

Klasyczne metody nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi

Ryszard Nowicki

1. Wprowadzenie

W [1] opisano stosowane wspólnie formy nadzoru stanu technicznego silników elektrycznych. Niniejszy artykuł stanowi rozwinięcie problematyki w zakresie najbardziej tradycyjnych form nadzoru online, realizowanych z pomocą pomiarów temperatury i drgań. Obie formy monitorowania mogą być wykorzystywane do bieżącej kontroli stanu technicznego, a także w celu realizacji zabezpieczeń. Podstawowe konfiguracje czujników oraz wymagań w stosunku do systemu monitorowania opisane są w standardzie [2]. Standard ten został stworzony przez specjalistów zgrupowanych wokół przetwórstwa ropy naftowej i gazu. Natomiast ze względu na brak na świecie podobnie dojrzałe sformułowanych dokumentów dedykowanych innym branżom oraz ze względu na fakt, że maszyny używane w tych innych branżach cechują się często podobnymi cechami konstrukcyjnymi, standard ten jest dość powszechnie przywoływany przy okazji formułowania wymogów dla systemów monitorowania i zabezpieczeń stanu technicznego także w innych obszarach zastosowań.

Celem artykułu jest omówienie wymogów dla klasycznych systemów nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi w przypadku stosowania różnych strategii utrzymania ruchu, zwrócenie uwagi na błędy popełniane w czasie wdrożeń takich systemów oraz pokazanie kilku przykładów wdrożeń systemowych.

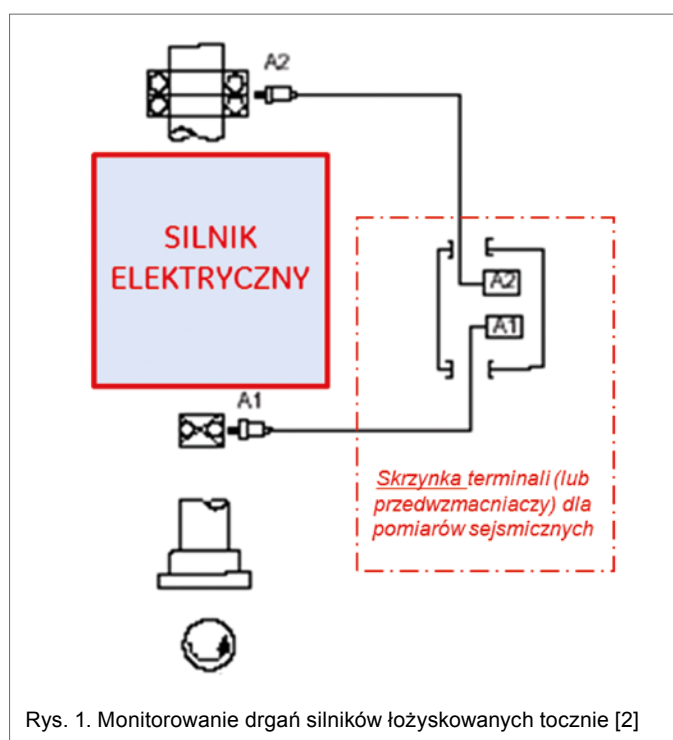
2. Konfiguracje czujników

W przypadku napędów elektrycznych monitorowanie stanu technicznego jest w standardzie [2] ograniczone do pomiarów:

- temperatur łożysk oraz uzwojeń stojana;
- drgań i położeń;
- fazy z pomocą dodatkowego czujnika (tzw. Keyphasor®).

Monitorowanie drgań jest realizowane z pomocą różnych czujników w zależności od rodzaju łożysk.

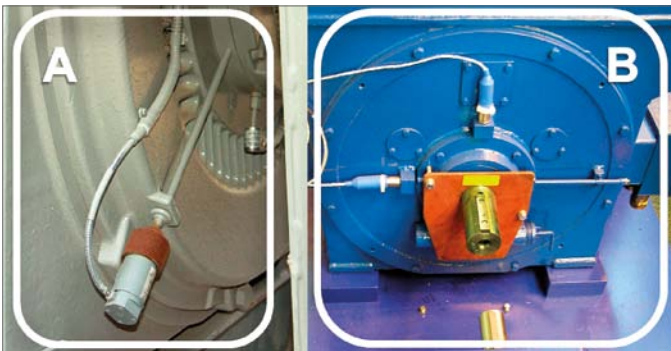
Schemat na rys. 1 przedstawia pojedynczy akcelerometryczny czujnik drgań zainstalowany poziomo w każdym węźle łożyskowym. Natomiast w przypadku większych maszyn (w szczególności takich, które są instalowane na konstrukcjach wsporczych, charakteryzujących się znaczną anizotropią sztywności) w celu monitorowania stanu stosuje się dla każdego łożyska po dwa sejsmiczne czujniki zainstalowane wzajemnie prostopadle (na ogół na kierunkach poziomym i pionowym) celem lepszego rozpoznawania zmiany sztywności powiązania agregatu z otoczeniem. Wspomniana anizotropia sztywności może być spowodowana nie tylko właściwościami konstrukcji wsporczej,



ale także sposobem połączenia maszyny roboczej z instalacją doprowadzającą/odprowadzającą medium.

Na rys. 2 pokazano przykłady instalacji czujników drgań sejsmicznych. Rys. 2a prezentuje nadzór węzła łożyskowego z pomocą pojedynczego czujnika indukcyjnego (generującego sygnał prędkości drgań). Czujnik został utwierdzony na kierunku hipotetycznie największego obciążenia promieniowego łożyska, natomiast ze względu na ograniczone gabaryty miejsca umożliwiającego mocowanie bezpośrednio do obudowy łożyska został on do tej obudowy przytwierdzony przy pomocy pręta pośredniczącego. Na rys. 2b pokazano parę czujników piezoelektrycznych zainstalowaną na specjalnych wspornikach przygotowanych przez producenta silnika i stanowiących integralną część obudowy węzła łożyskowego silnika. Podłączenie kabla do czujnika jest zabezpieczone z pomocą specjalnej ochrony minimalizującej wpływ czynników środowiskowych na jakość pracy połączenia.

Na rys. 3 pokazano rodzaj i typową konfigurację czujników wykorzystywanych do monitorowania silników łożyskowych ślizgowo. W tym przypadku podstawą oceny stanu technicz-



Rys. 2. Przykład instalacji czujników sejsmicznych w węzłach łożyskowych silników łożyskowych tocznie: a) pojedynczy czujnik indukcyjny; b) czujniki piezoelektryczne w konfiguracji VH

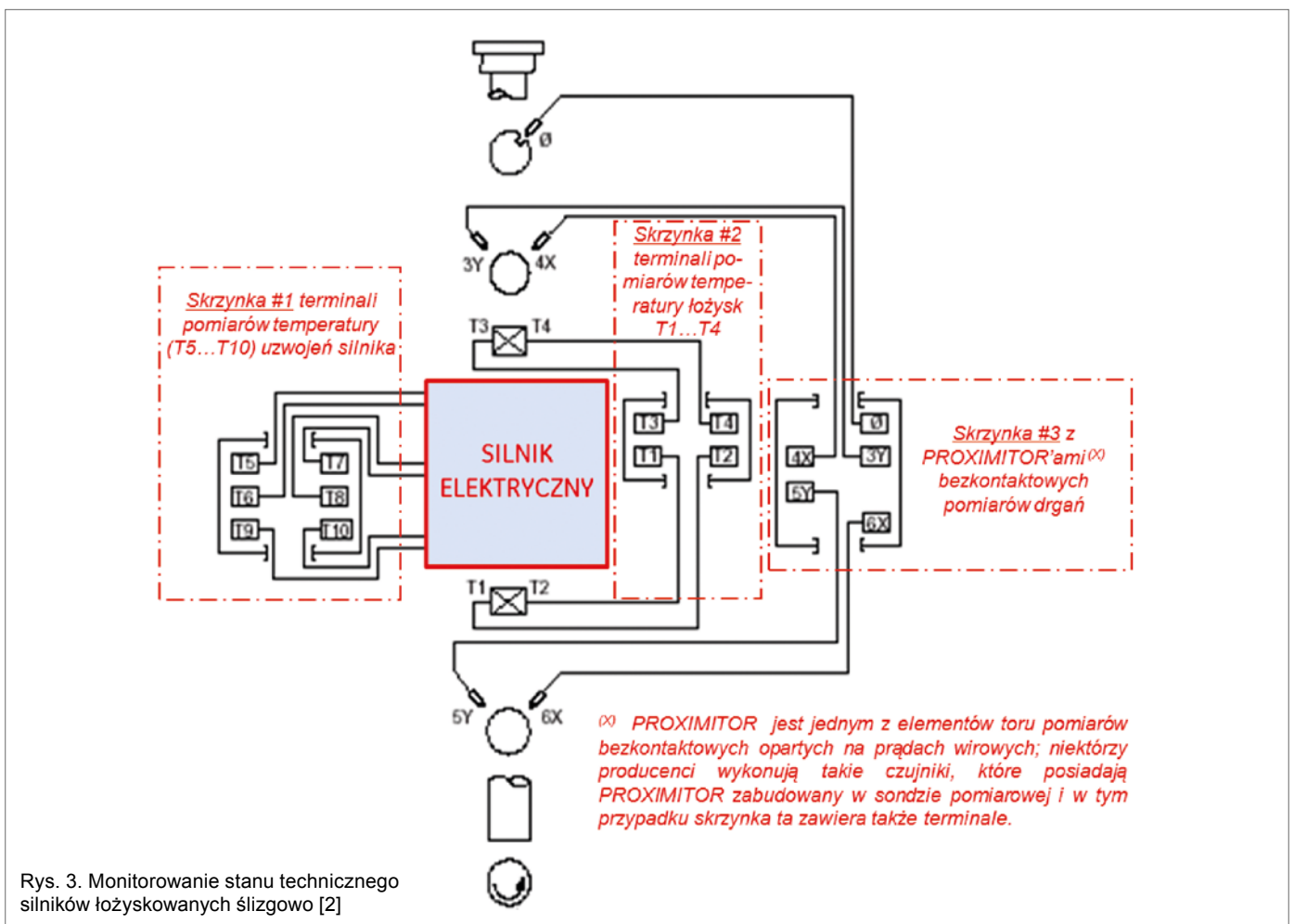
nego jest pomiar drgań względnych wirnika oraz położenie czopów wału w łożysku. Pomiary te realizowane są z pomocą czujników bezkontaktowych, najczęściej wykorzystujących efekt prądów wirowych¹. Taka konfiguracja czujników pozwala na rozpoznawanie problemów ruchowych powodowanych przez zakłócenia generowane przez wirniki, w tym także wynikające z ich niepoprawnego osiowania.

Stosowanie czujników sejsmicznych dla silników łożyskowych ślizgowo jest mało zasadne [3] i ma sens w odniesieniu do uszkodzeń stojana silnika². Także w przypadku niektórych problemów generowanych przez wirnik (w przypadku braku czuj-

ników drgań wału) można próbować posiłkować się pomiarami drgań wału, realizowanymi z pomocą czujnika sejsmicznego. W tym przypadku czujnik winien być przymocowany do trzpieńca, którego końcówka jest wykonana np. z drewna lub grafitu, a jej kształt umożliwia permanentny kontakt z obracającym się wirnikiem w czasie wykonywania pomiaru.

W związku z tym, że opis położenia (a także ruchu) na płaszczyźnie wymaga dwóch współrzędnych, niezbędne jest wykorzystywanie pary czujników bezkontaktowych, które w praktyce są montowane wzajemnie prostopadle. W przypadku maszyn średniej wielkości czujniki te są instalowane najczęściej pod kątem $\pm 45^\circ$ od pionu – natomiast nie jest to zalecenie obligatoryjne. Podobnie jak w przypadku opisanego uprzednio przypadku instalacji dwóch czujników sejsmicznych na kierunkach wzajemnie prostopadłych, także w przypadku maszyn łożyskowych ślizgowo można się spodziewać anizotropii sztywności podparcia wirnika. Anizotropia ta (a także zlokalizowanie kierunków osi ekstremów sztywności) może być określona z pomocą czujników zainstalowanych na maszynie także w innej orientacji niż $\pm 45^\circ$.

Na rys. 3 pokazany jest dodatkowo czujnik znacznika fazy *f*. Jest on również czujnikiem bezkontaktowym (najczęściej tego samego typu co czujniki drgań wału) wykorzystywanym dla realizacji pewnych pomiarów w systemach monitorowania i zabezpieczeń. Czujnik ten umożliwia także wykonywanie pewnych typów analiz w systemach diagnostyki, które są wykorzystywane dla oceny stanu technicznego tak silnika elektrycznego, jak i napędzanej przez niego maszyny³.



Rys. 3. Monitorowanie stanu technicznego silników łożyskowych ślizgowo [2]

Czujnik znacznika fazy nie jest pokazany w konfiguracji dotyczącej silników łożyskowanych tocznie (rys. 1). Natomiast coraz częściej agregaty napędzane takimi silnikami o mocy powyżej kilkuset kW są wyposażane w systemy regulacji prędkości obrotowej minimalizujące zużycie energii. Celem kontroli poprawności działania agregatu winien być w tym przypadku wykorzystywany dodatkowo tor pomiaru rzeczywistej prędkości obrotowej wirnika (pomiar tachometryczny). Jeśli agregat jest wyposażony w system monitorowania stanu technicznego online, to konfiguracja pokazana na rys. 1 winna być z definicji rozszerzona o znacznik fazy, który spełnia dwa zadania:

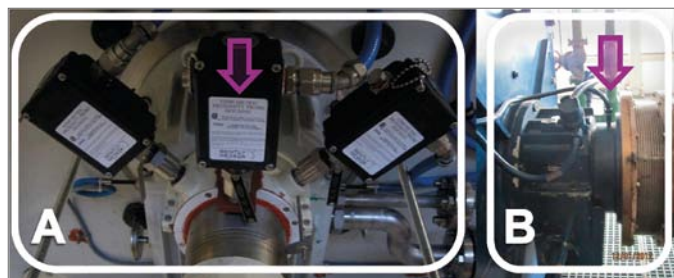
- dla systemu odpowiedzialnego za sterowanie procesem (DCS) dostarcza informacji o rzeczywistej prędkości obrotowej wirników;
- informuje system nadzoru stanu technicznego o rzeczywistej prędkości obrotowej, umożliwiając uzmiennienie generowanych w nim alarmów od tej prędkości (co może być istotne, gdy w przedziale zmienności obrotów są zlokalizowane jakieś rezonanse strukturalne agregatu lub powiązanej z nim instalacji), oraz warunkuje możliwość realizowania analiz diagnostycznych wymagających pomiaru fazy absolutnej⁴.

Na rys. 4 pokazano poprawnie zainstalowane czujniki drgań wału oraz znacznika fazy krytycznych silników łożyskowanych ślizgowo (dla węzła łożyskowego od strony sprzęgła). Na rys. 4a widoczne są uchwyty do mocowania czujników TYP 31000 wykonane częściowo z tworzywa, natomiast na rys. 4b dla czujników XY wykorzystywany jest podobny, natomiast wykonany całkowicie z metalu uchwyt TYP 21000, a znacznik fazy zamocowano w obudowie sprzęgła w inny sposób, który jednak (podobnie jak obydwa typy wymienionych wcześniej uchwytów) zapewnia pełne zabezpieczenie kabla czujnikowego.

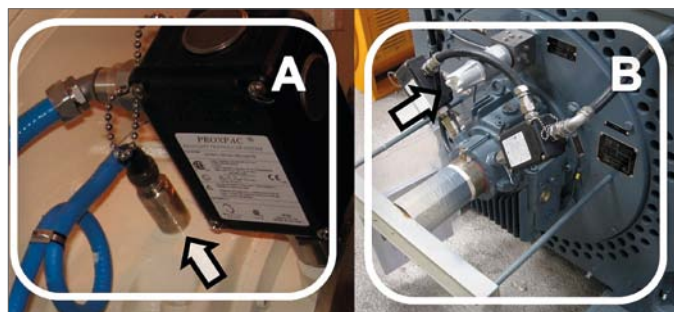
W przypadku maszyn szczególnie ważnych oprócz czujników drgań wału można dodatkowo zastosować czujniki sejsmiczne, tak jak to zostało przykładowo pokazano na rys. 5 (czujniki drgań wału są zainstalowane w uchwytych TYP 31000, a miejsca instalacji czujników sejsmicznych pokazano strzałkami). I tak na rys. 5a pokazano czujnik sejsmiczny zainstalowany na kierunku promieniowym równoległe do czujnika drgań wału⁵, natomiast na rys. 5b czujnik akcelerometryczny monitorujący drgania pokrywy silnika na kierunku osiowym.

Sejsmiczne czujniki drgań mogą wspomagać monitorowanie i diagnostykę agregatów krytycznych łożyskowanych ślizgowo, natomiast nie są w stanie zastąpić czujników drgań wałów. Ograniczenie nadzoru do czujników sejsmicznych może być ewentualnie akceptowane w przypadku prewencyjnego utrzymania ruchu maszyn średniej ważności, natomiast jest całkowicie niepoprawne w przypadku agregatów krytycznych, dla których zamierza się prowadzić predykcyjne utrzymanie ruchu. Takie patologiczne rozwiązanie systemu monitorowania łożyskowanego ślizgowo agregatu krytycznego o mocy kilku MW pokazano na rys. 6. Dostawca tego agregatu wyposażył go w każdym węzle łożyskowym jedynie w parę czujników sejsmicznych w układzie VH (tak jak pokazano to strzałkami) oraz dodatkowo (po stronie maszyny roboczej – co także nie jest poprawne) w czujnik znacznika fazy⁶.

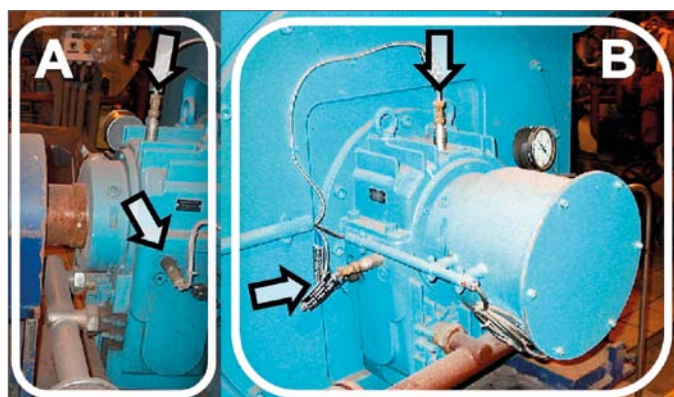
Oprócz czujników drgań w celu monitorowania stanu technicznego wykorzystywane są pomiary temperatury. Na rys. 3 pokazano dwa rodzaje pomiarów temperatury realizowane dla silników elektrycznych. Są to pomiary:



Rys. 4. Przykłady instalacji czujników XY oraz znacznika fazy (lokalizację czujnika fazy pokazano strzałką) po stronie napędowej silnika



Rys. 5. Przykłady zastosowania dla silników krytycznych wyposażonych w pomiary drgań wałów XY dodatkowych pomiarów sejsmicznych mierzących drgania: a) na kierunku promieniowym; b) na kierunku osiowym



Rys. 6. Lokalizacja sejsmicznych czujników drgań od strony: a) sprzęgła; b) swobodnej napędu agregatu krytycznego, łożyskowanego w całości ślizgowo

- związane z łożyskami ślizgowymi (lepiej: temperatury metalu łożysk);
- temperatury uzwojeń silnika.

Standard [2] dokonuje podziału łożysk ślizgowych na łożyska krótkie oraz długie i w konsekwencji precyzuje liczbę oraz lokalizację czujników w węzłach łożyskowych. Wciąż jeszcze w wielu przedsiębiorstwach można spotkać maszyny z poziomą osią wałów, które posiadają nieprawidłowo zrealizowany monitoring temperatury, bowiem:

- czujniki temperatury metalu są zamocowane jedynie w górnych półpanewkach⁷ (co jest podyktowane łatwością montażu mechanicznego czujnika, jednak czyni taki pomiar prawie całkowicie nieprzydatnym dla oceny stanu technicznego);

- rezygnuje się z pomiaru temperatury metalu na rzecz pomiaru temperatury oleju na spływie z łożyska (pomiar temperatury oleju jest jeszcze łatwiejszy w implementacji niż pomiar temperatury metalu realizowany od góry łożyska, natomiast cechuje się niezmiernie niską wrażliwością diagnostyczną⁸⁾);
- w przypadku łożysk długich realizuje się pomiar metalu łożyska jedynie w połowie długości łożyska.

Na rys. 7 pokazano dla agregatu o mocy kilku MW przykłady (a) poprawnej instalacji czujników drgań wału wirnika silnika od strony sprzęgła oraz (b) niepoprawnie zainstalowanych w kilku węzłach łożyskowych czujników temperatury. Jak to pokazano dla trzech widocznych łożysk, czujniki temperatury zostały zainstalowane jedynie w górnych półpanewkach. W narożniku rysunku pokazano schemat poprawnie instalowanego pomiaru temperatury w łożysku.

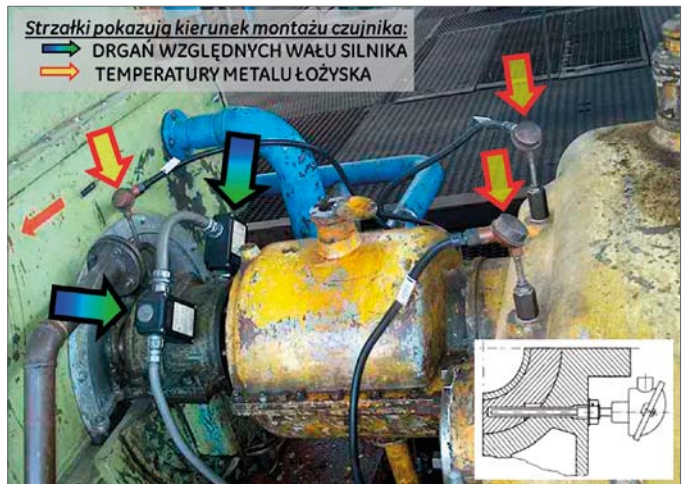
Na rys. 3 zaznaczono kilka skrzynek obiektowych umożliwiających połączenie kabli czujnikowych z kablami sygnałowymi doprowadzającymi sygnały z czujników do kasy systemu monitorowania, a w niektórych przypadkach doprowadzających także zasilanie z systemu monitorowania do elektroniki obiektowej warunkującej pracę czujników. Na schemacie zaznaczono trzy skrzynki obiektowe. Jest praktycznie zasadą, że kable czujników temperatury uzwojeń zlokalizowane są w skrzynkach zintegrowanych z korpusem silnika, wykorzystywanych także do doprowadzenia zasilania silnika. Natomiast znane są przypadki, kiedy w tych samych skrzynkach producent planował zainstalowanie terminali umożliwiających podłączenie kabli sygnałowych czujników drgań. Jest to zamiar dalece ryzykowny z punktu widzenia poprawności działania pomiarów drgań mechanicznych.

Kable wykorzystywane dla pomiarów dynamicznych (w tym także do pomiaru drgań mechanicznych) nie mogą być poddawane oddziaływaniu pól elektromagnetycznych. O ile w przypadku pomiarów statycznych (np. dla pomiarów temperatury) można sobie pozwolić w systemie monitorowania na zastosowanie filtrów zaporowych eliminujących szumowe składowe wysokoczęstotliwościowe (sieć i jej wyższe harmoniczne), o tyle w przypadku pomiarów dynamicznych stosowanie filtrów zaporowych mających poprawić stosunek sygnału do szumu jest dalece niepoprawne, bowiem filtrując składowe szumowe, można doprowadzić także do odfiltrowania z sygnału składowych dynamicznych niosących ważną informację o stanie technicznym maszyny. W konsekwencji kable sygnałowe winny znajdować się w wystarczająco dużej odległości od kabli zasilających, a odległość ta winna być tym większa, im większe są napięcia i prądy nimi przesyłane oraz gorsza jest jakość ekranowania.

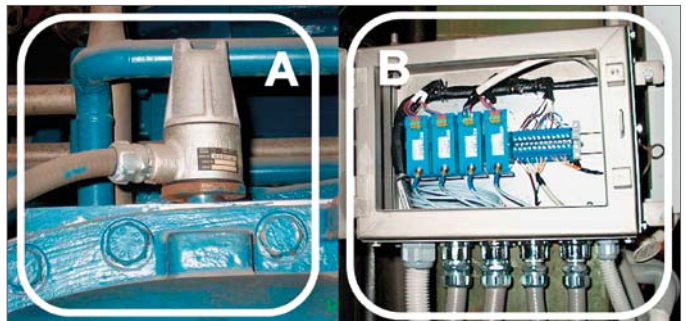
W konsekwencji warto przestrzegać następujących zaleceń instalacyjnych:

- Jeśli na silniku instalowane są czujniki sejsmiczne na kierunku poziomym, to ze względu na zwiększenie odległości między kablami czujnikowymi a kablami zasilającymi dobrze jest te czujniki mocować po stronie przeciwnej niż ta, z której jest zamocowana skrzynka doprowadzająca zasilanie do silnika.

Nic nie stoi na przeszkodzie, aby zredukować liczbę skrzynek obiektowych pokazanych na rys. 3; skrzynki obiektowe (2) i (3) mogą być zastąpione pojedynczą skrzynką (jak pokazano przykładowo na rys. 8b, w której znajdują się PROXIMITYORY pomiarów drgań względnych oraz terminale do podłączenia czujników temperatury oraz czujników sejsmicznych.



Rys. 7. Przykład monitorowania drgań i temperatur w kilku węzłach łożyskowych agregatu sprężarki powietrza

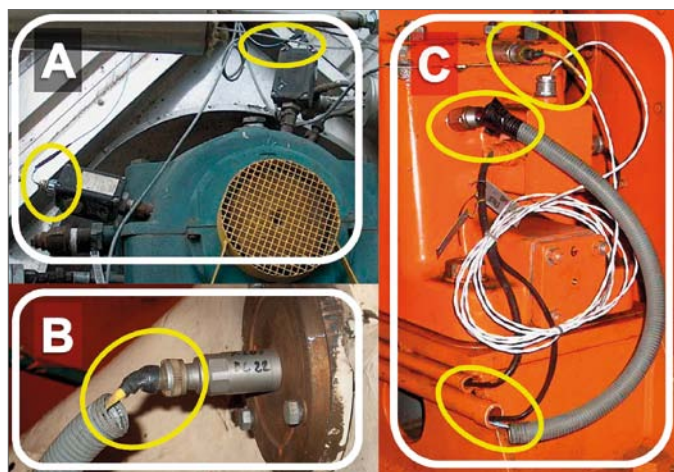
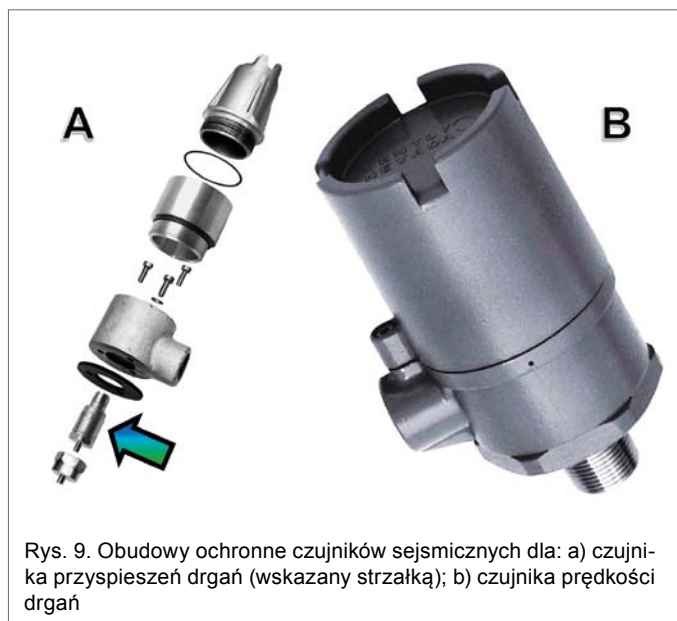


Rys. 8. Przykład zabezpieczenia czujnika piezoelektrycznego przez zastosowanie obudowy ochronnej (a) oraz poprawnego zabezpieczenia kabla czujnikowego na jego drodze od czujnika do skrzynki obiektowej (b); w której umieszczone są terminale i proximity

W przypadku instalacji czujników drgań w środowisku stanowiącym zagrożenie ich żywotności lub poprawności pracy celowe jest zabezpieczenie przed takimi wpływami. W przypadku czujników wiroprądowych są one instalowane w obudowach tak, jak to pokazano przykładowo na rys. 4, 5, 7. W przypadku czujników sejsmicznych mogą być wykorzystywane obudowy, jakie pokazano przykładowo na rys. 5b i 9. Kable czujnikowe winny być chronione przed uszkodzeniami mechanicznymi. W tym celu winny być stosowane ochronne rury giętkie o wysokiej sztywności (tak jak pokazane rys. 4, 7 i 8) lub ewentualnie rury sztywne (rys. 6).

Celem zapewnienia ochrony mechanicznej kabli czujnikowych nie zaleca się stosowania węży ochronnych o małej sztywności wykonanych z tworzywa sztucznego oraz nieposiadających specjalizowanego osprzętu zapewniającego dobre połączenie z czujnikiem lub jego uchwytem. Kilka przykładów takich niepoprawnych rozwiązań pokazano na rys. 10, a miejsca drastycznych naruszeń zaznaczono elipsami. Natomiast na rys. 11a pokazano przykład poprawnego łączenia sztywnych węży chroniących kable pomiarowe, a na rys. 11b i 11c rozwiązania przypadkowe.

Opisane w [2] wytyczne do instalacji czujników nadzoru stanu technicznego należy traktować jako minimalnie poprawne.

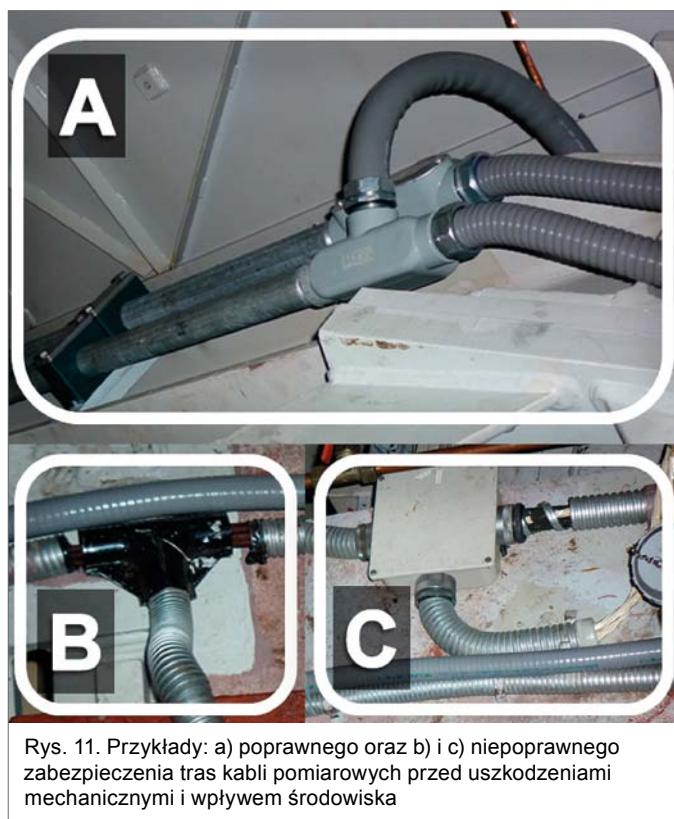


W każdym przypadku, kiedy jest to zasadne, opisane konfiguracje czujników mogą być rozszerzone. Na rys. 12 pokazano dwa przykłady instalacji dodatkowych czujników wskazanych strzałkami. Dla silnika na rys. 12a dodatkowo jest wykonywany pomiar położenia osiowego wirnika. W tym celu wykorzystywany jest podobny czujnik jak dla pomiarów XY, zamocowany w uchwycie przytwierdzonym do obudowy łożyska. Natomiast dla dużego silnika stanowiącego napęd maszyny krytycznej i pokazanego na rys. 12b, zgodnie z [4], wykorzystywane są redundancyjne czujniki XY drgań wału⁹.

3. Przygotowanie silnika do pomiarów XY

Podobnie jak w przypadku instalacji czujników sejsmicznych na maszynie wymagane jest spełnienie pewnych warunków (przygotowanie powierzchni, prostopadłość otworu mocowania, moment mocowania czujnika) zapewniających poprawność pomiaru, tak również w przypadku pomiarów bezkontaktowych wymagane jest przestrzeganie pewnych reguł. Najważniejszą z nich jest takie przygotowanie ścieżki pomiarowej na wale, która będzie zapewniać wystarczająco dobry stosunek sygnału do szumu. Problem ten jest mniejszy w przypadku pomiarów statycznych (np. pomiar osiowego położenia wału) i może być poważny w przypadku pomiarów drgań XY wału.

W literaturze anglojęzycznej ten szum pomiarowy wynikający z mechanicznych i elektrycznych (magnetycznych) właściwości wału jest nazywany *runoutem* spowodowanym przez *glitch*¹⁰ [5]. Standard [2] formułuje ograniczenie jego wartości na poziomie 25% wartości dopuszczalnego poziomu przemieszczeń drgań *Peak-to-Peak* lub 6 μm , jeśli wymienione 25% stanowiłoby wartość mniejszą od 6 μm . W [6] pokazano możliwości bardzo efektywnej minimalizacji *runoutu* (vide rys. 13: przed operacją dogniatania poziom *runoutu* wynosił około 13 μm , a po jej przeprowadzeniu poziom ten spadł do wartości niższej niż 5 μm). Jest niekwestionowaną prawdą, że obniżenie zaszumienia pomiarów sprzyja zwiększeniu łatwości i pewności wnioskowania diagnostycznego. Natomiast w prak-



tyce przemysłowej dla silnika będącego przedmiotem badań [6] i posiadającego nastawę alarmową (w systemie monitorowania i zabezpieczenia) przemieszczeń drgań 140 μm , zgodnie z [2] za akceptowalny poziom *runoutu* można uznać 35 μm . W zdecydowanej większości przypadków po przeprowadzeniu operacji skrawania (w trakcie przygotowywania ścieżki pomiarowej dla bezkontaktowych pomiarów drgań) uzyskuje się wartości *runoutu* na poziomie kilkunastu μm . Taki jego poziom jest całkowicie wystarczający nie tylko dla stosowania systemu monitorowania i zabezpieczeń dla tego silnika, ale także prowadzenia efektywnego diagnozowania jego stanu technicznego. Dążenie

w praktyce przemysłowej do dalszej minimalizacji runoutu prowadzi do niepotrzebnego zwiększenia kosztów przygotowania maszyny do pomiarów.

Operacja dogniatania jest operacją warunkową, stosowaną wtedy, gdy poziom runoutu uzyskany po operacji skrawania nie spełnia kryterium narzuconego przez zlecającego. Dogniatanie jest realizowane z pomocą diamentowego dogniataka, a minimalizację zaszumienia uzyskuje się w wyniku zwiększenia ujednorodnienia struktury podpowierzchniowej metalu wału. Już stosunkowo niegłęboki wpływ na warstwę podpowierzchniową jest wystarczający, bowiem prądy wirowe generowane przez bezkontaktowe czujniki wiropędowe wnikają w wał na głębokość do kilkuset μm , a maksymalna głębokość wnikańia jest uwarunkowana rodzajem materiału, z którego wał jest wykonany.

Pokazany na rys. 13 wynik minimalizacji runoutu nie zawsze jest możliwy do uzyskania. Jeśli dla nowego silnika jego wykonawca zaakceptuje bardzo ostre warunki zlecającego dotyczące dopuszczalnego poziom runoutu, to może się liczyć z koniecznością złomowania produkowanego wirnika w bardzo zaawansowanej fazie produkcji ze względu na techniczny brak możliwości spełnienia wymogów. Podobny problem może także wystąpić dla silnika starego, który jest poddawany remontowi lub modernizacji i w czasie tych działań zlecane jest między innymi przygotowanie silnika do pomiarów drgań wału.

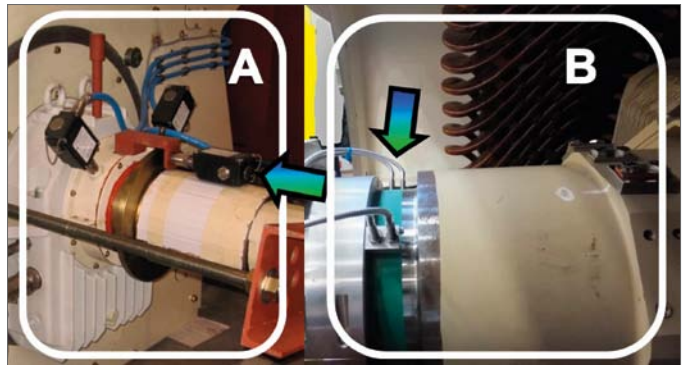
Po przygotowaniu ścieżek pomiarowych niezbędne jest należyte zadbanie o ich zabezpieczenie przed uszkodzeniami przede wszystkim natury mechanicznej. Uszkodzenia mogą powstać w czasie transportu wirnika i w czasie jego instalacji w łożyskach. Przykłady takiego zabezpieczenia zostały pokazane na rys. 14 – miejsca zabezpieczeń wskazano strzałkami.

W [7] jest dyskutowany przypadek silnika łożyskowanego tocznie o mocy ok. 560 kW, który nastęrczał pewnych kłopotów ruchowych. Analizy wykazały, że przyczyną problemów była statyczna deformacja wału. Zgięcie wału jest specyficzną formą runoutu i jest łatwo diagnozowalne tak w fazie produkcji wirnika, jak i w czasie jego remontu. Kontrola wektora 1X runoutu (mogąca także wpływać na jakość zaszprzęglenia) jest zalecana przez autorów jako celowa do nadzorowania dla większych silników niezależnie od rodzaju łożyskowania.

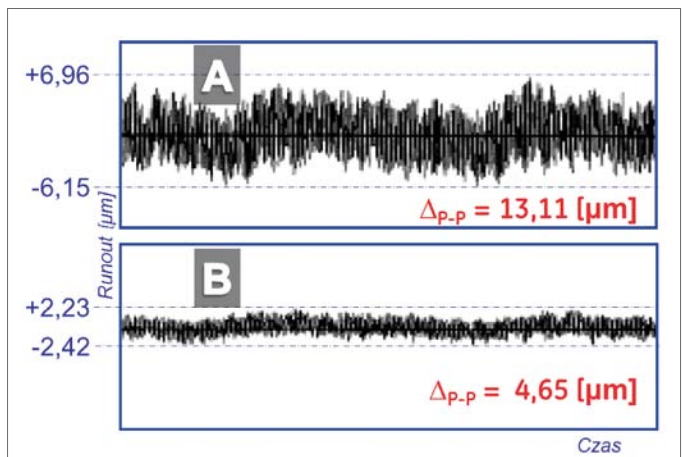
4. Uwagi dodatkowe do pomiaru temperatur

Standard [2] zaleca realizować pomiary temperatury z pomocą czujników RTD. Natomiast w przypadku pomiaru temperatury uzwojeń w stanach przejściowych (przyspieszanie obrotów wirnika lub jego utyk) czujniki typu RTD mogą być za wolne dla właściwej prezentacji szybko zmieniających się pól temperaturowych [8]. Z tego względu są wykorzystywane specjalizowane urządzenia zabezpieczające pracę silników większych mocy. W niektórych takich urządzeniach może być wymagana współpraca między dostawcą silnika, dostawcą systemu zabezpieczeń i użytkownikiem celem zaimplementowania w systemie zabezpieczeń krzywych obciążeń termicznych silnika, które są poprawne dla specyficznego scenariusza aplikacji. Przykład takiego rozwiązania, umożliwiającego poprawne użytkowanie silnika dużej mocy napędzającego wentylator w elektrowni, opisano w [8].

W celu zabezpieczenia pracy silników wykorzystywane są także termistory. Są to nieliniowe rezystory o skokowej zmianie rezystancji w wąskim przedziale temperatury. Ich zadaniem jest



Rys. 12. Dodatkowe czujniki zainstalowane na silniku: a) do pomiaru położenia osiowego wirnika; b) redundancyjne czujniki XY



Rys. 13. Przykład możliwości minimalizacji runoutu ścieżek wykorzystywanych do pomiarów drgań względnych silnika: a) przed dogniataniem i b) po dogniataniu ścieżki pomiarowej



Rys. 14. Przykładowe zabezpieczenie ścieżek pomiarowych wałów dwóch silników

ochrona silnika przed przekroczeniem dopuszczalnej temperatury, co może mieć miejsce w sytuacji, kiedy z jakichś przyczyn nie zadziałają zabezpieczenia na sygnały szybkozmienne. Ze względu na specyfikę działania (podobną do specyfiki działania zabezpieczeń bimetalicznych tzn. pracujących jak układy zero-jedynkowe) nie są to czujniki, które są preferowane w predykcijnym utrzymaniu ruchu, bowiem nie zapewniają odpowiednio wcześnie informacji o wzroście temperatury uzwojeń. Termistory są wykorzystywane jako pomiar dywersyfikujący dla sygnałów szybkozmiennych w systemach zabezpieczeń elektrycznych.

Profesjonalne systemy monitorowania wykorzystywane dla predykcyjnego utrzymania ruchu zapewniają na ogół możliwość bezpośredniego podłączenia czujników termooporowych i termopar, słabsze systemy monitorowania umożliwiają jedynie podłączenie sygnałów analogowych z transponderów temperatury (np. w standardzie 4–20 mA) i na ogół nie dają możliwości podłączenia termistorów.

W zastosowaniach przemysłowych coraz częściej się spotyka różnego typu pomiary wykorzystujące światłowody – w tym także do pomiarów temperatury. Są one m.in. wykorzystywane do monitorowania temperatur czół uzwojeń silników, a ich pozytywną stroną jest bardzo duża odporność na zakłócenia generowane przez silne pola elektromagnetyczne.

5. Wybór systemu monitorowania

Kolejnym krokiem po zaprojektowaniu systemu nadzoru stanu technicznego silnika (lepiej: agregatu napędzanego silnikiem elektrycznym) na poziomie czujników, jest dokonanie wyboru rozwiązania systemu monitorowania, do którego czujniki te zostaną podłączone. Przy podejmowaniu decyzji w tym zakresie należy się kierować przesłankami wynikającymi ze strategii utrzymania ruchu, którą ten agregat będzie docelowo objęty.

Jeśli agregat jest włączony do prewencyjnego utrzymania ruchu, to w takim przypadku można sobie pozwolić na stosowanie rozproszonego systemu monitorowania i zabezpieczeń. Oznacza to, że różne pomiary mogą być włączone do różnych systemów monitorowania.

W przypadku agregatów włączanych do predykcyjnego (lub silniejszego) utrzymania ruchu lepiej jest wykorzystywać zintegrowany system monitorowania i zabezpieczeń, do którego są podłączone te wszystkie pomiary, które mogą wzajemnie na siebie wpływać. Przykład takiego wzajemnego uzależnienia pomiarów został pokazany na rys. 15.

Zmiana temperatury oleju na splotywie z łożyska może być spowodowana problemami technicznymi w systemie smarowania i w konsekwencji obniżonym przepływem substancji smarnej lub zwiększeniem oddziaływania dynamicznego ze strony wirnika, będącego np. konsekwencją zmiany jego niewyrównowazenia w wyniku urwania łopatki. Zmiana temperatury może skutkować zmianą sztywności filmu olejowego i w konsekwencji zmianą całkowitej sztywności podparcia wirnika. Następstwem jest zwykle zmiana wzajemnego położenia częstotliwości rezonansowej wirnika w stosunku do częstotliwości roboczej odpowiadającej obrotom wirnika oraz może prowadzić do istotnej zmiany poziomu drgań. Jeśli zmieni się poziom drgań, to zmienia się dynamiczne obciążenie łożyska, które pociąga za sobą pogłębienie wyżej opisanych zmian. Ze względu na wzajemne sprzężenia ww. zmian, jedynie zastosowanie zintegrowanego systemu monitorowania, do którego są podłączone tak pomiary drgań, jak i pomiary temperatur ukierunkowane na estymację stanu technicznego, mamy szansę na praktyczne rozpoznanie, który z dyskutowanych procesów jest pierwotny, a który wtórny. Czyli:

- czy zmiana dynamiki wirnika pociąga za sobą zmianę pola temperatur, czy też
- zmiana pola temperatur rzutuje wtórnie na zmianę oddziaływań dynamicznych w maszynie.

Dostępne na rynku systemy monitorowania można sklasyfikować w następujący sposób:



Rys. 15. Możliwe wzajemne uzależnienia między zmianami temperatur i drgań



Rys. 16. Przykład systemu monitorowania o: a) małej i b) dużej liczbie kanałów umożliwiających podłączenie zróżnicowanych czujników dedykowanych ocenie stanu technicznego

- Systemy monoprosesowe o ograniczonej liczbie kanałów – systemy te posiadają możliwość podłączenia niewielkiej liczby czujników dedykowanych pomiarom jednego typu (np. pomiary drgań sejsmicznych, pomiary temperatury). Systemy tego typu są dedykowane przede wszystkim zastosowaniom na maszynach, dla których realizuje się prewencyjne UR.
- Uniwersalne systemy monitorowania o małej liczbie kanałów pomiarowych – systemy takie dedykowane są w pierwszej kolejności monitorowaniu stanu technicznego pojedynczych agregatów (lub maszyn) o niewielkiej liczbie łożysk. Przykład takiego systemu monitorowania pokazano na rys. 16a (SYSTEM 1900/65A). Umożliwia on podłączenie 4 czujników drgań (piezoelektrycznych lub bezkontaktowych – wiroprowadowych) oraz 4 czujników temperatury typu termopary. W przypadku wykorzystania tego systemu do realizacji pomiarów sejsmicznych możliwe jest skonfigurowanie kilku częstotliwościowych pasm pomiaru drgań, a przez to zwiększenie możliwości rozpoznawania róż-

nicowanych uszkodzeń maszyny. System taki umożliwia idealnie monitorowanie pojedynczego agregatu z czterema węzłami łożyskami tocznymi. Takie systemy są dedykowane zastosowaniom na maszynach, dla których realizuje się prewencyjne lub rzadziej predykcyjne UR.

C. Uniwersalne systemy monitorowania o dużej liczbie kanałów pomiarowych – systemy takie dedykowane są w pierwszej kolejności monitorowaniu stanu technicznego agregatów posiadających liczbę łożysk większą niż cztery. Natomiast z powodzeniem mogą być także wykorzystywane do monitorowania kilku maszyn. Przykład takiego systemu monitorowania pokazano na rys. 16 b (SYSTEM 3500 umożliwiający podłączenie kilkudziesięciu czujników temperatury i/lub drgań, a także pewnych innych pomiarów użytecznych w procesie oceny stanu technicznego silników elektrycznych). Systemy tego typu są dedykowane przede wszystkim zastosowaniom na maszynach, dla których realizuje się predykcyjne UR.

D. Systemy monitorowania stanu technicznego nieposiadające wyjść przekaźnikowych – systemy te mogą charakteryzować się zróżnicowanymi właściwościami funkcjonalnymi. Może to być system:

- jak pokazany na rys. 16 b lub podobny, ale pozbawiony bloków wyjść przekaźnikowych;
- system skaningowy – o ile w przypadku systemów monitorowania online wszystkie czujniki są podłączane do systemu monitorowania z pomocą indywidualnych kabli sygnałowych, o tyle w przypadku systemów skaningowych z pomocą pojedynczego kabla systemowego (posiadającego małą liczbę żył – np. 4) możliwa jest transmisja sygnałów statycznych lub dynamicznych z większej liczby czujników (od kilku do kilkuset); systemy takie mogą z powodzeniem być wykorzystywane do nadzoru maszyn, w których podstawowe uszkodzenia rozwijają się wolno w czasie (np. dla nadzoru pogarszania się stanu technicznego łożysk tocznych, dla których typowy czas rozwoju uszkodzenia wynosi na ogół od kilku tygodni do kilku miesięcy lub nawet kwartałów); w takich systemach skaningowych krok powtarzalności czasowej pomiarów z tego samego czujnika jest uwarunkowany liczbą czujników podłączonych do pojedynczego kabla systemowego (+ czasami dodatkowo priorytetem odpytywania punktu, określanym przy konfiguracji systemu) i wynosi od kilkunastu do kilkuset sekund; w systemach takich nie są potrzebne indywidualne wyjścia przekaźnikowe dla każdej włączonej do systemu maszyny; dane pomiarowe są przekazywane do DCS-u i ten realizuje funkcjonalność komparacji progowej oraz alarmowania; wykorzystywane coraz częściej bezprzewodowe systemy nadzoru stanu technicznego pracują jak systemy skaningowe;
- systemy detekcji anomalii – o ile w przypadku systemów skaningowych do pojedynczego systemu można podłączyć znaczną liczbę maszyn i w zależności od liczby podłączonych czujników czas pętli między kolejnymi kontrolami może być bardzo zróżnicowany, o tyle system detekcji anomalii jest na ogół dedykowany pojedynczemu agregatowi; ze względu na sposób oceny stanu potrzebny mu czas do zrealizowania pojedynczego kroku kontroli może być znacząco dłuższy od czasów opóźnienia między wystąpieniem przekroczenia wartości granicznej a wystąpieniem alarmu w typowych systemach zabez-

pieczeń; w konsekwencji o systemach detekcji anomalii można powiedzieć, że działają „krokowo”, bowiem co jakieś kwantum czasu (różne dla różnych systemów detekcji anomalii) formułowana jest ocena, która może dotyczyć nie tylko stanu technicznego maszyny, ale również realizowanego przez nią procesu.

W przypadku wielu przedsiębiorstw agregaty wymagają stosowania torów pomiarowych posiadających certyfikację ATEX. Certyfikat ATEX potwierdza możliwość zastosowania czujników (rzadziej systemów monitorowania) w strefach specjalnych oraz charakteryzuje sposób interfejsowania części obiektowej z systemem monitorowania (np. konieczność stosowania barier lub separacji galwanicznej). W systemach online takie dodatkowo wymagane środki techniczne muszą być stosowane indywidualnie dla każdego z czujników, natomiast w przewodowych systemach skaningowych wystarczające jest najczęściej zastosowanie ograniczonej liczby (np. w systemach czteroprzewodowych: dwóch barier), po czym do kabla systemowego znajdującego się w strefie zagrożenia można podłączyć nawet do kilkudziesięciu czujników. Takie rozwiązanie (alternatywne w stosunku do systemu online i często jeszcze akceptowalne technicznie ze względu na stawianą przed nim funkcję celu) prowadzi do dalszego obniżenia kosztu implementacji systemu nadzoru stanu technicznego.

6. Dobór systemu monitorowania stanu technicznego

Przy wyborze systemu monitorowania stanu technicznego są stosowane różne kryteria. Mogą to być np.:

- A. Możliwość bezpośredniego działania czujnika na kierunku systemu zabezpieczeń – w tym celu, dla pomiaru drgań bywają wykorzystywane wyłączniki mechaniczne, które wypracowują sygnał 0/1 w przypadku chwilowego przekroczenia zadanego poziomu drgań. Wyłączniki mechaniczne wymagają starannego skonfigurowania oraz dbałości w utrzymaniu ich stanu technicznego. Ze względu na binarną specyfikę działania nie dają żadnej informacji o zmieniającym się stanie technicznym maszyny. Także w Polsce uległa zniszczeniu pewna liczba maszyn, które były zabezpieczone tą techniką.
- B. Możliwość bezpośredniego podłączenia czujnika do systemu DCS – w tym celu wykorzystywane są tzw. transmitters, tzn. czujniki posiadające standardowe wyjście elektryczne (napięciowe lub prądowe) umożliwiające ich bezpośrednie podłączenie do kart w systemie automatyki. Transmitters nie posiadają całej gamy funkcjonalności, którą dysponują kanały pomiarowe w systemach monitorowania stanu technicznego i w konsekwencji instalowane z zamiarem zabezpieczenia maszyny na okoliczność krytycznego pogorszenia stanu dynamicznego są często z tego systemu zabezpieczeń wypinane, bowiem generują znaczną liczbę fałszywych alarmów. Także w kraju znanych jest szereg przypadków zastosowania transmittersów dla zabezpieczenia agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi, które wkrótce po zainstalowaniu zostały wyłączone z systemu zabezpieczeń, bowiem generowały fałszywe alarmy¹¹.
- C. Prostota implementacji systemu monitorowania – w przypadku stosowania tego kryterium preferowane są systemy monitorowania z niewielką liczbą kanałów (na ogół 1–4-kanałowe), posiadające różnie rozbudowaną funkcjonalność.

Systemy takie są na ogół dostarczane przez producentów maszyn, bowiem spełniają ogólnie sformułowane warunki akcji przetargowej wymagające dostarczenia maszyny wraz z systemem monitorowania. Takie ogólnie sformułowane warunki nie zawsze odpowiadają faktycznym potrzebom inwestora. Przykładem takich chybionych dostaw może być dostarczenie:

- 1-kanalowych systemów monitorowania wentylatora krytycznej instalacji odsiarczania dla kilku bloków w dużej elektrowni, gdzie system monitorowania winien być włączony do systemu diagnostyki, umożliwiającego predyktoryjne utrzymanie ruchu tych maszyn;
 - kilku agregatów pompowych napędzanych poprzez przekładnie hydrokinetyczne do elektrociepłowni wraz z 2-kanalowymi systemami monitorowania drgań, które były przyporządkowane: pierwszy dla silnika, drugi do pompy, natomiast przekładnia nie była monitorowana. Założeniem inwestora było włączenie tych maszyn do predyktoryjnego UR, natomiast dostarczone systemy monitorowania (ze względu na brak wyjść buforowych sygnałów dynamicznych) nie dawały możliwości podłączenia do systemu diagnostyki.
- D. Dywersyfikacja sygnałów stosowanych na rzecz zwiększenia wiarygodności oceny stanu technicznego – to kryterium wymaga na ogół stosowania bardziej zaawansowanych systemów monitorowania stanu technicznego, bowiem tylko takie systemy umożliwiają podłączanie zróżnicowanych czujników (w przypadku silników elektrycznych mogą to być, stosowane dodatkowo w stosunku do tradycyjnych pomiarów drgań czy temperatur, pomiary online na rzecz oceny strumienia magnetycznego w szczelinie, lub oceniające stan techniczny izolacji stojana).
- E. Włączenie do systemu diagnostyki większej grupy maszyn – systemy diagnostyki posiadają różne właściwości i w konsekwencji różne ograniczenia. Jednym z nich jest liczba procesorów komunikacyjnych zapewniających sprzęg między systemem monitorowania i zabezpieczeń, a serwerem systemu diagnostyki. W przypadku konieczności włączenia do systemu diagnostyki większej grupy maszyn mogą być stosowane dwa skrajne podejścia:
- każda maszyna jest monitorowana przez niezależny system monitorowania i zabezpieczeń;
 - pojedyncza kasetka systemu monitorowania umożliwia monitorowanie i zabezpieczenie kilku agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi.

W tym drugim przypadku, dzięki agregacji nadzoru stanu technicznego dla kilku maszyn w pojedynczej kasecie możliwe jest osiągnięcie szeregu korzyści, w tym m.in.:

- zmniejsza się liczba połączeń zasilania do systemów monitorowania;
- zmniejsza się liczba połączeń cyfrowych między systemami monitorowania a systemem DCS i w konsekwencji zmniejsza się wymagana liczba wejść cyfrowych w systemie DCS;
- zwiększa się liczba maszyn możliwych do podłączania do pojedynczego serwera systemu diagnostyki;
- zmniejszają się nakłady jednostkowe (koszt pojedynczego kanału) systemu nadzoru, bowiem minimalizuje się liczba systemowo wykorzystywanych modułów technicznych, które bezpośrednio nie prowadzą monitorowania (np. zasilacze, interfejsy cyfrowe, procesory komunikacyjne, kasetki etc.);

- pojawiają się możliwości zwiększenia niezawodności pracy systemu monitorowania i zabezpieczeń dzięki wykorzystaniu zasilania redundancyjnego (mniejsze systemy monitorowania nie umożliwiają takiej redundancji);
- polepszają się właściwości funkcjonalne systemu monitorowania, bowiem większe systemy monitorowania i zabezpieczeń posiadają na ogół szerszą funkcjonalność niż systemy małe.

Ww kryteria (A) i (B) mogą być stosowane w przypadku prewencyjnego UR agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi. Także zastosowanie kryterium (C) i wyboru skonfigurowania systemu w wersji nadmiernie uproszczonej może prowadzić do braku możliwości wdrożenia predyktoryjnego UR. Natomiast przy stosowaniu kryteriów (D) oraz (E), nawet jeśli agregaty są dostarczone z systemem nadzoru ograniczonym do „monitorowania i zabezpieczenia”, w każdym przypadku jest możliwe jego rozszerzenie o system diagnostyki.

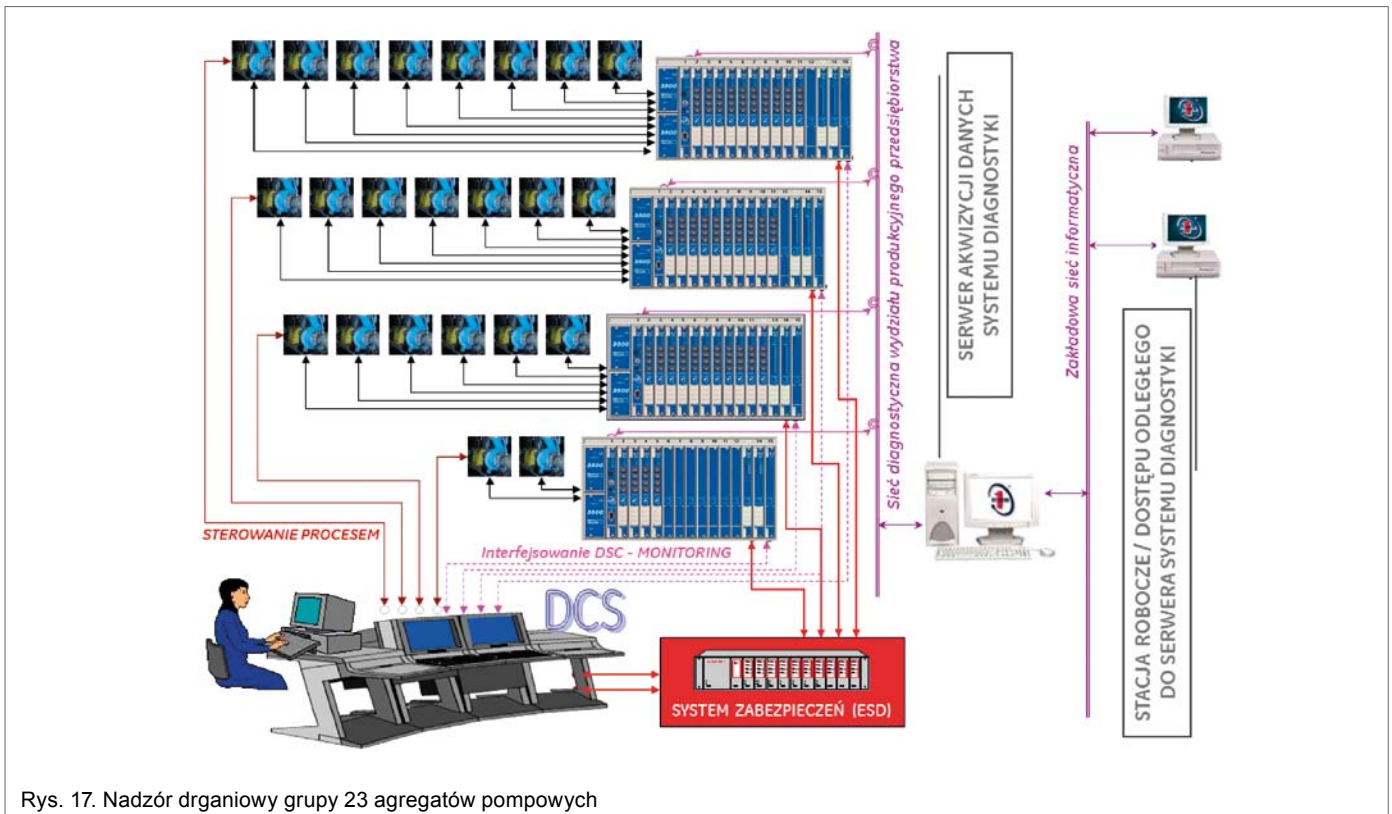
7. Przykład nr 1: postępowanie w zakresie monitorowania i zabezpieczenia stanu technicznego

Wiodące zakłady produkcyjne posiadają dokumenty wewnętrzne definiujące formy nadzoru stanu technicznego dla agregatów różnej ważności. Jedno z takich wiodących krajowych przedsiębiorstw zrealizowało w roku 2005 inwestycję w postaci nowego wydziału produkcyjnego. Inwestor wytypował na tym wydziale 23 agregaty pompowe, które winny być włączone do systemu monitorowania i zabezpieczeń oraz diagnostyki w sposób umożliwiający predyktoryjne utrzymanie ruchu (+ posiadać certyfikację ATEX). W konsekwencji na wytypowanych agregatach zainstalowano łącznie ok. 100 czujników drgań. Czujniki podłączono do 4 kasetki wielokanałowych systemów monitorowania SYSTEM 3500, gdzie w pojedynczej kasecie znajdowały się 4-kanalowe monitory drgań pracujące na rzecz od 2 do 8 pomp. Systemy monitorowania stanu technicznego zostały interfejsowane:

- cyfrowo z systemem DCS tak, aby przekazywać operatorom informację o bieżących wartościach pomiarów;
- z systemem zabezpieczeń agregatów z pomocą sygnałów binarnych z wyjść bloków przekaźnikowych zmieniających status w momencie przekroczenia granicznych wartości nastaw;
- poprzez sieć diagnostyczną z serwerem systemu akwizycji danych diagnostycznych SYSTEM 1. Serwer akwizycji danych poprzez drugą kartę sieciową został podłączony do zakładowej sieci informatycznej, aby umożliwić dostęp do zgromadzonych danych specjalistom z Wydziału UR oraz specjalistom innych wydziałów zainteresowanych tymi danymi. Ten odległy dostęp do danych serwera diagnostyki jest realizowany z poziomu komputerów osobistych ww. specjalistów.

Na rys. 17 pokazano schemat wdrożonego systemu nadzoru stanu technicznego w zakresie jego kluczowych elementów oraz zastosowanych dróg interfejsowania z innymi systemami.

W czasie realizacji tej inwestycji Inwestorowi zwrócono uwagę, że zgodnie ze standardem [2] obydwie grupy pomiarów diagnostycznych (tzn. drgania oraz temperatury węzłów łożyskowych oraz uzwojeń silników) winny być dla agregatów pompowych podłączone do jednego systemu nadzoru stanu technicznego. W przypadku tej inwestycji wszystkie pomiary temperatur (tzn. tak temperatury procesowe, jak i temperatury mówiące o stanie



Rys. 17. Nadzór drganiowy grupy 23 agregatów pompowych

technicznym) włączone zostały do systemu DCS. Rozwiązanie takie jest akceptowalne w przypadku przewencyjnego UR, natomiast w przypadku bardziej zaawansowanego UR pomiary temperatury dedykowane stanowi technicznemu winny być włączone do tego samego systemu monitorowania, który jest odpowiedzialny za pomiary drgań. Inwestor uznał argumentację i w konsekwencji wprowadził stosowną poprawkę w dokumentach wewnątrzzakładowych, formułujących wymagania dla systemów nadzoru stanu technicznego.

To samo przedsiębiorstwo przystąpiło do realizacji kolejnej inwestycji na przełomie lat 2008/2009. W tym przypadku do objęcia predykcijnym UR wytypowano około 70 agregatów pompowych. Kierując się dodatkowo kryterium standaryzacji stosowanych rozwiązań technicznych w ramach przedsiębiorstwa, dla tej inwestycji podjęto decyzję o zastosowaniu systemu monitorowania i zabezpieczeń w tym samym standardzie co wykorzystany w roku 2005 agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi (a także wykorzystywany w tym przedsiębiorstwie dla szeregu innych maszyn z napędami turbinowymi). W konsekwencji na wytypowanych agregatach pompowych zainstalowano kilkadziesiąt czujników drgań, które zostały podłączone do 4-kanalowych monitorów drgań w kasetach SYSTEMU 3500. Pompy oraz napędzające je silniki zostały przez ich producentów wyposażone w czujniki temperatury łożysk oraz uzwojeń stojanów (w łącznej liczbie ok. 500 sztuk). Czujniki te (w standardzie Pt-100) podłączono do 16-kanalowych monitorów temperatur w ww. systemie. Dodatkowo dla wybranych pomp pracujących z napędami zmiennobrotowymi zainstalowano czujniki znacznika fazy. Czujniki te zwiększają efektywność pracy systemu diagnostyki oraz dodatkowo realizują funkcjonalność pomiaru tachometrycznego na rzecz systemu sterowania procesem.

Dla zrealizowania monitorowania stanu technicznego w opisanym projekcie zastosowano łącznie 12 kaset SYSTEMU 3500, które zostały połączone z DCS-em. Niezależnie kasety te poprzez sieć diagnostyczną zostały podłączone do nowego serwera akwizycji danych diagnostycznych SYSTEM 1.

8. Przykład nr 2: monitorowanie stanu technicznego z pomocą przewodowego systemu skaningowego

W zakładzie odazotowania metanu podjęto decyzję o wdrożeniu systemu nadzoru drganiowego na zintegrowanych z silnikami pionowych agregatach pompowych ciekłego metanu. Głównym zadaniem postawionym przed systemem było rozpoznawanie pogorszenia stanu technicznego ceramicznych łożysk tocznych. Ze względu na niewielką liczbę agregatów pompowych (4) oraz niewielką liczbę czujników drgań na każdym agregacie (3), a w konsekwencji na akceptowalny krok czasowy między kolejnymi odczytami poziomów drgań w stosunku do czasu pogłębiającej się destrukcji łożyska, zdecydowano się na implementację systemu skaningowego.

Dla oceny stanu technicznego:

- łożysk tocznych preferowane są czujniki akcelerometryczne, generujące sygnał przyspieszeń drgań; natomiast w celu zabezpieczenia maszyny preferowane są sygnały prędkości drgań; w konsekwencji zdecydowano się na zastosowanie rozwiązania wykorzystującego sygnały prędkości drgań;
- preferowane jest utwierdzenie czujników maksymalnie blisko źródeł drgań; natomiast w przypadku pomp metanu pracujących z medium o temperaturze około -20°C i w konsekwencji wyposażonych w bardzo grubą izolację cieplną nie dysponowano czujnikami umożliwiającymi zastosowanie dla pomiarów na powierzchniach o tak niskiej temperaturze; dodatkowo

bezpośredni montaż czujników do maszyn nie był preferowany przez inwestora. W konsekwencji czujniki zainstalowano na prętach ponad metrowej długości, przytwierdzonych do agregatu i wychodzących na zewnątrz izolacji cieplnej.

Stosowanie takiego pręta pośredniczącego między maszyną a czujnikiem nie jest optymalnym rozwiązaniem, bowiem każdy pręt posiada funkcję przejścia mocno zróżnicowaną w różnych pasmach częstotliwości drgań i w konsekwencji w pewnych pasmach będzie te drgania mocno tłumić, a w innych wzmacniać. Okazało się jednak, że wdrożony system monitorowania (bez funkcjonalności zabezpieczenia) cechuje się dużą wiarygodnością działania i w każdym przypadku rozpoznał pogorszenie się stanu technicznego, a w kilku przypadkach wskazał na brak poprawności działania agregatów bezpośrednio po przeprowadzonym remoncie, co było spowodowane błędami remontowo-montażowymi.

9. Przykład nr 3: monitorowanie stanu technicznego z pomocą bezprzewodowego systemu skaningowego

W elektrowni podjęto decyzję o wdrożeniu bezprzewodowego systemu nadzoru temperaturowo-drganiowego dla agregatów pomp wody chłodzącej. Podobnie jak w poprzednim przykładzie, głównym zadaniem postawionym przed systemem było rozpoznawanie pogorszenia stanu technicznego łożysk tocznych. Ze względu na brak potrzeby włączenia pomp do systemu zabezpieczeń oraz znaczną odległość budynku pomp od sterowni zdecydowano się na bezprzewodowy system skaningowy.

Systemy bezprzewodowe umożliwiają bądź to jedynie transmisję sumarycznego poziomu drgań (a więc pracują w reżimie podobnym do pracy transmitera drgań i wtedy bardziej nadają się do wspierania prewencyjnego UR), bądź też umożliwiają transmisję przebiegów czasowych sygnałów drgań, co umożliwia dodatkowo współpracę z systemem diagnostyki (i takie rozwiązanie może wspierać predykcyjne UR pomp).

W tym przypadku zdecydowano się na:

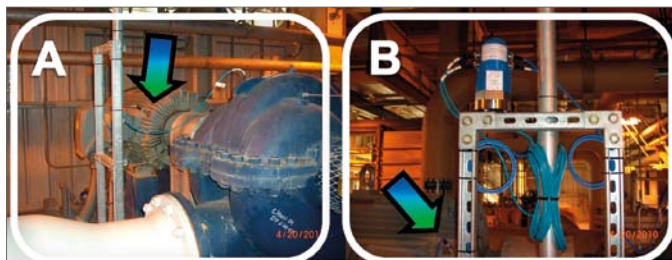
- zastosowanie systemu przydatnego dla predykcyjnego UR pomp;
- rozwiązanie techniczne, które umożliwi przewodowe połączenie do czterech czujników drgań lub temperatury do modułu transmisji bezprzewodowej.

Rozwiązanie takie zwiększa efektywność pracy systemu bezprzewodowego w warunkach przemysłowych, bowiem:

- czujniki są umieszczone w optymalnych punktach węzłów łożyskowych maszyn (rys. 18 a), natomiast
- moduł transmisji bezprzewodowej może być umieszczony w punkcie zapewniającym możliwie dobrą transmisję sygnału (rys. 18 b) między kolejnymi punktami sieci bezprzewodowej (w tym celu mogą być wykorzystywane kolejne punkty akwizycji i transmisji bezprzewodowej sygnałów diagnostycznych bądź też wtórnik [ang.: *repeater*]²).

Taki bezprzewodowy system skaningowy może pracować w takim samym standardzie serwera akwizycji danych jak opisany wcześniej w przykładzie nr 1 i wykorzystywany jako system online typu symultanicznego.

Systemy bezprzewodowe mogą być także wykorzystywane jako systemy wspomagające zakładową grupę diagnostyczną w zintensyfikowanych pomiarach diagnostycznych prowadzo-



Rys. 18. Nadzór silników agregatów pompowych z pomocą czujników drgań

nych dla maszyn, które w normalnym stanie technicznym są objęte nadzorem obchodowym z wykorzystaniem przenośnych zbieraczy danych. W przypadku, gdy dla takich maszyn zostanie stwierdzone pogorszenie stanu technicznego i w konsekwencji wymaga się częstszej kontroli, wtedy (do czasu remontu) można je wyposażać w stacjonarny system skaningowej akwizycji danych oparty na transmisji bezprzewodowej¹³. Środki techniczne wykorzystywane w tym celu posiadają również certyfikację ATEX na okoliczność stosowania w pewnych strefach specjalnych.

10. Zakończenie

Aktualnie obowiązująca jest 4. edycja standardu [1] opublikowana w końcu roku 2000. W ciągu kilkunastu lat od jej ukazania się dokonuje się systematyczny postęp tak w zakresie metod monitorowania, jak również w zakresie rozmiaru agregatów włączanych do systemów stacjonarnych nadzoru stanu technicznego.

Omawiane w artykule czujniki i pomiary są wykorzystywane celem:

- zabezpieczenia łożysk:
 - pomiary temperatury metalu łożyska (zazwyczaj Pt-100);
 - czujniki drgań sejsmicznych indykują fakt zmiany stanu technicznego w przypadku gwałtownych zmian w dynamice pracy silnika wcześniej, niż nastąpią zmiany wskazań temperatury;
 - czujniki drgań i położenia wirnika są stosowane dla silników łożyskowych ślizgowo i dostarczają informacji o poprawności osiowania poszczególnych maszyn agregatu, jak również informują o zbliżających się problemach w czasie pracy ustalonej agregatów;
- zabezpieczenia stojana:
 - pomiary temperatury uzwojeń z pomocą czujników zainstalowanych bezpośrednio w żłobkach (zazwyczaj Pt-100);
 - termistory są wykorzystywane do rozpoznawania przeciążeń prądowych silników i w systemach ich zabezpieczeń elektrycznych.

Poza standardem [2] dla nadzoru stanu technicznego stojana wykorzystuje się w predykcyjnym utrzymaniu ruchu inne specjalizowane, jak np. wysokoczułościowe, transformatory prądowe [11].

Przypisy

1. Alternatywnie w celu pomiaru drgań wału mogą być wykorzystywane czujniki pojemnościowe. Jednak w przypadku mocowania czujników bezkontaktowych bezpośrednio w łożyskach pracują-

- one najczęściej w środowisku silnego zaolejenia. Ta zmieniająca się ilość oleju (lub mgły olejowej) w przestrzeni między wałem a czujnikiem praktycznie dyskwalifikuje czujniki pojemnościowe na okoliczność opisywanego zastosowania.
2. Bardziej efektywną metodą detekcji problemów elektrycznych stojana jest monitorowanie drgań elektrycznych.
 3. Jeśli agregat posiada przekładnię (np. zębatą lub hydrauliczną), wtedy dla zapewnienia poprawności pracy systemu online nadzoru stanu technicznego wymagana jest instalacja kolejnego znacznika fazy na wale wyjściowym przekładni, a jeśli tych przekładni jest więcej, to KEYPHASOR jest wymagany na wale wyjściowym każdej z nich. Jako zasadę można przyjąć wymaganie sformułowane dla zaawansowanych systemów nadzoru online odnośnie stosowania niezależnego czujnika KEYPHASOR dla każdej linii wałów obracających się z różną prędkością obrotową, a znacznik fazy winien być instalowany na wale odpowiedzialnym za napęd kolejnych wałów (tak więc na wale silnika oraz na wale wyjściowym z przekładni).
 4. O ile czujniki znacznika fazy instalowane w systemach nadzoru stanu technicznego mogą pracować dodatkowo na rzecz pomiaru tachometrycznego (także dla systemu DCS), o tyle sygnały z czujników tachometrycznych wykorzystywanych w DCS nie mogą być wykorzystywane dla pomiarów fazowych prowadzonych przez system nadzoru stanu technicznego, bowiem współpracują z kołem zębatym.
 5. Instalacja czujników sejsmicznych w pobliżu czujników drgań wału oraz na kierunkach do nich równoległych jest realizowana w przypadku większych agregatów wtedy, gdy rozważa się możliwość i potrzebę realizacji diagnostyki z pomocą pomiarów drgań bezwzględnych wirników.
 6. Dostawa tych agregatów, wraz z systemami monitorowania, została zrealizowana przy całkowicie biernej postawie inwestora, który (a) jeszcze przed zrealizowaniem dostawy był informowany o „dyskusyjnej” konfiguracji systemu monitorowania, (b) w niedługim czasie po uruchomieniu instalacji nabył dla takich dwóch agregatów system diagnostyki. Zwraca się uwagę na fakt, że nadbudowywanie systemu diagnostyki nad niepoprawnie skonfigurowanym systemem monitorowania nie ma większego sensu praktycznego. Jeśli została podjęta decyzja, że agregat ten winien być włączony do systemu diagnostyki, to w pierwszej kolejności należało go wyposażać w taki zestaw czujników (jak pokazany na rys. 3–5), który warunkowałby możliwość realizacji tego zadania.
 7. Jedynie w przypadku niektórych agregatów wykorzystujących przekładnie zębate są zasadne pomiary temperatury górnych półpanewek wybranych łożysk.
 8. Pomiary temperatury oleju na spływie są przydatne w celu monitorowania poprawności działania układu olejowego. W przypadku dostarczania oleju w ilości mniejszej niż wymagana zostanie faktycznie zaobserwowany wzrost jego temperatury.
 9. Pomimo stosowanego w niniejszym artykule skrótowego zwrotu „czujniki XY drgań wału” należy pamiętać, że czujniki te oprócz pomiarów drgań wału służą jednocześnie do pomiaru położenia czopa wału w łożysku. Pomiar położenia jest bardzo ważny dla oceny poprawności osiowania wirnika w maszynie oraz poprawności zaszprzężenia wałów.
 10. *Glitch* w tłumaczeniu na język polski to „usterka, zakłócenie”. Techniczne piśmiennictwo polskojęzyczne nie posiada dotychczas tłumaczenia w znaczeniu tak jednoznacznym, z jakim mamy do czynienia dla słowa *glitch* w przypadku tematyki dotyczącej drgań wału w piśmiennictwie angielskim. Stąd proponuję w tym przypadku pozostanie przy terminie angielskim. *Glitch* jest pojęciem szerszym niż *runout*, bowiem uwzględnia usterki przejściowe (tzn. takie, jak np. odkształcony statycznie wał, które to odkształcenie, w przypadku niektórych maszyn, może być usunięte przez poprawne zarządzanie procesem).
 11. Najczęstszą przyczyną generowania fałszywych alarmów jest podniesienie się poziomów składowych drgań, które nie są związane ze stanem technicznym monitorowanego agregatu. Mogą one pochodzić z konstrukcji wsporczej, na której agregat jest usytuowany (np. w wyniku pojawienia się drgań rezonansowych konstrukcji wsporczej) lub są generowane przez proces (np. drgania agregatu pompowego wywołane przepływem z pobudzoną kawitacją).
 12. Zadaniem wtórnika jest przechwycenie sygnałów od innych modułów transmisji bezprzewodowej (lub także od innego wtórnika) i dalsza bezprzewodowa transmisja sygnału w kierunku serwera akwizycji danych diagnostycznych.
 13. Takie rozwiązanie jest stosowane np. przez Elektrownię Turów, która wykorzystuje jeden i ten sam system umożliwiający gromadzenie danych online dla maszyn krytycznych oraz dodatkowo bazując na sprzęcie obchodowym, prowadzi diagnostykę offline. Na tę drugą okoliczność została zorganizowana baza danych umożliwiająca akwizycję danych z ok. 6000 punktów z pomocą sprzętu przenośnego. Teraz, bazując na tym samym rozwiązaniu programowym (SYSTEM 1), istnieje także możliwość gromadzenia danych z pomocą bezprzewodowego systemu skaningowego.

Literatura

- [1] NOWICKI R.: *Wprowadzenie do problematyki nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*.
- [2] API STD 670, Machinery Protection Systems, 4th edition, DEC 2000.
- [3] FINLEY W.R., HODOWANCE M.M.: *Motor Vibration Analysis: Keeping it Simple*. „Electrical Construction and Maintenance” 1/2001.
- [4] API STANDARD 541, Brushless Synchronous Machines – 500 kVA and Larger, 3rd edition, September 2008.
- [5] „GLITCH” Definition, Sources and Methods of Correcting, <http://www.ge-mcs.com/en/online-learning-center/glitch-definition-sources-and-methods-of-correcting.htm>.
- [6] KACPEREK M.: *Diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych w przemyśle cementowym na przykładzie Cementowni ODRA SA*. Autoreferat pracy doktorskiej, Opole 2012.
- [7] Lesson learned on electric motor shaft, <http://www.reliableplant.com/Read/11311/electric-motor-shaft>, Reliable Plant March 2008.
- [8] VENKATARAMAN B., GODSAY B., PREMERLANI W., SHULMAN R.E., THAKUR M., MIDENCE R.: *Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection*, http://www.gedigitalenergy.com/multilin/family/motors/motor_thermal_model.pdf.
- [9] IEEE Guide for AC Motor Protection, Std. C37.96-2000.
- [10] IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines, Std. 620-1996.
- [11] NOWICKI R.: *Monitorowanie stanu agregatów krytycznych napędzanych silnikami elektrycznymi dużych mocy*. Zeszyty Problemy „Maszyny Elektryczne” 3/2012 (96), str. 183–188.

Ryszard Nowicki – GE POWER CONTROLS Sp. z o.o.
e-mail: ryszard.nowicki@ge.com