

Drgania spiralne w maszynach elektrycznych – efekt Newkirka

Piotr Miałkowski, Ryszard Nowicki

Wprowadzenie

Środki produkcji mogą podlegać różnego typu uszkodzeniom, które z kolei mogą prowadzić do zmiany ich stanu dynamicznego. Ta zmiana może być postępująca w czasie albo może mieć charakter cykliczny. W artykule poruszona jest kwestia niesprawności prowadzących do wystąpienia takiej cykliczności. Zajęto się rozpoznawaniem przyczyn problemów zmian oddziaływań dynamicznych spowodowanych przytarciami w wirnikowych maszynach elektrycznych i na przykładach pokazano możliwości ich jednoznacznego i poprawnego rozpoznawania w przypadku zastosowania poprawnych technik diagnostycznych.

W maszynach wirnikowych mogą występować przytarcia o różnej intensywności, będące konsekwencją różnego typu uszkodzeń pierwotnych oraz nieprawidłowości w pracy. Jeśli przycieranie występuje między wirnikiem a innym ciałem stałym, to można oczekiwać widocznych śladów procesów ciernych na powierzchniach trących o siebie ciał, pozostałości z procesów ciernych w oleju, zmian wymiarów etc. W artykule ograniczono się do omówienia przytarć lekkich, które nie powodują znacznego zużycia powierzchni ani istotnej zmiany wymiarów, a mimo tego (a także właśnie dlatego) mogą spowodować znaczne problemy eksploatacyjne. Omówiony zostanie wtórny efekt cieplny lekkiego przytarcia, powodujący deformację wirnika i zmianę sił dynamicznych widoczną jako zmianę składowej drgań 1X.

Większe wirnikowe maszyny elektryczne, takie jak silniki i generatory, są na ogół łożyskowane ślizgowo. W jaki sposób lekkie przytarcie może prowadzić do problemów w pracy? Np. przytarcie między wałem a uszczelnieniem wodorowym jest niebezpieczne nie dlatego, że może doprowadzić do pożaru na skutek tarcia, ale dlatego, że tarcie spowoduje wzrost drgań 1X i w konsekwencji odstawienie maszyny przez układ zabezpieczeń, co skutkuje w stratach produkcyjnych. Odstawienie może się wydawać przesadną reakcją. Zauważmy jednak, że alternatywą jest zwiększenie drgań do poziomów skutkujących uszkodzeniem uszczelnień, wyciekami wodoru i w konsekwencji... zagrożeniem eksplozją. Wciąż jednak w wielu przypadkach użytkownik, widząc bardzo nikłe ślady przytarcia w postaci delikatnej linii obwodowej na wale, i lekko wyblęszczone miejsce na elemencie stacjonarnym, odczuwa pewien dyskomfort, że jego ważna dla produkcji maszyna została zatrzymana, z wydawać by się mogło, nieistotnego powodu.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia może to być sytuacja gorsza niż cięższe przytarcie. Ciężkie przytarcie prawdopodobnie spowoduje powiększenie się luzów i po ponownym

Streszczenia: Jedną z niesprawności wirnikowych maszyn elektrycznych jest lekkie przytarcie, mogące prowadzić do zmiany poziomów drgań w postaci ich falującego poziomu w czasie. Taki stan dynamiczny budzi uzasadnioną obawę użytkowników maszyny o możliwość jej dalszego wykorzystywania w procesie produkcyjnym bez ryzyka wystąpienia poważnej awarii. W artykule pokazano szereg przykładów drgań falujących, jakie w niektórych przypadkach wymusiły odstawienie maszyny, w innych natomiast, po rozpoznaniu przyczyny występowania, można było podjąć świadomą decyzję o możliwości dalszego wykorzystywania maszyny bez ryzyka wystąpienia poważniejszej awarii.

W artykule opisano mechanizm generowania się drgań spiralnych, a następnie pokazano kilka przykładów ich identyfikacji. Na przykładach pokazano rodzaje analiz, które najlepiej prowadzą do prawidłowego rozpoznania diskutowanego typu niesprawności oraz omówiono sposób ich interpretacji.

SPIRAL VIBRATIONS IN ELECTRICAL MACHINES – NEWKIRK EFFECT

Abstract: One of malfunctions that can be present in electric motors and generators is a light rubbing, which can lead to a change in vibration levels in the form of their overall level oscillations over time.

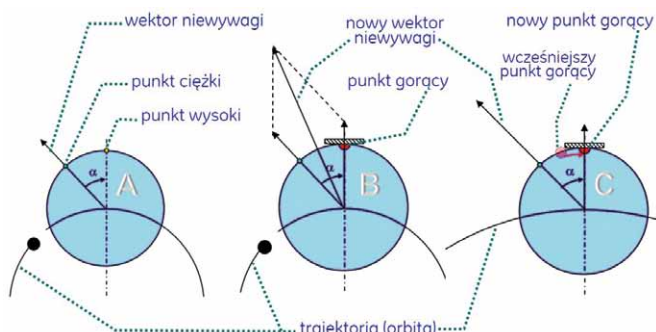
Such a dynamic condition raises a warrantable fear of the machine users about the possibility of its further use in the production process without the risk of a major accident.

The article presents a series of examples of long time oscillations of amplitude, which in some cases forced the machine to be shut down, in others, after recognizing the reason for such vibrations, it was possible to make a conscious decision about the continuation of operation, without the risk of failure.

The examples show the types of analyzes that lead to the correct diagnosis of this type of the discussed malfunction and their interpretation.

uruchomieniu maszyny może się okazać, że problem „sam się rozwiązał”. Natomiast w przypadku przytarć lekkich czas występowania pogorszonego stanu może być bardzo długi, w konsekwencji można mówić tu o chorobie chronicznej, obserwowanej przez wiele miesięcy lub nawet lat – aż do usunięcia przyczyn.

Generalnie, w zależności od stosunku działających sił normalnych (udaru) i stycznych (tarcia), przytarcia powodują liczne i mocno zróżnicowane efekty dynamiczne. Jednym z nich jest zjawisko „krążenia” wektora drgań 1X, zwane efektem Newkirka [1]. Kluczowe do zrozumienia tego efektu jest uświadomienie sobie, że kierunek dynamicznego wygięcia wirnika na skutek jego niewyważenia (kierunek odpowiedzi wirnika na niewyważenie, czyli tzw. „punkt wysoki”, technicznie opisywany przez fazę wektora 1X) nie pokrywa się z kierunkiem niewyważenia symbolicznie przedstawionym jako tzw. „punkt ciężki” (rys. 1 a), odpowiadający dodatkowej masie zainstalowanej na idealnie wyważonym wirniku, na pewnym promieniu niewyważenia. Odpowiedź wirnika, zgodnie z wszelkimi modelami dynamiki, począwszy od modelu Jeffcotta¹, jest opóźniona o kąt α , zależny od występującego tłumienia i różnicę (odległość) aktualnej prędkości obrotowej ω i prędkości rezonansowej najbliższej mody drgań (rys. 1 a). W przypadku kontaktu powierzchni wału (w punkcie wysokim) z elementem stałym dochodzi do miejscowego nagrzewania się powierzchni i w konsekwencji do dodatkowego wygięcia wału, w kierunku „punktu gorącego”, czyli aktualnego „punktu wysokiego”, co powoduje pojawienie się nowej składowej niewyważenia (rys. 1 a). Pojawia się więc nowy stan niewyważenia, tj. niewyważenie efektywne składające się z oryginalnego wektora niewyważenia oraz z niewyważenia na skutek wygięcia termicznego. Nowa odpowiedź wirnika (wygięcie dynamiczne) będzie również opóźniona o kąt α , a zatem punkt wysoki (faza drgań), czyli również punkt kontaktu przemieści się (rys. 1 c). Proces jest kontynuowany, powodując wędrówkę położenia punktów kontaktu oraz odpowiedzi (wektora 1X drgań).



Rys. 1. Prosty model przytarcia typu Newkirka: (A) wirnik bez przytarcia, kąt fazowy punktu wysokiego opóźniony w stosunku do punktu ciężkiego o α ; (B) podczas przytarcia następuje wygięcie wirnika w kierunku punktu wysokiego, co skutkuje pojawieniem się nowej składowej niewyważenia i zmianą niewyważenia efektywnej; (C) kąt α pozostaje niezmienny, a więc zmienia się punkt wysoki²

Zjawisko to zostało opisane przez Newkirka i wyjaśnione przez Kimballa w latach 20. ubiegłego wieku i posiada bogatą literaturę rozpatrującą poszczególne przypadki oraz doszczegółowienia modelu [1, 2], z których za użyteczne w praktyce diagnostycznej można np. uznać spostrzeżenie na temat zależności

kierunku przemieszczania się punktu kontaktu (tzn. zgodnie z lub przeciwnie do kierunku obrotów wirnika) od lokalizacji przytarcia i konfiguracji wirnika [3]. Można też zauważyć, że na skutek przytarcia prowadzącego do zmiany sił stycznych i normalnych kąt opóźnienia również może się zmieniać (w pewnym zakresie), a zatem odpowiedź wirnika w wielu przypadkach będzie nieliniowa i w konsekwencji bardziej złożona, niż to wynika z przedstawionego powyżej prostego modelu.

W przypadku maszyn wirnikowych możliwe jest również lokalne nagrzanie wału i w konsekwencji jego deformacja, powodowane przez opływający płyn. Zjawisko takie występuje w łożyskach szybkoobrotowych maszyn z tzw. wirnikami przewieszonymi (tj. gdy występuje istotna masowo część wirnika poza punktami jego podparcia) i nosi nazwę efektu Mortona [4, 5]. Efekt Mortona jest powodowany przez anizotropię pola temperatury wokół wału (typowo: oddziaływaniem w łożysku oleju na wał). To anizotropowe pole powodować może zróżnicowane nagrzewanie się wału na jego obwodzie. Oba wymienione efekty prowadzą do pojawienia się zgięcia wału, powodującego zmianę poziomu drgań oraz zmianę w czasie wzajemnego położenia punktów ciężkiego oraz wysokiego, co w konsekwencji skutkuje zmianą fazy drgań.

W artykule zostaną pokazane przykłady wystąpienia drgań spiralnych w odniesieniu do wirnikowych maszyn elektrycznych, a zatem ograniczymy się do sytuacji, w której występuje fizyczny kontakt (przytarcie, ale również oddziaływanie szczotek na pierścienie ślizgowe, kontakt w niektórych typach uszczelnień), czyli zjawisko Newkirka. Efekt Mortona – z dotychczasowego doświadczenia autorów – dotyczy maszyn o wyższych prędkościach obrotowych i wyższych amplitudach drgań 1X w stosunku do wielkości luzu łożyskowego niż spotykane w typowych przemysłowych napędach elektrycznych i generatorach.

W czasie występowania efektu Newkirka obserwowana jest na wykresie biegunowym cykliczna zmiana wektora drgań 1X, której prędkość jest uzależniona od intensywności lokalnego źródła ciepła oraz od intensywności odprowadzania ciepła w obszarze nieuczestniczącym w danej chwili w procesie przytarcia. Faza wektora zmienia swoje położenie na wykresie, w przybliżeniu ze stałą (jeśli nie zmieniają się warunki pracy maszyny, takie jak np. jej obciążenie) i na ogół z dość wolną prędkością. Jeśli jest to przytarcie lekkie, to wzrost amplitudy jest na ogół na tyle niewielki, że pozwala na osiągnięcie cyklu ustalonego, tzn. powtarzalnej (lub prawie powtarzalnej) charakterystyki zmiany wektora w czasie. Natomiast w przypadku przytarcia ciężkich wzrost amplitudy jest na tyle duży, że maszyna jest wybijana przez układ zabezpieczeń w trakcie rozwijania się drgań, co może mieć miejsce po wystąpieniu pewnej niewielkiej liczby cykli spiralnych lub nawet po wystąpieniu fragmentu pojedynczego cyklu (tzn. przed osiągnięciem cyklu ustalonego, który by hipotetycznie mógł zaistnieć dla wyższego poziomu drgań niż dopuszczalny przez system zabezpieczeń). Ostatni z opisanych scenariuszy utrudnia czasami rozpoznanie, że w gruncie rzeczy mamy do czynienia ze zjawiskiem o tej samej naturze, natomiast zachodzącym przy różnej jego intensywności. W niektórych publikacjach dotyczących tematu można

znaleźć rozważania dotyczące możliwie największej prędkości falowania drgań (podczas którego płynnie dochodzi do zmiany położenia wektora $1X$ o wartość kąta 2π) oraz kierunku możliwej zmiany kąta fazowego (tzn. czy jest on współbieżny, czy też przeciwbieżny w stosunku do obrotów wirnika).

W dalszej części artykułu opisano kilka przypadków rozpoznania lekkich przytarć w uszczelnieniach wirników maszyn elektrycznych oraz spowodowanych przez aparat szczotkowy.

2. Problem silnika agregatu pompowego

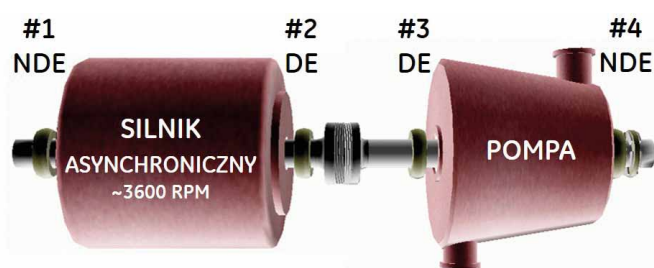
Agregat pompowy, jak pokazany na schemacie na rys. 2 (podobny do pokazanego na str. 193 w [6]), jest wyposażony w system nadzoru stanu technicznego, na który składają się: czujniki zainstalowane zgodnie z wymaganiami standardu API 670, system monitorowania i zabezpieczeń oraz system akwizycji danych diagnostycznych klasy online³, umożliwiający gromadzenie danych w stanach przejściowych. Do systemu monitorowania i zabezpieczeń podłączone są czujniki bezkontaktowe (drżania względne, przesuw osiowy, znacznik fazy), temperatury (metalów łożysk, oleju łożyskowego i uzwojeń silnika), poziomu oleju, a także ciśnienia (różnicowego na filtrze oleju oraz w systemie uszczelnień). Oprócz pomiarów parametrów stanu technicznego dla sygnałów generowanych z ww. czujników realizowanych przez system nadzoru stanu technicznego, monitorowana jest także sprawność działania agregatu pompowego, a do systemu diagnostyki są także dodatkowo importowane wybrane zmienne procesowe, pozwalające odróżnić zmiany w pomiarach drgań, będące efektem zmian warunków pracy (procesu, czyli warunków obciążenia) od tych, które są spowodowane zmianą stanu technicznego maszyny (niesprawnością).

W czasie poremontowego uruchomienia agregatu pompowego, w kilkanaście minut po uruchomieniu silnika, doszło do jego awaryjnego odstawienia [7]. Bezpośrednią przyczyną były drżania względne w węźle łożyskowym silnika leżącym po jego stronie napędowej.

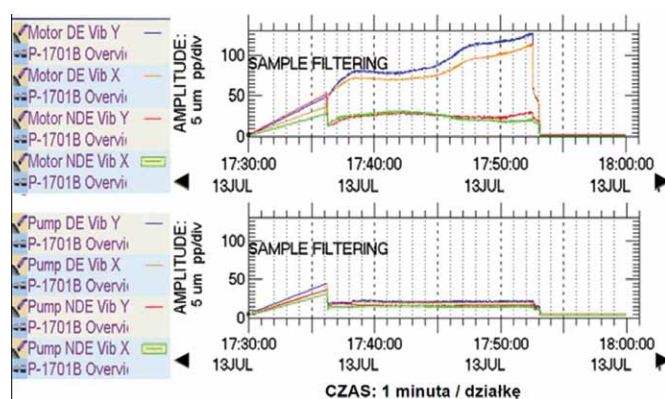
Na rys. 3 pokazano zmiany pomiarów drgań dla wszystkich czterech węzłów łożyskowych agregatu, gdzie oznaczenie „DE” (ang. *Drive End*) dotyczy przysprzęglowych węzłów łożyskowych, a „NDE” (ang. *Non-Drive End*) jego węzłów skrajnych. Widoczna jest stabilizacja poziomów drgań w trzech węzłach łożyskowych (poczynając od godziny ok. 17:36), natomiast dla węzła DE silnika obserwowany jest ich sukcesywny wzrost. Około 17:53 drżania przekraczają poziom zabezpieczeń (tu: 150 μm pp), co powoduje awaryjne odstawienie agregatu.

Przyczyna odpowiedzialna za ten nienormalny wzrost drgań względnych może być powiązana (ale nie musi) ze składową obrotową. Na rys. 4 pokazano połowkowe widmo potokowe odpowiadające temu samemu przedziałowi czasowemu, dla którego są wykonane analizy zamieszczone na rys. 3. Z analizy tej wynika, że w drganiach dominuje i za ich wzrost odpowiada składowa obrotowa.

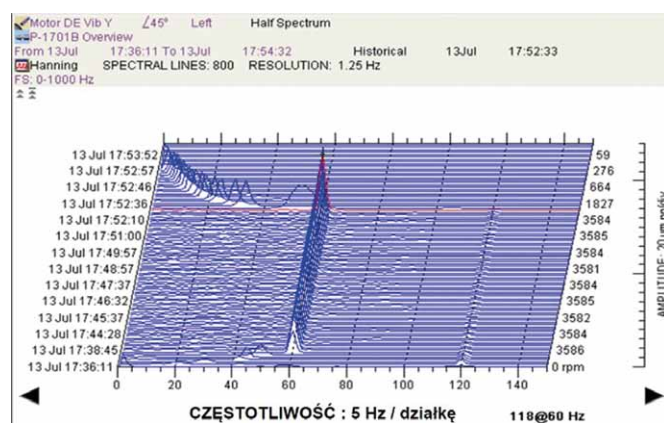
Na rys. 5 pokazane są historyczne trendy zmiany drgań w problematycznym węźle łożyskowym, z okresu poprzedzającego przeprowadzony remont (ok. pół roku przed wystąpieniem odstawienia awaryjnego).



Rys. 2. Schemat agregatu pompowego

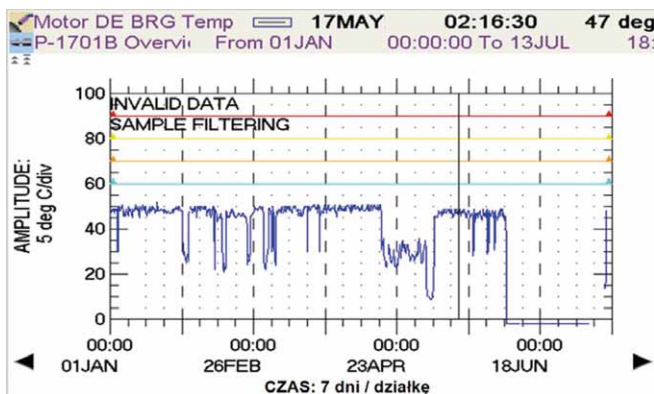
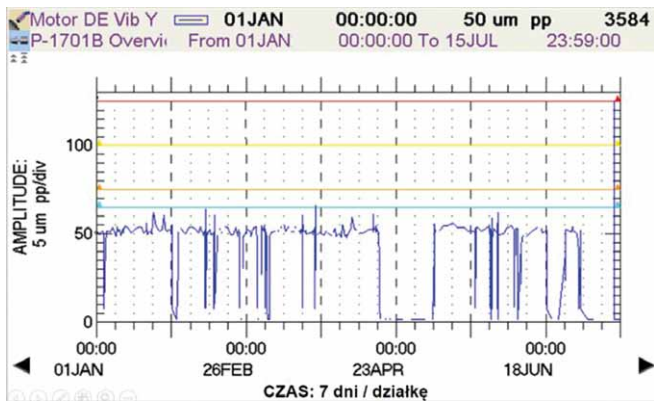


Rys. 3. Zmiana drgań względnych XY łożysk DE i NDE silnika (u góry) oraz pompy (na dole)

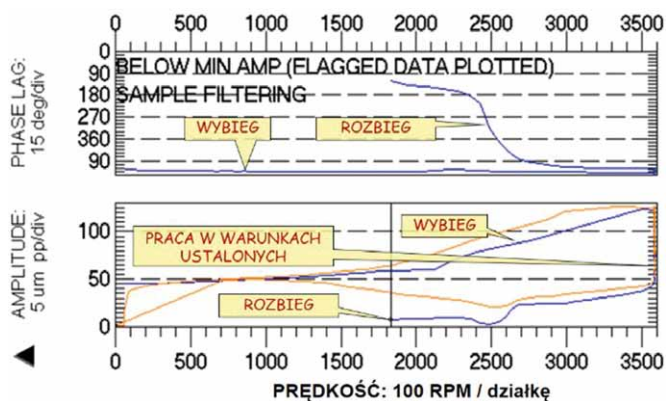


Rys. 4. Widmo potokowe drgań dla sygnału z czujnika Y węzła łożyskowego strony napędowej silnika

Z zamieszczonych wykresów wynika, że dla pracującego silnika poziom drgań kształtował się na poziomie ok. 55 μm pp, natomiast temperatura tego węzła łożyskowego wynosiła ok. 50°C (przy zabezpieczeniu ustawionym na poziomie 90°C). Można zauważyć, że bezpośrednio po uruchomieniu silnika poziom drgań w problematycznym węźle łożyskowym osiągnął wartości zbliżone do pokazanych na trendzie historycznym, natomiast następnie zaczął wzrastać z gradientem



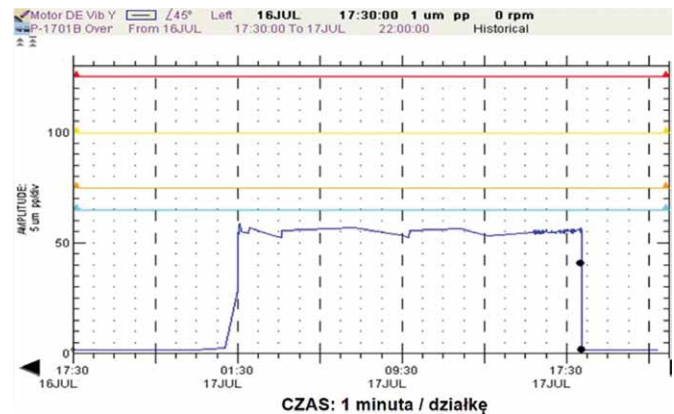
Rys. 5. Trendy historyczne drgań (u góry) i temperatury (na dole) węzła łożyskowego DE silnika



Rys. 6. Wykres Bodego sygnału 1X z czujnika Y zainstalowanego w łożysku DE silnika

ok. 6 μm pp /minutę, co po około kwadransie doprowadziło do awaryjnego odstawienia agregatu.

Na rys. 6 pokazano nieskompensowaną charakterystykę Bodego wektora 1X (czyli składowej obrotowej, w systemie X oznacza krotność częstotliwości obrotowej) sygnału z czujnika 2Y, odpowiadającą problematycznemu uruchomieniu. Charakterystyka pozwala rozpoznać rezonans układu wirnikowego dla obrotów, w przybliżeniu, 2500 RPM. Wykres potwierdza wzrost



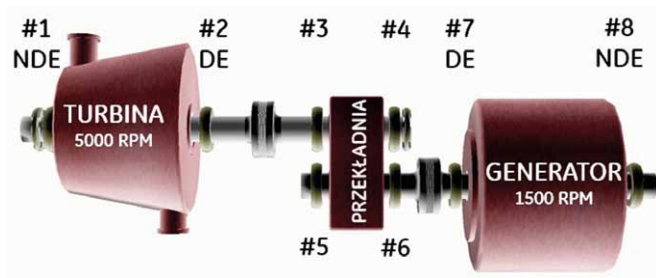
Rys. 7. Trend drgań względnych z czujnika Y w węźle DE silnika po jego naprawie

poziomu drgań już w czasie pracy agregatu z ustaloną prędkością obrotową (która widoczna jest również na rys. 3) i nie pokazuje już żadnego rezonansu układu wirnikowego w czasie wybiegu. Natomiast w czasie odstawienia agregatu nie należy poszukiwać tego rezonansu dla tych samych obrotów, dla jakich występował w czasie uruchomienia, bowiem widoczne efekty zmiany charakterystyk w czasie pracy agregatu z obrotami nominalnymi świadczą o pogłębiającym się procesie przycierania, co w konsekwencji powoduje przemieszczenie się rezonansu systemu wirnik/łożyska w kierunku do częstotliwości wyższej, niż to miało miejsce pierwotnie. Konsekwencją tego pogłębianego przycierania jest kształt charakterystyki wybiegowej, taki jak pokazano na rys. 6. Cechuje się ona trendem opadającym tak sumarycznego poziomu drgań, jak i ich składowej 1X wraz z obniżaniem się prędkości obrotowej wirnika.

W tym czasie nie zaobserwowano zmian w pomiarach temperatury problematycznego węzła łożyskowego, które by mogły świadczyć, że za zmianę jego dynamiki jest odpowiedzialne bezpośrednio łożysko⁴. W konsekwencji podejrzenia padły na brak poprawności pracy uszczelnienia labiryntowego wału w rejonie tego łożyska. Zarządzono sprawdzenie stanu tego uszczelnienia, bowiem jeśli podejrzenia byłyby trafne, to uszczelnienie winno nosić ślady przytarcia. Takie przytarcie może generować duże ilości ciepła, które prowadzą do deformacji (zgięcia) wirnika i powodują przebarwienia termiczne pozostających w kontakcie mechanicznym części maszyny.

Przeprowadzona inspekcja pokazała ewidentne ślady przytarcia. Rozpoznanie typu uszkodzenia pozwoliło na podjęcie decyzji o demontażu silnika i skierowania go do naprawy.

Awaryjne odstawienie nastąpiło (por. rys. 3) około godziny 18 13 lipca. Natomiast w nocy z 16/17 lipca było już możliwe przeprowadzenie testowego uruchomienia agregatu pompowego po naprawie silnika. Na rys. 7 pokazano 16-godzinny trend drgań w uprzednio niepoprawnie pracującym węźle silnika. Jak widać, drgania charakteryzują się stałym poziomem, który jest praktycznie taki sam, jak widoczny dla danych historycznych pokazanych na rys. 5.



Rys. 8. Schemat agregatu turbogeneratora

3. Drgania spiralne generatora

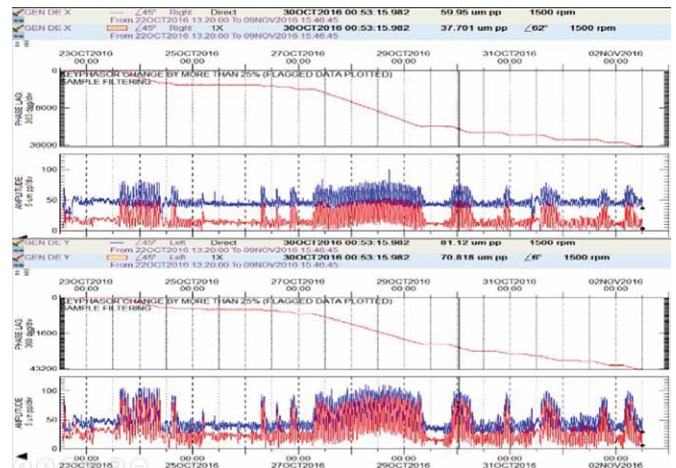
Problemy z drganiami spiralnymi w podobnym stopniu jak dla silników mogą również występować w przypadku generatorów [3]. Na rys. 8 pokazano schemat agregatu, na którym zaobserwowano drgania „falujące” (określenie operatorów), które w jednym z węzłów łożyskowych przekraczały dopuszczalne poziomy alarmowe.

Krzywe niebieskie na dolnych połówkach charakterystyk, pokazanych na rys. 9, 10 i 11 (tzn. trendy sumarycznych poziomów drgań), obrazują problem widziany oczyma operatorów nadzorujących pracę turbosespołu, bowiem operatorzy przede wszystkim bazują na ocenie sygnałów w formie trendów informujących o poziomie drgań. Ograniczając się do takich analiz, nie można dokonać oceny wskazującej na prawdopodobny rodzaj uszkodzenia, a w konsekwencji nie można dokonać oceny prawdopodobieństwa wystąpienia poważnego uszkodzenia majątku produkcyjnego.

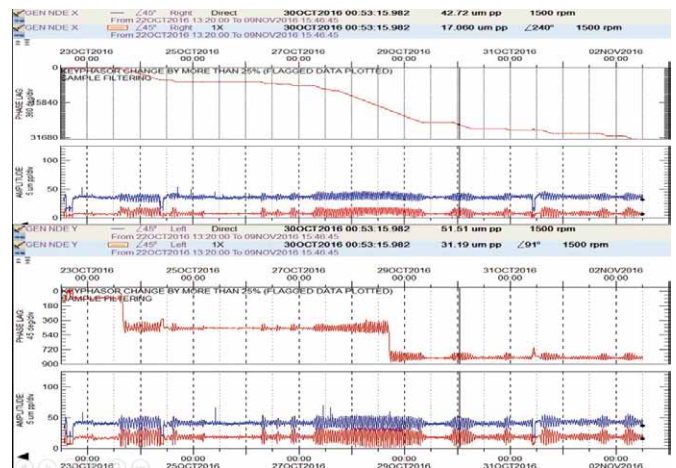
Na ww. rysunkach kolorem czerwonym pokazano dodatkowo trendy charakteryzujące wektory drgań 1X. Na rys. 9 pokazano charakterystyki trendu składowej 1X (amplitudy i fazy) dla sygnałów z czujników drgań względnych w łożysku generatora od strony przekładni (DE, łożysko #7), a na rys. 10 dla drugiego z łożysk (NDE, łożysko #8). Pomiary dla trzech kanałów charakteryzują się dużym skorelowaniem, w znacznym stopniu skorelowane są także amplitudy składowej 1X z magnitudami sygnałów. Natomiast fazy wektorów cechują się systematycznym opóźnieniem, charakterystycznym dla drgań spiralnych spowodowanych przycieraniem. Jedynie w przypadku kanału pomiarowego Y w łożysku Nr 8 charakterystyka fazowa nie prezentuje (pozornie, jak wyjaśniono dalej w tekście) tak płynnej zmiany, jak obserwowana dla pozostałych trzech kanałów pomiarów drgań względnych.

Na rys. 11 pokazano podobną charakterystykę (dla sygnału z czujnika 7Y), ale dla krótszego przedziału czasu niż pokazana wcześniej na rys. 9. Teraz widoczna jest ok. 1-godzinna cykliczność poziomu sygnału oraz dość systematyczny trend opóźniający fazy wektora 1X.

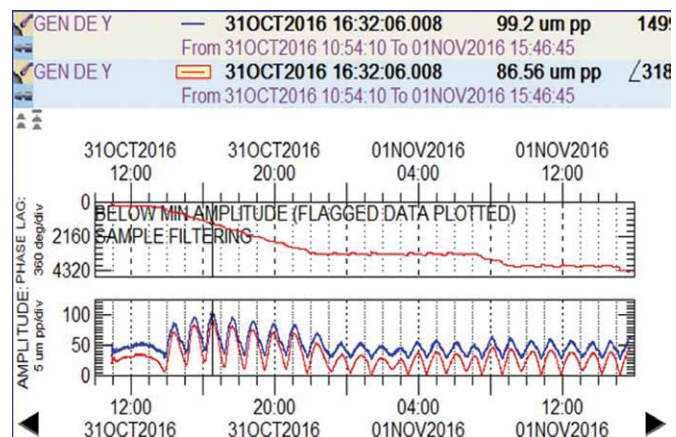
W odróżnieniu od operatorskich systemów prezentacji danych (ich możliwości ograniczają się na ogół do prezentacji pomiarów w postaci trendów i najczęściej są to wyłącznie trendy poziomu sumarycznego), w systemach wykorzystywanych przez służby utrzymania ruchu możliwa jest prezentacja



Rys. 9. Trend 10-dniowy drgań względnych czujników XY łożyska #7

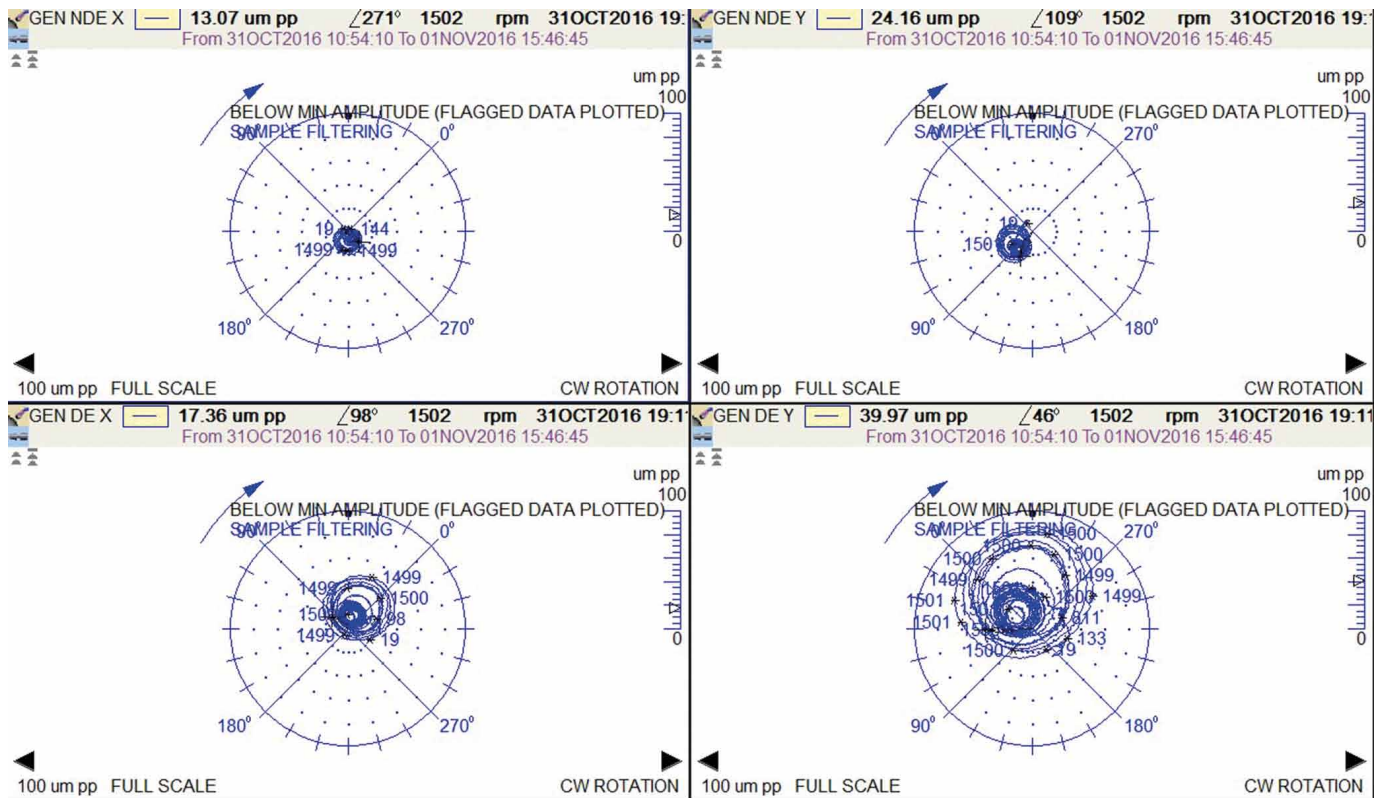


Rys. 10. Trend 10-dniowy drgań względnych czujników XY łożyska #8



Rys. 11. Trend ~dobowy drgań względnych sygnału z czujnika Y łożyska #7

danych w postaci charakterystyk biegunowych nX, tak jak to pokazano dla analizowanego przypadku dla wektora 1X na rys. 12. Charakterystyki te potwierdzają obecność drgań

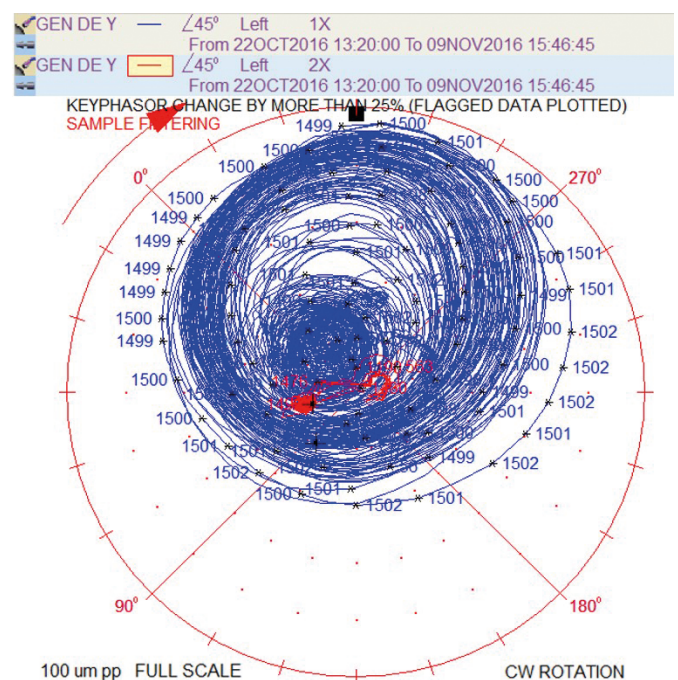


Rys. 12. Charakterystyki biegunowe wektora 1X dla sygnałów czujników XY drgań względnych generatora (u góry dla łożyska #8 i na dole dla łożyska #7 – z lewej dla czujników X, a z prawej dla czujników Y)

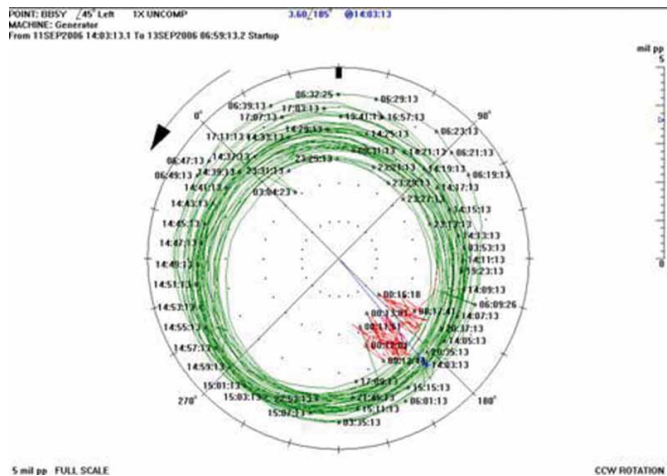
spiralnych, przy czym ta forma drgań w łożysku #7 (DE) jest zdecydowanie bardziej zaawansowana niż w łożysku #8 (NDE).

Zauważmy, że obrót wektora wynikający z wygięcia termicznego na skutek przytarcia (składowa termiczna) następuje wokół końca wektora stacjonarnego reprezentującego niewygagę (lub quasi-stacjonarnego, jeżeli w grę wchodzi np. wygięcie termiczne na skutek, przykładowo, nierównomierności chłodzenia wirnika generatora). W zależności od stosunku amplitud obu wektorów (krążącego i stacjonarnego) amplituda wektora wypadkowego albo opóźnia się w funkcji czasu (na wykresach na rys. 12 i 13 odpowiada to pętli zawierającej środek wykresu), albo oscyluje wokół pewnej wartości (na wykresach jw. pętla nie zawiera środka wykresu). W tym drugim przypadku, ze względu na wielkość oscylacji w stosunku do całkowitej zmiany fazy, giną one w pełnej skali fazy, na wykresach rys. 9, 10 i 11 tworząc regiony pozornie ustalonej fazy.

Przeprowadzone analizy pozwoliły na rozpoznanie drgań spiralnych, których przyczyna jest zlokalizowana w pobliżu węzła łożyskowego #7. Natomiast fakt, że zmienność poziomu drgań względnych była stosunkowo niewielka i w szczytowych momentach nie przekraczały one 100 μm , pozwalał na zbagatelizowanie obserwowanego ich falowania przy pełnej świadomości, co za tę zmienność odpowiada. Rozwiązanie problemu zostało odłożone do najbliższego planowego postępu remontowego, w którym przeprowadzono korektę montażu uszczelnień wału generatora i problem zaniknął.



Rys. 13. Charakterystyki biegunowe wektora 1X dla sygnałów czujników drgań względnych generatora



Rys. 14. Drgania spiralne obserwowane na generatorze w wyniku działania aparatu szczotkowego uziemiającego wirnik

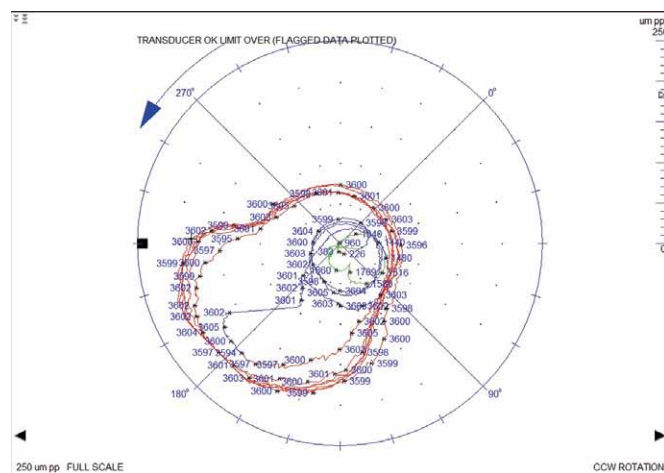
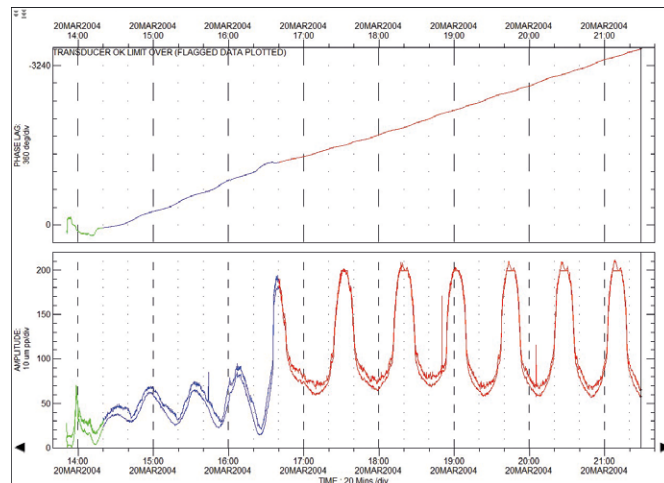
4. Drgania spiralne generatora spowodowane aparatem szczotkowym

Drgania spiralne mogą być wywołane pracą aparatu szczotkowego. W [8] dokonano porównania reakcji wirnika generatora na zastosowanie zróżnicowanych aparatów szczotkowych, których zadaniem jest zbieranie ładunków generowanych w wirniku. Na rys. 14 pokazano przykładowy wykres drgań spiralnych dla jednego z zestawów badanych szczotek. Należy zauważyć, że chociaż formalnie nie jest to przytarcie – kontakt szczotek jest przewidziany konstrukcyjnie – jego nierównomierność powoduje powstanie punktu gorącego, a więc przy pewnych konfiguracjach wirnika rozwój drgań spiralnych. Nadmierna czułość wirnika na efekt termiczny w tym miejscu wirnika stanowi istotny problem konstrukcyjny, ponieważ działanie maszyny wymaga kontaktu szczotek, a pewna nierównomierność ich kontaktu może wystąpić z różnych przyczyn eksploatacyjnych.

5. Niekołowe drgania spiralne generatora

Wirniki generatorów posiadają elementy konstrukcyjne o sztywności izotropowej (czyli takiej samej we wszystkich kierunkach promieniowych) oraz inne posiadające sztywność anizotropową (różną w różnych kierunkach promieniowych). Wirniki większości generatorów dwubiegunowych posiadają dwa lokalne maksima i minima sztywności na odcinku, na którym wirnik posiada uzwojenia.

Na rys. 15 pokazano drgania spiralne uzyskane w wyniku przycierania wirnika generatora. W przedziale czasu 14:30...16:30 charakteryzują się one kształtem kołowym (o cykliczności ~30 minut), a następnie ulegają spowolnieniu (w przedziale czasu od 16:40 do 21:10 obserwuje się 6 cykli, co daje średni czas pojedynczego cyklu wynoszący ~45 minut) i ponaddwukrotnie zwiększają swoją dynamikę przechodząc w drgania spiralne o kształcie niekołowym. Zgodnie z oczekiwaniami dla charakterystyki drgań spiralnych widoczne są dwa lokalne minima



Rys. 15. Charakterystyki wektora 1X drgań generatora: we współrzędnych prostokątnych (u góry) oraz biegunowych (na dole)

i maksima charakterystyki drgań, natomiast niekołowy kształt charakterystyki obserwowany po godzinie 16:40 jest najprawdopodobniej wynikiem anizotropii sztywności wirnika, która uwidacznia się po istotnym zwiększeniu dynamiki drgań. Warto zauważyć, że w tym przypadku wektor krąży współbieżnie z kierunkiem obrotów wirnika, a więc zgodnie z teorią [3] miejsce kontaktu powinno znajdować się na części przewieszonej.

6. Zakończenie

W artykule pokazano przykłady zróżnicowanego rozwoju drgań spiralnych wirnikowych maszyn elektrycznych, za które odpowiedzialny był efekt Newkirka.

W odniesieniu do maszyn wirnikowych można się liczyć z wystąpieniem przycierania wirnika o jakiś inny element konstrukcyjny lub kontaktu wynikającego z przyczyn projektowych (szczotki, niektóre typy uszczelnień, jak np. uszczelnienia kontaktowe). To przycieranie prowadzi do lokalnego podwyższenia temperatury wału. W przypadku maszyn krytycznych celowe jest zatem wykorzystywanie poprawnie skonfigurowanych systemów monitorowania i zabezpieczeń online, które współpracują z systemem akwizycji danych diagnostycznych, bowiem

systemy takie zdecydowanie ułatwiają sformułowanie poprawnej diagnozy.

Współczesne systemy diagnostyczne gromadzą dane tak w stanach ustalonych, jak i w warunkach uruchamiania oraz odstawiania maszyn, a systemy bardziej zaawansowane także realizują gromadzenie danych z dużą rozdzielczością w przypadku wystąpienia na agregacie stanów alarmowych (tak w czasie bezpośrednio poprzedzającym zaistnienie alarmu⁵, jak i po jego zaistnieniu). Jeśli wystąpienie alarmu powoduje awaryjne odstawienie agregatu, to lepsza świadomość przyczyny odstawienia prowadzi do zwiększenia racjonalizacji działania tak operatorów nadzorujących proces produkcyjny, jak i służb utrzymania ruchu odpowiedzialnych za stan techniczny majątku produkcyjnego. Zgromadzone dane pozwalają na stosunkowo łatwe rozpoznawanie szeregu typowych niesprawności działania maszyny, w tym także takich, które skutkują pojawieniem się drgań spiralnych. Drgania falujące mogą być skutkiem różnych niesprawności maszyny i mogą nieść ze sobą zróżnicowane konsekwencje. W większości przypadków występowania drgań spiralnych można łatwo dokonać nie tylko ich rozpoznania, ale także przybliżonej lokalizacji miejsca w maszynie, w którym to przycieranie występuje.

Jeśli drgania spiralne prowadzą do wzrostu poziomu drgań i w konsekwencji do awaryjnego odstawienia maszyny, to system diagnostyki umożliwia *post factum* rozpoznanie tej przyczyny oraz wskazanie węzła łożyskowego, który za to odstawienie jest odpowiedzialny (tak jak pokazano w pierwszym przykładzie). Pozwala to zatem na podjęcie świadomej decyzji, czy maszyna może być powtórnie uruchomiona, czy też należy wykonać inspekcję (i jeśli tak, to w jakim zakresie).

Jeżeli natomiast drgania spiralne przechodzą w drgania kołowe, a poziomy drgań nie skutkują wyłączeniem maszyny, bowiem wartości graniczne zabezpieczeń drganiowych nie są przekroczone, to w sposób kontrolowany można bezpiecznie realizować proces produkcyjny, w którym uczestniczy nie do końca sprawna maszyna (tak jak to miało miejsce w pozostałych przykładach). Także w tych przypadkach nadzorowanie agregatu – nie tylko z pomocą systemu monitorowania i zabezpieczeń, ale także z wykorzystaniem systemu diagnostyki – umożliwia prowadzenie automatycznego gromadzenia danych i w przypadku potrzeby dokonania ich stosownej analizy. W opisanych przykładach rozpoznania drgań falujących dla generatorów zgromadzone dane pozwoliły ocenić niesprawność jako mało groźną i podjąć świadomą decyzję o możliwości dalszej pracy turbogeneratora bez ryzyka wystąpienia jego uszkodzenia w konsekwencji nietypowego stanu dynamicznego.


Przypisy

1. Klasyczny model dynamiki wirnika został zaproponowany przez Henrego Homana Jeffcotta w 1919 r. W stosunku do wcześniejszego modelu De Lavalą uwzględnił wpływ tłumienia łożysk na dynamikę wirnika, a zatem w konsekwencji stopniową zmianę fazy przy przejściu przez rezonanse. W modelu De Lavalą, który nie uwzględniał wpływu tłumienia, następowała skokowa inwersja fazy przy przejściu przez rezonans.

2. UWAGA: fazy na rysunkach (B) i (C) zostały rozdzielone dla poglądowej ilustracji mechanizmu opisywanej zmiany, natomiast w rzeczywistości jest to jeden proces powodujący postępującą zmianę fazy.
3. Jest to określenie branżowe, charakteryzujące system pracujący w czasie rzeczywistym, realizujący pomiary w sposób ciągły i jednocześnie we wszystkich kanałach (tzn. współfazowo).
4. Takie wnioskowanie można prowadzić jedynie wtedy, kiedy posiada się pewność co do poprawnej instalacji czujników temperatury w łożyskach. Autorom znanych jest szereg przykładów niepoprawnie zainstalowanych sensorów temperatury w łożyskach, co automatycznie powoduje zmniejszenie wrażliwości pomiarów, a w przypadkach skrajnych nawet ich całkowitą bezużyteczność.
5. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu buforów kołowych, w których dane zapisywane są ciągle, a najstarsze z nich są zamazywane. Wystąpienie alarmu uruchamia procedury zrzutu tych danych z bufora do bazy danych na serwerze systemu diagnostyki. Bufor kołowy umożliwia zapis danych historycznych gromadzonych z większą rozdzielczością dla określonego odcinka czasu bezpośrednio przed wystąpieniem alarmu.

Literatura

- [1] NEWKIRK B.L.: *Shaft Whipping*. „General Electric review” 27(3)/1924, p. 169.
- [2] NEWKIRK B.L.: *Shaft Rubbing. Relative Freedom of Rotor Shafts from sensitiveness to rubbing Contact When Running Above Their Critical Speeds*. „Mechanical Engineering”, Vol. 48, No. 8, 1926, pp. 830–832.
- [3] Péton N.: *Balancing with the presence of a rub*. XIIIth International Scientific and Engineering Conference „HERVICON-2011”, „Procedia Engineering” 39/2012, pp. 182–191.
- [4] KEOGH P.S., MORTON P.G.: *Journal Bearing Differential Heating Evaluation With Influence on Rotor Dynamic Behaviour*. Proceedings of the Royal Society, London, Vol. A441, 1993, pp. 527–548.
- [5] DE JONGH F.M., MORTON P.G.: *The synchronous instability of a compressor rotor due to bearing journal differential heating*. „Journal of Engineering for Gas Turbines and Power”, October 1996, Vol. 118, pp. 816–824.
- [6] MAURICE L., ADAMS J.R.: *Rotating Machinery Vibration from analysis to troubleshooting*. Case Western Reserve University, Cleveland Ohio, Marcel Dekker Inc., New York Basel, ISBN: 0-8247-0258-1, 2001.
- [7] ASHLEY P., MIAŁKOWSKI P., NOWICKI R.: *Diagnostyka drgań spiralnych wirnikowych maszyn elektrycznych*. „Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne” 1(113)/2017, s. 177–182.
- [8] GE SUPPLEMENT TO TECHNICAL INFORMATION LETTER GETIL 1581, 31 AUGUST 2007, raport wewnętrzny GE.

 dr inż. Piotr Miałkowski – e-mail: Piotr.Mialkowski@bhge.com
dr inż. Ryszard Nowicki – e-mail: Ryszard.Nowicki@bhge.com