbadać wpływ symetryczności napięcia na próbkę:

- **Napięcie symetryczne (polegające na dostarczeniu takiego samego napięcia z obydwu stron elektrody zgodnie z Rys. 7)**

Otrzymano charakterystykę statyczną jak na Rys. 8.



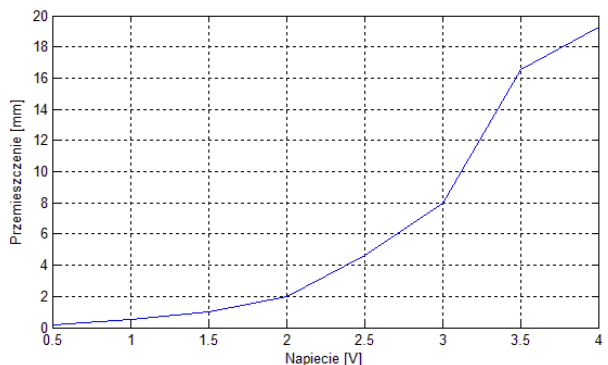
Rys. 8. Charakterystyka statyczna próbki IPMC

Funkcja linearyzująca charakterystykę:

$$s = 3,5U - 2,6 \quad (12)$$

Wyliczony błąd nieliniowości wyniósł $\delta_l = 0,210$.

- **Napięcie niesymetryczne dodatnie (napięcie górniej warstwy elektrody jest większe od napięcia warstwy spodniej) (Rys. 9)**



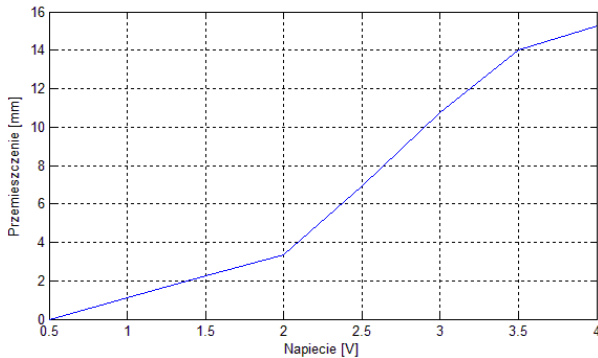
Rys. 9. Charakterystyka statyczna przy napięciu niesymetrycznym dodatnim

Funkcja linearyzująca charakterystykę:

$$s = 5,6U - 6,2 \quad (13)$$

Wyliczony błąd nieliniowości wyniósł $\delta_l = 0,410$

- **Napięcie niesymetryczne ujemne (napięcie górnej warstwy elektrody jest mniejsze od napięcia warstwy spodniej) (Rys. 10)**



Rys. 10. Charakterystyka statyczna dla napięcia niesymetrycznego ujemnego

Funkcja linearyzująca charakterystykę:

$$s = 4,8U - 4 \quad (14)$$

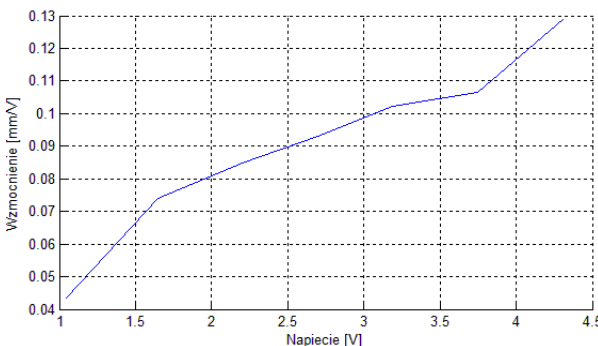
Wyliczony błąd nieliniowości wyniósł $\delta_l = 0,221$

Jak widać symetryczność przyłożonego napięcia nie ma wpływu na odpowiedź próbki. Natomiast występujące różnice w charakterystykach mogą być spowodowane wieloma czynnikami wpływającymi na pracę IPMC, jak np. wstępne naprężenie, niepełna relaksacja, która trwa po przyłożeniu napięcia zasilającego, nierównomierne lub niewystarczające nawilżenie próbki, czy też pojawienie się korozji na płaszczyźnie kontaktu miedź-platyna – zjawisko szczególnie groźnie przy dłuższym oddziaływaniu napięcia stałego.

- **Pomiar wzmocnienia dla różnych amplitud sygnału wejściowego**

Z powodu relaksacji próbek IPMC typu Nafion/Li⁺ pod wpływem napięcia stałego, jako metodę badania wzmocnienia użyto sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 0,25Hz.

ΔU – amplituda sygnału wejściowego, Δx – amplituda sygnału wyjściowego, $K = \Delta x / \Delta U$ – wzmocnienie.

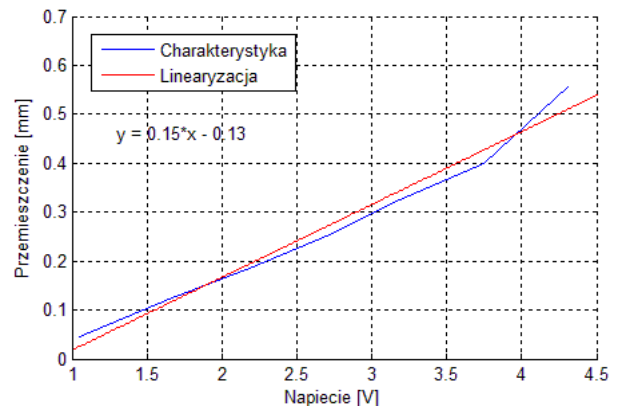


Rys. 11. Zależność $K = f(\Delta U)$

- **Nieliniowość**

Na Rys. 12 widoczny jest nieliniowy charakter kompozytu polimerowo metalowego.

Za pomocą narzędzia *Basic Fitting* programu Matlab dokonano linearyzacji charakterystyki.



Rys. 12. Linearyzacja charakterystyki statycznej IPMC

Charakterystyka została zaprosymowana funkcją liniową:

$$x = 0,15U - 0,13 \quad (15)$$

Za pomocą narzędzia *Basic Fitting* została określona norma Euklidesowa bezwzględnych odchyleń charakterystyki od linii prostej:

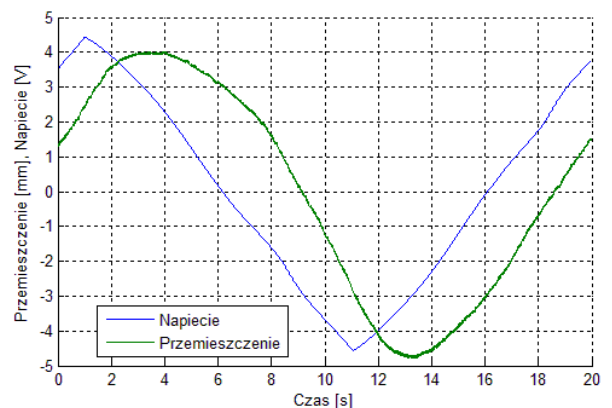
$$\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \Delta x_i^2} = 0,064745 \quad (16)$$

$$\delta_l = \frac{\|x\|}{x_{max} - x_{min}} = 0,0198 \quad (17)$$

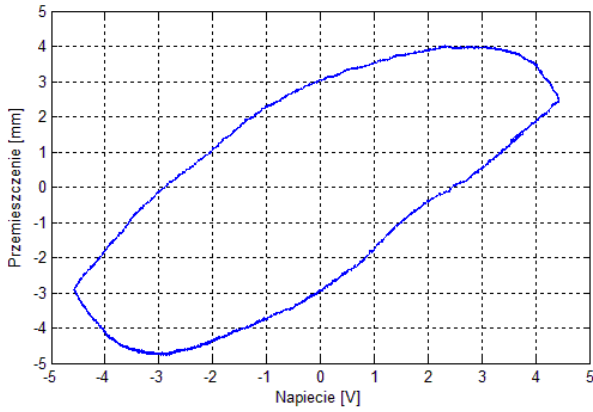
Wzorem (17) opisano błąd nieliniowości kompozytu polimerowo metalowego. Nieliniowość dla zmiennego napięcia (ok. 2%) jest dużo mniejsza niż w przypadku napięć statycznych (od 20 do 40%). Jest to kolejny argument za stosowaniem napięcia zmiennego.

- **Histeresa**

Aby przebadać histerezę odpowiedzi próbka została przebadana sygnałem o przebiegu trójkątnym o okresie 20 s (0,05 Hz) i amplitudzie 4,44V (Rys. 13-14).



Rys. 13. Przebiegi czasowe do badania histerezy



Rys. 14. Charakterystyka obrazująca pętlę histerezy

Wartość błędu niejednoznaczności wylicza się ze wzoru:

$$\delta_h = \frac{|y_1 - y_2|}{y_{max} - y_{min}} \quad (18)$$

gdzie: δ_h – błąd niejednoznaczności, y_1 – wartość przemieszczenia dla 0V przy zwiększaniu napięcia zasilania, y_2 – wartość przemieszczenia dla 0V przy zmniejszaniu napięcia zasilania, y_{max} , y_{min} – wartość maksymalna i minimalna przemieszczenia.

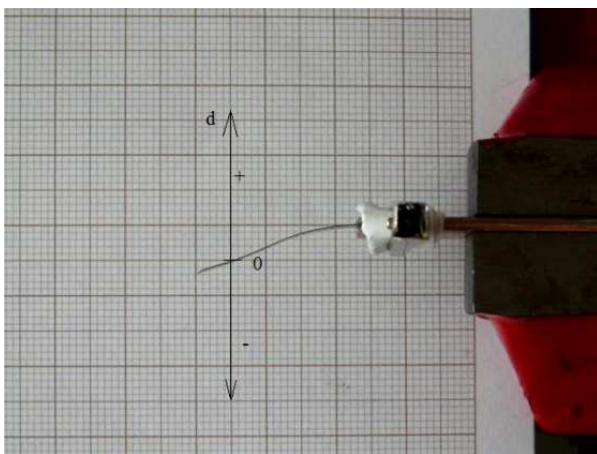
Wartości odczytane z wykresu za pomocą narzędzia *Data cursor*: $y_1 = -2,942$ mm; $y_2 = 3,039$ mm; $y_{max} = 4,022$ mm; $y_{min} = -4,777$ mm.

Wartość liczbowa błędu po wyliczeniu ze wzoru (18) wynosi $\delta_h = 0,6797$.

Odpowiedź IPMC jest obciążona dużym błędem histerezy, jednak jest to błąd powtarzalny dla danej częstotliwości, więc można ująć go w modelu.

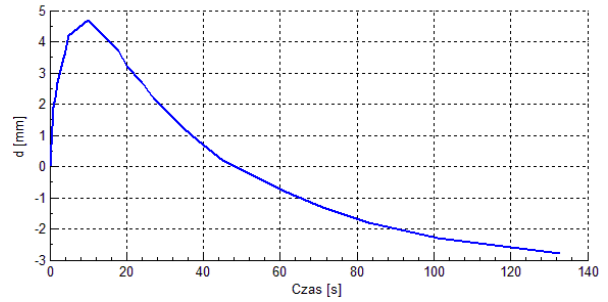
2.4. Charakterystyki czasowe

– Odpowiedź skokowa próbki (Rys. 17)



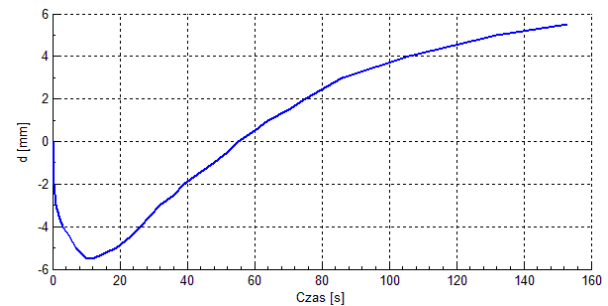
Rys. 15. Mocowanie próbki i umiejscowienie wartości d

Czas i wartość d odczytano analizując film klatka po klatce w programie VirtualDub 1.9.8 (Rys. 15).



Rys. 16. Odpowiedź na wymuszenie skokowe napięciem 2,9V

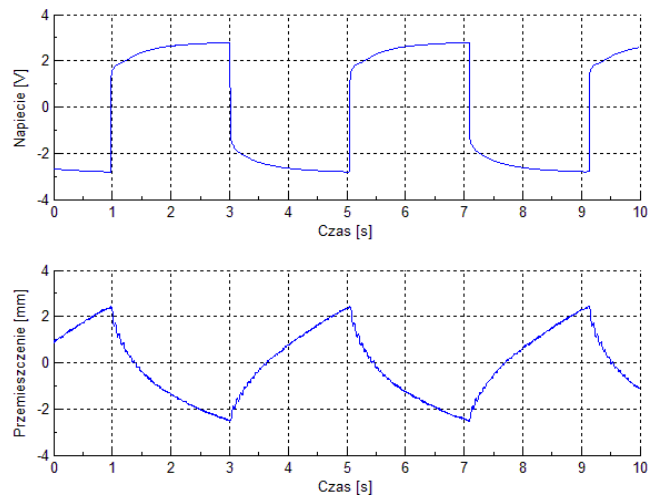
Po odłączeniu napięcia i złączeniu elektrod pozostawiono próbkę na ok. 1h w celu pełnej relaksacji. Następnie przyłożono napięcie -2,9 V.



Rys. 17. Odpowiedź na wymuszenie skokowe napięciem -2,9V

Odpowiedź skokowa próbki jest niezależna od kierunku przyłożenia napięcia. Wartość maksymalnego wychylenia zależy od strony, w którą była wygięta próbka przed jego przyłożeniem.

– Odpowiedź na sygnał o przebiegu prostokątnym



Rys. 18. Odpowiedź na sygnał o przebiegu prostokątnym o częstotliwości 0,25 Hz i amplitudzie 3 V

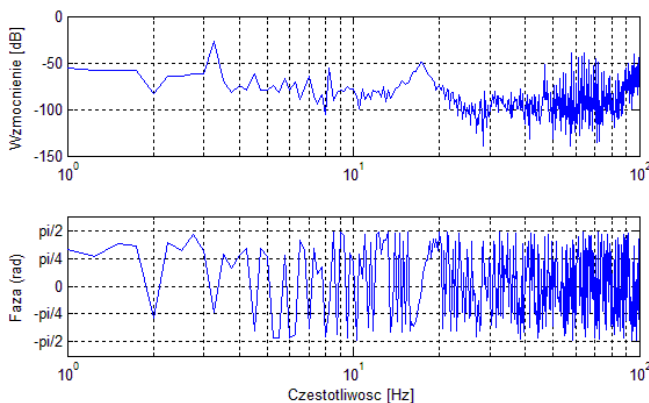
2.5. Charakterystyki częstotliwościowe

Charakterystyki czasowe przetwornika IPMC zostały wyznaczone w oparciu o odpowiedź próbki na podany

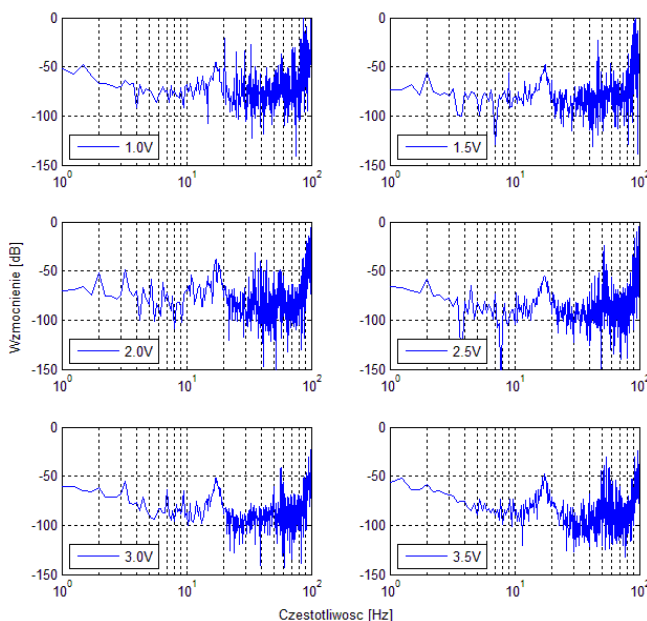
sygnał sinusoidalny o zmiennej częstotliwości typu *chirp*. Zakres częstotliwości wyniósł od 1 Hz do 100 Hz, czas trwania przebiegu – 2,4s (Rys. 19). Badanie zostało powtórzone dla różnych amplitud, aby określić zależność wzmocnienia od częstotliwości i amplitudy sygnału wymuszenia. Charakterystyki zostały wyznaczone korzystając z przekształcenia Fouriera (Rys. 20).

Dysponując przebiegami czasowymi napięcia wejściowego i przemieszczenia wyjściowego, można określić przebieg charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej i fazowo-częstotliwościowej przetwornika, jakim jest IPMC.

Na podstawie charakterystyk z Rys. 19 i 20 można oszacować, jakim obiektem jest belka z kompozytu polimerowo-metalowego. Można zauważyć częstotliwość rezonansową równą ok. 17,5 Hz, wynikającą z własności mechanicznych belki. Inną cechą jest większe wzmocnienie dla częstotliwości mniejszych niż rezonansowa, mniejsze dla większych.



Rys. 19. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowa i fazowo-częstotliwościowa dla amplitudy wymuszenia 4V. Zakres częstotliwości 1÷100Hz



Rys. 20. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe dla różnych amplitud napięcia wymuszającego

Powyżej ok. 50 Hz sygnał wynikający z przemieszczenia belki zrównuje się z poziomem szumów, co utrudnia analizę, należy się jednak spodziewać, że jest to granica pasma częstotliwościowego przenoszenia belki.

3. WNIOSKI

Kompozyty polimerowo-metalowe są nowymi materiałami, mało znanymi poza wyspecjalizowanymi laboratoriami. Zjawiskiem, którego nie udało się wyjaśnić jest np. widoczna przy pierwszym kontakcie z próbkami relaksacja kompozytu Nafion/Li⁺. To zjawisko relaksacji praktycznie wyklucza sterowanie próbek za pomocą napięcia stałego. Relaksacja jest zjawiskiem zachodzącym w próbce przez około 5 minut, jest dominująca przy próbie sterowania innym napięciem. W przypadku sygnałów zmiennych w czasie, kompozyt IPMC zachowuje się zadowalająco. Wyniki zaczynają być powtarzalne, gdyż zmieniająca się biegunowość eliminuje relaksację materiału. Dla osiągnięcia większej precyzji ruchów konieczne jest zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego do sterowania kompozytem IPMC. Opublikowane badania (Kamamichi i inni 2003, Lee i inni, 2007, Bar-Cohen, 1998) wykazują, że za pomocą podstawowej wersji regulatora PID można uzyskać kilkukrotne skrócenie czasu regulacji i utrzymywać stałą pozycję. Najważniejszą wadą kompozytów jest ich znikoma siła, spowodowana głównie rozmiarami badanych próbek. Należy się jednak spodziewać, że próbki o większych wymiarach, ulepszone za pomocą środków chemicznych czy metod takich jak powlekanie platynowej elektrody złotem, będą osiągały większą siłę, umożliwiając ich zastosowanie techniczne.

Czynnikiem blokującym szersze badania i zastosowania IPMC jest ich cena – 100 USD/cm². Potrzebny jest rozwój technologii produkcji tego typu materiałów, aby stworzyć konkurencję gwarantującą spadek ceny.

Kompozyty polimerowo-metalowe są materiałem, który wymagają kolejnych badań, jednak po rozwiązaniu niektórych problemów stanie się możliwe ich szersze zastosowanie w produkcji masowej.

W trakcie badania próbek IPMC zwrócono uwagę na liczne utrudnienia w ich wykorzystaniu, takie jak:

- niewielkie wymiary i miękki, delikatny materiał wymuszają szczególną ostrożność przy pracy z próbkami;
- próbki muszą być przechowywane w wilgotnym środowisku, przed użyciem zaś należy je osuszyć z pozostałej na nich wody;
- niemożliwość lutowania bezpośrednio do próbki wymusza stosowanie elektrod dostarczających napięcie zasilające do próbek, służących jednocześnie za utwierdzenie belki;
- w miejscu mocowania próbki należy dodatkowo ścisnąć elektrody, aby zapewnić pełny kontakt powierzchniowy, równocześnie nie powodując zwarcia;
- w miejscu kontaktu miedzi (elektroda) z platyną (IPMC) występuje korozja kontaktowa, zwiększona przepływem napięcia – miedź pokrywa się warstwą tlenków zmniejszając przewodność połączenia;
- praca pod wodą potęguje korozję w miejscu mocowania próbki, a także powoduje nagrzewanie się elektrod z powodu reakcji elektrolizy między nimi;

- pod wpływem stałego napięcia próbki wyginają się w jedną stronę, oraz kontynuują ruch po odłączeniu napięcia, co uniemożliwia kontrolowanie pozycji bez sprzężenia zwrotnego;
- po podłączeniu napięcia zmiennego należy odczekać kilka minut, zanim próbka się wyprostuje;
- próbki wykazują różne zachowania dla napięcia stałego i zmiennego, co utrudnia stworzenie spójnego modelu;
- próbki wykazują różne zachowania dla różnych przebiegów napięcia;
- charakterystyki próbek zależą w dużym stopniu od ich wymiarów geometrycznych, dzięki czemu można je w prosty sposób modyfikować stosownie do potrzeb;
- relaksacja nie występuje dla przebiegów wolnozmiennych już od częstotliwości 0,25 Hz.

LITERATURA

1. **Banaś W., SolarSKI W.** (2003), *Chemia dla inżynierów*, Kraków, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej.
2. **Bar-Cohen Y. et al.** (1998), Low mass muscle actuators using electroactive polymers (EAP) red., *Proceedings of SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, 1-5 March, San Diego, CA, p. 3324-32
3. **Byungkyu Kim et al.** (2002), *Analysis of mechanical characteristics of the ionic polymer metal composite (IPMC) actuator using cast ion-exchange film*, *Proceedings of SPIE* (2002) Volume: 4695, Publisher: Spie, p. 486-495.
4. **Farinholt K. M.** (2005), *Modeling and Characterization of Ionic Polymer Transducers for Sensing and Actuation*, Blacksburg, PhD Thesis. Blacksburg, Virginia
5. **Kamamichi N., Kaneda Y., Yamakita M., Asaka K., Luo Z. W.** (2003), Biped Walking of Passive Dynamic Walker with IPMC Linear Actuator, *SICE Annual Conference in Fukuoka*, 4-6.08, p. 123 - 128
6. **Lee J. S., Gutta S., Yim W.** (2007), Open-loop Control of Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) Based Underwater Actuator using a Network of Neural Oscillator, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, Oct 29-Nov 2, p. 2132-2137.
7. **Nemat-Nasser S.,** (2003), *Ionic Polymer-Metal Composites*, *Journal of Applied Physics*, 92, 2899.
8. **Norgen B., Krutmeijer E.** (2000) *The Nobel Prize in Chemistry 2000: Conductive polymers* (Advanced information), http://my.ece.ucsb.edu/mhwong/documents/nobel_organic_review.pdf
9. **Richardson R., Levesley L., Brown M., Hawkes J., Watterson K., Walker P.** (2003), Control of Ionic Polymer Metal Composites, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, p. 245-253.

LABORATORY RESEARCH ON MECHANICAL FEATURES OF IONIC POLYMER METAL COMPOSITE IPMC

Abstract: Electroactive polymers (EAP) are polymers, which under the voltage applying change its volume or shape. The first discovers begin in 90's previous century and quickly were adopted into many areas of techniques. Electroactive polymers attract attention scientist not only in Europe but all over the world. The number of ESNAM organization (European Scientific Network for Artificial Muscles) which is using also EAP polymers, has increased twice recently. In Poland the only research center which is the organization member is Warsaw Polytechnic. However, it does not work on EAP polymers. In the article the basic research on the samples of ionic polymer metal composite (IPMC) which are part of EAP polymers is presented. The emphasis was put on collecting the data for the static, dynamic and frequency characteristics. On the basis of characteristics a few mathematical models of IPMC composite were proposed.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr NN501208140 finansowanego ze środków Komitetu Badań Naukowych.