

Wiesław Toczek  
ZRE Katowice SA

## Tłumienie drgań samowzbudnych turbiny cieplnej z zastosowaniem łożysk czteroklinowych

### Damping of a steam turbine self-excited vibrations with the use of four-key bearings

Drgania powstające w turbinach ciepłych wywołane są przez różne zjawiska towarzyszące ruchowi obrotowemu wirnika. Oprócz drgań wywołanych niewyważeniem wirnika lub oddziaływaniem filmu olejowego w łożyskach, występują również drgania wywołane siłami aerodynamicznymi związanymi z przepływem pary przez układ przepływowy, powstające w szczególności na uszczelnieniach nadbandażowych i dławnicowych.

Wirnik turbiny porusza się po skomplikowanej trajektorii, co powoduje obwodową zmianę luzów, a przez to zmianę ciśnień i strumieni płynących przez uszczelnienia. Prowadzi to do nierównomiernego rozkładu sił obwodowych działających na wirnik. Niewspółosiowe położenie wału wirnika względem korpusu powoduje powstawanie nierównomiernego rozkładu ciśnień w uszczelnieniach dławicowych i nadbandażowych.

Powstawanie tego typu drgań jest złożone, ale zostało dokładnie wyjaśnione przez Thomasa w latach 50. ubiegłego wieku. Nad metodami eliminacji tych drgań prowadzone są badania w wielu ośrodkach na świecie.

W praktyce problem pojawiających się drgań typu aerodynamicznego rozwiązuje się najczęściej poprzez:

- odpowiednią zmianę luzów w uszczelnieniach,
- stosowanie nowych typów uszczelnień,
- zmiany konstrukcyjne wirnika,
- podniesienie odporności łożysk na precesję olejową.

W artykule przedstawiono przykład zastosowania wymienionych rozwiązań oraz ich wpływ na eliminację drgań aerodynamicznych.

W turbinach typu 13CK70 problemy z drganiami aerodynamicznymi występowały od momentu uruchomienia nowego bloku. Po pierwszej próbie uruchomienia stwierdzono na podstawie pomiarów diagnostycznych nadmierne drgania łożyska numer I i II. Składowa drgań 0,4X wskazywała, że charakteryzuje ją niestabilność pracy wirnika pochodząca od destabilizującego

działania wiru parowego, który generuje się w uszczelnieniach w różnych stanach obciążenia elektrycznego i cieplnego turbiny. Podjęto wtedy decyzję o otwarciu turbiny, drastycznie zwiększono luzy uszczelnień nadbandażowych i zastosowano łożysko numer II jako trójklinowe. Dzięki temu zabiegowi sprawność turbiny zmalała do minimalnego poziomu, a drgania uległy obniżeniu do poziomu umożliwiającego prowadzenie ruchu turbiny w ograniczonym zakresie mocy.

Podczas kolejnych postojów turbiny wykonywano szereg zabiegów, które miały wytłumić drgania, zwiększyć sprawność i przenieść wzbudzenie się drgań poza zakres znamionowej pracy turbiny. Polegały one na: zmniejszeniu luzów na łożyskach, korekcie linii wałów, obniżaniu temperatury oleju smarowego, zmianie konstrukcji uszczelnień międzystopniowych i nadbandażowych (usunięcie jednej blaszki i nawierceniu otworów antywirowych). Zabiegi te nie przynosiły jednak oczekiwanych efektów. Podczas normalnej pracy drgania mieściły się w dopuszczalnym przedziale, jednak w momencie zmian obciążenia i zmian przepływu pary pojawiały się ponownie drgania aerodynamiczne.

Podjęto więc kolejne działania mające na celu znalezienia innych rozwiązań mogących polepszyć stan dynamiczny turbiny. Pojawiła się firma, której przedstawiciele gwarantowali, że po zastosowaniu uszczelnień nadbandażowych typu szczotkowego i międzystopniowych typu cofającego się oraz antywirowego uzyskany zostanie zanik drgań aerodynamicznych dla pracy turbiny o znamionowych parametrach pary i obciążenia, a poziom składowej drgań 0,4X mierzonych w widmie drgań względnych łożysk nie przekroczy kilkunastu mikrometrów „peak to peak”.

Pomimo zastosowania kosztownych uszczelnień drgania aerodynamiczne nie zostały wytłumione, poprawiła się jedynie sprawność wewnętrzna turbiny.

Po nieudanej próbie wytłumienia poprzez wprowadzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień międzystopniowych i nadbandażowych, *ZRE Katowice* zaproponowało zastosowanie zamiast łożyska nr 1 cylindrycznego, łożyska czteroklinowego, które ma poprawić warunki stabilności wirującego układu.

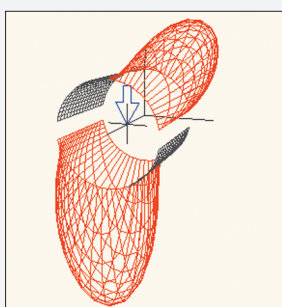
Zastosowane rozwiązanie, wykorzystujące łożysko antywibracyjne z czterema klinami smarnymi o specjalnej geometrii, przyniosło oczekiwany skutek. Układ ten efektywnie tłumi drgania, jeżeli właściwie zostanie zaprojektowany i wykonany. Zastosowane w nich aż cztery kliny olejowe mają wielokrotnie lepsze możliwości tłumienia drgań niż klasyczne łożyska.

W rezultacie osiągnięto poprawę stanu dynamicznego podczas uruchomienia oraz normalnej pracy turbiny. Można stwierdzić, że montowane uszczelnienia cofające się i antywirowe nie miały żadnego wpływu w tym układzie na wyeliminowanie i stabilizację drgań wirnika. Natomiast zdecydowaną poprawę stabilizacji drgań osiągnięto dzięki nowemu czteroklinowemu łożysku. Rozwiązanie to nie usunęło przyczyny powstawania tych drgań, a jedynie spowodowało tłumienie układu łożyska-wirnik, dając stabilną pracę turbozespołu w całym zakresie obciążeń elektrycznych i cieplnych.

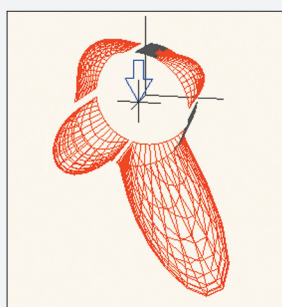
Łożyska czteroklinowe rozwiązują wiele problemów występujących w konwencjonalnych łożyskach. Uważa się, że tego typu łożyska nadają się do wirujących układów, w których:

- występują problemy ze stabilnością,
- wymagana jest modernizacja układu łożyskowania ,
- występuje słabe tłumienie układu łożyska-wirnik przy prędkościach znamionowych.

Łożyska czteroklinowe posiadają wiele zalet w porównaniu z łożyskami konwencjonalnymi.



Rys.1. Rozkład ciśnień w łożysku eliptycznym

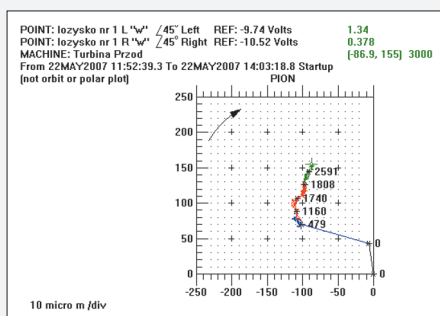


Rys. 2. Rozkład ciśnień w łożysku czteroklinowym

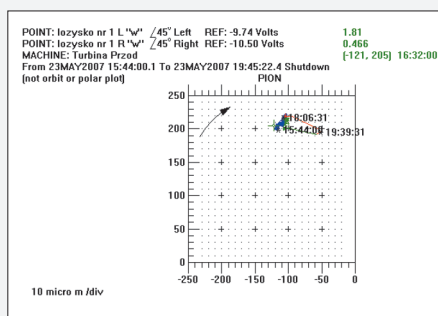
Do zalet tych zaliczyć można wymienione poniżej cechy.

1. Zachowanie luzu zbliżonego do kołowego. W łożysku znajdują się cztery kliny smarowe, dzięki czemu jego geometria (luzu) zbliżona jest do okręgu. Przekątne luzu są równe. Jest on korzystniejszy od luzu występującego w łożysku eliptycznym, w którym luz poziomy jest ponad 3-krotnie większy niż pionowy.

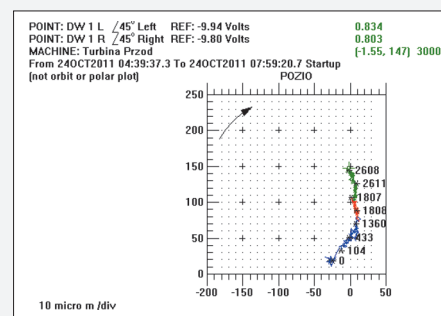
2. Większa odporność na odchyłanie się od kierunku pionowego. Konstrukcja łożyska zapewnia małą wrażliwość na odchyłanie wektora obciążenia. Zmiana kierunku obciążenia łożyska spowodowana może być przemieszczaniem stojaków łożyskowych, fundamentów, pracą w różnej konfiguracji otwarcia zaworów turbiny, wydłużeniami termicznymi itp., co powoduje, że wypadkowa siła obciążająca łożysko nie zawsze działa dokładnie pionowo.
3. Zwiększony zapas stabilności dla każdej prędkości obrotowej. Granica stabilności rozumiana jest jako prędkość obrotowa wału, po przekroczeniu której może generować się wir olejowy wywołujący drgania (około 0.5X). Zapewnienie rezerwy stabilności wirnika oznacza pracę łożyska w zakresie, w którym prawdopodobieństwo powstania wiru olejowego (drgania olejowe) jest bardzo niskie. Geometrię łożyska eliptycznego można dobrać optymalnie zwiększając granicę stabilności (większy zacisk - max ciśnienie w filmie olejowym) i w zasadzie w łożysku tego typu nie da się już osiągnąć lepszych własności dynamicznych. Osiągnięcie korzystniejszych własności dynamicznych i zwiększenie stabilności jest możliwa jedynie poprzez zastosowanie większej liczby klinów smarnych. Dzięki zastosowaniu czterech segmentów w łożysku jednocześnie generują się cztery kliny smarowe wywołując lepszą stabilizację czopa w całym zakresie pracy.
4. Zdolność do tłumienia drgań. Łożyska eliptyczne posiadają słabe tłumienie filmu olejowego w kierunku poziomym. Jest to ściśle związane z ich geometrią szczeliny smarowej (duży luz poziomy i mały pionowy). Tłumienie w kierunku poziomym w łożysku czteroklinowym jest ponad dwukrotnie większe niż w łożysku eliptycznym. W kierunku pionowym łożysko cytrynowe posiada nieznacznie większe tłumienie.
5. Korzystniejsze własności dynamiczne w całym zakresie pracy turbozespołu. Poprawa własności dynamicznych łożyska jest uzyskiwana na drodze kontrolowanego „docięcia” poszczególnych klinów łożyska w celu sztywniejszego utrzymania czopa. Powoduje to wzrost temperatury w filmie olejowym. Dlatego jest zjawiskiem naturalnym, że łożysko o korzystniejszych własnościach dynamicznych pracuje przy wyższej temperaturze filmu olejowego.
6. Większa sztywność w kierunku poziomym. W łożysku ślizgowym sztywność filmu olejowego w kierunku pionowym jest większa niż w kierunku poziomym. Jest to szczególnie widoczne w łożyskach eliptycznych, gdzie na skutek zwiększania „naciągu” łożyska ciśnienie hydrodynamiczne dociska czop z góry i z dołu usztywniając wirnik w kierunku pionowym. Zwiększenie sztywności w kierunku pionowym w łożysku eliptycznym nie prowadzi do zwiększenia sztywności w kierunku poziomym. Zachowanie zbliżonych wartości sztywności i tłumienia w kierunku poziomym i pionowym pozwala uzyskać trajektorię czopa zbliżoną do kołowej i ograniczyć drgania. W przypadku sztywności pionowej łożysko eliptyczne jest nieznacznie sztywniejsze od łożyska czteroklinowego. Sztywność łożysk w poziomie różni się znacznie – łożysko czteroklinowe jest



Rys. 3. Ruch środka czopa wału łożyska nr 1 (łożysko cylindryczne). Podjazd na 3000 obr.

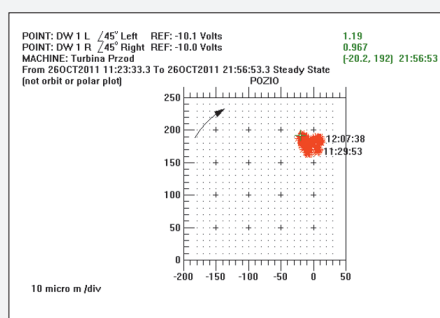


Rys. 4. Ruch środka czopa wału łożyska nr 1 (łożysko cylindryczne). Obciążenie - niebieski - podjazd do 65,7 MW, czerwony - podjazd do 67,8 MW, zielony - zjazd z mocą

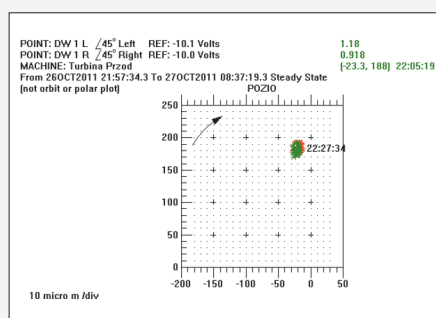


Rys. 5. Ruch środka czopa wału łożyska nr 1 (łożysko czteroklinowe). Podjazd na 3000 obr.

Rys. 6. Ruch środka czopa wału łożyska nr 1 (łożysko czteroklinowe). Synchronizacja i obciążenie do 55 MW - niebieski - 3000 obr., czerwony - synchronizacja i obciążenie do 55 MW



godz.:	11:27	11:34	11:42	11:54	12:24	13:53	14:56	15:06	15:53	17:30	18:09	19:22
MW:	synch.	11,5	15,0	21,2	30,6	38,5	42,0	45,0	45,0	47,1	55	55,0
Mvar:	synch.	17,4	14,2	14,6	17,0	18,9	22,8	20,0	18,9	---	---	20,0



Rys. 7. Ruch środka czopa wału łożyska nr 1 (łożysko czteroklinowe). Obciążenie - czerwony - obciążenie do 55 MW, zielony - podjazd na 70 MW

3-krotnie sztywniejsze, przez co korzystniejszy jest stosunek sztywności pionowej do poziomej. W łożysku eliptycznym wynosi około 9, a w łożysku czteroklinowym jest równy około 2.

W celu zilustrowania skutków zastosowania łożyska czteroklinowego w miejsce klasycznego - zredukowanie drgań i przesunięcie granicy stabilności poza obszar pracy - podano przykładowe wykresy.

## Wnioski porównawcze dotyczące łożyska czteroklinowego i łożyska eliptycznego

W łożysku czteroklinowym występują jednocześnie 4 kliny smarowe opasujące czop (w łożysku cytrynowym 2).

Łożysko czteroklinowe posiada 3-krotnie większą sztywność w poziomie przy zachowaniu podobnej sztywności w pionie.

Łożysko czteroklinowe posiada ponad 2-krotnie większe tłumienie w poziomie przy zachowaniu podobnego tłumienia w pionie.

Zarówno łożysko czteroklinowe jak i łożysko eliptyczne nie powinny generować wiru olejowego.

W łożysku czteroklinowym występuje korzystniejszy kształt koła luzów (okrągły) niż w łożysku eliptycznym (spłaszczona elipsa)

W łożysku czteroklinowym może występować nieznacznie wyższa temperatura i nieznacznie cieńszy film olejowy.

## Podsumowanie

Porównanie właściwości łożyska czteroklinowego z dotychczasowymi łożyskami wykazuje uzyskanie wyraźnej poprawy własności dynamicznych.

Zastosowanie łożyska czteroklinowego umożliwia redukcję drgań wywołanych siłami aerodynamicznymi powstającymi w uszczelnieniach nadbandażowych i przesuwa granicę stabilności oraz umożliwia bezpieczną pracę w zakresie przemieszczeń wirnika.

W wyniku zastosowania łożyska czteroklinowego można poprawić stan dynamiczny maszyny bez jej otwierania.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Łączkowski R.: Wibroakustyka maszyn i urządzeń, Warszawa 1993.
- [2] A&O EXPERT – Projekt i konstrukcja łożyska o zwiększonej zdolności do tłumienia drgań, opracowanie wykonane dla ZRE Katowice.
- [3] Sprawozdanie ZRE Katowice nr WD/40/.