



Modelowanie utraty stabilności układu wirnik–łożyska przy stochastycznej zmienności danych wejściowych

PAWEŁ PIETKIEWICZ

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Nauk Technicznych,
10-719 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 2

Streszczenie. Artykuł zawiera wybrane wyniki obliczeń potwierdzających możliwość symulacji utraty stabilności przez układ wirnik–łożyska obciążonego siłą poprzeczną zmienną w czasie. Opracowane dotąd modele nie były wykorzystywane do tego typu prób. Przedstawione wyniki obliczeń dotyczą dwóch wariantów obciążenia wirnika.

Słowa kluczowe: wirnik, niepewność danych, trajektoria, drgania, układ wirnik–łożyska

Symbole UKD: 62-13

Wprowadzenie

Zjawiska związane z utratą stabilności przez układ wirnik–łożyska są ciekawym i jak dotąd nie do końca poznanym aspektem pracy maszyn wirnikowych posadowionych na łożyskach ślizgowych. O ile podstawy teoretyczne występowania faktu utraty stabilności oraz jej przyczyn są dobrze opisane, o tyle dokładne mechanizmy stanów przejściowych, kiedy tzw. małe drgania czopów wirników przechodzą w drgania duże, będące konsekwencją utraty stabilności przez układ nie są znane [1, 2]. Z powodu ogromnego niebezpieczeństwa w przypadku utraty stabilności rzeczywistych obiektów, ograniczone są także możliwości przeprowadzenia odpowiedniej liczby eksperymentów, które pomogłyby dokładnie rozpoznać strukturę zjawisk przejściowych.

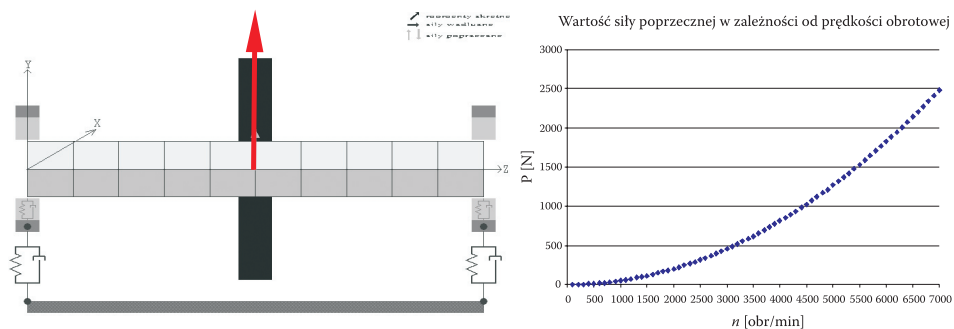
Istnieje wiele modeli numerycznych opisujących pracę maszyn wirnikowych opartych na łożyskach ślizgowych, które przez ich ciągłe doskonalenie coraz werniej odzwierciedlają pracę wirników w zakresach poznanych i zbadanych o wiele

dokładniej niż zakres pracy niestabilnej. Jednym z nich jest model opracowany i wciąż rozwijany w Instytucie Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku. Pozwala on analizować między innymi formy drgań giętno-wzdłużno-skrętnych z imperfekcjami typu pęknięcia wału i rozosiowania elementów oraz z zewnętrznymi obciążeniami w formie dodatkowych (poza niewyważeniami) sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skrętnych [1, 3, 4, 5].

Niniejszy artykuł jest wynikiem prób symulacji rozwoju drań połówkowych oraz ich przejścia w drgania rezonansowe [1], przy jednoczesnym uwzględnieniu stochastycznej zmienności danych dotyczących obciążenia zewnętrznego w postaci siły poprzecznej.

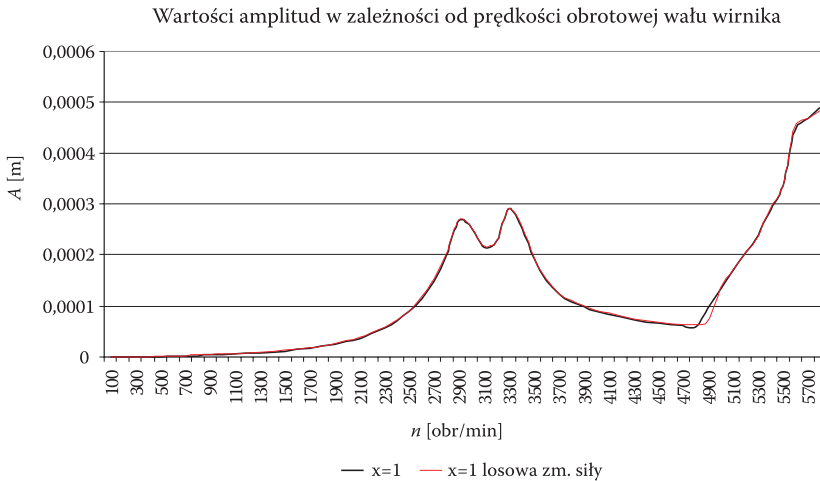
Obiekt i zakres badań

Obiektem badań jest wirnik dwupodporowy, podparty na łożyskach ślizgowych poprzecznych, w połowie długości którego umieszczono masę skupioną w postaci dysku. W połowie długości wału wirnika umiejscowiono także siłę poprzeczną, obciążającą wirnik, której wartość nominalna zmienia się wraz z prędkością obrotową wirnika jak na rysunku 1. Rozpatrywano dwa warianty symulacji: siła poprzeczna, obciążająca wirnik, wiruje z prędkością obrotową równą prędkości wirowania wału oraz z prędkością obrotową dwukrotnie wyższą od prędkości obrotowej wirnika. Dodatkowo wartość siły ulega losowemu odchyleniu w czasie, w zakresie $\pm 20\%$ swej nominalnej wartości wynikającej z rysunku 1 [2, 3, 4].



Rys. 1. Model analizowanego wirnika oraz zależność siły poprzecznej obciążającej wirnik od jego prędkości obrotowej

Na rysunku 2 przedstawiono wykres amplitud drgań poprzecznych osi wirnika w przekroju dysku w zależności od prędkości obrotowej wirnika w wariacie zgodnej wartości prędkości wirowania wału i siły poprzecznej. Zakres badań obejmuje prędkości obrotowe od ok. 4700 obr/min, a więc powyżej prędkości rezonansowych.



Rys. 2. Amplitudy drgań osi wirnika w funkcji jego prędkości obrotowej

Wyniki obliczeń

Na rysunku 3 zamieszczono trajektorie osi wału wirnika oraz składowe częstotliwości drgań w kierunku poprzecznym odpowiadające kolejno prędkościom obrotowym wirnika: a) 3650 b) 4775, c) 4776, d) 4790, e) 4900, f) 5400, g) 6450 obr/min. Wybrane w ten sposób wyniki obliczeń pokazują rozwój form drgań związanych z utratą stabilności przez układ. Obliczeń dokonywano, przyjmując gęstą podziałkę zmienności prędkości obrotowych, aby zaobserwować dokładnie przebieg rozwoju poszczególnych form drgań.

Pierwsza faza polega na powolnym wyodrębnieniu się z trajektorii drugiej elipsy, po której następuje ruch osi wirnika. Proces ten widać na rysunkach 3a i b. Wraz z dalszym wzrostem prędkości obrotowej, zmniejsza się jedna z wyodrębnionych wcześniej elips. Dokładna analiza trajektorii pozwala stwierdzić, że prędkość precesji wirnika spada dwukrotnie, a analiza fft pozwala wyodrębnić drugą, dominującą częstotliwość drgań, równą ok. połowie drgań harmonicznymi.

Dalszemu wzrostowi prędkości obrotowej towarzyszy wzrost amplitudy drgań połówkowych, przy czym amplituda drgań z częstotliwością $h/2$ (gdzie h = częstotliwość harmoniczna) zaczyna przewyższać amplitudę drgań harmonicznymi (rys. 3d). Wraz z dalszym wzrostem prędkości obrotowej wirnika, pętla na trajektorii osi wirnika, stworzona z wcześniej wyodrębnionej elipsy zaczyna zanikać (rys. 3e), jednak wysoka amplituda drgań z częstotliwością odpowiadającą połowie częstotliwości drgań harmonicznymi, wynikających z prędkości obrotowej, utrzymuje się.

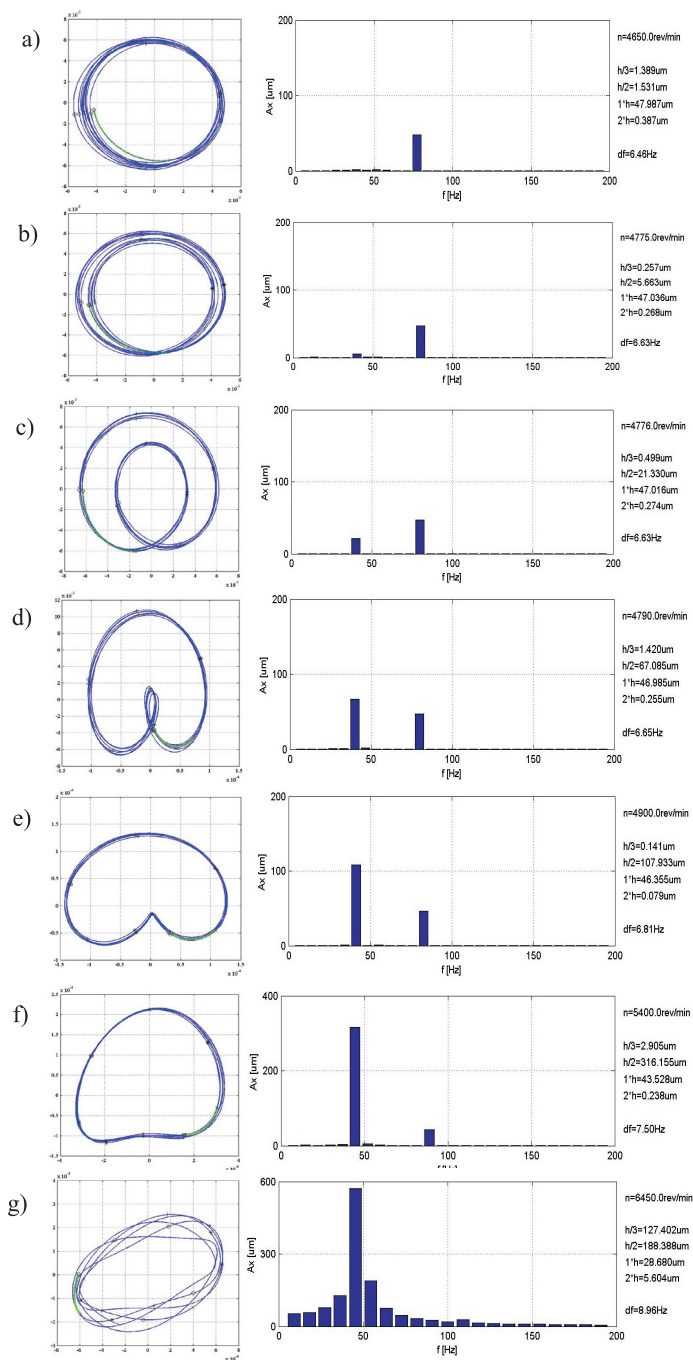
Przy prędkości obrotowej ok. 5400 obr/min trajektoria wraca do pojedynczej formy, zbliżonej kształtem do elipsy (rys. 3f), jednak prędkość precesji nie zmienia

się i odpowiada ok. połowie prędkości wirowania wirnika. Amplituda drgań zaczyna gwałtownie wzrastać, przy czym wzrasta przewaga drgań z częstością ok. $h/2$ nad częstością harmoniczną. Opisywane dotąd zjawisko jest konsekwencją występowania tzw. wirów olejowych, prowadzących do powstawania drgań samowzbudnych spowodowanych siłami hydrodynamicznymi [1]. Obserwując wyniki analizy fft drgań analizowanego układu, można zauważyć, że częstości drgań wynikających z powstawania wirów olejowych w łożyskach, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika zbliżają się do częstości drgań własnych, która dla tego układu wynosi ok. 50 Hz. Fakt ten sprzyja wystąpieniu drgań samowzbudnych o bardzo wysokiej częstości, zwanych drganiami rezonansowymi [1]. W łożyskach, na których podparty jest wirnik, drgania ograniczone są tylko i wyłącznie wielkością luzu. Obraz takich drgań pokazuje rysunek 3 g. Z prawej strony widać rozkład częstości drgań oraz ich amplitudy. Wartość amplitud jest znacznie wyższa od obserwowanych w poprzednich przypadkach. Obliczenia pozwoliły również potwierdzić, że mimo dalszego wzrostu prędkości obrotowej wirnika, prędkość precesji nie ulega zmianie. Warto zauważyć, że wyniki obliczeń wykonanych przy uwzględnieniu stochastycznie zmiennej wartości siły poprzecznej są w wysokim stopniu zgodne z wynikami otrzymanymi, jeśli przyjmuje się wartość siły poprzecznej wynikającej dokładnie z zależności przedstawionej na rysunku 1.

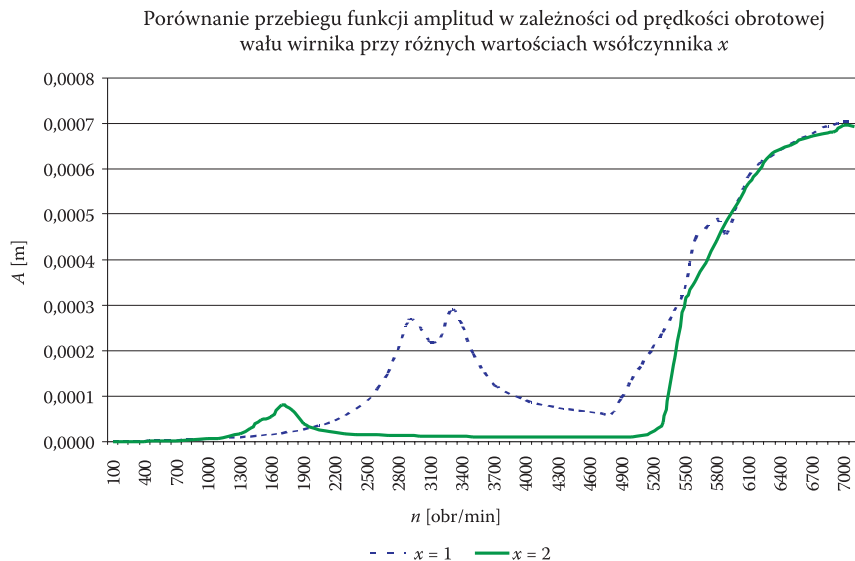
Analogiczne obliczenia wykonano dla przypadku, gdy losowo zmienna siła poprzeczna, obciążająca wirnik, wiruje z prędkością obrotową dwukrotnie wyższą od prędkości obrotowej wirnika. W tym przypadku zjawisko rezonansu występuje przy znacznie niższych prędkościach obrotowych, tj. w przedziale 1500÷1700 obr/min, co przedstawiono na rysunku 4 (krzywa dla $x = 2$, gdzie x — stosunek prędkości wirowania siły poprzecznej i prędkości obrotowej wirnika).

Wirnik po rozpedzeniu do prędkości powyżej rezonansu, przechodzi w przedział prędkości obrotowych, przy których jego praca jest stabilna. Po przekroczeniu prędkości obrotowej 5000 obr/min, pojawiają się pierwsze oznaki utraty stabilności przez układ. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analogiczne do rozpatrywanego wcześniej przypadku, przy czym — z powodu dużego wpływu stochastycznej zmienności wartości siły poprzecznej na przebieg obserwowanych zjawisk — z lewej strony dodano trajektorie układu obciążonego siłą wynikającą wprost z zależności narysowanej na rysunku 1.

W odmienności do przypadku, gdy prędkości wirowania wału i siły poprzecznej są zgodne, na rysunku 5 widać wyraźne rozbieżności między wynikami otrzymanymi przy zachowaniu stałej ustalonej zależności z rysunku 1 wartości siły a rezultatami symulacji przy losowej zmienności wartości siły [3, 4, 5]. Przy prędkości obrotowej ok. 3600 obr/min (rys. 5a) układ pracuje względnie stabilnie, przy czym oś wirnika obciążonego siłą losowo zmienną porusza się po trajektorii zbliżonej do elipsy pokazanej na rysunku 5a w lewej kolumnie.



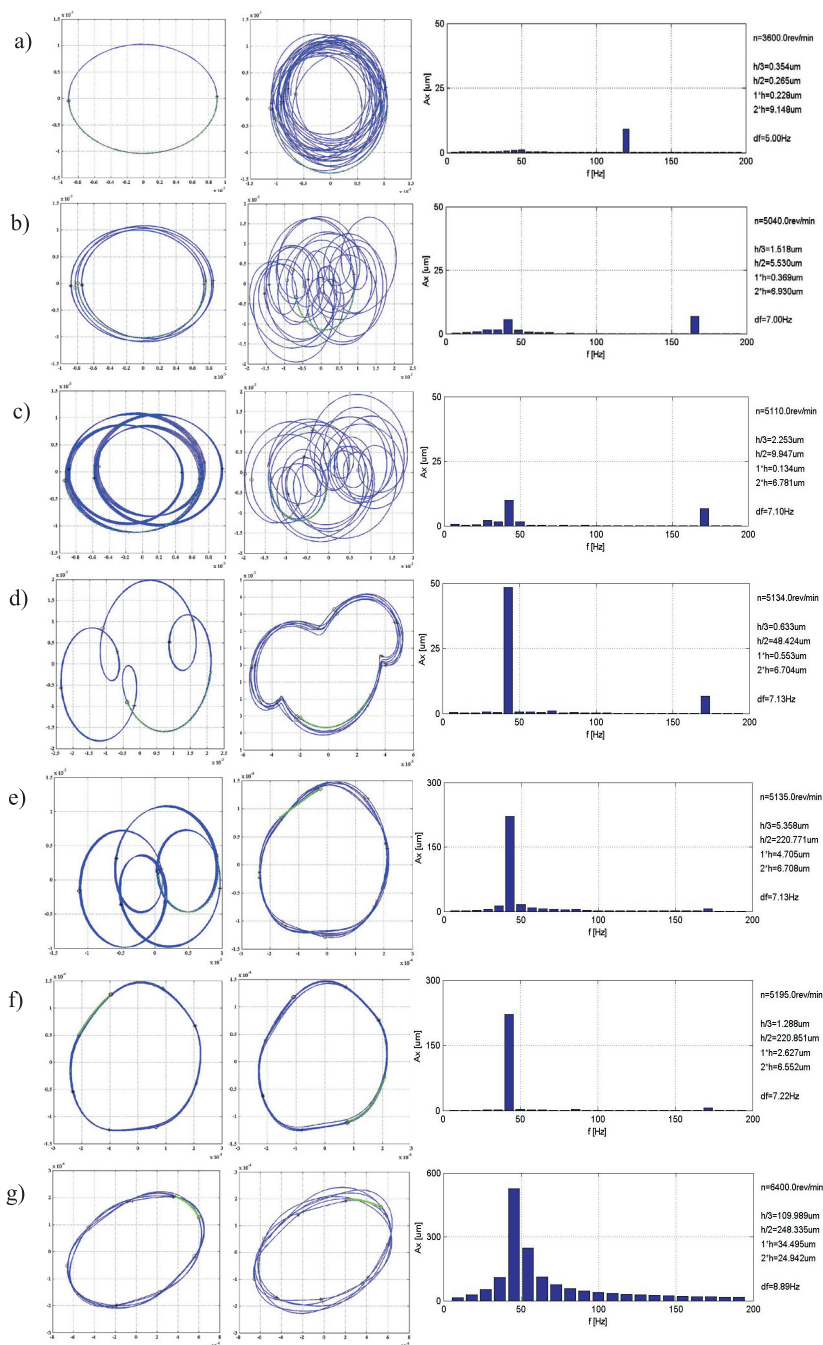
Rys. 3. Trajektorie osi wirnika oraz składowe form drgań podczas utraty stabilności przez układ



Rys. 4. Porównanie zależności amplitud drgań od prędkości obrotowych dla różnych stosunków x prędkości obrotowych siły poprzecznej i wirnika

Przy prędkości obrotowej ok. 5040 obr/min (rys. 5b) układ obciążony siłą stałą co do wartości wykazuje pierwsze tendencje do utraty stabilności. Z trajektorii eliptycznej wyodrębnione zostają cztery odrębne „pętle”, które wraz z dalszym wzrostem prędkości obrotowej ewoluują (rys. 5c). Opiswane zjawisko występuje przy niższych prędkościach obrotowych wirnika obciążonego siłą losowo zmienną, jednak trudno jest określić konkretną wartość graniczną prędkości obrotowej, z powodu znacznych odchylen trajektorii od zarysu eliptycznego. Wyodrębnienie się odrębnych pętli zarysowywanych przez oś wału wirnika to wynik występowania drgań połówkowych, których częstość przedstawiona na rysunku 5 jest jednak dużo niższa niż połowa harmonicznej [1].

Przy prędkości obrotowej około 5135 obr/min (rys. 5d i e), wirnik obciążony siłą stałą co do wartości znajduje się wciąż w zakresie drgań połówkowych, jednak wirnik obciążony siłą losowo zmienną przechodzi już w fazę drgań rezonansowych (rys. 5e). Amplituda drgań poprzecznych osi wirnika o częstości zbliżonej do częstości drgań własnych (ok. 50 Hz) znacznie wzrasta, a drgania wynikające z prędkości obrotowej wirnika przestają mieć znaczenie. Przy prędkości obrotowej równej 5400 obr/min odpowiedzi układu obciążonego siłą stałą i zmienną pokrywają się. Powyżej granicy 5500 obr/min układ wchodzi w fazę drgań rezonansowych [1], których amplituda jest wielokrotnie wyższa od występujących przy niższych prędkościach.



Rys. 5. Trajektorie osi wirnika oraz składowe form drgań podczas utraty stabilności przez układ przy stosunku prędkości obrotowych siły i wirnika $x = 2$

Podsumowanie

Wykonane obliczenia miały na celu sprawdzenie możliwości modelowania zjawisk mających ogromne znaczenie dla projektantów i diagnostów zajmujących się dynamiką maszyn wirnikowych. Model opracowany w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku opracowywany był tak, by uwzględniał wszelkie zjawiska wynikające z oddziaływań hydrodynamicznych zachodzących w łożyskach ślizgowych [2, 3], jednak jak dotąd nie przeprowadzono prób symulacji utraty stabilności układu wirnik-łożyska, który obciążony został siłą poprzeczną zmienną w czasie.

Otrzymane wyniki obliczeń stanowiąc będą podstawę do dalszych badań, w szczególności do wyjaśnienia znaczenia wpływu stochastycznej zmienności siły poprzecznej w różnych wariantach pracy wirnika. Wyjaśnienia i uściślenia bowiem wymaga między innymi różnica stopnia zgodności wyników przy różnych stosunkach prędkości obrotowych siły poprzecznej i prędkości obrotowej samego wirnika.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. KICIŃSKI, *Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych*, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław, 1994.
- [2] J. KICIŃSKI i in., *Modelowanie i diagnostyka oddziaływań mechanicznych, aerodynamicznych i magnetycznych w turbozespołach energetycznych*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk, 2005.
- [3] J. KICIŃSKI, P. PIETKIEWICZ, *Próba uwzględnienia stochastycznej zmienności danych wejściowych w modelowaniu heurystycznym wirników*, Przegląd Mechaniczny, 11/07, Warszawa, 2007.
- [4] P. PIETKIEWICZ, *Niepewność danych wejściowych dotyczących obciążeń w modelowaniu układów wirnikowych*, Diagnostyka, 3(43), Olsztyn, 2007.
- [5] P. PIETKIEWICZ, *Niepewność danych wejściowych w obliczeniach numerycznych*, Biul. WAT, 56 (nr spec. 1), Warszawa, 2007.

P. PIETKIEWICZ

Modelling of stability loss of rotor-bearings system with stochastic variation of the input data

Abstract. The chosen calculation results, confirming the possibility of simulation of the stability loss by the rotor-bearings system, subjected to a time-varying shearing force, are presented. Models formulated so far were not applied for such kind of tests. The presented results concern two variants of the rotor loading.

Keywords: rotor, data uncertainty, trajectory, vibrations, rotor-bearings system

Universad Decimal Classification: 62-13