

**A. Nowak, P. Rzeszuciński, M. Cyniak, J. Ottewill, M. Wnek, P. Mulay**  
**ABB, Aleksandrów Łódzki**  
**W. Gaura, W. Pytko, Lafarge Cement, Małogoszcz**

## **MONITORING ZDALNY W PRAKTYCE – 6 MIESIĘCY DOŚWIADCZEŃ Z INSTALACJI ZDALNEGO MONITORINGU SILNIKA AML 630 L6BAB W CEMENTOWNI LAFARGE KUJAWY**

### **REMOTE CONDITION MONITORING IN PRACTICE – 6 MONTH EXPERIENCE OF REMOTE MONITORING OF AML 630 L6BAB MOTOR AT LAFARGE KUJAWY**

**Streszczenie:** Optymalizacja procesów utrzymania ruchu, czyli podnoszenie niezawodności urządzeń przy równoczesnej redukcji kosztów, wymagają współpracy i wsparcia ze strony producentów maszyn i ich centrów serwisowych. Efektywność tej współpracy może zostać znacznie poprawiona dzięki systemom diagnostycznym oraz umożliwieniu zdalnej współpracy, pozwalającej na łatwy dostęp do wiedzy i doświadczeń specjalistów. Aspekty te zostały przedstawione na podstawie opisu doświadczeń związanych ze zdalnym monitoringiem wibracji silnika AML 630 L6BAB o mocy 3550 kW i napięciu znamionowym 6 kV, napędzającego młyn surowca. Zastosowany system obejmował zdalny monitoring wibracji w 4 niezależnych kanałach, mierzonych symulatnicznie. Obliczone przez system wskaźniki krytyczne, które wykorzystano następnie do analizy stanu silnika, zostały przesłane za pomocą modemu GSM i były następnie przechowywane na serwerze. Podgląd wartości współczynników oraz ich trendów, za pośrednictwem portalu diagnostycznego w trybie online, umożliwiał bieżącą obserwację stanu maszyny. W artykule przedstawiono szczegóły dotyczące samego systemu zdalnego monitoringu, jak również omówiono stan badanego silnika na podstawie zebranych pomiarów oraz przesłanych wskaźników krytycznych.

**Abstract:** Optimization of maintenance processes, which implies improving equipment reliability with simultaneous reduction in costs, require cooperation and support from the machine manufacturers and their service centers. The effectiveness of this cooperation can be greatly improved by the use of diagnostic systems and incorporating the concept of remote collaboration, allowing for easy access to the knowledge and experience of experts. These aspects have been presented on the basis of the description of the experience of the remote monitoring of vibrations of a 3550 kW AML 630L6BAB electric motor with rated voltage of 6 kV, driving a raw mill. The remote monitoring system comprises vibration measurements recorded simultaneously by 4 independent channels. The condition indicators derived by the system, which are used to analyze the condition of the engine, were transferred via a GSM modem and were then stored on the server. A preview of the value of the condition indicators and their trends over time can be made through a diagnostic portal online and allow a remote observation of the current state of the machine. This paper presents the details of the remote monitoring system, as well as discusses the condition of the monitored electric motor based on the collected measurements transferred values of the condition indicators.

**Słowa kluczowe:** *maszyny elektryczne, zdalny monitoring, badania diagnostyczne, wibracje*  
**Keywords:** *electrical machines, remote condition monitoring, diagnostics, vibration analysis*

#### **1. Wstęp**

Znajomość aktualnego stanu kluczowych dla danego zakładu silników elektrycznych stanowi podstawę profesjonalnego planowania zadań prewencyjnych i całości utrzymania ruchu. Przewodzenie systematycznych badań diagnostycznych staje się powoli standardem przemysłowym w większości przedsiębiorstw przemysłowych. W ostatnich latach prężnie rozwija się segment tak zwanego zdalnego monitoringu, który pozwala na ciągłą analizę (w trybie on-

line) i natychmiastowe wykrywanie możliwych problemów.

#### **2. System zdalnego monitoring**

Zastosowany system zdalnego monitoringu w omawianym przypadku obejmował monitoring wibracji w 4 niezależnych kanałach, mierzonych symultanicznie. Pomiar prowadzone były w dwóch reżimach próbkowania – wysokoczęstotliwościowym do diagnostyki łożysk oraz niskoczęstotliwościowym do analizy zwykłych de-

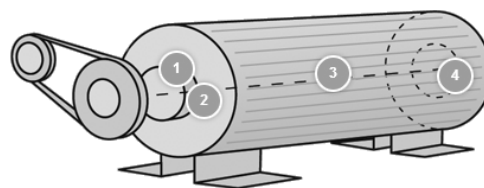
fektów mechanicznych. System oblicza na bieżąco krytyczne wskaźniki, które pozwalają na detekcję różnych uszkodzeń silnika. Wyznaczone parametry są następnie przesyłane za pośrednictwem modemu GSM i przechowywane na serwerze. Portal diagnostyczny umożliwia podgląd wartości współczynników oraz ich trendów w trybie on-line dla uprawnionych użytkowników. Ponadto, w odróżnieniu od standardowych rozwiązań, dane te są dodatkowo analizowane przez Regionalne Centrum Serwisowe, a odpowiednie raporty są dostarczane przez strony portalu diagnostycznego wprost do użytkownika. Diagnostyka przebiega więc dwupoziomowo: automatycznie, w oparciu o opracowane algorytmy oraz w oparciu o specjalistyczną wiedzę oraz doświadczenie pracowników Centrów Serwisowych.

## 2.1. Architektura systemu

System składa się z jednostki zbierającej dane (DAU – Data Analysis Unit), opartej na komercyjnej platformie linuxowej. Jednostka DAU wyposażona jest w szereg kanałów pomiarowych, między innymi cztery kanały do pomiaru wibracji, 8 do pomiaru temperatury, 1 do pomiaru napięcia i 1 do pomiaru prądu. DAU łączy się zdalnie z serwerem w sposób standardowy, poprzez sieć internetową, bądź bezprzewodowo przy użyciu zintegrowanego modemu GSM. Aby ograniczyć transfer danych, wstępne przetwarzanie zebranych pomiarów wibracji następuje na miejscu, z zastosowaniem dedykowanych algorytmów pozwalających na wyliczenie Wskaźników Stanu (KCP – Key Condition Parameters). Wskaźniki KCP przesyłane są do centralnej bazy danych, gdzie są porównane z progami alarmowymi. W razie wystąpienia nagłej zmiany i przekroczenia progu alarmowego, informacja ta zostaje przekazana do pracowników Centrum Serwisowego lub/i użytkownika. W przypadku potrzeby dokonania dokładniejszej analizy danych, istnieje również możliwość przesłania całości danych pomiarowych do bazy centralnej, gdzie następuje ich dalsze, szczegółowe opracowywanie.

## 2.2. Wskaźniki stanu

Stan maszyny/silnika jest oceniany w oparciu o tzw. Wskaźniki Stanu, które obliczane są na podstawie dedykowanych algorytmów analizujących pomiary wibracji pochodzące z wszystkich czterech kanałów. Sensory rozmieszczone są jak na Rys.1.



Rys. 1. Rozmieszczenie akcelerometrów: strona napędowa pionowo i poziomo (1 i 2), strona nienapędowa poziomo (4), na obudowie poziomo (3)

Przykładowe wskaźniki to :

- wskaźniki dla łożysk tocznych (kurtoza, kurtoza HF, wsp. szczytu, wartość międzyszczytowa),
- wskaźniki eksploatacyjne (liczba startów, poślizg, prędkość),
- wskaźniki wibracyjne (amplituda, prędkość, harmoniczne (1-5), przes. fazowe, przyspieszenie).

BEARING DRIVE SIDE				Status
✓ Bearing DS Crest Factor	Value 4.702	Timestamp 11/1/2012 2:31:10 PM		IT
✓ Bearing DS High Frequency RMS	Value 0.800 g/s	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing DS Kurtosis	Value 3.521	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing DS Modified Crest Factor	Value 0.038	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing DS Peak To Peak	Value 5.891 g/s	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
BEARING NON DRIVE SIDE				Status
✓ Bearing NDS Crest Factor	Value 4.788	Timestamp 11/1/2012 2:31:10 PM		IT
✓ Bearing NDS High Frequency RMS	Value 0.040 g/s	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing NDS Kurtosis	Value 3.501	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing NDS Modified Crest Factor	Value 0.035	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT
✓ Bearing NDS Peak To Peak	Value 5.071 g/s	Timestamp 11/2/2012 12:11:30 AM		IT

Rys. 2. Przykładowy odczyt wskaźników stanu dla łożysk

## 3. Metody diagnostyczne

System diagnostyczny jest wyposażony w wiele metod mających za zadanie wykrywanie specyficznych rodzajów uszkodzeń w monitorowanych komponentach. Wiele z nich opartych jest na statystycznej analizie mierzonych wielkości, głównie z dziedziny wibracji. Spośród różnych wskaźników stanu opartych o statystyczne parametry sygnału, do najczęściej stosowanych w przemyśle należą kurtoza, współczynnik szczytu, średnia kwadratowa (odniesiona do wartości precyzowanych w standardach), czy wartość międzyszczytowa.

Kurtoza jest miarą spłaszczenia rozkładu amplitudy i definiuje się ją jako czwarty normalizowany moment centralny sygnału. Matematycznie wartość kurtozy otrzymuje się jak we wzorze (1) [1]:

$$kurtoza = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)^2} \quad (1)$$

gdzie  $x$  reprezentuje analizowany sygnał,  $N$  oznacza ilość próbek sygnału,  $x_i$  to próbka o numerze  $i$  sygnału, a  $\bar{x}$  to średnia arytmetyczna sygnału. Kurtoza znajduje zastosowanie jako wskaźnik obecności impulsów w sygnale (charakterystycznych dla uszkodzeń np. przekładni zębatych czy łożysk tocznych). Pojawienie się impulsów w sygnale sprawia, iż rozkład jego amplitudy przybiera bardziej stromą postać, co powoduje zwiększenie wartości kurtozy. Tym samym na wyjściu systemu pojawia się informacja o postępujących zmianach.

Wartość średnio kwadratowa (ang. *Root Mean Square - RMS*) jest wyznacznikiem ilości energii zawartej w analizowanym sygnale i definiuje się ją, jak w równaniu (2) [1]:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}} \quad (2)$$

Wartość RMS sama w sobie nie niesie istotnych informacji diagnostycznych, o ile nie jest porównywana z wartościami precyzowanymi w standardach (np. ISO 10816). Informują one o progach dopuszczalnych wartości powyżej których powinny zostać podjęte odpowiednie czynności korekcyjne układu.

Współczynnik szczytu (ang. *Crest Factor - CF*) jest wskaźnikiem o zbliżonej zasadzie działania do kurtozy, jednak operującym w oparciu o odmienne założenia. CF definiuje się jako stosunek maksymalnej amplitudy wartości bezwzględnej analizowanego sygnału do wartości średnio kwadratowej [2]:

$$CF = \frac{\max|x|}{RMS} \quad (3)$$

gdzie  $\max|x|$  symbolizuje maksymalną amplitudę wartości bezwzględnej sygnału  $x$ . Pojawienie się zwiększonej amplitudy w sygnale nie zawsze oznacza pogarszający się stan techniczny maszyny, dlatego maksymalna wartość w sygnale nie niesie sama w sobie informacji diagnostycznej. Dopiero odniesienie tej wartości do wartości informuje, czy zwiększenie CF jest spowodowane ogólnym wzrostem amplitudy wynikającym z warunków pracy maszyny

np. wskutek zwiększonego obciążenia (niska wartość CF), czy wynika z pojawienia się impulsów w sygnale (wysoka wartość CF) mogących zwiastować uszkodzenie mechaniczne systemu.

Wartość międzyszczytowa (ang. *Peak-to-Peak - PP*) jest wyznaczana jako suma dwóch skrajnie ekstremalnych wartości (największa i najmniejsza) w analizowanym sygnale [3]:

$$PP = \max(x) + |\min(x)| \quad (4)$$

gdzie  $\min(x)$  symbolizuje najmniejszą amplitudę w sygnale  $x$ . Wartość międzyszczytowa analizowana indywidualnie nie niesie ze sobą wartościowych informacji diagnostycznych, gdyż jej wartość jest silnie zależna od warunków pracy danego elementu. Jednak analiza wartości międzyszczytowej przez pryzmat innych parametrów (jak np. kurtoza czy RMS) pozwala na rzetelną ocenę warunków pracy dzięki informacji o maksymalnej ilości energii zawartej w analizowanym sygnale.

Analiza spektrum wibracji jest kolejną, jedną z wielu znanych metod pozwalającą na oszacowanie stanu maszyn elektrycznych. Wykorzystuje ona fakt, że uszkodzenia powstałe w komponentach prowadzą do powstania dodatkowych wibracji powtarzających się okresowo. Częstotliwości związane z niewyrównoważeniem statycznym lub dynamicznym silnika, czy też uszkodzeniem prętów silnika są powszechnie znane i wielokrotnie opisywane w literaturze [5] - [10]. Pole magnetyczne w szczelinie powietrznej powoduje powstawanie sił przyciągania między stojanem a wirnikiem, co prowadzi do pojawienia się wibracji [5]. Monitorowanie amplitudy pików związanych z tymi częstotliwościami umożliwia detekcję powstałych uszkodzeń. Częstotliwości te oblicza się jak w równaniach (5) – (7).

Niewyrównoważenie statyczne silnika synchronicznego skutkuje powstaniem dodatkowych pików  $f_{synch,ns}$  o częstotliwości:

$$f_{synch,ns} = 2f \quad (5)$$

gdzie  $f$  to częstotliwość napięcia zasilającego. Niewyrównoważenie dynamiczne silnika synchronicznego prowadzi do powstania pików w częstotliwości  $f_{synch,nd}$ :

$$f_{synch,nd} = \frac{f}{p} \quad (6)$$

Niewyrównoważenie statyczne i dynamiczne silnika indukcyjnego można zauważyć w spektrum wibracji analizując szereg częstotliwości  $f_{ind, \frac{nd}{sd}}$  związanych z tego typu uszkodzeniem:

$$f_{ind, \frac{nd}{sd}} = f_w [(nN_r \pm k_e)(1-s) \pm pk] \quad (7)$$

$f_w$  – częstotliwość obrotowa wirnika

$N_r$  – liczba prętów wirnika

$s$  – poślizg

$p$  – liczba par biegunów

$n$  – kolejna harmoniczna (0,1,2,3...)

$k_e$  – liczba porządkowa niewyważoności (0 dla statycznego niewyważenia, 1,2,3... dla dynamicznego niewyważenia)

$k$  – numer harmonicznej (1, 3, 5, 7 ...)

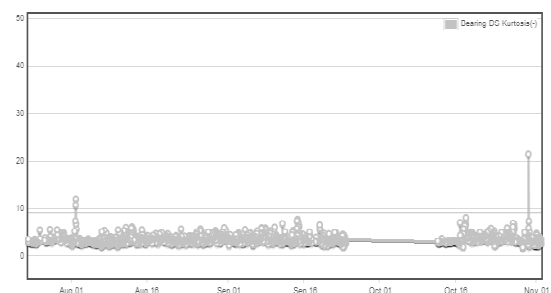
Dedykowane algorytmy, zaimplementowane w systemie zdalnego monitoringu, automatycznie analizują spektrum wibracji. Oprócz wymienionych powyżej, opisywanych w literaturze częstotliwości charakterystycznych dla danego rodzaju uszkodzenia, analizowane są również dodatkowe częstotliwości, poprawiające skuteczność algorytmów.

#### 4. Analiza przypadku

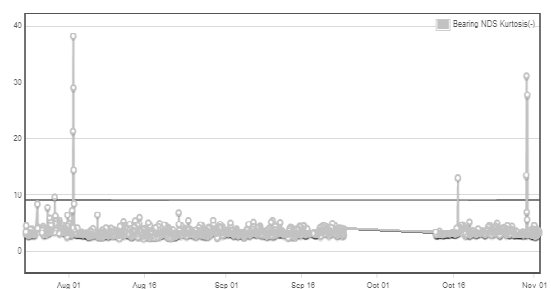
W okresie pracy systemu diagnostycznego nie wystąpiły zdarzenia, które prowadziłyby do niezaplanowanego przestoju w pracy cementowni. Poniżej opisano rezultaty monitoringu w oparciu o sygnały wibracyjne generowane przez silnik pierścieniowy typu AML 630 L6BAB o mocy 3550kW i napięciu znamionowym 6kV napędzający młyn cementu.

Dla zobrazowania idei zostały przedstawione 4 wykresy trendu dla wartości kurtozy i zmodyfikowanego współczynnika szczytu (wewnętrzny wyznacznik stanu opracowany przez firmę ABB) zarejestrowane w okresie 6 miesięcy. Warto zauważyć, że każdy z tych trendów posiada okres bez pomiarów - od 24 września do 12 października, kiedy przeprowadzane były rutynowe działania serwisowe. Analiza trendu kurtozy (Rys 3 i 4) pokazuje, że przez niemal cały okres 6 miesięcy pomiarów żadna z wartości tego wyznacznika nie przekroczyła progu alarmowego. Co prawda można zaobserwować kilka jednostkowych sytuacji, w których wartość ta została przekroczona, jednak sytuacje te nie doprowadziły do długotrwałych przekro-

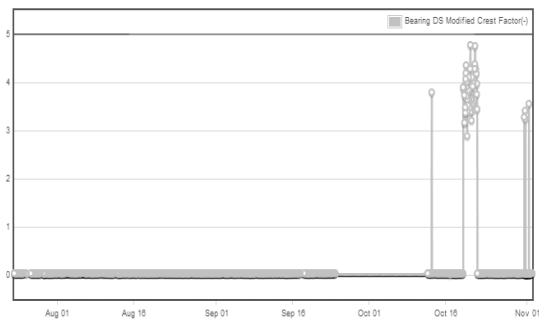
czeń progu alarmowego, a co za tym idzie zostały zinterpretowane przez system jako nieistotne. Zdarzenia te mogły zostać spowodowane przemysłowymi warunkami pracy prowadzącymi do pojawiania się impulsów nie związanych z faktycznym stanem technicznym monitorowanych komponentów. Podobne zmiany można zauważyć w przypadku zmodyfikowanego współczynnika szczytu (Rys. 5 i Rys. 6), który przez znakomitą większość czasu pracy nie wykrywał żadnych anomalii. Z drugiej strony analiza trendów pokazuje, że w okolicach połowy października, a następnie pod koniec listopada miało miejsce kilka przeciągających się okresów zwiększonych wartości zmodyfikowanego współczynnika szczytu. Wartości te pozostawały poniżej stanów alarmowych, jednak pewne rutynowe czynności zostały podjęte, aby sprawdzić czy analizowane sygnały wibracyjne nie posiadają symptomów mogących sygnalizować początek zmian któregoś z komponentów.



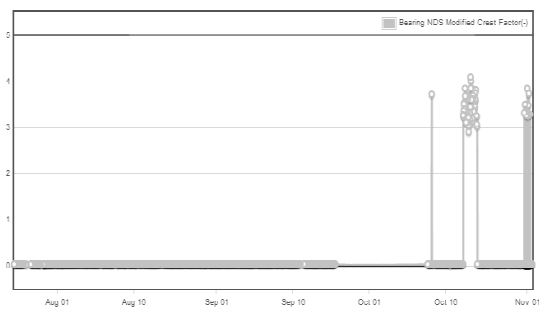
Rys. 3. Wartości kurtozy w czasie 6-miesięcznego monitoringu – strona nadawcza



Rys. 4. Wartości kurtozy w czasie 6-miesięcznego monitoringu – strona odbiorcza



Rys. 5. Wartości zmodyfikowanego współczynnika szczytu w czasie 6-miesięcznego monitoringu – strona nadawcza



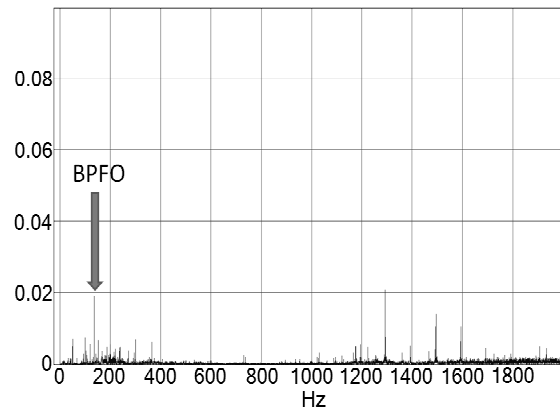
Rys. 6. Wartości zmodyfikowanego współczynnika szczytu w czasie 6-miesięcznego monitoringu – strona odbiorcza

Rys. 7 i 8 pokazują spektra wibracji zarejestrowanych po stronie nadawczej silnika. Analiza spektralna pozwoliła zidentyfikować obecność jednej z charakterystycznych częstotliwości mogących wystąpić przy uszkodzeniu łożyska tocznego - częstotliwość defektu pierścienia zewnętrznego - częstotliwość defektu pierścienia zewnętrznego (ang. *Ball Pass Frequency Outer* – *BPFO*). Częstotliwość ta jest określana na podstawie wzoru (8) [4]:

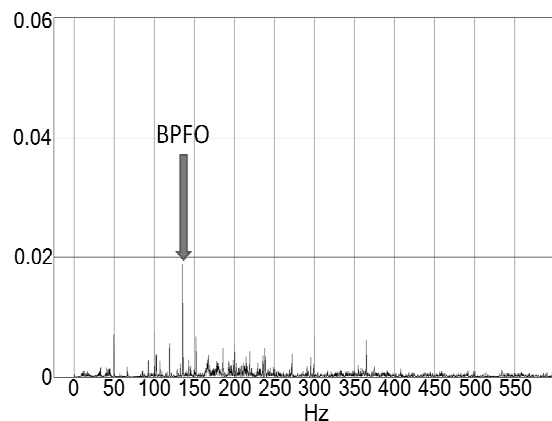
$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos(\Theta)\right) f_r \quad (8)$$

gdzie  $N$  oznacza ilość elementów tocznych w łożysku,  $b$  oznacza średnicę elementu tocznego,  $B$  symbolizuje odległość między przeciwległymi elementami tocznymi w łożysku,  $\Theta$  oznacza kąt pomiędzy elementami tocznymi, a pierścieniami,  $f_r$  symbolizuje prędkość obrotu wału, na którym dane łożysko pracuje. Dla prędkości wału 16.5Hz BPFO wynosi 137.9Hz i odpowiada częstotliwości oznaczonej na Rys. 7 i 8. Obserwacja ta pozwala przypuszczać, iż fakt, że system diagnostyczny nie zgłosił stanu alarmowego znajduje odzwierciedlenie w bardzo po-

czątkowej fazie ewentualnego uszkodzenia łożyska.



Rys. 7. Spectrum sygnału wibracyjnego z oznaczoną częstotliwością defektu pierścienia zewnętrznego



Rys. 8. Powiększony widok Rys. 7

## 5. Wnioski

Opisany system zdalnego monitoringu pozwala na optymalizację procesów utrzymania ruchu. Możliwość ciągłej obserwacji Wskaźników Stanu oraz ich trendów pozwala na natychmiastowe zauważenie powstających błędów w silniku. Generowane raporty dostarczane do klienta umożliwiają zaplanowanie działań serwisowych w celu poprawy jakości działania maszyny i/lub wymiany jej komponentów. Współpraca z Regionalnym Centrum Serwisowym nie tylko zapewnia regularną weryfikację przesyłanych danych, lecz także umożliwia dogłębną analizę zebranych danych przez specjalistów. Zaimplementowane w systemie algorytmy przeprowadzają automatyczną diagnostykę maszyn, a wynik ich działania dostępny jest przez cały czas poprzez diagnostyczny serwis internetowy.

## 6. Literatura

- [1]. Vecer, P., Kreidl, M., Smid, R. *Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems*, Acta Polytechnica, 45(6): 35-43, 2005.
- [2]. Hartmann, W.M. *Signals, sound and sensation*, Springer, 1997
- [3]. Mobley, R.K. *Vibration Fundamentals Plant Engineering Maintenance*, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [4]. Tandon, N. *A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings*, Measurement, Vol. 12, p.285-289, 1994.
- [5]. Frosini L., Pennacchi P. *Detection and modelling of rotor eccentricity in electrical machines – an overview*, Eight International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, 2004.
- [6]. Hanna, R. A, Klinowski P., *Failure Analysis of Three-Slow Speed Induction Motors for Reciprocating Load Applications*, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 43, No. 2, April/March 2007.
- [7]. Bonnett, G.C. Soukup, *Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors* IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 24, Issue 6, Nov/Dec 1988 Page(s):1124 – 1130.
- [8]. Bonnett, G.C. Soukup *Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 28, Issue 4, Jul/Aug 1992 Page(s):921 – 937.
- [9]. Vas, P. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines* Oxford: Calendar Press, 1993.
- [10]. S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso, H.A. Toliyat, *Diagnosis of stator, rotor and airgap eccentricity faults in three-phase induction motors based on the multiple reference frames theory*: Industry Applications Conference, Publication Date: 12-16 Oct. 2003 Volume: 2, On page(s): 1340- 1346 vol.2.