

Adam MARTOWICZ, Mateusz ROSIEK, Tadeusz UHL

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI,
KATEDRA ROBOTYKI I MECHATRONIKI

Wykorzystanie pomiarów impedancji elektromechanicznej do detekcji uszkodzeń konstrukcji mechanicznych

Dr inż. Adam MARTOWICZ

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W latach 2003-2008 uczestnik studiów doktoranckich zakończonych obroną pracy doktorskiej dotyczącej metody oceny wpływu niepewności parametrów konstrukcji mechanicznych na zmienność ich własności dynamicznych. Zainteresowania naukowe autora dotyczą m.in.: analizy niepewności, analizy wrażliwości, metod optymalizacji konstrukcji mechanicznych oraz detekcji uszkodzeń.

e-mail: adam.martowicz@agh.edu.pl



Mgr inż. Mateusz ROSIEK

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Od 2009 r. pracownik Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH. Zainteresowania naukowe autora skupiają się na zastosowaniu pomiarów impedancji elektromechanicznej do detekcji uszkodzeń konstrukcji mechanicznych oraz na pasywnym tłumieniu drgań z wykorzystaniem materiałów piezoelektrycznych.

e-mail: rosiek@agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Tadeusz UHL

Absolwent Wydziału Maszyn Górniczych i Hutniczych AGH w Krakowie. W 1983 r. obronił pracę doktorską w zakresie mechaniki, a w 1991 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego. W 1998 r. otrzymał tytuł profesora w zakresie nauk technicznych. Zainteresowania naukowe autora obejmują m.in.: diagnostykę, analizę modalną, aktywną redukcję drgań, układy sterowania i mechatronikę. Jest autorem 16 książek oraz ponad 500 publikacji naukowych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych.

e-mail: tuhl@agh.edu.pl



1. Wprowadzenie

W ramach technik Monitorowania Stanu Konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring; SHM) dostępne są metody bazujące na pomiarze impedancji elektromechanicznej (EM). Metody te wykorzystują własność sprzężenia EM występującego w przetworniku piezoelektrycznym montowanym w monitorowanej konstrukcji [1, 2]. Detekcja uszkodzenia oraz ocena jego rozwoju przeprowadzane są z wykorzystaniem pośrednio mierzonej impedancji mechanicznej. Impedancja mechaniczna definiuje własności strukturalne układu mechanicznego (tj. własności dynamiczne: masę, sztywność oraz tłumienie; impedancja mechaniczna stanowi stosunek siły do prędkości zdefiniowanych jako wielkości zespolone) przez co może być z powodzeniem wykorzystana do detekcji uszkodzeń ponieważ determinują one zmiany przedstawionych wyżej własności. Bezpośredni pomiar impedancji mechanicznej charakteryzuje się pewnymi niedogodnościami. Wykorzystywane przetworniki charakteryzują się znacznymi wymiarami oraz masami ponieważ stanowią połączenie układów wzbudzających, realizujących również pomiar siły wymuszającej, jak i akceleratorów. W związku z tym zamocowanie przetworników może spowodować istotną zmianę własności monitorowanej konstrukcji. Również zminiaturyzowane zabudowane przetworniki charakteryzują się wysoką ceną oraz małymi zakresami pomiarowymi [3]. Przetworniki wykorzystywane do pomiaru impedancji EM zbudowane są z jednego kawałka materiału piezoelektrycznego realizującego zarówno zadanie wymuszania drgań w konstrukcji jak również pomiaru odpowiedzi. Dzięki temu są mniejsze, lżejsze i w pomijalnym stopniu wpływają na zmianę własności strukturalnych monitorowanych konstrukcji. Mogą być również zamontowane na stałe a ich uruchomienie następuje tylko na czas pomiaru [4]. Obecnie stosowane przetworniki charakteryzują się niskim poborem energii, prostotą układów zasilania oraz niską ceną [2].

W opisywanych metodach wnioskowanie o stanie konstrukcji przeprowadzane jest z wykorzystaniem impedancji (lub admittancji, definiowanej jako odwrotność impedancji) elektrycznej zamontowanego przetwornika ze względu na istniejące ścisłe zależności pomiędzy elektrycznymi i mechanicznymi własnościami przetwornika piezoelektrycznego. Detekcja powstającego uszkodzenia przeprowadzana jest poprzez porównanie impedancji zmierzonych dla układu nieuszkodzonego (wynik referencyjny) oraz układu w czasie jego normalnej pracy. W pomiarach najczęściej wykorzystuje się przetworniki wykonane z cyrkonianu-tytanianu ołowiu (ang. lead zirconate titanate; PZT).

Podczas pomiaru impedancji EM w monitorowanej konstrukcji wymuszane są drgania w paśmie wysokich częstotliwości: 30kHz–400kHz [5], 50kHz–500 kHz [6], 10–500 kHz [7,8]. Wysokie częstotliwości wymuszanych drgań umożliwiają uzyskanie dużej wrażliwości technik detekcji na uszkodzenie w jego początkowej fazie. Małe długości wzbudzanych fal oraz małe wymiary wzbudzanych lokalnych postaci drgań własnych pozwalają na

Streszczenie

Pomiar impedancji elektromechanicznej umożliwia detekcję oraz śledzenie rozwoju różnego rodzaju uszkodzeń występujących w konstrukcjach mechanicznych. Nieniszczący charakter badań pozwala na stały monitoring stanu wrażliwych komponentów. Koncepcja systemu monitorowania konstrukcji bazującego na pomiarach impedancji elektromechanicznej wykorzystuje własność sprzężenia elektromechanicznego przetwornika piezoelektrycznego przyklejonego do konstrukcji. Wnioskowanie o zaistnieniu uszkodzenia mechanicznego dotyczy przede wszystkim obszaru znajdującego się w bezpośrednim otoczeniu przetwornika i jest przeprowadzane na podstawie analizy zmienności zmierzonej impedancji elektromechanicznej. W artykule przedstawiono definicję i sposób pomiaru impedancji elektromechanicznej. Ponadto scharakteryzowano metody monitoringu wykorzystujące impedancję elektromechaniczną oraz opisano możliwości ich praktycznego wykorzystania.

Słowa kluczowe: impedancja elektromechaniczna, przetwornik piezoelektryczny, detekcja uszkodzenia, własności dynamiczne.

An application of measurements of electro-mechanical impedance for damage detection in mechanical systems

Abstract

The paper deals with electromechanical impedance-based and non-destructive methods used for damage detection in mechanical structures. In section 1 the overview of methods is presented including main idea, used physical phenomenon, characteristics of mounted piezoelectric transducers, possible areas of applications and comparison to other monitoring techniques. In section 2 the definition of electromechanical impedance is presented. Direct and reverse piezoelectric effects are determined by matrix constitutive equation for piezoelectric transducers. Equation describing electromechanical admittance is presented for exemplary model of structure with transducer. Equivalent electrical model of transducer is also described. Section 3 presents most commonly used processing techniques applicable for measured data to determine damage indicators. Exemplary kinds of detected damages and monitored structures are listed in section 4. The last section summarizes the paper and presents concluding remarks.

Keywords: electromechanical impedance, piezoelectric transducer, damage detection, dynamic properties.

wykrycie niewielkich zmian w strukturze monitorowanego układu przede wszystkim w bezpośrednim otoczeniu zamontowanego przetwornika [9]. Lokalny zasięg pomiaru impedancji wynika również z obecności tłumienia [6], np. tarcie występujące w połączeniach konstrukcji kratowej uniemożliwia pomiar impedancji dla odległych węzłów [9]. Dodatkowo w zakresie wysokich częstotliwości wymagane są niewielkie napięcia zasilające przetwornika pozwalające na wzbudzenie drgań w konstrukcji, zazwyczaj mniejsze niż 1 V [5]. W przypadku układów, w których podczas normalnej pracy występują drgania o niskich częstotliwościach (np. ruch sterów w samolocie, przejazd samochodu przez most), dodatkową zaletą opisywanych metod jest brak zakłóceń dotyczących pomiaru impedancji EM przeprowadzanego w paśmie wysokich częstotliwości. Na wynik pomiaru nie wpływają wówczas obciążenia i przemieszczenia eksploatacyjne, globalne zmiany parametrów strukturalnych dotyczących masy, sztywności jak również warunków brzegowych zaistniałe poza obszarem bezpośredniego otoczenia zamontowanego przetwornika [6].

Wrażliwość metod impedancji EM jest porównywalna z wrażliwością metod ultradźwiękowych jednak nie wymagają one wiedzy doświadczanego operatora potrzebnej do lokalizacji uszkodzenia [5]. Wymagany sprzęt jest również tańszy w przypadku metod impedancji EM. Opisywane metody stanowią więc kompromis pomiędzy globalnymi technikami pomiaru oraz metodami ultradźwiękowymi. Dodatkową zaletą zastosowania jest możliwość równoczesnego wykorzystania zamontowanych przetworników w innych nieniszczących metodach diagnostycznych.

2. Definicja impedancji elektromechanicznej

W przypadku metod bazujących na impedancji EM zamontowane przetworniki piezoelektryczne wykorzystują zarówno prosty jak i odwrotny efekt piezoelektryczny. Drgania w układzie pojawiają się dzięki odwrotnemu efektowi piezoelektrycznemu, w którym po przyłożeniu pola elektrycznego następuje odkształcenie materiału piezoelektrycznego. Impedancja lub admitancja EM mogą być mierzone z wykorzystaniem prostego efektu piezoelektrycznego, który związany jest z generacją pola elektrycznego na skutek odkształceń mechanicznych. Odpowiedź dynamiczna układu wygenerowana w monitorowanym obszarze jest transformowana w przetworniku do postaci sygnału elektrycznego. Ostatecznie pomiar wielkości elektrycznych umożliwia przeprowadzenie wnioskowania na temat zmian własności mechanicznych monitorowanej konstrukcji.

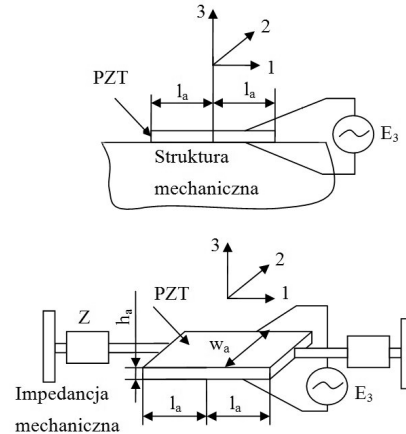
Dla liniowego zakresu związków pomiędzy mechanicznymi i elektrycznymi parametrami materiału piezoelektrycznego może być zdefiniowany jak poniżej [5]:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d_t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie: S jest wektorem odkształceń mechanicznych, T jest wektorem naprężeń mechanicznych, E jest wektorem natężenia pola elektrycznego, D jest wektorem indukcji elektrycznej (gęstości ładunku w kondensatorze reprezentującym przetwornik), s jest macierzą podatności mechanicznej, d jest macierzą odkształceniowych stałych piezoelektrycznych, ε jest macierzą przenikalności elektrycznej. Użyte indeksy E oraz T oznaczają że, dane wielkości są mierzone odpowiednio przy zwartych elektrodach i braku naprężeń zewnętrznych, natomiast t oznacza transpozycję. Pierwsze z równań opisuje odwrotny efekt piezoelektryczny, natomiast drugie definiuje prosty efekt piezoelektryczny.

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy model konstrukcji mechanicznej z zamontowanym przetwornikiem PZT. Przetwornik jest przymocowany do powierzchni monitorowanej struktury za pomocą spoiwa epoksydowego o wysokiej wytrzymałości. Można zatem przyjąć, że zachowuje się jak cienki pręt poddany drganiom osiowym. Przetwornik ulega wydłużaniu i skracaniu w kierunku '1' kiedy przyłożone do niego zostanie zmienne pole elektryczne

w kierunku '3'. Połowa długości przetwornika oznaczona jest jako l_a , szerokość jako w_a a grubość jako h_a .



Rys. 1. Model konstrukcji mechanicznej z przytwierdzonym przetwornikiem
Fig. 1. Model of mechanical system with mounted transducer

W omawianym przypadku przyjęto, iż monitorowana struktura reprezentowana jest przez jednowymiarowe człony o impedancji mechanicznej Z , których parametry (powierzchnia oraz moment bezwładności) skupione są wzdłuż osi obojętnej każdego z nich. W związku z tym drgania przetwornika w kierunku '2' mogą być pominięte. Przy tych założeniach, zachowanie przetwornika może być opisywane przez następujące równanie konstytutywne wprowadzone z równania (1) [3]:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

gdzie: S_1 jest odkształceniem na kierunku '1', D_3 jest indukcją elektryczną (tj. gęstością ładunku) w przetworniku PZT, d_{31} jest stałą piezoelektryczną, T_1 jest naprężeniem normalnym na kierunku '1'. Zespolona podatność mechaniczna s_{11}^E jest odwrotnością zespolonej sztywności, wprost definiowanej jako zespolony moduł Younga Y_{11}^E . Zarówno moduł Younga Y_{11}^E jak i przenikalność elektryczna ε_{33}^T są rozważane jako wartości zespolone, w celu wprowadzenia mechanicznego i elektrycznego współczynnika strat, odpowiednio η oraz δ :

$$Y_{11}^E = Y_{11}^E (1 + j\eta) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{33}^T = \varepsilon_{33}^T (1 + j\delta) \quad (4)$$

Elektryczny współczynnik strat δ jest zazwyczaj mniejszy niż 1% [9]. Założono, że drgający przetwornik traktowany jest jako nieskończenie mały w porównaniu do całej struktury, dlatego jego masa i sztywność są pomijane. Przyjęto ponadto, iż struktura charakteryzuje się jednorodną sztywnością dynamiczną dla całego obszaru mocowania. Przy takim założeniu obydwa końce przetwornika połączone są z jednakowymi impedancjami mechanicznymi Z reprezentującymi monitorowaną konstrukcję. W takim przypadku, przetwornik charakteryzuje się zerowym odkształceniem w punkcie środkowym ($x=0$ dla kierunku '1') niezależnie od jego umiejscowienia. Wymuszenie generowane przez PZT na kierunku '3' jest pomijane, ze względu na fakt, iż jego wpływ może być traktowany jak reakcja nieskończenie małego wzbudnika na nieskończenie dużą podstawę. Przemawia za tym również fakt, iż zazwyczaj częstotliwość rezonansowa przetwornika dla drgań grubościowych jest znacznie wyższa niż zakres częstotliwości w którym dokonuje się pomiarów impedancji EM.

Drgania PZT dla kierunku '1' mogą być opisane falowym równaniem różniczkowym:

$$Y_{11}^E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

gdzie u jest przemieszczeniem dowolnego punktu przetwornika na kierunku '1' natomiast ρ jest gęstością materiału PZT. Po założeniu warunku brzegowego: $u=0$ dla $x=0$, wyrażenie na admitancję EM przyjmuje formę [5,10]:

$$Y_E = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\epsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_{11}^E + \frac{Z_a}{Z + Z_a} d_{31}^2 Y_{11}^E \frac{\text{tg}(\kappa l_a)}{\kappa l_a} \right] \quad (6)$$

gdzie ω jest częstotliwością, κ jest liczbą falową:

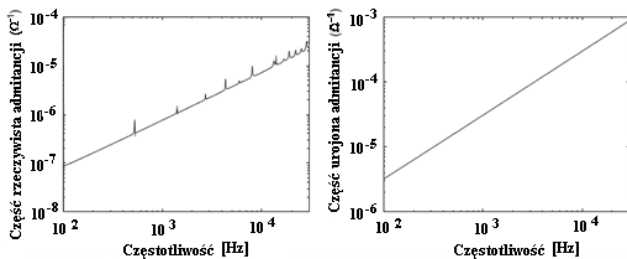
$$\kappa = \omega \sqrt{\rho / Y_{11}^E} \quad (7)$$

natomiast Z_a jest impedancją mechaniczną przetwornika. Równanie (6) może również przyjąć uproszczoną formę [9, 11]:

$$Y_E = j\omega a \left[\epsilon_{33}^T - \frac{Z}{Z + Z_a} d_{31}^2 Y_{11}^E \right] \quad (8)$$

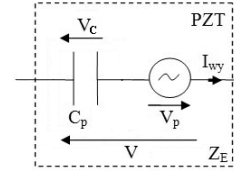
po przyjęciu, że $\text{tg}(\kappa l_a)/\kappa l_a \approx 1$ [3] oraz wprowadzeniu stałej geometrycznej przetwornika $a = w_a l_a / h_a$. Jakikolwiek uszkodzenie struktury spowoduje zmianę impedancji mechanicznej Z , co z kolei wpłynie na Y_E , wskazując tym samym na uszkodzenie. Przyjmując założenie, iż własności mechaniczne przetwornika nie ulegną zmianie, admitancja EM powinna charakteryzować zmiany własności mechanicznych monitorowanego obszaru.

Pierwszy człon w równaniu (8) stanowi admitancja o charakterze pojemnościowym dla swobodnego PZT. Ta część determinuje liniowy trend zmienności admitancji w funkcji częstotliwości (linia bazowa widoczna na rys. 2 po prawej stronie) i może być wykorzystana w detekcji uszkodzenia przetwornika piezoelektrycznego. Przetwornik przedstawiany jest na elektrycznych schematach zastępczych z wykorzystaniem kondensatora (rys. 3). Zmiany jego pojemności mogą być traktowane jako zmiany własności przetwornika wynikające z jego uszkodzenia. Wpływ drugiego członu uwidacznia się w obecności ostrych pików powyżej linii bazowej (na rys. 2 po lewej stronie). Obserwowane piki odzwierciedlają odpowiedź dynamiczną struktury. Jakakolwiek zmiana impedancji może być traktowana jako uszkodzenie konstrukcji. Podsumowując, w metodach detekcji uszkodzeń wykorzystywane są przede wszystkim części rzeczywiste impedancji $\text{Re}(Z_E)$ lub admitancji $\text{Re}(Y_E)$ ze względu na większą wrażliwość na zmiany parametrów struktury. Pomiar impedancji lub admitancji EM dają zatem informację zarówno o własnościach przetwornika, jak i monitorowanej struktury.



Rys. 2. Rzeczywista i urojona część admitancji EM [19]
Fig. 2. Real and imaginary parts of EM admittance [19]

Uproszczony model elektryczny przetwornika przedstawiono na rys. 3. Model ten zbudowany jest z szeregowo połączonych: siły elektromotorycznej V_p , czyli źródła napięcia generowanego zgodnie z prostym efektem piezoelektrycznym i kondensatora C_p [5].

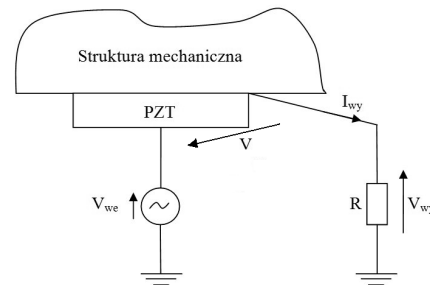


Rys. 3. Model elektryczny przetwornika
Fig. 3. Electrical model of the transducer

Do wyznaczenia impedancji elektrycznej przetwornika definiowanej jako wielkość zespolona Z_E , wymagany jest pomiar przyłożonego napięcia V oraz przepływającego prądu I_{wy} :

$$Z_E = \frac{1}{Y_E} = \frac{V}{I_{wy}} \quad (9)$$

Na rys. 4 przedstawiono przykład obwodu elektrycznego wykorzystywanego do pomiaru impedancji EM.



Rys. 4. Przykładowy układ do pomiaru impedancji EM
Fig. 4. Exemplary electric circuit used for the measurement of EM impedance

Korzystając z II prawa Kirchhoffa dla obwodu przedstawionego na rys. 3 oraz rys. 4 można wyprowadzić wzór definiujący impedancję przetwornika:

$$Z_E = R \left(\frac{V_{WE}}{V_{WY}} - 1 \right) \quad (10)$$

Podsumowując, zmierzona impedancja przetwornika zależy od napięcia V , uwzględniającego napięcie V_p , które, z kolei, jest funkcją impedancji mechanicznej monitorowanego układu [5].

3. Detekcja uszkodzeń

Wnioskowanie o zaistnieniu uszkodzenia przeprowadzane jest na podstawie zmian impedancji EM z wykorzystaniem różnych wskaźników uszkodzeń. Jednym z najczęściej stosowanych jest *Root Mean Square Deviation* (RMSD), który definiowany jest następująco [3, 5]:

$$\text{RMSD} = \sum_{j=1}^n \sqrt{(\text{Re}(Z_{j,1}) - \text{Re}(Z_{j,2}))^2 / (\text{Re}(Z_{j,1}))^2} \quad (11)$$

Dla j -tej częstotliwości $Z_{j,1}$ jest impedancją EM układu w stanie początkowym bez uszkodzenia. $Z_{j,2}$ definiuje bieżącą wartość impedancji monitorowanego układu. Im większa wartość wskaźnika RMSD tym większa różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami parametrów strukturalnych co jest interpretowane jako wystąpienie uszkodzenia.

Wskaźnik *Relative Deviation* (RD) zastosowano m.in. do detekcji poluzowanych połączeń śrubowych w kratownicy [9]:

$$\text{RD}_i = \left(\sum_{k=1}^n (\text{Re}(Y_{i,k}^1) - \text{Re}(Y_{i,k}^0))^2 \right) / \left(\text{Re}(Y_{i,k}^1) - \text{Re}(Y_{i,k}^0) \right)^2 \quad (12)$$

$Y_{i,k}^1$ i $Y_{i,k}^0$ stanowią admittance EM dla k -tego interwału częstotliwości odpowiednio po i przed poluzowaniem i -tego połączenia w każdym węzle kratownicy. $Y_{1,k}^1$ i $Y_{1,k}^0$ są admittance EM po i przed poluzowaniem jednego, wybranego połączenia. Autorzy publikacji stwierdzają, że metryka RD nie jest wrażliwa na rozwój uszkodzenia i jego ilościowa ocena nie jest możliwa. Jedyne dwustanowe wnioskowanie („uszkodzony”, „nieuszkodzony”) może być efektywnie przeprowadzone.

Przykładem innego wskaźnika uszkodzenia jest wskaźnik oparty na korelacji wzajemnej *Cross-Correlation* [5]:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^n ((\operatorname{Re}(Z_{j,1}) - \operatorname{Re}(Z_1))(\operatorname{Re}(Z_{j,2}) - \operatorname{Re}(Z_2)))}{(n-1)s_{Z_1}s_{Z_2}} \quad (13)$$

gdzie s_Z są odchyleniami standardowymi mierzonych impedancji, natomiast $Z_{j,1}$ i $Z_{j,2}$ definiowane są jak w równaniu (11).

W [12] zaproponowany jest wskaźnik stanowiący sumę kwadratów różnic części rzeczywistych admittance. W [3] zaproponowano, że zarówno część rzeczywista jak i urojona admittance mogą być wykorzystane do oceny uszkodzenia. Inne wskaźniki uszkodzeń przedstawiono w [13].

4. Przykłady zastosowań

Do najczęściej występujących typów uszkodzeń wykrywanych z wykorzystaniem metod opartych na impedancji EM można zaliczyć: pęknięcia, poluzowania połączeń śrubowych, sworzniowych, uszkodzenia połączeń klejonych, rozwarstwienia oraz korozję. Aplikacje metod impedancji EM obejmują m.in. następujące konstrukcje mechaniczne:

- z połączeniami sworzniowymi, śrubowymi (poluzowania) [1, 4, 5, 6, 14, 15, 16];
- z połączeniami klejowymi (odklejenia) [17];
- z połączeniami spawanymi (pęknięcia) [18];
- wykonane z kompozytów (pęknięcia, delaminacja) [19];
- tory kolejowe [20];
- wykonane z betonu i żelbetonu (pęknięcia) [5];
- wykonane z elementów cienkościennych [21].

Wspomniane wyżej uszkodzenia lokalnie modyfikują własności monitorowanych konstrukcji dlatego mogą być z powodzeniem analizowane opisanymi metodami.

5. Podsumowanie i wnioski

Artykuł stanowi przegląd teorii oraz możliwości zastosowań metod monitorowania stanu konstrukcji mechanicznych bazujących na pomiarze impedancji EM. Przedstawiono charakterystyki stosowanych przetworników, wybrane wskaźniki uszkodzeń oraz definicję impedancji EM dla przykładowej konstrukcji.

Ze względu na zastosowanie pasma wysokich częstotliwości w pomiarze impedancji EM opisywane metody znajdują zastosowanie w detekcji lokalnych uszkodzeń występujących przede wszystkim w bliskim sąsiedztwie przetworników, co wiąże się z koniecznością selekcji obszarów potencjalnych uszkodzeń.

Metody impedancji EM umożliwiają przede wszystkim ocenę jakościową uszkodzeń ponieważ wymienione w pracy typy uszkodzeń powodują podobne zmiany impedancji EM, przez co identyfikacja konkretnego typu uszkodzenia może być poważnie utrudniona. Dodatkowo, ze względu na dużą wrażliwość opisywanych metod na zmienność warunków pracy, m.in. zmienność temperatury, warunków brzegowych, wymuszeń, itp., zmienność tych parametrów powinna być monitorowana, aby możliwe było wyznaczenie poprawnej wartości impedancji EM.

Artykuł prezentuje wyniki prac realizowanych w projekcie badawczym nr R0301502 finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

6. Literatura

- [1] Inman D.J., Farrar C.R., Lopes V. Jr., Steffen V. Jr. [ed.]: Damage prognosis. For aerospace, civil and mechanical systems. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2005.
- [2] Park G., Farrar C.R., Rutherford A.C., Robertson A.N.: Piezoelectric Active Sensor Self-Diagnostics using Electrical Admittance Measurements. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 128(4), 469-476, 2006.
- [3] Bhalla S., Soh C.K.: Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, 2003, pp. 1897-1916.
- [4] Giurgiutiu V.: Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Elsevier Academic Press, 2008.
- [5] Park G., Inman D.J.: Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements, Philosophical Transactions of the Royal Society A 365 (2007) 373-392.
- [6] Ayres J.W., Lalonde F., Chaudhry Z., Rogers C.A.: Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures, Smart Materials and Structures 7 (1998) 599-605.
- [7] Yan W., Lim C.W., Chen W.Q., Cai J.B.: A coupled approach for damage detection of framed structures using piezoelectric signature. Journal of Sound and Vibration 307 (2007) 802-817.
- [8] Naidu A.S.K., Soh C.K.: Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers, Smart Materials and Structures 13 (2004) 393-403.
- [9] Sun F.P., Chaudhry Z., Liang C., Rogers C.A.: Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 6 (1995) 134-139.
- [10] Park S., Yun C.-B., Inman D.J.: Structural health monitoring using electro-mechanical impedance sensors. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 31, 2008 714-724.
- [11] Park G., Sohn H., Farrar C.R.: Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. The Shock and Vibration Digest, 35(6), 2003, p. 451-463.
- [12] Park G., Kabeya K., Cudney H.H., Inman D.J.: Impedance-based Structural Health Monitoring for temperature varying applications. JSME International Journal, Series A, Vol. 42, No. 2, 1999.
- [13] Zagari A.N., Giurgiutiu V.: Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Wall Structures. 3rd International Workshop of Structural Health Monitoring, Sept. 12-14, 2001, Stanford University.
- [14] Wait J.R., Park G., Farrar C.R.: Integrated Structural Health Assessment using Piezoelectric Active Sensors, Shock and Vibration, 12(6), 389-405, 2005.
- [15] Sodano H.A., Park G., Inman D.J.: An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications, Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 683-697.
- [16] Fasel T.R., Sohn H., Park G., Farrar C.R.: Active Sensing using Impedance-based ARX Models and Extreme Value Statistics to Damage Detection, Earthquake Engineering & Structural Dynamics Journal, (2005) Vol. 34, No. 7, 763-785.
- [17] Chiu W.K., Koh Y.L., Galea S.C., Rajic N.: Smart structure application in bonded repairs, Composite Structures 50 (2000) 433-444.
- [18] Kim M.H., Kang S.W., Lee J.M., Inman D.J.: Simultaneous Health Monitoring and Vibration Control of Structures using Smart Materials. Key Engineering Materials Vols. 297-300 (2005) pp 2207-2212.
- [19] Bois Ch., Herzog P., Hochard Ch.: Monitoring a delamination in a laminated composite beam using in-situ measurements and parametric identification, Journal of Sound and Vibration, 299 (2007), 786-805.
- [20] Park S., Inman D.J., Yun Ch.-B.: An outlier analysis of MFC-based impedance sensing data for wireless structural health monitoring of railroad tracks, Engineering Structures 30 (2008) 2792-2799.
- [21] Yang Y., Hu Y.: Electromechanical impedance modeling of PZT transducers for health monitoring of cylindrical shell structures, Smart Materials And Structures, 17 (2008) 015005.