

## WPLYW WYMIANY CIEPŁA W WĘZŁACH ŁOŻYSKOWYCH NA SYMPTOMY DIAGNOSTYCZNE MASZYN WIRNIKOWYCH

Jan KICIŃSKI

Institut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku  
Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie  
e-mail: [kic@imp.gda.pl](mailto:kic@imp.gda.pl)

### Streszczenie

Praca przedstawia wpływ wymiany ciepła w filmie smarnym łożysk ślizgowych i w efekcie wpływ deformacji termosprężystych panwi i jej utwierdzeń zewnętrznych na pracę dwupodporowego wirnika ułożyskowanego ślizgowo. Analizę teoretyczną przeprowadzono w oparciu o tzw. 3-D elastodiatermiczny model węzła łożyskowego. Przeprowadzona została analiza wpływu dwóch rodzajów utwierdzeń zewnętrznych i zacisku wstępnego panwi na zachowanie się układu w stabilnym jak i niestabilnym zakresie pracy. Prześledzony został rozwój wirów i bicia olejowego w łożyskach i opisane zostały wyróżniki diagnostyczne takiego stanu.

Słowa kluczowe: łożyska ślizgowe, wiry i bicie olejowe, dynamika wirników, symptomy diagnostyczne.

### THE INFLUENCE OF HEAT TRANSFER IN BEARINGS KNOTS ON DIAGNOSTICS SYMPTOMS OF ROTOR MACHINES

#### Summary

The paper presents the influence of heat transfer in oil film of journal bearings and thereby the influence of thermoelastic deformation of bearing bush and its external fixings on two supported rotor characteristics. Analysis has been performed on the basis of 3-D elastodiathermic model of journal bearing. Carried out has been the analysis of influence of two kinds of external fixations and initial clamping of bearing bush on properties of rotor set in stable and unstable operation regime. Traced has been the propagation of oil whirl and oil whip in journal bearings and described has been the diagnostic determinant of such state.

Keywords: slide bearings, oil whirl, oil whip, rotor dynamic, diagnostic symptoms.

### 1. MODEL TEORETYCZNY

W niniejszym artykule przedstawimy przykład aplikacji zaawansowanych modeli i programów komputerowych do oceny stanu dynamicznego maszyn wirnikowych. Wykorzystamy tu przede wszystkim nowoczesne metody wibrodiagnostyki w odniesieniu do nowej i szybko rozwijającej się dyscypliny wiedzy, a mianowicie diagnostyki według modelu.

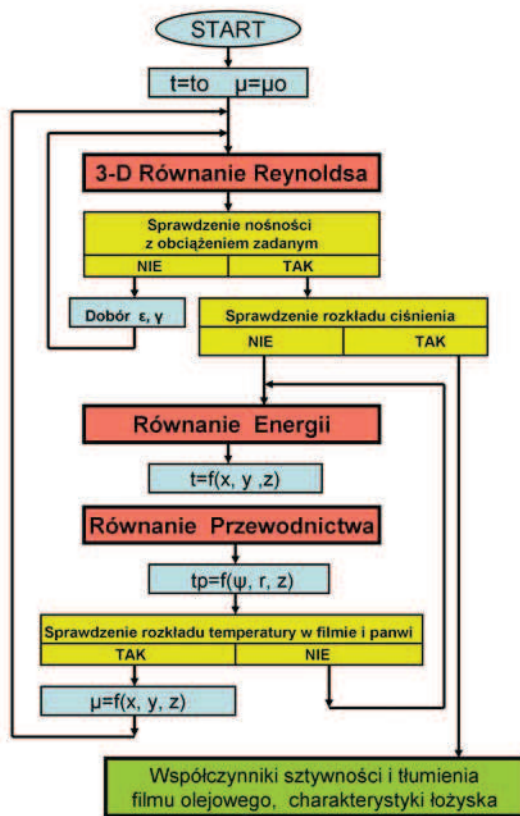
W klasycznej maszynie wirnikowej wyróżnić możemy trzy zasadnicze podukłady:

- linia wirników z dyskami, sprzęgłami i imperfekcjami typu pęknięcia wału lub rozosiowania wałów;
- hydrodynamiczne poprzeczne łożyska ślizgowe i uszczelnienia labiryntowe;
- fundament z podporami i utwierdzeniami zewnętrznymi łożysk.

Szczególnie trudne do zamodelowania teoretycznego są łożyska ślizgowe i uszczelnienia labiryntowe. W IMP PAN w Gdańsku opracowany został 3-D elastodiatermiczny model wymiany ciepła

w łożysku (program DIADEF, a na jego bazie program KINWIR-F, do analizy zagadnień kinetostatyki wirników) obejmujący skojarzone równania Reynoldsa, energii, przewodnictwa a następnie deformacji panwi – rys. 1. Do analizy zagadnień dynamiki układu wirnik-łożyska-fundament w zakresie nieliniowym, a więc w zakresie umożliwiającym analizę stanu obiektu po przekroczeniu granicy stabilności, opracowany został blok programów serii NLDW. Programy serii KINWIR jak i NLDW stanowią element środowiska MESWIR szczegółowo opisanego w monografii [1]. Stąd też nie będą one prezentowane bliżej w niniejszym artykule.

Opracowane narzędzia badawcze umożliwiają m.in. modelowanie utwierdzeń zewnętrznych panwi i zacisków wstępnych w stojakach. Wyłania się tym samym interesująca możliwość badania wpływu np.: propagacji wirów i bicia olejowego przy zmienionym kształcie szczeliny smarnej na wskutek wymiany ciepła, deformacji panwi i wpływu utwierdzeń zewnętrznych. Autorowi niniejszego artykułu nie są znane doniesienia literaturowe na ten temat.



Rys. 1. Przyjęty model wymiany ciepła w łożysku

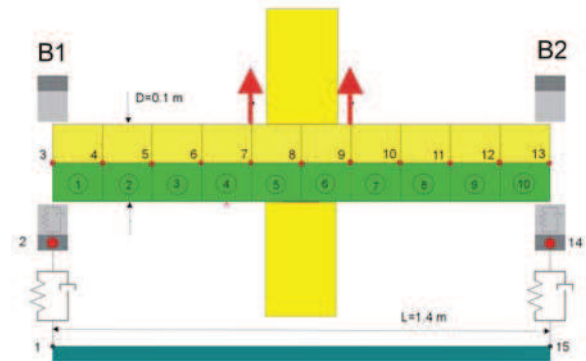
## 2. WYNIKI ANALIZY

Przyjmijmy do dalszych rozważań dwa przypadki utwierdzenia zewnętrznego panwi dla wirnika z rys. 2, a mianowicie:

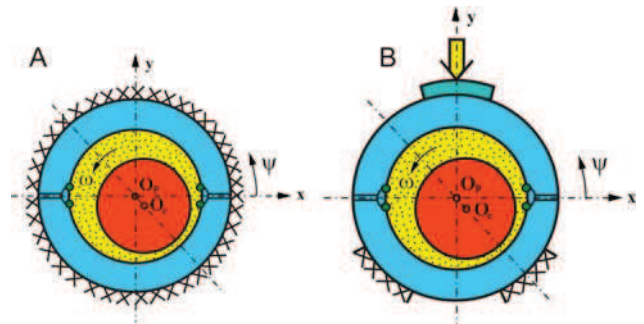
- utwierdzenie nieskończenie sztywne na całej powierzchni zewnętrznej panwi (określimy to jako typ A). Oznacza to, że możliwe są jedynie deformacje panwi i szczeliny w kierunku wewnętrznym;
- utwierdzenie sztywne częściowe dolnej panwi z jednoczesnym zaciskiem panwi górnej (co określimy jako typ B). Teraz panew może odkształcać się zarówno kierunku zewnętrznym jak i wewnętrznym, to znaczy w kierunku do środka panwi.

Schematy obu przypadków utwierdzeń zewnętrznych panwi przedstawia rys. 3.

Wyniki obliczeń rozkładów temperatury i deformacji panwi za pomocą wzajemnie skojarzonych programów KINWIR-F i NLDW-LEW (zagadnienia kinetostatyki i dynamiki) przedstawiają rys. 4 do 6.

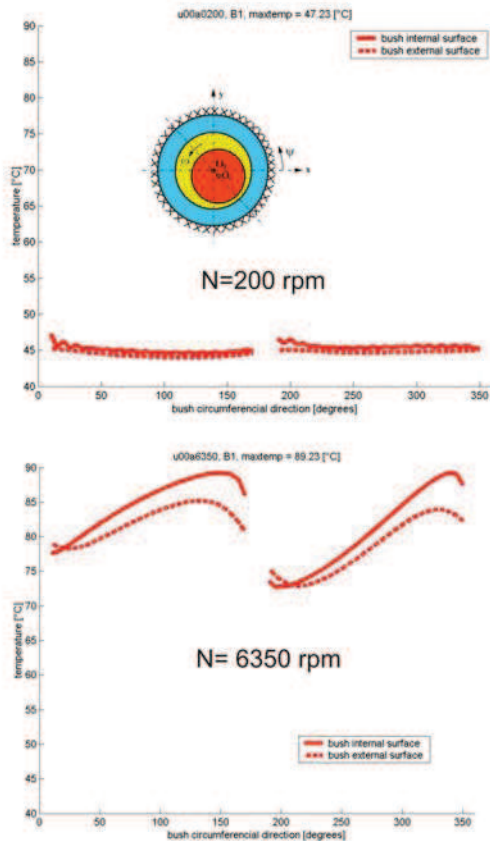


Rys. 2. Przyjęty do analizy diatermiczny model cieplny łożyska (lewa strona: algorytm obliczeń dla programu DIADEF) i przyjęty model obiektu: dwupodporowy wirnik łożyskowy ślizgowo. Obliczenia prowadzone były w oparciu o programy serii KINWIR i NLDW stanowiące elementy środowiska MESWIR [1]

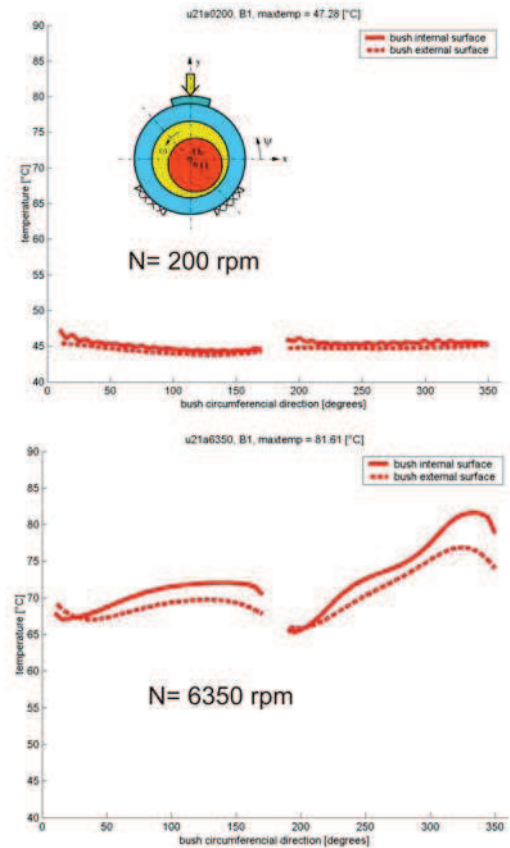


Rys. 3. Analizowane przypadki utwierdzeń zewnętrznych panwi. A – utwierdzenie sztywne na całej powierzchni zewnętrznej panwi, B – utwierdzenie sztywne częściowe panwi dolnej z jednoczesnym zaciskiem panwi górnej

Jak widać z rys. 6 duży wzrost temperatury panwi przy wysokich obrotach wirnika (rys. 4 i rys. 5) spowodował znaczne zmiany kształtu szczeliny smarnej łożyska w stosunku do jej kształtu konstrukcyjnego (w tym przypadku luzu kołowo-cylindrycznego). Zmiany te są szczególnie mocno widoczne w przypadku utwierdzenia B (rys. 3). Zacisk panwi górnej spowodował jej niesymetryczne odkształcenia w kierunku zewnętrznym, a częściowe utwierdzenie panwi dolnej spowodowały istnienie charakterystycznego „dolka” w części centralnej panwi dolnej – rys. 6. Utwierdzenia typu A (rys. 3) spowodowało prawie równomierne zmniejszenie luzu promieniowego o ok. 25%. Fakt ten zmienił oczywiście przebieg trajektorii wirnika, mimo iż na układ w obu przypadkach działają dokładnie te same siły zewnętrzne (siły niewyważenia resztkowego).



Rys. 4. Rozkłady temperatury na powierzchni zewnętrznej (linia przerywana) i wewnętrznej panwi (linia ciągła) obliczone dla przypadku utwardzenia A z rys. 4 i różnych prędkości obrotowych wirnika z rys. 3



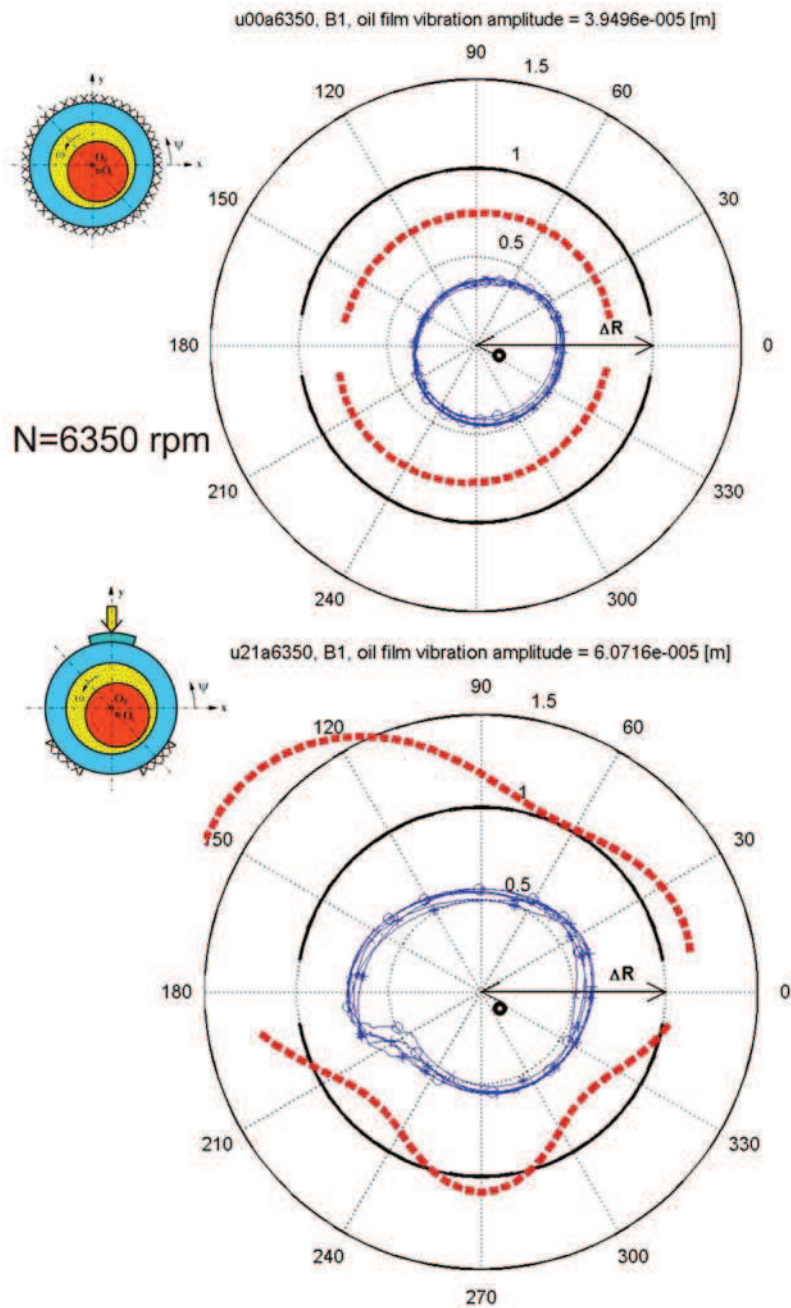
Rys. 5. Rozkłady temperatury na powierzchni zewnętrznej (linia przerywana) i wewnętrznej panwi (linia ciągła) obliczone dla przypadku utwardzenia B z rys. 3 i różnych prędkości obrotowych wirnika z rys. 2

Zobaczmy teraz jak będą rozwijały się wiry i bicie olejowe jeśli zmienimy rodzaj utwardzeń zewnętrznych panwi. Odpowiemy sobie tym samym na pytanie, na ile konieczne jest stosowanie zaawansowanych narzędzi badawczych w ocenie niestabilności hydrodynamicznej układu. Pozostaniemy przy tym samym układzie, a mianowicie wirniku symetrycznym z jedną tarczą posadowionym na dwóch identycznych łożyskach ślizgowych – rys. 2. Wyniki stosownych obliczeń przedstawiają rys. 7 do rys. 12.

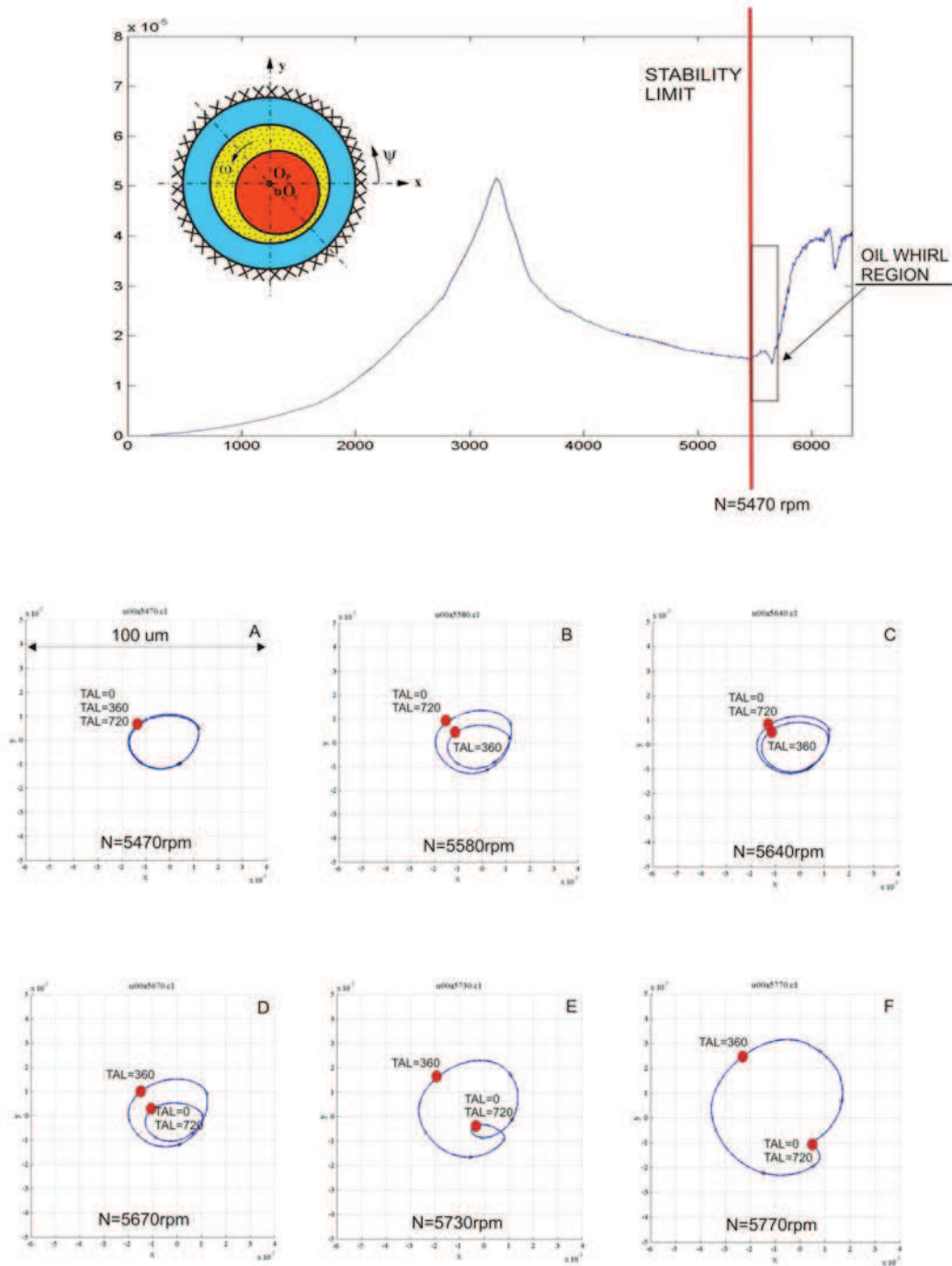
Porównując rys. 7 z rys. 9 a następnie rys. 8 z rys. 10 stwierdzamy, iż utwardzenie typu B okazało się mniej korzystne z punktu widzenia dynamiki układu. Granica stabilności o prawie 400 rpm wypada wcześniej, amplitudy przemieszczeń wirów i bicia są zdecydowanie większe, a ponadto wiry szybciej przechodzą do niebezpiecznej już fazy

bicia olejowego. Są to wyniki dość zaskakujące. Jak wynika bowiem z badań prowadzonych w [2], ten typ utwardzenia zwiększał w efekcie tzw. rezerwę stabilności układu w stabilnym zakresie jego pracy. Liniowy opis dynamiki układu stosowany w [2] nie pozwalał jednakże na prześledzenie warunków pracy po przekroczeniu granicy stabilności. Dopiero opis nieliniowy zastosowany w niniejszej analizie umożliwił wyciągnięcie pełnych i właściwych wniosków.

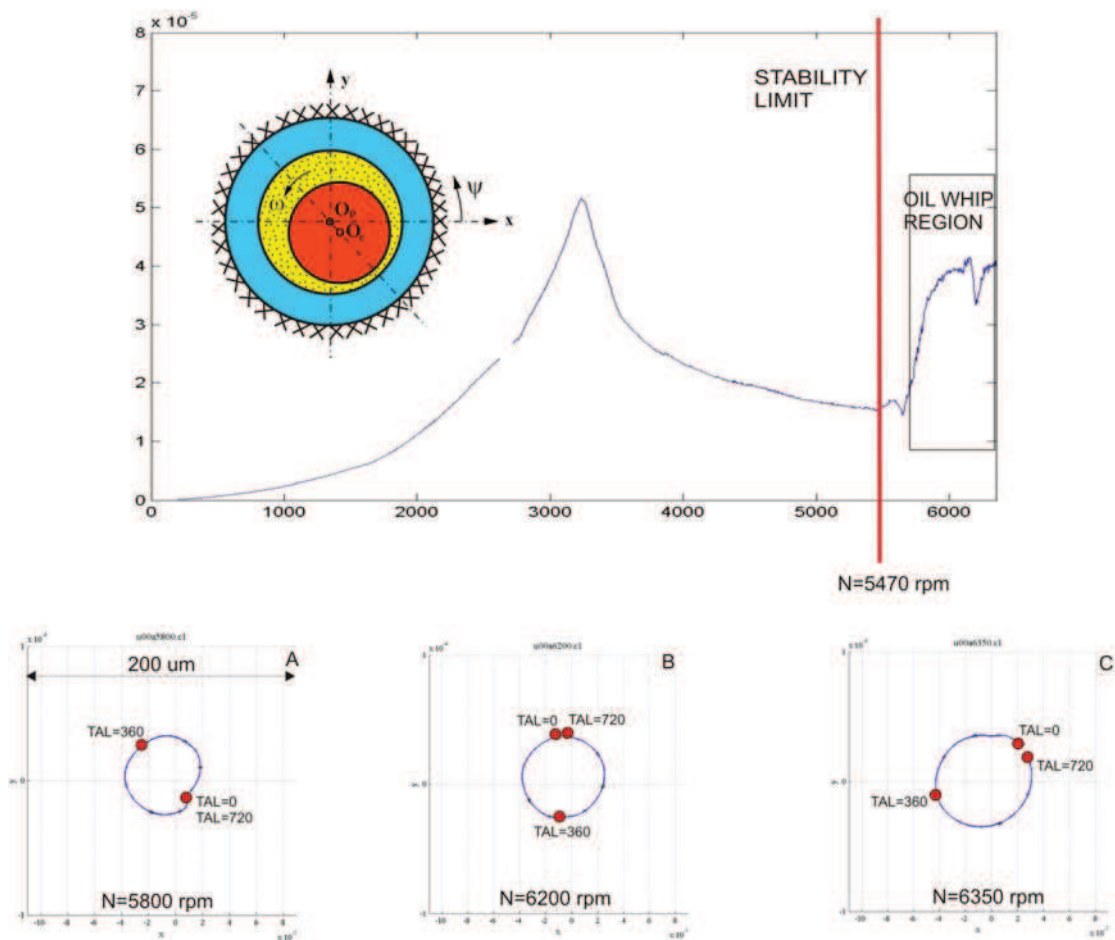
Rys. 11 i rys. 12 pozwalają ujawnić, że dla tych samych warunków pracy i położen zewnętrznej siły wymuszającej drgania układu „wychwycone w locie” przestrzenne rozkłady ciśnienia obliczone dla przyjętych dwóch typów utwardzenia panwi, wypadają zupełnie inaczej, co uzasadnia wcześniejsze różnice w przebiegu trajektorii.



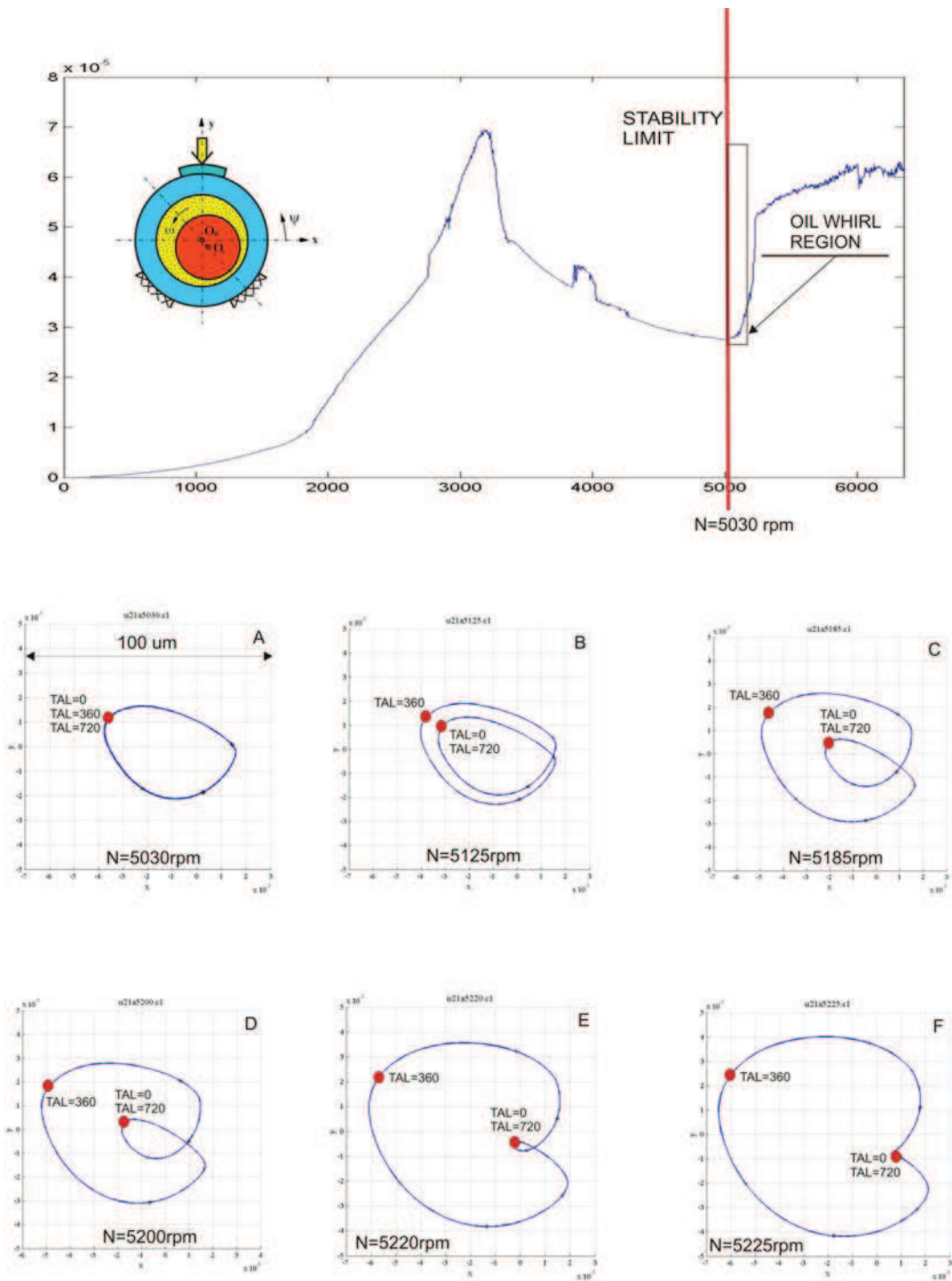
Rys. 6. Kształt szczeliny smarnej z uwzględnieniem deformacji termosprężystych panwi (linia przerywana) na tle kształtu konstrukcyjnego (linia ciągła) i trajektorii przemieszczeń czopa przy prędkości wirnika  $N = 6350$  rpm (obszar silnej niestabilności hydrodynamicznej). Obliczenia przeprowadzone zostały dla dwóch przypadków utwierdzeń zewnętrznych panwi według rys. 3



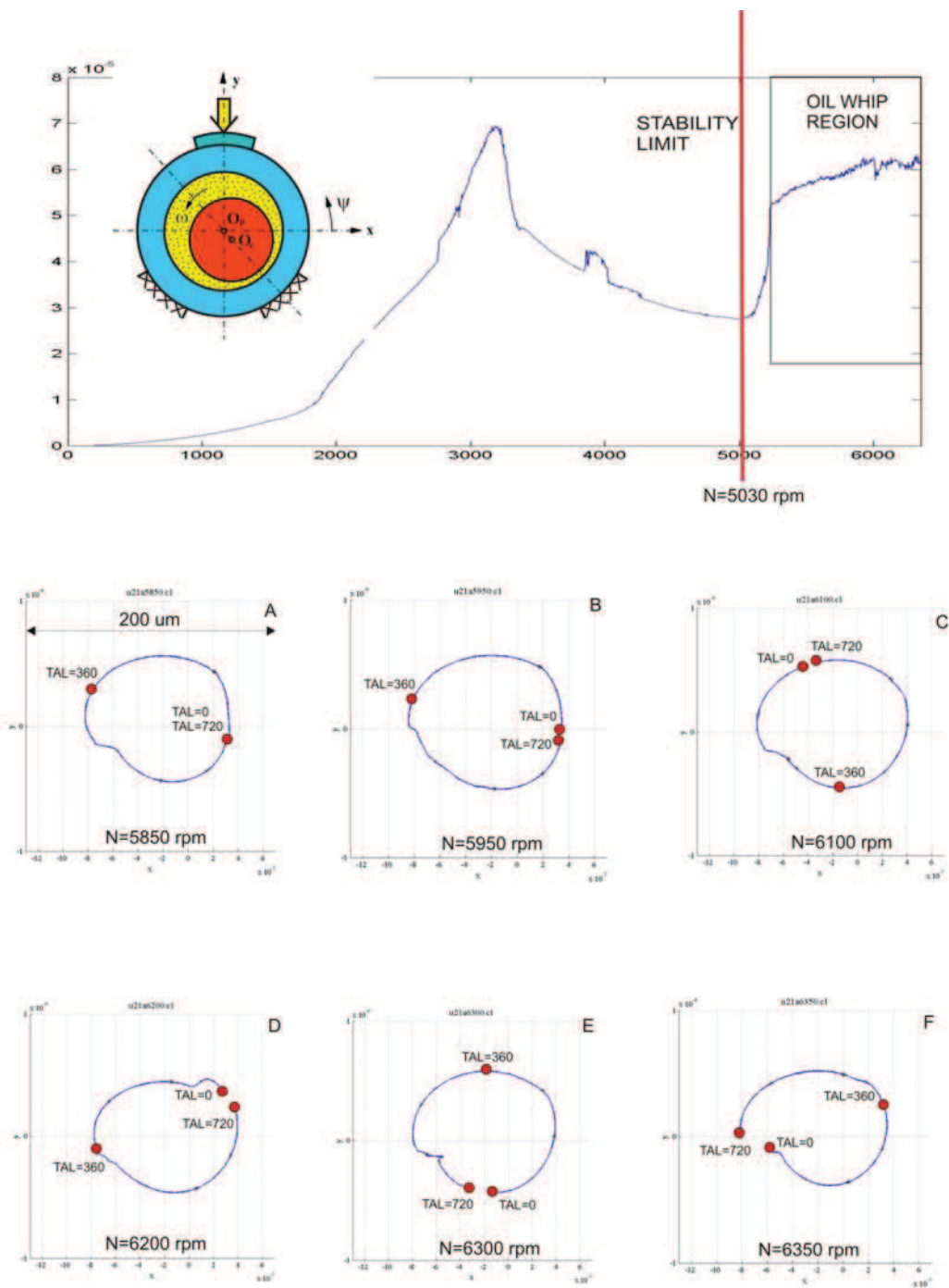
Rys. 7. Rozwój wirów olejowych obliczony dla przypadku utwierdzeń zewnętrznych panwi typu A. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Część górną wykresu – charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe układu



Rys. 8. Rozwój bicia olejowego obliczony dla przypadku utwierdzeń zewnętrznych panwi typu A. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Część górna wykresu – charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe układu

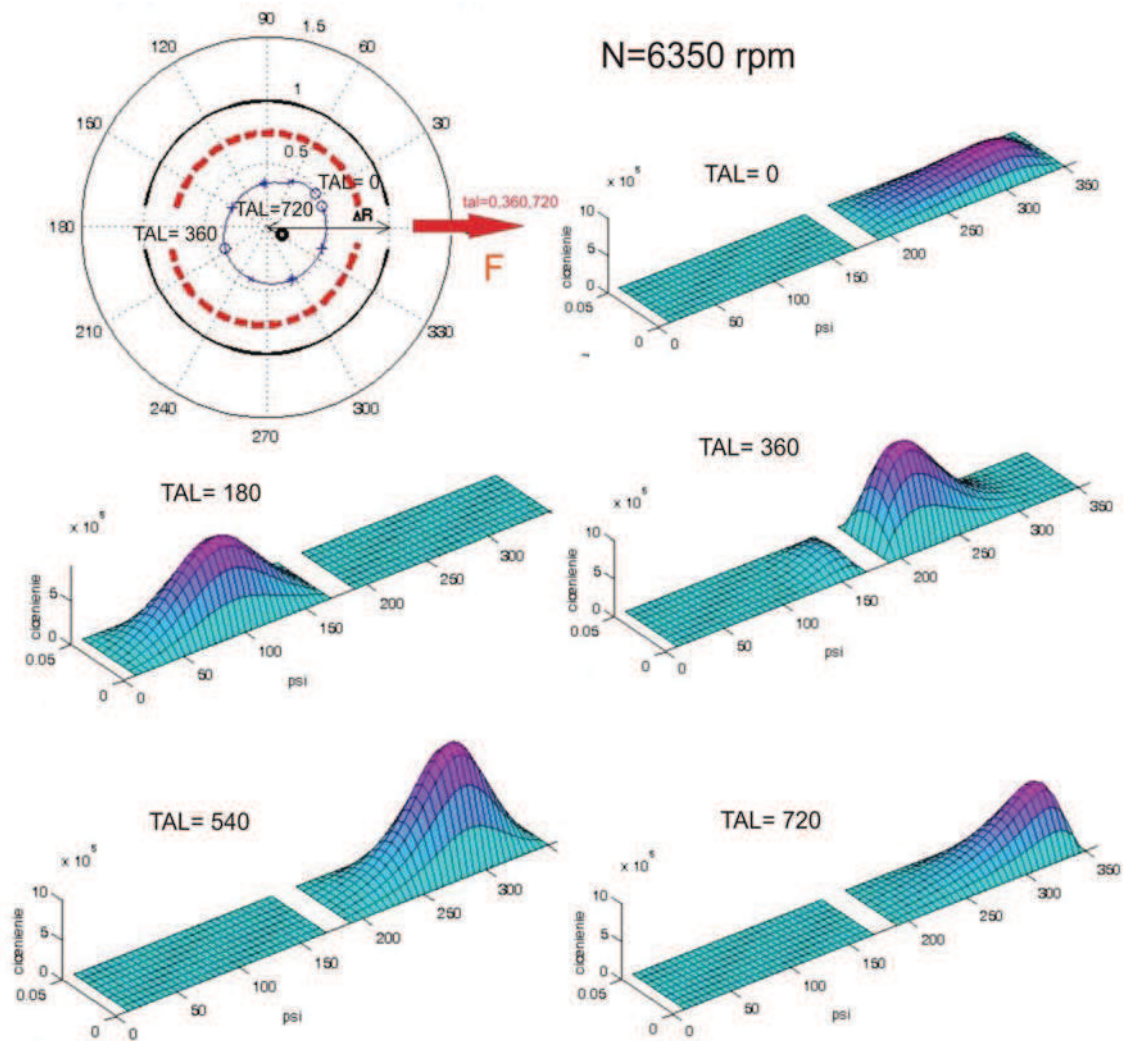


Rys. 9. Rozwój wirów olejowych obliczony dla przypadku utwierdzeń zewnętrznych panwi typu B. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Część górna wykresu – charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe układu

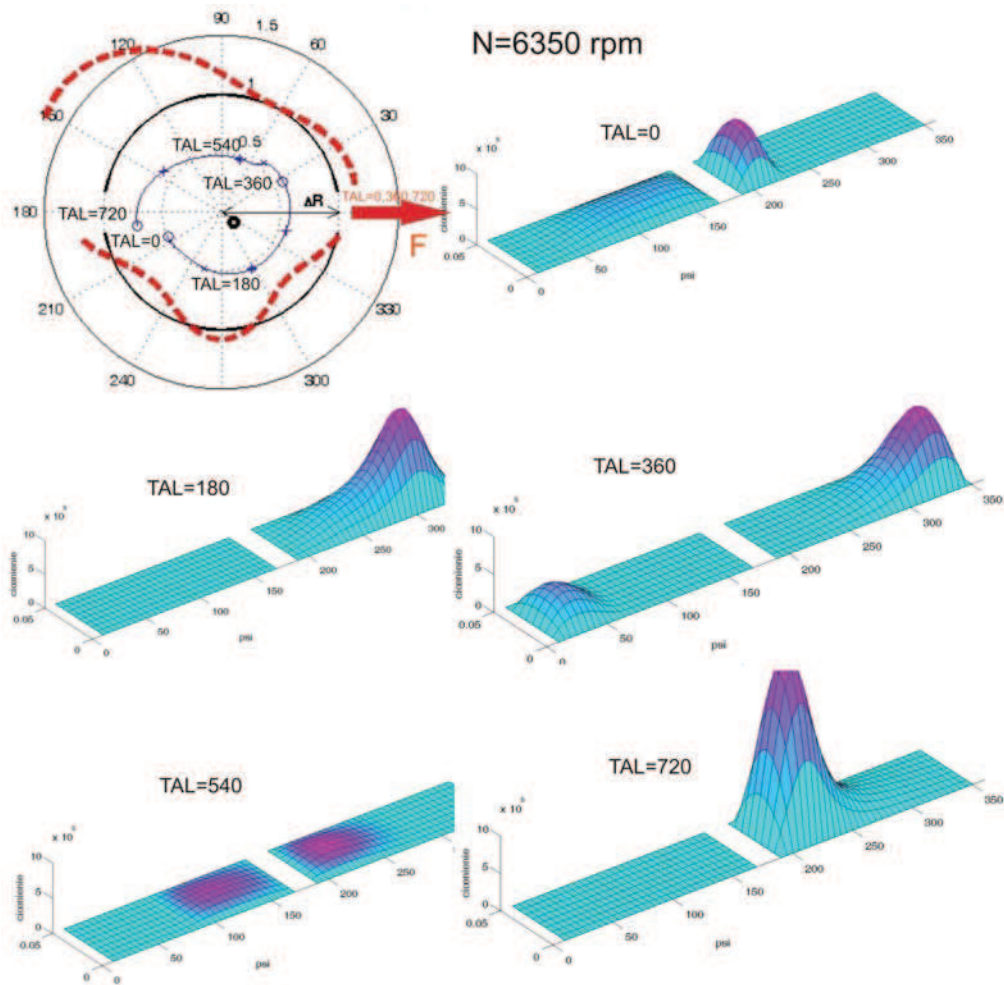


Rys. 10. Rozwój bicia olejowego obliczony dla przypadku utwierdzeń zewnętrznych panwi typu B. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Część górna wykresu – charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe układu





Rys. 11. Przestrzenny rozkład ciśnienia hydrodynamicznego w szczelinie smarnej łożysk „wychwycony w locie” dla poszczególnych charakterystycznych położen znacznika TAL na trajektorii. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Przypadek A utwierdzenia zewnętrznego panwi. Strefa bicia olejowego (N=6350 rpm)



Rys. 12. Przestrzenny rozkład ciśnienia hydrodynamicznego w szczelinie smarnej łożysk „wychwycony w locie” dla poszczególnych charakterystycznych położeń znacznika TAL na trajektorii. Określenia TAL=0, 360, 720 oznaczają położenia znacznika na trajektorii przy położeniu wektora sił wymuszających poziomo w prawo (początek przyjętego układu współrzędnych). Przypadek B utwierdzenia zewnętrznego panwi. Strefa bicia olejowego ( $N=6350$  rpm)

### 3. UWAGI KOŃCOWE

Podsumowując nasze rozważania musimy stwierdzić, że odpowiedź na pytanie, czy analiza teoretyczna z zastosowaniem bardzo zaawansowanych narzędzi jest zawsze konieczna, również i w tym przypadku wypada niejednoznacznie. W pewnych sytuacjach (u nas przypadek utwierdzenia A) zastosowanie izotermicznego modelu cieplnego łożysk i sztywnej panwi wydaje się być wystarczające do analizy stanu dynamicznego układu w całym zakresie prędkości obrotowych wirnika. W innych sytuacjach (np.: przypadek utwierdzenia B) zastosowanie bardziej złożonych modeli jest konieczne dla właściwej oceny stanu maszyny. Niestety często trudno jest *a priori* ocenić jaki rodzaj utwierdzenia czy warunków pracy wymagał będzie bardziej zaawansowanych narzędzi.

W przypadku tego rodzaju wątpliwości rozsądnym wydaje się zastosowanie w pierwszej kolejności narzędzi bardziej złożonych, a dopiero później dokonywać ewentualnych uproszczeń.

### LITERATURA

- [1] J. Kiciński, *Dynamika wirników i łożysk ślizgowych*, Maszyny Przepływowe t. 28, Wydawnictwo IMP, 2005.
- [2] J. Kiciński, R. Haller, *Computer Optimization of External Fixation and Initial Camping of a Bushing with Respect to Static and Dynamic Properties of Journal Bearings*, Transaction of the ASME, Vol. 116, October 1994.