

Marek Kacperak, Cementownia Odra S.A., Opole
Sławomir Szymaniec, Politechnika Opolska, Opole

KOMPLEKSOWA DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYSŁE CEMENTOWYM – PRZYKŁAD APLIKACJI - CZĘŚĆ I

COMPLEX EXPLOITATION DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MACHINES IN CEMENT INDUSTRY – AN EXAMPLE APPLICATION

Streszczenie: Artykuł opisuje przykład zastosowania nowej technologii i organizację efektywnej diagnostyki eksploatacyjnej napędów elektrycznych w przemyśle cementowym, na wdrożonym przykładzie. Zastosowana diagnostyka off-line 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 off-line i on-line.

Autorzy przedstawiają efektywne sposoby diagnostyki on-line stanu maszyn elektrycznych takie jak:

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

Abstract: Article introduced a new technology and the organization of effective operational diagnostics of electric drives in the cement industry. Off-line 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 off-line and on-line method. The authors present an effective ways of on-line 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.

Słowa kluczowe: kompleksowa diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych

Keywords: complex exploitation diagnostics of electric machines.

1. Wprowadzenie

Diagnostyka eksploatacyjna [1÷5] jest to zespół działań podjętych na obiekcie technologicznym 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 po głębokiej analizie awaryjności napędów elektrycznych w cementowni określili zakresy koniecznych zmian wyposażenia elektrycznego. Do najważniejszych należała wymiana przestarzałych zabezpieczeń oraz wyłączników mocy pól 6 kV. Do licznych wypad-

ków 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.

2. Wprowadzenie układów i systemów diagnostycznych

Do najbardziej efektywnych sposobów diagnostyki stosowanych w ważnych zespołach maszynowych należą techniki diagnostyki on-line:

- **Pomiar drgań względnych** dla napędów na łożyskach ślizgowych wolny jest od negatywnego wpływu filmu olejowego na wynik pomiaru.

- **Pomiary wyladowań niepełnych** monitorują w sposób ciągły izolację maszyn elektrycznych. Pokazują powstałe defekty izolacji. Układ wykrywa pogorszenie stanu izolacji maszyny, przez co możemy podjąć działania naprawcze oraz poprawić niekorzystne warunki pracy silnika degradujące układ izolacyjny.

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 wytycznikowane cechy charakterystyczne układu napędowego możemy rozpatrywać wpływ jego elementów na stan techniczny oraz analizować otrzymane wyniki pomiarów diagnostycznych. Klasa stosowanej aparatury oraz częstotliwość pomiarów zależy od miejsca maszyny w układzie technologicznym.

W cementowni wprowadzono podział maszyn według ważności w układach technologicznych:

- **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, przestój 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 parametrów w sposób ciągły przez pomiary on-line [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 on-line przedstawiają się następująco:

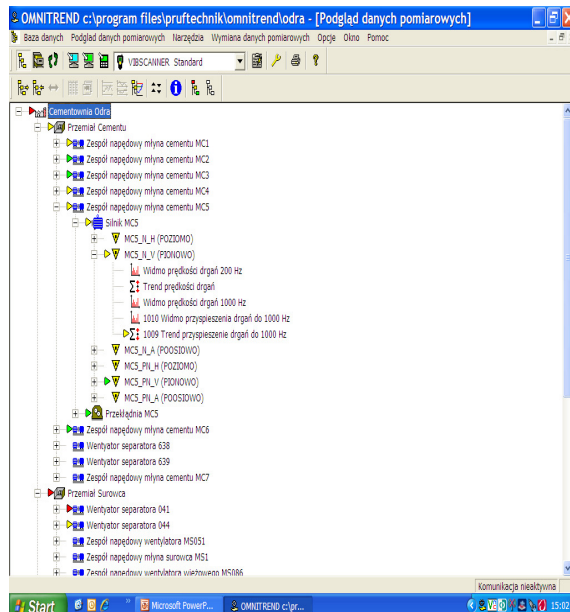
- monitoring układów napędowych, pozwala na określenie stanu technicznego instalacji.
- archiwizowanie danych diagnostycznych poszczególnych obiektów, pozwala planować zakresy rocznych remontów.
- rejestracja zaistniałych usterek i awarii.
- obserwacja poszczególnych parametrów technologicznych, występowanie 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 niezależnie, na której planszy jest aktualnie. 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 odstąpienia urządzenia,
- modelowanie zabezpieczeń pól 6 kV zasilających silniki.

Tabela 1. Maszyna strategiczna - pomiary

Lp.	Maszyna	Pomiary off-line		Pomiary on-line					
		Drgania bezwzgl.	Pomiary izolacji	Temp. uzwojeń	Temp. łożysk	Drgania bezwzgl.	Drgania względne	Obciąż.	wnz
	Maszyny Strategiczne								
1	Napęd młyna surowca	1	1	1	1	1		1	1

2.3. Pomiary drgań bezwzględnych off-line - badania własne

Dużym problemem cementowni jest **żywotność łożysk tocznych** zainstalowanych na obiektach technologicznych. Złe warunki pracy łożysk w wysokiej temperaturze, w zapyleniu, przy intensywnych drganiach pochodzących od maszyn napędzanych, powodują powstawanie częstych awarii. Praca ciągła układu technologicznego zezwala na przeprowadzanie czynności naprawczych raz w roku. Zadaniem służb utrzymania ruchu jest nie dopuszczanie 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 ścieżki pomiarowe ułatwiają organizację prowadzenia pomiarów. Czytelny układ rozmieszczenia punktów pomiarowych na napędzie zapobiega powstaniu błędów pomiarowych (rys.1).



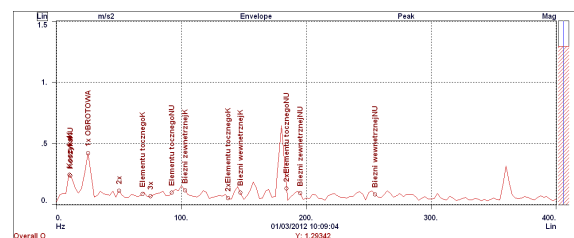
Rys. 1. System ścieżek pomiarowych obiektów technologicznych, pomiary off-line drgań bezwzględnych

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

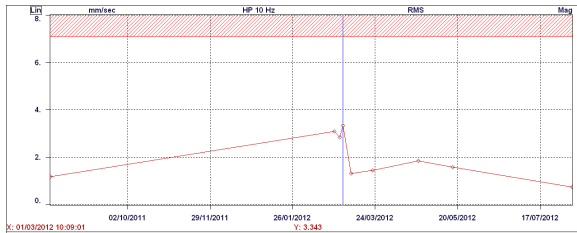
Tabela 2. Trasy pomiarowe i częstotliwość badań okresowych pomiarów drgań bezwzględnych

Lp	Maszyna układu technologicznego	Częstotliwość pomiarów	Przedziały pracy maszyny i wartości graniczne prędkości drgań V_{RMS} [mm/s]		
			$V_{RMS} < B$	$B < V_{RMS} < C$	$C < V_{RMS} < D$
Maszyny Strategiczne					
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 obrotu 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	3,5	7,5	11
7	Wentylatory chłodzenia rusztu chłodnika klinkieru	co 4 tygodnie	3,5	7,5	11
Maszyny Podstawowe					
8	Napędy główne młynów cementu nr.1,2,3,4,5	co 8 tygodni	2,5	7	10
	Napędy główne młynów cementu nr.6,7	co 8 tygodni	2,5	7	10

napędowej wentylatora młyna surowca nr 051 silnik Sf560Y6-E 1000 kW, 1483 obr/min, 6kV - rys. 2 i 3.



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

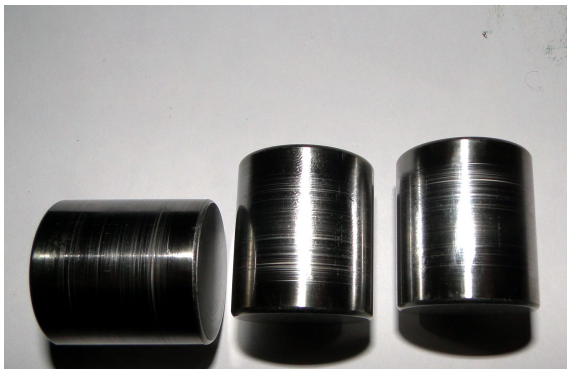


Rys. 3. Trend prędkości drgań bezwzględnych łożyska NU 222E silnika wentylatora młyna surowca punkt P1 V (pionowo)

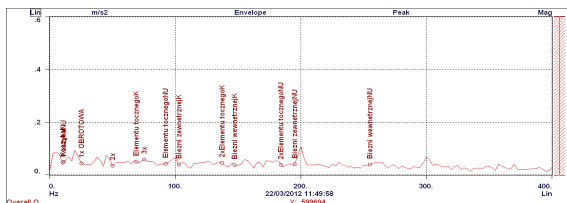
Na rysunku 4 i 5 przedstawiono zdjęcia uszkodzonego łożyska. Po przeprowadzonej wymianie łożyska wykonano pomiary kontrolne widma drgań dla sprawdzenia czy diagnoza była trafna – rys.6. Okazało się, że diagnoza była trafna [3].



Rys. 4. Bieżnia wewnętrzna łożyska NU222E



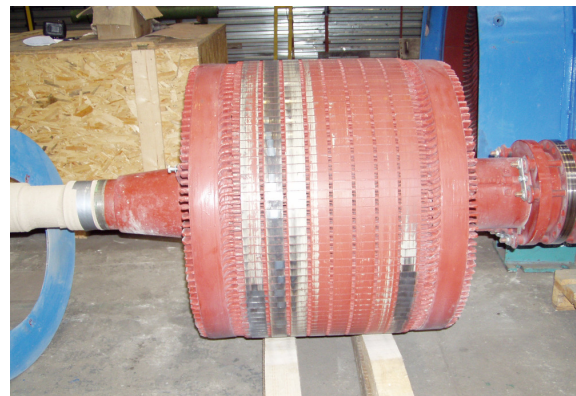
Rys. 5. Elementy toczne łożyska NU222E



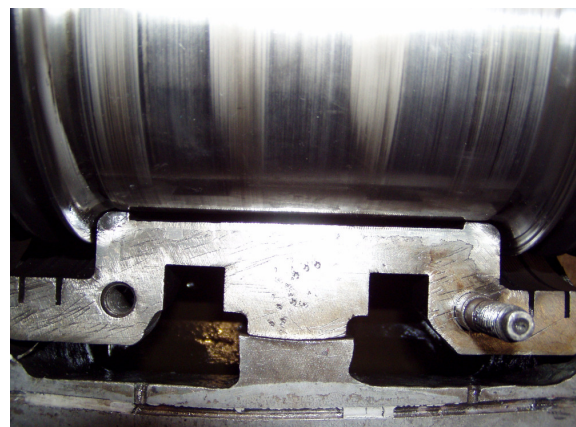
Rys. 6. Widmo przyspieszeń drgań bezwzględnych do 400 Hz łożyska NU 222E silnika wentylatora młyna surowca punkt P1 V – dla nowego łożyska

2.4. Pomiary drgań względnych on-line – badania własne

Pomimo prowadzonych pomiarów drgań bezwzględnych off-line na silnikach z łożyskami ślizgowymi na młynach cementu, odnotowywano powstawanie uszkodzenia panewek - rys.8. W skrajnym wypadku doszło do zatarcia wirnika ze stojanem - rys.7. Pomiary off-line nie dawały gwarancji zatrzymania układu napędowego zapobiegając awarii [3]. Po przeprowadzonej analizie pracujących napędów z łożyskami ślizgowymi autorzy wytypowali ze względu na dużą liczbę awarii do pomiarów drgań względnych on-line 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.



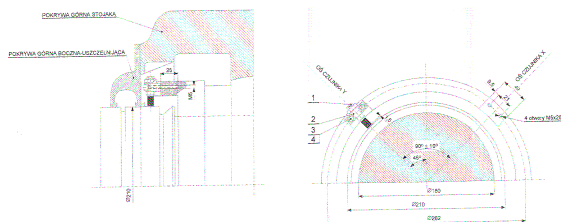
Rys. 7. Zatarty wirnik silnika SYUe-148r/01 1000kW 6 kV



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

Według wiedzy autorów jest to w skali kraju pierwsze tego typu rozwiązanie na silnikach krajowych. Do tej pory takie systemy stosowa-

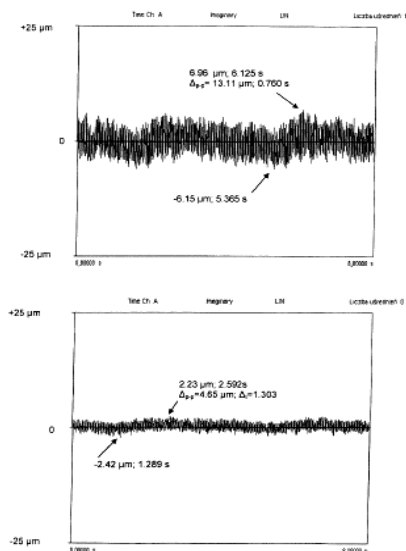
no do diagnostyki turbozespołów i turbin. Metoda diagnozowania polega na określeniu trajektorii czopa wału. Drgania są mierzone przez dwa bezdotykowe (zbliżeniowe) czujniki wiroprowadowe, mierzące przemieszczenie drgań, umieszczone w obudowie łożyska lub przymocowane do niej w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika - rys.9.



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

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.

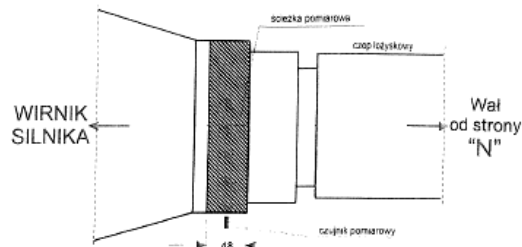
Utrudnieniem stosowania układu jest konieczność przygotowania ścieżek pomiarowych na wałach (ograniczenie zjawiska runoutu całkowitego wału do około 5 μm rys.12.)



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

Zdemontowany wał silnika umieszczany jest w obrabiarce. W wyznaczonych miejscach wału

(rys.11) przy użyciu dogniatąka uzyskujemy powierzchnię wygładzoną z nierównomiernością powierzchni < 5 μm i namagnesowaniu < 5 Gs.

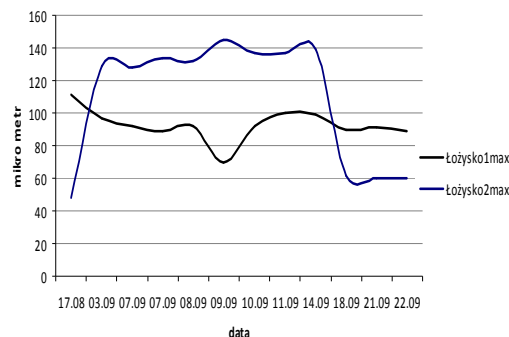


Ścieżka pomiarowa od strony napędowej „N” wirnika silnika

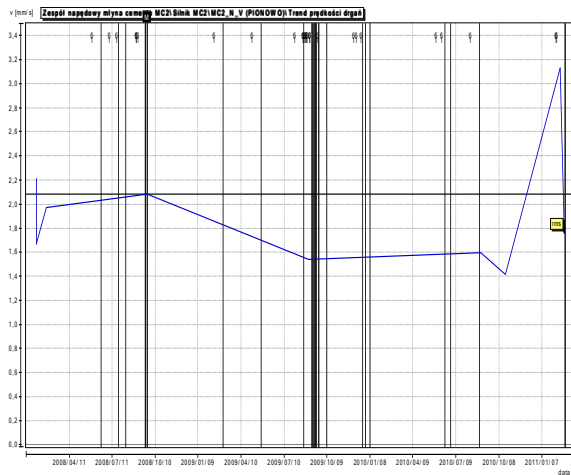
Rys. 11. Usytuowanie ścieżki pomiarowej na wale od strony napędowej

Przykład:

W układzie monitoringu młyna cementu odnotowano wystąpienie przekroczenia dopuszczalnych drgań względnych wału strona napędowa. 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 wskazał 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 mm/s - rys.13.



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



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

Po rewizji wewnętrznej przekładni stwierdzono w łożysku przekładni wałka szybkoobrotowego od strony napędowej nieprawidłowy luz gniazda łożyskowego - (rys.14), co mogło doprowadzić do wybicia obudowy łożyska. Przekładnię naprawiono przez wymianę łożysk i skasowanie luzu gniazda łożyskowego.



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

3. Uwagi i wnioski końcowe

W przykładowej Cementowni opracowano i wdrożono nową technologię i organizację diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych. Polegało to na:

- zestawienie zespołów napędowych w Cementowni z podziałem na grupy o różnej ważności: maszyny strategiczne, maszyny podstawowe, maszyny pomocnicze,
- dla poszczególnych grup maszyn wprowadzono diagnostykę off-line i on-line. Maszyny

strategiczne, takie jak młyn surowca, wentylatory obiegowe i chłodzenia pieca wypału klinkieru, napęd pieca są nadzorowane za pomocą systemów ciągłego monitorowania on-line i zabezpieczeń. Maszyny podstawowe w przeważającej większości napędy młynów cementu i ich wentylatory, są nadzorowane częściowo za pomocą systemów ciągłego monitorowania i zabezpieczeń oraz monitorowane okresowo przy pomocy sprzętu przenośnego off-line. Maszyny pomocnicze są monitorowane okresowo przy pomocy przenośnego sprzętu pomiarowego off-line,

- 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 on-line i off-line maszyn,
- zastosowanie i wykorzystanie 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 cementowni, które decydują się na wprowadzenie diagnostyki off-line i on-line maszyn w szczególności maszyn elektrycznych.

Literatura

- [1]. Glinka T.: *Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych*. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004, str. 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. Ofi-

cyna 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.

Autorzy

dr inż. Marek Kacperak
Cementownia Odra S.A.
mkacperak@odrasa.com.pl

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec
prof. PO Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki.
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. Nr 1
s.szymaniec@po.opole.pl