

Monitorowanie ekscentryczności wirników turbin – różnicowanie w implementacji czujników

Monitoring of turbine rotors eccentricity – differentiation in implementation of sensors

Miarą statycznej deformacji wału/wirnika jest ekscentryczność. Deformacja ta jest szczególnie groźna w skutkach dla maszyn z wirnikami elastycznymi po osiągnięciu przez nie prędkości obrotowej bliskiej pierwszej częstotliwości drgań rezonansowych wirnika. W strefie obrotów rezonansowych wirniki podlegają dodatkowo odkształceniom dynamicznym prowadzącym do wzrostu utraty prostoliniowości osi wału. Ich deformacja dynamiczna będzie tym większa, im większa jest niewyważa wirnika, a znaczącym komponentem tej ostatniej może być niepożądana deformacja statyczna. W artykule skoncentrowano się wyłącznie na problemie monitorowania ekscentryczności turbin, natomiast problem ten może także dotyczyć niektórych innych maszyn wirnikowych, które transportują gorące media, jak np. pompy wody gorącej. W przypadku potrzeby monitorowania innych maszyn wykorzystywany w tym celu monitoring powinien być podobny do stosowanego na turbinach.

Słowa kluczowe: wirniki turbin, system monitorowania i zabezpieczania ekscentryczności

The measure of a shaft/rotor static deformation is its eccentricity. This kind of deformation is particularly dangerous in effects for machines with elastic rotors after reaching by them the rotational speed close to the first frequency of a rotor resonant vibrations. In the zone of resonant revolutions the rotors are additionally subject to dynamic deformations leading to the growth of a shaft axis straightness loss. The bigger is the rotor imbalance, the bigger is the dynamic deformation and the significant component of this imbalance can be an unwanted static deformation. The authors focus here exclusively on the problem of turbine eccentricity monitoring but the same problem may also concern some other types of rotating machinery transporting hot media like hot water pumps. In case of the need to monitor such machines the type of monitoring should be similar to the one used for turbines.

Keywords: turbine rotors, system for monitoring and eccentricity protection

W piśmiennictwie angielskim pojęcie *eccentricity*²⁾ oznacza dewiację od ustalonego wzorca lub normy i jest wykorzystywane na okoliczność dyskusji problemów technicznych dotyczących bądź to położenia, bądź też kształtu. W obszarze techniki pojęcie to może dotyczyć zarówno wyrobów statycznych (np. dla przewodu elektrycznego położenia żyły w izolacji), jak również jest wykorzystywane w przypadku opisu różnych dewiacji występujących w maszynach.

Niniejszy artykuł zajmuje się szczególną dewiacją maszyn wirnikowych.

W piśmiennictwie polskojęzycznym dla opisu grupy odstępstw od dobrego stanu technicznego stosowane są m.in. dwa pojęcia: *mimośrodowość* oraz *ekscentryczność*. Widoczna jest już tendencja ich wykorzystania na okoliczność dwóch różnych klas problemów technicznych. I tak, w przypadku maszyn wirnikowych o *mimośrodowości* mówi się, gdy środek obrotu jest przesunięty względem geometrycznej linii środka obracającego się elementu, np. koła zębatego, łożyska, koła pasowego czy sztywnego wirnika. O *mimośrodowości* mówi się także w przypadku wzajemnego położenia kilku osi, co do których oczekuje się, że powinny się pokrywać, a tak nie jest (np. osi łożysk utwierdzających wał sztywny, co jest jednoznaczne z brakiem współliniowości z osią tego wału, wzajemnego położenia osi wirnika silnika elektrycznego oraz osi jego stojana, wzajemnego położenia osi wirnika turbiny wodnej oraz osi komory, w której ten wirnik pracuje) lub też powinny pozostawać w określonej odległości od siebie (np. położenie rolek w walcarkach).

W przypadku maszyn wirnikowych możemy mieć do czynienia bądź to z wirnikami sztywnymi³⁾, bądź też elastycznymi. Życzeniowo oś wirnika powinna być prosta, natomiast pod wpływem różnych przyczyn ulega deformacji. Miarą statycznej deformacji wału/wirnika jest *ekscentryczność* ϵ . Deformacja ta jest szczególnie groźna w skutkach dla maszyn z wirnikami elastycznymi po osiągnięciu przez nie prędkości obrotowej bliskiej pierwszej częstotliwości drgań rezonansowych wirnika. W strefie obrotów rezonansowych wirniki podlegają dodatkowo odkształceniom dynamicznym prowadzącym do wzrostu utraty prostoliniowości osi wału. Ich deformacja dynamiczna będzie tym większa, im większa jest niewyważa wirnika, a znaczącym (w niektórych przypadkach dominującym) komponentem tej ostatniej może być niepożądana deformacja statyczna. W konsekwencji, kiedy osiągnięta zostaje strefa drgań rezonansowych wirnika, wzrost poziomu drgań prowadzący do dynamicznej deformacji jego kształtu jest skorelowany z zaawansowaniem jego ekscentryczności: wzrost drgań będzie mniejszy w przypadku małej ekscentryczności i duży w przypadku jej większych wartości. Taka dwuprzyczynowa deformacja osi, po przekroczeniu pewnej granicznej wartości deformacji sumarycznej, prowadzi na ogół do poważnego uszkodzenia maszyny.

Tak więc w języku polskim sugeruje się jednoznaczne używanie pojęć:

- *mimośrodowość* – dla tych problemów technicznych, w których nie ma miejsca wystarczająco dobre pokrywanie się osi podzespołów konstrukcyjnych z osią obrotu wirnika,
- *ekscentryczność* – dla tych problemów technicznych dotyczących długich wałów/wirników, dla których wymóg

¹⁾ Kontakt: Ryszard.Nowicki@vp.pl

²⁾ W języku łacińskim *eccentricus*, a w greckim *ékkentos*, od: eks – [s]poza, *kéntron* – środek, centrum.

³⁾ O wirniku mówi się, że jest sztywny, kiedy jego prędkość obrotowa jest co najmniej o 30% niższa od jego prędkości rezonansowej.

wystarczającej prostolinijności ich osi nie jest spełniony, a przyczyną pierwotnej deformacji nie są oddziaływania dynamiczne.

Monitorowanie ekscentryczności wirników jest ważnym elementem systemu nadzoru stanu technicznego dużych turbin parowych oraz turbin gazowych⁴⁾, a jej znaczenie wzrasta w przypadku turbosespołów podlegających częstym uruchomieniom i odstawieniom. O ekscentryczności można także mówić w odniesieniu do generatorów [1], gdyż ich wirniki mogą cechować się wrażliwością na zmianę temperatury wywołaną zmianą wzbudzenia i w tym przypadku ich czułość termiczna może być powtarzalna (tzn. powtarzające się wzrosty i obniżenia temperatury będą powodować powtarzalne zmiany kształtu) bądź też niepowtarzalna. Ocena wielkości statycznej deformacji wirnika przekłada się bezpośrednio na poziomy drgań maksymalnych w czasie stanów przejściowych (rozruch/wybieg, a w przypadku generatorów przez stan przejściowy należy rozumieć także dodatkowo zmianę jego obciążenia) oraz na ich poziom w warunkach pracy ustalonej, a zatem pośrednio znacząco wpływa na gotowość, niezawodność, sprawność i żywotność turbosespołu.



Rys. 1. Zróżnicowane zmiany wartości wektora drgań w stosunku do ich maksymalnej wartości dopuszczalnej

Na rysunku 1 pokazano na wykresie biegunowym dwie możliwe zmiany wektora drgań, z których jedna jest akceptowalna, nie przekracza bowiem wartości granicznej, a druga nieakceptowalna.

Ze względu na krytyczność tego pomiaru dla oceny prawidłowości stanu technicznego maszyny w warunkach stanów przejściowych (przede wszystkim w warunkach rozruchu) wymagania na okoliczność monitorowania ekscentryczności powinny

⁴⁾ Dla takich systemów bywa wykorzystywany skrót TSI = *Turbine Supervisory Instrumentation*.

być formułowane nie tylko w przypadkach zakupów nowych turbosespołów, ale także w przypadkach planowania retrofitów systemów nadzoru zainstalowanych w przeszłości i konieczności ich wymiany. W tym drugim przypadku powinien być brany pod uwagę także fakt postępu w technikach wykorzystywanych na rzecz nadzoru stanu technicznego, a także dobrze jest zweryfikować stopień poprawności pierwotnie zainstalowanego systemu w stosunku do współczesnych wymagań. Zdarza się bowiem, że dla niektórych pomiarów włączonych do TSI sposób ich pierwotnego wdrożenia nie odpowiada współczesnym wytycznym, a więc nie jest zrealizowany wystarczająco poprawnie i bywa, że problem poprawności dotyczy także pomiaru ekscentryczności.

Przyczyny ekscentryczności i jej minimalizowanie

Można wyróżnić pięć pojedynczych przyczyn statycznej deformacji wirnika, a mianowicie:

- pierwotne skrzywienie wału, będące konsekwencją procesu produkcyjnego lub transportu wału/wirnika do przedsiębiorstwa użytkownika,
- skrzywienie w konsekwencji mimośrodowości (nieosiowości),
- przejściową termiczną deformację wirnika, będącą konsekwencją jego anizotropii termicznej oraz obwodowego zróżnicowania pola temperatury medium,
- przejściową grawitacyjną deformację wirnika będącą konsekwencją długotrwałego oddziaływania siły ciężkości na wirnik pozostający w poziomym bezruchu,
- w przypadku generatorów zmiana prądu wzbudzenia powoduje zmianę pola temperatury wirnika.

Do deformacji statycznej prowadzi także dowolna kombinacja wymienionych przyczyn. Omówienie problematyki ekscentryczności i jej pomiaru zostanie ograniczone do wirników turbin.

Styczna deformacja wirnika może mieć miejsce w jednej płaszczyźnie (i wtedy przybiera formę łuku) lub też może przybierać bardziej złożoną formę przestrzenną. Ta pierwsza jest na ogół konsekwencją długotrwałego pozostawiania unieruchomionego wirnika w pozycji poziomej. Taka deformacja grawitacyjna, powodująca permanentne uwieszenie (ang. *sag*) wirnika, jest podobna w skutku do trwale odkształconej półki w bibliotece po zdjęciu z niej książek, którymi wcześniej była długo obciążona. Natomiast deformacja przestrzenna może być spowodowana zmianą stanu termicznego wirnika wywołaną szybką i znaczącą zmianą temperatury opływającego go medium (np. w wyniku podania na wirnik turbiny pary o niższej temperaturze) oraz anizotropią termiczną wirnika, różną w różnych przekrojach na jego długości. Deformacja termiczna ma charakter przejściowy, gdyż wyrównanie pola temperatur wewnątrz wirnika będzie prowadzić do powrotu jego kształtu bieżącego do kształtu pierwotnego, tzn. takiego, jaki miał miejsce przed zaistnieniem zmiany pola temperatury w otoczeniu wirnika.

Deformacja termiczna może także nastąpić w przypadku zatrzymania ruchu wirnika w korpusie wypełnionym gorącym medium. Dochodzi wtedy do zróżnicowania pola temperatur na obwodzie wirnika: w konsekwencji konwekcji temperatura

Przedział zmienności maksymalnych parametrów pary dla różnych turbin

Opis słowny	Zakres mocy [MW]	Przedział zmienności maksymalnego ciśnienia pary [Bar]	Przedział zmienności maksymalnej temperatury pary [°C]
Małe turbiny	0,5...2,0	10...30	260...400
Średnie turbiny	1,5...10	10...42	400...440
Duże turbiny (I)	4...100	42...62	400...482
Duże turbiny (II)	10...1000	62...166	440...566
Turbiny nadkrytyczne	>200	250...370	540...720

w górnej części korpusu jest wyższa niż w jego części dolnej, co powoduje szybsze schładzanie dolnej części wału i w konsekwencji jej szybsze skracanie niż części górnej. Efekt ten jest potocznie nazywany *kocim grzbietem* i może doprowadzić do zablokowania wirnika, jeśli deformacja będzie nieco większa niż luz między wirnikiem a korpusem (efekt taki w literaturze angielskiej zwie się *hog*)^{5),6)}. W przypadku dużych turbozespołów taka niebezpieczna deformacja wirnika może już zaistnieć przy różnicowaniu temperatury wynoszącym 3-4°C.

Koci grzbiet może być spowodowany nie tylko przez medium w części przepływowej turbiny. Podobny mechanizm deformacji wirnika może nieć miejsce także w przypadku podania pary do jej uszczelnień, wtedy kiedy wirnik pozostaje w pozycji spoczynkowej.

Efekt *kociego grzbietu* jest stosunkowo szybkim procesem. Już w ciągu kilku minut może dojść do deformacji wału, powodującej całkowite wykasowanie luzu promieniowego między wirnikiem a korpusem. Próba wprowadzenia wirnika na obroty w takim stanie powoduje uszkodzenia wewnątrz turbiny, a także prowadzi do uszkodzenia łożysk, gdyż kontakt wirnik-korpus uniemożliwia wznios czopów, niezbędny do wytworzenia filmu olejowego. W konsekwencji wymuszając obroty wirnika doprowadza się do pracy pary czop-łożysko w warunkach tarcia suchego.

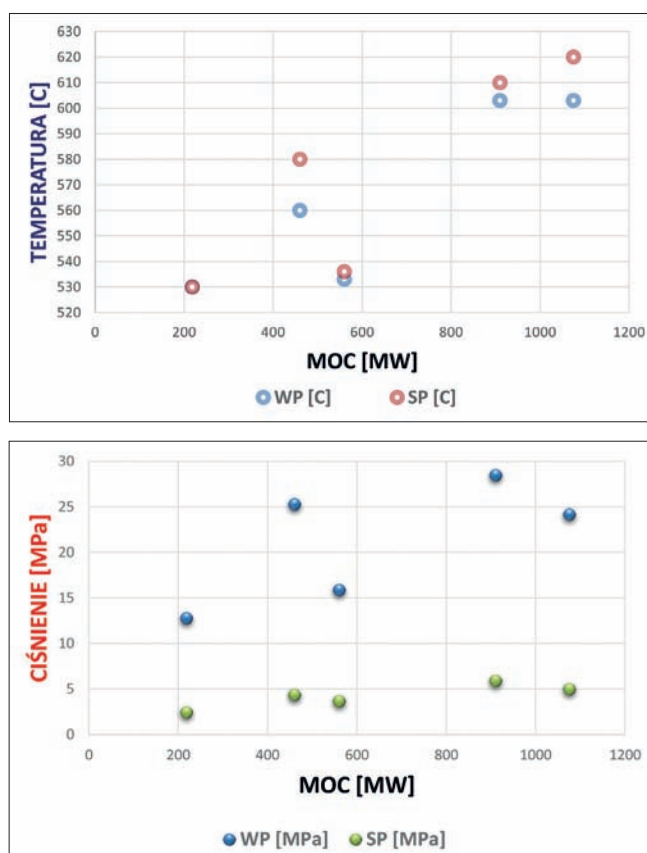
Efekt *kociego grzbietu*, podobnie jak dla wirnika, zachodzi także dla korpusu turbiny. Natomiast ze względu na fakt, że korpus typowo charakteryzuje się większą pojemnością cieplną niż umieszczony w nim wirnik, proces jego prężenia się jest wolniejszy niż ma to miejsce w przypadku wirnika. O ile deformacja statyczna wirnika powoduje w warunkach ruchu (na ogół) zwiększenie jego deformacji dynamicznej, o tyle korpus podlega jedynie deformacji statycznej. Tak więc, efekt *kociego grzbietu* wirnika stanowi zdecydowanie większe zagrożenie dla maszyny wirnikowej niż efekt *kociego grzbietu* jej korpusu.

Anizotropia termiczna wirnika, w przypadku zmiany pola temperatury otaczającego go medium, w podobnym stopniu przyczynia się do deformacji wirnika zarówno podczas jego nagrzewania jak i schładzania.

Deformacje grawitacyjna i termiczna różnią się tempem ich powstawania. O ile groźna deformacja termiczna może nastąpić już w ciągu kilku minut, o tyle dla podobnie zaawansowanej deformacji grawitacyjnej może być potrzebnych wiele dni, a nawet tygodni.

⁵⁾ Czasownik *hog* w języku angielskim oznacza *blokowanie*.

⁶⁾ Efekt *kociego grzbietu* może także wystąpić w przypadku odstawienia poziomych pomp transportujących gorące medium. O ekscentryczności można również mówić w przypadku pomp pionowych, ale w tym przypadku jest ona powodowana innymi przyczynami [2].



Rys. 2. Parametry pary (temperatura u góry i ciśnienie poniżej) dla stopni WP i SP wybranych turbozespołów użytkowanych w kraju

W tabeli 1 zestawiono wartości ciśnienia i temperatury pary dla turbin różnej mocy [3], a na rysunku 2 pokazano zestawienie parametrów temperaturowych i ciśnieniowych pary dla stopni WP i SP wybranych turbin parowych używanych w kraju. O ile wpływ ciśnienia pary na efekt ekscentryczności jest nieistotny, o tyle wartości skomentowania wydają się charakterystyki temperaturowe. Temperatura pary jest typowo wyższa od 520-530°C i dla współczesnie budowanych bloków energetycznych na parametry nadkrytyczne może osiągać wartości nawet o ~200° wyższe. O ile dla turbin starej generacji (na rys. 2 ~220 MW i ~560 MW) temperatury pary stopni WP i SP prawie się nie różnią, o tyle dla współczesnych turbozespołów na parametry nadkrytyczne, temperatury pary stopni SP są wyższe o ~10-20° od temperatur pary stopni WP.

Zapobieganie ekscentryczności wirnika zatrzymywanej turbiny, a więc wirnika, który jest w stanie znaczącego nagrzania, jest realizowane poprzez jego obracanie z pomocą doraźnie włą-

czanej obracarki przed ostatecznym zatrzymaniem^{7),8)}. W podobny sposób realizuje się prostowanie wirnika odkształconego grawitacyjnie, a także zapobiega się jego deformacji w procesie zwiększenia temperatury medium wpływającego wirnik. W tym przypadku przejście turbiny ze stanu postojowego (najczęściej jest to stan zimny wirnika) do pracy w warunkach roboczych jest także poprzedzone tzw. pracą na obracarce⁹⁾. Systematyczne zwiększanie temperatury wpływającego wirnik medium, gdy się on obraca, skutkuje jego lepszą stabilizacją termiczną i w konsekwencji szybciej prowadzi do prostoliniowości osi wału. Po osiągnięciu wymaganej prostoliniowości można przystąpić do zwiększania prędkości obrotowej. Jeśli wirnik turbiny jest dostatecznie dobrze wyważony, to przejściu przez rejon częstotliwości rezonansowej towarzyszyć będą stosunkowo niewielkie deformacje dynamiczne.

Pomiar ekscentryczności

Na rysunku 3 pokazano dwa rodzaje pomiaru ekscentryczności, a mianowicie pomiar międzyszczytowy ε_{p-p} (tzn. pomiar PEAK-to-PEAK) oraz pomiar połowiczny ε_{0-p} (tzn. pomiar ZERO-PEAK). W tym drugim przypadku, bardziej poprawne byłoby rozróżnienie dwóch różnych pomiarów ε_{0-p} , tzn. ε_{0-p+} dla szczytowego położenia wirnika, która to wielkość (w przypadku pionowej orientacji czujnika) w stosunku do ε_{0-p} jest nieznacznie pomniejszona o chwilową elastyczną deformację grawitacyjną oraz ε_{0-p-} , która to wielkość w stosunku do ε_{0-p} jest nieznacznie

⁷⁾ Ostateczne zatrzymanie wirnika jest na ogół warunkowane schłodzeniem turbiny do temperatury poniżej 100°C.

⁸⁾ Celowe jest monitorowanie przez system nadzoru rzeczywistych obrotów wirnika turbiny. Miały miejsce przypadki, w których następowało uszkodzenie w przekazywaniu napędu od silnika obracarki na wirnik turbiny. W konsekwencji mimo pracy silnika wirnik turbiny się nie obracał. Monitorowanie poprawności zachowania się turbiny w reżimie pracy na obracarce jest łatwo zaimplementować w większości profesjonalnych systemów monitorowania i zabezpieczeń. Monitoring ten praktycznie nie zwiększa kosztów TSI, realizowany może być bowiem z wykorzystaniem zainstalowanych czujników oraz modułów i tak znajdujących się w TSI.

⁹⁾ Współczesne turbiny mają konstrukcję umożliwiającą ciągłą pracę obracarki z niską prędkością obrotową. W przeszłości turbiny nie posiadały układu oleju lewarowego, co nie sprzyjało pracy obracarki w trybie ciągłym i w konsekwencji wykorzystywane były obracarki pracujące w reżimie krokowym. Bezpośrednio po odstawieniu turbiny obracarki takie dokonywały obrotu wirnika o 180° i zatrzymywały się na jakiś czas w celu ciągłej kompensacji ugięcia grawitacyjnego zachodzącego powtarzalnie, ale z przeciwną. Taki periodyczny proces pracy obracarki trwał do czasu wystarczającego schłodzenia wirnika.

powiększona o chwilową elastyczną deformację grawitacyjną. Natomiast z praktycznego punktu widzenia niezbędny i wystarczający jest pomiar ε_{p-p} .

W przeszłości monitorowanie ekscentryczności było realizowane głównie dla stopni WP turbin parowych. Obecnie, w przypadku turbin o wysokiej sprawności termodynamicznej, co osiąga się m.in. poprzez minimalizację wszelkich luzów, w tym także luzów promieniowych między łopatkami wirnika a korpusem, można się liczyć z sytuacją, w której stosunkowo nieznaczna deformacja wirnika może doprowadzić do wykasowania luzów. Niezmiennie dąży się także do obniżenia kosztów produkcji turbiny. Dążenie to pozostaje w korelacji z ilością materiału potrzebnego do jej wyprodukowania i może powodować obniżenie sztywności konstrukcji. Tak więc w przypadku wysokosprawnych turbozespołów dużej mocy pomiar ekscentryczności może być także zasadny dla wirników pozostałych stopni.

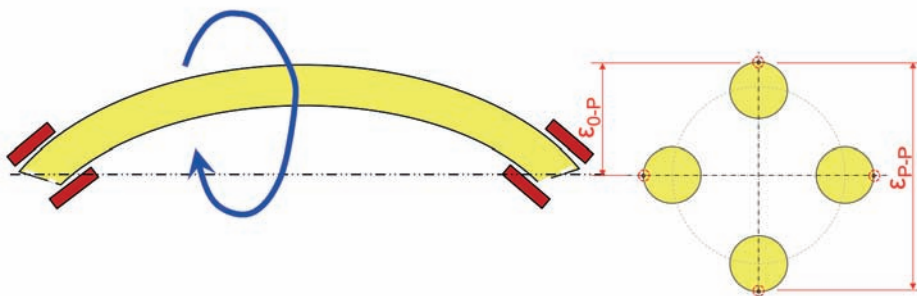
Monitorowanie ekscentryczności w podobnym stopniu jak dla dużych turbin parowych jest także ważne dla nadzoru stanu technicznego turbin gazowych.

Pomiar ekscentryczności w standardach

Dla turbin parowych mniejszej mocy nie ma obligatoryjnego wymogu stosowania monitorowania ekscentryczności. Standard [4], precyzujący wymagania systemów monitorowania i zabezpieczeń dla maszyn wykorzystywanych w obszarze O&G, nie uwzględnia ekscentryczności w bazowym zestawie pomiarów dla przemysłowych turbin parowych. Turbiny przemysłowe cechują się na ogół krótkimi wirnikami, często o stosunkowo dużej średnicy. Takie wirniki charakteryzują się słabą podatnością na znaczne deformacje statyczne¹⁰⁾ (znaczne, tzn. takie, w rezultacie których mogłoby dojść do wykasowania luzu promieniowego między wirnikiem a korpusem turbiny).

Pomiar ekscentryczności powinien być natomiast bezwzględnie realizowany dla turbozespołów pracujących w elektrowniach zawodowych. Nie ma standardów, które by jednoznacznie

¹⁰⁾ Nie zmienia to natomiast faktu, że nawet w odniesieniu do takich turbin wykorzystywanie monitorowania ekscentryczności może skutkować przyspieszonym rozpoznaniem groźnego stanu awaryjnego. W kraju miał miejsce przypadek uszkodzenia turbiny przemysłowej w początkowej fazie jej rozruchu. Komisja awaryjna skonkludowała, że w przypadku posiadania zabezpieczenia na ekscentryczność doszłoby do szybszego zadziałania systemu zabezpieczeń i odstawienia maszyny. W konsekwencji zakres uszkodzeń byłby znacznie mniejszy i nakłady finansowe poniesione na naprawę byłyby również kilkakrotnie niższe.



Rys. 3. Statyczna deformacja wału oraz dwa rodzaje pomiaru jego ekscentryczności

określały wymogi jego stosowania i określały dopuszczalne wartości graniczne. Tak więc w przypadku turbin kwestia realizacji takiego pomiaru, a jeśli tak, to również wybór miejsca instalacji czujnika ekscentryczności oraz określenie wartości alarmowych, pozostają w gestii producenta turbiny. Mimo to instalacją takiego czujnika (lepiej: możliwie poprawną instalacją!) powinien być przede wszystkim zainteresowany właściciel turbiny¹¹⁾. Współcześnie inwestorzy są zainteresowani turbinami o możliwie wysokiej sprawności. Jedną z dróg prowadzących do jej zwiększenia jest minimalizacja luzów, tak więc monitorowanie deformacji statycznej wirnika powinno być bezwzględnie stosowane.

Wymagania dla realizacji pomiaru ekscentryczności

Podstawowym warunkiem dla realizacji pomiaru ekscentryczności jest stabilny ruch wirnika w łożysku przy prędkości obrotowej wystarczająco niższej od jego pierwszej częstotliwości drgań własnych.

W przypadku łożysk ślizgowych stabilny ruch wirnika jest możliwy po osiągnięciu (lepiej: po przekroczeniu) takiej jego granicznie minimalnej prędkości obrotowej, która umożliwi ukształtowanie się stabilnego filmu olejowego. W przypadku braku stabilności filmu, pomiary ekscentryczności mogą być obciążone błędem wynikającym ze zmienności położenia czopa w łożysku.

Brak stabilności położenia czopa może być spowodowany kilkoma przyczynami:

- prędkość obrotowa wirnika niższa niż wymieniona minimalna prędkość graniczna (wartość granicznej prędkości obrotowej może podlegać drobnej fluktuacji w funkcji czasu, może być bowiem uzależniona od temperatury oleju, jego lepkości etc.);
- sposób podania oleju lewarowego (w niektórych przypadkach mają miejsce pulsacje ciśnienia w systemie oleju lewarowego doprowadzanego do łożysk turbiny, np. powodowane zastosowaniem w tym systemie pomp tłokowych);
- wymuszeniami ze strony obracarki (w przypadku większych turbozespołów mechanizm obracarki jest zlokalizowany typowo w rejonie stopnia niskiego ciśnienia, tak więc można optymistycznie założyć, że wpływ działania tego mechanizmu na zmienność położenia wirników turbin WP i SP, a w konsekwencji na pomiar ekscentryczności, będzie znikomy).

W przypadku pomiarów ekscentryczności realizowanych z pomocą bezkontaktowych czujników wiropędowych (co współcześnie jest typowym rozwiązaniem technicznym) niezbędne jest również właściwe przygotowanie ścieżki pomiarowej¹²⁾.

¹¹⁾ Znane są przypadki zainstalowania i uruchomienia już po roku 2000 nowych turbin parowych o mocy ponad 200 MW, których system TSI nie uwzględniał pomiaru ekscentryczności. Spowodowane to było: (a) brakiem sformułowania explicite wymogu zastosowania tego rodzaju monitorowania w opracowanym przez inwestora SIWZie [5], (b) negatywnymi doświadczeniami producenta turbiny na okoliczność roszczeń gwarancyjnych które go dotknęły przy realizacji projektu w innej elektrowni; w konsekwencji wykorzystano utomną redakcję wymagań formalnych w SIWZi i podjął decyzję o niewłączeniu pomiaru ekscentryczności do TSI.

¹²⁾ Podobnie jak jest to wymagane dla pomiarów drgań wirnika.

Powinno się ono cechować poziomem runoutu, który w przybliżeniu jest o rząd niższy od maksymalnie dopuszczalnej wartości ekscentryczności. W czasie długotrwałego eksploataowania maszyny może się zdarzyć, że poziom runoutu w określonej płaszczyźnie pomiarowej będzie podległ zmianie (np. w konsekwencji pojawienia się magnetyzmu rezydualnego), co może skutkować zmianą wskazań czujnika ekscentryczności (w konsekwencji pogorszenia stosunku sygnału do szumu). Zmiana poziomu runoutu może mieć także miejsce po stosunkowo krótkim czasie pracy maszyny. W takim przypadku może być ona spowodowana zmianą ścieżki pomiarowej obserwowanej przez czujnik ekscentryczności i wystąpi, gdy charakterystyka runoutu ścieżki zmienia się poosiowo. W konsekwencji wzajemna zmiana położenia czujnika w stosunku do wykorzystywanej ścieżki pomiarowej na wale (co może być konsekwencją zmiany wydużeń względnych: wirnik – korpus) może powodować zmianę wartości pomiaru dla fizycznie takiej samej ekscentryczności wirnika.

Praktyka pomiaru ekscentryczności

Wirnik może być osadzony w łożyskach tak, jak to pokazano na rysunkach 3 i 4A, tzn. z obu stron podparty łożyskami lub też podparty łożyskiem jednostronnie, a z drugiej utwierdzony na sprzęgle (rys. 4B). W przypadku turbin parowych nie ma możliwości zlokalizowania czujnika wykorzystywanego do pomiaru ekscentryczności w części środkowej wirnika, a więc tam, gdzie jego deformacja oraz ryzyko przycierania o korpus są największe (przykładową deformację osi wirnika pokazano linią granatową na rys. 4). W konsekwencji pomiar musi być prowadzony bądź to w bloku przednim (tzn. przed łożyskiem #1, jak to pokazuje oś a-a na rys. 4) lub na końcu wirnika WP (tzn. w rejonie sprzęgła, czyli przed łożyskiem #2, jak to pokazuje oś b-b na rys. 4B). Czym czujnik będzie usytuowany dalej od łożyska, tym większa będzie wrażliwość realizowanego z jego pomocą pomiaru.

Z lewej strony rysunku 4A pokazano zalecenie firmy GE mówiące, że lokalizacja czujnika pomiaru ekscentryczności powinna być w odległości nie mniejszej niż 46 cm od łożyska. Czujnik powinien być zorientowany w pionie. Z rysunku wynika także oczywisty wniosek, że lokalizacja czujnika w różnej odległości od łożyska wpływać będzie na wartość mierzonej ekscentryczności oraz wymaga określenia stosownej dopuszczalnej wartości granicznej pomiaru.

Na rysunku 4 wał wirnika WP pokazano jako monolit, natomiast często część tego wału znajdująca się w bloku przednim jest dokręcana do wirnika WP. Takie rozwiązanie konstrukcyjne wiąże się z ryzykiem nieosiowości połączenia obu wałów. W konsekwencji ta nieosiowość (efekt zwany po prostu „korpą”) będzie wpływać na wynik pomiaru ekscentryczności realizowanego w przekroju a-a (zaszumienie pomiaru spowodowane „korpą” typowo przyczynia się do zwiększenia wartości pomiaru ekscentryczności) i pomiar w przekroju b-b będzie jakościowo lepszy, gdyż nie podlega tego typu zaszumieniu.

W przeszłości pomiary zarówno dynamiki jak i deformacji wirnika były realizowane z pomocą czujników *kontaktowych*, tzn. z pomocą takich technik pomiarowych, które wykorzystywały czujniki pozostające w bezpośrednim kontakcie z wałem. Pomiar dynamiki wirnika był realizowany przy pomocy rozwiązania

zwanego *shaftrider*¹³⁾, natomiast na rzecz prowadzenia pomiaru ekscentryczności szereg turbin było przygotowanych konstrukcyjnie do zastosowania mierników zegarowych. Takie rozwiązanie pokazano na rysunku 5 na przykładzie turbiny o mocy kilkudziesięciu MW. Na rysunku 5A zaznaczono pierścieni na wale (znajdujący się w odległości około 0,5 m od łożyska), z którym współpracuje „popychacz” umożliwiający podłączenie czujnika zegarowego. Ten ostatni pokazano na rysunku 5B. Na rysunku 5A, na prawo od popychacza widoczny jest także czujnik zbliżeniowy wykorzystywany do bezkontaktowego pomiaru ekscentryczności, który został zainstalowany w ramach unowocześniania systemu monitorowania tego turbozespołu. Pokazana na rysunku możliwość zastosowania czujnika zegarowego równoległe z pomiarem realizowanym z pomocą czujnika zbliżeniowego umożliwia łatwą weryfikację poprawności pomiaru realizowanego techniką bezkontaktową.

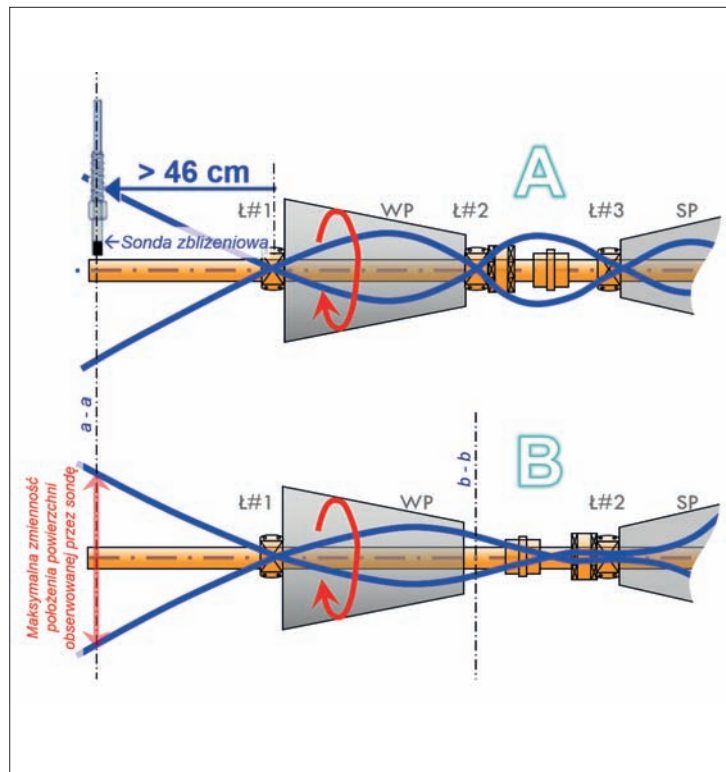
W przypadku turbozespołów wielokorpusowych pomiar ekscentryczności wirnika WP jest realizowany bądź to w rejonie bloku przedniego turbiny, bądź też w rejonie sprzęgła wirników WP i SP.

Z tym drugim przypadkiem mamy do czynienia np. w turbinach skonstruowanych w Rosji o mocy ~200 MW. Na rysunku 6A pokazano przykładowo sposób realizacji montażu czujnika pod pokrywą łożyskową dla takiej turbiny.

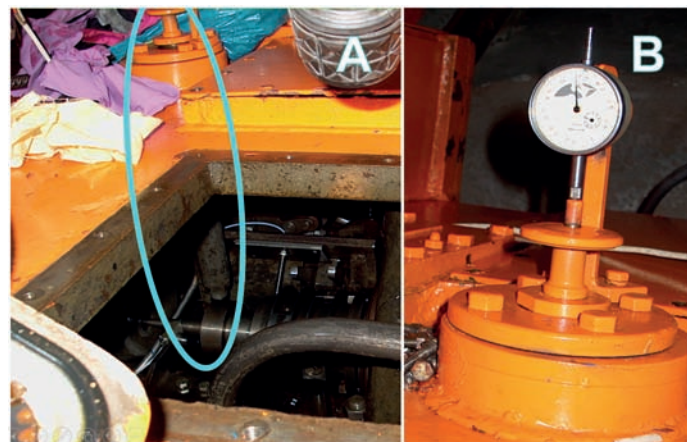
Jak już wspomniano, niektóre turbiny posiadają wirniki podparte łożyskiem jednostronnie i takie rozwiązanie konstrukcyjne jest m.in. wykorzystywane dla wymienionej turbiny o mocy ~200 MW. W przypadku dużych drgań wirnika WP dochodzi do uszkodzenia uszczelnień od strony sprzęgła, co w konsekwencji prowadzi do poważnych przecieków pary do przestrzeni pod pokrywą łożyskową. Przecieki te nie tylko przyczyniają się do obniżenia sprawności termodynamicznej turbozespołu, ale także stanowią poważne zagrożenie dla wszystkich czujników zainstalowanych pod pokrywą węzła łożyskowego między stopniami WP i SP¹⁴⁾, wykorzystywanych w celu nadzoru stanu technicznego turbiny. Współcześnie stosowane w tym celu systemy czujników wiropędowych mają różną konstrukcję i w konsekwencji różnicowane ograniczenie na maksymalną temperaturę środowiska, w którym mogą być zastosowane – co również dotyczy czujnika ekscentryczności. Czujniki powinny być zatem tak dobrane, aby cechowały się wystarczająco dużą niezawodnością w przypadku możliwego podniesienia się pola temperatur w przestrzeni ich zastosowania, ewentualna konieczność wymiany uszkodzonego czujnika w przypadku montażu

¹³⁾ Na *shaftrider* składał się układ mechaniczny, który życzeniowo pozostawał w stałym kontakcie ślizgowym z wałem, do którego był przymocowany czujnik sejsmiczny.

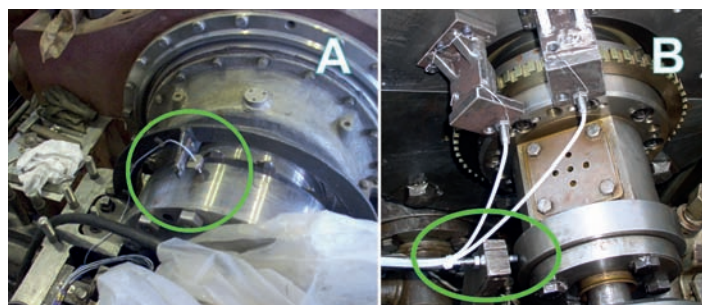
¹⁴⁾ Znany jest przypadek turbiny o mocy ~200 MW, dla którego temperatura pokrywy łożyskowej osiągała miejscowo 140°C. Natomiast w tym rejonie turbiny, pod pokrywą, oprócz czujnika ekscentryczności są także instalowane inne ważne czujniki systemu nadzoru stanu technicznego turbozespołu, a mianowicie: czujniki drgań względnych XY, czujniki nadzoru łożyska oporowego (tzn. przesuwu osiowego) oraz czujnik znacznika fazy (Keyphasor®).



Rys. 4. Zróżnicowanie podparcia wirnika WP oraz lokalizacja czujnika ekscentryczności w stosunku do stojaka łożyskowego



Rys. 5. Przygotowanie turbiny do bezpośredniego pomiaru ekscentryczności z pomocą czujnika zegarowego

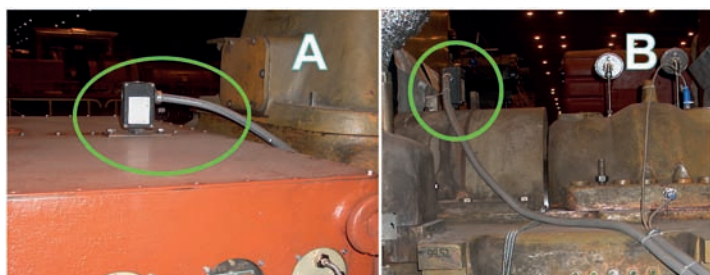


Rys. 6. Pomiary ekscentryczności przy pomocy czujników mocowanych pod pokrywą łożyska: (A) czujnik pionowy (B) czujnik poziomy

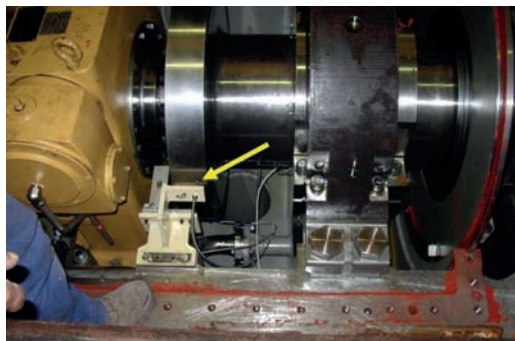
pod pokrywą wiąże się bowiem najczęściej z koniecznością odstawienia turbiny i (na ogół¹⁵⁾ przeprowadzeniem kłopotliwego demontażu pokrywy łożyskowej.

W przypadku użytkowanych w Polsce turbin o mocy ~380 MW pomiar ekscentryczności jest prowadzony zarówno z przodu jak i z tyłu wirnika WP, a sposób zaimplementowania tego pomiaru pokazano na rysunku 7. W tym przypadku zastosowano „montaż zewnętrzny” czujników. Montaż taki umożliwia, w przypadku uszkodzenia czujnika ekscentryczności, przeprowadzenie jego wymiany bez demontażu pokrywy, co jest możliwe nawet na pracującej maszynie¹⁶⁾. Deformacja statyczna pokryw (powodowana przede wszystkim stabilizacją termiczną podzespołów turbiny), do której są mocowane obudowy czujników (na rys. 7 pokazano obudowę TYP 31000) wraz z sondami wirowymi mierzącymi ekscentryczność wirnika powoduje co prawda niewielką zmianę gap'u (podobnie jak będzie go nieznacznie zmieniać zdemontowanie i ponowne zamontowanie uchwytu z sondą), jednakże niewielka zmiana w pozycjonowaniu sondy pomiarowej nie jest istotna dla realizowanego pomiaru, gdyż pomiar prowadzony jest dla każdego obrotu wirnika i zmiana gap'u w przedziale liniowej dynamiki pracy czujnika nie wpływa na jego dokładność.

Jak już wspomniano, w przypadku wysokosprawnych turbin zasadnym może być monitorowanie ekscentryczności wirników stopni SP i LP¹⁷⁾. Przykład takiej aplikacji pokazano na rysunku 8 (czujnik pomiaru ekscentryczności wskazuje strzałką).



▲ Rys. 7. Pomiar ekscentryczności dla turbin 18K370 (A) blok przedni (B) za korpusem WP



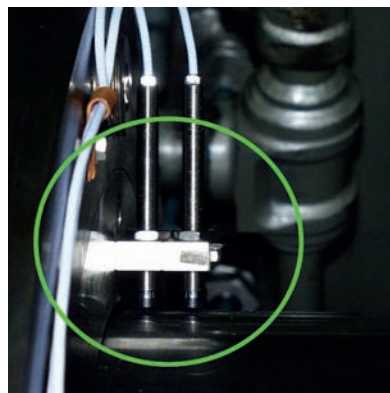
▶ Rys. 8. Pomiar ekscentryczności wirnika LP turbiny produkcji GE

W przypadku turbin większej mocy, w celu zwiększenia niezawodności pomiaru ekscentryczności, zaleca się wykorzystywanie czujnika redundancyjnego. Przykład takiej instalacji (wariant montażu – pod pokrywą) dla turbozespołu o mocy ~700 MW pokazano na rysunku 9.

¹⁵⁾ „Na ogół” bowiem w przypadku niektórych turbin ich producenci wykonują w pokrywach łożyskowych „okna rewizyjne” umożliwiające dostęp do przestrzeni pod pokrywą bez konieczności jej całkowitego demontażu jak to pokazano w [6].

¹⁶⁾ Możliwość taka jest warunkowana zastosowaniem tzw. *bezkontaktowej sondy rewersyjnej* zamocowanej w uchwycie mocowanym powtarzalnie do pokrywy łożyskowej.

¹⁷⁾ Pomiary ekscentryczności nie tylko dla wirników WP są realizowane np. przez firmy GE oraz MHPS.



Rys. 9. Pomiar ekscentryczności dla turbozespołu o mocy ~700 MW

Wybrane szczegóły na okoliczność optymalnej instalacji sondy wykorzystywanej do pomiaru ekscentryczności zawarto w [7].

Zakończenie

Stosowanie turbozespołów na nadkrytyczne parametry pary zwiększa wymagania co do poprawności wdrażania monitorowania ekscentryczności. W artykule omówiono wymagania i pokazano przykłady rozwiązań tradycyjnych wykorzystywanych w przeszłości przede wszystkim dla wirnika stopnia WP. Współcześnie, ze względu na maksymalizowanie sprawności termodynamicznej turbin, monitorowanie ekscentryczności winno być również wdrażane dla pozostałych stopni, a to ze względu na zmniejszone luzy promieniowe i w konsekwencji zwiększone ryzyko wystąpienia przytarć w przypadku deformacji kształtu wirnika.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Zawoysky R.J., Genovese W.M., *Generator Rotor Thermal Sensitivity – Theory and Experience*, “GE Power Systems Schenectady”, NY, GER-3809, SEP 2002.
- [2] Blackman B., *Vertical Pump Repair and Upgrade Considerations*, <https://www.pumpsandsystems.com/>, Pump & Systems 2012-03-15 <https://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/vertical-turbine-pumps/vertical-pump-repair-and-upgrade-considerations>
- [3] Latcovich J., Astrom T., Frankhuizen P., Fukushima S., Hamberg H., Keller S., *Maintenance and Overhaul of Steam Turbines*, International Association of Engineering Insurers, 38th Annual Conference – Moscow 2005, paper IMIA – WGP 42 (05).
- [4] API STD 670, *Machinery Protection Systems*, 5th edition, Nov. 2014.
- [5] Nowicki R., *Krytyczne uwagi do SIWZów dotyczących bloków energetycznych w zakresie: nadzór stanu technicznego*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2017, nr 11, s. 31-40.
- [6] Nowicki R., *Czarny Humor UR – Odcinek 4: PRAWIE – czyni znaczącą różnicę także w nadzorze maszyn wirnikowych*, „Służby Utrzymania Ruchu” 2018, nr 1(69), s. 32-36, ISSN 1896-0677.
- [7] *Proper Eccentricity Probe Location*, ORBIT, Dec. 1990, p. 27-29.

