

Ryszard Nowicki
GE Company Polska, Poznań

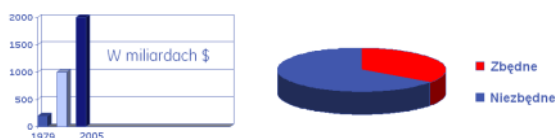
ZRÓŻNICOWANIE SYSTEMÓW ON LINE NADZORU STANU TECHNICZNEGO AGREGATÓW Z NAPĘDAMI ELEKTRYCZNYMI

DIVERSIFICATION OF ON-LINE CONDITION MONITORING SYSTEMS FOR AGGREGATES WITH ELECTRICAL DRIVERS

Abstract: A goal of the paper is a presentation of a modern approach dedicated to an optimal condition management of aggregates driven by electrical motors. These aggregates are one of the most popular assets used in majority of plants. Cost relationships appointed to various maintenance strategies are presented. An optimization of a used maintenance strategy can result in minimization of plant maintenance expenses. For various strategies have to be used a proper structure of a plant asset management system. This article describes a modern structure of the condition monitoring system and presents the system components that are required to fulfill the most typical maintenance strategies. A discussion of various techniques used for condition monitoring of electrically driven aggregates is provided according to importance of the aggregates for production process. A critical factor of each condition monitoring system is correctness of used transducer types and their fixing. Therefore, a discussion of the most common mistakes in transducer selection and fixing is presented. These mistakes directly influence on maintenance expenditure increasing.

1. Wstęp

Nakłady na utrzymanie ruchu (=UR) w skali globalnej wykazują oczywistą tendencję wzrostową i stanowią jeden z istotnych czynników rzutujących na wynik finansowy działania przedsiębiorstwa. Na rys.1 w ślad za [1] zaprezentowano wzrost kosztów UR na przestrzeni ostatnich ~30 lat oraz przedstawiono relację między nakładami ponoszonymi zasadnie i bezzasadnie. Szacuje się, że statystycznie blisko 30% ponoszonych na UR nakładów nie ma rzeczywistego uzasadnienia technicznego.



Rys. 1. Wzrost kosztów UR i ich zasadność

Przyczyn tak znacznego udziału niepotrzebnych nakładów na UR upatruje się w:

- niewystarczająco nowoczesnej strategii UR stosowanej przez przedsiębiorstwa,
- braku dostosowania struktury systemu nadzoru (=SN) do realizowanej strategii UR,
- brakach w implementacji SN z punktu widzenia tak potrzeb jak i współczesnych możliwości.

Udział silników elektrycznych w generowaniu w/w kosztów jest znaczący ze względu na liczbę silników będących w użytkowaniu. Zachowawcze oszacowania mówią, iż średni

wskaźnik awaryjności silników wynosi 3...5% w skali roku, a w niektórych branżach (np. kopalnie, fabryki papieru) dochodzi on nawet do 12% [2]. W artykule zaprezentowano poprawne uzależnienie między różnymi (najczęściej stosowanymi) strategiami UR, a wymaganą dla ich skutecznej egzekucji strukturą SN oraz wskazano sposób postępowania umożliwiający zwerifikowanie efektywności stosowanej strategii i w konsekwencji minimalizacji kosztów UR. W rozważaniach ograniczono się do stacjonarnych SN¹ oraz do agregatów z napędami elektrycznymi.

2. Struktura współczesnego systemu nadzoru

Pierwsze prace stanowiące podwaliny dla współczesnych SN stanu technicznego datują się na lata 30-te ubiegłego wieku [3]. Wtedy to dokonano pionierskiej próby wdrożenia czujników drgań (wówczas: mechanicznych – mierzonych z pomocą czujników sejsmicznych) na rzecz oceny stanu technicznego turbin parowych. W latach 50- i 60-tych pojawiają się pierwsze systemy monitorowania posiadające funkcję zabezpieczeń, a u podstaw ich efektyw-

¹ W praktyce wielu przedsiębiorstwach stosuje się także (alternatywnie lub uzupełniająco) nadzór oparty na technikach obchodowych realizowanych okazjonalnie lub okresowo.

nego zastosowania leży wprowadzenie w latach 50-tych do praktyki przemysłowej czujników bezkontaktowych [4]. Czujniki te dawały tak możliwość pomiaru drgań wirników (tu: drgań względnych) jak i wzajemnego położenia wybranych elementów maszyny (np. wirnika w łożysku oporowym). Celem stosowania systemów monitorowania było w pierwszej kolejności zapobieżenie katastrofom w branży chemicznej mogącym prowadzić do kaskadowego unicestwienia systemu produkcyjnego oraz w szeregu przypadków także wtórnie do katastrof ekologicznych. Wkrótce jednak bardzo podobne systemy zaczęto stosować do zabezpieczenia pracy agregatów szczególnie kosztownych (i w konsekwencji krytycznych dla pracy przedsiębiorstw) w innych branżach.

Dla zorientowanej diagnostycznie analizy sygnałów drgań pierwotnie wykorzystywano analizatory analogowe. Jednak dopiero opracowanie algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera [5] i dynamiczny rozwój komputeryzacji w latach 80-tych stworzyły podstawę do konstrukcji, stosowania i upowszechnienia stacjonarnych systemów diagnostyki stanu technicznego. Funkcjonalność ówczesnych systemów diagnostyki sprowadzała się przede wszystkim do akwizycji i przetwarzania sygnału. Jednak już wtedy można było doszukać się ich silnego zróżnicowania jakościowego wyrażającego się m.in.: liczbą obsługiwanych kanałów dynamicznych, możliwościami w zakresie współfazowej akwizycji sygnałów ze wszystkich czujników zainstalowanych na jednej maszynie czy możliwościami w zakresie akwizycji sygnałów w tzw. stanach przejściowych pracy maszyn. W tym ostatnim przypadku najważniejsze były możliwości systemów w zakresie zabezpieczenia akwizycji sygnałów w czasie rozruchu agregatów. Zadanie to było szczególnie trudne dla agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi, a to ze względu na krótkość rozruchu. W praktyce przemysłowej często są wykorzystywane agregaty posiadające jedną lub więcej przekładni dzięki którym prędkość nominalna wirnika maszyny roboczej może wynosić nawet kilkadziesiąt tysięcy obrotów na minutę. Jeśli uwzględnić fakt, że ta prędkość nominalna jest osiągana w ciągu kilkunastu sekund to zgromadzenie danych diagnostycznych choćby w wymiarze wymaganym przez [6] jest trudne do zrealizowania przez wiele z dostępnych współcześnie na rynku SN.

Dla służb UR nie były nigdy szczególnie interesujące dane gromadzone przez *system diagnostyki*. Służby UR były i są zainteresowane przede wszystkim informacjami w zakresie (a) co zrobić aby polepszyć stan techniczny agregatu (jeśli nie jest on prawidłowy) oraz (b) co zrobić aby wydłużyć przebiegi między remontowe. To zadanie konwersji:

$$\begin{aligned} \{DANE\ W\ SYSTEMIE\ DIAGNOSTYKI\} &\Rightarrow \\ &\Rightarrow \{DIAGNOZA\} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \{INFORMACJA\ U\ZYTECZNA\ DLA\ UR\} \end{aligned} \quad (1)$$

na etapie pierwotnych systemów diagnostyki było realizowane przez specjalistę w zakresie diagnostyki maszyn. Dopiero na początku lat 90-tych pojawiły się pierwsze wdrożenia systemów ekspertowychⁱⁱ wykorzystujące sztuczną inteligencję, które wspomagały proces w/w konwersji dla SN klasy On-Line.

Dla systemów ekspertowych dedykowanych SN można wyróżnić 3 fazy rozwoju:

- systemy typu „czarna skrzynka” umożliwiające jedynie konfigurowanie w zakresie wybranych danych konstrukcyjnych maszyny (np. obroty nominalne, obroty rezonansowe, rodzaje i gabaryty łożysk),
- systemy umożliwiające dodanie do bazowego zestawu reguł (j.w.) dodatkowych nowych reguł opartych na algorytmach deterministycznychⁱⁱⁱ,
- systemy umożliwiające także dodanie nowych reguł opartych na algorytmach nie-deterministycznych (np. dzięki wykorzystaniu podejścia bazującego na *sieciach neuronowych*).

ⁱⁱ Systemy ekspertowe wspomagające ocenę stanu technicznego realizowaną na bazie danych gromadzonych z pomocą przenośnych zbieraczy były wdrożone już w latach 80-tych. Należy jednak pamiętać, że nadzór z pomocą systemów przenośnych jest pierwszoplanowo wykorzystywany dla agregatów niższej ważności, w konsekwencji o mniejszej złożoności konstrukcyjnej i o większym przyzwoleniu na ewentualne popełnienie błędów. Agregaty takie są produkowane masowo co w konsekwencji stwarza możliwość skutecznego wspomaganie się metodami statystycznymi tak na okoliczność oceny zawadności jak i przy wypracowywaniu diagnozy.

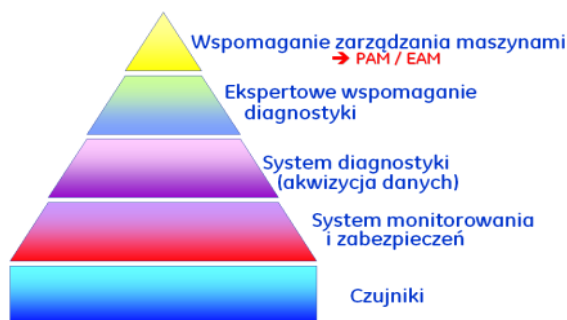
ⁱⁱⁱ Tu dodatkowo można dokonać rozróżnienia na systemy prostsze, które umożliwiają jedynie budowanie reguł z wykorzystaniem *liczb* oraz bardziej zaawansowane dopuszczające stosowanie tak *liczb* jak i *funkcji*.

Współcześnie jedynie nieliczne spośród dostępnych na rynku systemów diagnostyki, które wyszły z fazy prototypu oferują wspomaganie ekspertowe dedykowane różnym maszynom, a także napędom elektrycznym różnych typów oraz udostępniają strukturę szkieletową na okoliczność ich możliwej dalszej rozbudowy przez użytkownika.

Pojawienie się systemów ekspertowych nie oznacza deprecjacji znaczenia specjalisty diagnosty, a oznacza jedynie możliwość zautomatyzowania jakiegoś procenta diagnoz w stosunku do których istnieje dostatecznie wysokie prawdopodobieństwo sformułowania poprawnej diagnozy w trybie automatycznym, a także zgodnie z (1) automatycznej konwersji danych w informację użyteczną dla służb UR.

Jeśli SN jest w stanie wypracować automatycznie diagnozę / informację, to winien on mieć także funkcjonalność umożliwiającą przekazywanie tej informacji do tych działów przedsiębiorstwa, które nią winny (+ mogą) być zainteresowane.

Na rys. 2 pokazano strukturę kompletnego SN stanu technicznego. Składają się na nią czujniki, elektronika systemów monitorowania i zabezpieczeń, system akwizycji danych diagnostycznych (to nie tylko komputer i oprogramowanie ale także specjalizowane procesory akwizycji danych diagnostycznych umożliwiające wystarczająco szybką i współfazową akwizycję danych z wielu kanałów sygnałów dynamicznych). Pierwsze profesjonalne systemy diagnostyki wdrażane w Polsce od początku lat 90-tych posiadały jedynie strukturę trójpoziomową na którą składały się 3 najniższe warstwy struktury jak pokazana poniżej.



Rys. 2. Komponenty współczesnego SN i ich wzajemne pozycjonowanie

Szczytowa warstwa piramidy to „wspomaganie zarządzania maszynami” nie tylko w zakresie ich stanu technicznego, ale także procesu produkcyjnego. Wchodzi ono w zakres zadania

PAM^{iv} zdefiniowanego w roku 1999. To ta warstwa SN jest m.in. odpowiedzialna za przekazanie tak szybko jak to możliwe komunikatów z informacjami o zmianach dotyczących stanu technicznego środków produkcji do tych wszystkich komórek przedsiębiorstwa, które mogą być tym faktem zainteresowane.

Jeśli system posiada funkcjonalność umożliwiającą komunikowanie się ze środowiskiem na rzecz którego pracuje to istnieje także możliwość takiego jego wykorzystania, że oprócz komunikatów adresowanych do służb UR będzie on mógł także przysyłać komunikaty do wydziałów odpowiedzialnych bezpośrednio za produkcję (np. do operatorów). W tym przypadku komunikaty winny podpowiadać w jaki sposób należałoby zmienić parametry pracy maszyny, aby nie zwiększać ryzyka przyspieszonego jej, a w konsekwencji także instalacji (jeśli jest to agregat nie posiadający rezerwy), odstawienia.

Pokazana na rys. 2 struktura SN nie rozrastała się na przestrzeni laty wyłącznie w kierunku pionowym, ale także w poziomym. W połowie ubiegłego wieku wykorzystywano do oceny stanu technicznego bardzo ograniczony zbiór czujników. Zbiór ten uległ znacznemu wzbogaceniu i zróżnicowaniu na przestrzeni ostatniego ćwierćwiecza. Opracowanych zostało wiele nowych konstrukcji czujników, czy to dla nowych typów pomiarów (czujniki symetrii szczeliny powietrznej i pola magnetycznego między wirnikiem a stojanem), czy też dla pomiarów, które już wcześniej były realizowane w warunkach „normalnych”, a które współcześnie mogą być także realizowane w warunkach ekstremalnych (np. czujniki niskotemperaturowe dla monitorowania zintegrowanej z silnikiem pompy kriogenicznej, czujniki odporne na promieniowanie niezbędne dla wybranych napędów elektrycznych w elektrowniach jądrowych, itp.).

Postępu dokonano również w konstrukcji systemów monitorowania. Jedną z nowych funkcjonalności (wymaganą dla obiektów technicznych szczególnie krytycznych) było zwiększenie niezawodności SN poprzez wprowadzenie redundancji (np. z myślą o niektórych agregatach

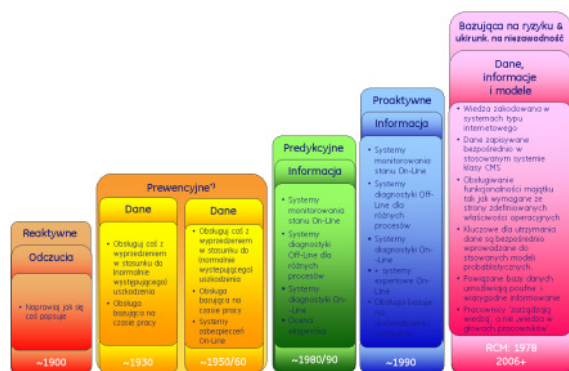
^{iv} PAM = Plant Asset Management oznacza zarządzanie majątkiem przedsiębiorstwa. W kolejnych latach pojęcie to zostało rozwinięte w EAM = Enterprise Asset Management, które jest dedykowane przedsiębiorstwom wielozakładowym.

tach wykorzystywanych w energetyce jądrowej). Takie systemy monitorowania są określane mianem systemów klasy TMR^v.

3. Ewolucja strategii UR

W świetle danych pokazanych na rys. 1 można stwierdzić, że współcześnie ponosi się niepotrzebne nakłady na UR w stopniu większym, niż ponoszone były wydatki na całość UR ćwierć wieku temu. Na stosunek między nakładami ponoszonymi bezzasadnie i nakładami zasadnymi w podstawowym stopniu wpływa stosowana strategia UR.

Na rys. 3 pokazano historię ewolucji UR na przestrzeni ostatniego wieku. Pierwotnie maszyny pracowały tak długo, dopóki nie wystąpiło uszkodzenie (awaria), wymuszająca przeprowadzenie naprawy^{vi}.



Rys. 3. Etapy ewolucji strategii UR

W prewencyjnym UR można wyróżnić dwa okresy rozwoju. W tym pierwszym dla oceny stanu technicznego wykorzystywane były jedynie pomiary (quasi-) statyczne natomiast w okresie późniejszym do prewencji zaczęto wykorzystywać także pomiary dynamiczne. Podejście takie zaczęło się upowszechniać po drugiej wojnie światowej.

Prewencyjne UR dało początek TPM^{vii}. W roku 1951 prewencyjne UR zostało z USA przejęte przez Japończyków. TPM jest japońską pomysłą na rzecz doskonalenia UR. Za jego początek przyjmuje się rok 1960 kiedy to jeden z oddziałów Toyoty (Nippondenso) jako pierwsza japońska firma wdrożył na szeroką skalę prewencyjne UR.

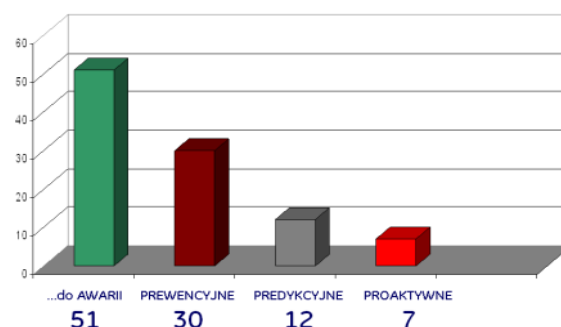
^v TMR = Triple Modular Redundant

^{vi} W literaturze angielskiej strategia ta jest nazywana RTF = Run-to-Failure.

^{vii} TPM = Total Productive Maintenance czyli Totalne UR dla Produkcji.

Posiadanie kompletnych systemów diagnostyki^{viii} dało podstawy proaktywnemu UR, a modelowe uwzględnienie niezawodności stworzyło możliwość stosowania bardziej wyspecjalizowanych strategii UR dedykowanych pewnym specyficznym procesom produkcyjnym.

Wszystkie te działania miały i mają na celu minimalizację nakładów na utrzymanie środków produkcji w należytym stanie. Na rys. 4 pokazano (w ślad za ASME) relacje między nakładami na UR w zależności od stosowanej strategii UR.



Rys. 4. Relatywne koszty UR dla czterech dyskutowanych strategii

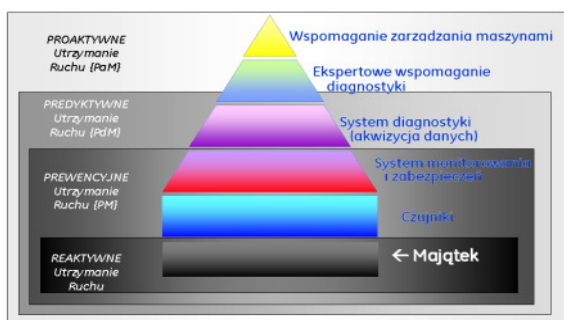
Pokazane uzależnienie kosztów uwzględnia jedynie koszty związane bezpośrednio ze stosowaniem jednej z czterech strategii UR. Natomiast na wynik ekonomiczny działania szeregu przedsiębiorstw będą także miały przestoje instalacji (wymuszone nieplanowaną awarią) i w konsekwencji brak możliwości realizowania produkcji, a także w niektórych sytuacjach kary będące skutkiem nie wywiązania się z zakontraktowanych dostaw. W konsekwencji bieżące straty produkcyjne mogą znacząco przekraczać nakłady na UR, a ich skala będzie tym większa im bardziej strategia UR nie przystaje do optymalnej dla konkretnej branży produkcyjnej.

^{viii} Na kompletny system diagnostyki składa się system komputerowy umożliwiający (a) akwizycję danych, (b) system ekspertowy dedykowany dla określonego typu maszyny i wymagający stosownego do konstrukcji nastrojenia (c) dodatkowe oprogramowanie umożliwiające generowanie nowych (dodatkowych) reguł wnioskowania. Akwizycja danych w rozwiązaniach profesjonalnych wykorzystuje procesory komunikacyjne (fizycznie są one zlokalizowane między systemem monitorowania stanu technicznego i komputerem) oraz oprogramowanie spełniające różne funkcje w tym także specjalizowanego post processing'u.

4. Uzależnienie między strategią UR, a SN

Na rys. 5 pokazano uzależnienie między SN stanu technicznego, a stosowaną strategią UR. I tak jeśli jest to strategia *reaktywna* wtedy nie są potrzebne żadne środki techniczne wspomagające UR. Jeśli strategia *prewencyjna* to wtedy na ogół wystarczającym jest zastosowanie ograniczonej liczby czujników, aby zapewnić zgrubne monitorowanie stanu technicznego oraz zabezpieczenie maszyny przed rozległą awarią.

W przypadku strategii *predykcyjnej*, a więc w przypadku w którym oczekujemy, że podstawą działań służb UR będzie dobra świadomość odstępstw od dobrego stanu technicznego (tak w zakresie typu uszkodzenia, jak i jego zaawansowania), liczba stosowanych czujników winna być większa niż w przypadku strategii *prewencyjnej*. Dodatkowo musi być także stosowany system diagnostyki (choćby w podstawowym zakresie, tzn. zapewniający wystarczająco silną akwizycję danych diagnostycznych).



Rys. 5. Zaawansowanie SN stanu technicznego wymagane dla różnych strategii UR

Uszkodzenia, które charakteryzują się dobrze zdefiniowanymi symptomami mogą być identyfikowane z pomocą reguł ekspertowych co przyspiesza proces generowania diagnozy i w konsekwencji zwiększa poprawność decyzji operacyjnych.

W przypadku stosowania *proaktywnego* UR wspomaganie ekspertowe winno być bardziej rozbudowane. System ekspertowy może także prowadzić dodatkowo doradztwo w zakresie zmiany parametrów operacyjnych tak, aby wciąż móc prowadzić (zaniżoną) produkcję przy jednoczesnym minimalizowaniu oddziaływań dynamicznych. Wydłużenie czasu do wymuszonego zatrzymania agregatu umożliwia lepsze przygotowanie remontu i w konsekwencji skraca czas przerwy produkcyjnej.

5. Systemy nadzoru silników elektrycznych

SN agregatów napędzanych silnikami możemy podzielić na dwie grupy:

- SN, które są podłączone do systemów zabezpieczeń i w przypadku pomiarów przekraczających ustawienia graniczne powodują odstawienie agregatów lub uniemożliwiają ich uruchomienie,
- SN, które wykorzystują sygnały symptomatyczne dla stanu technicznego i w konsekwencji, po przekroczeniu zadanych wartości granicznych, generuje alarmy; alarmy te nie powodują automatycznego odstawienia agregatu, a są przekazywane jedynie do wiadomości operatorom; od ich dalszej subiektywnej oceny zależy decyzja o odstawieniu, bądź też nie agregatu.

W praktyce często wykorzystywane są systemy monitorowania, które posiadają obie wyżej opisane funkcjonalności, bowiem część pomiarów pracuje na rzecz zabezpieczenia agregatu, a część posiada funkcję wspomagającą (informacyjną).

6. Pomiary włączane do SN agregatów napędzanych silnikami

Do systemów monitorowania są włączane pomiary:

- mechaniczne,
- temperatury,
- elektryczne oraz
- wybrane procesowe mogące wpływać na stan techniczny agregatu.

Pomiary mechaniczne i temperatury dotyczą zarówno silnika, jak i jednostki napędzanej. Wytyczne w zakresie pomiarów włączanych do systemu monitorowania są zawarte w [7].

W zakres tych pomiarów wchodzi:

- drgania mechaniczne realizowane w różny sposób w zależności od konstrukcji węzłów łożyskowych: łożyska ślizgowe lub toczne^{ix} ← zbiór: MV);
- pomiary położenia osiowego wirników w łożyskach oporowych (jeśli agregat posiada takie łożyska) ← zbiór Ax;

^{ix} W praktyce są stosowane także coraz częściej łożyska magnetyczne wymagające specjalistycznego oczujnikowania, natomiast ze względu na brak takich aplikacji w kraju ich specyfika nie będzie dalej dyskutowana.

- pomiary temperatury węzłów łożyskowych (tak dla łożysk promieniowych jak i osiowych) ← zbiór T_B ; w tym zbiorze uwzględnia się zarówno pomiary temperatury łożysk, jak i (np. dla gorących pomp procesowych) temperatury mediów chłodzących, stojaków łożyskowych, etc.;
- pomiary temperatury uzwojeń silnika ← zbiór T_w .

W niektórych przypadkach w/w pomiary na rzecz oceny stanu technicznego mogą być rozszerzone o (zbiór AM):

- pomiary kierunku obrotu wirnika (stosowane dla niektórych rodzajów agregatów pompowych – mają na celu minimalizację obciążeń rozruchowych silnika),
- pomiary drgań obudów co może mieć miejsce np. w przypadku przekładni zębatych [7], pomp (w celu monitorowania kawitacji); pomiar taki także okazjonalnie spotka się na korpusach silników,
- pomiary poprawności pracy uszczelnień co może być stosowane np. w przypadku pomp procesowych i sprężarek,
- pomiary momentu przenieszonego od jednostki napędowej do maszyny roboczej^x,
- grupę specyficznych pomiarów drgań mechanicznych, położenia tłoczyska oraz temperatur w przypadku jeśli napędzaną maszyną jest sprężarka tłokowa.

Oprócz wyżej wymienionych pomiarów dla dużych silników krytycznych realizuje się czasami monitorowanie szczeliny powietrznej (zbiór AG) co pozwala na oszacowanie kształtu stojana, wirnika oraz ocenę rozosiowania.

Pomiary elektryczne w pierwszej kolejności są dedykowane dla monitorowania stanu technicznego i zabezpieczeń silnika. Są to zabezpieczenia (zbiór EP):

- nadprądowe zależne i niezależne,
- nadprądowe ziemnozwarciowe,
- nadprądowe kontrolujące rozruch silnika,
- nadprądowe reagujące na utyk wirnika,
- nadprądowe od asymetrii obciążenia,
- nadnapięciowe,
- podprądowe niezależne,
- nadnapięciowe ziemnozwarciowe,
- podnapięciowe,

^x Na ogół mierzony jest moment statyczny, choć w niektórych przypadkach celem jest także dokonywanie pomiaru momentu dynamicznego co ułatwia identyfikację występowania drgań skrętnych.

- czasu blokady po rozruchu,
- od nadmiernej częstotliwości rozruchów,
- admitacyjne,
- ziemnozwarciowe kątowe,
- od zwarć międzyfazowych,
- specjalne: technologiczne.

Dla dużych silników krytycznych, oprócz w/w zabezpieczeń, realizuje się czasami monitorowanie stanu technicznego w oparciu o dodatkowe pomiary charakteryzujące stan obwodów elektrycznych, a mianowicie (zbiór EM):

- wyładowania cząstkowe oraz
- strumień magnetyczny w szczelinie.

Pomiar pomocniczy: W przypadku agregatów łożyskowanych ślizgowo standard [7] wskazuje na konieczność instalowania dodatkowego toru pomiarowego, który nie służy bezpośrednio do monitorowania stanu technicznego, a jest torem wspomagającym, umożliwiającym wykonanie pewnych dodatkowych pomiarów z pomocą wcześniej wymienionych czujników. Jest to tzw. znacznik fazy. I tak:

- w przypadku jego braku możliwe są jedynie pomiary drgań sumarycznych,
- w przypadku jego stosowania można dodatkowo prowadzić monitorowanie wybranych składowych harmonicznych klasy NX, podharmonicznych, realizować pomiar S_{MAX}^{xi} , NOT(1X), etc.

Znacznik fazy ma także kluczowe znaczenie dla SN w których system monitorowania jest nadbudowany o system diagnostyki (vide rys. 2) bowiem warunkuje on realizację niektórych analiz funkcyjnych w stanach przejściowych pracy agregatu (rozruch / odstawienie) jak np. widma kaskadowe, analizy wektorowe BODE, oraz analizy biegunowe.

Czujnik znacznika fazy (zbiór kF) winien być instalowany zawsze od strony napędu, tzn. na wale silnika oraz na wale wyjściowym przekładni. Jedynym wyjątkiem są sprężarki tłokowe, w przypadku których instalowany jest specjalizowany multiznacznik fazy bezpośrednio na wale korbowym sprężarki. Jego instalacja ma na celu umożliwienie identyfikacji szczególnie-

^{xi} W systemach monitorowania spotyka się różne estymacje S_{MAX} . Dla realizowania prawdziwej estymacji S_{MAX} (TRUE S_{MAX}) niezbędne jest wykorzystywanie znacznika fazy bowiem to on jest źródłem informacji o czasie pojedynczego obrotu wirnika dla którego wyznacza się tę miarę sygnału.

go położenia tłoków w cylindrach i wykonania pomiarów dla ich różnych położań.

Czujnik fazy jest także bezwzględnie wymagany dla realizacji pomiaru kształtu szczeliny powietrznej oraz strumienia magnetycznego w tejże szczelinie.

Powyżej wymieniono 8 zbiorów pomiarów, które w różnej kombinacji mogą być instalowane w zależności od ważności agregatu dla realizowanego procesu produkcyjnego.

Przyjmijmy, że ze względu na ważność agregatu dla procesu produkcyjnego wszystkie maszyny przyporządkujemy do czterech zbiorów:

- maszyny *krytyczne*,
- maszyny *ważne (quasi krytyczne)*,
- maszyny *ogólnego zastosowania*,
- maszyny *pomocnicze*.

Wtedy, opisane wcześniej pomiary realizowane na rzecz SN, są na ogół przyporządkowane do agregatów różnej krytyczności tak, jak to zostało pokazane w tabeli poniżej.

Zakres pomiarów (ilość, rodzaj czujników) z grupy MV, T oraz AM jest istotnie skorelowany z zaawansowaniem stosowanego systemu monitorowania. I tak dla *agregatów krytycznych* winny być stosowane profesjonalne systemy monitorowania posiadające wymagane certyfikaty oraz zapewniające zaawansowaną autodiagnostykę, umożliwiające pasmową filtrację sygnału oraz konfigurowalne opóźnienie czasowe alarmów, programowalne logiczne wyjścia przekaźnikowe, odpowiednio silne interfejsy do systemu diagnostyki oraz operatorskiego, etc.

GRUPA POMIARÓW → TYP AGREGATU ↓	MV, AX	T _B , T _W	kF, AM	EP	EM, AG
Pomocniczy					
Ogólnego zastosowania	✓	✓			
WAŻNY (Krytyczny z rezerwą)	✓	✓	✓	✓	
KRYTYCZNY	✓	✓	✓	✓	✓

W przypadku *agregatów ważnych* stosuje się najczęściej SN zbliżonych siłą działania do systemów stosowanych dla *maszyn krytycznych*. W przypadku *agregatów ważnych* wyposażonych w łożyska toczne mogą być ewentualnie stosowane systemy o podobnej funkcjonalności ale nie posiadające wyjść przekaźnikowych. W takich przypadkach winny one za-

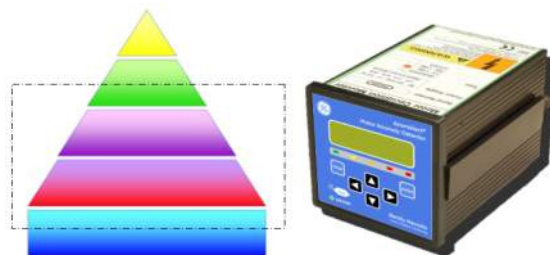
pewniać szybką komunikację z DCS i ten ostatni musi wziąć na siebie zadanie dyskryminacji progowej i funkcję zabezpieczenia maszyny.

Natomiast w przypadku *maszyn ogólnego zastosowania* mogą być także stosowane skanin-gowe systemu monitorowania.

Profesjonalne systemy monitorowania dla w/w grup agregatów umożliwiają na ogół podłączenie sygnału prądu silnika (drżania elektryczne) co w przypadku ich włączenia do systemu diagnostyki umożliwia prowadzenie analiz mających na celu ocenę poprawności pracy w zakresie elektrycznym.

W ostatniej dekadzie do nadzoru agregatów napędzanych silnikami zaczęto stosować systemy *monitorowania anomalii*, np. [8, 9]. Na systemy te należy patrzeć jak na hybrydowe SN, bowiem na poziomie sprzętowym integrują one funkcje systemu monitorowania, akwizycji danych i formułowania oceny ekspertowej, a w przypadku silników niskonapięciowych pracują także jako swoisty czujnik.

Na rys. 6 linią przerywaną zaznaczono granice działania takiego systemu.



Rys. 6. Hybrydowy system monitorowania anomalii agregatów napędzanych silnikami

Dla takich systemów monitorowania wymaga się podłączenia tak sygnału napięcia z silnika jak i prądu. Systemy tej klasy realizują periodycznie akwizycję i przetwarzanie podłączonych sygnałów. Po zainstalowaniu potrzebują jakiegoś okresu czasu (np. ~kilkanaście dni) na samokształcenie z wykorzystaniem zaimplementowanych algorytmów sztucznej inteligencji. Następnie, dokonując porównania danych bieżących ze wzorcowymi formułują diagnostyczną ocenę ekspertową. Systemy te dokonują oceny tak w zakresie stanu technicznego części elektrycznej silnika, jak również mogą realizować detekcję uszkodzeń mechanicznych (np. dla łożyska, sprzęgła, układu łopatkowego), ocenę poprawności zasilania silnika oraz sprawności jego działania.

Tego typu SN mogą być wykorzystywane do monitorowania stanu technicznego agregatów

w stosunku do których nie są wymagane zabezpieczenia sprzętowe, a także mogą wspomagać ocenę stanu technicznego agregatów wyposażonych w SN jak opisane w tabeli, ale bez pomiarów wyspecyfikowanych w ostatnich dwóch kolumnach.

Mogą być również bardzo przydatne dla oceny agregatów w przypadku których brak jest możliwości zainstalowania czujników z grupy MV – co może mieć miejsce np. dla pomp pionowych, pomp pracujących w całkowitym zanurzeniu, pomp kriogenicznych, etc.

7. Typowe błędy popełniane przy wdrażaniu SN dla silników

W przypadku wielu SN wykorzystywanych dla agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi można stwierdzić znaczne obniżenie efektywności ich działania w wyniku błędów popełnionych na etapie wdrożenia (lub użytkowania). Poniżej wyszczególniono najbardziej typowe z obserwowanych błędów.

A) Nadzór silników łożyskowych ślizgowo przy pomocy czujników sejsmicznych. Jest to podejście ewentualnie dopuszczalne w przypadku zastosowania prewencyjnej strategii UR. Natomiast rozwiązaniem poprawnym i bezwzględnie obowiązującym w przypadku stosowania predyktywnej strategii UR jest stosowanie czujników bezkontaktowych w konfiguracji XY, które nie tylko umożliwiają zabezpieczenie przed nadmiernymi drganiami, ale także umożliwiają nadzór luzów łożyskowych.

B) Włączenie pomiarów T_B do systemu DCS w przypadku, w którym są stosowane pomiary MV. Jest to podejście ewentualnie dopuszczalne w przypadku zastosowania prewencyjnej strategii UR. Natomiast rozwiązaniem poprawnym i bezwzględnie obowiązującym w przypadku stosowania predyktywnej strategii UR jest podłączenie pomiarów T_B oraz MV do jednego i tego samego SN jak to opisane w [7].

C) Brak poprawności zainstalowania czujników z grupy T_B w łożyskach. Wciąż jeszcze często w przypadku maszyn z poziomą osią wałów czujniki temperatury są zainstalowane od góry łożysk co jest rozwiązaniem poprawnym jedynie w nielicznych przypadkach. Czujniki z tej grupy winny być instalowane w miejscu hipotetycznie największego obciążenia łożyska [7].

D) Brak poprawności w zakresie instalacji czujników z grupy T_B dla łożysk długich [7]. łożyska takie winny posiadać pomiary w dwóch płaszczyznach przesuniętych osiowo.

E) Brak poprawności w zakresie podłączenia czujników T_W do systemu monitorowania. Rozwiązaniem poprawnym jest włączenie tych pomiarów do tego samego systemu, do którego są podłączone pomiary z grupy EP. Natomiast w przypadku braku pomiarów EP grupa pomiarów T_W winna być podłączona do tego samego systemu monitorowania, do którego są podłączone pomiary T_B .

F) Brak zadbania ze strony użytkownika o standaryzację czujników oraz systemów monitorowania i zabezpieczeń w skali przedsiębiorstwa. Stosowanie różnych czujników (np. drgań) do podobnych zastosowań podnosi koszty UR i w żadnym stopniu nie zwiększa niezawodności pracy maszyn.

Standaryzacja systemów monitorowania oraz agregacja pomiarów prowadząca do minimalizacji liczby kaset systemów monitorowania w przedsiębiorstwie zainteresowanym predyktywnym UR prowadzi do zmniejszenia nakładów na wdrożenie systemu diagnostyki oraz może się przyczynić znacząco do podniesienia efektywności jego działania.

G) Brak stosowania pomiaru kF w przypadku napędów zmiennie obrotowych, a także stało prędkościowych i wyposażonych w pomiary drgań wału.

8. Zakończenie

Dokonując omówienia systemów nadzoru ograniczono się do oceny niezawodnościowej. Strukturę identyczną jak pokazana na rys. 2 posiadają także systemy pracujące na rzecz oceny termodynamicznej efektywności pracy agregatów. Współcześnie obserwuje się tendencję do agregacji obu wymienionych systemów w jeden noszący nazwę „SYSTEM ZARZĄDZANIA MASZYNAMI”. W świetle powyższego można zatem również mówić o: *systemie zarządzania silnikami*.

9. Literatura

- [1]. Ring P.: *Applying Lean and RCM Principles to Implement a Cost Effective Preventive Maintenance Program*, IFMA Industrial Forum, April 2008, Denver, Colorado.
- [2]. Banerjee A., Tiwari A., Vico J., Wester C.: *Motor Protection Principles*, Presented at 2008 Texas A&M Protective Relaying Conference –College Station TX, APR 2008
- [3]. Mitchell, J. S.: *From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance: Seventy Years of Continuous Progress*, Sound and Vibr., JAN 2007

-
- [4]. Bently D.E., Hatch Ch.T.: *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics (Design and Manufacturing)*, Bently Pressurized Bearing Press LCCN 200294136, ISBN 0-9714081-0-6, 2003
- [5]. Cooley, J. W., and Tukey J. W., *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, Math. Comput. 19, 297–301 (1965).
- [6]. API STD 617 *Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services*, API, 17th edition, JUL 2002
- [7]. API STD 670, *Machinery Protection Systems*, 4th edition, DEC 2000
- [8]. Case study: *ARTESIS makes waves with WESSEX WATER*, www.artesis.com
- [9]. *Going against the grain*, 3 NOV 2010, www.artesis.com

Autor

Ryszard.Nowicki@ge.com, ☎+48 601 710 700
ul. Myśluborska 62, 60-432 Poznań