

Nadzór stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi: wprowadzenie do tematyki

Ryszard Nowicki

1. Wprowadzenie

Dla agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi (=SE) stosowane są różne systemy nadzoru. Celem artykułu jest omówienie systemów, które wspomagają służby utrzymania ruchu (UR) w realizacji preferowanej dla określonego agregatu strategii UR. W artykule dokonano omówienia najczęściej występujących uszkodzeń, scharakteryzowano typowe konsekwencje finansowe dla różnych branż oraz scharakteryzowano zróżnicowanie systemów stosowanych jako standardowe zabezpieczenia elektryczne w stosunku do tych, które mogą być pomocne w rozpoznawaniu problemów ruchowych ze znacznym wyprzedzeniem w stosunku do czasu uszkodzenia agregatu.

Na zakończenie omówiono typowe błędy, które są popełniane w czasie wdrożenia systemów nadzoru i które mogą znacząco obniżyć efektywność nakładów ponoszonych na wdrożenie tych systemów.

2. Nakłady na utrzymanie ruchu

Nakłady na 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 ~30% nakładów ponoszonych na UR nie ma rzeczywistego uzasadnienia technicznego, a więc są to nakłady, których w przypadku lepszej świadomości stanu technicznego (=ST) można by było uniknąć.



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 tak z punktu widzenia potrzeb ze strony majątku, dla którego te systemy są instalowane, jak i w zakresie optymalnego doboru właściwości tych systemów z punktu widzenia współczesnych możliwości.

Skróty:

PaM – Proaktywne Utrzymanie Ruchu;
PdM – Predykcyjne Utrzymanie Ruchu;
PM – Prewencyjne Utrzymanie Ruchu;
SE – Silnik Elektryczny (lub Silniki Elektryczne);
SN – System Nadzoru;
ST – Stan Techniczny;
UR – Utrzymanie Ruchu.

Udział SE w generowaniu ww. kosztów jest znaczący ze względu na liczbę silników będących w użytkowaniu. Także w szeregu krajowych przedsiębiorstw stwierdzano ponoszenie bezzasadnych kosztów na remonty SE.

Ocena ST może być realizowana w oparciu o techniki Off-Line lub On-Line. W artykule ograniczono się do dyskusji technik i rozwiązań systemowych On-Line wykorzystywanych pierwszoplanowo dla agregatów krytycznych.

3. O uszkodzaniu silników

Z roku na rok coraz większa liczba maszyn napędzanych SE obejmowana jest jakąś formą nadzoru ST. Stosowane w tym celu techniki zależą od ważności agregatu oraz od formy utrzymania ruchu, która jest dedykowana temu agregatowi.

Ocena ST SE (lepiej: agregatów napędzanych SE) może być prowadzona w zróżnicowany sposób. Na dobór stosowanych technik nadzoru winien wpływać sposób uszkodzania, który jest bezpośrednią konsekwencją doskonałości konstrukcji, jakości zastosowanych w procesie produkcji materiałów, jakości wykonania oraz sposobu użytkowania.

Badania na rzecz statystycznej oceny uszkodzeń SE były prowadzone w latach osiemdziesiątych XX w. [2, 3, 4]. Wyniki tamtych badań wciąż są traktowane jako reprezentatywne, bowiem są cytowane w kolejnych dekadach w literaturze zarówno dotyczącej niezawodności silników, jak i poświęconej różnym formom nadzoru ich ST.

Na rys. 2 pokazano statystyki głównych typów uszkodzeń silników wg danych zgromadzonych w [3] oraz w [2] odpowiednio dla 6312 i 1141 sztuk SE. Oba te źródła w pierwszej kolejności wskazują na łożyska, a następnie na stojan jako na główne przyczyny uszkodzeń silników.

Prowadzone w podobnym czasie przez Electrical Research Association badania przyczyn uszkodzeń SE w Wielkiej Brytanii [5] koncentrowały się na przyczynach uszkodzeń. Jako trzy główne przyczyny zostały rozpoznane: (I) przeciążenie układów zabezpieczeń elektrycznych 30%, (II) zabrudzenia 18% oraz (III)

błędy po stronie zasilania (w tym brak fazy) 15%, a dopiero na kolejnym, tzn. (IV) miejscu wyróżniono łożyska toczne – 12%.

W materiałach niektórych producentów można znaleźć drastycznie różną ocenę awaryjności łożysk tocznych w SE. I tak np. TOSHIBA ocenia [6], że łożyska są przyczyną 80% uszkodzeń, natomiast stojan jest odpowiedzialny za pozostałe 20%.

Z punktu oceny ST w czasie gromadzenia danych dla ww. statystyk koncentrowano się bardziej na charakterystykach elektrycznych przyczyn defektów, niż na mechanicznych cechach konstrukcyjnych różniących badane silniki. Natomiast, jak wiadomo, znaczący wpływ na dominujące przyczyny uszkodzenia się maszyn ma rodzaj zastosowanych łożysk, sposób ich obsługi, a także sposób zasilania agregatów. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, że w latach, w których gromadzono dane pokazane z pomocą statystyki na rys. 2, nie miało miejsca sterowanie prędkością obrotową z pomocą falowników. Stosowanie regulacji obrotów ma znaczący wpływ na sposób uszkodzenia się silników [7].

Za bardziej współcześnie reprezentatywne statystyki, oceniające sposób uszkodzenia się SE wynikający z ich konstrukcji, można traktować statystyki pokazane na rys. 3 [8]. Co prawda, grupują one w dalszym ciągu silniki wg wielkości elektrycznej, którą jest napięcie zasilania (za wartość graniczną przyjęto 4 kV). Natomiast można przyjąć, że silniki o niższym napięciu zasilania nie posiadają znaczących mocy i są w przeważającej liczbie łożyskowane tocznie. Wraz ze wzrostem mocy wykorzystywane są wyższe napięcia po stronie zasilania, a w konstrukcji węzłów łożyskowych zdecydowanie częściej są stosowane łożyska ślizgowe.

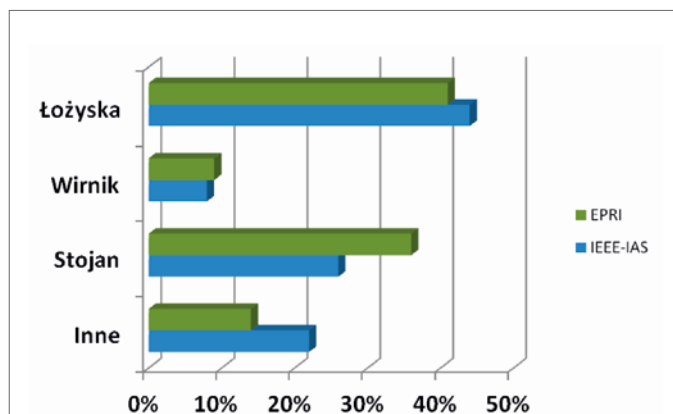
W tym przypadku widoczne jest wyraźne zróżnicowanie głównych przyczyn uszkodzeń: dla mniejszych SE są to przede wszystkim łożyska toczne, natomiast dla SE dużych mocy, wyposażanych na ogół w łożyska ślizgowe, stojan staje się niewralgiczną przyczyną uszkodzeń.

W świetle powyższego można stwierdzić, że wytyczne na rzecz monitorowania ST On-Line sformułowane w [9] mogą być uznane za wystarczające dla silników o mniejszych mocach, które z reguły posiadają wirniki łożyskowane tocznie, i są niewystarczające dla silników o większych mocach, posiadających wirniki łożyskowane ślizgowo. W tym drugim przypadku postępującej destrukcji stojana nie zawsze musi towarzyszyć obserwowalny w systemie nadzoru ST On-Line wzrost drgań i temperatury. Dla silników dużej mocy, w SN ST winien być monitorowany także ST izolacji stojana [10].

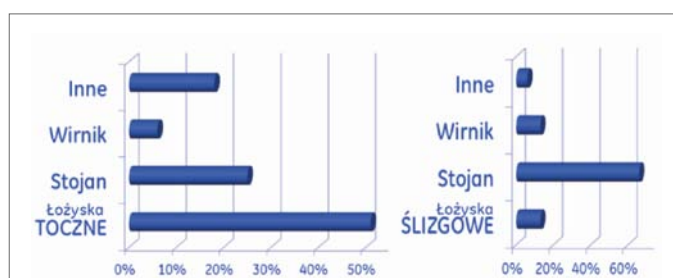
4. Straty z powodu niespodziewanych awarii silników

Niespodziewane uszkodzenia izolacji silników powodują przerwy produkcyjne (lub konieczność obniżenia produkcji) prowadzące w konsekwencji do dużych strat produkcyjnych. W przypadku platform wydobywczych ocenia się, że straty te mogą być na poziomie 25 k\$/godz. Na rys. 4 [11] pokazano dla różnych branż oszacowanie strat produkcyjnych będących konsekwencją uszkodzenia SE.

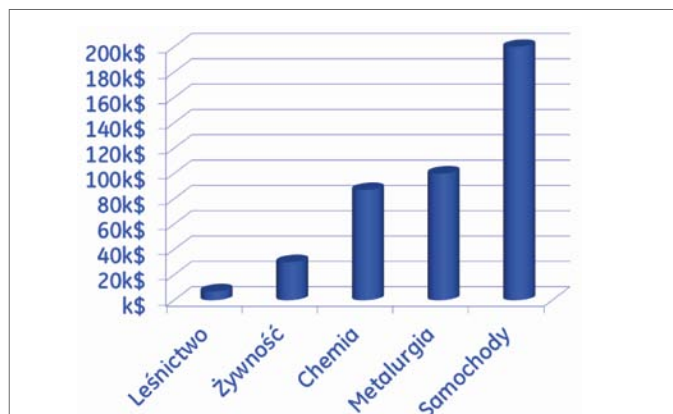
Powyższe dane nie obejmują energetyki, ale w niej także, w przypadku uszkodzenia silników o mocy powyżej 1 MW, można się liczyć ze stratami rzędu ~20–40 k\$/awarię. W [12] przeprowadzono analizę kosztów i start wynikających z uszkodzenia silnika 3-fazowego średniej wielkości, z której wynika, że koszty naprawy silnika wynoszące ok. 5 k\$ przekładały się na 61,5 k\$ strat przychodu.



Rys. 2. Statystyka podstawowych uszkodzeń silników wg IEEE-IAS [2] i EPRI [3]



Rys. 3. Statystyki przyczyn uszkodzeń silników ze względu na ich zróżnicowanie konstrukcyjne



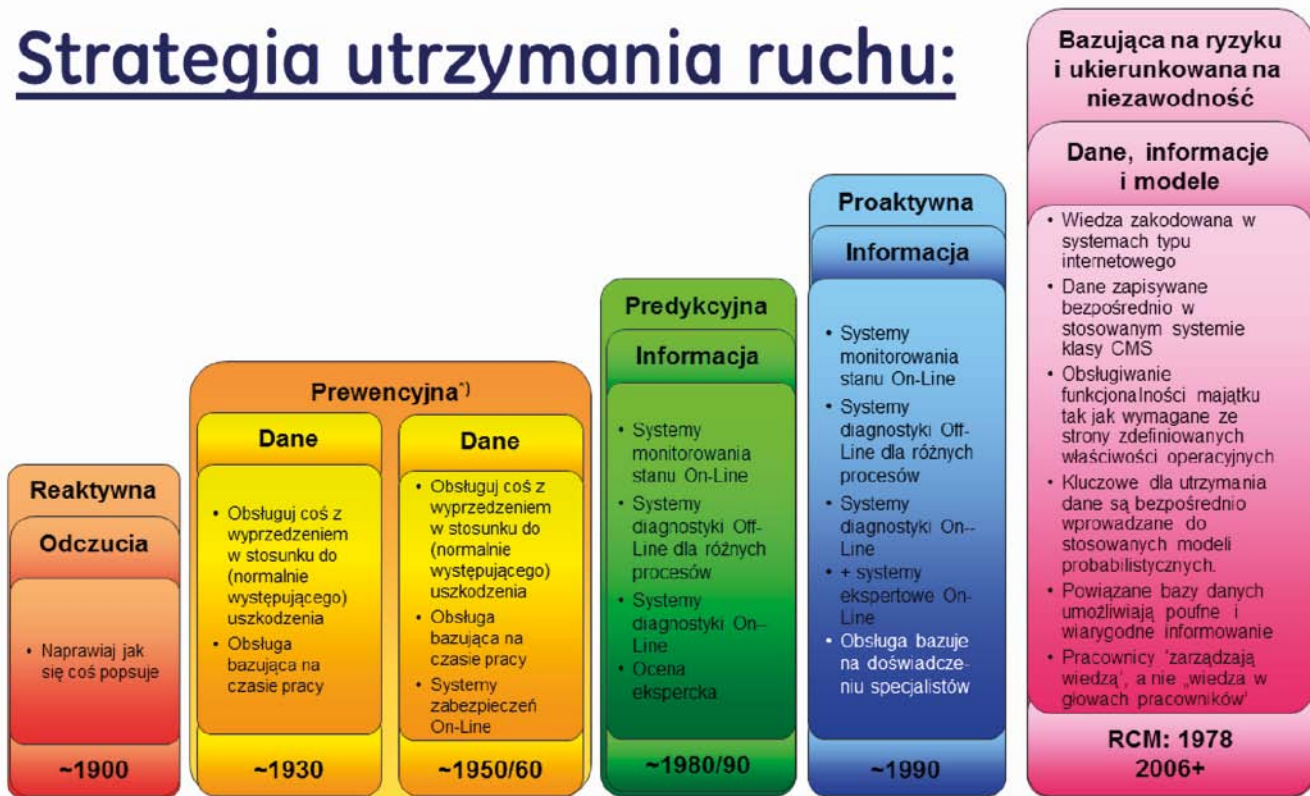
Rys. 4. Oszacowanie strat spowodowanych uszkodzeniem silnika w różnych branżach

Ze względu na wysokie konsekwencje finansowe uszkodzeń napędów elektrycznych ważne jest posiadanie wystarczająco dobrych narzędzi umożliwiających wiarygodne diagnozowanie ich ST. Narzędzia takie winny umożliwiać odpowiednio wcześniejszą predykcję zmiany ST i w konsekwencji winny dawać służbom UR możliwość przygotowania się do optymalnej wymiany/naprawy silnika.

5. Ewolucja strategii utrzymania ruchu

W świetle danych pokazanych na rys. 1 można stwierdzić, że współcześnie ponosi się niepotrzebne nakłady na UR w stopniu

Strategia utrzymania ruchu:



Rys. 5. Etapy ewolucji strategii UR

większym, niż ponoszone były wydatki na całość UR ćwierć wieku temu. Na relacje między nakładami ponoszonymi bezzasadnie i nakładami zasadnymi w podstawowym stopniu wpływa stosowana strategia UR.

Na rys. 5 pokazano historię ewolucji strategii UR na przestrzeni ostatniego wieku. Pierwotnie maszyny pracowały tak długo, dopóki nie wystąpiło uszkodzenie, wymuszające przeprowadzenie naprawy¹⁾.

W prewencyjnym UR można wyróżnić dwa okresy rozwoju. W tym pierwszym dla oceny ST wykorzystywane były jedynie pomiary (quasi-) statyczne, natomiast w okresie późniejszym do prewencji zaczęto wykorzystywać także pomiary dynamiczne. Podejście takie zaczęło się upowszechniać w połowie ubiegłego wieku.

Prewencyjne UR dało początek TPM²⁾. W roku 1951 prewencyjne UR zostało z USA przejęte przez Japończyków. TPM jest japońskim pomysłem 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 (=PM).

Posiadanie kompletnych systemów diagnostyki dało podstawy proaktywnemu UR (=PaM), a modelowe uwzględnienie niezawodności stworzyło możliwość stosowania bardziej wyspecjalizowanych strategii UR dedykowanych pewnym specyficznym procesom produkcyjnym.

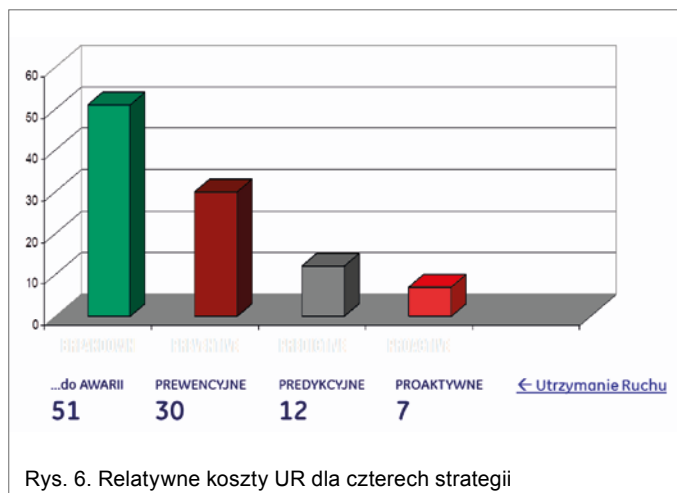
Wszystkie te działania miały i mają na celu minimalizację nakładów na utrzymanie środków produkcji w należytej funkcjonalności. Stwierdzono bowiem, że dla niektórych gałęzi przemysłu koszty UR stanowią jeśli nie najwyższy, to drugi z kolei element kosztów operacyjnych [13]. Na rys. 6 (w ślad za

ASME) pokazano relacje względne między nakładami na UR w zależności od stosowanej strategii UR.

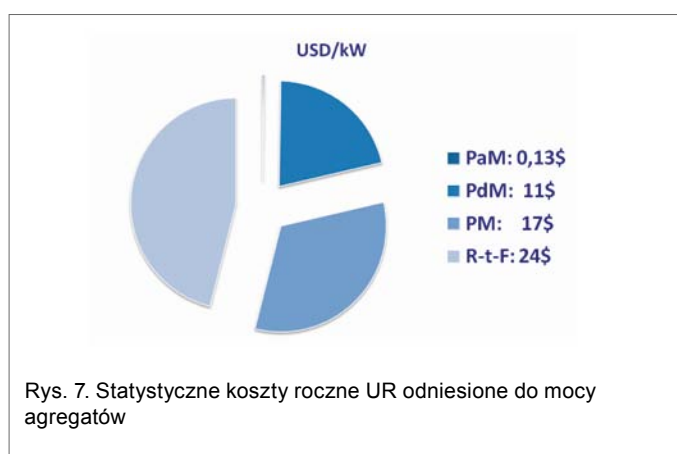
Jeszcze bardziej zróżnicowane konsekwencje nakładów na UR dla 4 dyskutowanych strategii zostały podane w [14] i zaprezentowane na rys. 7. W tym przypadku statystyczne nakłady na UR są odniesione do mocy urządzeń w skali roku. Można stwierdzić, że dane zaprezentowane na rys. 6 i rys. 7 charakteryzują się znaczną korelacją, a największa rozbieżność dotyczy spodziewanych nakładów na PaM, co może być spowodowane zróżnicowaną „proaktywnością” oraz specyfiką branży (lub branż), dla której statystyki zostały wygenerowane.

Także współczesne publikacje prezentują podobne zróżnicowanie kosztów UR. W [15] podano następujące relacje dla najczęściej realizowanych strategii UR: w stosunku do PM koszty PdM są szacowane jako ~5 razy niższe, natomiast koszty UR w przypadku działań reakcyjnych jako dwukrotnie większe. Publikacja ta podkreśla dodatkowo ważność dodatkowych działań wpływających na efektywność realizacji predykcyjnego UR, a mianowicie wprowadzanie w przedsiębiorstwie kultury działania jak wymagana w przypadku TPM, TQM³⁾ oraz Six Sigma.

Pokazane powyżej uzależnienie kosztów uwzględnia jedynie koszty związane bezpośrednio ze stosowaniem jednej z czterech strategii UR. Natomiast na wynik ekonomiczny działania szeregu przedsiębiorstw wpływają dodatkowo przestoje instalacji (wymuszone nieplanowaną awarią) i w konsekwencji brak możliwości realizowania produkcji oraz dodatkowo, w niektórych sytuacjach, kary będące skutkiem niewywiązania się z zakontraktowanych dostaw. W konsekwencji dla niektórych branż bieżące straty produkcyjne mogą znacząco przekraczać nakłady na UR, a ich skala będzie tym większa, im bardziej strategia



Rys. 6. Relatywne koszty UR dla czterech strategii



Rys. 7. Statystyczne koszty roczne UR odniesione do mocy agregatów

UR nie przystaje do strategii optymalnej dla konkretnej branży produkcyjnej.

6. Struktura współczesnego systemu nadzoru

Pierwsze prace stanowiące podwaliny dla współczesnych SN ST datują się na lata 30. ubiegłego wieku [16]. Wtedy to dokonano pionierskiej próby wdrożenia czujników drgań (wówczas: mechanicznych – mierzonych z pomocą czujników sejsmicznych) na rzecz oceny ST turbin parowych. W latach 50. i 60. pojawiają się pierwsze systemy monitorowania posiadające funkcję zabezpieczeń, a u podstaw ich efektywnego zastosowania leży wprowadzenie w latach 50. do praktyki przemysłowej bezkontaktowych czujników drgań i położenia [17]. Czujniki te umożliwiały zarówno pomiary drgań wirników (w tym przypadku: drgań względnych), jak i wzajemnego położenia wybranych elementów maszyny (np. wirnika w łożysku). 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.

W przypadku SE możemy wyróżnić dwie grupy systemów nadzoru. Pierwsza z nich jest pierwszoplanowo dedykowana

szybkodzielnym procesom elektrycznym i służy zabezpieczeniu silników. Zabezpieczenia wykorzystujące sygnały szybkozmienne (przede wszystkim różne pomiary elektryczne), działają zero-jedynkowo, a więc nie dają służbom UR możliwości śledzenia postępującego rozwoju uszkodzenia.

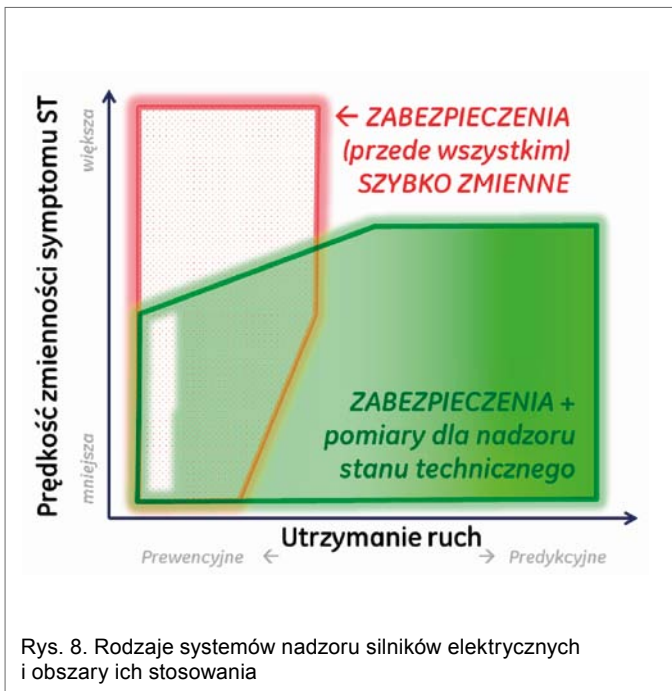
Druga grupa to systemy wspomagające działanie służb UR dzięki możliwości dostarczania danych informujących o pogarszającym się ST, a także umożliwiające rozpoznanie przyczyn postępującej destrukcji. Systemy te wykorzystują przede wszystkim sygnały z czujników pomiarów mechanicznych oraz pomiarów temperatury⁴, a w ostatnich latach także coraz częściej pomiary elektryczne (inne niż wykorzystywane przez systemy zabezpieczeń).

Na rysunku można także znaleźć systemy zabezpieczeń elektrycznych, które posiadają funkcjonalność rozszerzoną o pomiary umożliwiające rozpoznawanie wolnych zmian stanu technicznego (przede wszystkim pomiary temperatur i drgań mechanicznych). Systemy takie mogą być stosowane dla PM, natomiast nie nadają się dla PdM lub lepszego UR, bowiem nie są przygotowane konstrukcyjnie do podłączenia do systemu diagnostyki. Pomiary drgań w systemach zabezpieczeń ograniczają się najczęściej do pomiaru sumarycznego poziomu drgań w warunkach pracy ustalonej i nie umożliwiają ani prowadzenia specjalizowanych analiz drganiowych w przejściowych stanach pracy silnika, ani analiz funkcyjnych w reżimie pracy ustalonej.

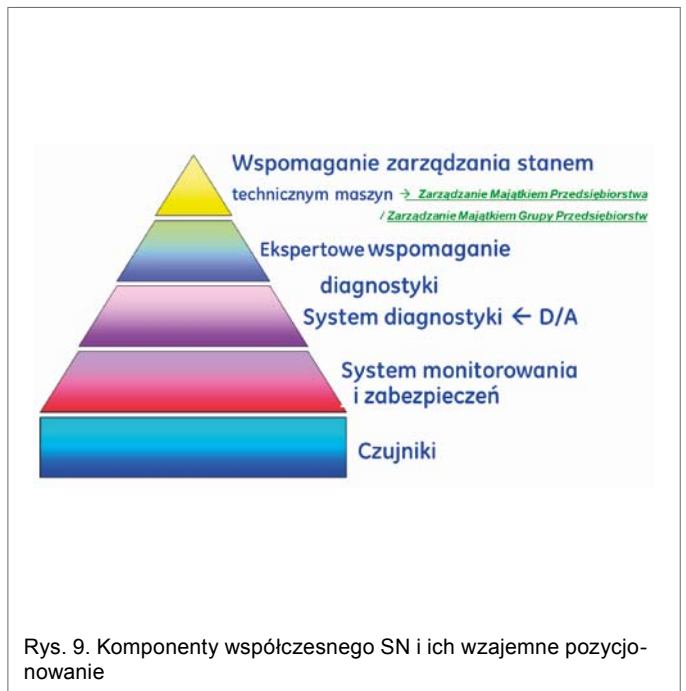
Obszar zastosowań obu typów systemów nadzoru pokazano na rys. 8. Zaznaczone obszary stosowalności mówią o przydatności wyróżnionych dwóch klas systemów dla różnych strategii UR.

Dla zorientowanej diagnostycznie analizy sygnałów drgań pierwotnie wykorzystywano analizatory analogowe. Jednak dopiero opracowanie algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera [18] i dynamiczny rozwój komputeryzacji w latach 80. stworzyły podstawę do konstrukcji, stosowania i upowszechnienia stacjonarnych systemów diagnostyki ST. 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 (rozruch/odstawienie). W tym ostatnim przypadku najważniejsze są możliwości systemów w zakresie zabezpieczenia akwizycji sygnałów w czasie rozruchu agregatów. Zadanie to było szczególnie trudne dla agregatów napędzanych SE, 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 osiągnięta w ciągu kilkunastu sekund, to zgromadzenie danych diagnostycznych choćby w wymiarze wymaganym przez [19], a więc takich, które charakteryzują właściwości dynamiczne (rezonansowe) systemu wirników, jest trudne do zrealizowania przez wiele z dostępnych na rynku SN.

Dla służb UR nigdy szczególnie interesujące nie były dane gromadzone przez system diagnostyki. Służby UR były i są zainteresowane przede wszystkim informacjami wynikającymi z tych danych w zakresie:



Rys. 8. Rodzaje systemów nadzoru silników elektrycznych i obszary ich stosowania



Rys. 9. Komponenty współczesnego SN i ich wzajemne pozycjonowanie

- co zrobić w przypadku odstępstwa od dobrego stanu technicznego agregatu, aby ten stan techniczny polepszyć?
 - co zrobić, aby wydłużyć przebiegi międzyremontowe?
- Odpowiedź na powyższe dwa pytania jest możliwa po dokonaniu dwustopniowej konwersji:
- w oparciu o DANE ZGROMADZONE W SYSTEMIE DIAGNOSTYKI wypracowuje się BIEŻĄCĄ DIAGNOZĘ ST AGREGATU;
 - w oparciu o wiarygodną DIAGNOZĘ ST AGREGATU wypracowuje się INFORMACJĘ UŻYTECZNA DLA SŁUŻB UR w zakresie niezbędnych działań prowadzących do poprawy ST.

Na etapie pierwotnych systemów diagnostyki („pierwotnych”, tzn. dostępnych na rynku wcześniej niż w ostatniej dekadzie XX wieku) zadanie konwersji „DANE → INFORMACJA” było realizowane przez specjalistów od diagnostyki maszyn. Dopiero na początku lat 90. pojawiły się pierwsze wdrożenia systemów ekspertowych⁵ wykorzystujące sztuczną inteligencję, które wspomagały proces ww. konwersji dla SN klasy On-Line.

Pojawienie się systemów ekspertowych nie oznacza deprecjacji znaczenia specjalisty diagnosty, a oznacza jedynie możliwość zautomatyzowania jakiegoś procentu diagnoz, w stosunku do których istnieje dostatecznie wysokie prawdopodobieństwo sformułowania poprawnej konwersji „DANE → INFORMACJA” w sposób automatyczny.

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. 9 pokazano komponenty składowe struktury kompletnego SN ST. Składają się na nią (w kolejności od dołu na rysunku) czujniki, elektronika systemów monitorowania i zabezpieczeń, system akwizycji danych diagnostycznych. Pierwsze profesjonalne systemy diagnostyki, wdrażane w Polsce od początku lat 90. ub.w., posiadały jedynie strukturę trójpoziomą, na którą składały się 3 z najniższej położonych warstw⁶.

Szczytowa warstwa piramidy to „wspomaganie zarządzania maszynami” nie tylko w zakresie ich ST, ale także procesu produkcyjnego. Wchodzi ono w zakres zadania PAM⁷ 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 ST 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 samego urządzenia, a w konsekwencji także instalacji (jeśli jest to agregat nieposiadający rezerwy), odstąpienia. Współcześnie dostępne wiodące systemy ekspertowe są przygotowane na skonfigurowanie opisanej funkcjonalności, tzn. jak w przypadku pogorszenia ST zmieniać obciążenia procesowe, aby minimalizować tak ryzyko katastroficznego uszkodzenia agregatu krytycznego, jak również minimalizować straty produkcyjne będące konsekwencją obniżenia parametrów produkcyjnych.

Pokazana na rys. 9 struktura SN nie rozrastała się na przestrzeni lat wyłącznie w kierunku pionowym, ale progres dotyczy również unowocześniania jej poszczególnych poziomów. W połowie ubiegłego wieku wykorzystywano do oceny ST 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 (np. dla SE: 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 jednocześnie mogą być także realizowane w warunkach ekstremalnych (np. czujniki niskotemperaturowe dla monitorowania zintegrowanej z silnikiem pompy kriogenicznej, czujniki odporne na promieniowanie radioaktywne niezbędne dla wybranych napędów elektrycznych w elektrowniach jądrowych itp.).

Postęp dokonał się także 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 wykorzystywanych w energetyce jądrowej). Takie systemy monitorowania są określane mianem systemów klasy TMR⁸.

Ma miejsce także permanentne unowocześnianie systemów diagnostyki. W systemach tych można wyróżnić trzy główne elementy składowe. Są to:

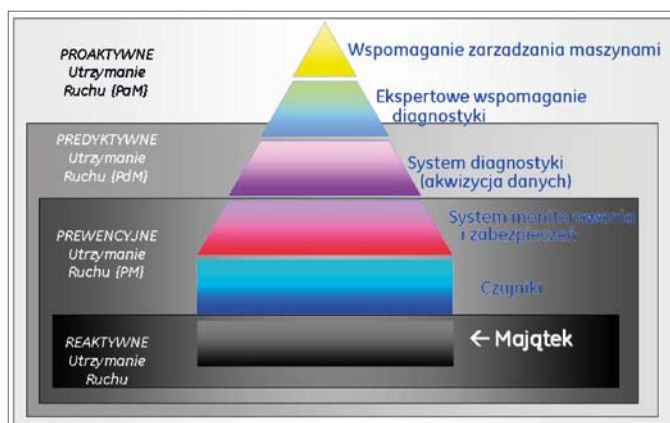
- procesory komunikacyjne zapewniające akwizycję sygnałów zgodnie z potrzebami aplikacji;
- oprogramowanie diagnostyczne odpowiedzialne za gromadzenie i wizualizację danych oraz ich wtórne, zorientowane diagnostycznie, przetwarzanie (w tym także wnioskowanie ekspertowe);
- serwer, na którym jest zainstalowane oprogramowanie diagnostyczne i na którego nośnikach gromadzona jest baza danych diagnostycznych.

Nowe możliwości systemów operacyjnych stymulują rozwój oprogramowania diagnostycznego, nowe standardy wpływają także na konstrukcję bardziej doskonałych systemów diagnostyki. I tak dla przykładu: miniaturyzacja pamięci i elementów cyfrowych wspomagających akwizycję sygnałów umożliwiła integrację nawet bardzo silnych procesorów komunikacyjnych z systemami monitorowania i zabezpieczeń. Wiodący producenci systemów diagnostyki doprowadzili do takiej integracji w latach ~1995–2003. Natomiast pojawiające się standardy bezpieczeństwa wymagają współcześnie ponownego fizycznego rozdzielenia procesorów komunikacyjnych systemów diagnostyki od systemu monitorowania i zabezpieczeń. Względny bezpieczeństwa każą uniknąć komunikacji cyfrowej od serwera nadrzędnego systemu diagnostyki bezpośrednio do systemu monitorowania i zabezpieczeń. Zgodnie z najnowszymi standardami bezpieczeństwa komunikacja od systemu monitorowania i zabezpieczeń do procesora komunikacyjnego jest realizowana jednokierunkowo, natomiast między wymienionym procesorem i serwerem diagnostyki dopuszcza się już komunikację dwukierunkową.

7. Uzależnienie między strategią UR a SN

Pokazane na rys. 9 komponenty systemu nadzoru mówią o tym, co może być stosowane, i stwarzają możliwość odpowiedzi na pytanie, co winno być stosowane na okoliczność projektowania systemu nadzoru jakiegoś agregatu. Natomiast podstawowym pytaniem stojącym przed projektantem systemu nadzoru jest: co z tej struktury winno być stosowane w przypadku określonego agregatu pracującego na jakiej instalacji?

Wciąż wśród wielu managerów pokutuje błędne przekonanie, że dostawca maszyny wie najlepiej, w jaki system nadzoru ST winna być ona wyposażona. Jest to przekonanie błędne, bowiem producent maszyny czy silnika realizuje produkcję na bazie jednostkowego zamówienia, w którym na ogół nie ma informacji o ważności agregatu dla procesu produkcyjnego oraz



Rys. 10. Zaawansowanie SN ST wymagane dla różnych strategii UR

planach inwestora odnośnie strategii UR, którą ten agregat będzie objęty. Natomiast identyczne agregaty (sprężarki, dmuchawy, wentylatory, pompy itp.) pracujące w różnych przedsiębiorstwach mogą posiadać zróżnicowaną ważność i w konsekwencji mogą wymagać zróżnicowanego systemu monitorowania ST. Jedynie stosowni managerowie po stronie inwestora mogą scharakteryzować system nadzoru, w jaki winna być wyposażona maszyna i/lub jej napęd.

Na rys. 10 pokazano uzależnienie między SN ST, a strategią UR wymaganą dla agregatu. 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 ST oraz zabezpieczenie maszyny przed rozległą awarią (np. w przypadku silników w wielu przypadkach wystarczające są szybkozmiennne zabezpieczenia elektryczne).

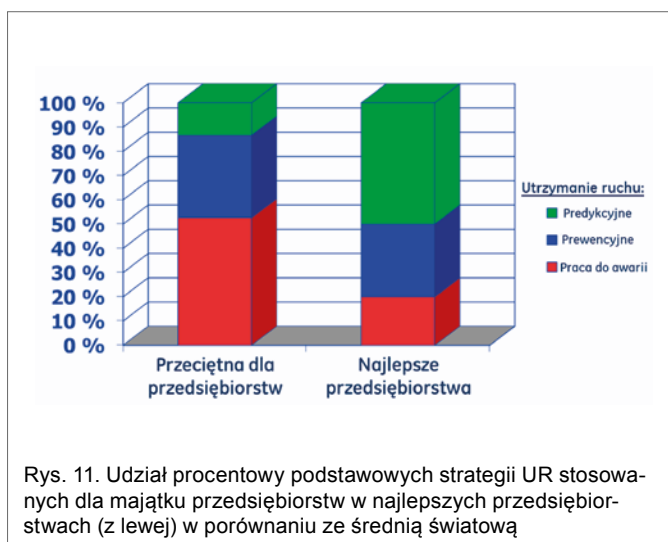
W przypadku strategii predykcyjnej, a więc w przypadku, w którym oczekujemy, że podstawą działań służb UR będzie dobra świadomość odstępstw od dobrego ST (tak w zakresie typu uszkodzenia, jak i jego zaawansowania), liczba stosowanych czujników winna być większa niż w przypadku strategii prewencyjnej.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

Jeśli dla określonego typu agregatu występują uszkodzenia, które charakteryzują się dobrze zdefiniowanymi symptomami, a zaawansowanie procesu uszkodzania jest dobrze sformalizowane z pomocą reguł ekspertowych, to można rozważyć rozszerzenie systemu diagnostyki o wspomaganie ekspertowe, które będzie przyczyniać się do przyspieszenia procesu generowania diagnozy i w konsekwencji zwiększenia poprawności decyzji operacyjnych.

W przypadku stosowania proaktywnego UR wspomaganie ekspertowe winno być bardziej rozbudowane, a także często systemy diagnozowania powinny być rozszerzone o systemy detekcji anomalii. Systemy detekcji anomalii pracują nie tylko na kierunku oceny ST majątku, ale także umożliwiają rozpoznawanie anomalii w procesie. Ta klasa systemów umożliwia najwcześniejsze rozpoznanie pogorszenia możliwości produkcyjnych w stosunku do wystąpienia uszkodzenia funkcjonalnego. Wcześniejsza świadomość problemu umożliwia lepsze

przygotowanie obsługi bądź też remontu, umożliwia zaplanowanie tych działań w optymalnym czasie, a także na ogół prowadzi do skrócenia czasu przerwy produkcyjnej wymuszonej działaniami służb UR.

Dobór strategii UR dla pojedynczego środka produkcji winien być realizowany w oparciu o wytyczne wewnątrzzakładowe i nie jest równoznaczny ze strategią UR dla przedsiębiorstwa. Na rys. 11 pokazano intensywność wykorzystania podstawowych strategii UR dla przedsiębiorstw wiodących w zakresie stosowania zaawansowanego UR (prawy słupek wykresu) na tle zaawansowania przeciętnego (lewy słupek). Wykres pokazuje, że w przypadku statystyki przeciętnej wciąż jeszcze dominującym podejściem do UR maszyn jest podejście reaktywne, bowiem nieco ponad 50% majątku jest objęte reaktywnym UR. Natomiast w przypadku przedsiębiorstw wiodących ~50% majątku jest włączone do predykcyjnego UR (co stanowi wynik ponad 3-krotnie lepszy od przeciętnego).



Rys. 11. Udział procentowy podstawowych strategii UR stosowanych dla majątku przedsiębiorstw w najlepszych przedsiębiorstwach (z lewej) w porównaniu ze średnią światową

8. Pomiary wykorzystywane w ocenie stanu technicznego SE

Zgodnie ze standardem [20] w celu oceny ST silników są wykorzystywane następujące parametry:

- temperatura;
- prąd;
- napięcie;
- opór;
- moc na wejściu;
- moc na wyjściu;
- hałas;
- drgania;
- techniki akustyczne;
- ciśnienie oleju;
- zużycie oleju;
- skład oleju (trybologia);
- moment;
- prędkość obrotowa.

W prostszych systemach monitorowania większość spośród ww. wielkości ocenianych jest w sposób statyczny (lepiej: quasi-statyczny). Natomiast coraz częściej systemy monitorowania ST wykorzystują także pomiary dynamiczne – podobnie jak to ma miejsce w przypadku drgań mechanicznych. I tak pomiary dynamiczne mogą być realizowane z powodzeniem dla oceny dynamicznych składowych prądu, napięcia, mocy, momentu obrotowego, a także prędkości obrotowej.

Dodatkowo w systemach monitorowania bywają także wykorzystywane:

- szczelina powietrzna;
- strumień magnetyczny w szczelinie (lub w otoczeniu silnika);
- położenie czopa w łożysku⁹;
- emisja akustyczna¹⁰.

Pomiary i systemy monitorowania wykorzystywane w nadzorze SE możemy podzielić ze względu na rodzaj wykorzystywanych sygnałów na dwie grupy, a mianowicie pomiary:

- mające na celu zabezpieczyć SE przed konsekwencjami procesów szybkozmiennych w postaci: zwarć (tak w obwodach silnika, jak i doprowadzenia zasilania), przeciążeń prądowych powodujących przekroczenie dopuszczalnych temperatur oraz zaników napięcia zasilającego; wymienione tu zabezpieczenia są ukierunkowane na procesy szybkozmiennych, w konsekwencji działają zero-jedynkowo i w związku z tym są niewystarczające do predykcyjnej oceny postępujących

w długim czasie zmian ST (typowe zabezpieczenia realizowane dla większych SE zostały wymienione w [21]);

- symptomatyczne dla zmian ST; współcześnie w tym celu wykorzystywane są następujące techniki [22, 23]:

- I. pomiary i analiza drgań;
- II. pomiary temperatury i termografia;
- III. analiza oleju i trybologia;
- IV. techniki ultradźwiękowe;
- V. analiza prądów i napięć silnika;
- VI. analiza strumienia magnetycznego (FLUX).

Spośród ww. technik każda może być wykorzystywana jako technika Off-Line'owa dla realizacji której są stosowane urządzenia przenośne. Natomiast techniki (I), (II) i coraz częściej również (V) oraz (VI) są wykorzystywane w systemach nadzoru On-Line.

W uzupełnieniu do ww., kontroli także podlegają parametry robocze specyficzne dla napędzanej przez SE maszyny (np. w przypadku wentylatora: ciśnienie medium i jego przepływ), a do systemu nadzoru włączane są wybrane pomiary procesowe mogące wpływać na wartości symptomów wykorzystywanych w ocenie ST agregatów.

W przypadku agregatów łożyskowanych ślizgowo standard [9] wskazuje na konieczność instalowania dodatkowego toru pomiarowego, który nie służy bezpośrednio monitorowaniu ST, a jest torem wspomagającym, umożliwiającym wykonanie pewnych dodatkowych pomiarów z pomocą wcześniej wymienionych czujników. Jest to tzw. znacznik fazy. Dla większości sygnałów dynamicznych w przypadku jego

- braku możliwe są jedynie pomiary drgań sumarycznych;
- stosowania można dodatkowo prowadzić monitorowanie wybranych składowych harmonicznych klasy NX, podharmonicznych, realizować pomiar S_{MAX}^{11} , NOT(1X) etc.

Znacznik fazy ma także kluczowe znaczenie dla SN, w których system monitorowania jest nadbudowany systemem diagnostyki (vide: rys. 9), bowiem warunkuje on realizację niektórych analiz funkcyjnych w stanach przejściowych pracy agregatu, jak np. widma kaskadowe, analizy wektorowe (BODE i/lub analizy biegunowe) itp.

Czujnik znacznika fazy winien być instalowany zawsze od strony napędu, tzn. na wale silnika. W przypadku agregatów wyposażonych w:

- przekładnie mechaniczne lub hydrauliczne także na wale wyjściowym przekładni;
- w przypadku napędów pasowych także na wale koła napędzanego.

Wyjątkiem są sprężarki (i silniki) tłokowe, dla których instalowany jest specjalizowany multiznacznik fazy bezpośrednio na wale korbowym sprężarki, a znacznik ten może pracować także na rzecz SE napędzającego sprężarkę. Instalacja multiznacznika ma na celu umożliwienie identyfikacji szczególnego położenia tłoków w poszczególnych cylindrach i wykonania pomiarów dla ich różnych, ale specyficznych i powtarzalnych położań¹². Takie pomiary mają podstawowe znaczenie dla diagnostyki ST sprężarek tłokowych.

Dla wirnikowych maszyn elektrycznych czujnik fazy jest także bezwzględnie wymagany dla realizacji pomiaru kształtu szczeliny powietrznej oraz strumienia magnetycznego w szczelinie.

W przypadku agregatów napędzanych SE o zmiennej prędkości obrotowej zalecane jest kontrolowanie rzeczywistej prędkości obrotowej wirników. W tym celu może być wykorzystywany ww. czujnik znacznika fazy pracujący dodatkowo jako czujnik tachometryczny¹³.

W przypadku niektórych agregatów przepływowych mogą się zdarzyć przepływy zwrotne i w konsekwencji mogą zostać zaobserwowane przeciwne obroty wirnika. Ze zjawiskami takimi możemy mieć miejsce:

- dla agregatu, który winien być w stanie spoczynku, natomiast ze względu na nieszczelność zaworów lub klap odcinających (np. dla agregatu pompowego) występują obroty wirnika przeciwne niż w warunkach pracy;
- w czasie przejściowych warunków pracy (zatrzymywanie agregatu sprężarkowego) znacznie większe ciśnienie medium po stronie tłoczenia może spowodować zaistnienie w instalacji przepływu zwrotnego i w konsekwencji wystąpienie przeciwnych obrotów wirnika.

Ww. zjawiska mogą:

- świadczyć o złym stanie technicznym zaworów/klap odcinających instalacji, z którą współpracuje agregat;
- niekorzystnie wpływać na żywotność pewnych typów uszczelnień stosowanych w węzłach maszynowych (niektóre materiały stosowane na uszczelnienia nie akceptują tarcia w kierunku przeciwnym niż ten, dla którego zostały zaprojektowane i wykonane);
- znacząco skracać żywotność silnika, bowiem jego uruchomienie w warunkach przeciwnych obrotów wirnika będzie przyczyniać się do wydłużenia czasu rozruchu oraz w konsekwencji do większego wyteżenia w czasie uruchamiania, (wyższe prądy i w konsekwencji temperatury prowadzące do osłabienia izolacji).

Dla agregatów, dla których wyżej zasygnalizowany problem może być ważny, stosuje się monitorowanie przeciwnych obrotów. W tym celu wymagane jest stosowanie podwójnego znacznika fazy, który oprócz opisanych typowych funkcjonalności znacznika fazy umożliwia dodatkowo śledzenie kolejności następstwa sygnałów z obu znaczników i na tej podstawie indykuje informację o kierunku obrotów wirnika.

9. Standardy oceny ST silników

W przypadku większych silników stosowane są zabezpieczenia elektryczne (i termiczne) uzwojeń silników, których

złożoność na ogół rośnie wraz z mocą nadzorowanych silników. Zabezpieczenia elektryczne działają zero-jedynkowo, a więc w sposób taki, który nie stwarza służbom UR możliwości obserwowania pogarszającego się ST. Taki nadzór jest wystarczający dla prewencyjnego utrzymania ruchu, nie umożliwia jednak śledzenia postępującej degradacji maszyny/napędu i w związku z tym nie spełniają warunków wymaganych dla systemów wspomagających predykcyjne utrzymanie ruchu.

Standardy do oceny ST SE koncentrują się na określeniu rodzaju czujników i miejscach ich podłączenia w zależności od rodzaju rozwiązania konstrukcyjnego węzłów łożyskowych [9] lub zorientowania osi wirnika. Niektóre z nich określają dopuszczalne poziomy drgań. Wartości dopuszczalne bywają uzależnione od prędkości obrotów wirnika SE i w przypadku agregatów poziomych także od położenia osi wirników powyżej konstrukcji wsporczej [24, 25]. Oprócz wymienionych standardów ISO dla maszyn elektrycznych można znaleźć wiele standardów siostrzanej organizacji zajmującej się standaryzacją, którą jest IEC¹⁴, oraz standardy krajowe, jak np. w Ameryce American National Standard Institute (np. ANSI 2372), na wyspach British Standards Institution (np. BS 4999-142), w Australii Australian Standards (np. AS 1359-114) czy standardy branżowe dedykowane określonemu typowi maszyn (np. API STANDARD 541).

Ww. standardy wspomagają UR przez określenie rodzaju pomiarów reprezentatywnych punktów pomiaru stanu technicznego (w zdecydowanej większości przypadków dla pomiarów drgań mechanicznych oraz temperatur) oraz często charakteryzują przedziały zmienności właściwe dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz ST napędu.

Standard [9] formułuje wymogi dla systemów monitorowania ST różnych agregatów, w tym tych, które są napędzane SE, i jest (lub: winien być) przywoływany przy okazji formułowania wymogów na okoliczność minimalnego skonfigurowania systemu monitorowania i zabezpieczenia stanu technicznego z punktu widzenia integralności mechanicznej. Jest on zorientowany na maszyny pracujące w szeroko rozumianym obszarze „Oil & Gas”, natomiast może i winien być także przywoływany w przypadku formułowania wytycznych monitorowania ST dla agregatów użytkowanych w innych branżach, a także dla wielu agregatów bezpośrednio w nim niewyspecyfikowanych (jak np. wentylatory, młyny itp.), bowiem bardzo dobrze określa sposoby nadzoru różnych węzłów konstrukcyjnych.

10. Systemy nadzoru On-Line stosowane do nadzoru ST silników

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 ST i w konsekwencji, po przekroczeniu zadanych wartości granicznych, generuje alarmy; alarmy te nie powodują automatycznego odstawienia agregatu, a są przekazywane jedynie do wiadomości operatorom oraz służbom UR; 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).

Systemy monitorowania i zabezpieczeń charakteryzują się różnymi właściwościami i w konsekwencji ich koszt bezpośredni oraz koszt implementacji dla jakiegoś agregatu (lub systemu produkcyjnego) mogą się istotnie różnić. Stąd dla realizacji procesu produkcyjnego w procesie podejmowania decyzji co do rodzaju systemu nadzoru wykorzystywanego na rzecz nadzoru celowe jest uwzględnienie oprócz ważności maszyny także jej wartość, bowiem koszt inwestycyjny często pozostaje w skorelowaniu z kosztami remontów.

W procesie podejmowania decyzji dotyczącej wymaganej funkcjonalności systemu monitorowania ST winny być brane pod uwagę następujące kwestie:

- I. Zróżnicowanie czujników, które można podłączyć do systemu monitorowania.
- II. Liczba czujników, które można podłączyć do pojedynczego systemu monitorowania.
- III. Sposób podłączenia czujników do systemu monitorowania (przewodowy lub bezprzewodowy, równoległy i/lub skaningowy).
- IV. Możliwość autodiagnostyki toru pomiarowego.
- V. Liczba i rodzaj pomiarów dostępnych dla pojedynczego sygnału dynamicznego.
- VI. Możliwość konfiguracji opóźnień czasowych alarmów dla poszczególnych pomiarów.
- VII. Możliwość sterowania ustawieniem progów alarmowych (kontrolowanych przez system sterowania maszyną) w specyficznych warunkach pracy maszyny.
- VIII. Potrzeba posiadania przez system monitorowania wyjść przekaźnikowych, a jeśli tak to funkcjonalność sposobu zorganizowania i konfigurowania tych wyjść.
- IX. Sposób interfejsowania z systemem DCS (analogowy/cyfrowy) – z redundancją lub bez niej.
- X. Sposób wizualizacji danych w systemach monitorowania i zabezpieczeń oraz możliwość włączenia systemu do dedykowanej mu stacji inżynierskiej.
- XI. Możliwość redundancji wybranych funkcji (np. zasilania, wyjścia przekaźnikowe, interfejsowanie cyfrowe etc.).
- XII. Sposób interfejsowania z systemem diagnostyki oraz liczba kaset systemów monitorowania ST, które mogą być podłączone do pojedynczego serwera systemu diagnostyki.

11. Systemy quasi On-Line stosowane do nadzoru ST silników

Jednym ze sposobów pracy systemów monitorowania jest praca w trybie skaningowym. Mówienie o systemach monitorowania klasy On-Line (czyli prowadzących nadzór w sposób ciągły) w jednej frazie z określeniem skaningowe – klóci się trochę ze sobą. W przypadku systemów monitorowania On-Line oczekujemy od nich, że sygnały ze wszystkich podłączonych do systemu czujników są przetwarzane równoległe (tzn. w tym samym czasie). W przypadku skaningowych systemów monitorowania On-Line mamy do czynienia z systemem monitorowania, który faktycznie pracuje w trybie On-Line, jednak podłączone do niego czujniki są odpytywane skaningowo (czyli kolejno i powtarzalnie). W konsekwencji informacje o stanie technicznym nadzorowanego w ten sposób majątku są dostarczane do operatorów krokowo, czyli co jakiś czas.

Taki sposób monitorowania stanu technicznego jest całkowicie wystarczający dla maszyn, dla których czasu degradacji podzespołów, w wyniku pojawienia się pewnego szczególnego uszkodzenia, jest znacząco dłuższy od kroku czasowego między kolejnymi pomiarami.

Przykładami poprawnych zastosowań skaningowych systemów monitorowania On-Line są systemy wdrożone dla nadzoru ST łożysk tocznych, uszczelnień pomp czy położenia tłoczyska sprężarki tłokowej. Dla każdego z przytoczonych przykładów czas destrukcji podzespołu jest znacząco dłuższy od czasu powtarzalności pętli skanowania.

Dla systemów skaningowych (niezależnie od faktu, czy jest to system skaningowy oparty na połączeniu z czujnikami realizowanymi drogą przewodową, czy też bezprzewodową) nie jest konieczne posiadanie wyjść przekaźnikowych. Jeśli skaningowy system On-Line posiada wystarczająco dobrą komunikację z DCS, to ten ostatni może wziąć na siebie zadanie dyskryminacji progowej i funkcjonalność zabezpieczenia włączonego do systemu majątku.

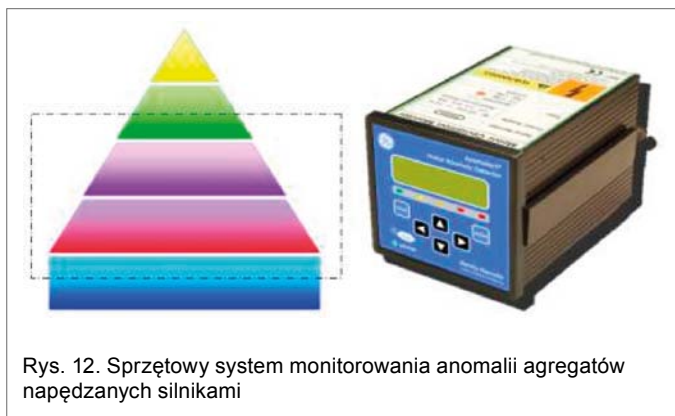
W ostatniej dekadzie pojawiła się nowa klasa systemów monitorowania, które pracują krokowo. Są to systemy monitorowania, które wykonują pewien powtarzający się cykl działań prowadzący się np. do: (a) akwizycja sygnałów, (b) zorientowane diagnostycznie przetwarzanie sygnałów, (c) porównywanie wyników przetwarzania z wcześniej utworzonymi wzorcami, (d) informowanie operatorów o wyniku oceny. Czas trwania takiego cyklu wynosi w praktyce od kilkunastu sekund do kilkunastu minut. Systemy te są dodatkowo wyposażone w mechanizmy umożliwiające generowanie wzorców odpowiadających dobremu (i złemu) stanowi technicznemu. Wzorce są generowane w początkowej fazie implementacji systemu (faza samouczenia). Systemy takie zwane są systemami rozpoznawania anomalii i mogą pracować bądź to w oparciu o rozwiązania sprzętowe, bądź też programowe.

Na sprzętowe systemy monitorowania anomalii [21] należy patrzeć jak na hybrydowe SN, bowiem na poziomie sprzętowym w pojedynczym urządzeniu mamy zintegrowane funkcjonalności systemu monitorowania, akwizycji danych diagnostycznych i formułowania oceny ekspertowej. W przypadku silników niskonapięciowych hybrydy te pracują także jako czujniki napięcia.

Z lewej strony rys. 12 zaznaczono linią przerywaną te komponenty współczesnego SN (opisane na rys. 9), które są zaimplementowane w pojedynczym systemie detekcji anomalii jak pokazany przykładowo z prawej strony rysunku.

Sprzętowe systemy monitorowania anomalii są dedykowane silnikom trójfazowym i wymagają podłączenia tak sygnałów napięcia, jak i prądów z trzech faz. Po zainstalowaniu potrzebują jakiegoś okresu czasu (zazwyczaj 1–2 tygodnie) na samokształcenie z wykorzystaniem zaimplementowanych algorytmów sztucznej inteligencji. Następnie, dokonując porównania danych bieżących z wygenerowanymi w fazie samouczenia wzorcami, formułują diagnostyczną ocenę ekspertową. Systemy te zarówno dokonują oceny w zakresie ST części elektrycznej silnika, jak również mogą realizować detekcję uszkodzeń mechanicznych (np. dla łożysk, sprzęgła, układu łopatkowego), ocenę poprawności zasilania silnika oraz sprawności jego działania, a także rozpoznawać wybrane anomalie procesowe.

Systemy monitorowania anomalii mogą być wykorzystywane do monitorowania ST agregatów, w stosunku do których nie są wymagane zabezpieczenia sprzętowe, a także mogą wspoma-



Rys. 12. Sprzętowy system monitorowania anomalii agregatów napędzanych silnikami

gać ocenę ST agregatów wyposażonych w tradycyjne systemy monitorowania i zabezpieczeń ST. Są one szczególnie przydatne dla oceny agregatów, w przypadku których brak jest łatwej możliwości zainstalowania tradycyjnych czujników drgań – co może mieć miejsce np. dla pomp pionowych, pomp pracujących w całkowitym zanurzeniu, pomp kriogenicznych etc.

Monitorowanie anomalii pracy agregatów napędzanych SE może być również realizowane w oparciu o rozwiązania programowe. W [26] opisano kilka przykładów detekcji anomalii przez system programowy Proficy SmartSignal.

Systemy detekcji anomalii nie są pokazane explicite na rys. 9, natomiast z punktu widzenia potrzeb służb UR są one najprostszą formą systemów diagnostyki. Systemy te nie precyzują bardzo dokładnie typu uszkodzenia, ale są najwcześniejszym wskaźnikiem nieprawidłowości stanu technicznego lub procesu.

12. Typowe błędy popełniane przy wdrażaniu SN dla silników

W przypadku wielu SN wykorzystywanych dla agregatów napędzanych SE 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 PdM jest stosowanie czujników drgań i położenia wałów. Takie rozwiązanie umożliwia nie tylko zabezpieczenie przed nadmiernymi drganiami, ale także nadzór prawidłowości luzów w łożyskowych ślizgowych.

B) Włączenie pomiarów temperatur łożysk do systemu DCS w przypadku, w którym jest stosowane monitorowanie drgań. Jest to rozwiązanie akceptowalne w przypadku zastosowania prewencyjnej strategii UR. Natomiast rozwiązaniem poprawnym i bezwzględnie obowiązującym w przypadku stosowania PdM jest podłączenie pomiarów temperatury oraz drgań i położenia do jednego i tego samego SN jak to opisano w [9].

C) Brak poprawności zainstalowania czujników temperatury w łożyskach ślizgowych lub w węzłach łożyskowych tocznych. 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 [9]. Niepo-

prawna lokalizacja czujników temperatury czyni te pomiary bezwartościowymi.

D) Brak poprawności w zakresie instalacji czujników temperatury dla łożysk długich [9]. Łożyska takie winny posiadać pomiary w dwóch płaszczyznach: z przodu i z tyłu łożyska.

E) Brak poprawności w zakresie podłączenia czujników temperatury uzwojeń do systemów monitorowania i zabezpieczeń. Termistory winny być bezwzględnie włączone do systemu zabezpieczeń elektrycznych i są wystarczające dla PM. W przypadku PdM winny być dodatkowo stosowane czujniki typu RTD podłączone do tego samego systemu, o którym mowa w „B”.

F) Brak ze strony użytkownika zadbania 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 PdM prowadzi do zmniejszenia nakładów na wdrożenie systemu diagnostyki oraz może się znacząco przyczynić do podniesienia efektywności jego działania.

G) Brak stosowania czujnika znacznika fazy w przypadku napędów zmiennobrotowych, wyposażonych w dowolnego typu czujniki drgań, a także stałoprędkościowych, wyposażonych w pomiary drgań wału.

Przypisy

1. W literaturze angielskiej strategia ta jest nazywana RTF = *Run-to-Failure* (czyli „pracuj do awarii”) lub RM = *Reactive Maintenance* (czyli „reakcyjne UR”).
2. TPM = *Total Productive Maintenance*, czyli Totalne UR zintegrowane z produkcją.
3. TPM oraz TQM są skrótami nazw strategii UR oraz kierowania przedsiębiorstwem (TPM = *Total Productive Maintenance*, TQM = *Total Quality Management*), które wychodzą poza tematykę artykułu i w związku z tym nie będą bardziej szczegółowo dyskutowane.
4. W rzeczywistości pomiary temperatury są wykorzystywane także w ww. systemach zabezpieczeń elektrycznych celem zabezpieczenia izolacji przed wystąpieniem zbyt wysokich temperatur. Na tę okoliczność wykorzystywane są termistory, które charakteryzują się silną nieliniowością działania. W konsekwencji działają one prawie zero-jedynkowo po przekroczeniu pewnej temperatury granicznej. Transmisyory są dedykowane nadzorowi temperatury w uzwojeniach i stanowią dodatkowe zabezpieczenie stojana w typowych systemach zabezpieczeń elektrycznych. W systemach wspomagania PdM jako podstawowe czujniki pomiaru temperatury są wykorzystywane czujniki typu RTD lub TC, które umożliwiają obsłudze śledzenie zmian temperaturowych wynikających ze zmian ST. W przypadku niektórych większych silników instaluje się w uzwojeniach zarówno termistory, jak i czujniki RTD – te pierwsze w celu zabezpieczeń, a te drugie w celu umożliwienia bieżącej oceny zmiany ST.
5. Systemy ekspertowe wspomagające ocenę ST realizowaną na bazie danych gromadzonych z pomocą przenośnych zbieraczy (tzn. Off-Line) były wdrożone już w latach 80. 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 popelnienie błędu. Agregaty takie są produkowane masowo, co w konsekwencji stwarza możliwość skutecznego wspomaganie się metodami statystycznymi tak na okoliczność oceny zawodności, jak i przy wypracowywaniu diagnozy.
6. Te 3 warstwy stanowiły natenczas strukturę kompletną, bowiem dodanie warstwy 4. nastąpiło na świecie około roku 1993.
 7. PAM = *Plant Asset Management* oznacza zarządzanie majątkiem przedsiębiorstwa. W kolejnych latach pojęcie to zostało rozwinięte do EAM = *Enterprise Asset Management*, które jest dedykowane przedsiębiorstwom wielozakładowym.
 8. TMR = *Triple Modular Redundant* jest terminem oznaczającym systemy redundantne charakteryzujące się potrójnymi modułami na rzecz każdego wykonywanego pomiaru.
 9. Pomiar ten jest wykonywany standardowo z pomocą czujników drgań wału i wykorzystywany przede wszystkim w przypadku maszyn łożyskowych ślizgowo. Natomiast ta sama technika może czasami okazać się bardzo użyteczna na okoliczność detekcji zużycia łożyska (łożysk) w przypadku maszyn wolnoobrotowych łożyskowych tocznie.
 10. Ta technika bywa stosowana do oceny stanu technicznego silników wolnoobrotowych.
 11. 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.
 12. Niektóre firmy oferujące systemy nadzoru sprzężarek tłokowych bazują w swoich rozwiązaniach na tradycyjnym, tzn. pojedynczym znaczniku fazy. Takie rozwiązanie jest wystarczające w przypadku maszyn tłokowych, na których nie występują drgania skrętne. Jeśli jednak takie drgania występują (a ze względu na specyfikę działania maszyny występują praktycznie w każdym przypadku), to obniżają skuteczność diagnostyki.
 13. Ze względu na brak koordynacji między projektantem układów automatyki i projektantem SN ST na agregatach, których prędkość robocza jest sterowana falownikami, można spotkać tory pomiarowe zarówno znacznika fazy, jak i pomiarów tachometrycznych. W zdecydowanej większości przypadków można by zrezygnować z instalacji toru tachometrycznego, bowiem tor pomiaru znacznika fazy może pracować równolegle jako tor pomiarów tachometrycznych, zapewniając wystarczającą dokładnością i szybkością pomiaru, a system monitorowania ST może bez problemu przekazywać do systemu automatyki informację o bieżącej prędkości obrotowej wirnika SE.
 14. IEC = *International Electrotechnical Commission* specjalizuje się w standardach adresowanych dla maszyn elektrycznych.

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] REPORT I.C.: *Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations*. Part I and Part II, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 21, pp. 853–872, 1985.
- [3] ALBRECHT P.F., APPIARIUS J.C., SHARMA D.K.: *Assesment of the reliability of motors in utility applications – Updated*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 1, pp. 29–46, 1986.
- [4] Electric Motor Manual: Application, Installation, Maintenance, Troubleshoot Ing.; editor Lawrie E., 1987.

- [5] Development in Motor Protection – White Paper, Bulletin No. 9065PD9501, JAN 1996, SQUARE D, Raleigh, NC USA.
- [6] RICK FINK R.: *AWWA Motor Fundamentals Class 2012*. Prezentacja Toshiba International Corporation.
- [7] NAM-HUN KIM, WON-SIK BAIK, MIN-HUEI KIM, CHANG-HO CHOI: *Rotor Fault Detection System for the Inverter Driven Induction Motor using Current Signals*. „Journal of Power Electronics”, Vol. 9, No. 2, March 2009.
- [8] Materiały wewnętrzne BENTLY NEVADA dotyczące uszkodzeń silników elektrycznych, Minden 2011.
- [9] API STD 670, Machinery Protection Systems, 4th edition, DEC 2000.
- [10] NOWICKI R.: *Współczesne kierunki rozwoju stacjonarnych systemów wspomaganie oceny stanu technicznego majątku produkcyjnego*. Materiały 41 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Toruń 23–25 października 2012, s. 253–257.
- [11] PENROSE H.W.: *Test methods for determining the impact of motor condition on motor efficiency and reliability*. Ph.D. dissertation, ALLTEST Pro, LLC, Old Saybrook, CT.
- [12] Predictive Maintenance – Overview, FLUKE, www.fluke.com/pdf.
- [13] LEGUTKO S.: *Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn*, „Eksplotacja i Niezawodność” 2/2009.
- [14] KULIK A.: *Zarządzanie i funkcje predykcyjnego utrzymania ruchu (PdM) w ogólnej strategii UR*. Seminarium nt. Mechaniki i Utrzymanie Ruchu, Poznań 2013.
- [15] HILLS PETER W.: *Condition Monitoring Keeps Conveyors Conveying*, IMHC, JUL 2013.
- [16] RATHBONE T.C.: *Vibration Tolerances*. „Power Plant Engineering” 43/1939.
- [17] 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.
- [18] COOLEY J.W., TUKEY J.W.: *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*. Math. Comput. 19, p. 297–301 (1965).
- [19] API STD 617 Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services, API, 17th edition, JUL 2002.
- [20] Condition monitoring and diagnostics of machines – General guideline, ISO 17359, edition 2011.
- [21] NOWICKI R.: *Zróżnicowanie systemów On-Line nadzoru stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi*. „Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe” 89/2011, s. 65–73.
- [22] DUNN S.: *Condition Monitoring in the 21st Century*. The Plant Maintenance Resource Center, AUG 2009.
- [23] FINLEY W.R., HODOWANEC M.M., HOLTER W.G.: *An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems*, IEEE Paper No. PCIC-99-20.
- [24] ISO 10816: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
- [25] ISO 7919: Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria.
- [26] NOWICKI R., BATE M.: *Inteligentne podejście w rozpoznawaniu anomalii pracy maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Zeszyty Problemowe: Maszyny Elektryczne” 2/2013, s. 241–246.

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