

# Diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych w przemyśle cementowym. Zagadnienia wybrane. Część I

Marek Kacperak, Sławomir Szymaniec

## 1. Wprowadzenie

Diagnostyka eksploatacyjna [1–5] jest to zespół działań podjętych w danym zakładzie przemysłowym w trakcie prowadzenia produkcji w celu uzyskania informacji o:

- aktualnym stanie technicznym urządzeń;
- przyczynach pogorszenia się stanu technicznego urządzenia;
- prognozowanym czasie bezawaryjnej pracy urządzenia;
- koniecznych zabiegach konserwacyjnych i remontowych przy najbliższym postoju.

Autorzy od wielu lat zajmują się między innymi szeroko rozumianą diagnostyką techniczną w krajowym przemyśle cementowo-wapienniczym. W niniejszym artykule i w kolejnych jego częściach przedstawiają zagadnienie diagnostyki eksploatacyjnej w przykładowej krajowej cementowni.

Analiza awaryjności napędów elektrycznych w cementowni określiła newralgiczne miejsca w procesie produkcyjnym, decydujące o awaryjności cementowni. Do licznych wypadków wypalenia wirników napędów młynów cementu dochodziło przez zbyt częste załączanie silników. Zły stan techniczny sprzęgieł i fundamentów sprzyjał degradacji łożysk. W układach wentylatorów dochodziło do drgań spowodowanych technologicznym niewyważeniem wirników. Analiza awaryjności określiła również zakresy koniecznych zmian wyposażenia elektrycznego. Do najważniejszych należała wymiana przestarzałych zabezpieczeń oraz wyłączników mocy pól 6 kV.

## 2. Wprowadzenie układów i systemów diagnostycznych

Do najbardziej efektywnych sposobów diagnostyki stosowanych w ważnych zespołach maszynowych należą techniki diagnostyki online:

- pomiar drgań względnych dla napędów z łożyskami ślizgowymi wolny jest od negatywnego wpływu filmu olejowego na wynik pomiaru;
- pomiary wyładowań niepełnych monitorują w sposób ciągły izolację maszyn elektrycznych. Pokazują powstałe defekty izolacji. Układ wykrywa degradację stanu izolacji maszyny, przez co możemy podjąć działania naprawcze oraz korygować niekorzystne warunki pracy silnika.

### 2.1. Klasyfikacja napędów

Układ napędowy należy rozpatrywać w całości jako obiekt diagnostyczny. Dobór sprzętu i metod diagnostycznych uzależniony jest od budowy maszyn i środowiska pracy. Mając wyspecyfikowane cechy charakterystyczne układu napędowego, możemy rozpatrywać wpływ jego elementów na stan techniczny

**Streszczenie:** Artykuł opisuje przykład zastosowania nowej technologii i organizację efektywnej diagnostyki eksploatacyjnej napędów elektrycznych w przemyśle cementowym, na wdrożonym przykładzie. Zastosowana diagnostyka offline obejmuje uszkodzenia typu elektromagnetycznego i mechanicznego. Autorzy zaproponowali zmianę zasad eksploatacji maszyn, wprowadzili zmiany w zabezpieczeniach maszyn i urządzeń. Zestawienie zespołów napędowych w cementowni z podziałem na grupy o różnej ważności: maszyny strategiczne, maszyny podstawowe, maszyny pomocnicze. Dla poszczególnych grup maszyn wprowadzili diagnostykę offline i online.

Autorzy przedstawiają efektywne sposoby diagnostyki online stanu maszyn elektrycznych, takie jak:

- pomiar drgań względnych dla napędów o łożyskach ślizgowych;
- pomiar wyładowań niepełnych monitorujący w sposób ciągły izolację główną, zwojową maszyn elektrycznych.

Słowa kluczowe: kompleksowa diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych

### EXPLOITATION DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MACHINES IN CEMENT INDUSTRY - AN EXAMPLE APPLICATION

**Abstract:** Article introduced a new technology and the organization of effective operational diagnostics of electric drives in the cement industry. Offline diagnostics includes failure electromagnetic and mechanical type. Authors proposed to change the rules of operation of machines, has introduced changes in the security machinery and equipment. Summary of the power units in the cement division into groups of varying importance: Strategic machine, basic machines, auxiliary machines. For each group machines introduced diagnostic offline and online method. The authors present an effective ways of online diagnostics condition electrical machines such as:

- Vibration measurement relative to the drives slide bearings
- Measurement of partial discharge monitoring continuously the main insulation, coil of electrical machinery.

Keywords: complex exploitation diagnostics of electric machines

oraz analizować otrzymane wyniki pomiarów diagnostycznych. Klasa stosowanej aparatury oraz częstotliwość pomiarów zależy od miejsca maszyny w układzie technologicznym.

Tabela 1. Maszyna strategiczna – pomiary

Lp.	Maszyna	Pomiary offline		Pomiary online					
		Drgania bezwzgl.	Pomiary izolacji	Temp. uzwojeń	Temp. łożysk	Drgania bezwzgl.	Drgania względne	Obciąż.	wnz
	<b>Maszyny strategiczne</b>								
1	Napęd młyna surowca	1	1	1	1	1		1	1

W cementowni wprowadzono podział maszyn w układach technologicznych według ich ważności:

- maszyny strategiczne – są to urządzenia inwestycyjnie drogie, których zatrzymanie awaryjne powoduje przestój w produkcji, generujący znaczne straty ekonomiczne;
- maszyny podstawowe – są to ważne napędy technologiczne, które można zastąpić pracą innych urządzeń, postój nie powoduje całkowitego zatrzymania produkcji;
- maszyny pomocnicze – urządzenia spełniające dodatkowe funkcje, ich zatrzymanie nie powoduje wstrzymania produkcji.

Maszyny strategiczne i podstawowe wymusiły konieczność dążenia do obserwacji ich pracy w sposób ciągły przez pomiary diagnostyczne online [3, 4, 5].

Obecnie silniki maszyn strategicznych wyposażane są w:

- czujniki temperatur łożysk i uzwojeń;
- czujniki drgań układu łożyskowego w osiach X, Y i Z;
- pomiar obciążenia z alarmami przeciążenia;
- pomiar parametrów środowiska pracy.

Dla poszczególnych grup maszyn ustalono zakresy prowadzonej diagnostyki. Dla przykładu pomiary diagnostyczne dla maszyn strategicznych przedstawia tabela 1.

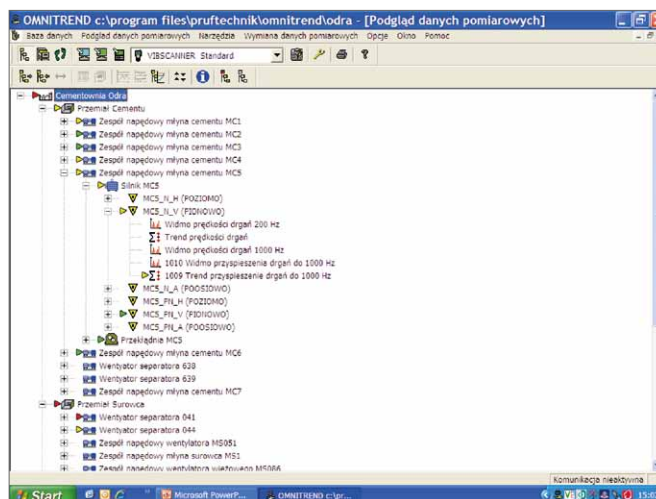
## 2.2. Monitoring układów napędowych

Zalety monitoringu online przedstawiają się następująco:

- monitoring układów napędowych pozwala na określenie stanu technicznego instalacji;
- archiwizowanie danych diagnostycznych poszczególnych obiektów pozwala planować zakresy rocznych remontów;
- rejestracja zaistniałych usterek i awarii;
- obserwacja poszczególnych parametrów technologicznych, występowanie ich obok sygnałów pomiarowych, pomaga analizować przyczyny występowania alarmów w systemie;
- wyfiltrowanie stanów awaryjnych od zakłóceń procesu technologicznego;
- śledzenie trendów sygnałów z programowanymi poziomami:
  - normalnej pracy (zakres zielony),
  - stan ostrzegawczy (zakres żółty),
  - stan awaryjny – wyłączenie (zakres czerwony).

Stan ostrzegawczy generuje alarm wyświetlony dla operatora na sterowni. Stany awaryjne dodatkowo obsługiwane są sekwencją wyłączenia (wykonywane są czynności zabezpieczające, w sytuacjach krytycznych napęd się wyłącza);

- pomiar temperatury uzwojeń, temperatury łożysk, pomiary drgań. Prawidłowe dobranie kryteriów alarmowych i awaryjnego odstawienia urządzenia;
- modelowanie zabezpieczeń pól 6 kV zasilających silniki.



Rys. 1. System ścieżek pomiarowych obiektów technologicznych, pomiary offline drgań bezwzględnych

## 2.3. Pomiary drgań bezwzględnych offline – badania własne

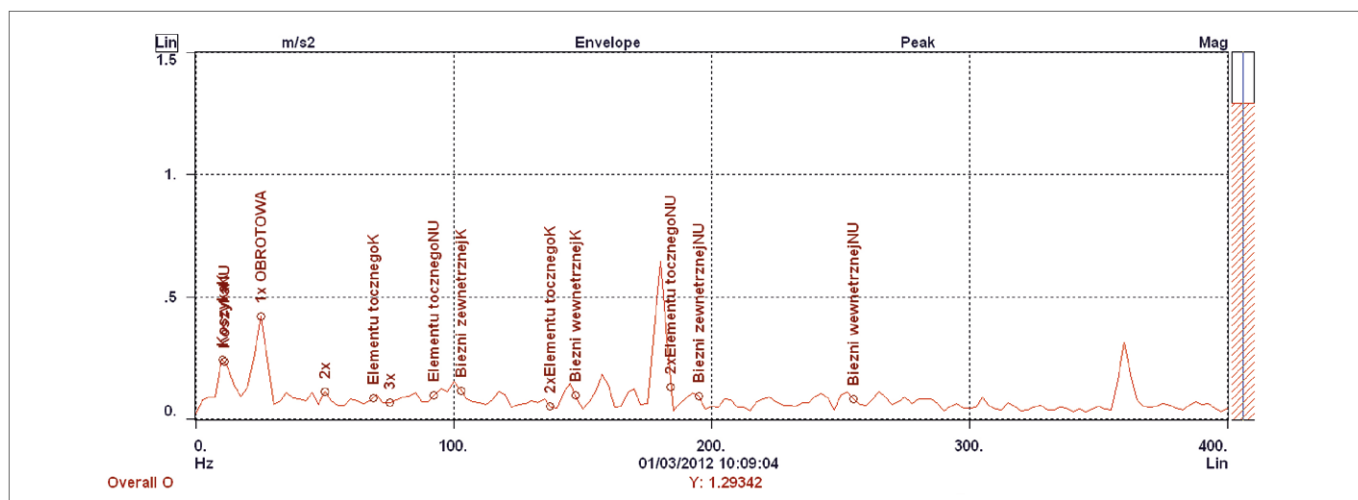
Dużym problemem cementowni jest żywotność łożysk tocznych zainstalowanych w urządzeniach technologicznych. Złe warunki pracy łożysk w wysokiej temperaturze, w zapyleniu, przy intensywnych drganiach pochodzących od maszyn napędzanych, powodują występowanie częstych awarii. Praca ciągła układu technologicznego zezwala na przeprowadzanie czynności naprawczych raz w roku. Zadaniem służb utrzymania ruchu jest niedopuszczanie do awaryjnych wyłączeń instalacji. Ważnym zadaniem jest również określenie, które łożyska podczas remontu trzeba wymienić, a których stan techniczny pozwala na dalszą roczną eksploatację. Autorzy opracowali system kontroli drgań układów napędowych. Obiekty i punkty pomiarowe zostały jednoznacznie oznaczone. Generowane przez system diagnostyczny ścieżki pomiarowe ułatwiają organizację prowadzenia pomiarów. Czytelny układ rozmieszczenia punktów pomiarowych na napędzie zapobiega powstaniu błędów pomiarowych (rys. 1).

Opracowano trasy pomiarowe i określono częstotliwość badań okresowych stanu dynamicznego poszczególnych grup maszyn – tabela 2.

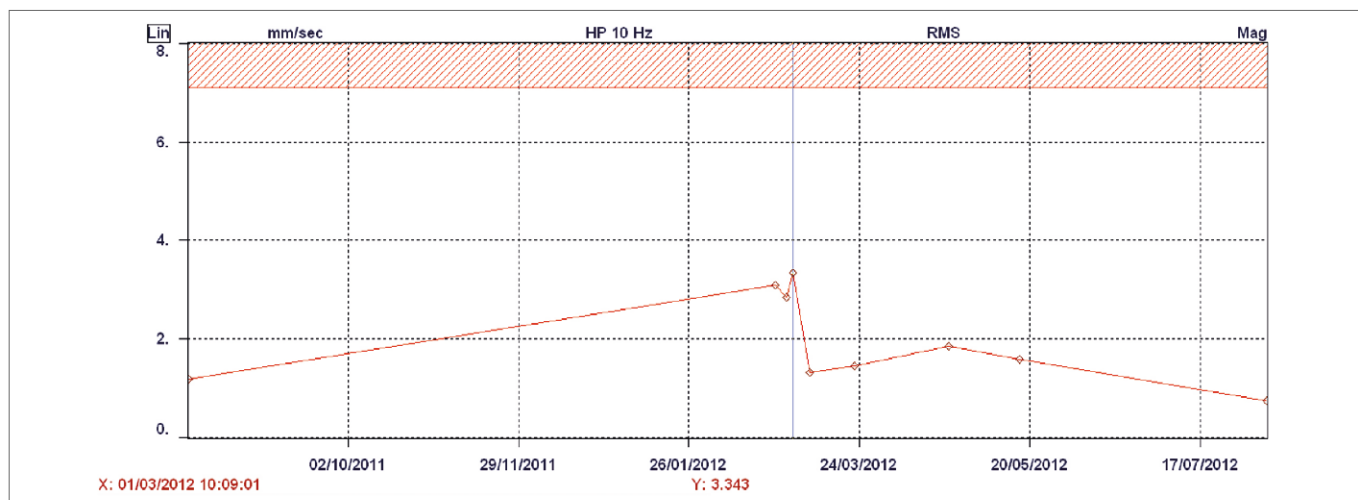
Przykładowo [3] podczas rutynowych pomiarów prowadzonych zgodnie z ustalonym systemem ścieżek (rys. 1) odnotowano wzrost wartości sygnału obwiedni dla łożyska strony napędowej wentylatora młyna surowca nr 051 silnik Sf560Y6-E 1000 kW, 1483 obr/min, 6 kV – rys. 2 i 3.

**Tabela 2.** Częstotliwość badań okresowych stanu dynamicznego poszczególnych grup maszyn, wartości graniczne prędkości drgań dla poszczególnych stanów pracy maszyn, drgania bezwzględne

Lp.	Maszyna układu technologicznego	Częstotliwość pomiarów	Stan pracy maszyn i wartości graniczne prędkości drgań $V_{RMS}$ [mm/s]		
			$V_{RMS} < B$	$B < V_{RMS} < C$	$C < V_{RMS} < D$
<b>Maszyny strategiczne</b>					
1	Napęd młyna surowca	co 4 tygodnie	2,5	7	10
2	Wentylator młyna surowca	co 4 tygodnie	3,5	8,5	11
3	Napęd pieca wypału klinkieru	co 4 tygodnie	2,5	7	10
4	Wentylatory obiegowe pieca nr 051, 098	co 4 tygodnie	3,5	7,5	11
5	Wentylator filtra pieca	co 4 tygodnie	3,5	7,5	11
6	Wentylator filtra chłodnika klinkieru	co 4 tygodnie </td <td>3,5</td> <td>7,5</td> <td>11</td>	3,5	7,5	11
7	Wentylatory chłodzenia rusztu chłodnika klinkieru	co 4 tygodnie	3,5	7,5	11
<b>Maszyny podstawowe</b>					
8	Napędy główne młynów cementu nr 1, 2, 3, 4, 5	co 8 tygodni	2,5	7	10
9	Napędy główne młynów cementu nr 6, 7	co 8 tygodni	2,5	7	10



Rys. 2. Widmo przyspieszeń drgań bezwzględnych do 400 Hz łożyska NU 222E silnika wentylatora młyna surowca punkt P1 V (pionowo) – uszkodzenie



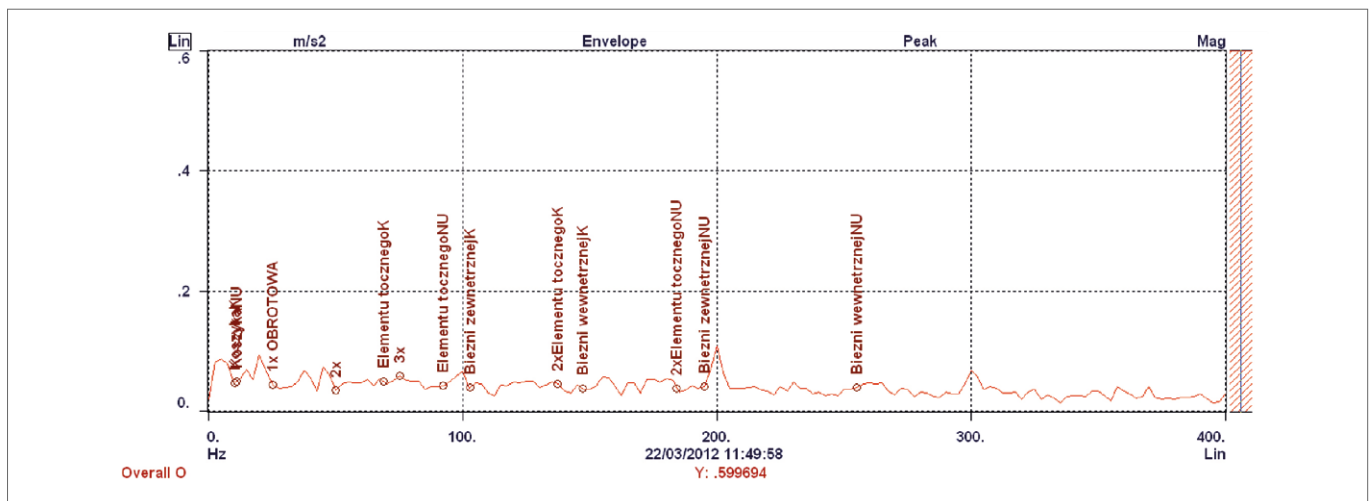
Rys. 3. Trend prędkości drgań bezwzględnych łożyska NU 222E silnika wentylatora młyna surowca punkt P1 V (pionowo)



Rys. 4. Bieżnia wewnętrzna łożyska NU222E



Rys. 5. Elementy toczne łożyska NU222E



Rys. 6. Widmo przyspieszeń drgań bezwzględnych do 400 Hz łożyska NU 222E silnika wentylatora młyna surowca punkt P1 V – dla nowego łożyska



Rys. 7. Zatarty wirnik silnika SYUe-148r/01 1000 kW 6 kV



Rys. 8. Uszkodzona panewka silnika SYUe-148r/01 1000 kW 6 kV

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono zdjęcia uszkodzonego łożyska. Po przeprowadzonej wymianie łożyska wykonano pomiary kontrolne widma drgań – rys. 6.

#### 2.4. Pomiary drgań względnych online – badania własne

Pomimo prowadzonych pomiarów drgań bezwzględnych offline na silnikach z łożyskami ślizgowymi na młynach cementu odnotowywano awarie panewek – rys. 8. W skrajnym wypadku dochodziło do zatarcia wirnika ze stojanem – rys. 7.

Pomiary offline nie dawały gwarancji zatrzymania układu napędowego zapobiegającego awarii [3]. Po przeprowadzonej analizie pracujących napędów z łożyskami ślizgowymi autorzy wytypowali – ze względu na dużą liczbę awarii – do pomiarów drgań względnych online silnik SYUe-148r/01 1000 kW, 740 obr/min, 6 kV i silnik SAS-158 1000 kW, 750 obr/min, 6 kV. Napędy te są silnikami młynów cementu, zaliczonych do grupy maszyn podstawowych. Rozwiązaniem problemu awarii panewek było wprowadzenie pomiaru drgań względnych wału.

Według wiedzy autorów jest to w kraju pierwsze tego typu rozwiązanie na silnikach krajowych. Do tej pory takie systemy pomiarowe stosowano do diagnostyki głównie maszyn przepływowych, w tym turbin oraz generatorów. Metoda diagnozowania polega na określeniu trajektorii czopa wału. Drgania są mierzone przez dwa bezdotykowe (zbliżeniowe) czujniki wiroprowadowe, mierzące przemieszczenie drgań, umieszczone w obudowie łożyska lub przymocowane do niej w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika – rys. 9.

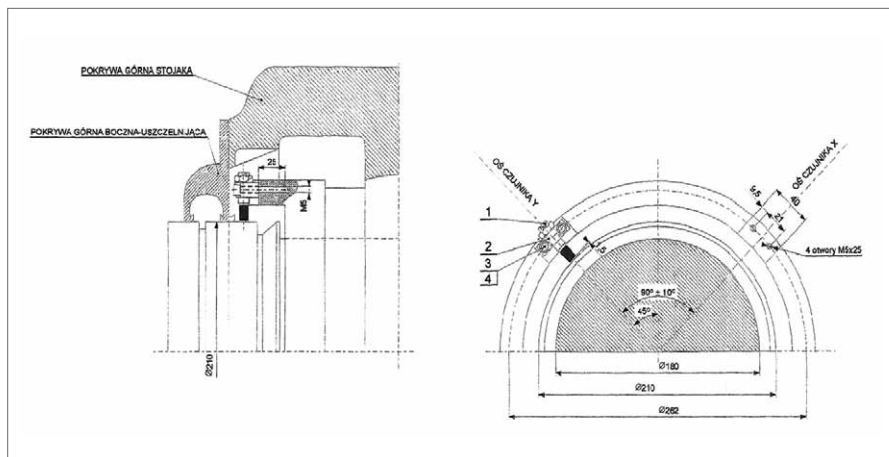
Pomiar drgań względnych w maszynach z łożyskami ślizgowymi jest korzystniejszy, sygnał pomiarowy nie jest tłumiony filmem olejowym panewek, umożliwia szybsze wykrycie uszkodzenia i zatrzymanie maszyny, przez co zmniejsza skutki oraz koszty awarii.

Utrudnieniem stosowania układu jest konieczność przygotowania ścieżek pomiarowych na wałach (ograniczenie zjawiska runoutu całkowitego wału do około  $5 \mu\text{m}$  – rys. 12).

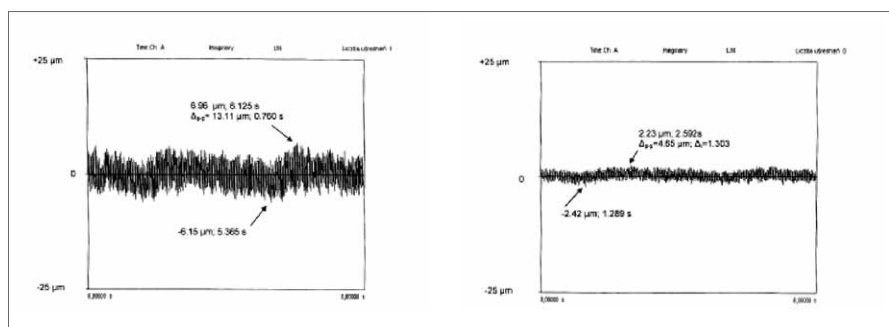
Zdemontowany wał silnika umieszcza się w obrabiarce. W wyznaczonych miejscach wału (rys. 11) przy użyciu dogniataka uzyskujemy powierzchnię wygładzoną z nierównomiernością powierzchni  $< 5 \mu\text{m}$  i namagnesowaniem  $< 5 \text{Gs}$ .

W układzie monitoringu młyna cementu odnotowano wystąpienie przekroczenia dopuszczalnych drgań względnych wału od strony napędowej. Dla potwierdzenia dokonano doraźnego pomiaru drgań bezwzględnych układu napędowego. Wartości drgań bezwzględnych na stojakach łożyskowych silnika SYUe-148r/01 1000kW, 6 kV, 740 obr/min były do zaakceptowania. Pomiar drgań względnych wału silnika wykazał przekroczenie wartości amplitudy drgań powyżej wartości alarmowej dla tego napędu, to jest 140 mikrometrów – rys. 12. Dla sprawdzenia źródła drgań wykonano pomiary drgań bezwzględnych węzłów łożyskowych przekładni. Największe drgania wykazywał węzeł łożyskowy wału szybkiego na poziomie  $3,4 \text{ mm/s}$  – rys. 13.

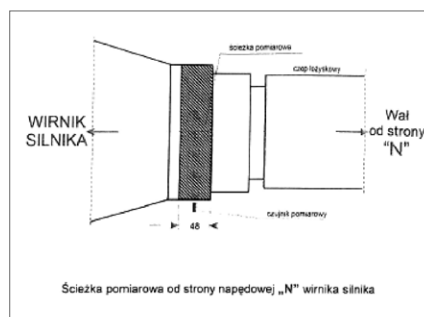
Po rewizji wewnętrznej przekładni stwierdzono w łożysku przekładni wałka szybkoobrotowego od strony napędowej nieprawidłowy luz gniazda łożyskowego – (rys. 14), co mogło doprowadzić do



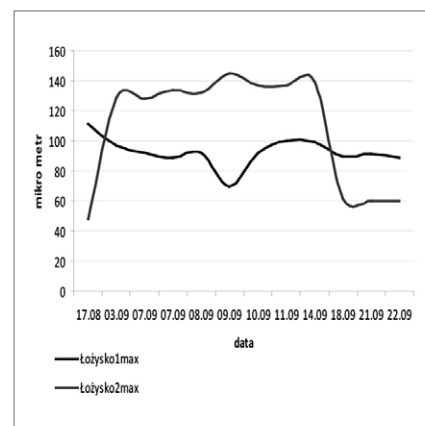
Rys. 9. Mocowanie czujników drgań względnych na łożysku ślizgowym silnika SYUe-148r/01



Rys. 10. Runout całkowity ścieżek pomiarowych przed dogniataniem (rysunek po lewej) i po dogniataniu (rysunek po prawej) strona napędowa



Rys. 11. Usytuowanie ścieżki pomiarowej na wale od strony napędowej



Rys. 12. Wykres trendu drgań względnych węzła łożyskowego silnika SYUe-148r/01 1000 kW, 6 kV (obniżenie wartości nastąpiło po naprawie przekładni)

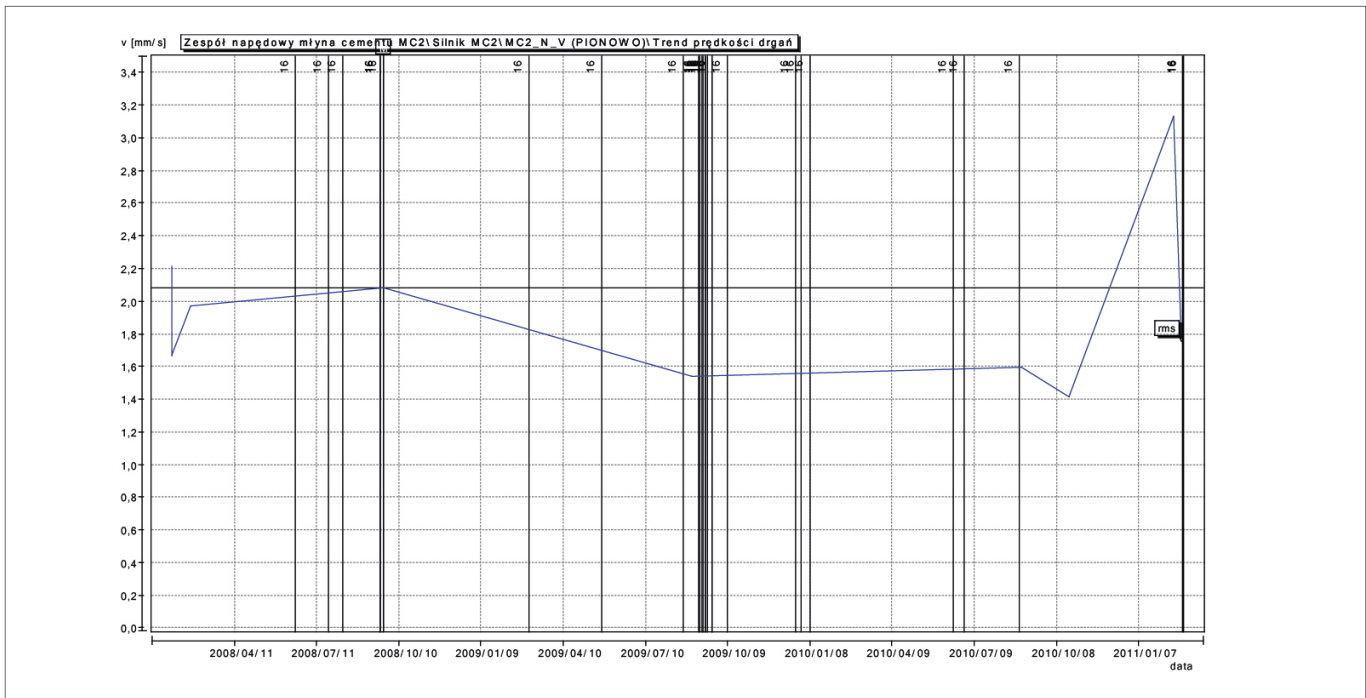
wybicia obudowy łożyska. Przekładnię naprawiono przez wymianę łożysk i skasowanie luzu gniazda łożyskowego.

### 3. Uwagi i wnioski końcowe

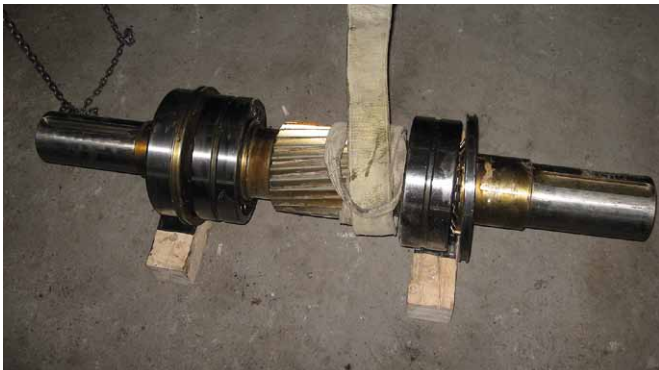
W przykładowej cementowni opracowano i wdrożono nową technologię i organizację diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych. Oto główne ich elementy:

- podzielono zespoły napędowe na grupy o różnej ważności: maszyny strategiczne, maszyny podstawowe, maszyny pomocnicze;

- dla poszczególnych grup maszyn wprowadzono diagnostykę offline i online. Maszyny strategiczne takie jak młyn surowca, wentylatory obiegowe i chłodzenia pieca wypału klinieru, napęd pieca, są nadzorowane za pomocą systemów ciągłego monitorowania online i zabezpieczeń. Maszyny podstawowe, w przeważającej wię-



Rys. 13. Trend, drgania bezwzględne stojaka łożyskowego od strony napędowej, kierunek  $V_{RMS}$ , przykładowego silnika, 740 obr/min. Wzrost wartości do poziomu 3,4 mm/s



Rys. 14. Wał szybkoobrotowy przekładni napędu głównego młyna cementu z uszkodzonym łożyskiem

szości napędy młynów cementu i ich wentylatory, są nadzorowane częściowo za pomocą systemów ciągłego monitorowania i zabezpieczeń oraz monitorowane okresowo przy pomocy sprzętu przenośnego offline. Maszyny pomocnicze są monitorowane okresowo przy pomocy przenośnego sprzętu pomiarowego offline;

- wprowadzono jednolity system akwizycji danych diagnostycznych dla wszystkich wymienionych grup maszyn;
- wprowadzono gruntowne zmiany w wyposażeniu elektrycznych układów napędowych dla uzyskania prawidłowych warunków ich eksploatacji w cementowni;
- włączono do systemu zarządzania maszynami wszystkie pomiary online i offline maszyn;
- zastosowano i wykorzystano po raz pierwszy w kraju techniki pomiarów drgań względnych do oceny dynamicznej zespołu maszynowego: silnik WN + przekładnia + młyn cementu.

Opracowana technologia i nowa organizacja diagnostyki zespołów napędowych jest technologicznym wzorcem dla

przedsiębiorstw typu cementownie, które decydują się na wprowadzenie diagnostyki offline i online maszyn w szczególności maszyn elektrycznych.

#### Literatura

- [1] GLINKA T.: *Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych*. Wyd. BOBRME, Katowice, „Maszyny Elektryczne” 68/2004, s. 13–18.
- [2] GOLUBEV A, PAOLETTI G.: *Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment*. 2000 IEEE. Reprinted, with permission, from Paper 99–25 presented at the IAS 34th Annual Meeting, Oct 3–7, '99, Phoenix, AZ.
- [3] KACPERAK M.: *Diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych w przemyśle cementowym na przykładzie Cementowni ODRA S.A.* Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole 2012.
- [4] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2006, Opole, Studia i Monografie z. 193.
- [5] SZYMANIEC S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie nr 333.

Dr inż. Marek Kacperak – Cementownia Odra SA,  
e-mail: mkacperak@odrasa.com.pl;  
dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO – Politechnika Opolska,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra  
Elektrowni i Systemów Pomiarowych,  
e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl

artykuł recenzowany