

TRAJEKTORIA FAZOWA JAKO NARZĘDZIE OCENY PROCESÓW DEGRADACYJNYCH POMPY WYPOROWEJ

Wojciech BATKO*, Tomasz KORBIEL*, Jerzy STOJEK**

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki*, Katedra Automatyzacji Procesów**
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, email: batko@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule podjęto próbę oceny przydatności obrazów trajektorii fazowych dla procesu diagnozowania zmian stanu pomp wyporowych. Przedstawiono przesłanki realizacyjne podjętych badań i ich laboratoryjną realizację. Dotyczyły one eksperymentalnego sprawdzenia zmian obrazów trajektorii fazowych sprawnej pompy wyporowej - pracującej z stałą wydajnością, z pompą w której element tarcz rozrządowych pompy wielotłoczkowej uległ procesom degradacji. Wykazały one ich informacyjną przydatność do rozpoznawania zmian degradacyjnych w pompie wyporowej. Artykuł sygnalizuje celowość rozważenia wprowadzenia portretów fazowych monitorowanych sygnałów drganiowych do procedur nadzoru diagnostycznego stanu elementów konstrukcji pompy wyporowej.

Słowa kluczowe: trajektorie fazowe, pompa wyporowa, diagnostyka techniczna, hydraulika siłowa, analiza sygnału.

PHASE TRAJECTORY AS A TOOL FOR ASSESSING DEGRADATION PROCESSES IN A DISPLACEMENT PUMP

Summary

A test of assessing a suitability of the phase trajectory pattern for diagnostics of condition changes of displacement pumps - is undertaken in the presented paper. Accomplishment reasons of investigations together with their laboratory realizations are given. They concerned the experimental comparison of changes in the phase trajectory patterns of the efficient displacement pump - working with a constant output - with the multi-piston pump, in which an element of the gear disc plate was degraded. The performed tests confirmed the suitability of phase trajectories in the recognition of degradation changes in displacement pumps.

The paper signals the usefulness of considering the introduction of phase trajectory patterns of the monitored vibration signals into processes of the diagnostic inspection of the displacement pump structural elements.

Keywords: phase trajectories, displacement pump, technical diagnostics, forced hydraulics, signal analysis.

1. WSTĘP

Badania stanu degradacji elementów pompy wyporowej można przeprowadzać na wiele sposobów. Powszechnie stosowane jest pomiar podstawowych parametrów eksploatacyjnych pompy takich jak: pomiar ciśnienia wyjściowego, pomiar wydajności pompy, określenie współczynnika nierównomierności wydatku czy też oszacowanie chwilowej wartości sprawności ogólnej pompy. Innym sposobem rozpoznawania stanu degradacji pompy wyporowej jest zastosowanie tak zwanej diagnostyki wibracyjnej bazującej na pomiarze sygnałów drganiowych (przyspieszenia, prędkości, przemieszczenia) w miejscach charakterystycznych korpusu pompy. Na uzyskanych tą drogą przebiegach czasowych monitorowanych sygnałów drganiowych wyznaczane są estymaty punktowe lub funkcyjne, które mogą być określane zarówno

w dziedzinie czasowej, jak i częstotliwościowej. Wybór właściwych związany jest z analizą wrażliwości, czyli ocenami zmian degradacyjnych wywołanych nieskończenie małymi zmianami wybranego symptomu. Istotnym warunkiem tej drogi postępowania jest związany z nią wymóg małej wrażliwości wyróżnionego symptomu na możliwe zakłócenia wymuszeń stanów ustalonych diagnozowanego obiektu, najczęściej oscylujące w granicach błędu wartości wejściowej. Przykładem takim może być wartość prędkości obrotowej wału wyjściowego dowolnej maszyny wirnikowej, która oscyluje wokół założonej wartości. Obecność w procesach rozpoznania diagnostycznych zakłóceń; związanych z dopuszczalnymi zaburzeniami, na które składają się: dopuszczalne błędy parametrów struktury diagnozowanych obiektów, zaburzenia wymuszające działające na ich wejściach, jak i błędy powstające w systemie pomiarowym; jest przesłanka

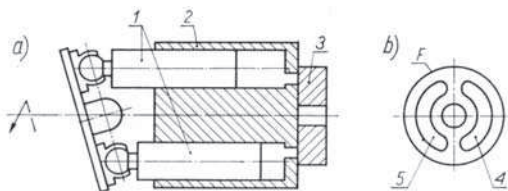
dla poszukiwań nowych symptomów diagnostycznych, o lepszej jakości odwzorowania relacji degradacyjnych w diagnozowanym obiekcie na podstawie odpowiednio zdefiniowanych miar ich zmienności. Prace w tym zakresie prowadzą do odkrywania i definiowania różnych relacji diagnostycznych, na bazie których budowane są systemy monitorujące zmiany stanu diagnozowanego obiektu i stanowią podstawę do wnioskowania o jego stanie.

W artykule zaprezentowano badania nad przydatnością obrazów trajektorii fazowych dla procesu rozpoznawania zmiany stanu wybranych elementów pomp waporowych. Mają one odniesienia do idei budowy systemów monitorujących bazującej na teorii stateczności technicznej [1], [2]. Zgodnie z jej ideą, trajektorie fazowe analizowanych sygnałów diagnostycznych stanowią element wykonawczy budowy systemu monitorującego. Mają walor użytecznego, prostego w obserwacji narzędzia kontrolnego, odwzorowującego oddziaływanie dynamiczne występujące w diagnozowanych maszynach, określone prawami fizyki opisujących ich funkcjonowanie.

Weryfikacja tej tezy w odniesieniu do oceny degradacji elementów pomp waporowych jest przedmiotem badań przedstawionych w artykule. Ich ilustracją jest opis czynnego eksperymentu diagnostycznego dotyczącego oceny procesu degradacji płaskiej tarczy rozrządowej wielotłoczkowej pompy waporowej o stałej wydajności z wykorzystaniem obserwacji zmian obrazów fazowych sygnałów drganiowych poddanych kontroli.

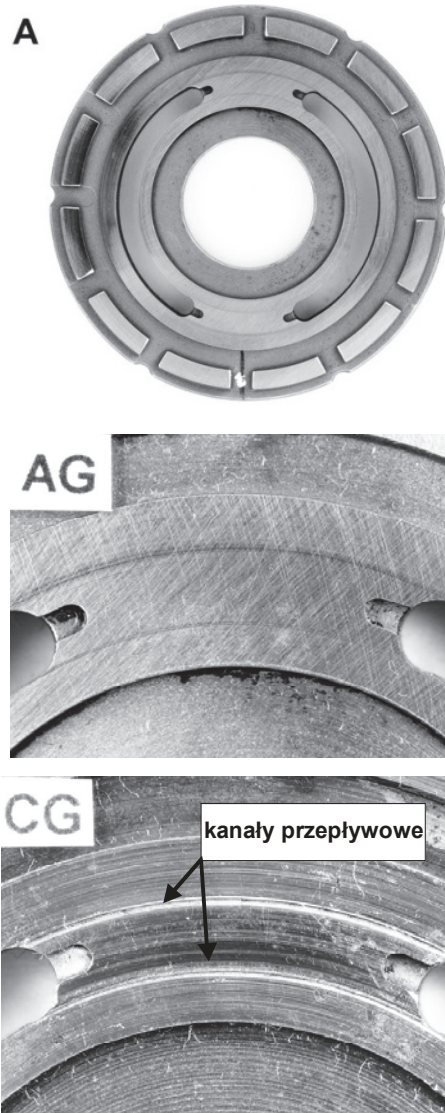
2. OBIEKT BADAŃ

W hydraulicznej pompie tłokowej rozdzielanie cieczy roboczej do i od cylindrów wirnika odbywa się na ogół za pomocą nieruchomej płaskiej tarczy rozdzielczej (rozrządem pompy), prostopadłej do osi obrotu wału pompy (rys. 1). Tarcza ta posiada otwory o kształcie nerek łączące cylindry z objętościami niskiego i wysokiego ciśnienia. Czoło wirnika współpracuje z tarczą rozdzielczą ślizgając się po jej powierzchni podczas ruchu obrotowego.



Rys. 1. Uproszczony schemat pompy wielotłoczkowej osiowej: a) przekrój poprzeczny, b) widok tarczy rozdzielczej (rozrządu pompy), 1. tłoczek, 2. wirnik, 3. tarcza rozdzielcza, 4. otwór ssawny, 5. otwór tłoczny

Powierzchnia styku tych elementów narażona jest na zużycie, a nawet niebezpieczeństwo zatarcia spowodowane min. zanikiem filmu olejowego. Wypracowanie tarcz rozrządowych związane jest z pojawianiem się mikro-kanalów przepływowych pomiędzy otworem ssawnym pompy a otworem tłocznym na powierzchniach stref przejściowych tarczy (tzw. mostków) (rys. 2). Powstałe kanały powodują przepływ czynnika roboczego co prowadzi do braku szczelności między strefą ssawną i tłoczną pompy, obniżenia jej sprawności wolumetrycznej oraz ciśnienia eksploatacji.



Rys. 2. Widok tarczy rozrządowej wraz z strefami przejściowymi: A) ogólny widok tarczy, AG) strefa przejściowa tarczy sprawnej, CG) strefa przejściowa tarczy wypracowanej

Rozwój wypracowania tarczy rozrządowej, związany z powiększeniem geometrii kanałów przepływowych w przeprowadzonych badaniach zamodelowano wykonując nacięcia kanałów przepływowych na powierzchniach tarcz rozrządowych o głębokościach odpowiednio: 0.01 mm (rozrząd typu B) i 0.05 mm (rozrząd typu C).

3. OPIS METODY TRAJEKTORII FAZOWYCH

Wykrycie wstępnej fazy uszkodzenia poszczególnych elementów pompy (tarczy rozrządowej, wirnika czy tarczy wychylnej), powinno być niezależne od zakłóceń związanych z pracą pozostałych elementów składowych. Jednakże niemożliwe jest wyodrębnienie z dostępnego sygnału diagnostycznego składowych informacyjnych związanych z konkretnym jej elementem (np. tarczą rozrządczą). Zatem mamy do czynienia z maszyną, urządzeniem, elementem pracującym w otoczeniu innych maszyn, urządzeń czy elementów. Oddziaływania otoczenia na badany element, niezależnie od charakteru zjawisk mogą zostać opisane funkcjami zwanymi dalej zaburzeniami stale działającymi. Tak sformułowane zagadnienie w literaturze fachowej opisane jest jako stateczność w sensie Lapunowa oraz stateczność techniczna [2].

Rozpatrując konkretny element pompy wielotłoczkowej, na który działają siły pochodzące od innych elementów pompy lub obiektów układu hydraulicznego, równanie ruchu badanego elementu można sformułować następująco:

$$\ddot{x} = f(\dot{x}, x, t) \quad (1)$$

gdzie: \ddot{x} - przyspieszenie elementu badanego,
 \dot{x} - prędkość badanego elementu,
 x - przemieszczenie badanego elementu,
 t - czas.

Równanie to posiada jednoznaczne rozwiązania określone przez warunki początkowe. Uwzględniając oddziaływanie na badany element otoczenia opisanego w postaci równania zaburzeń „R” stale działających, otrzymujemy:

$$\ddot{x} = f(\dot{x}, x, t) + R(\dot{x}, x, t) \quad (2)$$

Rozwiązanie powyższego równania przeprowadza się poprzez podstawienie i redukcję jego rzędu otrzymując:

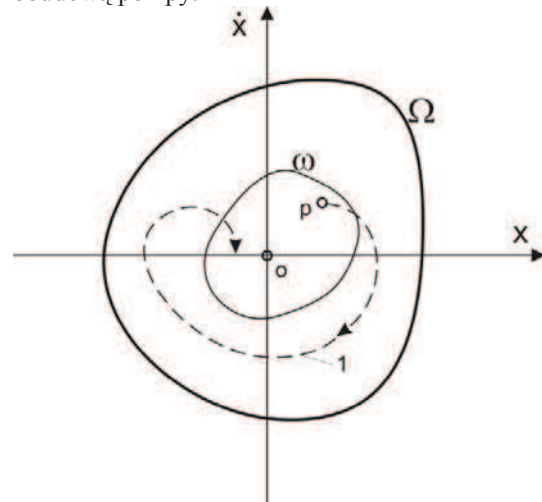
$$\dot{x} = f(x, t) + R(x, t) \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę to, iż funkcja $R(x, t)$ uwzględnia dopuszczalne odchyłki od stanu ustalonego oraz zmianę warunków początkowych i przewidziane zaburzenia zewnętrzne i wewnętrzne działające na rozpatrywany element (obiekt, układ) o charakterze stochastycznym oraz periodycznym można określić stan dynamiczny obiektu poprzez pojęcie stateczności technicznej [2].

Proponowane podejście nie wymaga pełnej identyfikacji struktury układu, czyli ścisłego określenia funkcji $f(x, t)$, skupiając się jedynie na

rozwiązaniach równania (3). Skutecznym narzędziem do badania rozwiązań układów równań różniczkowych jest analiza trajektorii w przestrzeni fazowej. Z definicji układu statecznego technicznie wynika, że jeżeli dla warunków początkowych zawartych w obszarze ω przestrzeni fazowej, rozwiązania układu (3) pozostają w obszarze Ω , to badany element (układ, obiekt) jest stateczny technicznie (rys. 3).

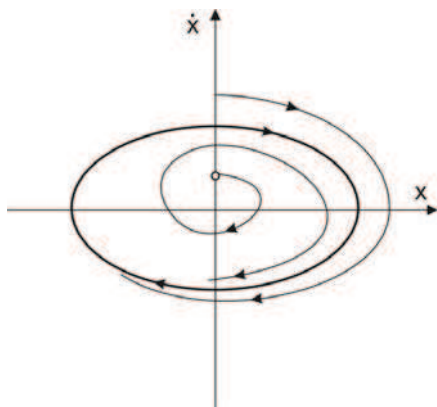
Badając rzeczywisty obiekt jakim jest pompa wielotłoczkowa mamy do czynienia z wieloma jej elementami składowymi oddziaływującymi między sobą. Stateczność układu możemy określić poprzez pomiar parametru ruchu poszczególnych elementów. Fizycznie dostępne są tylko elementy związane z obudową pompy.



Rys. 3. Ilustracja pojęcia stateczności technicznej: 1 – trajektoria fazowa, Ω - obszar dopuszczalnych odchyłeń od stanu równowagi, ω – obszar warunków początkowych, p – stan początkowy układu po wytrąceniu, ze stanu równowagi „o”

Parametry drganiowe obudowy są powiązane z ruchem elementów składowych pompy. Zatem należy wybrać odpowiednie miejsce na obudowie, geometryczne powiązane z badanymi elementami pompy. Pomiary przemieszczenia i prędkości drgań wybranego punktu odniesione do przestrzeni fazowej będą charakteryzowały klasę rozwiązań równań cząstkowych związanych z poszczególnymi elementami pompy. Problem określenia obszaru Ω , można rozwiązać na kilka sposobów. W przypadku pomp wielotłoczkowych preferowanym podejściem będzie określenie obszaru Ω na podstawie analizy dynamiki pompy niewypracowanej. Badanie trajektorii fazowej dla pompy sprawnej z uwzględnieniem zakłóceń zewnętrznych pozwoli na określenie tego obszaru. W przypadku analizy drgań korpusów pomp wporowych mamy odczytanie, że zjawiskiem drgań nietłumionych wokół położenia równowagi. Obrazem przestrzeni fazowej dla takiego obiektu będzie wówczas płaszczyzna fazowa z tzw. cyklem granicznym. Występuje ona wówczas gdy trajektoria fazowa nie

dochodzi do punktu równowagi lecz przechodzi w krzywą zamkniętą otaczającą ten punkt (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowa trajektoria fazowa z cyklem granicznym

Obserwacja zmiany obszaru zawierającego trajektorie posłuży stworzeniu symptomu diagnostycznego, a następnie doprowadzi do postawienia hipotezy diagnostycznej. Z rozważań teoretycznych [1] wynika, że nie wiadomo jak obszar Ω uznany jako statyczny technicznie będzie się zmieniał w wyniku degradacji badanego elementu. W przestrzeni fazowej ujęta jest informacja o zmagazynowanej energii (sumie energii kinetycznej i potencjalnej) badanego obiektu. Z modelu maszyny jako procesora energii [3], wynika, że w przypadku wzrostu sumarycznej energii badanego elementu pole powierzchni obszaru Ω będzie się zwiększać. Ta przesłanka umożliwi identyfikację struktury energetycznej badanego obiektu. Obserwując elementy związane z procesem roboczym pompy (wytworzenie wydatku Q) w przypadku spadku sprawności energetycznej można spodziewać się zmniejszenia obszaru Ω . Dla elementów, gdzie nastąpi destrukcyjne sprzężenie energii dyssypowanej obszar ten powinien się zwiększać.

4. CZYNNY EKSPERYMENT DIAGNOSTYCZNY

Badania stopnia wypracowania tarcz rozrządnych pomp wielotłoczkowych zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym, którego głównymi elementami była pompa wielotłoczkowa o stałej wydajności wraz z zamontowanymi przetwornikami pomiarowymi (wibracji, natężenia przepływu ciśnienia statycznego i dynamicznego). Widok układu badawczego pomp wraz z zamontowanymi przetwornikami wibracji przedstawiono na rys. 5.

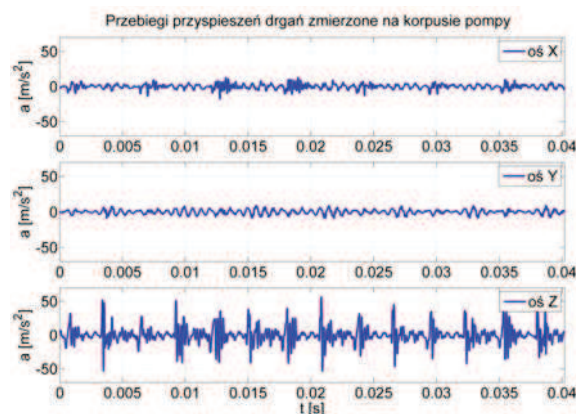
Umieszczając w pompie tarcze rozrządne o różnym stopniu wypracowania dokonywano pomiaru wibracji jej korpusu w miejscu bezpośredniego ich zamontowania. Do pomiaru wibracji użyto piezoelektrycznych przetworników przyspieszenia, usytuowanych w trzech osiach

pomiarowych X, Y oraz Z. W pomiarach wykorzystano 16 bitową kartę pomiarową współpracującą z układem kondycjonującym i programowaną, za pomocą pakietu LabView. Przykładowy przebieg przyspieszeń wibracji przypadający na jeden pełny obrót wału pompy zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 5. Widok badanej pompy w na stanowisku badawczym

Zmierzone sygnały zostały archiwizowane na dysku twardym komputera poczym poddano je analizie numerycznej.

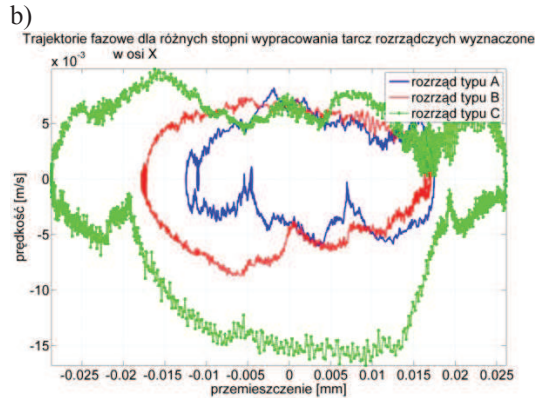
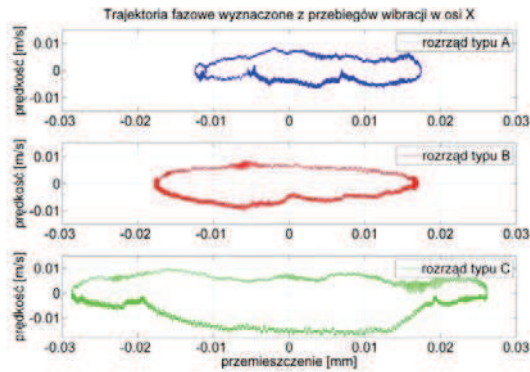


Rys. 6. Przebiegi przyspieszeń drgań korpusu pompy mierzone w osi X, Y, Z

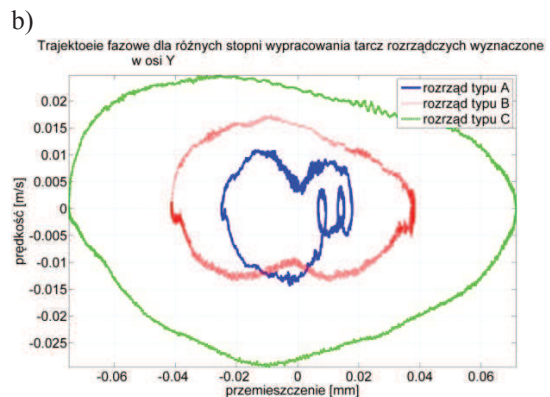
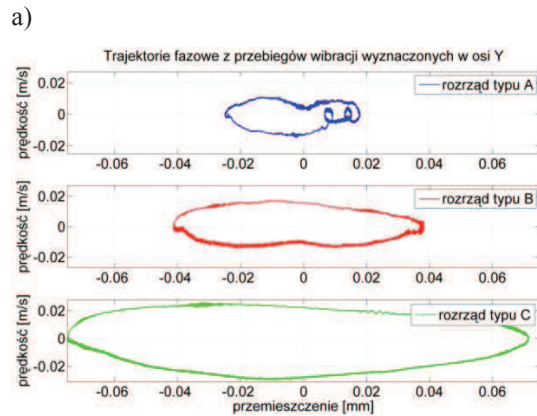
5. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Prowadzone badania polegały na wyznaczeniu trajektorii w przestrzeni fazowej dla pompy z niewypracowaną tarczą rozrządczą (typ A) oraz pomp wyposażonych w wypracowane tarcze rozrządne (typu B i C). Metodyka wyznaczania trajektorii fazowych oparta była o całkowanie numeryczne przebiegów przyspieszeń drgań korpusu pompy w jej punktach charakterystycznych. Uzyskane wykresy trajektorii fazowych wyznaczone w trzech osiach pomiarowych przedstawiono na rysunkach poniżej.

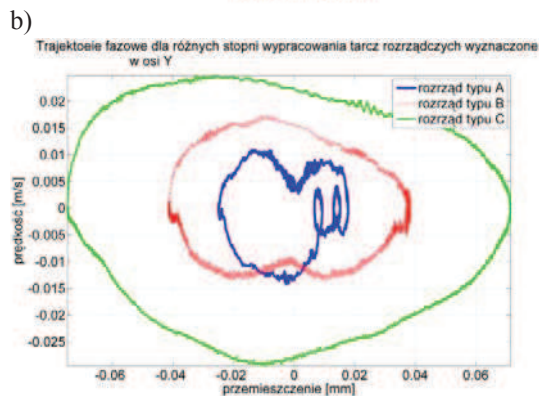
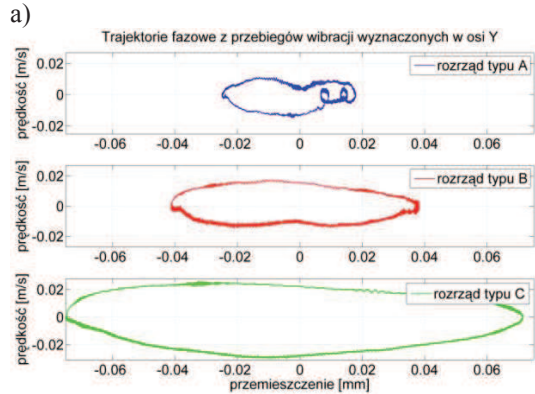
a)



Rys. 7. Trajektorie fazowe wyznaczone z przebiegów vibracji zmierzonych w osi X: a) przebiegi indywidualnych trajektorii dla tarczy typu A, B, C, b) zestawienie porównawcze



Rys. 9. Trajektorie fazowe wyznaczone z przebiegów vibracji zmierzonych w osi Y: a) przebiegi indywidualnych trajektorii, dla tarczy typu A, B, C, b) zestawienie porównawcze



Rys. 8. Trajektorie fazowe wyznaczone z przebiegów vibracji zmierzonych w osi Y: a) przebiegi indywidualnych trajektorii, dla tarczy typu A, B, C, b) zestawienie porównawcze

6. UWAGI KOŃCOWE

Wyniki badań czynnego eksperymentu diagnostycznego pompy waporowej z tarczą rozrządczą (typ A) w dobrym stanie technicznym oraz pomp wyposażonych w tarcze rozrządzące (typu B i C) uszkodzone, którymi symulowano proces ich degradacji; poprzez pogłębianie rowków przepływowych w strefie przejściowej między kanałem ssawnym tarczy, a jej kanałem tłocznym; wykazały dużą wrażliwość trajektorii fazowych; na wszystkich trzech osiach pomiarowych; na uszkodzenie diagnozowanego elementu.

Odwołując się do modelu energetycznego maszyny można wnioskować, że w obszarze pomiaru drgań w miejscu bezpośredniego zamontowania tarczy rozrządczej, następuje wzrost energii korpusu pompy spowodowanej rozpraszaniem całkowitej energii pary kinematycznej, jaką jest „tarcza rozrządczą-powierzchnia czołowa wirnika pompy”. Szczególnie dobrze ilustruje tę zależność obraz trajektorii uzyskany z przetworników zamontowanych w osi X i Y, w bezpośrednim sąsiedztwie rozrządu pompy. Mniej wyraźnie, ale równie poprawnie można rozpoznawać degradację tarczy, poprzez obserwacje zmian trajektorii przyporządkowanej lokalizacji pomiaru sygnałów drganiowych z przetwornika zamontowanego na powierzchni tarczy wychylnej

pompy na kierunku osi Z, co wynikało z braku możliwości pomiaru drgań w bezpośrednim sąsiedztwie badanego rozrządu. Sygnał pomiarowy z tego przetwornika, będąc reprezentantem sygnałów od elementów składowych pompy (min. tarczy wychylnej, wirnika wraz z łożyskowaniem), miał tym samym ograniczoną selektywność do pozyskania właściwej informacji diagnostycznej. Biorąc pod uwagę przytoczone rezultaty można stwierdzić, że trajektorie fazowe monitorowanych sygnałów drganiowych na pompie wyporowej mogą być dobrym wskazaniem do poszukiwania szerszych wdrożeń tych symptomów do diagnostyki i monitoringu zmian stanu różnych jej elementów. Na etapie ich klasyfikacji i powiązań z stopniem rozpoznawanych uszkodzeń możliwe jest zastosowanie różny miar dla opisu ich zmian.

Dalsze prace autorów ukierunkowane będą na rozwiązanie tego problemu, tj. przyporządkowania określonych miar liczbowych dla obserwowanych zmian trajektorii fazowych, który pozwoliłby na ich związanie z parametrami opisującymi stan degradacji analizowanego uszkodzenia.

LITERATURA

- [1] Batko W.: *Nowe idee w budowie systemów monitorujących*. Przegląd Mechaniczny, nr 11/2007, str. 43-47.
- [2] Batko W.: *Technical stability – a new modeling perspective for building solutions of monitoring systems for machine state*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, z.3 (151), Vol.42, s.147-157, 2007.
- [3] Bogusz W.: *Stateczność techniczna*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1972.
- [4] Cempel C. *Diagnostyka maszyn*. Wyd. Międzyresortowe Centrum Naukowe, Radom 1992.
- [5] Stryczek S.: *Napęd hydrostatyczny*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1995.
- [6] Żółkiewski B., Cempel C.: *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Praca zbiorowa. Wydawnictwo PTDT, Radom 2004.



Prof. dr hab. inż. **Wojciech BATKO**, prof. zw. AGH ur. 1949. Kierownik Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH, autor i współautor ponad 230 publikacji, w tym 12 książkowych. Zajmuje się zagadnieniami dynamiki i wibroakustyki maszyn oraz zagadnieniami diagnostyki technicznej



Dr inż. **Tomasz KORBIEL** jest adiunktem w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH. Jego zainteresowania związane są z diagnostyką techniczną oraz systemami monitorującymi w technice



Dr inż. **Jerzy STOJEK** jest pracownikiem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. W Katedrze Automatykacji Procesów zajmuje się zagadnieniami napędu i sterowania hydraulicznego ich modelowaniem i symulacją