

IDENTYFIKACJA SIŁ ODDZIAŁYWANIA W UKŁADZIE KOŁO SZYNA METODĄ ODWRÓCONEGO FILTRU STRUKTURALNEGO

Krzysztof MENDROK

Akademia Górniczo – Hutnicza, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, fax. 012 634 35 05, e-mail mendrok@agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono zastosowanie metody identyfikacyjnej do rekonstrukcji sił działających w układzie kontaktu koła i szyny. Metoda polega na estymacji współczynników filtra strukturalnego, który służy do wyliczania siły na podstawie rejestrowanych przebiegów przyspieszenia drgań. Badana metoda została zweryfikowana przy pomocy danych symulacyjnych pochodzących z prostego modelu o 7 stopniach swobody, a następnie przy pomocy danych eksperymentalnych. Przebiegi do weryfikacji były rejestrowane podczas jazd wagonu towarowego po torach o różnej jakości i z różnymi prędkościami. Zapisywano przebiegi czasowe sił układu koło - szyna oraz przyspieszenia drgań w wybranych punktach obiektu. Wyniki obu stopni weryfikacji zamieszczone w pracy potwierdzają skuteczność metody w zagadnieniach nieliniowych i niekolokacyjnych.

Słowa kluczowe: Identyfikacja sił, układ koło szyna, metody odwrotne.

LOAD IDENTIFICATION IN WHEEL RAIL SYSTEM WITH USE OF INVERSE STRUCTURAL FILTER METHOD

Summary

In the paper the identification method is used for rail wheel system load reconstruction. The method bases on structural filter coefficients identification. The filter, further is used for load estimation from the vibrations acceleration time histories. The tested method was verified with simulation data, obtained from simple 7 DOF model, and next with experimental data. Time histories used for verification were recorded during freight car running on the rails with different quality and with different speeds. Forces acting in the wheel rail system were stored as well as vibrations accelerations in selected object points. Results of both levels verification, presented in the paper, acknowledge the method efficiency in the nonlinear and non-colocated applications.

Keywords: Load identification, wheel rail system, inverse techniques.

1. WPROWADZENIE

Obciążenia oddziałujące na konstrukcje w czasie jej eksploatacji powodują zużywanie się jej elementów. Bardzo istotne z punktu trwałości konstrukcji byłoby monitorowanie oraz sterowanie tymi obciążeniami tak, aby na bieżąco oceniać stopień zużycia lub mieć możliwość takiego sterowania obiektem, aby zużycie to było minimalne [1]. Według autorów jednym ze sposobów zużycia elementów konstrukcji, które może być monitorowane i ewentualnie sterowane, jest zużycie zmęczeniowe. Aby ocenić utratę trwałości lub sterować nią należy w pierwszej kolejności ocenić (zidentyfikować) obciążenie oddziałujące na konstrukcję. W czasie eksploatacji większości konstrukcji bezpośredni pomiar sił obciążających jest niemożliwy lub technicznie bardzo trudny. Dlatego też opracowano metody identyfikacji obciążeń, które na podstawie pomiaru odpowiedzi układu umożliwiają ocenę obciążenia. Metody oceny

obciążeń można podzielić na trzy grupy:

- metody oparte na zależnościach deterministycznych,
- metody oparte na zależnościach statystycznych,
- metody oparte na algorytmach inteligentnych.

Do pierwszej grupy należą metody oparte na algorytmach zagadnienia odwrotnego identyfikacji zdefiniowanego w następujący sposób; dany jest model obiektu dana jest odpowiedź układu należy wyznaczyć wymuszenie [4]. Zagadnienie to można rozwiązać zarówno w dziedzinie częstości, czasu jak i amplitud.

Do najczęściej stosowanych metod statystycznych należy zaliczyć metody oparte o analizę regresji [6]. Metody te polegają na identyfikacji parametrów modelu regresyjnego opisującego związek, bądź to pomiędzy wymuszeniem a odpowiedzią układu lub też pomiędzy parametrami procesu, a obciążeniami [5].

Metody oparte na algorytmach sztucznej inteligencji wykorzystywane są wtedy, gdy nie ma

dostatecznej wiedzy na temat dynamiki obiektu by posłużyć się jego modelem deterministycznym, lub gdy model jest zbyt duży i nie nadaje się do obliczeń, zwłaszcza w czasie rzeczywistym. Przewagą metod opartych o algorytmy sztucznej inteligencji nad metodami bazującymi na modelach statystycznych jest ich większa przydatność do przypadków silnie nieliniowych. Również w przypadkach, gdy obiekt jest zbyt skomplikowany, aby mógł być dobrze opisany przez model regresyjny stosuje się algorytmy sztucznej inteligencji. Do najczęściej stosowanych metod z tej grupy zaliczyć należy identyfikację obciążeń przy pomocy sztucznych sieci neuronowych [6], [7], [8] i logiki rozmytej [8]. Stosowane są też algorytmy genetyczne, głównie w połączeniu z innymi metodami.

Zagadnienia identyfikacji sił powstających w kontakcie koło szyna mają ogromne znaczenie z punktu widzenia, zarówno bezpieczeństwa eksploatacji pojazdów szynowych, jak i kosztów remontów taboru kolejowego i sieci trakcyjnej. Poprawne zidentyfikowanie sił powstających podczas jazdy pociągu w kontakcie koło-szyna i monitorowanie tych sił pozwala na określenie stopnia zużycia pojazdów oraz szyn. To z kolei pozwala na dokładne ustalenie terminu napraw co zwiększa bezpieczeństwo i zmniejsza koszty eksploatacji. Należy jednocześnie podkreślić, że pomiar sił kontaktu koło - szyna w czasie normalnego użytkowania pojazdu szynowego jest zagadnieniem niezwykle trudnym z uwagi na dobór rodzaju i miejsca usytuowania czujników, sposób transmisji danych itp. Prostszy wydaje się być pomiar odpowiedzi układu w postaci np. przebiegów przyspieszenia drgań i na ich podstawie identyfikacja sił. Do takiej identyfikacji najlepiej nadają się metody statystyczne lub oparte na sztucznej inteligencji, z uwagi na wysoki stopień skomplikowania modelu oraz występujące w nim nieliniowości. Dodatkowym utrudnieniem jest niekolokacyjność układu koło - szyna, tzn. nie ma możliwości pomiaru odpowiedzi w punkcie działania sił. W pracy podjęto próbę identyfikacji sił kontaktu koło - szyna przy pomocy metody statystycznej zwanej metodą odwróconego filtra strukturalnego.

2. METODA ODWRÓCONEGO FILTRU STRUKTURALNEGO

Metoda odwróconego filtra strukturalnego nadaje się do identyfikacji sił w układach nie-minimalnofazowych i niekolokacyjnych [2]. Z przypadkiem takim mamy do czynienia w zagadnieniach odtwarzania sił powstających w układzie koło - szyna. Wyliczenie siły przy pomocy odwrotnego filtra strukturalnego, realizowane jest przy pomocy wzoru:

$$u_k = \sum_{i=0}^{N_r-l} r_i \cdot y_{k-i+l} \quad (1)$$

W równaniu (1) u_k to k -ta próbka identyfikowanego wektora sił, y to wektor odpowiedzi, a r_i to i -ty współczynnik filtra. Rząd filtra określony jest przez N_r , a l oznacza wyprzedzenie filtra. Dla układów o wielu wejściach i wielu wyjściach współczynniki filtra r są macierzami o wymiarach $n_a \times n_s$ (liczba wejść \times liczba wyjść). Współczynniki te, to pseudoodwrotne parametry Markowa układu. Wyznaczenie ich wiąże się z koniecznością rozwiązania zagadnienia dekonwolucji. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest przedstawienie go w postaci zagadnienia pseudoodwrotności macierzy. Aby to uczynić konieczne jest zestawienie współczynników filtra r w macierz R o wymiarach $n_a \times N_r n_s$. Przy takiej reprezentacji filtra, splot danych wejściowych i wyjściowych przyjmuje formę równania:

$$R \cdot Y = U \quad (2)$$

Chcąc rozwiązać równanie (2) ze względu na R pojawia się problem pseudoinwersji macierzy Y .

$$R = U \cdot Y^+ \quad (3)$$

W powyższych równaniach U i Y zostały zestawione w następujący sposób:

$$Y = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0 & \tilde{y}_0 & \cdots & \cdots & \cdots & \tilde{y}_{N_c-1} \\ 0 & \tilde{y}_0 & \cdots & \cdots & \cdots & \tilde{y}_{N_c-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tilde{y}_0 & \cdots & \tilde{y}_{N_c-N_r} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad \tilde{u}_0 \quad \tilde{u}_1 \quad \cdots \quad \tilde{u}_{N_r-l-1}] \quad (5)$$

Liczba elementów zerowych na początku macierzy U równa jest wartości wyprzedzenia l . Każdy z elementów macierzy U i Y składa się z próbek zarejestrowanych w czasie różnych eksperymentów. można je dalej rozpisac:

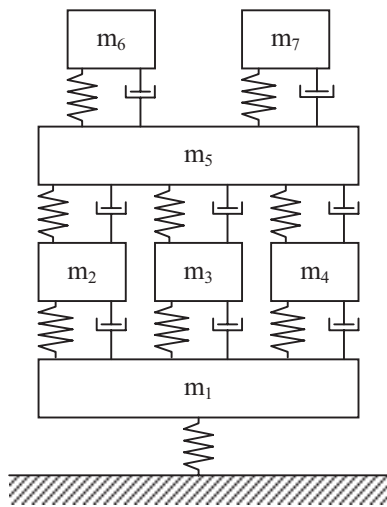
$$\begin{aligned} \tilde{y}_i &= [y_i^1 \quad y_i^2 \quad \cdots \quad y_i^{n_{exp}}] \\ \tilde{u}_i &= [u_i^1 \quad u_i^2 \quad \cdots \quad u_i^{n_{exp}}] \end{aligned} \quad (6)$$

Analiza wzoru (2) i kolejnych wykazuje, że istnieje $(n_a N_r) * n_{exp}$ równań i $n_a * (N_r n_s)$ niewiadomych. Wynika z tego, iż liczba eksperymentów n_{exp} wzięta do obliczeń musi być nie mniejsza od liczby wejść n_a , aby rozwiązanie było jednoznaczne. Aby obliczyć macierz pseudoodwrotną do macierzy Y , wykorzystano metodę rozkładu macierzy na wartości szczególne, przy czym do obliczeń brane były tylko te wartości szczególne, których wartość przekraczała pewien

zadany próg. Technika ta zwana jest TSVD (z ang. Truncated Singular Value Decomposition) [3].

3. WERYFIKACJA SYMULACYJNA

Poprawność działania opisanej metody sprawdzono najpierw przy pomocy danych wygenerowanych na drodze symulacji utworzonego modelu. Posłużono się modelem o siedmiu stopniach swobody. Sposób połączenia mas układu pokazano na rysunku 1. Parametry fizyczne przyjęte dla modelu zestawiono w tabeli 1. Przyjęto następującą notację: wartość sztywności między masami i i j – k_{ij} , wartość tłumienia między masami i i j – c_{ij} .



Rys. 1. Schemat układu zbudowanego na potrzeby symulacji

Tabela 1. Zestawienie parametrów układu zbudowanego na potrzeby symulacji

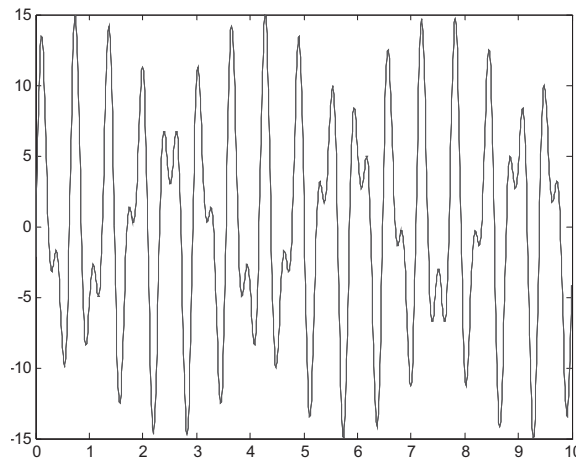
Masy skupione [kg]	$m_1 = 5; m_2 = 1; m_3 = 1; m_4 = 1;$ $m_5 = 4; m_6 = 2; m_7 = 2;$
Współczynniki tłumienia [Ns/m]	$c_{01} = 12; c_{12} = 5; c_{13} = 5; c_{14} = 5;$ $c_{25} = 5; c_{35} = 5; c_{45} = 5; c_{56} = 9;$ $c_{57} = 9;$
Współczynniki sztywności [N/m]	$k_{01} = 80000; k_{12} = 15000; k_{13} =$ $15000; k_{14} = 15000; k_{25} =$ $14800;$ $k_{35} = 15000; k_{45} = 15000; k_{56} =$ $28000; k_{57} = 28000;$

Dane do weryfikacji metody generowano przykładając wymuszenie do masy m_3 i symulując odpowiedź na to wymuszenie w postaci przyspieszenia wszystkich mas układu. Przeprowadzono sześć tego typu symulacji stosując różne wymuszenia: funkcje harmoniczne, sumy kilku funkcji harmonicznnych, sumy funkcji harmonicznnych z szumem. Do identyfikacji współczynników filtra wykorzystano przebiegi przyspieszenia drgań mas modelu z wyjątkiem masy m_3 , aby zapewnić niekolokacyjność układu. Do

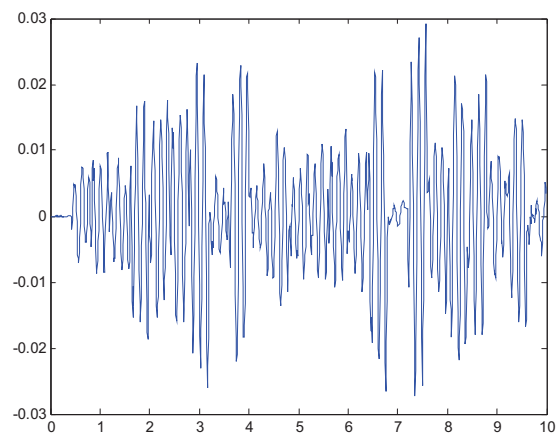
wyliczania siły dla tak przygotowanych danych symulacyjnych zastosowano następujące parametry procedury identyfikacyjnej:

- liczba wymuszeń $n_a=1$,
- liczba odpowiedzi $n_s=6$,
- rząd filtra $N_r=100$,
- liczba eksperymentów $n_{exp}=6$,
- wyprzedzenie filtra $l=30$,

Zarówno rząd filtra N_r , jaki i jego wyprzedzenie l dobrano empirycznie na drodze kilku prób. Rząd N_r zmieniano od 20 w górę aż do osiągnięcia zadowalającego efektu. Dalsze zwiększanie rozmiaru filtra dla przyjętego układu nie przynosiło poprawy jakości identyfikacji. Wartość wyprzedzenia l zmieniano od 10 do 50 co 10. Przyjęta wartość 30 dawała najlepsze wyniki. Odwrócony filtr strukturalny zidentyfikowany dla opisanego układu symulacyjnego i zebranych powyżej parametrów został następnie wykorzystany do wyliczania sił na podstawie przebiegów przyspieszeń drgań. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie przebiegu czasowego siły przyłożonej (linia gruba) i wyliczonej (linia cienka). Na rysunku 3 pokazano przebieg różnicy obu sygnałów.



Rys. 2. Porównanie przebiegu czasowego siły przyłożonej (linia gruba) i zidentyfikowanej (linia cienka)



Rys. 3. Przebieg różnicy sił zadanej i obliczonej

Rozważana siła miała charakter sumy dwóch sinusów o różnej częstotliwości i amplitudzie. Wartość współczynnika korelacji policzonego między oboma przebiegami wynosi 0,99. Wartość błędu względnego nie przekroczyła 0,5 %.

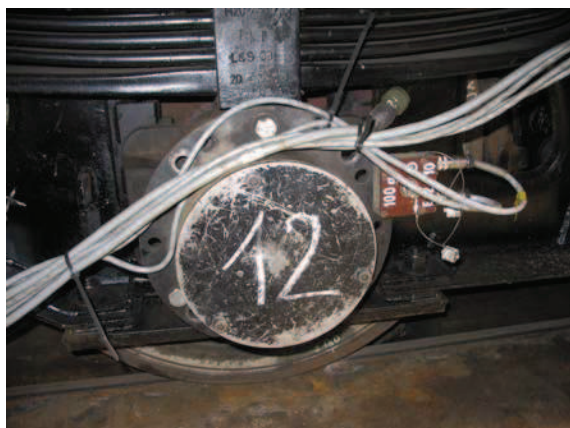
4. ZASTOSOWANIE METODY DO IDENTYFIKACJI SIŁ KONTAKTU KOŁO - SZYNA

Zweryfikowaną metodę odwróconego filtra strukturalnego zastosowano do identyfikacji sił powstających w układzie kontaktu koło - szyna. Przedmiotem badań był samowyładowczy wagon towarowy serii Fals, typu 665 4 011-4. Badaniem poddano wagon w stanie próżnym. Rysunek 3 przedstawia zdjęcie wagonu typu 665 4 011-4 przygotowanego do badań.



Rys. 3. Wagon Fals, typu 665 4 011-4

Na rysunku 4 pokazano umiejscowienie akcelerometrów na maźnicach badanego wagonu.



Rys. 4. Pomiar przyspieszenia drgań na maźnicy drugiego zestawu pierwszego wózka.

W czasie jazdy rejestrowano przebiegi czasowe:

- siła pionowa, działająca na styku koło-szyna, zestaw pierwszy, prawa strona [kN],
- siła poprzeczna, działająca na styku koło-szyna, zestaw pierwszy, prawa strona [kN],

- przyspieszenie pionowe, maźnica, zestaw pierwszy, strona prawa [m/s^2],
- przyspieszenie pionowe, maźnica, zestaw pierwszy, strona lewa [m/s^2],
- przyspieszenie poprzeczne, maźnica, zestaw pierwszy, strona prawa [m/s^2],
- przyspieszenie poprzeczne, maźnica, zestaw pierwszy, strona lewa [m/s^2],
- przyspieszenie poprzeczne, rama pierwszego wózka nad pierwszym zestawem [m/s^2],
- przyspieszenie poprzeczne, rama pierwszego wózka nad drugim zestawem [m/s^2],
- prędkość jazdy wagonu [km/h].

Pomiar sił w czasie jazdy realizowany był pośrednio. Mierzono, przy pomocy układu tensometrów odkształcenia osi zestawów, a na ich podstawie wyliczano momenty gnące. Momenty te były następnie przeliczane na siły kontaktu układu koło szyna. Tak zmierzone siły były następnie wykorzystane do porównania z wartościami wyliczonymi przy pomocy testowanej metody. Zarejestrowano osiem zestawów danych odpowiadających ośmiu jazdom z różnymi prędkościami po torach o różnej jakości. Czas trwania każdej z rejestracji wynosił około 20 s. Częstotliwość próbkowania ustalono na 150 Hz. Zastosowano następujące parametry procedury identyfikacyjnej:

- liczba wymuszeń $na=2$,
- liczba odpowiedzi $ns=6$,
- rząd filtra $Nr=400$,
- liczba eksperymentów $nexp=8$,
- wyprzedzenie filtra $l=30$.

Podobnie jak dla modelu symulacyjnego rząd filtra N_r oraz jego wyprzedzenie l dobrano empirycznie. Rząd N_r zmieniano od 200 w górę. Wzrost rzędu filtra powodował znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Było to wynikiem konieczności pseudoinwersji macierzy Y . Dla zarejestrowanych danych wartością, przy której siły były identyfikowane zadowalająco było $N_r = 400$. Wartość wyprzedzenia l zmieniano od 10 do 100 co 10. Również w tym przypadku wartość 30 dawała najlepsze wyniki. Odwrócony filtr strukturalny zidentyfikowany dla danych z eksperymentu rzeczywistego z zebranymi powyżej parametrami został następnie wykorzystany do wyliczania sił na podstawie przebiegów przyspieszeń drgań. Na rysunku 5 przedstawiono porównanie przebiegu czasowego zmierzonej siły poprzecznej, działającej na styku koło-szyna w zestawie pierwszym po prawej stronie (kolor niebieski) i tej samej siły wyliczonej metodą odwróconego filtra strukturalnego (kolor czerwony). Na rysunku 6 przedstawiono analogiczne porównanie dla siły pionowej działającej na styku koło - szyna w zestawie pierwszym po prawej stronie. Jako kryterium porównawcze przebiegów zmierzonych i zidentyfikowanych przyjęto współczynnik korelacji liczony między nimi oraz wartość średniokwadratową. Otrzymane wyniki

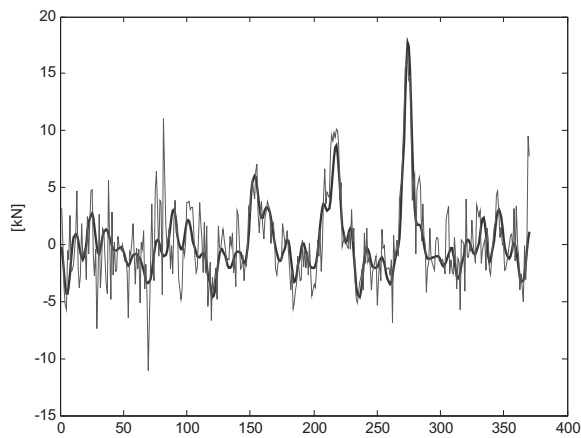
przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Zestawienie współczynników korelacji pomiędzy siłami zidentyfikowanymi i zmierzonymi

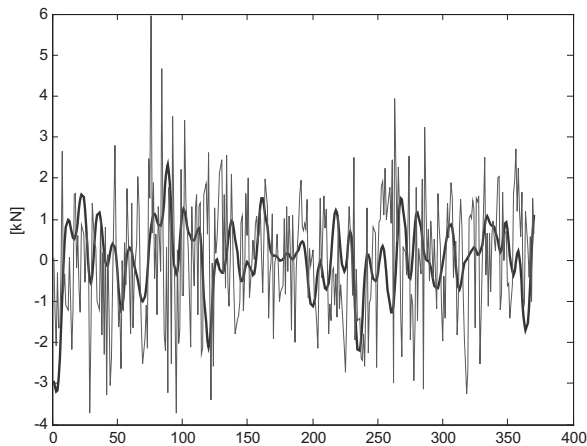
Siła	Wsp korelacji	
	bez filtracji	po filtracji
Siła poprzeczna prawa	0.71	0.83
Siła pionowa prawa	0.43	0.59

Tabela 3. Zestawienie średniokwadratowych wartości sił zmierzonych i zidentyfikowanych

Siła	Wartość średniokwadratowa		
	zmierzona	bez filtracji	po filtracji
poprzeczna prawa	0,0442	0,0963	0,0619
pionowa prawa	0,1561	0,2320	0,1876



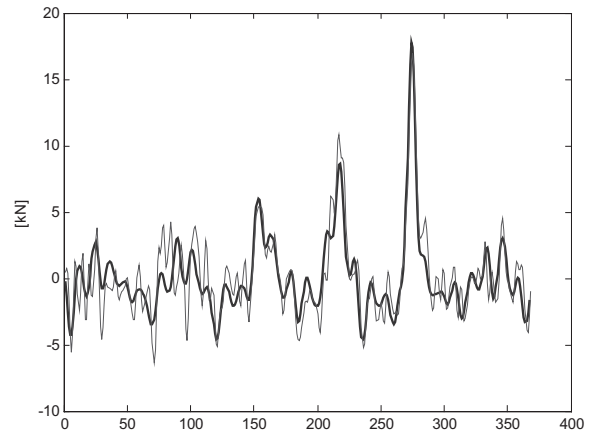
Rys. 5. Porównanie przebiegu czasowego siły poprzecznej zmierzonej (linia gruba) i zidentyfikowanej (linia cienka)



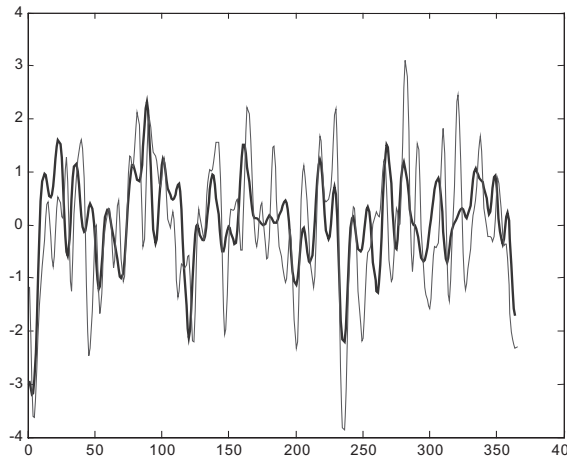
Rys. 6. Porównanie przebiegu czasowego siły pionowej zmierzonej (linia gruba) i zidentyfikowanej (linia cienka)

Porównanie przebiegów zmierzonych i zidentyfikowanych ujawnia ich podobieństwo. Przebiegi zidentyfikowane są jednak mocno zakłócone. Zakłócenia te pojawiają się

w częstotliwościach wyższych niż najwyższa składowa harmoniczna estymowanego sygnału. Dlatego zidentyfikowane przebiegi sił zostały następnie przefiltrowane filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości odcięcia równej 70 Hz. Zabieg ten znacznie poprawił podobieństwo estymowanych sił w stosunku do wartości sił zarejestrowanych podczas jazd wagonu. Na rysunkach 7 i 8 pokazano porównanie sił zmierzonych (linia gruba) i zidentyfikowanych, z filtracją dolnoprzepustową (linia cienka).



Rys. 7. Porównanie przebiegu czasowego siły poprzecznej zmierzonej (linia gruba) i zidentyfikowanej, przefiltrowanej (linia cienka)



Rys. 8. Porównanie przebiegu czasowego siły pionowej zmierzonej (linia gruba) i zidentyfikowanej, przefiltrowanej (linia cienka)

Wyniki porównania sił zmierzonych i zidentyfikowanych zawarte w tabelach 2 i 3 pokazują, że filtracja dolnoprzepustowa poprawiła jakość identyfikacji o około 15%.

5. UWAGI KOŃCOWE

Metoda odwróconego filtra strukturalnego została opracowana z myślą o identyfikacji sił działających w układach nieminimalnofazowych i niekolokacyjnych, czyli takich, gdzie model odwrotny jest niestabilny. Właśnie taki układ analizowany był w pracy. Przeprowadzona przy pomocy opisanej metody identyfikacja sił kontaktu w układzie koło - szyna przyniosła pozytywne rezultaty. Współczynniki korelacji liczone pomiędzy przebiegami zmierzonymi i zidentyfikowanymi oscylowały w granicach 0,6, przy czym lepiej identyfikowała się siła poprzeczna. Jakość estymacji poprawiono stosując filtrację dolnoprzepustową. Częstotliwość odcięcia filtra ustawiono nieco poniżej maksymalnej częstotliwości zawartej w sygnale zmierzonym.

Autor dziękuje Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie badań w ramach projektu badawczego nr 4T12C05226.

LITERATURA

- [1]. Uhl T., Współczesne trendy rozwojowe systemów monitorowania i diagnozowania maszyn, PAK, no.4, 1999.
- [2]. Stelzner D. A., Kammer D. C., Input force estimation using an inverse structural filter, Proceedings of 17th IMAC, Orlando, Florida, USA, 1999.
- [3]. Kiełbasiński A., Schwetlicki H., *Numeryczna algebra liniowa*, WNT Warszawa 1992.
- [4]. Gladwell M. L. G., *Inverse problems in vibration*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 2004.
- [5]. Zion L, Predicting fatigue loads using regression diagnostics, Proceedings of The American Helicopter Society Annual Forum, Washington D.C., 1994.
- [6]. Haas D.J., Milano J., Flitter L., Prediction of Helicopter Component Loads Using Neural Networks, Journal of the American Helicopter Society, no.1, 1995
- [7]. Góral G., Uhl T., Ocena obciążeń konstrukcji na podstawie pomiarów eksploatacyjnych, V Konferencja Naukowa - Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn, Wrocław – Szklarska Poręba 2001.
- [8]. Góral G., Bydoń S., Uhl T., Zastosowanie sieci neuronowych i logiki rozmytej do oceny obciążeń konstrukcji na podstawie pomiarów eksploatacyjnych, Machine Dynamics Problems, Vol. 26, No 2/3, 2002

Dr inż. Krzysztof
MENDROK

Jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania skupiają się na zagadnieniach dynamiki strukturalnej, a zwłaszcza na algorytmach analizy modalnej i analizy dróg rozchodzenia się energii drgań w konstrukcjach. Zajmuje się wykorzystaniem tych metod do wykrywania uszkodzeń. Jest autorem prac podejmujących tę tematykę

