

James Song, TFS GLOBAL CO., LTD., POSCO 1ST VENTURE Co., Seoul, Korea
 Ryszard Nowicki, GE POWER CONTROLS Sp. z o.o., Poznań, Polska
 Ahmet Duyar, ARTESIS, Gebze, Turcja

ZASTOSOWANIE MODELOWANIA DIAGNOSTYCZNEGO DLA WSPOMAGANIA PREDYKCYJNEGO UTRZYMANIA RUCHU I ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W HUCIE

PREDICTIVE MAINTENANCE AND ENERGY EFFICIENCY USING MODEL BASED FAULT DETECTION TECHNOLOGY FOR METALLURGICAL INDUSTRY

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. Zaprezentowano wyniki uzyskane w czasie pilotażowego wdrożenia w hucie.

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. Implementation and case studies for iron and steel industry are presented.

Słowa kluczowe: diagnostyka, rozpoznawanie anomalii, modelowanie uszkodzeń, sprawność, huta
Keywords: diagnostics, detection of anomalies, malfunction modeling, steel mill

1. Wstęp

Znane są uzależnienia między pogarszaniem się stanu technicznego, a pogarszaniem sprawności działania wielu typów maszyn. Nadmierne rozosowanie, niezrównoważenie napięciowe lub niewyważa mechaniczna mogą poważnie wpływać na grzanie się łożysk lub być przyczyną problemów natury elektrycznej [1,2]. W [3] stwierdza się, że *dobrze realizowane Proces Produkcyjny i Utrzymanie Ruchu (=PP&UR) promują zwiększenie efektywności wykorzystania energii i wydłużają cykl życia urządzeń, co może prowadzić do zmniejszenia rachunków rocznych za energię na poziomie 5...20% bez żadnych dodatkowych nakładów kapitałowych. Dodatkowo, dobre programy PP&UR przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa, poprawy komfortu pracy i zdrowia.* Aktualnie obserwuje się intensyfikację zastosowań systemów detekcji anomalii w celu optymalizacji tak PP jak i UR. Stosowane są dwa podejścia, z których jedno wykorzystuje rozwiązania sprzętowe [4] wymagające autonomicznej akwizycji i przetwarzania danych, a drugie ogranicza się jedynie do rozwiązań

programowych, które przetwarzają dane gromadzone przez inne systemy [5, 6].

W artykule pokazano przykłady efektywnego zastosowania tego pierwszego podejścia na okoliczność poprawy UR w hucie. Możliwość proaktywnego reagowania na pogarszanie się stanu technicznego może mieć także bezpośredni wpływ na zoptymalizowanie zapotrzebowania energetycznego huty i poprawę bezpieczeństwa jej działania.

2. Detekcja uszkodzeń i diagnostyka ba-zująca na modelowaniu

Chociaż korzyści ze stosowania diagnostyki są powszechnie uznawane, to wciąż jeszcze liczba firm skutecznie wykorzystujących to narzędzie jest dość ograniczona. Dla wielu potencjalnych użytkowników nakłady oraz konieczność posiadania specjalistów posiadających pewien minimalnie wymagany poziom wykształcenia stanowią wciąż trudną do pokonania zaporę. Z tego względu w dalszym ciągu ważnym jest zadanie poszukiwania takich rozwiązań sprzętowo-programowych, które wciąż jeszcze za-

pewniając znaczącą atrakcyjność dla służb UR będą cechować się prostotą implementacji oraz niskimi kosztami wdrożenia. Podejście wykorzystujące modelowanie uszkodzeń jest od ~10 lat wykorzystywane w oprogramowaniu ekspertowym, stanowiącym element składowy bardziej zaawansowanych systemów diagnostyki. Teraz doczekało się ono unikalnego wdrożenia na poziomie sprzętowym. Zaawansowane algorytmy wnioskowania diagnostycznego stosowane w tej technologii pierwotnie były opracowane w ramach kontraktu dla NASA [7,8,9,10] i są chronione patentowo. Przejście od modelu fizycznego, poprzez model matematyczny do rozwiązania sprzętowego stosowanego w praktyce, wymagało wiele wysiłku, który m.in. był spowodowany koniecznością przebadania kilku milionów silników elektrycznych celem zapewnienia dokładności i powtarzalności diagnostycznej oceny ich stanu. Wykorzystywane rozwiązanie sprzętowe [4, 11] buduje samodzielnie model matematyczny monitorowanego agregatu, a źródło danych stanowią pomiary napięcia i prądu. Tak więc, najlepszym miejscem do instalacji monitora jest szafa sterowania silnikiem. Po zainstalowaniu monitor automatycznie inicjuje proces samouczenia, w czasie którego budowany jest *referencyjny model* matematyczny. Ten *model referencyjny* uwzględnia wiele charakterystyk elektrycznych i mechanicznych tak w odniesieniu do silnika, jak i dla napędzanej przez niego maszyny. System monitorowania nie wymaga wprowadzania danych przez operatora, samodzielnie rozpoznaje oraz uwzględnia różne stany użytkowania maszyny występujące w fazie samo uczenia, jak np. praca agregatu pod różnym obciążeniem oraz z różnymi obrotami roboczymi. Kiedy proces budowy *modelu referencyjnego* jest zakończony monitor przechodzi w tryb regularnej pracy mającej na celu rozpoznawanie anomalii. W trybie roboczym budowany jest z krokiem 90-sekundowym *bieżący model* nadzorowanego systemu. *Model bieżący* jest porównywany z *modelem referencyjnym* z uwzględnieniem metod statystycznych. W przypadku rozpoznania znaczącego zróżnicowania między *modelem bieżącym* i *referencyjnym* następuje identyfikacja hipotetycznych uszkodzeń mogących być odpowiedzialnymi za zaistnienie obserwowanych zmian. W tym celu wykorzystywane są zarówno bezpośrednie pomiary sygnałów, jak i ich analiza widmowa. W następstwie prze-

prowadzonych analiz jest dokonywana ocena stopnia zagrożenia. Monitor formułuje sugestie co do rodzaju działań, które winny być podjęte. Monitor umożliwia podłączenie do sieci zakładowej i wtedy formułowane sugestie co do konieczności przeprowadzenia określonych działań prewencyjnych wraz z oszacowaniem czasu, w ciągu którego winny być podjęte są przekazane bezpośrednio do służb UR. Formułowana diagnoza uwzględnia tak problemy natury elektrycznej (np. uszkodzenia izolacji, zniszczenie prętów wirnika), jak i mechanicznej (np. uszkodzenie łożysk, niewyważa wirnika, nieosiowość, uszkodzenie sprzęgła, zmiany w konstrukcji wsporczy). Ocenie podlega łącznie 22 różnych parametrów modelu, które reprezentują nie tylko uszkodzenia elektryczne i mechaniczne, ale także anomalie procesowe (prowadzące do zmiany obciążenia) oraz odstępstwa od poprawnego zasilania silnika. Zastosowane podejście jest z jednej strony wystarczająco wrażliwe, aby rozpoznać uszkodzenia już w ich początkowej fazie rozwoju, natomiast z drugiej jest także odporne na generowanie fałszywych alarmów (jeśli proces samokształcenia był zrealizowany wystarczająco poprawnie). W uzupełnieniu do w/w ocen dokonywane są pomiary parametrów elektrycznych (w tym mocy aktywnej i biernej) umożliwiające ocenę sprawności działania. Realizacja w/w zadań jest możliwa w oparciu o rozwiązanie On-Line systemu monitorowania AnomAlert [4,11], lub jego wersji przenośnej AMT [12] do badań Ad-Hoc. Wymienione środki techniczne stanowią unikalne rozwiązanie w ramach systemów nadzoru stanu technicznego bowiem zawierają w sobie kilka elementów składowych tego systemu tak, jak to pokazano na schemacie poniżej: dla silników niskonapięciowych są funkcjonalnie czujnikami napięcia, natomiast dla silników wszelkich napięć są monitorem, systemem akwizycji danych diagnostycznych oraz diagnostycznym systemem ekspertowym (dedykowanym dla pojedynczego agregatu).



3. Przykłady oceny Ad-Hoc wybranych agregatów w hucie

Badania prowadzono z pomocą zestawu AMT. Umożliwia on badania stanu technicznego agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi 3-fazowymi oraz generatorów – w obu przypadkach niezależnie od ich mocy. Możliwe jest rozpoznawanie nieprawności elektrycznych, mechanicznych oraz automatyczne generowanie raportów diagnostycznych natychmiast po zakończeniu badania. Raport formułuje dość jednoznaczne wskazania co do typu rozpoznanej niesprawności.

W skład zestawu AMT wchodzi detektory anomalii AnomAlert będące urządzeniami niskonapięciowymi, wykorzystującymi wtórne obwody pomiarowe w przypadku stosowania dla urządzeń średnio-napięciowych (trzy przekładniki napięciowe oraz trzy przekładniki prądowe [lub czujniki Halla]). Podłączenie pomiarowe jest więc mało skomplikowane i nie wymaga specjalnego treningu użytkownika w celu samodzielnego prowadzenia badań. Przeprowadzenie testu dla pojedynczego agregatu zajmuje ~1 godziny.

Poniżej pokazano przykład analizy stanu technicznego maszyn użytkowanych w hucie produkującej stale chromowe. Z pomocą zestawu AMT dokonano testu 5 agregatów i uzyskano następujący wynik oceny: liczba agregatów (i) pracujących bez zastrzeżeń: 0, (ii) wymagających remontu w ciągu 3 miesięcy: 2 (iii) ... i w ciągu 6 miesięcy: 3.

Tabela nr 1

| NAZWA AGREGATU | OCENA STANU TECHNICZNEGO | SUGEROWANY CZAS REMONTU | USD/rok ⁽¹⁾ |
|--------------------------------|--|-------------------------|------------------------|
| Młyn | Remont winien być zaplanowany na okoliczność problem z izolacją stojana | W ciągu 6 miesięcy | 16 100 |
| Napęd #1 pieca obrotowego | Remont winien być zaplanowany ze względu na luz mechaniczny i problematyczną pracę reduktora | W ciągu 6 miesięcy | 2 800 |
| Napęd #2 pieca obrotowego | Remont winien być zaplanowany ze względu na luz mechaniczny i problematyczną pracę reduktora | W ciągu 6 miesięcy | 1 900 |
| Wentylator #1 pieca obrotowego | Remont winien być zaplanowany ze względu na niewyważenie, luz mechaniczny, mimosrodość wirnika i uszkodzenia stojana | W ciągu 3 miesięcy | 1 600 |
| Wentylator #2 pieca obrotowego | Remont winien być zaplanowany ze względu na niewyważenie, luz mechaniczny, mimosrodość wirnika i uszkodzenia stojana | W ciągu 3 miesięcy | 6 800 |

⁽¹⁾ SZACOWANA WARTOŚĆ ZMNIJSZONEGO ZAPOTRZEBOWANIA ENERGETYCZNEGO

Rodzaj agregatów, sugestie co do zakresu i czasu wymaganej obsługi oraz oszacowanie kosztów zmniejszonego zapotrzebowania energetycznego w konsekwencji dokonanych napraw zestawiono w TABELI Nr 1.

Użytkowanie agregatów z rozwijającymi się uszkodzeniami mechanicznymi i elektrycznymi prowadzi do pogorszenia ich sprawności działania oraz wiąże się ze zwiększeniem ryzyka (jeśli są to agregaty krytyczne) awaryjnego odstawienia linii produkcyjnej. W hucie, w któ-

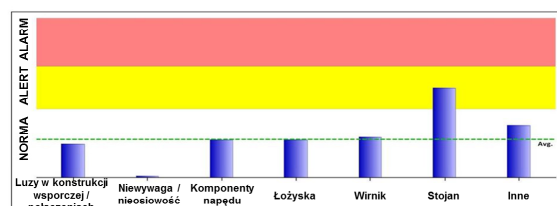
rej prowadzono ocenę, awaryjne odstawienia linii produkcyjnej jest równoznaczne ze stratami na poziomie kilkudziesięciu tysięcy USD. Wartość strat ulega powiększeniu o straty wtórne innych wydziałów huty będące konsekwencją przestoju w/w linii. Jeśli rozpoznanie przyczyn w/w anomalii jest poprawne wtedy możliwe jest zaoszczędzenie w skali roku kwoty ~29k\$. Tak więc, realne oszczędności na kosztach elektryczności jedynie dla tych 5 agregatów, w przypadku przeprowadzenia natychmiastowego remontu w stosunku do remontu prowadzonego z opóźnieniem, jak specyfikowane w TABELI Nr 1, wyniosłyby ~12,5k\$. Zauważmy, że w przypadku zastąpienia napędu wentylatora #2 pieca obrotowego nowym napędem o właściwej sprawności spodziewać się można zwrotu nakładów inwestycyjnych w ciągu ~13 miesięcy.

Sprawność agregatów nie jest stała i może zależeć od warunków użytkowania. Omawiane systemy wspomaganie oceny stanu technicznego agregatów, dokonują nie tylko ich bieżącej ocenę sprawności energetycznej, ale także dają możliwość rozpoznania odstępstw od poprawnego stanu technicznego już we wczesnej fazie rozwoju uszkodzenia. W konsekwencji wczesne skorygowanie spostrzeżonych uchybień prowadzi do spowolnienia procesu kumulacji naprężeń i w konsekwencji do istotnego wydłużenia okresów między - remontowych. Przeprowadzona analiza kosztów co do słuszności wyposażenia w/w 5 agregatów w system On-Line monitorowania anomalii prowadziła do konkluzji, że przewidywany zwrot nakładów inwestycyjnych nastąpi po ~8 miesiącach.

Fragment typowego raportu oceniającego stan techniczny, został zaprezentowany poniżej na przykładzie agregatu młyna. Syntetyczna ocena diagnostyczna jest sformułowana w części wstępnej każdego raportu w postaci tekstowo-graficznej tak, jak to pokazano na rysunku poniżej. Ocena jest przedstawiona w postaci wykresu słupkowego dla rozważanych przez system typów anomalii.

CONDITION ASSESSMENT REPORT

Equipment Name: 15-28 Mill Motor
 Equipment Type: Other
 DB Start & End Date: 2012-11-21 10:10:12 -
 Frequency: 50 Hz
 Nominal Voltage: 6000 V
 Nominal Current: 56 A
 Motor Speed: 750 rpm



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 w/w 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), którego stopień zaawansowania jest co najmniej na poziomie ALERT, sformułowana jest bardziej dokładna charakterystyka. W omawianym przypadku mamy tylko jedno uszkodzenie: uszkodzenie STOJANA.

Tabela nr 2

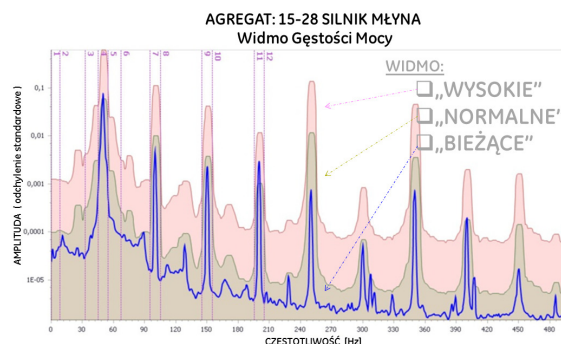
| Część agregatu - Praca - Status niesprawności - Diagnostyka | | |
|---|---|---------|
| Stan | Nazwa | Wartość |
| OK | Współczynnik mocy | 0,97 |
| OK | Moc aktywna [kW] | 448 |
| OK | Moc pasywna [kW] | 121 |
| OK | Vrms [V] | 6022 |
| OK | Irms [A] | 43 |
| OK | V - niewyważenie [%] | 0,40 |
| Obserwuj | I - niewyważenie [%] | 3,3 |
| OK | Częstotliwość [Hz] | 50 |
| OK | THD [%] | 2,4 |
| OK | 3-harmoniczna [%] | 0,90 |
| OK | 5-harmoniczna [%] | 2,00 |
| 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. | |

Raport dokonuje oceny integralności mechanicznej silnika w następujący sposób: „**Charakterystyka uszkodzenia elektrycznego: Stojan.** Należy sprawdzić stojan pod kątem istniejących zwarć, uszkodzenia izolacji i WNZ” oraz nawiązuje do jego sprawności: „**EEEⁱ:** Grzanie się i zwiększona oporność obwodów stojana, wirnika oraz inne uszkodzenia natury elektrycznej, powodują pogarszanie się stanu technicznego i obniżają sprawność działania”.

Dla użytkownika dostępne są także wyniki szczegółowych pomiarów podane w postaci tabelarycznej tak, jak to pokazano w TABELI

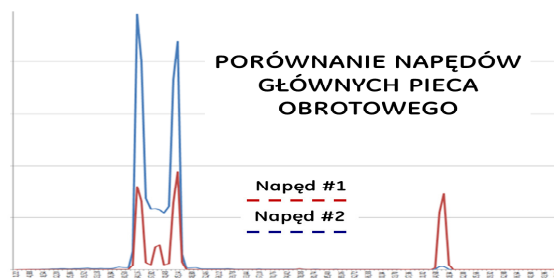
Nr 2. W przypadku odstępstwa od dobrego stanu technicznego (OK) pojawia się instrukcja: „OBSERWUJ”.

Dla badanej maszyny są także generowane automatycznie dwa widma gęstości mocy: *normalne* i *wysokie*. Pokazano je na rysunku (poniżej) wraz z widmem *bieżącym*. W analizowanym przypadku widmo *bieżące* jedynie w zakresie wybranych składowych przekracza nieznacznie widmo *normalne* i nie stwierdza się przekroczenia widma *wysokiego*.

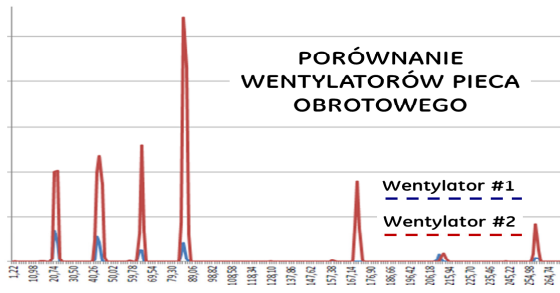


Przekroczenie przez wartości widma *bieżącego* obwiedni widma *wysokiego* winno być interpretowane jako wynik znaczącego pogorszenia stanu technicznego lub poważnej anomalii w procesie.

W przypadkach, w których ocenie podlega maszynka podobny konstrukcyjnie i spełniający podobną funkcję celu, oprócz wyżej opisanych analiz, możliwe jest dodatkowo porównanie wzajemne takich maszyn. W rozważanym przypadku dysponujemy dwoma takimi parami. Są to napędy główne pieca obrotowego oraz agregaty wentylatorowe tegoż pieca. Z porównania wynika, że pogorszenie stanu technicznego głównego napędu #2 jest zdecydowanie bardziej zaawansowane niż ma to miejsce w przypadku napędu #1, a w przypadku agregatów wentylatorowych zdecydowanie większa uwaga winna być skierowana na agregat #2 niż na #1.



ⁱ EEE = Effects on Energy Efficiency



4. Przykład aplikacji On-Line detekcji anomalii

Monitorowanie On-Line z pomocą systemu detekcji anomalii AnomAlert jest rozwiązaniem preferowanym dla ważniejszych agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi. Praca napędów elektrycznych w hucie ma na ogół miejsce w ciężkich warunkach, a to ze względu na częste usytuowanie w polu podwyższonych temperatur i w zawilgoceniu sprzyjającym korozji. Warunki te powodują przyspieszone zużycie szczotek (i w konsekwencji pogorszenie komutacji) oraz przyspieszone uszkodzanie uzwojeń silników. W warunkach huty omawiana forma monitorowania umożliwia nie tylko rozpoznawanie integralności majątku, ale także ocenę sprawności jego działania. Trzy przykłady dla wymienionego obszaru zastosowań zostaną zaprezentowane poniżej.

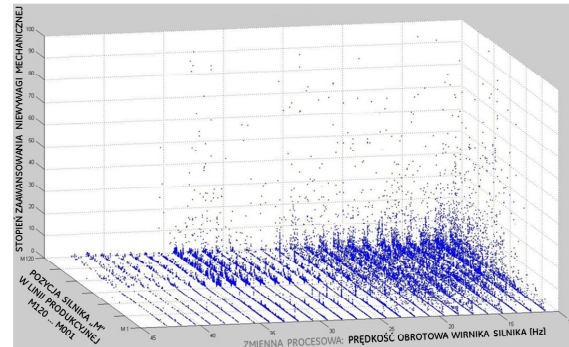
4.1. Monitorowanie zespołów walcowniczych (=ZW)

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 ~60k\$. ZW pracują nie tylko w podwyższonych temperaturach ale także w warunkach silnie zmieniającego się obciążenia napędów.

Dla monitorowania ZW zastosowano monitorowanie On-Line analizujące sygnały napięcia i prądu dla 120 napędów. W wyniku pierwszego oszacowania stanu technicznego (po wyposażeniu linii produkcyjnej w systemy monitorowania) uzyskano:

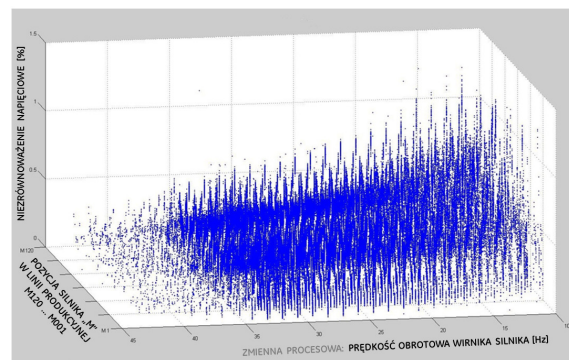
- 106 ← liczba napędów pracujących zgodnie z oczekiwaniami,
- 3 ← Liczba napędów wymagających naprawy w ciągu 3 miesięcy (uszkodzenia stojana),
- 11 ← Liczba urządzeń, które winny być obserwowane ze zwiększoną uwagą (tym: luzy w konstrukcji wsporczej: 7 i niewyważenie: 4).

W ogólności stan techniczny w zakresie „integralności mechanicznej” wszystkich ZW wraz z napędzającymi je silnikami, (których prędkość jest sterowana poprzez falowniki) został uznany jako dobry. Na rysunku pokazano w postaci charakterystyki 3D ocenę niewyważenia mechanicznego wszystkich ZW.



Zaawansowanie niewyważenia mechanicznego ZW jest mierzone jako liczba odchyłek standardowych stanu rzeczywistego w stosunku do stanu modelowego uznanego jako dobry i jest przedstawiona w funkcji numeru napędu (od M001 do M120, gdzie liczba odpowiada jego położeniu w ciągu technologicznym) oraz zmieniającej się prędkości obrotowej (w przedziale ~10...~45 Hz dla wybranych 27 wartości dyskretnych z krokiem ~1,2 Hz). Z wykresu można sformułować ogólny wniosek, że podzespoły linii technologicznej wraz ze wzrastającym numerem w ciągu technologicznym prezentują większe zaawansowanie niewyważenia mechanicznego. Sytuacja taka może być spowodowana zastosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym linii produkcyjnej (zmieniające się właściwości strukturalne wraz ze wzrostem pozycji „Mnnn”).

W kolejnym kroku dokonano analizy nierównoważenia elektrycznego w podobnym do wyżej zastosowanego układzie współrzędnych 3D. Wynik tej analizy pokazano poniżej.



Współrzędne płaszczyzny poziomej są identyczne jak w przypadku poprzedniej analizy 3D, natomiast współrzędna pionowa wyraża niezrównowagę napięciową wyrażoną w [%]. Analiza pokazuje, że wraz ze zmniejszaniem prędkości obrotowej napędów wzrasta niezrównowaga napięciowa. Dla analizowanego zbioru silników w zdecydowanej większości nie przekracza ono zalecanego (ze względu na sprawność działania) 1% i jedynie w przypadku niskich prędkości obrotowych (<1000 RPM) nieliczne silniki prezentują wyższe niezrównowagę, które jednak w żadnym przypadku nie przekracza 1,3%. Jak wiadomo niezrównowaga napięciowa wpływa znacząco na wartość niezrównowagi prądowej, które osiąga wartości [12] 6...10 razy większe od napięciowej. Zwiększenie niezrównowagi prądowej prowadzi do (i) pulsacji momentu, (ii) wzrostu poziomu drgań, (iii) w konsekwencji do przyspieszonej kumulacji naprężeń mechanicznych, (iv) zróżnicowania pola temperatur silnika, (v), a wzrost temperatury przyczynia się do skrócenia żywotności izolacji. Wszystkie te przyczyny razem wzięte prowadzą do (vi) zmniejszenia sprawności działania silnika. Statystycznie można przyjąć, że brak zrównowagi napięciowej wynoszący 2,5% powoduje obniżenie sprawności o 1,5%.

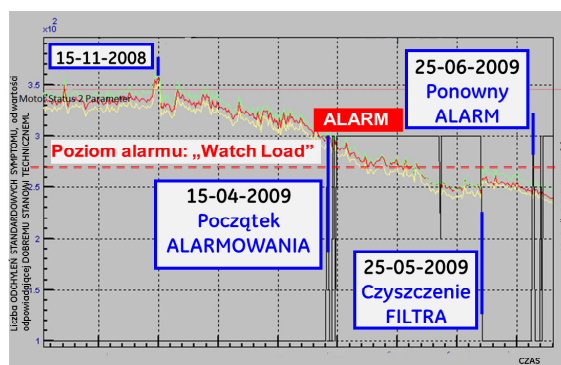
Przedstawione wyniki były podstawą wydania rekomendacji, co do selekcji silników pod kątem poprawności niezrównowagi napięciowej w przedziale prędkości obrotowych, w których silnik będzie pracował. Selekcja taka będzie prowadzić do zwiększenia sprawności całego systemu produkcyjnego.

4.2. Niesprawność instalacji wyciągowej

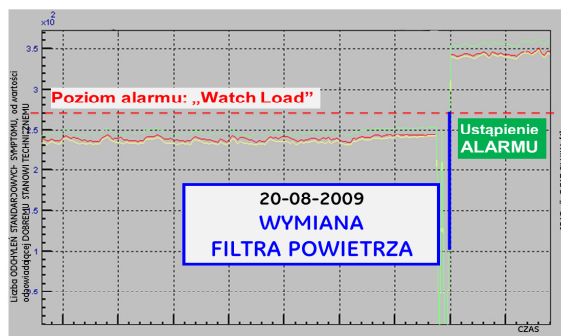
Kolejny przykład dotyczy pracy instalacji wyciągowej na linii zimnego walcowania. Wentylator (pokazany na fotografii) usuwa, poprzez zespół filtrów do otoczenia zanieczyszczone powietrze z hali produkcyjnej.



Wentylator został objęty monitorowaniem z pomocą systemu AnomAlert. Po kilku miesiącach od zainstalowania systemu monitorowania wygenerował alarm (~15 kwietnia 2009 „Watch Load”). 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 grudzień 2008 – kwiecień 2009 widoczny jest wyraźny jego trend spadkowy. Gradient trendu spadkowego utrzymał się przez kolejny miesiąc (vide rysunek poniżej), po czym ustabilizował się na poziomie nieco powyżej 70% poboru prądu nominalnego. Wyżej opisana zmiana była spowodowana przez postępujące zapychanie się filtra powietrza.



Wydział UR nie zdecydował się na wymianę filtra, a podjął jedynie próbę (25 kwietnia) jego oczyszczenia z pomocą sprężonego powietrza. Działanie to minimalnie poprawiło efektywność pracy instalacji o czym świadczy fakt nieznacznego wzrostu poboru prądu przez silnik (co może być interpretowane jako nieznaczne zwiększenie objętości przepychanego powietrza) i w konsekwencji już po ~4 tygodniach alarm „Watch Load” został zainicjowany ponownie. 20 sierpnia 2009 roku dokonano wymiany filtra na nowy, co spowodowało skokowy wzrost poboru prądu (do poziomu oczekiwanego), a system indykacji anomalii zaprzestał alarmowania.

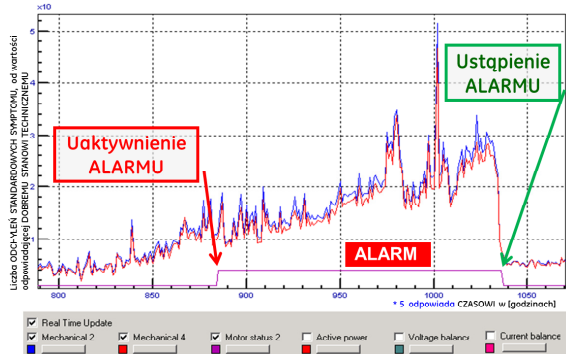


Na podstawie powyższych analiz można domniemać, że w przeciągu około pół roku wymiana powietrza nie odpowiadała założeniom projektowym walcowni, natomiast dzięki (i) zastosowanemu systemowi monitorowania – problem został rozpoznany, a efektywność podjętej akcji naprawczej (w maju) mogła być oceniona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

Opisany powyżej przypadek rozpoznania niepoprawności działania instalacji wyciągowej jest trudny do zdiagnozowania z pomocą innych, tradycyjnie stosowanych metod diagnostycznych, jak np. monitorując drgania węzłów łożyskowych.

4.3. Rozpoznanie uszkodzenia sprzęgła

Tak jak było to przedstawione w [4,11,12] system detekcji anomalii oparty na sygnałach elektrycznych może również rozpoznawać anomalie mechaniczne agregatu. W tym punkcie zostanie omówiony przypadek innego agregatu wykorzystywanego w walcowni, w którym stosowane jest sprzęgło zębate. Na wykresie poniżej pokazano 3 krzywe. Dwie z nich dotyczą symptomów mechanicznych (dla wybranych dwóch spośród 22 generowanych w systemie monitorowania) i pokazują wzrastające odchylenie od normalnego stanu technicznego natomiast trzecia krzywa 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 wyniki ewidentnie wskazujące na systematyczne pogarszanie stanu technicznego podjęto decyzję o zatrzymaniu agregatu celem dokonania jego szczegółowego przeglądu. Zi-

dentyfikowane zostało zaawansowane zużycie sprzęgła zębatego (vide fotografia), a wspomniane wcześniej skoki wartości symptomów były najprawdopodobniej spowodowane wyłamaniami kolejnych zębów sprzęgła.

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



5. Zakończenie

Monitorowanie sygnałów elektrycznych stanowić może interesującą dywersyfikację pomiarową dla ważnych maszyn huty, oraz w szeregu przypadków może być traktowane jako interesująca alternatywa w stosunku do tradycyjnych metod monitorowania. Jest to unikalne rozwiązanie, które w odróżnieniu od metod tradycyjnych umożliwia nie tylko ocenę stanu technicznego, ale także daje możliwość rozpoznawania anomalii procesowych.

6. Literatura

- [1]. US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy: *Motor Tip Sheet #5, Replace V-Belts with Cogged or Synchronous Belt Drives*, September 2005.
- [2]. US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy: *Motor Tip Sheet #2, Eliminate Voltage Unbalance*, JAN 2000.
- [3]. US Department of Energy Web Page: http://www1.eere.energy.gov/femp/program/operations_maintenance.html, March 2013.
- [4]. Nowicki R.: *Zróżnicowanie systemów On-Line nadzoru stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 89/2011, str. 65-73.
- [5]. Nowicki R., Pappas Y.: *Intelligent Maintenance Support of Hydro Station Asset Management*, Proceedings of International Conf. OCT 29-31, 2012, Bilbao, Spain.

- [6]. Nowicki R., Bate M.: *Inteligentne podejście w rozpoznawaniu anomalii pracy maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi*, Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, 2013, przesłane do redakcji.
- [7]. Duyar A., Merrill W. C.: *Fault Diagnosis For the Space Shuttle Main Engine*, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 15, no. 2, 1992, 384-389.
- [8]. Litt J., Kurtkaya M., Duyar A.: *Sensor Fault Detection and Diagnosis of the T700 Turboshaft Engine*, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 187, no. 3, 1995, 640-642.
- [9]. Musgrave J. L., Guo T., Wong E., Duyar A.: *Real-Time Accommodation of Actuator Faults on a Reusable Rocket Engine*, IEEE TCST, vol. 5, no. 1, 1997, 100-109.
- [10]. 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, 1994, 104-108.
- [11]. Duyar A.: *Simplifying Predictive maintenance*, Orbit Magazine, Vol. 31, No. 1, 2011, 38-45.
- [12]. Artesis AMT Toolkit, <http://www.artesis.com/products/amt/>, 2013.
- [13]. US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, *Motor Systems Tip Sheet #7, Eliminate Voltage Unbalance*, Nov. 2012.

7. Autorzy



James Song
 jssong@poscotfs.com
 TFS Global Co., Ltd., Posco
 1st Venture Co.
 #416 Mario Digital Tower,
 222-12 Guro-dong, Guro-gu,
 Seoul / Korea
 (+82) 2 890 6629



Dr inż. Ryszard Nowicki
 Ryszard.Nowicki@ge.com
 GE Power Controls Sp. z o.o.
 60-432 Poznań, ul.
 Myśluborska 62 / Polska
 (+48) 601 710 700



Prof. Dr. Ahmet Duyar
 Ahmet.duyar@artesis.com
 Artesis
 GOSB Teknoparki, Hightech
 Binasi, Kat 3/B 10, Gebze
 41480 Kocaeli / Turcja
 (+90) 262 678 8860