

Sprzętowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi

James Song, Ryszard Nowicki, Ahmet Duyar

SKRÓTY:

- SD – System Diagnostyki
 SDA – System Detekcji Anomalii
 SE – Silnik Elektryczny
 (lub Silniki Elektryczne)
 SN – System Nadzoru
 ST – Stan Techniczny
 UR – Utrzymanie Ruchu
 ZW – Zespół Walcowniczy

1. Wprowadzenie

W [1] opisano stosowane współcześnie formy nadzoru stanu technicznego (=ST) silników elektrycznych (=SE). Jedną z metod wspomagających utrzymanie ruchu (=UR) jest wykorzystywanie systemów detekcji anomalii (=SDA). Rozpoznawanie anomalii jest możliwe z pomocą metod programowych [2] oraz sprzętowych [3]. W niniejszym artykule opisano podejście sprzętowe oraz pokazano kilka przykładów działania wdrożonych systemów.

2. Oddziaływania dynamiczne

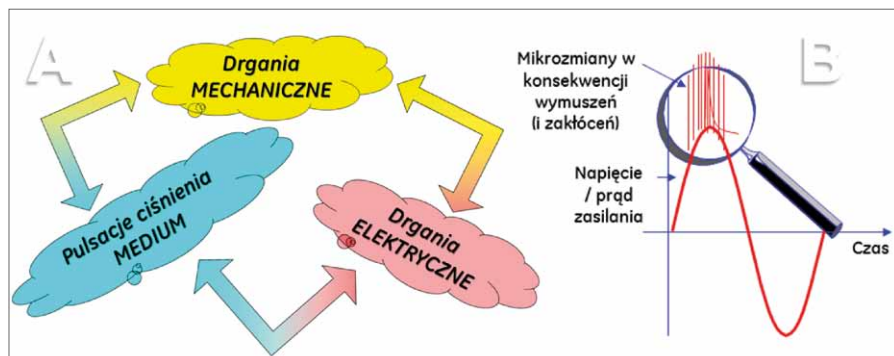
Oddziaływania dynamiczne obserwowane w różnych agregatach napędzanych SE mogą być generowane przez:

- procesy elektryczne (np. składowa drgań odpowiadająca podwójnej

częstotliwości sieciowej, w silnikach asynchronicznych drgania będące konsekwencją poślizgu, drgania z tzw. częstotliwością żłobkową);

- procesy mechaniczne (np. składowa drgań odpowiadająca częstotliwości obrotów wirnika zależna od stopnia i rodzaju jego niewyważenia, w przypadku wirników łożyskowanych tocznie składowe drgań odpowiadające tzw. częstotliwościom łożyskowym, w przypadku agregatów posiadających przekładnie zębate drgania odpowiadające tzw. częstotliwościom ząbienia);
- przepływy (np. drgania odpowiadające pulsacjom medium wymuszonym przez układ łopatkowy).

Ww. procesy mogą na siebie nawzajem oddziaływać (vide rys. 1 a). Cechują się one mocą szczytkową w porównaniu do mocy potrzebnej do pracy agregatu, natomiast wraz z postępującym procesem destrukcji ich intensywność wzrasta. Konsekwencją tych wymuszeń są mikrozmiany w chwilowym zapotrzebowaniu prądowym. Obserwując te zmiany, możemy dokonać oceny ST agregatu, bowiem procesy szczytkowe typowe dla dobrego ST jakiegos agregatu różnią się od procesów szczytkowych odpowiadających stanowi złemu.



Rys. 1. Oddziaływania wzajemne między trzema rodzajami dynamicznych procesów szczytkowych w maszynie (A) oraz mikrozmiany w zasilaniu, będące konsekwencją tych procesów (B)

Streszczenie: W dokumencie przedstawiono unikalną technologię umożliwiającą bardzo wczesne ostrzeżenie o rozwijającym się uszkodzeniu maszyn i/lub urządzeń. Sprzętowa detekcja anomalii jest wykorzystywana celem zwiększenia zdolności produkcyjnych, a także sprawności energetycznej poprzez zapobieganie niespodziewanym przestojom. Prezentowane podejście wykorzystuje mechanizm detekcji uszkodzeń oparty na modelowaniu z wykorzystaniem technik analizy widmowej. Jako przykład zaprezentowano wybrane wyniki uzyskane w czasie wdrożenia w hucie.

Słowa kluczowe: silniki elektryczne, rozpoznawanie anomalii, modelowanie uszkodzeń, sprawność, huta, diagnostyka,

🇬🇧 A HARDWARE SOLUTION FOR FUNCTIONAL ANOMALY RECOGNITION OF AGGREGATES DRIVEN BY ELECTRIC MOTORS

Abstract: This paper presents a unique technology for early warning of pending failures of industrial equipment. The technology is used to increase productivity and energy efficiency by preventing unexpected downtime and faulty operation of equipment. The technology uses model based fault detection and diagnosis approach using system identification and spectral analysis techniques. As an example chosen results of an implementation for iron and steel industry are presented.

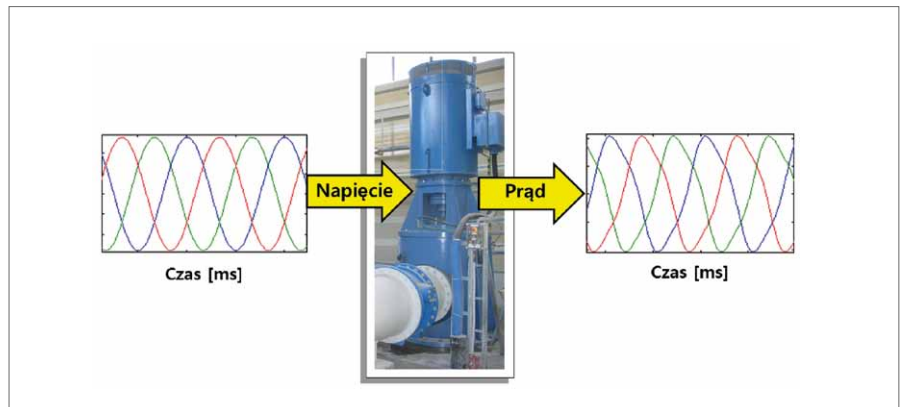
Keywords: electric motors, detection of anomalies, malfunction modeling, efficiency, steel mill, diagnostics,

U podstaw opisywanej techniki sprzętowej detekcji anomalii leżą zaawansowane algorytmy wnioskowania diagnostycznego, opracowane w ramach kontraktu dla NASA [4, 5, 6, 7], które podlegają ochronie patentowej. Agregat napędzany SE, tak jak to pokazano na rys. 2 (na przykładzie pionowego agregatu pompowego), może być traktowany z punktu widzenia długiego czasu eksploatacyjnego jako „czarna skrzynka” posiadająca swoją funkcję przejścia: w funkcji czasu dynamicznego napięcie jest transferowane w prąd, a wynik tej transformacji zależy od właściwości elektrycznych napędu, właściwości mechanicznych agregatu (+ jego powiązania z otoczeniem poprzez konstrukcję wsporczą oraz instalację), a także od właściwości procesu. Przejście od modelu fizycznego, poprzez model matematyczny do rozwiązania sprzętowego stosowanego w praktyce wymagało wielu lat wysiłku, który m.in. był spowodowany koniecznością przebadania kilku milionów SE celem zapewnienia dokładności i powtarzalności diagnostycznej oceny ich ST.

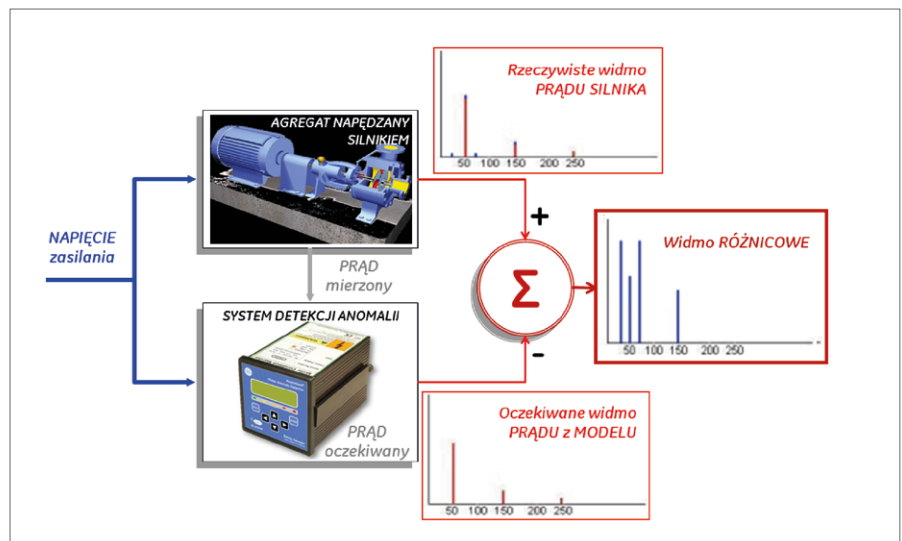
Sposób pozyskiwania danych oraz ich przetwarzania przez sprzętowy układ detekcji anomalii pokazany został na rys. 3. Do systemu podłączone są napięcie zasilania oraz sygnał odpowiadający prądowi pobieranemu przez silnik. Jeśli silnik jest 3-fazowy, to sygnały te winny być podłączone dla każdej fazy niezależnie.

Wykorzystywane rozwiązanie sprzętowe [3, 8] buduje samodzielnie model matematyczny monitorowanego agregatu, a źródło danych pierwotnych stanowią ww. napięcia i prądy. Wygenerowany model matematyczny jest podstawą do porównywania wyników uzyskanych z danych rzeczywistych. Na rys. 3 pokazano analizę widmową prądu pobieranego przez silnik oraz analizę widmową prądu wynikającą z modelu. Jeśli silnik (lepiej: agregat, tzn. silnik wraz z napędzaną przez niego maszyną) znajduje się w dobrym ST, to obydwie wymienione widma winny być bardzo podobne do siebie, a zatem widmo różnicowe, uzyskane w wyniku ich odejmowania, winno charakteryzować się bardzo małą dynamiką wszystkich składowych.

Jeśli natomiast, w wyniku pogarszania się ST, nastąpią dewiacje w poborze prądu (spowodowane przez procesy szcząt-



Rys. 2. Agregat napędzany SE traktowany jako czarna skrzynka z funkcją przejścia



Rys. 3. Sygnały pierwotne i sposób ich przetwarzania

kowe, będące skutkiem degradacji stanu) i pojawiają się bardziej znaczące składowe drgań elektrycznych oraz składowe nietypowe, a następnie będzie obserwowane postępujące w czasie zwiększanie się dynamiki tych składowych, to możliwe jest wyciągnięcie bezpośredniej konkluzji o wystąpieniu anomalii ST.

Oczywiście dewiacje mogą dotyczyć nie tylko ST, ale także zasilania silnika. Z tego względu niezbędne jest kontrolowanie napięcia zasilania. Pomiarzy charakteryzujące zasilanie umożliwiają SDA informowanie co do jego prawidłowości. W przypadku wystąpienia anomalii zasilania (np. błąd fazy, niezrównoważenie napięciowe) system informuje o zaistniałej anomalii. Informacja ta jest ważna dla służb UR, bowiem anomalie zasilania mogą wpływać na pracę agregatu oraz na jego sprawność termodynamiczną, a także mogą przyczyniać się do przyspieszonej destrukcji podzespołów.

Ww. model matematyczny w jakiejś części jest zaimplementowany w monitorze detekcji anomalii (np. sposób przetwarzania sygnałów, pasmo analizy widmowe, oraz jej rozdzielczość, sposób różnicowania warunków pracy agregatu, sposób generowania widm granicznych, wpływ uszkodzeń mechanicznych na charakterystyki elektryczne, wpływ uszkodzeń elektrycznych na charakterystyki elektryczne), natomiast w jakiejś części podlega tworzeniu i kalibracji bezpośrednio po zainstalowaniu monitora (np. rozpoznawanie zróżnicowania obciążenia agregatu, rozpoznawanie zróżnicowania obrotów agregatu, widmo graniczne alertowe i alarmowe).

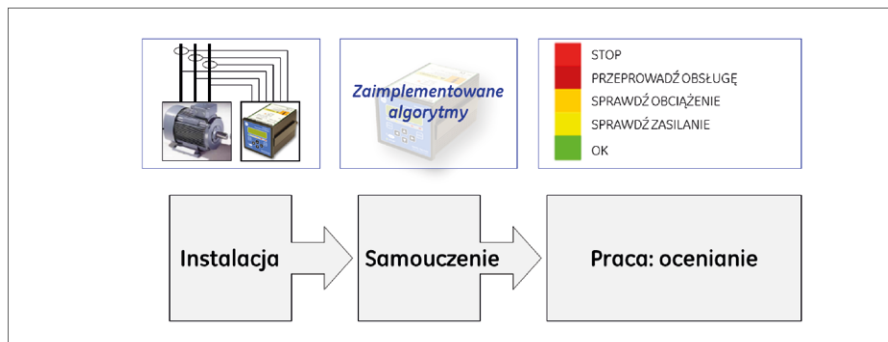
Na rys. 4 pokazano trzy fazy postępowania typowe dla implementacji sprzętowego SDA. Pierwsza to proces instalacji monitora. Druga zaczyna się po zainstalowaniu monitora, kiedy to automatycznie inicjuje się proces samoczenia

i następuje tworzenie referencyjnego modelu matematycznego. Ten model referencyjny uwzględnia wiele charakterystyk elektrycznych oraz mechanicznych tak w odniesieniu do silnika, jak i do napędzanej przez niego maszyny.

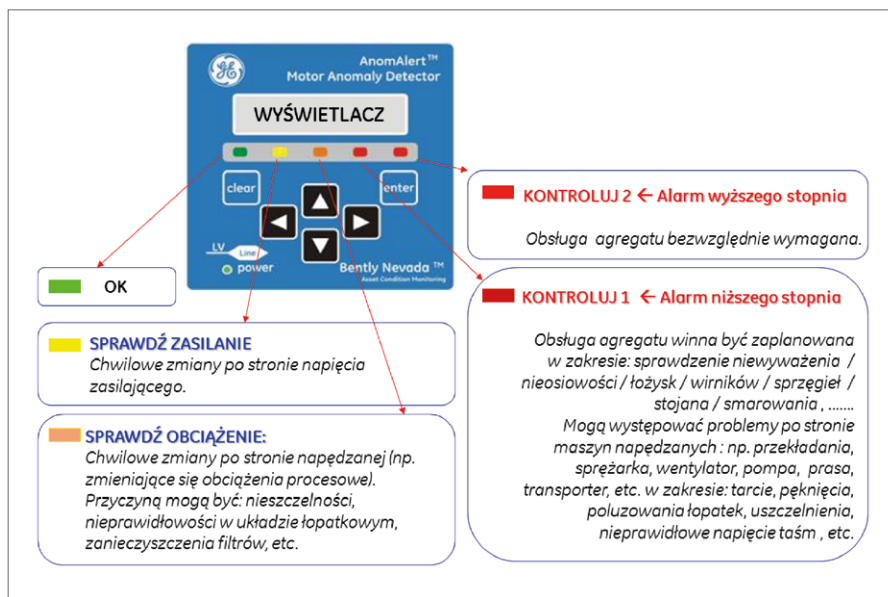
Po zakończeniu procesu samouczenia (tzn. po wypracowaniu modelu referencyjnego) monitor przechodzi w tryb pracy (faza trzecia) jako urządzenie przygotowane do rozpoznawania anomalii. W trybie pracy budowany jest z krokiem 90-sekundowym bieżący model nadzorowanego systemu. Model ten jest porównywany z modelem referencyjnym z uwzględnieniem metod statystycznych. W przypadku rozpoznania znaczącego zróżnicowania między ww. modelami następuje identyfikacja hipotetycznych uszkodzeń odpowiedzialnych za zmiany. W tym celu wykorzystywane są zarówno bezpośrednie pomiary sygnałów, jak i ich analiza widmowa, tak jak to zostało pokazane na rys. 3.

W dalszej części artykułu zaprezentowano szereg przykładów wykorzystania sprzętowego SDA. Przykłady te dotyczą zastosowania systemu AnomAlert [3, 8]. Dla tego systemu proces samouczenia zajmuje ~10 dni. Początkowe 3 dni są zasadniczą fazą samouczenia, podczas której następuje wypracowanie pierwotnego modelu referencyjnego. Kolejny tydzień jest poświęcony na proces douczania. W ciągu tego tygodnia następuje sprawdzanie, jak dalece model bieżący przystaje do bądź odstaje od pierwotnego modelu referencyjnego i w przypadku stwierdzenia takich odstępstw następuje jego korekta. Po upływie dekady AnomAlert dysponuje na ogół modelem referencyjnym na wystarczająco wysokim poziomie wiarygodności, tak aby nie generować fałszywych alarmów.

W następstwie przeprowadzonych analiz możliwe jest dokonywanie oceny stopnia zagrożenia, tak jak pokazano w prawej górnej części rys. 4, system formułuje sugestie co do rodzaju działań, które winny być przedsięwzięte przez służby UR. W przypadku aplikacji jednostkowej komunikacja z użytkownikiem ma miejsce przy pomocy znajdującego się na płycie czołowej wyświetlacza oraz diod wskazujących na rodzaj i poziom zagrożenia. Rodzaj alarmów generowanych z pomocą diod został opisany na rys. 5. Są to alarmy na



Rys. 4. Fazy wdrażania SDA



Rys. 5. Interpretacja rodzaju rozpoznanej anomalii z pomocą diod

okoliczność anomalii po stronie zasilania silnika, po stronie obciążeń procesowych maszyny roboczej oraz dwa alarmy „czerwone”. Alarm pierwszy (niższy) sugeruje konieczność zaplanowania przeglądu (i obsługi) agregatu ze względu na stwierdzoną i rozwijającą się anomalię ST. Alarm drugi (wyższy) jest wynikiem stwierdzenia zaawansowanej anomalii w porównaniu z wypracowanym wcześniej modelem referencyjnym. Sugeruje on natychmiastowe zatrzymanie agregatu oraz przeprowadzenie jego naprawy. Odstępstwo od normalnego ST może dotyczyć tak problemów natury elektrycznej (np. uszkodzenia izolacji, zniszczenie prętów wirnika), jak i mechanicznej (np. uszkodzenie łożysk, niewyważenie wirnika, nieosiowość, uszkodzenie sprzęgła, zmiany w konstrukcji wsporczej).

Ocenie podlegają łącznie 22 parametry modelu, które reprezentują nie tylko

uszkodzenia elektryczne i mechaniczne, ale także anomalie procesowe (prowadzące do zmiany obciążenia) oraz odstępstwa od poprawnego zasilania silnika. Na rys. 5 zaznaczono również wyświetlacz (zlokalizowany powyżej diod sygnalizujących stan OK lub rodzaj anomalii), który stwarza możliwość zapoznania się z wszystkimi parametrami modelu. Na rys. 6 pokazano przykładowe dane pomiarowe oraz opisowe dostępne z pomocą wyświetlacza.

Zastosowane podejście jest z jednej strony wystarczająco wrażliwe, aby rozpoznać uszkodzenia już w początkowej fazie ich rozwoju, natomiast z drugiej, ze względu na stosunkowo dużą liczbę parametrów modelu, jest także odporne na generowanie fałszywych alarmów (jeśli proces samokształcenia był zrealizowany wystarczająco poprawnie).

W przypadku zaimplementowania SDA dla większej liczby agregatów ist-

nieje możliwość włączenia monitorów (podobnie jak to ma miejsce w systemach monitorowania i zabezpieczenia ST bazujących na pomiarach temperatur, położenia i drgań) do zakładowego systemu wspomagania utrzymania ruchu.

Jeśli w przedsiębiorstwie jest wykorzystywany system diagnostyki (=SD) wspomagający UR (np. SYSTEM 1, tak jak to pokazano dla kilku przykładów w [9]), to wszystkie monitory AnomAlert mogą być podłączone do tego SD. Jeśli takiego systemu nie ma, to monitory anomalii mogą być włączone w sieć DCS-u. Posiadając monitory anomalii podłączone do systemu skomputeryzowanego, dysponuje się łatwym (i zbiorczym) dostępem do wszystkich danych dostępnych z wyświetlacza, a pokazanych na rys. 6.

W kolejnych dwóch częściach zostaną opisane przykłady zastosowania SDA AnomAlert jako rozwiązania On-Line oraz pokazane możliwości zastosowania do pomiarów doraźnych (Ad-Hoc).

3. Przykłady detekcji anomalii On-Line w hucie

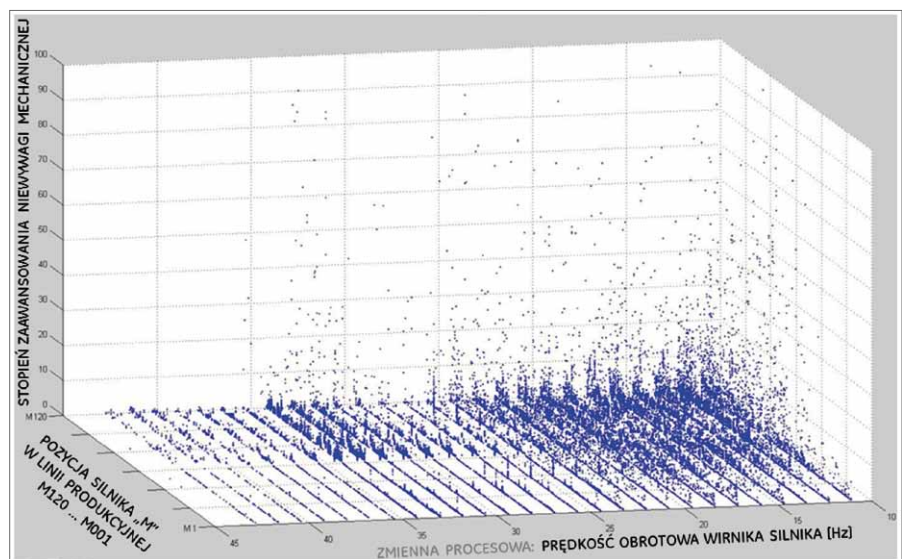
Monitorowanie anomalii On-Line jest rozwiązaniem preferowanym dla ważniejszych agregatów napędzanych SE. Praca napędów elektrycznych w hucie ma na ogół miejsce w ciężkich, sprzyjających korozji warunkach, a to ze względu na częste ich usytuowanie w polu podwyższonych temperatur i w znacznym zawilgoceniu. Warunki te powodują przyspieszone zużycie szczotek (w konsekwencji pogorszenie komutacji) oraz przyspieszone uszkodzanie uzwojeń silników. W warunkach huty omawiana forma monitorowania umożliwia nie tylko rozpoznawanie integralności mechanicznej majątku, ale także ocenę sprawności jego działania. Trzy przykłady wykorzystania SDA [12] w reżimie On-Line zaprezentowano poniżej.

Monitorowanie zespołów walcowniczych (=ZW)

Awaria ZW może istotnie wpływać na wynik ekonomiczny huty. Szacuje się, że w zakładzie, w którym prowadzono badania, straty będące konsekwencją godzinowego przestoju linii technologicznej wynoszą średnio ~60 k\$. ZW pracują nie tylko w podwyższonych temperaturach,

Część agregatu - Praca - Status niesprawności - Diagnostyka		Pomiary elektryczne		
Stan	Nazwa	Stan	Nazwa	Wartość
OK	Luzy komponentów / Fundament	OK	Współczynnik mocy	0,97
OK	Niewyważenie/Nieosiowość: sprzęgło/łożysko	OK	Moc aktywna [kW]	448
OK	Pasy/Transmisja/Maszyna napędzana	OK	Moc pasywna [kW]	121
SPRAWDŹ !	Łożyska	OK	Vrms [V]	6022
OK	Wirnik	OK	Irms [A]	43
OK	Poluzowane uzwojenia/Stojan/Zwarcia	OK	V - niewyważenie [%]	0,40
OK	Wewnętrzne uszkodzenie elektryczne	Obserwuj	I - niewyważenie [%]	3,3
OK	Zewnętrzne uszkodzenie elektryczne	OK	Częstotliwość [Hz]	50
OK	Inne	OK	THD [%]	2,4
OK	Status zasilania	OK	3-harmoniczna [%]	0,90
OK	Status obciążenia	OK	5-harmoniczna [%]	2,00
SPRAWDZ- NIE #1	Elektryczne (vide: PRAWA KOLUMNĄ) i/lub mechaniczne (j.w.: łożyska) uszkodzenia znajdują się w fazie rozwoju. Obsługa winna być zaplanowana w ciągu ~3 miesięcy.	OK	7-harmoniczna [%]	0,21
		OK	9-harmoniczna [%]	0,08
		OK	11-harmoniczna [%]	0,06
		OK	13-harmoniczna [%]	0,06
		Obserwuj pomiary elektryczne	Niektóre pomiary elektryczne znajdują się poza wartościami oczekiwanymi. Ich zmiana winna być obserwowana, a przyczyna anomalii winna być rozpoznana.	

Rys. 6. Przykładowe charakterystyki stanu technicznego



Rys. 7. Wynik oceny niewyważenia mechanicznego maszyn dużego ciągu technologicznego

ale także w warunkach silnie zmieniającego się obciążenia napędów.

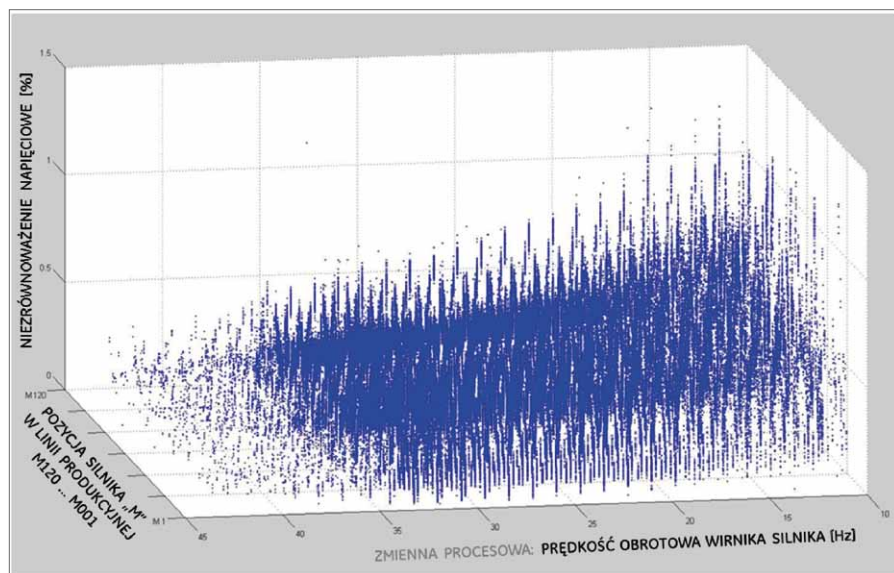
Dla monitorowania ZW zastosowano monitorowanie anomalii On-Line dla 120 napędów. W wyniku pierwszego oszacowania ST (po wyposażeniu linii produkcyjnej w systemy AnomAlert) rozpoznano:

- 106 napędów pracujących zgodnie z oczekiwaniami;
- 3 napędy wymagające naprawy w ciągu 3 miesięcy (uszkodzenia stojana);
- 7 urządzeń, które winny być obserwowane ze zwiększoną uwagą z powodu luzów w konstrukcji wsporczej oraz 4 z powodu niewyważenia.

W ogólności ST w zakresie „integralności mechanicznej” wszystkich ZW wraz z napędzającymi je silnikami (których prędkość jest sterowana) został uznany jako dobry. Na rys. 7 pokazano

no – w postaci charakterystyki 3D – ocenę niewyważenia mechanicznego wszystkich ZW.

Zaawansowanie niewyważenia mechanicznego ZW jest scharakteryzowane jako liczba odchylenia standardowego stanu rzeczywistego w stosunku do stanu modelowego uznanego jako dobry i jest przedstawione w funkcji numeru napędu (od M001 do M120, gdzie liczba odpowiada jego położeniu w ciągu technologicznym) oraz zmieniającej się prędkości obrotowej (w przedziale od ~10 do ~45 Hz dla wybranych 27 wartości dyskretnych z krokiem ~1,2 Hz). Z wykresu można sformułować ogólny wniosek, że podzespoły linii technologicznej opisane wyższym numerem prezentują większe zaawansowanie niewyważenia mechanicznego. Sytuacja taka może być spowodowana rozwiązaniem konstrukcyjnym



Rys. 8. Wynik oceny niezrównoważenia elektrycznego napędów ciągu technologicznego

linii produkcyjnej (zmieniające się właściwości strukturalne wraz ze wzrostem pozycji „M”).

W kolejnym kroku dokonano analizy niezrównoważenia elektrycznego w podobnym do wykorzystywanego układu współrzędnych. Wynik tej analizy pokazano na rys. 8.

Współrzędne płaszczyzny poziomej są identyczne jak w przypadku poprzedniej analizy 3D, natomiast współrzędna pionowa opisuje tutaj niezrównoważenie napięciowe w [%]. Analiza pokazuje, że wraz ze zmniejszaniem prędkości obrotowej napędów wzrasta ich niezrównoważenie napięciowe. Dla analizowanego zbioru w zdecydowanej większości nie przekracza ono zalecanego (ze względu na sprawność działania) 1% i jedynie w przypadku najniższych prędkości obrotowych nieliczne silniki prezentują wyższe niezrównoważenie, które jednak w żadnym przypadku nie przekracza 1,3%. Jak wiadomo, niezrównoważenie napięciowe wpływa znacząco na wartość niezrównoważenia prądowego, które osiąga wartości 6–10 razy większe od napięciowego [11]. Zwiększenie niezrównoważenia prądowego prowadzi do:

- pulsacji momentu;
- wzrostu poziomu drgań i w konsekwencji do
- przyspieszonej kumulacji naprężeń mechanicznych;
- zróżnicowania pola temperatur silnika, a wzrost temperatury przyczynia się do
- skrócenia żywotności izolacji.

Wszystkie te przyczyny razem wzięte prowadzą do zmniejszenia sprawności działania silnika. Statystycznie można przyjąć, że brak zrównoważenia napięciowego wynoszący 2,5% powoduje obniżenie sprawności o 1,5%.

Przedstawione wyniki były podstawą wydania rekomendacji, mającej na celu selekcję silników pod kątem poprawności niezrównoważenia napięciowego w funkcji prędkości roboczej. Selekcja taka umożliwiła zwiększenie sprawności działania całego systemu produkcyjnego.

Niesprawność instalacji wyciągowej

Kolejny przykład dotyczy pracy instalacji wyciągowej na linii zimnego walcowania. Wentylator pokazany na rys. 9 poprzez zespół filtrów usuwa do otoczenia zanieczyszczone powietrze z hali produkcyjnej.

Wentylator został objęty monitorowaniem anomalii. Po kilku miesiącach od zainstalowania system monitorowania wygenerował alarm (~15.IV.2009: „SPRAWDŹ OBCIĄŻENIE”). Kontrola historycznych danych poboru prądu przez silnik wentylatora pokazała, że w stosunku do okresu sprzed grudnia roku poprzedzającego (kiedy to trend poboru prądu był w przybliżeniu poziomy), w przedziale czasu XII.2008 – IV.2009 widoczny jest wyraźny jego trend spadkowy. Gradient trendu spadkowego utrzymał się przez kolejny miesiąc (vide: rys. 10), po czym ustabilizował się na po-



Rys. 9. Wentylator instalacji wymiany powietrza w hali

ziomie nieco powyżej 70% poboru prądu nominalnego.

Wyżej opisana zmiana była spowodowana przez pogłębiającą się niedrożność filtra powietrza.

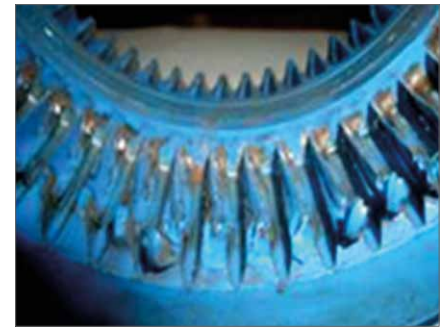
Wydział UR nie zdecydował się na wymianę filtra, a podjął jedynie próbę (25. IV) jego oczyszczenia z pomocą sprężonego powietrza. Działanie to minimalnie poprawiło efektywność pracy instalacji, o czym świadczy fakt nieznacznego wzrostu poboru prądu przez silnik (co można interpretować jako nieznaczne zwiększenie objętości przepychanego powietrza). Po ~4 tygodniach alarm „SPRAWDŹ OBCIĄŻENIE” został wygenerowany ponownie. 20.VIII. 2009 roku dokonano wymiany filtra na nowy, co spowodowało skokowy wzrost poboru prądu (do poziomu oczekiwanego), a SDA zaprzestał alarmowania.

Na podstawie powyższych analiz można domniemywać, że w ciągu około pół roku wymiana powietrza nie odpowiadała założeniom projektowym walcowni, natomiast dzięki zastosowanemu systemowi monitorowania – problem został rozpoznany, a efektywność podjętej akcji naprawczej (w maju) mogła być oceniona natychmiast dzięki pomiarom elektrycznym, dostępnym w systemie AnomAlert.

Opisany przypadek rozpoznania niepoprawności działania instalacji wyciągowej jest trudny do zdiagnozowania z pomocą innych, tradycyjnie stosowanych metod diagnostycznych, jak np. monitorowanie drgań i temperatury węzłów łożyskowych.

Rozpoznanie uszkodzenia sprzęgła

Tak jak było wspomniane powyżej, SDA oparty na sygnałach elektrycznych może również rozpoznawać anomalie mechaniczne agregatu. Poniżej zostanie



Rys. 12. Sprzęgło zębate z widocznymi uszkodzeniami zębów

omówiony przypadek innego agregatu wykorzystywanego w walcowni, w którym zastosowane jest sprzęgło zębate. Na wykresie pokazanym na rys. 11 widoczne są 3 krzywe. Dwie z nich dotyczą symptomów mechanicznych (dla wybranych dwóch spośród 22 generowanych w systemie AnomAlert) i pokazują wzrastające odchylenie od normalnego ST, natomiast trzecia krzywa (najniższa na wykresie) opisuje status alarmu dla napędu. Już w okresie poprzedzającym pojawienie się ALARMU widoczny jest trend (silnie skorelowany dla obu symptomów), wskazujący na pogarszanie stanu. Trend ten utrzymuje się po wygenerowaniu ALARMU. W przedziale czasu 4850–5200 godzin obserwuje się znaczące skoki wartości obu symptomów.

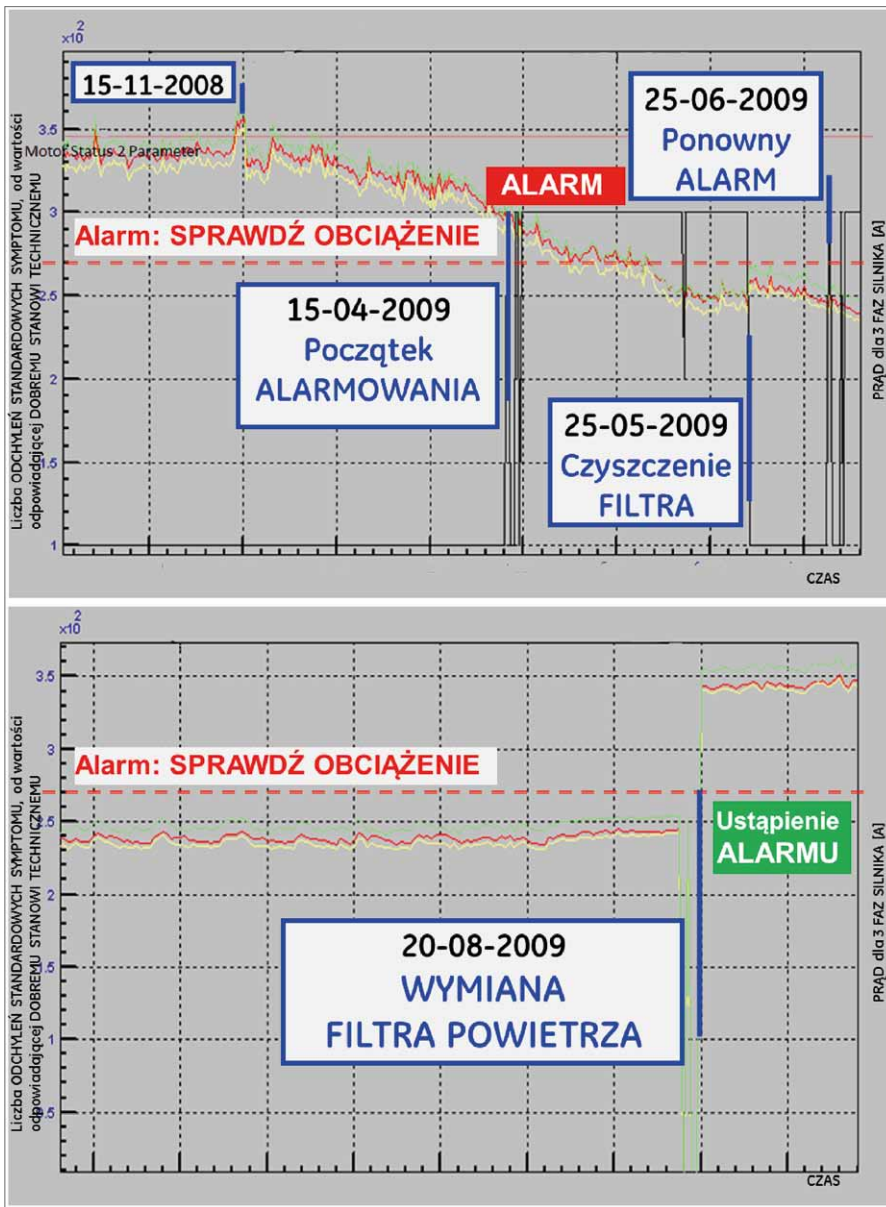
W oparciu o zaprezentowane wyniki, ewidentnie wskazujące na systematyczne pogorszenie ST, podjęto decyzję o zatrzymaniu agregatu celem dokonania jego szczegółowego przeglądu. Zidentyfikowane zostało zaawansowane zużycie sprzęgła zębatego (vide: rys. 12), a wspomniane wcześniej skoki wartości symptomów były najprawdopodobniej spowodowane kolejnymi pęknięciami i/lub wyłamaniem zębów sprzęgła.

Po wymianie sprzęgła na nowe status alarmu dla silnika ustąpił, a dla symptomów anomalii mechanicznych uzyskano obniżenie wartości do poziomów bliskich normalnemu ST.

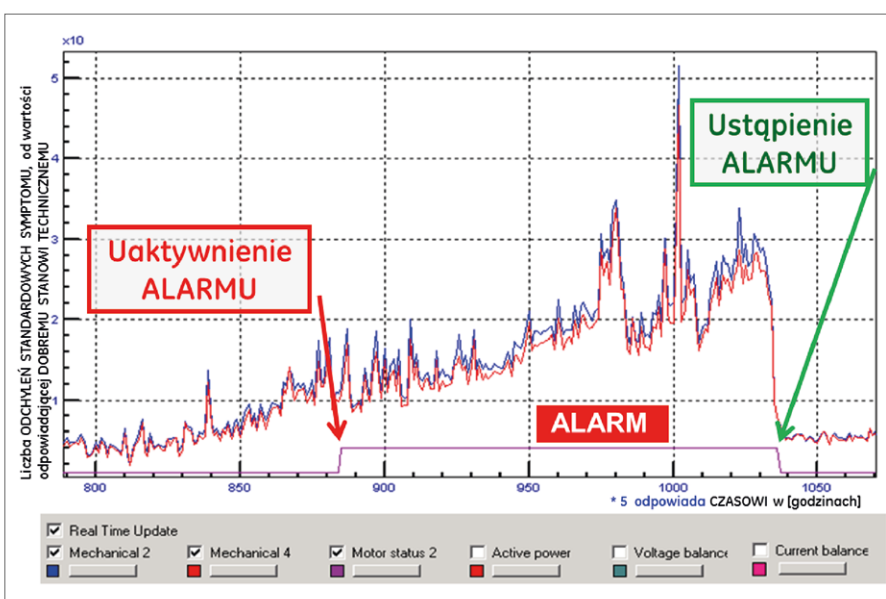
4. Implementacja systemu detekcji anomalii

Poniżej zostanie podanych kilka praktycznych zasad dotyczących implementacji sprzętowych SDA klasy On-Line:

- SDA może być stosowany dla silników zasilanych prądem przemiennym (indukcyjnych i synchronicznych).

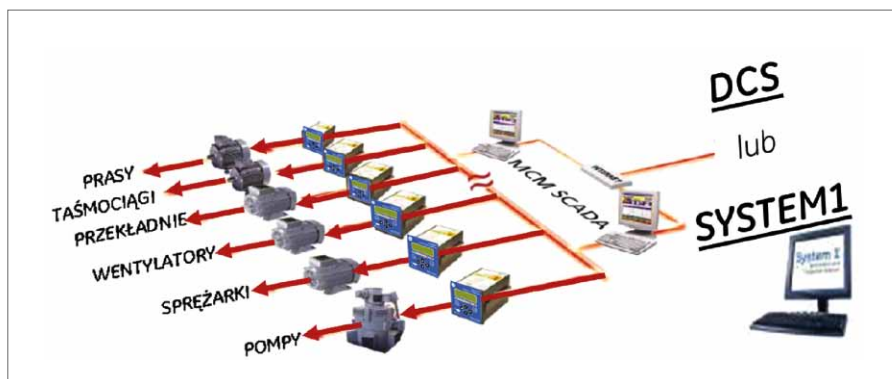


Rys. 10. Analiza trendów z naniesionym opisem zdarzeń – wykres dolny jest kontynuacją górnego



Rys. 11. Przykład trendu intensyfikacji anomalii z powodu uszkodzenia mechanicznego

- W przypadku silników stałobrotowych zasilanych niskim napięciem (do 400 V AC) sygnały napięcia zasilającego silnika mogą być bezpośrednio podłączone do systemu monitorowania AnomAlert.
- W przypadku silników stałobrotowych pracujących na napięcia wyższe niż 400 V AC sygnały napięciowe winny być podłączone poprzez przekładniki napięciowe.
- W przypadku silników stałobrotowych sygnały prądowe winny być podłączone poprzez przekładniki prądowe.
- W przypadku silników zmienneobrotowych (zasilanych za pośrednictwem falowników) sygnały prądowe winny być podłączone poprzez czujniki Halla.
- W przypadku grupy SE, którą planuje się objąć sprzętowym monitorowaniem anomalii, a która to grupa jest zasilana z jednej podstacji na średnie napięcie, wystarczające jest skorzystanie z pojedynczego przekładnika napięcia i powielenie tego sygnału do wszystkich systemów AnomAlert.
- W przypadku silników dwubiegowych SDA wymaga zastosowania dwóch monitorów – niezależnie dla uzwojeń odpowiadających za każdą z prędkości obrotowych.
- Na rys. 13 wyspecyfikowano szereg typów popularnych maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi, dla których z powodzeniem może być wykonywane monitorowanie anomalii przy pomocy systemu AnomAlert.
- W przypadku rozwiązania systemowego znaczna liczba monitorów anomalii może być podłączona do zakładowej sieci informatycznej i może współpracować z SD SYSTEM 1 lub ze specjalizowanym oprogramowaniem dedykowanym temu monitoringowi, a zaimplementowanym na poziomie systemów DCS, tak jak to pokazano na rys. 13.
- Nie zaleca się stosowania monitorowania anomalii dla agregatów wykorzystujących sprzęgła hydrauliczne oraz posiadających istotne dla oceny ST podstawowe składowe drgań o częstotliwości wyższej niż 500 Hz.
- SDA AnomAlert mogą być efektywnie wykorzystywane do oceny sprawności (termodynamicznej) pracy agregatów.
- Preferowanym miejscem do instalacji



Rys. 13. Przykłady typowych maszyn, dla których może być realizowane monitorowanie anomalii

Rys. 14. Przekładniki prądowe zainstalowane na kablach zasilających silnika (A) oraz dwa monitory AnomAlert zainstalowane w drzwiach szafki wiszącej (B) sterowania niskonapięciowych silników pomp



monitora anomalii jest szafa sterowania silnikiem. Na rys. 14 a pokazano przekładniki prądowe zainstalowane na kablach zasilających silnika 3-fazowego. Sygnały z przekładników prądowych są podłączone do wejść sygnałowych systemu AnomAlert. Na rys. 14 b pokazano natomiast szafę sterowania dwóch silników z zainstalowanymi w drzwiach dwoma systemami AnomAlert.

- Ocena ST sprowadzająca się do rozpoznawania anomalii może być również stosowana w trybie *Ad-Hoc* (tzn. poprzez prowadzenie analiz okazjonalnych z pomocą zestawu przenośnego). Więcej szczegółów na okoliczność prowadzenia takich analiz podano poniżej.

5. Wykorzystanie systemu monitorowania anomalii w warunkach *Ad-Hoc*

SDA pierwszoplanowo dedykowany jest dla zastosowań stacjonarnych (On-Line). Można go jednak również z powodzeniem wykorzystywać do badań *Ad-Hoc*. W przypadku podejścia

Ad-Hoc dysponujemy modelem bieżącym i niestety nie dysponujemy modelem referencyjnym, z którym model bieżący jest porównywany w przypadku zastosowań On-Line.

Podejście takie w dalszym ciągu może być użyteczne dla służb UR, jeśli:

- celem badań *Ad-Hoc* jest określenie stanu elektrycznego agregatu: zwraca się uwagę na fakt, że pokazane na rys. 6 pomiary elektryczne (prawa część tabeli) charakteryzują stan elektryczny agregatu i są pomocne do oceny sprawności jego działania w związku z tym, że dokonywane są m.in. pomiary mocy aktywnej i biernej;
 - przedmiotem badań jest kilka agregatów tego samego typu: w takim przypadku mimo tego, że nie posiada się modelu referencyjnego, a jedynie dostępne są modele bieżące, to możliwe jest przeprowadzenie oceny względnej z wykorzystaniem kryterium podobieństwa wygenerowanych modeli bieżących.
- Pomiary *Ad-Hoc* mogą być wykonywane z pomocą przenośnego zestawu



Rys. 15. Zestaw przenośny do rozpoznawania anomalii agregatów napędzanych SE

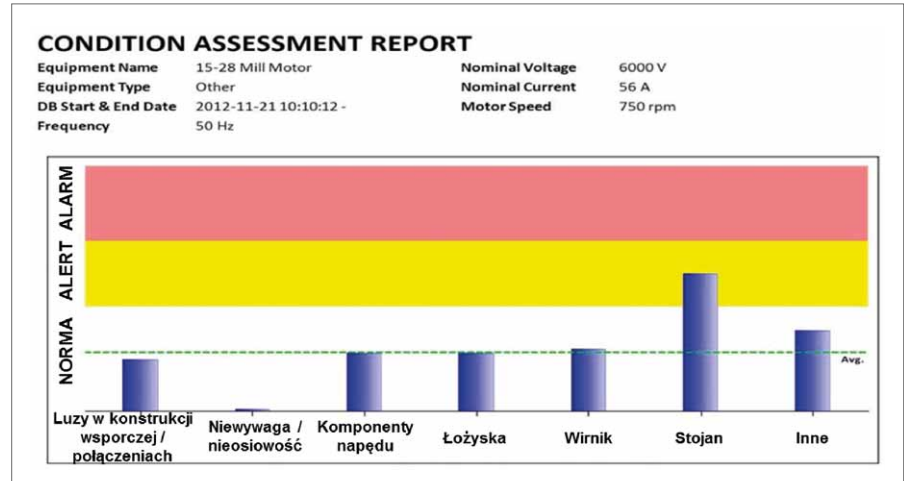
pomiarowego AMT [10] pokazanego na rys. 15. W skład zestawu wchodzi dwa monitory anomalii typu AnomAlert, osprzęt pomocniczy umożliwiający pozyskanie sygnałów napięciowych i prądowych, wymaganych do przeprowadzenia badań, oraz komputer przenośny, który umożliwia podłączenie do monitora AnomAlert. Komputer jest wyposażony w oprogramowanie o charakterze ekspertowym, wspomagające konwersję danych pomiarowych w informację o stopniu zaawansowania anomalii. Oprogramowanie umożliwia także generowanie standardowego raportu z przeprowadzonych badań. Raport zawiera m.in. syntetyczną ocenę ST agregatu oraz zalecenia dla użytkownika wskazujące na podzespoły agregatu, na które należy zwrócić szczególną uwagę ze względu na ich stan. Raport może także zawierać analizy widmowe dla wszystkich sygnałów.

Podłączenie zestawu AMT, umożliwiające przeprowadzenie pomiarów, jest mało skomplikowane i nie wymaga wcześniejszego specjalistycznego przeszkolenia użytkownika w celu samodzielnego prowadzenia badań. Wykonanie testu dla pojedynczego agregatu zajmuje ~1 godzinę.

Poniżej opisano kilka przykładów badań *Ad-Hoc*.

Analizy dla kilku maszyn użytkowanych w hucie

Z pomocą zestawu AMT dokonano analizy ST pięciu agregatów pracujących w hucie produkującej stale chromowe.



Rys. 16. Przykład syntetycznej charakterystyki rozpoznanych anomalii dla młyna

Były to: jeden młyn, dwa napędy pieca obrotowego oraz dwa wentylatory pieca obrotowego. Uzyskano następujące wyniki oceny: liczba agregatów

- pracujących bez zastrzeżeń: 0;
- wymagających remontu w ciągu 3 miesięcy: 2;
- wymagających remontu w ciągu 6 miesięcy: 3.

Na rys. 16 pokazano syntetyczną charakterystykę oceny ST agregatu młyna. Jak widać, raport nie sugeruje występowania pogorszenia ST w zakresie mechanicznym, a jedyną wątpliwość budzi ST stojana silnika.

W dalszej kolejności w raporcie znajduje się sugestia co do formy zalecanych działań naprawczych oraz co do czasu ich przeprowadzenia: „OBSERWUJ ISTNIEJĄCE USZKODZENIA: Sugestie co do ww. prawdopodobnych uszkodzeń winny być zweryfikowane w zakresie ich słuszności i działania korekcyjne winny być przedsięwzięte w czasie kolejnego remontu, jednak nie później niż w ciągu najbliższych sześciu (6) miesięcy”.

Dla każdego typu uszkodzenia (spośród wymienionych na wykresie słupkowym raportu syntetycznego), którego stopień zaawansowania jest co najmniej na poziomie ALERT, sformułowana jest bardziej dokładna charakterystyka. W omawianym przypadku mamy tylko jedno uszkodzenie: uszkodzenie STOJANA. Raport dokonuje oceny integralności mechanicznej silnika w następujący sposób: „Charakterystyka uszkodzenia elektrycznego: Stojan. Należy sprawdzić stojan pod kątem istniejących zwarc,

uszkodzenia izolacji i wyładowań niezupełnych” oraz nawiązuje do jego sprawności: „EEE¹: Grzanie się i zwiększona oporność obwodów stojana, wirnika oraz inne uszkodzenia natury elektrycznej powodują pogarszanie się ST i obniżają sprawność działania”.

Dla użytkownika dostępne są także wyniki szczegółowych pomiarów podane w postaci tabelarycznej, tak jak to pokazano na rys. 6 (dane z lewej strony tabeli dotyczą tego młyna). W przypadku odstępstwa od dobrego ST (OK) pojawia się instrukcja: „OBSERWUJ”.

Dla badanej *Ad-Hoc* maszyny automatycznie generowane są także dwa widma gęstości mocy: normalne i wysokie. Pokazano je na rys. 17 wraz z widmem bieżącym. W analizowanym przypadku widmo bieżące jedynie w zakresie nielicznych składowych przekracza nieznacznie widmo normalne i nie ma miejsca przekroczenie widma wysokiego. Przewyższenie przez składowe widma bieżącego obwiedni widma wysokiego winno być interpretowane jako wynik znaczącego pogorszenia ST lub poważnej anomalii w procesie.

W sytuacjach, w których ocenie podlega majątek podobny konstrukcyjnie i spełniający podobną funkcję celu, możliwe jest dodatkowo przeprowadzenie wzajemnego porównania ST takich maszyn. W rozważanym przypadku dysponujemy dwiema takimi parami. Są to napędy główne pieca obrotowego oraz agregaty wentylatorowe tegoż pieca.

Wyniki wzajemnego porównania ST dla obu par pokazano na rys. 18. Wyni-

ka z niego, że pogorszenie ST głównego napędu #2 jest zdecydowanie bardziej zaawansowane, niż ma to miejsce dla napędu #1, a w przypadku agregatów wentylatorowych zdecydowanie większa uwaga służb UR winna być skierowana na agregat #2 niż na #1.

Można także stwierdzić, że zróżnicowanie ST wentylatorów jest zdecydowanie większe niż napędów pieca, o czym świadczy większe zróżnicowanie w dynamice skali pionowej obu par zaprezentowanych analiz.

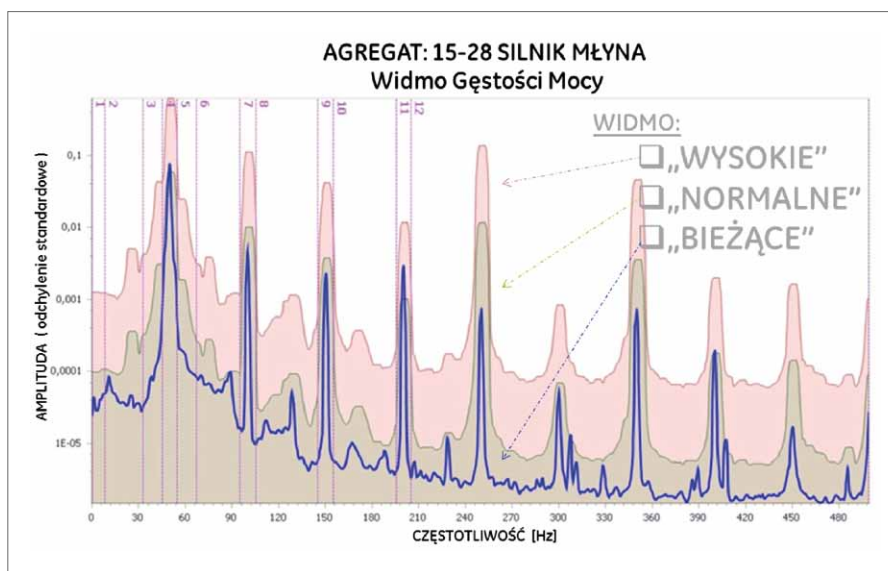
Użytkowanie agregatów z rozwijającymi się uszkodzeniami mechanicznymi i elektrycznymi prowadzi do pogorszenia ich sprawności oraz wiąże się ze zwiększeniem ryzyka (jeśli są to agregaty krytyczne) awaryjnego odstawienia linii produkcyjnej. W hucie, w której prowadzono ocenę, awaryjne odstawienie linii produkcyjnej jest równoznaczne ze stratami na poziomie kilkudziesięciu tysięcy USD. Wartość strat ulega powiększeniu o straty wtórne innych wydziałów huty, które są konsekwencją przestoju ww. linii.

Możliwość oceny pojedynczych agregatów

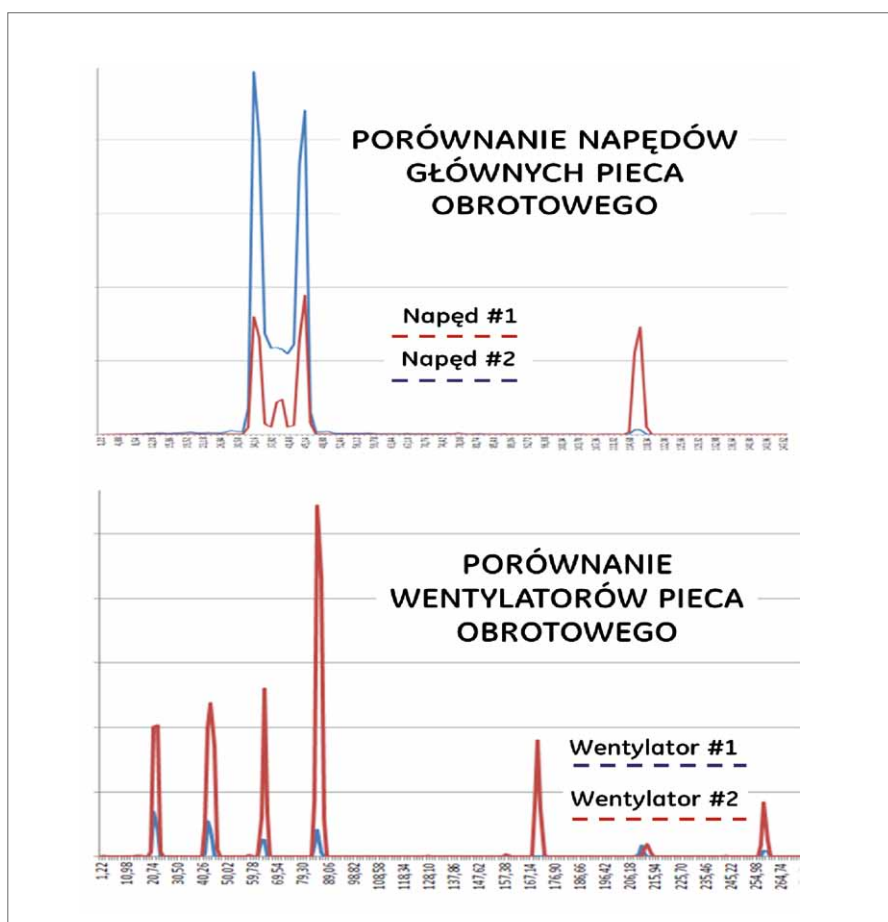
Na rys. 19 pokazano 2 syntetyczne raporty oceny ST dla agregatów napędzanych silnikami niskonapięciowymi. W odróżnieniu od raportu pokazanego na rys. 16, gdzie rozpoznana została tylko jedna anomalia na poziomie ALERT, raport dla wentylatora spalin (rys. 19 a) cechuje się trzema anomaliami. Są to anomalie w stosunkowo wczesnej fazie rozwoju i dotyczą luzów w powiązaniu między agregatem, jego konstrukcją wsporczą, ST łożysk oraz stanu stojana. W przypadku raportu wykonanego dla pompy (rys. 19 b) stwierdzone są dwie anomalie, z których jedna jest na poziomie ALARM (a więc w stosunkowo poważnym stadium zaawansowania), a druga ALERTUJE uszkodzenie stojana (odpowiada stosunkowo wczesnemu stadium zaawansowania uszkodzenia).

6. Ocena sprawności

SDA nie tylko dokonuje oceny ST agregatu, ale także umożliwia ocenę zasilania i w konsekwencji obu ocen prowadzi do szybkiej oceny sprawności. W dalszej części tego punktu skupimy się



Rys. 17. Przykład generowanej analizy widmowej wykorzystywanej w procesie oceny



Rys. 18. Przykład wzajemnej oceny stanu dwóch par obiektów konstrukcyjnie podobnych

przede wszystkim na ocenie korzyści, jakie mogą być uzyskane dzięki rozpoznaniu niezrównoważenia napięciowego zasilania.

W [11] podano skutki obniżenia sprawności silnika o mocy ~75 kW

w wyniku niewyrównoważenia napięciowego i w konsekwencji oszacowano straty finansowe ponoszone przez użytkownika w skali roku. Przyjmując podane tam wskaźniki, można oszacować, że dla agregatu o mocy 100 kW (przyjmu-

jąc jego użytkowanie w ciągu roku na poziomie 90% oraz koszt jednostkowy elektryczności 0,36 zł/kWh) pracującego pod pełnym obciążeniem i w przypadku niezrównoważenia napięciowego wynoszącego ~2,5% straty roczne wyniosą ~4500 zł.

Na rys. 20 pokazano widoczną część pionowego agregatu pompowego o mocy 780 kW, który jest monitorowany przy pomocy monitora AnomAlert podłączonego do SD SYSTEM 1. Z prawej strony pokazano wartości pomiarów elektrycznych dostępne w SD. Wśród nich widoczna jest m.in. informacja o niewyrównoważeniu napięciowym: w tym przypadku bardzo nieznacznym, bowiem wynoszącym zaledwie 0,04%.

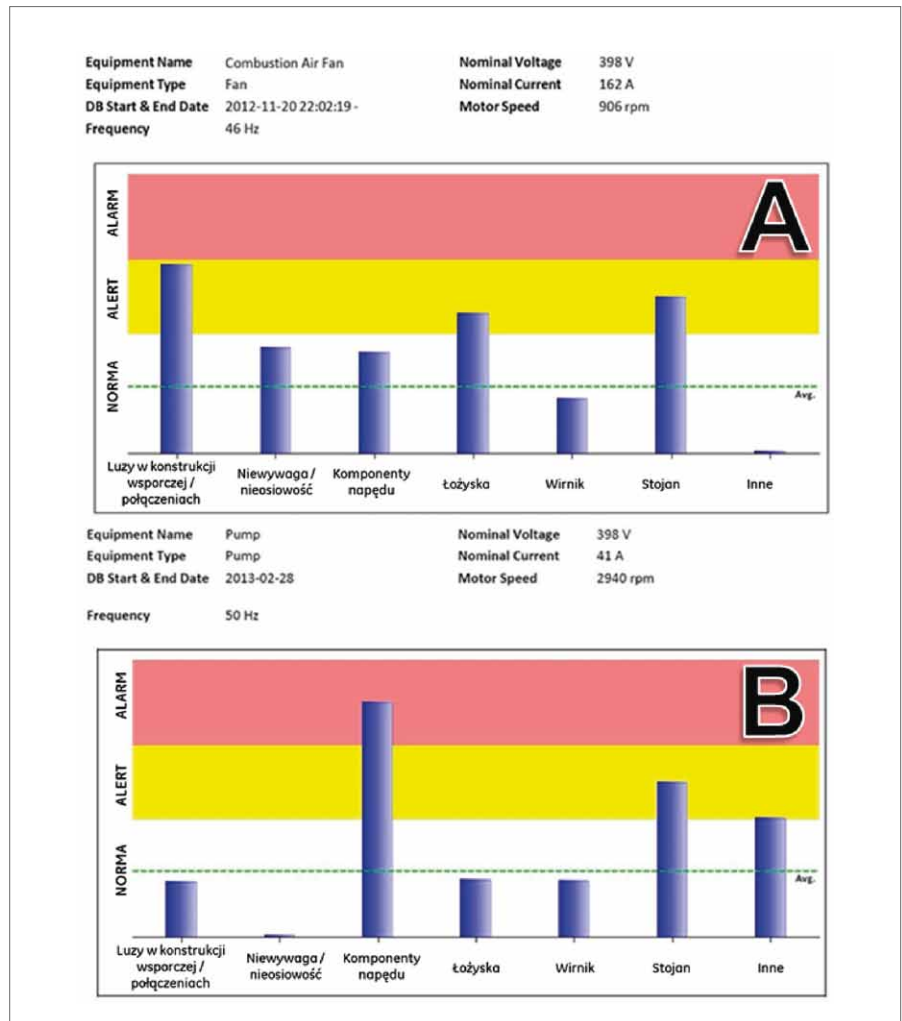
Zauważmy jednak, że w przypadku takiego (średniej wielkości) agregatu pompowego dla niezrównoważenia napięciowego jak rozważane powyżej (tzn. wynoszącego ~2,5%) straty roczne liczone z pomocą identycznych wskaźników jak poprzednio wyniosłyby: dla agregatu użytkowanego z pełną mocą ~35000 zł, a w przypadku obciążenia w przedziale 50–75% straty byłyby mniejsze i wynosiłyby ~24000 zł.

Oczywiście straty maleją wraz ze zmniejszeniem niewyrównoważenia napięciowego. W przypadku braku zbalansowania napięciowego na poziomie ~1% i przy obciążeniu agregatu pompowego na poziomie ~50% kształtowałyby się one na poziomie ~7000 zł/rok.

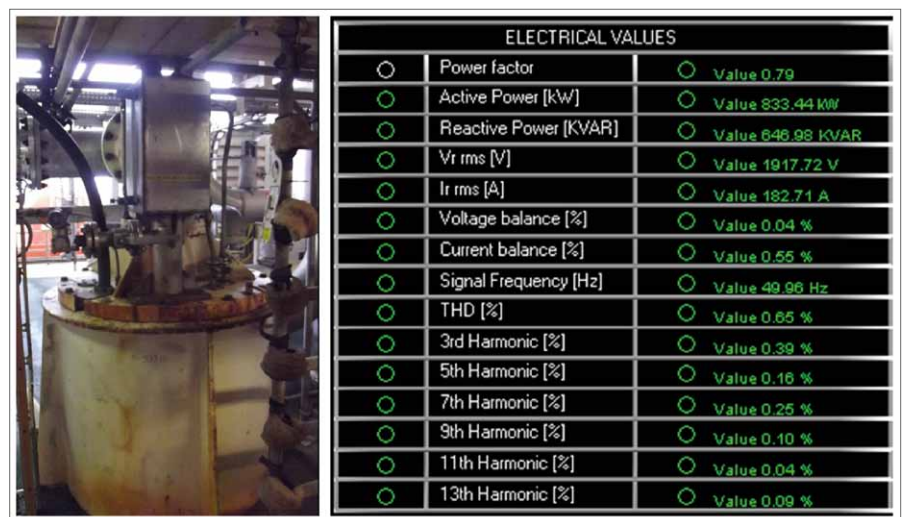
Oprogramowanie wspomagające sprzętową analizę anomalii daje m.in. możliwość wizualizacji napięć i prądów oraz zależności fazowych między nimi dla trzech faz. Przykład takiej wizualizacji pokazano na rys. 21. W SD możliwe jest skonfigurowanie alarmów, co zwołania operatorów i służby UR z kontroli danych dla poprawnego ST systemu produkcyjnego, bowiem alarmowanie pojawi się automatycznie po przekroczeniu zadanej wartości progowej.

Jeśli zasilanie charakteryzuje się wysokimi składowymi harmonicznymi, to również następuje obniżenie sprawności pracy silnika, które może wynosić nawet 1%. W związku z tym SDA prowadzi detekcję składowych harmonicznymi oraz oblicza ich wartość sumaryczną THD².

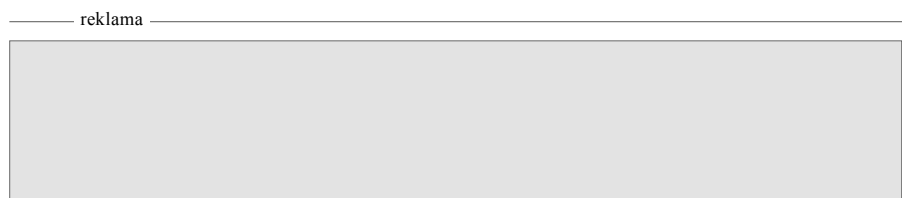
W przypadku systemu AnomAlert alarmowanie pojawia się wtedy, gdy na



Rys. 19. Syntetyczna ocena stanu technicznego (A) wentylatora spalin i (B) pompy



Rys. 20. Pionowy agregat pompowy (z lewej) wraz z bieżącym zestawem pomiarów elektrycznych dostępnych w SD (z prawej)



MONITORING I SYSTEMY STEROWANIA

pięcie zasilania różni się o 10% od napięcia znamionowego, niezrównoważenie napięciowe oraz THD przekraczają odpowiednio 2% i 5%.

Opisana funkcjonalność oraz ciągła indykacja mocy aktywnej oraz mocy biernej pozwalają na bardzo dobrą kontrolę bieżącej pracy agregatu wraz z jego sprawnością.

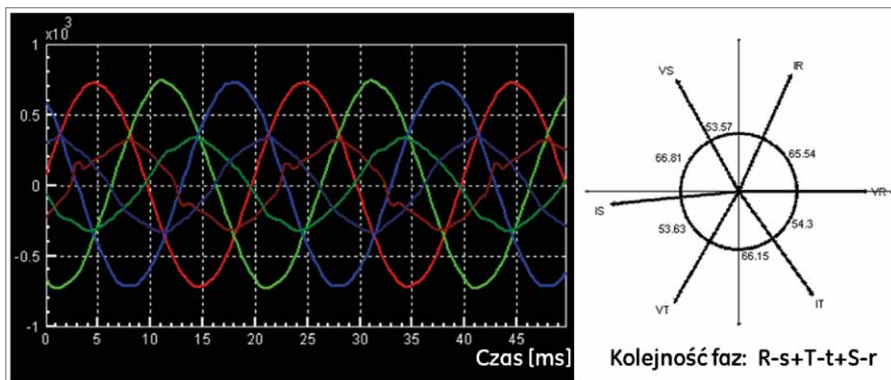
7. Zakończenie

Monitorowanie sygnałów elektrycznych stanowić może interesującą dywersyfikację pomiarową dla mniej i bardziej ważnych maszyn w różnych branżach. W szeregu przypadków monitoring taki może być traktowany jako interesująca alternatywa w stosunku do tradycyjnych metod monitorowania i zabezpieczenia maszyn. Sprzętowe monitorowanie anomalii może być wykorzystywane wtedy, gdy instalacja czujników drgań jest ze względów obiektywnych trudna lub wręcz niemożliwa do przeprowadzenia. Przykładem takich trudności mogą być pionowe agregaty pompowe, dla których na ogół instalowanie czujników dla dolnego łożyska pompy wiąże się z trudnościami natury technicznej.

Także w przypadku agregatów wyższej ważności monitorowanie anomalii może być traktowane jako interesujące rozszerzenie tradycyjnego monitoringu drganiowo-temperaturowego. W takich przypadkach nadzór ST jest dodatkowo rozciągnięty na część elektryczną silnika. Monitoring ten alternatywnie w stosunku do czujników drgań i temperatury umożliwia monitorowanie integralności mechanicznej agregatu z pomocą sygnałów elektrycznych.

Stosowanie monitorowania anomalii może być także pomocne w przypadku agregatów pomocniczych, posiadających nawet dwukrotną redundancję procesową. Przykładem takich agregatów mogą być niektóre pompy procesowe w chemii czy pompy systemu olejowego w energetyce wodnej. Pompy takie pracują z niską intensywnością, z tego też względu nie zawsze znajduje się dla nich wystarczającą argumentację na okoliczność instalacji standardowego monitoringu drganiowego. Zastosowanie monitorowania anomalii (pokazane na rys. 14 wdrożenie dotyczy pomp w elektrowni wodnej) stanowi efektywną pomoc dla służb UR.

Monitorowanie anomalii nie tylko



Rys. 21. Przebiegi czasowe napięć (V) i prądów (I) (z lewej) oraz informacja o zależnościach fazowych między nimi dla trzech faz (opisanych jako R, T i S – z prawej)

wspomaga nadzór integralności mechanicznej maszyn, ale także umożliwia rozpoznawanie anomalii procesowych, umożliwia rozpoznawanie wolnozmiennych zaburzeń po stronie zasilania silników oraz umożliwia ocenę sprawności pracy tak pojedynczych agregatów, jak i małych systemów produkcyjnych, w skład których wchodzi grupa agregatów napędzanych SE.

Przypisy

1. EEE oznacza „wpływ na sprawność energetyczną” i jest skrótem od terminu *Effects on Energy Efficiency*.
2. *Total Harmonic Distortion*.

Literatura

- [1] NOWICKI R.: *Nadzór stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi – wprowadzenie do tematyki*. „Napędy i Sterowanie” 10/2013, s. 114–125.
- [2] NOWICKI R., BATE M.: *Programowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 12/2013, s. 90–97.
- [3] NOWICKI R.: *Zróżnicowanie systemów online nadzoru stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 89/2011 s. 65–73.
- [4] DUYAR A., MERRILL W.C.: *Fault Diagnosis For the Space Shuttle Main Engine*. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 15, no. 2, pp. 384–389, 1992.
- [5] LITT J., KURTKAYA M., DUYAR A.: *Sensor Fault Detection and Diagnosis of the T700 Turbohaft Engine*. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 187, no. 3, pp. 640–642, 1995.

- [6] MUSGRAVE J.L., GUO T., WONG E., DUYAR A.: *Real-Time Accommodation of Actuator Faults on a Reusable Rocket Engine*. IEEE Trans. Cont. Syst. Technol., vol. 5, no. 1, pp. 100–109, Jan. 1997.
- [7] DUYAR A., ELDEM V., MERRILL W.C., GUO T.: *Fault Detection and Diagnosis in Propulsion Systems: A Fault Parameter Estimation Approach*. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 17, no. 1, pp. 104–108, 1994.
- [8] DUYAR A.: *Simplifying Predictive maintenance*. „Orbit Magazine” Vol. 31, No. 1, 2011, s. 38–45.
- [9] NOWICKI R.: *Klasyczne metody nadzoru stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 11/2013, s. 134–145.
- [10] Artesis AMT Toolkit, <http://www.artesis.com/products/amt/>, 2013.
- [11] U.S. Department of Energy, Energy Tips: Motor Systems Tip Sheet #7, DOE/GO-102012-3733, NOV 2012.
- [12] SONG J., NOWICKI R., DUYAR A.: *Zastosowanie modelowania diagnostycznego dla wspomagania predykcyjnego utrzymania ruchu i zwiększenia efektywności energetycznej w hucie*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 2/2013 (99), s. 233–240.

James Song – TFS Global Co., Ltd., Posco 1st Venture Co., Seoul/Korea, e-mail: JSSong@poscofcs.com;

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

Ahmet Duyar – Artesis, Gebze/Turcja; e-mail: Ahmet.Duyar@artesis.com

artykuł recenzowany