

Rola znacznika fazy w systemach nadzoru stanu technicznego

Ryszard Nowicki

Skróty

- SD – System Diagnostyki;
- ST – Stan Techniczny;
- SMiZ – System Monitorowania i Zabezpieczeń;
- UR – Utrzymanie Ruchu.

1. Wprowadzenie

Dla maszyn, dla których wykorzystywane jest utrzymanie ruchu bazujące na stanie technicznym (=ST) bardzo ważną rolę odgrywa znacznik fazy. Z tego względu zarówno w przenośnych przyrządach diagnostycznych umożliwiających akwizycję sygnałów dynamicznych (np. drgania mechaniczne, pulsacje ciśnienia, pomiary strumienia magnetycznego w szczelinie), jak i w nowoczesnych stacjonarnych systemach nadzoru ST możliwość akwizycji fazy jest funkcjonalnością obligatoryjną.

W artykule skoncentrowano się na prezentacji zastosowań znacznika przede wszystkim dla agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi i objętych nadzorem ST online (oraz w podobnym zakresie dla generatorów). Szereg z przedstawionych zastosowań na poziomie analiz diagnostycznych może być również zrealizowany w oparciu o sprzęt przenośny.

W [1] pokazano strukturę i omówiono główne komponenty systemu wspomaganego nadzoru ST. Omawiana w niniejszym artykule problematyka dotyczy systemu monitorowania i zabezpieczeń (=SMiZ) oraz systemu diagnostyki (=SD) tej struktury (a więc poczynając od warstwy najniższej, tzn. czujników, i kończąc na wspomaganym eksperckim systemie diagnostyki).

2. Wykorzystywane czujniki

W celu akwizycji sygnału fazowego mogą być wykorzystywane różne czujniki. W przypadku systemów stacjonarnych są to najczęściej czujniki wirowe lub czasami czujniki magnetyczne.

Czujniki wirowe są wykorzystywane w systemach monitorowania również do realizacji pomiarów drgań (np. względnych wirnika) oraz pomiarów quasi-statycznych (np. monitorowanie położenia wału w łożysku oporowym, do pomiaru statycznej deformacji wału, czyli tzw. ekscentryczności). Dla pracy wymienionych czujników na ogół niezbędne jest przygotowanie ścieżki pomiarowej na wale.

W przypadku przenośnych SD preferowane są czujniki optyczne [2] (współcześnie: przede wszystkim laserowe), a przygotowanie wału do współpracy z czujnikiem może być dla wielu maszyn dość łatwo zrealizowane przed przystąpieniem do realizacji badań. Zdarzają się jednak agregaty, które mają obudowane wały i sprzęgła i w takich przypadkach pomiary okazjonalnie wymagają specjalnego przygotowania.

Streszczenie: Celem publikacji jest przedstawienie ważności wykorzystywania referencyjnego pomiaru fazy w przypadku ważniejszych agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi, a więc takich, które są objęte systemem nadzoru stanu technicznego online. W kolejnych częściach omówiono (a) podstawowe zasady instalacji tego czujnika na maszynie oraz wymagane w tym zakresie przygotowanie maszyny do instalacji, (b) sposób wykorzystania sygnału referencyjnego na poziomie systemu monitorowania i zabezpieczeń w przypadku agregatów wirnikowych oraz łokowych oraz (c) zakres wykorzystania sygnału referencyjnego na poziomie systemu wspomaganego wnioskowania diagnostycznego o stanie technicznym.

Słowa kluczowe: silnik elektryczny, referencyjny sygnał fazowy, monitorowanie online, zabezpieczenia, diagnostyka techniczna

🇬🇧 ROLE OF KEYPHASOR SIGNAL IN THE CONDITION MONITORING SYSTEMS

Abstract: A goal of the paper is a presentation of application phase reference signal (Keyphasor[®]) for more important aggregates driven by electric motors, and covered by online Condition Monitoring System. The following aspects are discussed in the paper: (a) basic rules of the transducer installation on a machine, and requested rotor system preparation for proper transducer operation, (b) functionalities of online Condition Monitoring and Protection Systems that need the phase reference signal; these aspects are discussed separately for rotor machines and reciprocating compressors (c) formats of diagnostic data that unconditionally need the phase reference signals for diagnostic inference.

Keywords: electric motors, phase reference signal, online monitoring, protections, technical diagnostics

Ze względu na możliwość zakłócenia pracy czujników optycznych ze strony środowiska, nie są one stosowane do akwizycji referencyjnego sygnału fazowego w systemach online.

3. Lokalizacja znacznika fazy

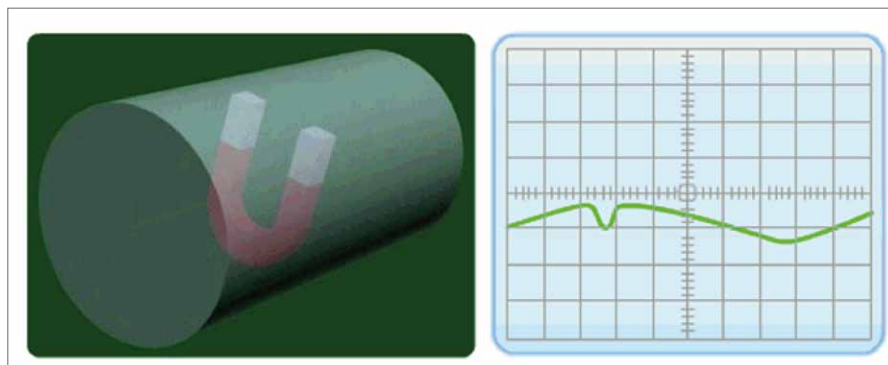
Zgodnie ze standardem [3] zaleca się, aby czujnik znacznika fazy (noszący również w żargonie diagnostycznym nazwę „Keyphasor[®]”) był zlokalizowany na wale napędzającym, tzn. współpracował np. z wałem silnika, wałem wyjściowym przekładni etc.

zamocowany dodatkowy płaski element metalowy (powodujące raz na obrót wału krótkotrwałe zmniejszenie odległości między czujnikiem a obserwowaną powierzchnią wału).

Dla pomiarów drgań wału na ogół niezbędne jest przygotowanie jego powierzchni do współpracy z czujnikiem tak, aby stosunek sygnału do szumu (zwanego runoutem) był powyżej wymaganego minimum. Dla znacznika fazy na ogół nie jest wymagane przygotowanie ścieżki pomiarowej. W niektórych sytuacjach można sobie nawet pozwolić na rezygnację z przygotowania wału. Jest to możliwe wtedy, gdy sygnał runoutu posiada jeden, wystarczająco znaczący, pik w czasie obrotu wału o 360° , tak jak to pokazano na rys. 4.

Na rys. 5 zaprezentowano przykłady zabudowania znacznika fazy oraz czujników XY (służących do pomiarów drgań względnych wału oraz średniego położenia czopu w łożysku) dla dwóch silników. W obu przypadkach czujnik fazy jest zainstalowany po stronie napędowej (=DE) wału silnika. Zwraca się uwagę na fakt, że o ile czujniki XY są zlokalizowane w jednej płaszczyźnie (prostopadłej do osi wału), o tyle czujnik znacznika fazy musi być zlokalizowany w płaszczyźnie osiowo przesuniętej tak, aby współpracujący z nim znacznik na wale nie zakłócał pomiarów drgań realizowanych czujnikami XY. Na fotografiach widoczne jest jego usytuowanie w płaszczyźnie nieco bliższej sprzęgła, niż ma to miejsce dla płaszczyzny pomiarów XY.

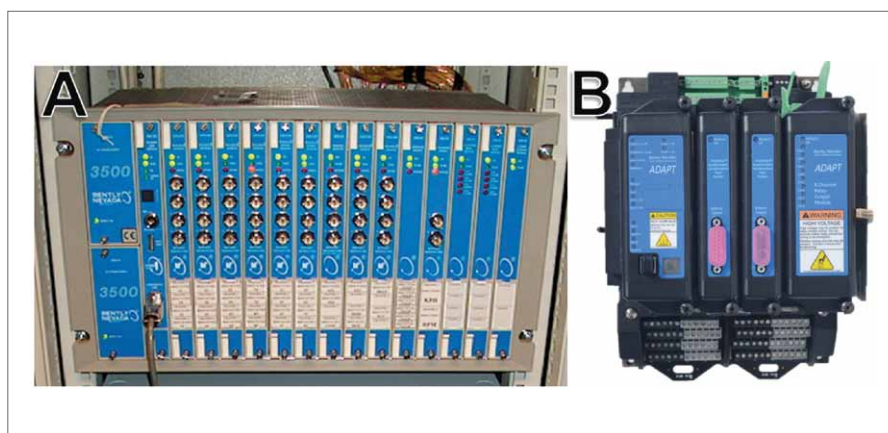
Przykładowa zabudowa czujników znacznika fazy jest także widoczna na rys. 3. I tak na rys. A widoczne są 2 czujniki, z których ten drugi jest czujnikiem redundancyjnym. Czujnik redundancyjny jest wykorzystywany w przypadku maszyn o wysokim stopniu krytyczności, dla których utrata sygnału znacznika fazy może wpływać na utratę poprawności działania zabezpieczenia maszyny i/lub na poprawność działania SD. Na rys. B widoczny jest czujnik zamocowany bezpośrednio do uchwyty bez dodatkowego zabezpieczenia kabla czujnikowego – taki montaż jest akceptowany w przypadku mocowania czujnika wewnątrz maszyny (np. pod pokrywą łożyskową, wewnątrz przekładni czy wewnątrz sprzężarki tłokowej – vide rys. 8).



Rys. 4. Wykorzystanie runoutu w celu generacji referencyjnego sygnału fazowego



Rys. 5. Przykłady zainstalowania czujników znacznika fazy oraz czujników XY na silnikach łożyskowych ślizgowo z pomocą obudów (A) TYP 21000 oraz (B) TYP 31000/32000



Rys. 6. Przykłady współczesnych SMiZ stanu technicznego

4. Sygnały i ich estymaty w systemach monitorowania

O ile w przypadku pojedynczego czujnika podłączonego do systemu DCS system ten dokonuje pojedynczego pomiaru, o tyle w przypadku czujników podłączonych do SMiZ ST możemy spotkać się z czujnikami generującymi nie jeden, a dwa sygnały, z których jeden jest sygnałem quasi-statycznym, a drugi dynamicznym (a więc odpowiada jakiejś formie drgań). Do takiej grupy czujni-

ków należą ww. wiroprowadowe czujniki bezkontaktowe.

Systemy monitorowania charakteryzują się zróżnicowanymi możliwościami w zakresie liczby realizowanych pomiarów estymat sygnałów dynamicznych. W przypadku systemów najprostszych ograniczają się one do pomiaru sumarycznej energii drgań dla jakiegoś pasma sygnału (np. normowego 10–1000 Hz lub w przypadku systemów nieznacznie silniejszych pasma konfigurowanego

w systemie monitorowania zgodnie z potrzebami aplikacji z pomocą filtrów górno- i dolnoprzepustowego).

W przypadku bardziej zaawansowanych systemów generowana jest większa liczba estymat sygnałów, a wyznaczenie szeregu z nich jest możliwe jedynie w przypadku posiadania referencyjnego sygnału znacznika fazy. Poniżej zostały omówione przykładowe estymaty sygnału, wyznaczenie których jest uwarunkowane fazowo i realizowane na poziomie SMiZ.

4.1. Zróznicowanie systemów monitorowania

Na rys. 6 pokazano przykładowo dwa systemy monitorowania dedykowane aplikacjom o zróznicowanych potrzebach w zakresie liczby pomiarów oraz sposobu przetwarzania sygnałów. System „A” (SYSTEM 3500) jest systemem o znacznym stopniu integracji (umożliwia podłączenie kilkudziesięciu czujników do pojedynczej kasety). System „B” (SYSTEM 3701/ADAPT) jest systemem typu rozproszonego (umożliwia podłączenie do kilkunastu czujników sygnałów dynamicznych), a w przypadku potrzeby zastosowania większej liczby czujników do nadzoru stanu technicznego pojedynczej maszyny należy stosować kilka takich systemów (stąd nazwa: rozproszony system monitorowania ST)¹.

Obydwa systemy cechują się także różnymi możliwościami w zakresie wyznaczania estymat sygnałów. W przypadku systemu „A” możliwe jest generowanie maksymalnie do 8 estymat dla pojedynczego sygnału dynamicznego, natomiast w przypadku systemu „B” liczba estymat może być kilkukrotnie większa. W obu systemach wyznaczenie wielu spośród dostępnych estymat jest uwarunkowane akwizycją referencyjnego sygnału fazowego.

W praktyce można również spotkać systemy monitorowania online nieposiadające wyjść przekaźnikowych (tzn. nieposiadające funkcjonalności zabezpieczeń), natomiast w dalszym ciągu realizujące akwizycje referencyjnego sygnału fazowego. Przykładem takiego systemu jest DSM² pracujący w tandemie: TRENDMASTER[®] i SYSTEM 1 [4]. Dla takich systemów monitorowania, jeśli jest potrzebna funkcjonalność na rzecz zabezpieczeń maszyny (komparacja pro-

gową), to jest ona realizowana przez jakiś komponent systemu DCS.

4.2. Estymaty niewymagające znacznika fazy

Pomiary statyczne podłączone do systemu monitorowania (np. położenie osiowe wirnika, temperatura np. węzła łożyskowego) nie są na ogół powiązane z sygnałem znacznika fazy. Takie powiązanie jest wymagane dla sygnałów dynamicznych, tzn. dla drgań mechanicznych, pulsacji ciśnienia oraz dla drgań elektrycznych. Wymienione sygnały ograniczają się do składowej V_{ac} (lub I_{ac}), natomiast składowa stałonapięciowa (lub stałoprądowa) jest albo zerowa, albo (jeśli występuje) charakteryzuje stan pracy czujnika (OK – NOT OK).

Do systemu monitorowania mogą być także podłączone czujniki, które generują zarówno składową V_{dc} , jak i V_{ac} (lub: I_{dc} i I_{ac}) i obie te składowe są ważne z punktu widzenia oceny ST maszyny.

Typowym przykładem takich pomiarów dynamicznych, które nie wymagają znacznika fazy, są sumaryczne pomiary drgań:

- względnych – realizowane z pomocą czujników bezkontaktowych³; w tym przypadku składowa V_{dc} mówi o średniej odległości obserwowanej powierzchni od czujnika (w kategoriach diagnostycznych pomiar ten mówi o położeniu czopa w luzie łożyska), natomiast składowa V_{ac} o ruchu dynamicznym obserwowanej powierzchni względem punktu mocowania czujnika;
- skrętnych wirnika – powiązany z pomiarem momentu średniego przenieszonego przez wał;
- mediu (czyli pulsacji ciśnienia) – realizowane przez czujnik umożliwiający także równoległe pomiar ciśnienia statycznego medium.

4.3. Estymaty wymagające znacznika fazy dla maszyn wirnikowych

Bardziej zaawansowane SMiZ wyznaczają szereg estymat sygnału dynamicznego, dla których wymagane jest podłączenie referencyjnego sygnału fazowego. Najczęściej są to: wektor drgań 1X, wektor drgań 2X, wektor drgań NX, estymata NOT(1X) reprezentująca sumaryczną energię sygnału dynamicznego pomniejszoną o energię składowej 1X, estymata

sygnału S_{MAX} . Słabsze systemy monitorowania dokonują czasami estymacji przybliżonej S_{MAX} , bowiem nie uwzględniają okresu obrotu wirnika. W systemach silniejszych prędkość obrotowa wirnika jest kontrolowana dzięki sygnałowi znacznika fazy i uwzględniana przy realizacji estymacji S_{MAX} .

Znacznik fazy jest wykorzystywany w ww. przypadkach podwójnie. Z jednej strony umożliwia on określenie faz wektorów drgań NX (wazy mierzone są względem referencyjnego punktu na wale), z drugiej natomiast steruje pracą filtrów współbieżnych odpowiedzialnych za generowanie wektorów NX. Liczba filtrów współbieżnych w systemie monitorowania jest podyktowana potrzebą aplikacji i jest zróznicowana w różnych systemach monitorowania.

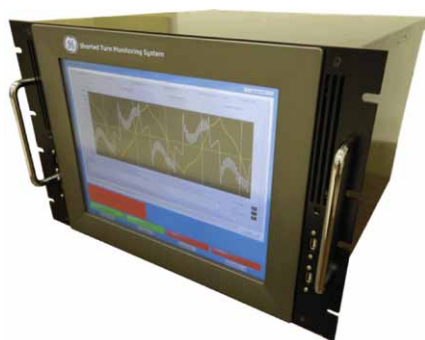
Wektory NX posiadają ważne wtórne zastosowanie w systemach monitorowania ST, bowiem z ich pomocą mogą być definiowane i w konsekwencji monitorowane tzw. obszary akceptacji. Obszar ten definiuje się przez zadanie dopuszczalnego przedziału zmienności amplitudy i fazy wektora NX. Tak zdefiniowany obszar akceptacji [5] jest monitorowany na poziomie sprzętowym.

Dla wirnikowych maszyn elektrycznych (silniki, generatory, ...) w celu oceny i zabezpieczenia ich ST wymagana jest realizacja pewnych specyficznych pomiarów, które bezwzględnie wymagają zastosowania znacznika fazy. Są to:

- pomiar szczeliny powietrznej: pomiar ma tym większe znaczenie, im większa jest średnica wirnika maszyny, i najczęściej jest realizowany dla dużych silników i generatorów stosowanych w elektrowniach wodnych; celem jego wykonania stosowane są różne konfiguracje czujników (czujniki mocowane wyłącznie do stojana maszyny lub zarówno do stojana, jak i do wirnika); pomiar stwarza możliwość zabezpieczenia maszyny przed możliwością wystąpienia przytarcia między wirnikiem a stojanem; w przypadku wykorzystywania znacznika fazy możliwe jest dodatkowo wskazanie, która część wirnika jest najbardziej zagrożona przytarcie; pomiarem szczeliny są zainteresowani także niektórzy producenci generatorów dla turbin wiatrowych; w tym przypadku średnica generatora nie jest tak duża,

jak w przypadku energetyki wodnej, natomiast ze względu na specyfikę konstrukcji nominalna szczelina jest kilkukrotnie mniejsza, a dążenie do minimalizacji masy elementów turbiny lokalizowanych na wieży przekłada się na obniżenie sztywności konstrukcji, co stanowić może problem w dłuższym czasie eksploatacyjnym;

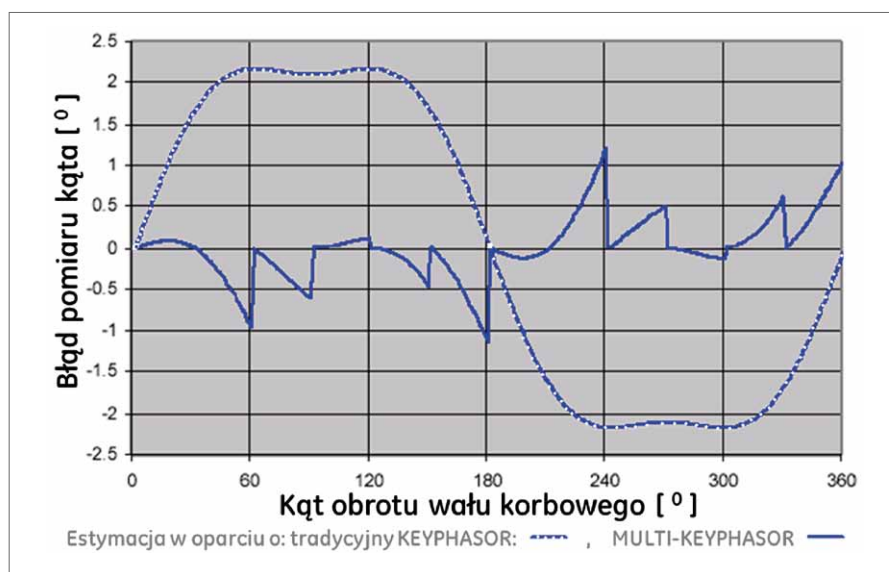
- pomiar indukcji magnetycznej w szczelinie: celem tego pomiaru jest ocena ST wirnika; pomiar jest przede wszystkim wykorzystywany dla generatorów, ale także może być stosowany dla silników; w celu jego realizacji wystarczające jest zastosowanie pojedynczego czujnika; jest on mocowany do stojana maszyny i umożliwia pomiar indukcji w Teslach; różnie realizowany jest *post processing* sygnału dla wirników z biegunami utajonymi oraz dla wirników z biegunami jawnymi; w przypadku maszyn z biegunami jawnymi (np. hydrogeneratory, hydrozespoły odwracalne oraz dużej mocy agregaty pompowe stosowane w elektrowniach pompowo-szczytowych) indukcja mierzona jest dla każdego z biegunów osobno; w systemie monitorowania można zadać wartości progowe (dolną i górną) i jeśli dla któregoś z biegunów nastąpi przekroczenie którejś z wartości granicznych, generowany jest alarm; podobnie jak w przypadku monitorowania szczeliny, dla której znacznik fazy umożliwia wskazanie miejsca największego ryzyka, także w przypadku pomiaru indukcji uwzględnienie dla prowadzonych analiz referencyjnego sygnału znacznika fazy umożliwia wskazanie biegunów, dla których indukcja przekracza zadane wartości progowe. Detekcja zwarć w wirnikach cylindrycznych (tzn. z biegunami utajonymi) realizowana jest przez specjalizowane systemy monitorowania. Przykład takiego systemu pokazano na rys. 7. Stosowanie znacznika fazy nie jest wymagane dla generatorów z cylindrycznymi wirnikami dwubiegunowymi, natomiast w przypadku wirników cylindrycznych czterobiegunowych taka potrzeba już występuje;
- pomiar rozkładu kołowego temperatury wirnika (profil kołowy temperatury wirnika) – pomiar ten jest wdrażany coraz częściej przede wszystkim dla



Rys. 7. System monitorowania zwarć uzwojeń wirnika generatora STMS 400



Rys. 8. Specjalne koło umożliwiające generację multiznacznika fazy



Rys. 9. Porównanie błędów indykacji fazy dla różnych znaczników fazy

wirników generatorów niskoobrotowych.

4.4. Estymaty wymagające znacznika fazy dla agregatów tłokowych

O ile w przypadku maszyn wirnikowych analizy fazowe są prowadzone w odniesieniu do pewnego wyróżnionego punktu na wale, o tyle w przypadku maszyn tłokowych (silniki, sprężarki) wymagana jest identyfikacja większej liczby szczególnych położenia podzespołów tych maszyn. Na rys. 8 pokazano specjalne koło instalowane na końcu wału korbowego sprężarki tłokowej, które umożliwia indykację większej liczby znaczników fazy (tzw. Multi-Keyphasor) na jeden obrót wału korbowego maszyny. Liczba ta odpowiada na ogół liczbie cylindrów maszyny.

W przypadku sprężarek tłokowych znacznik fazy jest potrzebny dla efektywnej pracy monitorów nadzorujących drgania mechaniczne, położenie tłoczyska oraz pulsacje ciśnienia medium⁴. W słabszych systemach monitorowania indykacja położenia poszczególnych tłoków jest realizowana w oparciu o tradycyjny znacznik pojedynczy, co nie zapewnia tak precyzyjnego wnioskowania jak to, które jest możliwe w przypadku systemów wykorzystujących multiznacznik fazy.

Na rys. 9 pokazano porównanie błędów indykacji kąta położenia poszczególnych tłoków w przypadku zastosowania pojedynczego znacznika fazy oraz Multi-Keyphasor[®]. Z porównania tego wynika, że w przypadku pojedynczego znacznika fazy błąd skuteczny pomiaru fazy wynosi niemal 20, natomiast

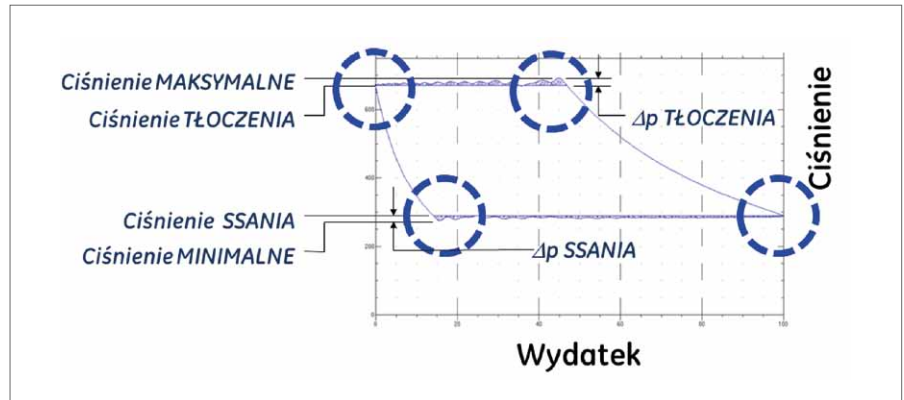
w przypadku multiznacznika dokładność estymacji fazy jest zdecydowanie lepsza, bowiem błąd skuteczny jest mniejszy niż $0,5^\circ$.

O ile w przypadku maszyn wirnikowych znacznik fazy jest na ogół potrzebny do wspomagania detekcji specyficznych składowych drgań, o tyle w przypadku maszyn tłokowych znacznik nie tylko wspomaga ww. pomiary sygnałów dynamicznych, ale ponadto wykonuje pomiary dla sygnałów dynamicznych w pewnych szczególnych położeniach poszczególnych tłoków oraz wspomaga detekcję pomiarów dynamicznych dla specyficznie zdefiniowanych „okien czasowych”. Dążenie do możliwie dokładnego pomiaru fazy dla sprężarek tłokowych wiąże się z potrzebą estymacji punktowej realizowanej dla pomiarów ciśnienia w charakterystycznych punktach wykresu indykatorowego – punkty te zostały zaznaczone kółkami dla wykresu indykatorowego pokazanego na rys. 10.

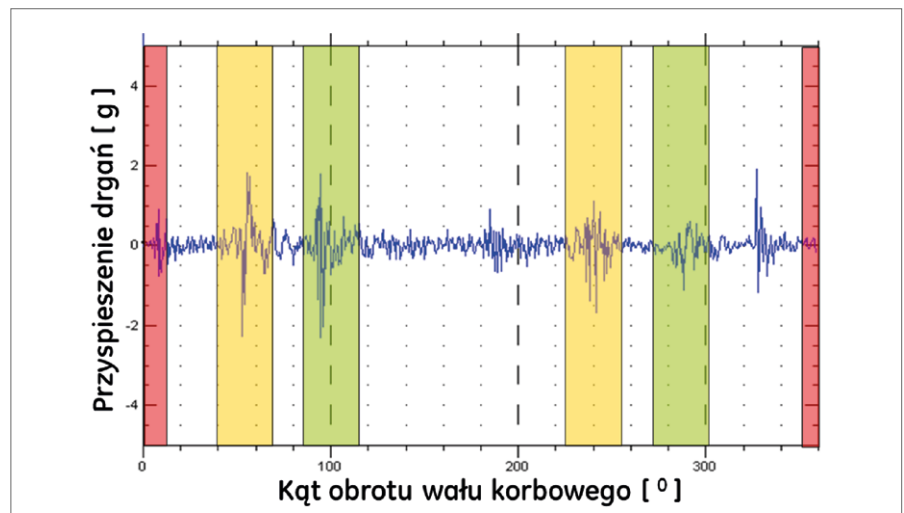
Potrzeba tak dokładnej estymacji fazowej nie ma natomiast już takiego znaczenia dla pomiarów drgań w krótkotrwałych oknach czasowych („krótkotrwałych”, tzn. o czasie znacząco krótszym od czasu pojedynczego obrotu wału korbowego). Na rys. 11 pokazano sześć okien czasowych (odpowiadających określonym położeniom wału korbowego maszyny i wykorzystywanych do prowadzenia specyficznego wnioskowania o ST sprężarki), zdefiniowanych w systemie monitorowania, natomiast na rys. 12 przykładowy wynik pomiarów drgań realizowany dla tych okien (odpowiednio w słupkach od 3 do 8 (tzn. opisanych jako „Band N”); słupek pierwszy („DIRECT”) obrazuje pomiar sumarycznego poziomu drgań dla pełnego obrotu wału korbowego, natomiast w słupku nr 2 pokazana jest informacja o napięciu kontrolnym [tzw. bias] informującym o stanie OK/NOT OK toru pomiarowego).

Ocena ST tłoka jest realizowana poprzez pomiary położenia i dynamiki tłoczyska oraz dzięki pomiarom ciśnienia w cylindrze.

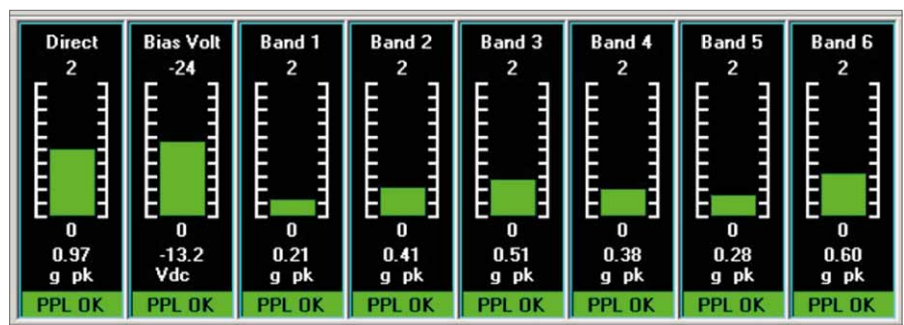
Na rys. 13 pokazano dwa wzajemnie prostopadłe czujniki⁵ służące do pomiarów położenia tłoczyska. Pomiary statyczne i dynamiczne dzięki znacznikowi fazy mogą być realizowane przez SMiZ



Rys. 10. Punkty charakterystyczne wykresu PV nadzorowane w SMiZ



Rys. 11. Przykład definicji 6 okien czasowych, dla których wyznaczana jest energia drgań



Rys. 12. Pomiary drgań: sumaryczny oraz pomiary w zdefiniowanych oknach czasowych

dla każdego z cylindrów w tym samym (wymaganym przez procedurę pomiarową) położeniu⁶.

4.5. Inne estymaty wymagające znacznika fazy

Oprócz omówionych powyżej estymat ww. w SMiZ realizowanych jest szereg innych pomiarów wymagających znacznika fazy, jak np. pomiar ekscentryczności



Rys. 13. Czujniki monitorowania położenia oraz dynamiki tłoczyska

(czyli monitorowanie prostoliniowości wirników turbin stopnia WP) czy monitorowanie pęknięć łopatek wybranych stopni sprężarek turbin gazowych w systemie BHM [6].

W niektórych przypadkach czujnik znacznika fazy realizuje dodatkową funkcjonalność w systemie monitorowania. Może być np. wykorzystywany w systemie monitorowania przeciwnych obrotów wirnika czy (dla niektórych turbin) także w SMiZ nadobrotów [7].

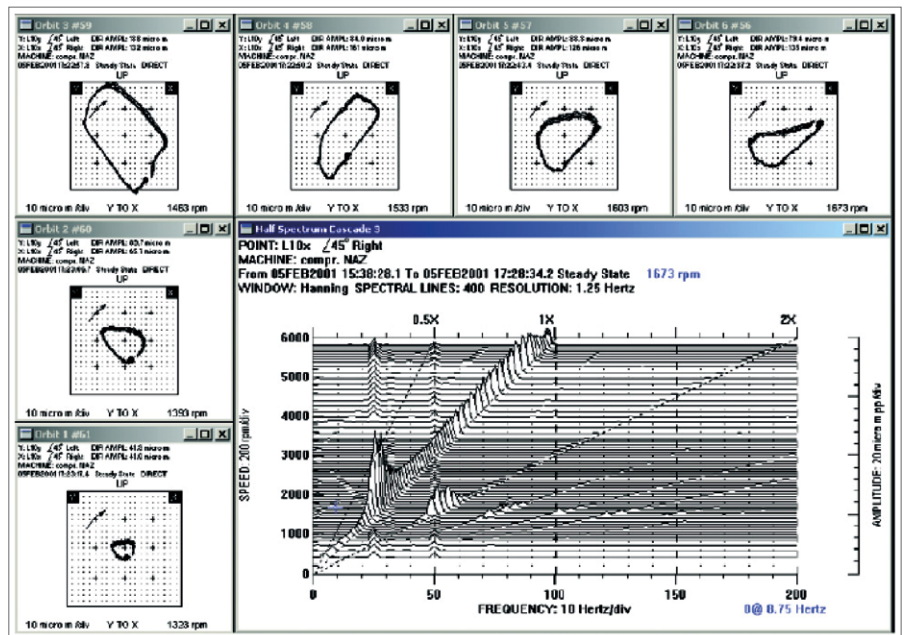
5. Rola znacznika w systemach akwizycji danych diagnostycznych

W przypadku SD, podobnie jak w przypadku SMiZ, można wyróżnić systemy słabsze i silniejsze, których różnicowanie może być definiowane w zależności np. od:

- rodzaju pracy z sygnałami generowanymi przez czujniki podłączone do systemu monitorowania (symultaniczna lub skaningowa akwizycja danych);
- liczby sygnałów możliwych do podłączenia do systemu;
- możliwości w zakresie akwizycji danych (jedynie w warunkach pracy stacjonarnej lub także w tzw. warunkach transjentowych);
- możliwości akwizycji danych w warunkach transjentowych (z krokiem stałym i/lub zmiennym po obrotach);
- możliwości gromadzenia danych o znacznej rozdzielczości kroku czasowego nie tylko po wystąpieniu alarmu, ale także w okresie czasu poprzedzającego ten alarm (sic!);
- możliwości sortowania danych w zależności od wartości wybranych zmiennych procesowych oraz od liczby tych zmiennych; funkcjonalność ta w przypadku systemów najlepszych nie jest limitowana;
- różnorodności analiz diagnostycznych i estymat sygnałów, które można generować w SD itd.

Omówienie roli znacznika fazy dla diagnostyki groźnych uszkodzeń maszyn (takich jak detekcja pęknięcia wału, detekcja przystarć, wyważanie wirnika, określanie postaci drgań wirnika, lokalizacja niestabilności płynowych) przedstawiono w [8 i 9].

W kolejnych punktach omówione są najważniejsze analizy diagnostyczne wymagające znacznika fazy.



Rys. 14. Połówkowe widmo kaskadowe stowarzyszone z analizą ORBIT PLUS

5.1. Analiza orbity

Pomiary drgań względnych (realizowane m.in. dla większych silników elektrycznych oraz generatorów łożyskowych ślizgowo z pomocą pary czujników XY instalowanej w każdym węzle łożyskowym) na poziomie systemu monitorowania są prezentowane jako wartości międzyszczytowe sygnału przemieszczeń drgań. Alternatywnie, w niektórych krajach, wciąż jeszcze jest realizowana estymacja sygnału SMAX z dwóch wzajemnie prostopadłych czujników XY⁷. Natomiast w celu prowadzenia diagnostyki agregatu niezbędne jest także wykonywanie analiz funkcyjnych, z których jedną z najważniejszych dla maszyn łożyskowych ślizgowo jest analiza orbity (czyli trajektorii ruchu dynamicznego wału).

Na rys. 14 pokazano szereg orbit, które posiadają znacznik fazy (punkt na orbicie w miejscu, w którym następuje przerwa jej ciągłości). Dzięki świadomości kierunku obrotów wirnika (pokazany na wykresach z pomocą strzałki – w tym przypadku zgodnej z ruchem wskazówek zegara) oraz dostępności znacznika fazy możliwe jest wnioskowanie o precesji orbity (tu: precesji współbieżnej) i w konsekwencji bardziej precyzyjne o ST. Dla wszystkich 6 analiz wykorzystywane dla ich sporządzenia sygnały czasowe cechują się znacznym podobieństwem dla kolejnych obrotów wirnika, stąd też

znaczniki fazy znajdują się na analizach w powtarzających się punktach.

W przypadku orbit obrazowanych w SD bez uwzględnienia znacznika fazy posiadają one kształt zamknięty. Znacznik fazy uniemożliwia zatem prowadzenie wnioskowania w oparciu o precesję orbity.

Pokazane na rys. 14 orbity z powtarzającym się położeniem znacznika fazy nie zawsze jednak mają miejsce. W przypadku występowania istotnych energetycznie asynchronicznych składowych drgań znacznik fazy może zmieniać swoje położenie. Na rys. 15 pokazano przykład takiej analizy orbity wykonanej z pomocą przebiegów czasowych odpowiadających kilkudziesięciu obrotom wirnika.

Znacznik fazy jest także niezbędny dla generowania tzw. orbit skompensowanych⁸ oraz do wyznaczania orbit filtrowanych typu NX.

5.2. Widmo kaskadowe

W diagnostyce wykorzystywane są dwa rodzaje widm przestrzennych: pierwsze z krokiem po czasie ΔT (widmo potokowe), a drugie z $\Delta RPM = const$ po obrotach (widmo kaskadowe). W przypadku widma potokowego niekoniecznie musi być spełniony warunek $\Delta T = const$.

Realizacja warunku $\Delta RPM = const$ jest realizowana dzięki znacznikowi fazy, który dodatkowo w SD jest wykorzystywany jako sygnał tachometryczny umożli-

liwiający kontrolowanie i spełnienie warunku na stałość kroku po obrotach.

Pokazane na rys. 14 połówkowe widmo kaskadowe drgań względnych umożliwia wnioskowanie o obszarach pobudzenia się drgań (gdzie pod słowem „obszar” rozumie się: zakres zmienności obrotów oraz pasmo częstotliwości, dla którego następuje zwiększenie poziomu drgań) oraz rozpoznanie częstotliwości rezonansowych wirnika, częstotliwości rezonansów strukturalnych, częstotliwości sił wymuszających etc.

Na rys. 16 pokazano przykład pełnego widma kaskadowego zarejestrowanego w czasie rozruchu maszyny, gdzie w pewnej fazie tego rozruchu rozpoczął się proces przycierania wirnika o część nieruchomą maszyny.

Ten rodzaj analizy jest bardzo dobrze skorelowany z analizą orbity, bowiem dla analiz posiadających dominującą energię dla dodatniej częstotliwości widma orbita wirnika posiada precesję współbieżną, natomiast jeśli dominująca energia przypada w części ujemnej, wtedy orbitowanie wirnika cechuje się precesją przeciwbieżną.

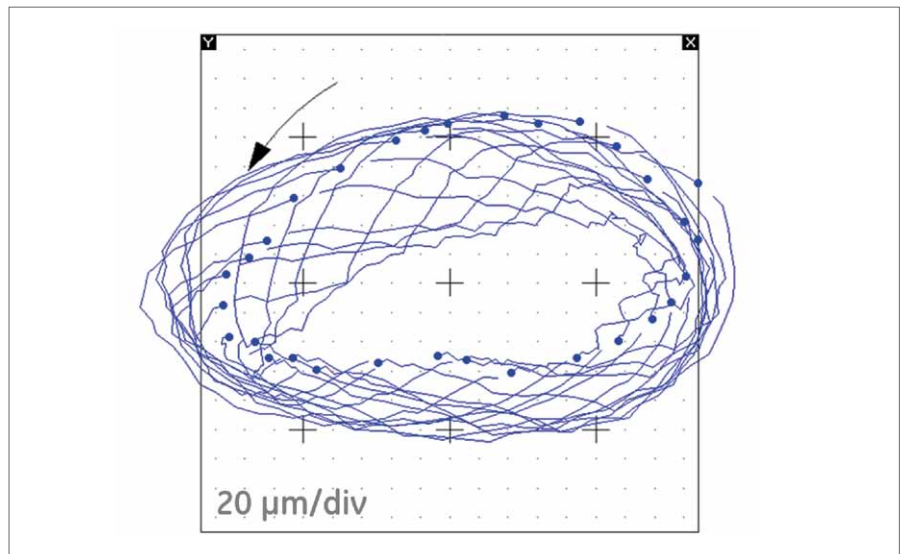
5.3. Analizy Bode'go

Na analizę Bode'go składają się dwa wykresy, z których jeden przedstawia zmienność amplitudy wektora NX, drugi natomiast jego fazy w funkcji zmiany prędkości obrotowej wirnika. Tak jak było to opisane w [5], wektory NX oraz pewne miary pochodne wyznaczone z ich pomocą mogą być estymowane na poziomie SMiZ z pomocą filtrów współbieżnych. W konsekwencji mówimy o estymacji sprzętowej tych miar, a wyznaczone estymaty sygnału (w tym przypadku: liczby) są przekazywane do SD, w którym mogą być obrazowane jako zależności funkcyjne. Liczba sprzętowych filtrów współbieżnych jest zdefiniowana dla określonego SMiZ.

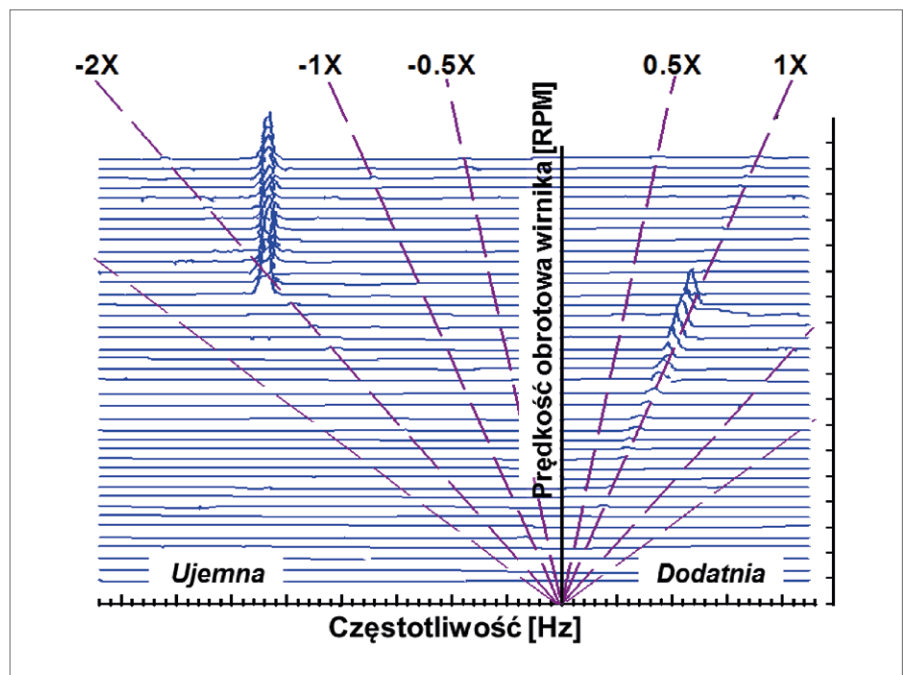
Natomiast niezależnie te same miary (oraz podobne dodatkowe w stosunku do estymowanych w SMiZ) mogą być wyznaczone metodą programową na poziomie SD.

Ta dualność postępowania umożliwia:

- weryfikację zgodności estymacji w oparciu o metody sprzętowe i programowe;
- wyznaczanie drogą programową dodatkowych (w stosunku do możliwości



Rys. 15. Analiza orbity z niestabilnym położeniem znacznika fazy



Rys. 16. Pełne widmo kaskadowe zarejestrowane w czasie rozruchu maszyny

sprzętowych) estymat sygnału, będących funkcjami wektorów NX;

- obliczenie estymat wtórnych na bazie wcześniej określonych wektorów NX.

Na rys. 17 pokazano przykładową charakterystykę Bode'go 1X dla agregatu dmuchawy napędzanej silnikiem elektrycznym poprzez przekładnię. Wirnik dmuchawy pracuje z prędkością nominalną powyżej 20 kRPM, a prędkość ta jest uzyskiwana w ciągu kilkunastu sekund od podłączenia zasilania do silnika. Dla tego typu charakterystyk mogą

wystąpić problemy z ich wyznaczeniem programowym ze względu na dużą wartość gradientu prędkości obrotowej, natomiast bez problemu wyznacza się je z pomocą filtrów współbieżnych sterowanych znacznikiem fazy na poziomie sprzętowym [5]. Dokonane estymacje amplitudy i fazy wektora NX są przekazywane do SD wraz z etykietą informującą o odpowiadających im prędkościach wirnika i tu prezentowane na wykresach, tak jak pokazany przykładowo na rys. 17.

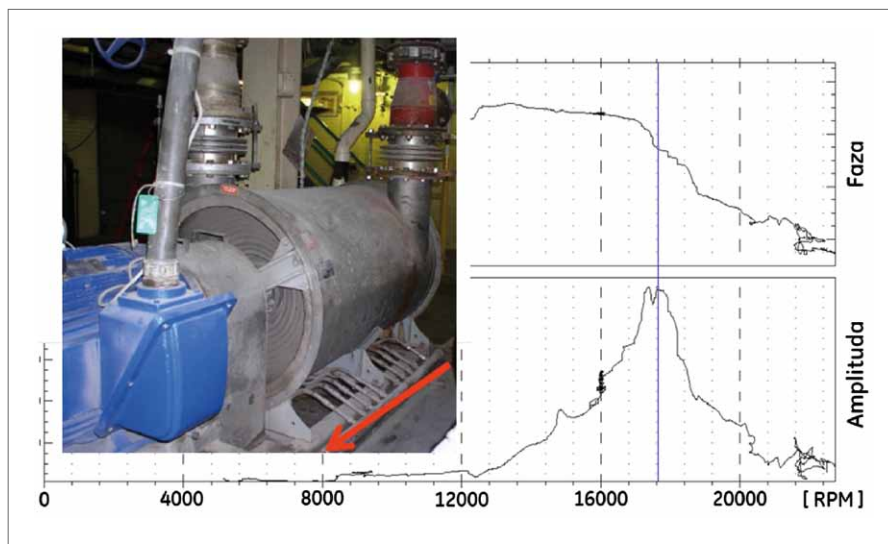
Spełnienie warunku $\Delta RPM = const$ jest realizowane dzięki znacznikowi fazy, który dodatkowo w SD jest wykorzystywany jako sygnał tachometryczny umożliwiający kontrolowanie i spełnienie warunku na zadaną stałość kroku po obrotach.

Na rys. 18 pokazano przykład charakterystyk biegunowych wykonanych w tym samym czasie z pomocą czujników obserwujących drgania wału i zainstalowanych w dwóch kolejnych łożyskach maszyny. Charakterystyki te zawierają informację o prędkościach obrotowych wirnika przypisanych do poszczególnych wektorów drgań 1X i pokazują typową pierwszą oraz drugą postać drgań własnych: pierwsza postać przypada dla 2730 RPM (wektory są w fazie wzdłuż osi wirnika), natomiast druga postać przypada dla ~7400 RPM (wektory są w przeciwfazie w obu węzłach łożyskowych).

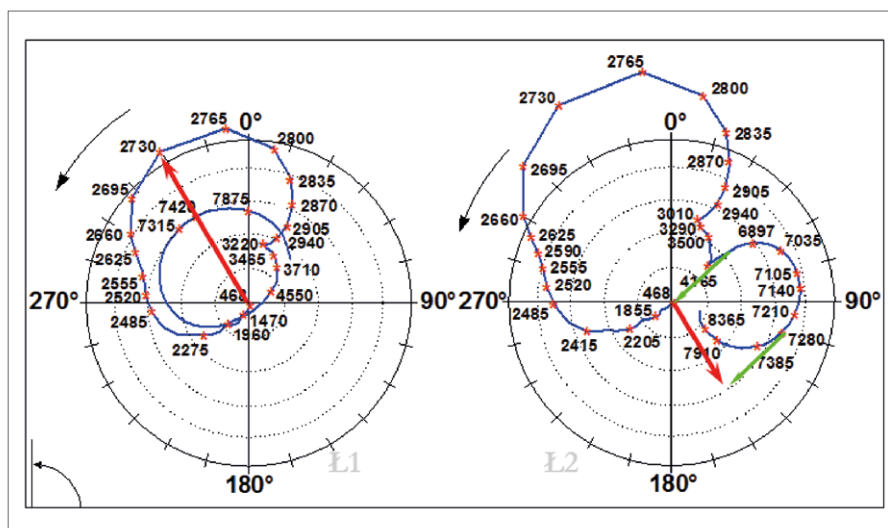
Na rys. 19 pokazano charakterystyki biegunowe NX wykonane w stanach transientowych dla dwóch agregatów pomp pionowych napędzanych silnikami elektrycznymi. W tym przypadku $N = 5$ i odpowiada liczbie łopat wirnika pompy, a więc spodziewanemu wymuszeniu umożliwiającemu przeprowadzenie analizy dla pasma częstotliwości, w którym zawierały się wybrane rezonanse układu mechanicznego. Charakterystyka A odpowiada dobremu stanowi technicznemu (jedna z postaci drgań występuje dla ~3100 RPM i została pokazana zielonym „punktem”), natomiast charakterystyka B pozwoliła zauważyć istotne obniżenie częstotliwości występowania tej postaci (tu odpowiadająca jej częstotliwość obrotów wynosi ~2540 RPM i została pokazana czerwonym „punktem”) oraz pojawienie się (w wyniku obniżenia sztywności wirnika) kolejnej postaci dla obrotów ~8140 RPM, co pokazano „punktem” niebieskim). Obniżenia ww. częstotliwości są ewidentnym dowodem zmniejszającej się sztywności wirnika spowodowanej procesem jego zaawansowanego (i postępującego) pęknięcia.

5.4. Analizy APHT

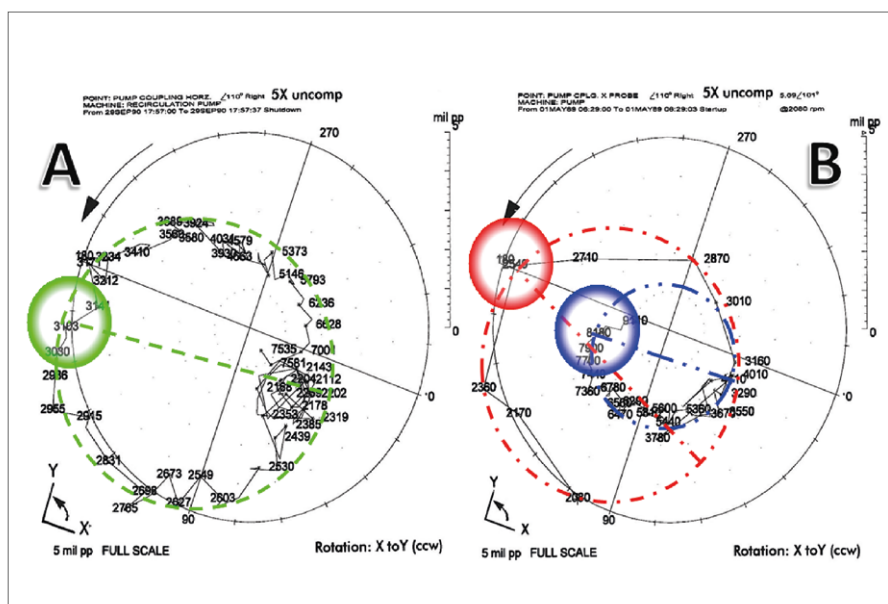
O ile omówione w trzech poprzednich częściach analizy są typowe dla stanów transientowych, a jeszcze wcześniej omówiona analiza orbity jest użyteczna także w warunkach pracy ustalonej ma-



Rys. 17. Charakterystyka Bode'go 1X maszyny wirnikowej



Rys. 18. Charakterystyki biegunowe 1X dla dwóch kolejnych łożysk (Ł1 i Ł2) zarejestrowane dla agregatu pompowego



Rys. 19. Charakterystyki biegunowe 5X dla różnego stanu technicznego silników napędzających pompę

PRZEMYSŁ MASZYNOWY, INNOWACJE / INTELIGENTNY BUDYNEK

szyny, o tyle analiza APHT jest typowym formatem danych diagnostycznych przydatnym przede wszystkim dla maszyn charakteryzujących się stałymi obrotami wirnika.

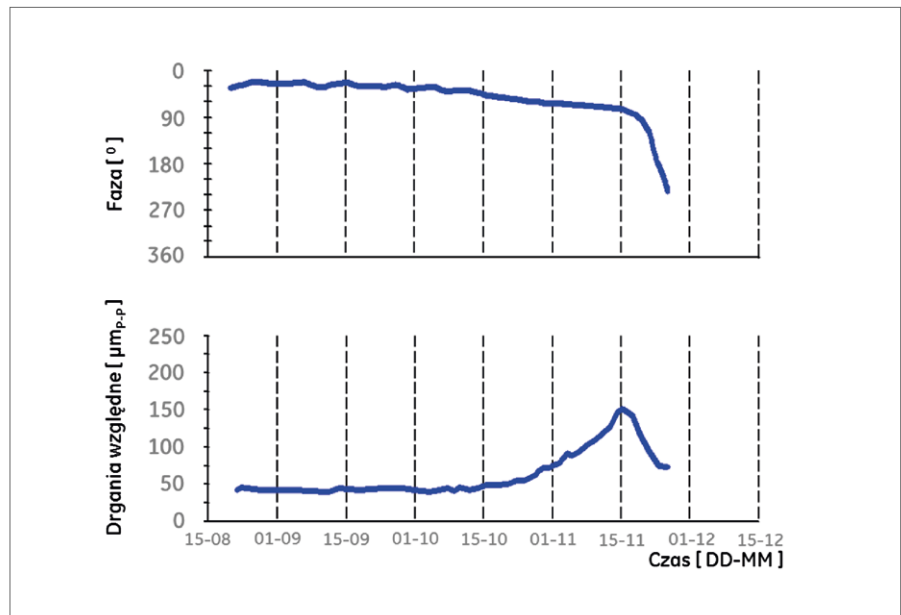
Nazwa „APHT” pochodzi od *Amplitude and PHase in Time*, co oznacza, że jest to charakterystyka opisująca zmianę amplitudy i fazy w funkcji czasu. Oznacza to dalej, że podobnie jak w przypadku wykresu Bode’go analiza ta bezwzględnie wymaga znacznika fazy, bowiem jest dedykowana składowym wektorowym drgań typu NX, a ich wyznaczenie (czy to na poziomie sprzętowym, czy też programowym) bez znacznika fazy nie jest możliwe.

Na rys. 20 pokazano charakterystykę APHT 2X dla agregatu pompowego wody chłodzącej napędzanego silnikiem elektrycznym. W chwili wyłączenia wał agregatu charakteryzował się znacznym pęknięciem poprzecznym, co bardzo dobrze odzwierciedla trend analizy pokazujący obniżanie się częstotliwości rezonansowej wirnika, będące konsekwencją postępującego zmniejszania się sztywności wirnika (na charakterystyce widoczne jest wyraźne „przejście rezonansu” przez wymuszenie typu 2X^o, tzn. odpowiadające podwojonej prędkości stałych obrotów wirnika maszyny).

Podobnie jak w przypadku charakterystyki Bode’go, którą można przedstawić w postaci biegunowej, także i w przypadku charakterystyk typu APHT NX możliwa jest ich prezentacja biegunowa. Przykład takiej charakterystyki pokazano na rys. 21. Odpowiada ona charakterystyce APHT z poprzedniego rysunku, co oznacza, że obydwa wykresy bazują na tym samym zbiorze danych zgromadzonych dla maszyny pracującej ze stałą prędkością obrotową.

Omówione obie postaci wykresów typu APHT NX są dostępne jedynie na poziomie SD.

Jedno z opisanych zastosowań znacznika fazy na poziomie sprzętowym [5] dotyczyło monitorowania zmienności wektorów NX – co jest realizowane z pomocą tzw. obszarów akceptacji na poziomie SMiZ i może być włączone do systemu alarmowania (na ogół 2-poziomowego). Oczywiście definiowanie obszarów akceptacji może mieć miejsce także na poziomie SD. Na rys. 22 pokazano przykładową zmienność wybra-



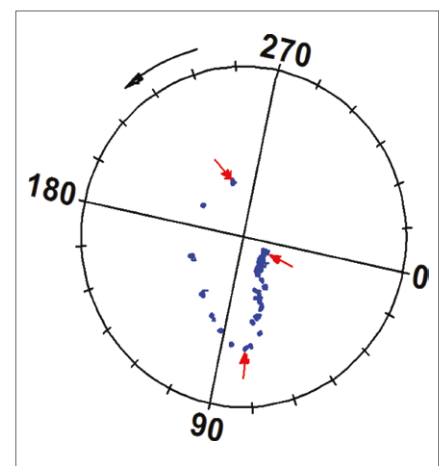
Rys. 20. Charakterystyka APHT 2X zarejestrowana dla agregatu pompowego

nego wektora drgań i zdefiniowane dla niego cztery obszary akceptacji.

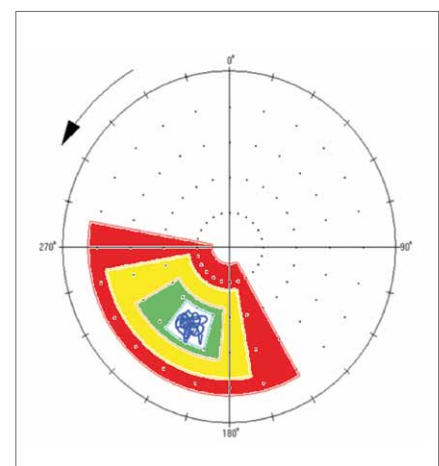
Nadzór obszarów akceptacji na poziomie SD może być bardziej efektywny niż nadzór na poziomie systemu monitorowania nie tylko ze względu na możliwość zdefiniowania większej wartości alarmów. Większa efektywność wynika z faktu, że o ile w systemie monitorowania nie ma na ogół możliwości uzmiennienia definicji obszaru akceptacji w funkcji zmiany obrotów wirnika (a więc w stanach transientowych lub dla agregatów napędzanych silnikami o sterowanej prędkości obrotowej), o tyle w systemie programowym możliwość takiego uzmiennienia może być bez problemu realizowana na poziomie SD w oparciu o metody programowe. Przykład takiej możliwości uzmiennienia granic alarmów w funkcji zmieniającej się zmiennej procesowej pokazano w [10].

5.5. Grupa analiz dla nadzoru szczeliny

Na poziomie sprzętowym realizowane jest monitorowanie wielkości szczeliny między stojanem a wirnikiem oraz możliwe było zorganizowanie zabezpieczeń zapobiegających wystąpieniu ciężkiego przytarcia. Dane gromadzone z czujników mogą być na szereg różnych sposobów przedstawione w SD na rzecz prowadzenia wnioskowania o różnych



Rys. 21. Charakterystyka biegunowa APHT 2X



Rys. 22. Przykład zdefiniowania obszarów akceptacji dla wybranego wektora NX sygnału drgań

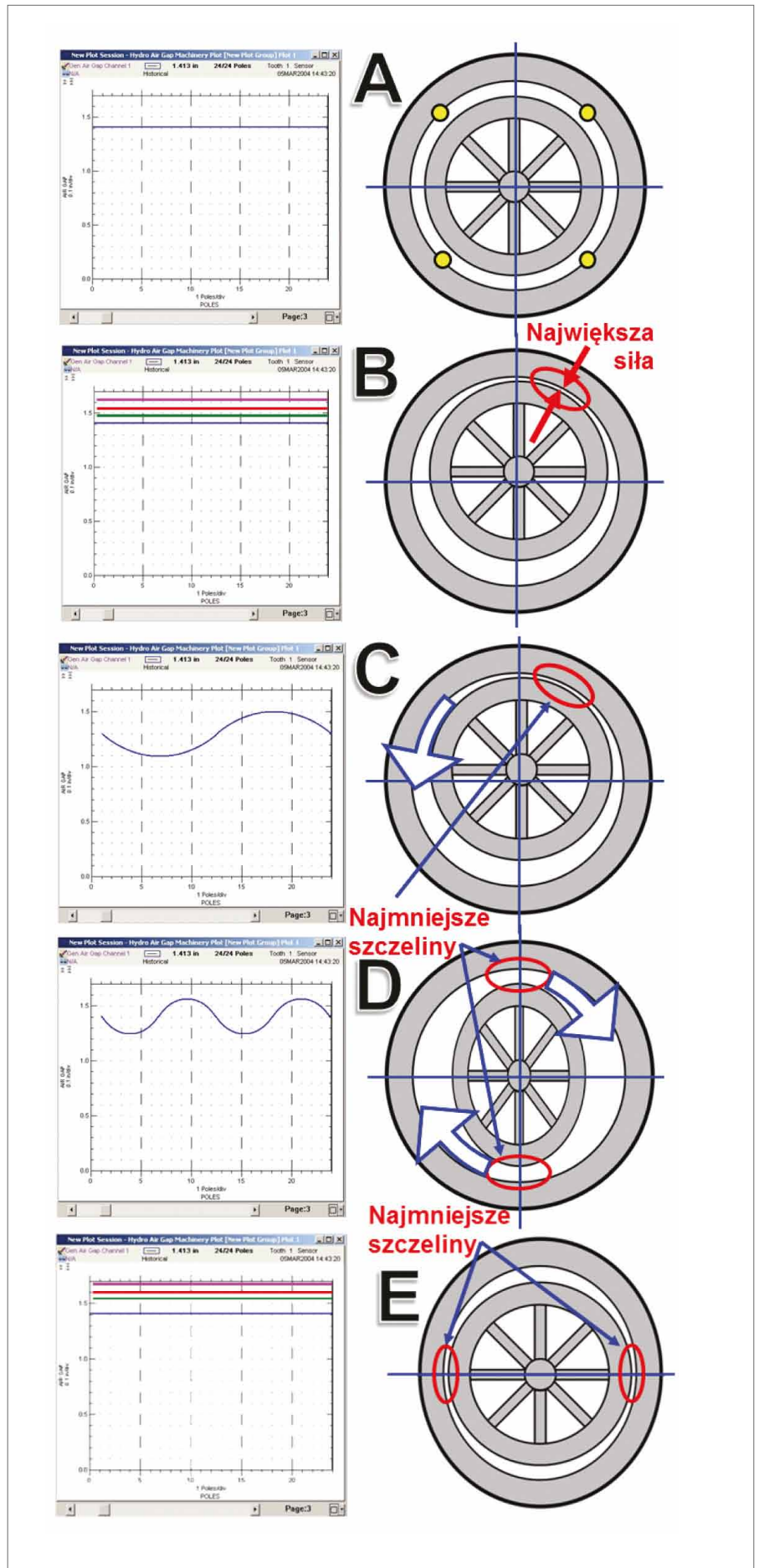
formach niepoprawności działania silników i/lub generatorów. Wnioskowanie takie nie byłoby możliwe do przeprowadzenia w przypadku braku znacznika fazy.

Na rys. 23 pokazano szereg analiz stanowiących podstawę wnioskowania o ST wirnikowej maszyny elektrycznej ze względu na kształt jej szczeliny. I tak: A) z prawej strony pokazano stojan (punkty na stojanie wskazują miejsce mocowania czujników – tu czterech) wraz z wirnikiem, z lewej natomiast uzyskany wykres odpowiadający technicznemu stanowi idealnemu; wykresy dla każdego czujnika są linią prostą, a wszystkie te linie są poziome i pokrywają się; w tym doskonałym ST sprawność elektryczna generatora jest maksymalna, generowane ciepło najmniejsze, brak jest niewyważenia magnetycznej i w konsekwencji generowane przez generator drgania są także najmniejsze;

B) stojan i wirnik posiadają kształt okręgów, natomiast ich środki nie są współosiowe; stan odpowiada statycznej ekscentryczności wirnika; wykresy z czujników są liniami prostymi poziomymi, niepokrywającymi się; na stojanie obserwowana jest składowa drgań 2X oraz nierównowaga fazowa; występuje zwiększone ryzyko przycierania stojan – wirnik na kierunku działania największej siły;

C) również tutaj stojan i wirnik posiadają kształt okręgów, natomiast oś wirnika jest przemieszczona w stosunku do osi geometrycznej; w konsekwencji sygnały z czujników pokrywają się, jednak nie posiadają kształtu linii prostej, a kształt „sinusa”; obserwowana jest tak niewyważenie mechaniczne, jak i magnetyczne skutkujące zwiększonym poziomem składowej drgań 1X; stan ten opisywany jest jako zwiększona ekscentryczność dynamiczna wirnika; zwiększone oddziaływanie magnetyczne może doprowadzić do przycierania wirnika wokół wewnętrznej powierzchni stojana;

D) wirnik nie posiada kształtu kołowego (na rysunku pokazany jako elipsa), natomiast osie wirnika i stojana są współosiowe; krzywe generowane z poszczególnych czujników pokry-



Rys. 23. (A) analiza idealnej szczeliny; (B...E) przykłady analiz podstawowych błędów kształtu szczeliny

wają się i posiadają liczbę lokalnych minimów odpowiadającą liczbie „zafalowań” kształtu wirnika (na rysunku ze względu na kształt eliptyczny widoczne są dwa minima); lokalnie minimalne szczeliny przemieszczają się wraz z obrotem wirnika; maszyna posiada zarówno niewyagę mechaniczną, jak i magnetyczną; obserwowane są zwiększone drgania NX (dla sytuacji przedstawionej na rysunku: $N = 2$); zwiększa się ryzyko wystąpienia przycierania wirnika wokół wewnętrznej powierzchni stojana;

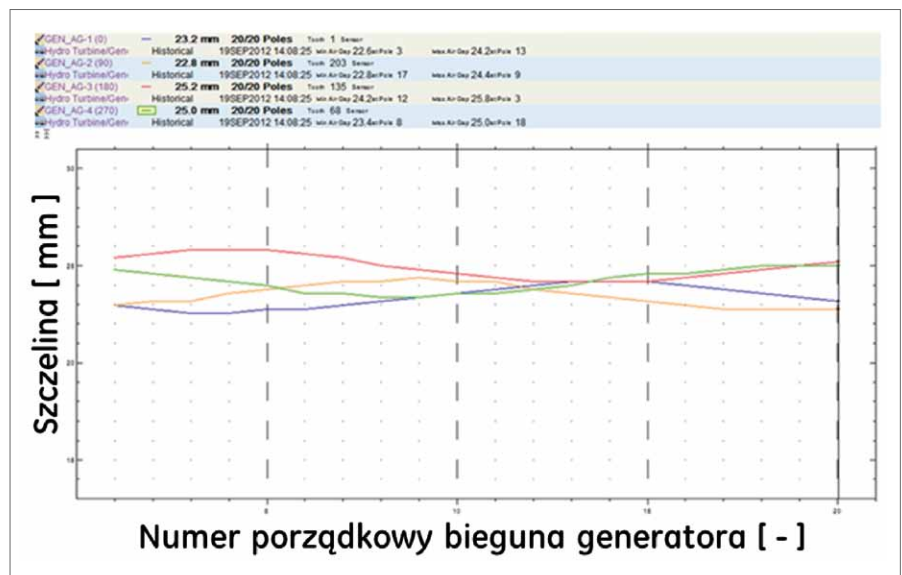
- E) stojan nie posiada kształtu kołowego (na rysunku pokazany jako elipsa), natomiast osie wirnika i stojana pokrywają się; wykresy są podobne do tych z przypadku „B”; lokalnie minimalne szczeliny pozostają cały czas w tym samym miejscu; sprawność maszyn jest pomniejszona; obserwowane jest lokalne zwiększenie temperatur stojana (w miejscach minimalnych odległości do wirnika); zwiększa się ryzyko lokalnego przytarcia stojana (tzn. nie byłoby to przytarcie obwodowe).

Opisane powyżej przykłady wnioskowania w zakresie kinematyki oraz zagrożeń maszyny elektrycznej dotyczą uszkodzeń „podstawowych”. W praktyce na maszynach mamy z reguły do czynienia z odstępstwami rzeczywistego ST od stanu idealnego jako sumy ww. przypadków o różnym stopniu ich zaawansowania. Przykład rzeczywistej analizy zmienności szczeliny dla maszyny wykorzystującej 4 czujniki pokazano na rys. 24.

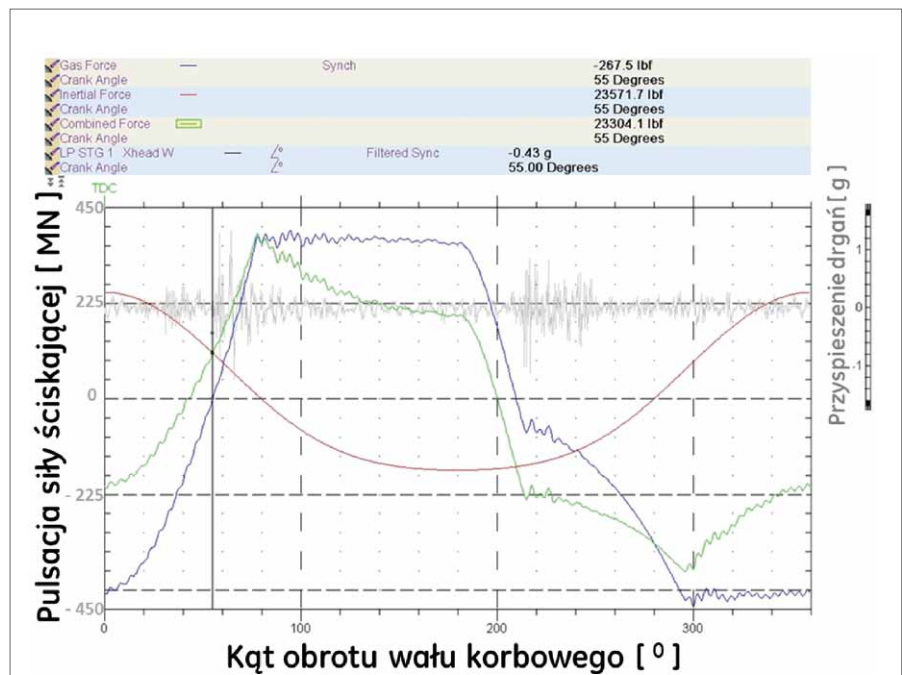
Celem lepszego rozpoznawania uszkodzeń realizuje się: (I) pomiary z pomocą większej liczby czujników mocowanych do stojana, a liczba ta jest tym większa, im większa jest średnica wirnika; (II) pomiary z pomocą czujników zamocowanych do wirnika; (III) w przypadku maszyn o większej długości (wysokości) wirnika pomiary szczeliny wykonuje się w dwóch przekrojach.

5.6. Graficzna prezentacja analizy FLUX

Obserwacja strumienia magnetycznego między stojanem a wirnikiem jest prowadzona z pozycji pojedynczego czujnika zamocowanego do stojana



Rys. 24. Przykład analizy kształtu szczeliny



Rys. 25. Dekompozycja sił działających na tłoczek na tle sygnału przyspieszeń drgań

lub/i do wirnika. O ile na poziomie SMiZ dostępne są jedynie charakterystyki punktowe tego pola, o tyle na poziomie SD (podobnie jak w przypadku wykresów szczeliny) dokonuje się graficznej prezentacji z pomocą wykresów prostokątnych i kołowych [biegunowych]. Wykonanie tych charakterystyk jest warunkowane istnieniem referencyjnego sygnału z czujnika fazy.

W przypadku maszyn odwracalnych (stosowanych w niektórych elektrowniach pompowo-szczytowych) dla tej

samej maszyny winny być wykonywane wykresy FLUX odpowiadające różnym stanom procesowym: reżim generatorowy i silnikowy.

5.7. Specjalizowane analizy dla maszyn tłokowych

Wcześniej omówiono potrzebę posilowania się znacznikiem fazy w przypadku monitorowania maszyn tłokowych. Na poziomie systemów monitorowania nadzorowane są jedynie charakterystyczne punkty ważnych dla

oceny charakterystyk, tak jak to pokazano na rys. 10. W przypadku SD dostępne są nie tylko ww. punkty, ale także kompletne charakterystyki P-V wraz z prezentacją dynamicznych zaburzeń sygnału (pulsacje ciśnienia), mogących wystąpić w przypadku różnych odstępstw od dobrego ST. Zmienność charakterystyki między w/w punktami charakterystycznymi również jest pomocna w zakresie prowadzenia wnioskowania diagnostycznego. Dostępnych jest także cały szereg dodatkowych analiz (jak np. zmienność mierzonych sygnałów, takich jak ciśnienie czy drgania w funkcji obrotu wału korbowego – rys. 25).

6. Wykorzystywanie znacznika w systemach ekspertowych

Zadaniem systemów ekspertowych jest wspomaganie procesu przetwarzania danych diagnostycznych w informacje użyteczne dla służb utrzymania ruchu (a czasami także produkcyjnych). Zaawansowane systemy diagnostyczne (np. SYSTEM 1 [4], [11]) oferują z jednej strony specjalizowane grupy reguł ekspertowych dedykowanych wspomaganianiu wnioskowania diagnostycznego dla różnych maszyn, z drugiej natomiast także specjalizowane narzędzia umożliwiające generowanie nowych reguł.

W przypadku systemów ekspertowych nie można tak jednoznacznie mówić o wykorzystaniu znacznika fazy, jak w przypadku SMiZ oraz na poziomie akwizycji i typowego przetwarzania danych diagnostycznych. Tu zakres tego wykorzystania wynika przede wszystkim z inwencji twórcy.

Pewne narzędzia oprogramowania szkieletowego są dedykowane wykorzystywaniu informacji fazowej, a spora grupa reguł ekspertowych wykorzystuje fazę. Przykładem takiego zorientowanego fazowo wnioskowania mogą być: (I) rozróżnianie niewyważenia mechanicznego, magnetycznego i hydraulicznego w pakiecie HydroX dedykowanym hydrogeneratorom pionowym [11]; (II) generowanie wykresu obciążenia tłoczyska (vide rys. 25) czy (III) rozpoznawanie prądów/napięć wałowych prowadzących do erozji elektrostatycznej podzespołów.

7. Zakończenie

Cyfrowe SMiZ ST online stosowane są na świecie od ponad ćwierćwiecza. Nato-

miast wciąż jeszcze stosunkowo znaczna liczba specjalistów współdecydujących o sposobie interfejsowania systemów nadzoru ST z DCS-em optuje w kraju za ich interfejsowaniem analogowym¹⁰. W przypadku interfejsowania analogowego nie są zauważane ponoszone na etapie inwestycji koszty zwiększonej liczby wejść analogowo-cyfrowych po stronie DCS-u, koszty kabli sygnałowych (w przypadku interfejsowania cyfrowego długość kabli wykorzystywanych w celu interfejsowania redukuje się zazwyczaj do 5–10%), w przypadku systemów nadzoru ST o dużej gęstości koszty wyjść analogowych z reguły przekraczają kilkukrotnie koszt systemowej karty interfejsu cyfrowego, żeby nie wspomnieć już o kosztach projektowych oraz kosztach implementacji systemu. Nie są także zauważane koszty utrzymania tego bardziej złożonego systemu analogowego (bardziej złożonego niż system cyfrowy) w ciągu kolejnych ~15–25 lat jego użytkowania.

Ze sposobu formułowania sporego procentu dokumentów przetargowych wynika, że ich autorom nie są znane funkcjonalności współczesnych rozwiązań rynkowych w omawianym zakresie. Bezpośrednią konsekwencją stosowania interfejsowania analogowego jest brak możliwości wykorzystywania tych pomiarów, które „z definicji” są realizowane we współczesnym (cyfrowym!) systemie monitorowania ST na rzecz predykcyjnego utrzymania ruchu. Zdecydowana większość współczesnych systemów monitorowania wykorzystuje zależności fazowe i wyznacza co najmniej po kilka estymat sygnału dla każdego pomiaru dynamicznego. Bazowanie na pomiarach analogowych dominowało w latach 30. i 40. ubiegłego wieku, a współczesne wykorzystywanie interfejsowania analogowego umożliwia przekazanie do DCS-u jedynie wybranej jednej z wymienionych kilku estymat.

Nadzór ST z wykorzystaniem znacznika fazy został wdrożony w latach 60., a przełom lat 70. i 80. ub.w. to burzliwy rozwój i coraz powszechniejsze stosowanie online'owych systemów diagnostyki. Działanie tych ostatnich bez referencyjnego sygnału fazy prowadzi do trywializacji nadzoru stanu. Może wciąż jeszcze standard analogowy jest dobry w sterowaniu procesem, a SMiZ ST online wy-

daje się wystarczająco dobrze bez znacznika fazy, natomiast na pewno nie jest właściwe analogowe interfejsowanie systemów nadzoru z systemami DCS. Przy nabywaniu każdej nowej maszyny warto rozważyć celowość jej przygotowania do akwizycji fazy (to przygotowanie praktycznie nie wpływa na koszt zakupu), a w przypadku obejmowania agregatu monitorowaniem online warto skonsultować ze specjalistami odpowiedzialnymi za utrzymanie ruchu racjonalność uwzględnienia w konfiguracji sprzętowej znacznika fazy.

Błędy popełniane na poziomie pojedynczych maszyn potęgują się w przypadku realizacji większych inwestycji (jak np. budowa nowego bloku energetycznego). W [12] omówiono najczęściej popełniane błędy oraz podano przykład wtórnych konsekwencji finansowych decyzji minimalizującej koszt inwestycji.

Przypisy

1. W przypadku SYSTEMU 3500 akwizycja sygnału fazowego może być zrealizowana z pomocą 2-kanalowych monitorów 3500/25 lub 3500/50, a kasetą akceptującą skonfigurowanie od 1 do 4 różnych znaczników fazy. W przypadku systemu ADAPT (np. 3701/46) możliwe jest zastosowanie 1 lub 2 kart akwizycji sygnałów, z których każda daje możliwość podłączenia do 6 czujników pomiarów drgań/położeń oraz pojedynczego czujnika znacznika fazy – co oznacza, że w systemie można skonfigurować 1 lub 2 znaczniki fazy. W przypadku wystąpienia takiej potrzeby skonfigurowanie kolejnych znaczników fazy jest możliwe poprzez wykorzystanie któregoś/którychś z tych 6 kanałów, które są tradycyjnie wykorzystywane do pomiarów drgań i położeń.
2. DSM = *Dynamic Scanning Module*.
3. Najczęściej jako czujniki bezkontaktowe w systemach klasy online są wykorzystywane ww. czujniki wiropędowe. Czasami spotyka się również czujniki pojemnościowe. Natomiast te ostatnie są słabą alternatywą dla czujników wiropędowych, bowiem są wrażliwe na zmianę warunków środowiska (np. chłapiący olej czy pojawienie się w wyniku przedmuchów uszczelnienia pary między czujnikiem a obserwowaną przez niego powierzchnią), które mogą wpłynąć na zmianę charakterystyki czułościowej


- czujnika i w konsekwencji znacząco zwiększyć błąd pomiaru.
4. W przypadku pokazanego na rys. 6 SYSTEMU 3500 monitory realizujące specjalizowane formy monitorowania sprzężarek tłokowych, które wymagają akwizycji polireferencyjnego sygnału fazowego, to: 3500/70M, 3500/72M oraz 3500/77M.
 5. W starszych i słabszych systemach monitorowania sprzężarek tłokowych do nadzoru położenia tłocznika wykorzystywany jest jedynie czujnik pionowy z pokazanej pary czujników.
 6. Położenie tłocznika oraz jego ruch dynamiczny są różne dla różnych położenia wału korbowego, tak więc wykorzystanie tych pomiarów w celach oceny stanu technicznego musi być realizowane z pełną świadomością kąta położenia tego wału.
 7. Ocena stanu technicznego z pomocą indywidualnych estymat międzyszczytowych, realizowanych dla pary czujników XY, jest lepsza dla diagnostyki technicznej (bowiem może informować o kierunku sił mechanicznych) niż pojedyncza estymacja sygnału z tych dwóch czujników, jaką jest SMAX. SMAX jest estymacją lepszą dla systemów nadzoru stanu technicznego dedykowanych prewencyjnemu utrzymaniu ruchu, a więc pierwszoplanowo UR zainteresowanemu zabezpieczeniem maszyny, a nie jej diagnostyką.
 8. Analizy skompensowane (np. orbity) prezentują lepszy stosunek sygnału do szumu (generowanego ze względu na niedoskonałość przygotowania ścieżki pomiarowej na wale) i mogą być wyznaczone w przypadku, w którym istnieje możliwość wiarygodnego pomierzenia szumu. Warunkiem jest zrealizowanie pomiaru referencyjnego (w dziedzinie

- czasu) w warunkach wystarczająco wolnych obrotów wirnika, tzn. przy obrotach zdecydowanie niższych od pierwszej prędkości drgań rezonansowych wirnika. Dysponując takim referencyjnym przebiegiem czasowym (gromadzonym w trybie synchronicznym), możemy go następnie wykorzystać do subtrakcji szumu dla sygnałów (próbekowanych także synchronicznie) zgromadzonych w warunkach wirników obracających się z większą prędkością.
9. W przypadku wykresu Bodego możemy mówić o „przejściu prędkości obrotowej wirnika” przez obroty odpowiadające jakiejś charakterystycznej częstotliwości układu wirnikowego lub przepływowego.
 10. Współcześnie jedna z elektrowni na okoliczność akcji przetargowej na nowe agregaty pracujące w części kotłowej wprowadziła zapis, że wszystkie pomiary drgań i temperatur realizowane w celu oceny stanu technicznego będą transmitowane do DCS-u analogowo z wykorzystaniem standardu 4–20 mA.

Literatura

- [1] NOWICKI R.: *Wprowadzenie do problematyki nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*.
- [2] SZYMANIEC S.: *Wykorzystanie fazy w diagnostyce układów napędowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2013 (99), s. 43–48.
- [3] API STD 670, Machinery Protection Systems, 4th edition, DEC 2000.
- [4] *More reasons to rely on System 1 as your condition monitoring platform for every asset*, ORBIT, vol. 26, 1/2006.
- [5] NOWICKI R.: *O potrzebie znacznika fazy dla oceny stanu technicznego maszyn*. Cz. 1: *Systemy monitorowania i zabez-*

- pieczeń*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, wyd. Komel 2014.
- [6] MARTIN R., FORRY D., MAIER S., HANSEN CH.: *GE's next 7FA Gas Turbine „Test and Validation”*. GE Energy. JUL 2011.
 - [7] NURCOMBE B.: *Considerations When Retrofitting Overspeed Detection Systems*, vol. 25, 1/2005, ORBIT 17, p. 17–28.
 - [8] FORLAND C.: *Why phase information is important for diagnosing machinery problems*. ORBIT, 2nd/3rd Quarters, 1999, p. 29–31.
 - [9] NOWICKI R.: *O potrzebie znacznika fazy dla oceny stanu technicznego maszyn*. Cz. 2: *Systemy diagnostyki*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, wyd. Komel 2014.
 - [10] NOWICKI R.: *Multi state analysis in condition management*. Publication scheduled: ORBIT, vol. 34, 2/2014, p. 25.
 - [11] NOWICKI R., PAPPAS Y.: *Intelligent Maintenance Support of Hydro Station Asset Management*. Proceedings of International Conf. OCT 29–31, 2012, Bilbao, Spain.
 - [12] NOWICKI R.: *Współczesne kierunki rozwoju stacjonarnych systemów wspomagania oceny stanu technicznego majątku produkcyjnego*. Materiały 41 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Toruń 23–25 października 2012, s. 253–257.

 **Ryszard Nowicki** – GE POWER CONTROLS Sp. z o.o., Poznań/Polska, e-mail: Ryszard.Nowicki@ge.com

reklama



Preferujesz internet?

Wypromuj się na www.nis.com.pl