



Wykorzystanie trajektorii fazowej jako informacji o stanie technicznym obiektu

WOJCIECH BATKO, LESZEK MAJKUT

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30

Streszczenie. W artykule podjęto próbę oceny przydatności trajektorii fazowych dla potrzeb diagnozowania zmian stanu przewodników zbrojenia szybowego kopalń. Omówiono procedurę porównawczą obrazów trajektorii fazowych odpowiedzi tego elementu konstrukcji szybu uzyskanego w teście impulsowym dla przewodnika bez uszkodzeń oraz z określonymi uszkodzeniami. Analizy przeprowadzono na wynikach symulacji numerycznej zachowań dynamicznych rozważanych elementów oraz na wynikach badań eksperymentalnych przewodnika bez uszkodzeń oraz uszkodzonego. W ich rezultacie zasygnalizowano celowość rozważenia szerszego wprowadzenia do procedur nadzoru diagnostycznego stanu elementów konstrukcji stalowych portretów fazowych analizowanych sygnałów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, monitoring, trajektorie fazowe

Symbole UKD: 539.4

1. Wstęp

Bezpieczne użytkowanie górniczych urządzeń wyciągowych, zapewniających transport ludzi i urobku z podziemnych wyrobisk górniczych, jest podstawowym zadaniem dla służb zajmujących się ich eksploatacją. Generuje potrzebę poszukiwania coraz doskonalszych metod ich diagnozowania [1]. Ważnym elementem określającym niezawodność ich funkcjonowania jest zbrojenie szybowe, które przenosi wymuszenia od naczyń wydobywczych o masach rzędu kilkudziesięciu ton, poruszających się nierzadko z prędkością kilkunastu metrów na sekundę. Wymóg ich prostoliniowego poruszania w szybach kopalń zapewnia odpowiednio zabudowany ciąg przewodników, od zrębu szybu do rżnięcia szybu, podpartych za

pomocą ciągu dźwigarów zabudowanych bezpośrednio do obmurza szybu lub za pośrednictwem wsporników.

W praktyce ruchowej wiedza dotycząca stanu technicznego zbrojenia szybowego jest pozyskiwana na bazie wyników trzech sposobów prowadzenia kontroli. *Pierwszy* z nich związany jest z wizualnym oglądem stanu zaawansowania korozyjnego. *Drugi* związany jest z nieniszczącymi badaniami ultradźwiękowymi, w których dokonywany jest punktowy pomiar grubości ścianek elementów konstrukcyjnych zbrojenia szybowego za pomocą defektoskopu ultradźwiękowego. *Trzeci* sprowadza się do pomiaru przyspieszeń naczyń wyciągowych lub pomiarów sił dynamicznych oddziaływania naczyń w czasie jazdy na zbrojenie szybowe. Towarzyszące tym rozwiązaniom niedoskonałości i ich ograniczenia są powodem ciągłych poszukiwań nowych rozwiązań diagnostycznych.

Rokującą metodą badawczą oceny stanu konstrukcji zbrojenia szybowego, w tym podstawowego jej elementu, jakim jest przewodnik, jest *metoda testu impulsowego* [5], polegająca na pobudzeniu konstrukcji do drgań, a następnie pomiarze odpowiedzi na wymuszenie. Wymaga ona jednak doboru właściwych estymat dla niestacjonarnych sygnału odpowiedzi na wymuszenie, dobrze odwzorowujących zmiany stanu kontrolowanych elementów. Rozwiązanie tego problemu w pracach [5, 6] było poszukiwane na bazie transformaty falkowej sygnału odpowiedzi, dla której zdefiniowano miarę funkcyjną zużycia konstrukcji wyrażoną widmem Fouriera składowej transformaty falkowej sygnałów odpowiedzi, odpowiedzialnej za przenoszenie głównej części energii sygnału. Rozwiązanie to, uzupełnione prototypem systemu diagnostycznego zbudowanego na platformie LabView, przeszło pozytywne testy w praktyce diagnostyki zbrojenia szybowego w jednej z kopalń rud miedzi.

Zaproponowane podejście pomimo wielu zalet jest obwarowane potrzebą realizacji szeregu złożonych analiz, które generują pewne ograniczenia jej wykorzystania jako metody inżynierskiej na obecnym etapie.

Niniejsza praca ukierunkowana jest na sprawdzenie przydatności w rozważanym zadaniu diagnostycznym wykorzystania rozwiązań teorii stateczności technicznej [8] do projektowania algorytmów diagnozujących zmiany stanu przewodników szybowych. W szczególności celem pracy było sprawdzenie związanego z tą koncepcją [2] problemu przydatności obserwacji zmian obrazów fazowych kontrolowanych sygnałów diagnostycznych. W proponowanej koncepcji trajektorie fazowe analizowanych sygnałów diagnostycznych [3, 4, 7] winny mieć walor użytecznego, prostego w obserwacji narzędzia kontrolnego, zabezpieczającego identyfikację procesu rozwoju uszkodzeń tych elementów konstrukcji zbrojenia szybowego. Ich obrazy są bowiem ściśle związane ze zmianami współczynników: mas, sprężystości, tłumienia wywołanych zmianami stanu kontrolowanych elementów.

Niezbędne analizy dla tak formułowanej drogi poszukiwań rozwiązań systemu monitorowania zmian nadzorowanych elementów zbrojenia szybowego są przedmiotem treści niniejszej pracy. Zostały one ukierunkowane na zbadanie

w eksperymentach numerycznych i laboratoryjnych zmian portretów fazowych przewodnika nowego i uszkodzonego, co pozwoliłoby je zakwalifikować do grupy ważnych i użytecznych symptomów diagnostycznych.

2. Opis obiektu badań i zaprogramowanych eksperymentów numerycznych oraz identyfikacyjnych badań laboratoryjnych

Ocenę przydatności portretów fazowych procesów opisujących zachowania dynamiczne elementów konstrukcji stalowych przeprowadzono w odniesieniu do konstrukcji zbrojenia szybowego, w tym zasadniczego jej elementu, jakim jest przewodnik. Wymaganiami zabezpieczającymi bezpieczną ich pracę są zapisy Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. nr 139 poz. 1169) wraz z załącznikami. W dokumencie tym zawarte są również warunki dla urządzeń wyciągowych, w tym także wytyczne określające dopuszczalny poziom zużycia zbrojenia szybowego. Zgodnie z § 460 tego dokumentu prawne elementy konstrukcji stalowych zbrojenia podlegają wymianie, jeżeli zużycie przekroczy wartość dopuszczalnego zużycia lub 50% pierwotnego wymiaru nominalnego określonego w dokumentacji technicznej. W praktyce eksploatacyjnej przyjęło się, że wskaźnikiem zużycia elementów stalowych zbrojenia jest grubość ścianki profilu. Wychodząc z tych uwarunkowań, zaprogramowano szereg badań analizujący przydatność trajektorii fazowych odpowiedzi impulsowej przewodnika szybowego do rozpoznawania zmian jego stanu. Objęły one zarówno badania laboratoryjne jak i numeryczne eksperymenty przeprowadzone na ich modelu dynamicznym.

Charakterystyka stanowiska badawczego

Przyjęte do badań laboratoryjnych w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH przewodniki kopalniane miały typową dla szybów kopalnianych długość $l = 3$ m. Zostały one wykonane z dwu zespawanych ze sobą ceowników typu 140 na całej długości. W trakcie badań dążono do zapewnienia porównywalnych warunków ich utwierdzeń. W tym celu przewodnik został obustronnie utwierdzony (zaciśnięty) pomiędzy dwoma płaskownikami o szerokości 10 cm.

Wizualizację wykorzystywanego stanowiska badawczego pokazano na rysunku 1.

Przedstawiony na powyższym zdjęciu jeden z przewodników jest przewodnikiem nieuszkodzonym, zaś drugi został uszkodzony sztucznie w sposób mechaniczny. Wprowadzonym do badań uszkodzeniem przewodnika było sfrezowanie obu ceowników na określoną grubość, która symulowała ubytki materiału na skutek

tarcia. W takich przypadkach granicznym, dopuszczalnym przez stosowne przepisy uszkodzeniem przewodnika jest zmniejszenie jego grubości g do wartości 3 mm. Wartość początkowa dla ceownika typu 140 wynosiła $g = 7$ mm.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

W badaniach laboratoryjnych dostępne były jedynie dwa „rodzaje” przewodników — nieuszkodzony (zdrowy) i uszkodzony w stopniu granicznym, dopuszczalnym przez rozporządzenie.

W harmonogramie badań uwzględniono również analizy numeryczne zachowań dynamicznych przewodników, w tym ich portretów fazowych o różnym stopniu uszkodzenia. Związane z nimi modele miały dostarczyć informacji o wrażliwości zmian trajektorii fazowych procesu odpowiedzi impulsowej przewodnika szybowego ze zmianą ich stanu, wyrażoną ubytkami materiałowym na ich przekroju.

Do realizacji numerycznych eksperymentów opracowano dwa modele przewodnika: model elementów skończonych, wykorzystywany do analizy jego zachowań drganiowych w dziedzinie częstotliwości, i uproszczony jednowymiarowy model ciągły umożliwiający analizę drgań przejściowych.

Model MES rozpatrywanego elementu konstrukcyjnego zbrojenia szybowego

Przeprowadzenie czynnych eksperymentów diagnostycznych dla różnych rodzajów i wielkości uszkodzeń przewodnika jest kosztowne i czasochłonne. Z tego też powodu zaproponowano przeprowadzenie eksperymentów numerycznych, które w szeregu rozważanych problemów diagnostycznych niosą istotną informację pomocną w realizacji rozpoznań diagnostycznych [9, 10, 11]. W tym celu zbudowano model geometryczny (MES) w programie FEMAP (6000 elementów i 9632 węzły), zaś jego analizę prowadzono w programie MSC NASTRAN.

Na rysunku 2 pokazano przyjętą do badań geometrię przewodnika i wyniki analiz przebiegu amplitudy drgań, wymuszonych monoharmonicznie.



Rys. 2. Model MES przewodnika

Przyjęty do analiz model przewodnika umożliwił wyliczenie amplitud i prędkości drgań wymuszonych harmonicznie. Na ich bazie wyznaczono trajektorie fazowe dla rozpatrywanych stanów przewodnika.

Model uproszczony zachowań dynamicznych przewodnika

W przypadku poszukiwania odpowiedzi dynamicznej przewodnika w stanie przejściowym (tzn. przy wymuszeniu siłą impulsową) można skorzystać ze znajomości macierzy: sztywności K , bezwładności M i tłumienia C określonych w metodzie elementów skończonych, przy wykorzystaniu postaci równań Lagrange'a drugiego rodzaju, scałkowanych dowolną metodą bezpośrednią. Taka procedura jest jednak nieefektywna z uwagi na dużą liczbę stopni swobody, która nie pozwala na bezpośrednie całkowanie równań ruchu (wymiary macierzy sztywności K , bezwładności M i tłumienia C to $3 \times 9632 = 28\,896$).

Dlatego też w celu wyznaczenia odpowiedzi dynamicznej w stanie przejściowym zaproponowano budowę modelu uproszczonego. Na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie częstości drgań własnych zidentyfikowano parametry jednowymiarowego modelu belki, tzn. wartość ilorazu masy i sztywności poprzecznej ($\rho A/EI$), co przy znajomości gęstości stali $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ oraz przekroju poprzecznego $A = 40,8 \text{ cm}^2$, pozwoliło określić parametr sztywności na zginanie — EI niezbędny w procedurze wyznaczenia macierzy tłumienia.

Dla belki obustronnie utwierdzonej wartości własne wyniosły: $\lambda_1 l = 4,7300$; $\lambda_2 l = 7,8532$, gdzie: $\lambda_i^4 = \omega_i^2 \rho A / EI$.

Wyniki identyfikacji parametrów belki nieuszkodzonej (zdrowej) i poddanej maksymalnemu uszkodzeniu pokazano w tabeli 1.

TABELA 1

Identyfikacja parametrów belki

Prowadnik nieuszkodzony (zdrowy)		Prowadnik uszkodzony	
częstość	$\rho A/EI$	częstość	$\rho A/EI$
pierwsza	$5,82 * 10^{-4}$	pierwsza	$7,46 * 10^{-4}$
druga	$6,28 * 10^{-4}$	druga	$8,15 * 10^{-4}$
średnia	$6,05 * 10^{-4}$	średnia	$7,81 * 10^{-4}$

Do wyznaczenia przebiegów drgań przyjęto wartości średnie parametrów. Takie parametry wykorzystano do budowy modelu belkowego (jednowymiarowego) prowadnika.

Belkę podzielono na 25 elementów skończonych i po wyznaczeniu macierzy: sztywności, bezwładności i tłumienia wyznaczono równania ruchu, które scałkowano metodą bezpośrednią.

3. Analiza zmian trajektorii fazowych prowadnika wywołana zmianami jego stanu

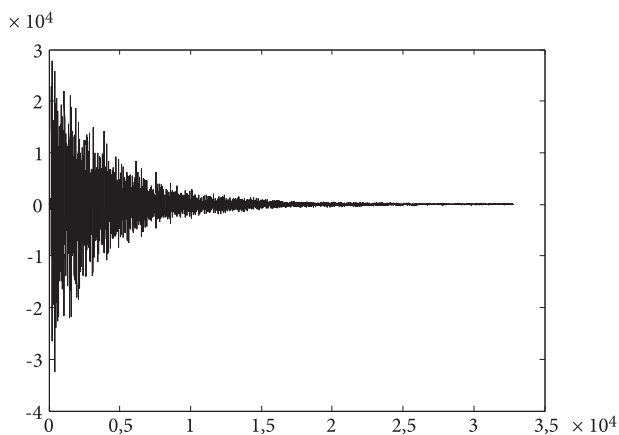
Obrazy trajektorii fazowych prowadnika w stanie ustalonym

Jedną z metod diagnostyki prowadników szybowych może być obserwacja trajektorii fazowych monitorowanego obiektu. Trajektorja fazowa to krzywa obrazująca zmiany prędkości drgań w funkcji przemieszczeń. W przypadku obiektu „liniowego” jest to elipsa, której oś wielka (pozioma) jest równa podwojonej amplitudzie drgań, a oś mała (pionowa) równa podwojonej prędkości drgań dowolnego punktu diagnozowanego obiektu przy wymuszeniu monoharmonicznym.

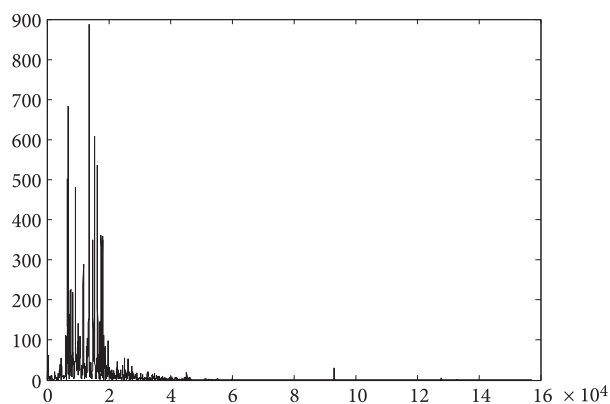
Poniżej opisano procedurę diagnostyczną pozwalającą wyznaczyć poszukiwaną trajektorię na podstawie pomiaru odpowiedzi impulsowej.

Na rysunku 3 pokazano przebieg wyznaczonej odpowiedzi impulsowej prowadnika.

W wyniku pomiaru zarejestrowano przyśpieszenie drgań w punkcie pomiarowym. W celu wyznaczenia amplitudy prędkości i amplitudy drgań wyznaczono transformatę Fouriera zarejestrowanych przyśpieszeń drgań. Przykładowy przebieg charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej przyśpieszeń drgań pokazano na rysunku 4 (transformata przebiegu z rysunku 3).



Rys. 3. Odpowiedź impulsowa przewodnika



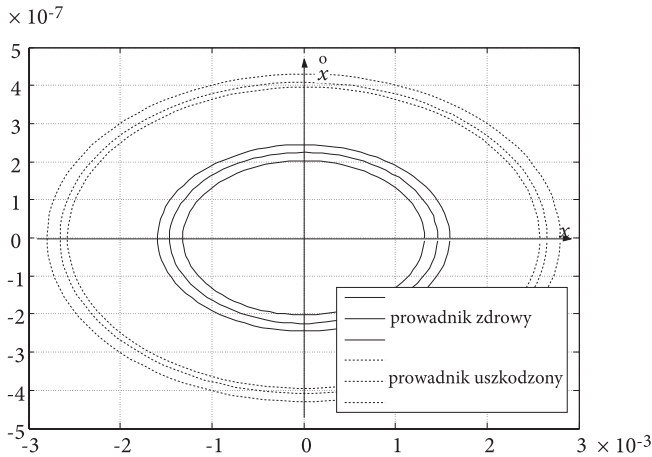
Rys. 4. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przyspieszeń drgań

Po wyznaczeniu takiej charakterystyki należy wybrać jedną wartość częstości i odpowiadającą jej wartość amplitudy przyspieszenia. Częstość ta może być dowolna, ale autorzy proponują, by była to częstość bliska, ale poniżej pierwszej częstości drgań własnych.

W analizowanym przypadku założono, że analizowany układ jest układem liniowym, dlatego też amplitudę prędkości drgań wyznaczono, dzieląc wartość amplitudy przyspieszenia przez wartość częstości, którą wybrano do analizy. Wartość amplitudy przemieszczeń wyznaczono, dzieląc wartość amplitudy prędkości przez wartość wybranej częstości (lub wartość amplitudy przyspieszeń przez kwadrat częstości). Po wyznaczeniu tych wartości wykreślenie trajektorii fazowej nie stanowi problemu.

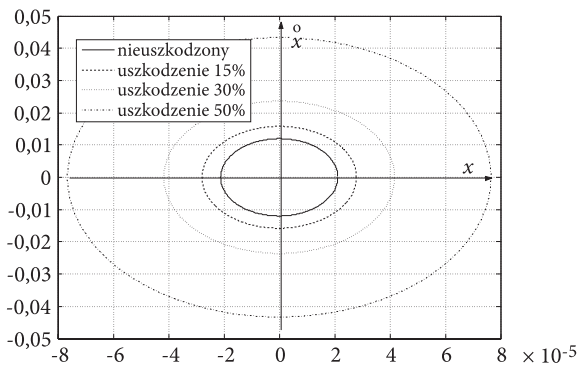
Na rysunku 5 pokazano przebieg trajektorii fazowych (otrzymanych w sposób opisany wyżej) zarejestrowanych w laboratorium. Linia ciągłą oznaczono trzy

wybrane trajektorie wyznaczone na przewodniku bez ubytków masowych, linią przerywaną trajektorie wyznaczone dla przewodnika zeszlifowanego. W przypadku obu przewodników krzywe największe i najmniejsze wynikają z odpowiednio maksymalnej i minimalnej wartości amplitud uzyskanych w serii 8 pomiarów, krzywe środkowe odpowiadają wartościom średnim serii eksperymentów.



Rys. 5. Przykładowe trajektorie fazowe

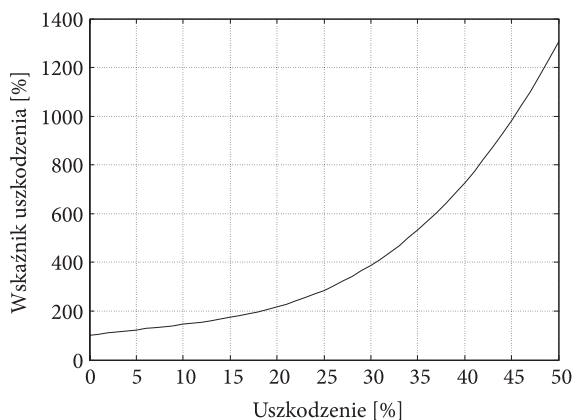
Znaczna różnica w przebiegu trajektorii fazowych jest bez wątpienia symptomem diagnostycznym uszkodzenia przewodnika, ale nie pozwala ocenić stanu przewodnika, a właściwie, co bardziej istotne określić możliwości dalszej jego eksploatacji. W tym celu wykorzystano model numeryczny przewodnika i na jego podstawie wyznaczono trajektorie fazowe przewodników o różnym stopniu uszkodzenia. Trajektorie pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Trajektorie fazowe przewodnika w funkcji uszkodzenia

Na rysunku 6 wyrażone w procentach uszkodzenie oznacza procentową zmianę grubości g przewodnika.

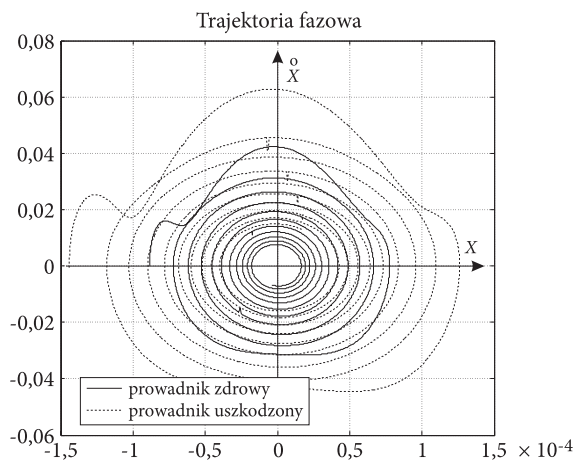
Jako wskaźnik uszkodzenia d autorzy wybrali względną zmianę pola powierzchni wewnątrz trajektorii. Przebieg proponowanego wskaźnika w funkcji uszkodzenia pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg proponowanego wskaźnika uszkodzenia

Analiza przebiegu trajektorii fazowej przewodnika w stanie przejściowym

W celu znalezienia odpowiedzi impulsowej przewodnika wymuszono go do drgań siłą impulsową w postaci połowy sinusoidy o czasie trwania 10^{-2} s. Jako metodę całkowania wybrano metodę różnic skończonych (metoda różnic centralnych).



Rys. 8. Trajektorie fazowe przewodników

Tak wyznaczone przebiegi wykorzystano do konstrukcji przebiegów trajektorii fazowych. Na rysunku 8 trajektorię wyznaczoną dla przewodnika nieuszkodzonego oznaczono linią ciągłą, trajektorię przewodnika uszkodzonego linią przerywaną.

Obserwacje trajektorii fazowych wskazują jednoznacznie, że mogą być one wykorzystane jako symptom diagnostyczny uszkodzenia.

Poszukiwanie liczbowych wskaźników uszkodzeń dla trajektorii fazowych jest przedmiotem dalszych prac autorów.

4. Uwagi końcowe

Wyniki badań symulacji numerycznych, jak i przeprowadzone badania eksperymentalne zmian trajektorii fazowych odpowiedzi elementu konstrukcji stalowej na wymuszenie impulsowe pokazały ich informacyjną przydatność do rozpoznawania zmian ich stanu. Mogą one stanowić wskazanie do poszukiwania szerszych wdrożeń w tym symptomów do diagnostyki i monitoringu zmian stanu różnych elementów konstrukcji stalowych. Na etapie ich klasyfikacji i powiązań z rozpoznawanymi uszkodzeniami możliwe jest zastosowanie różnych miar, w tym zaproponowanej w artykule miary w postaci pola powierzchni pod obrazami monitorowanych trajektorii.

Przykładowym elementem konstrukcyjnym poddanym analizom był rzeczywisty przewodnik kopalniany, którego uszkodzenie polegało na ubytkach materiałowych spowodowanych procesami tarciovymi mającymi miejsce w ruchu skipu w szybie kopalnianym.

Wyznaczone na podstawie modelu numerycznego trajektorie fazowe (rys. 5 i 6) pokazały ich dużą wrażliwość na uszkodzenie diagnozowanego elementu.

Dalsze prace autorów dotyczyć będą poszukiwania innych miar liczbowych dla obserwowanych zmian trajektorii fazowych, który pozwoliłyby na ich związanie z parametrami opisującymi stan zaawansowania uszkodzenia.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy: N N504 403835.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] D. ADAMS, *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*, Wiley, 2007.
- [2] W. BATKO, *Technical stability — a new modeling perspective for building solutions of monitoring systems for machine state*, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 151, 2007, 147-157.
- [3] W. BATKO, L. MAJKUT, *The phase trajectories as the new diagnostic discriminates of foundry machines and devices usability*, *Archives of Metallurgy and Materials*, 52, 2007, 389-394.

- [4] W. BATKO, L. MAJKUT, *Damage identification in prestressed structures using phase trajectories*, Diagnostyka, 44, 2007, 63-68.
- [5] W. BATKO, A. MIKULSKI, *A new method of pit-shaft reinforcement evaluation with the application of pulse test*, Problemy Eksploatacji, 63, 2006, 171-178.
- [6] W. BATKO, A. MIKULSKI, *Zastosowanie analizy falkowej-Fouriera w diagnostyce zbrojenia sztybowego*, Mat. Konferencji „Systemy ograniczające zagrożenia w procesach eksploatacji maszyn i urządzeń”, Zakopane, 2005, 43-49.
- [7] W. BATKO, Z. DĄBROWSKI, J. KICIŃSKI, *Nonlinear Effects In Technical Diagnostics*, Polish Academy of Scienc, Division IV of Technical Science, Warszawa–Radom, 2008.
- [8] W. BOGUSZ, *Stateczność techniczna*, PWN, Warszawa, 1972.
- [9] A. GRZĄDZIELA, *Dynamic problems of shafts*, Diagnostyka, 44, 2007, 5-10.
- [10] L. MAJKUT, *Wibroakustyczne symptomy pęknięcia belki*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 144, 2005, 165-181.
- [11] L. MAJKUT, *Vibration based damage detection using Laplace wavelet*, Diagnostyka, 49, 2009, 79-82.

W. BATKO, L. MAJKUT

Utilization of phase trajectories as information about technical condition of an object

Abstract. In the work, new approach to construction of monitoring system was showed. The proposed system is based on analysis of phase trajectories on example of the shaft steelwork system. The procedure of the trajectories comparison given by an impulse test was given. The analysis was performed on the numerical (FEM) model and experimental one. Both models have different severity of damage (reduction of stiffness due corrosion).

Analysis of the damage index associated with the phase trajectories, shows purposefulness in controlling the phase images of the tested vibration signals, giving them the value of a useful tool for fault development process identification in the diagnosed object.

Keywords: diagnostics, monitoring, phase trajectory

Universal Decimal Classification: 539.4

