

**Marek Kacperak**  
**Cementownia Odra S.A., Politechnika Opolska, Opole**

## **DIAGNOSTYKA ON-LINE MASZYN ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYŚLE CEMENTOWYM – WŁASNA METODA OCENY STANU IZOLACJI STOJANA NA PODSTAWIE POMIARÓW WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH**

### **DIAGNOSTIC ON-LINE OF ELECTRIC MACHINES IN CEMENT INDUSTRY**

**Abstrakt:** This short document describes represents question about diagnostic of electric drive system . Preventive working are important element in work of plant. Qualification of technical state of machines lies out the directions of repairs and observation Industrial plant which they work in continuous system they require different way of repairs. Author represents his working for assurance of correct work of devices. The task of maintenance was introduced for on-line partial discharge measurements.

#### **1. Wstęp**

Układ napędowy należy rozpatrywać w całości jako obiekt diagnostyczny. Dobór sprzętu i metod diagnostycznych uzależniony jest od zamaszynowania i środowiska pracy. Mając wyspecyfikowane 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. Podział według ważności w układach technologicznych:

- maszyny strategiczne są to urządzenia których zatrzymanie awaryjne powoduje przestój w produkcji ciągłej powodujący znaczne straty ekonomiczne,
- maszyny podstawowe są to ważne napędy technologiczne których zatrzymanie można zastąpić pracą innych urządzeń, 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, pomiary on-line. Silniki wyposażane są w czujniki temperatur, drgań, obciążenia oraz parametrów środowiska pracy. Zapisywane przez systemy nadzorcze wszystkie istotne parametry silnika i napędu służą do analizy punktów pracy oraz przyczyn powstających awarii. Rozwijająca się technika pomiarowa umożliwia nadzorowanie ciągle, bez potrzeby wyłączania napięcia pomiary izo-

lacji uzwojenia stojanów (pomiary wyładowań niezupełnych wzn ). W dalszej części zostaną przedstawione możliwości aparatury pomiaru wyładowań niezupełnych oraz autorska metoda oceny stanu izolacji stojanów na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych .

#### **2. System pomiaru wyładowań niezupełnych wzn on-line**

W Cementowni ODRA S.A. wprowadzono dla napędów strategicznych **systemy pomiaru wyładowań niezupełnych**.

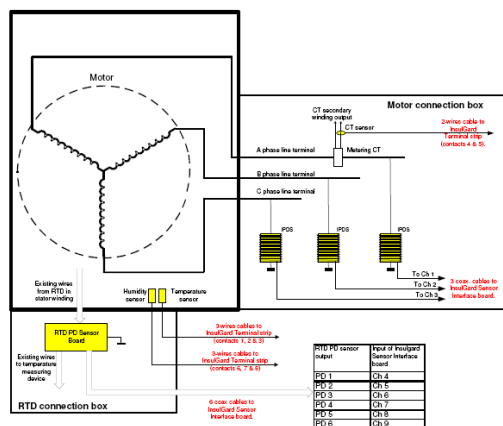
Dla napędu młyna kulowego z silnikiem SZUf-1412LL 1400kW, 6000V, 50Hz, 496 obr/min izolacja wykonana metodą VPI , zainstalowano układ do pomiaru on-line wyładowań niezupełnych.

W uzwojeniu zabudowano 18 czujników RTD (termorezystory Pt100 ang. Resistance Temperature Detektor): 12 szt. rozmieszczonych w żłobkach między bokami cewek po obu stronach pakietu (po 2 na fazę z każdej strony pakietu) oraz po 3 na czołach uzwojeń (liczba żłobków stojana  $z=108$ ).

Czujnikami wzn są 3 kondensatory sprzęgające o pojemności 80 pF.

Centralna jednostka monitorująca wykrywa i analizuje fale elektromagnetyczne o częstotliwościach  $1 \div 20$  MHz. wzbudzanych przez wyładowania niezupełne. Fale te zbierane są przez kondensatory i rezystory RTD (spełniające funkcję anteny) zabudowane w silniku. Na podstawie danych pomiarowych wyładowań niezupełnych można wyznaczać przebiegi tych zmiennych. Analiza wyładowań niezupełnych

może dostarczyć informacji o początkowych stadiach degradacji izolacji. Dokładne wskazanie miejsca potencjalnego uszkodzenia ułatwi proces naprawy. Poniżej przedstawiono schemat główny pomiaru wzn silnika.



Rys. 1. System pomiaru wyładowań niepełnych



Rys. 2. Widok aparatury pomiarowej. Silnik SZUf-1412LL 1400kW, 6000V, 50Hz, 496obr/min

Prowadząc eksploatację systemów pomiaru on-line wzn zaobserwowano zmiany intensywności wzn w przekroju rocznym. Pomiar wzn charakteryzują się dużą zmiennością w poszczególnych warunkach środowiskowych. Do analizy wyników autor opracował własną metodę.

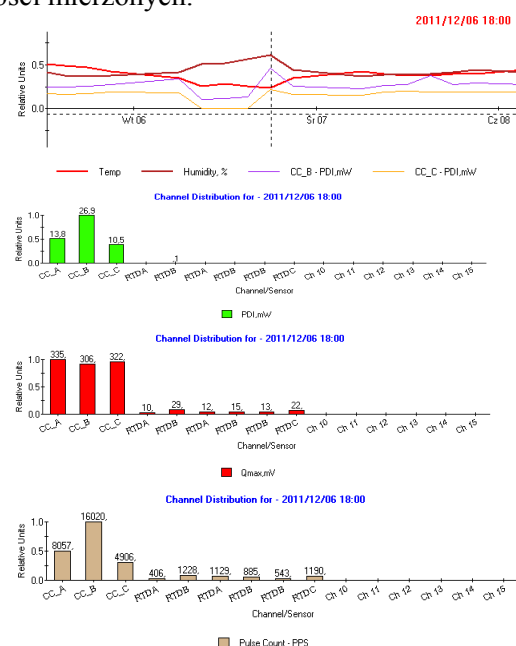
### 3. Własna metoda oceny stanu izolacji stojanów silników wysokonapięciowych w oparciu o wyliczenie współczynnika $w_1$ i $w_2$ zmiany wartości pdi [mW] od warunków środowiska pracy

Opierając się na prowadzonych pomiarach on-line wyładowań niepełnych „wzn” prowa-

dzonych od 9.2009 roku do nadal dla silnika SZUf-412LL 1400kW, 6000V, 50Hz, 496obr/min autor wprowadził metodykę analizy polegającą na badaniu poziomu wyładowań dla powtarzających się zdarzeń wywołanych oddziaływaniem środowiska pracy silnika, rozruchów w różnych warunkach.

### 3.1. Przydatności sygnałów pdi (mW), pulse count PPS, Qmax (mV)

Na przykładzie zimnego rozruchu silnika zarejestrowane pomiary pokazują zależności wielkości mierzonych.

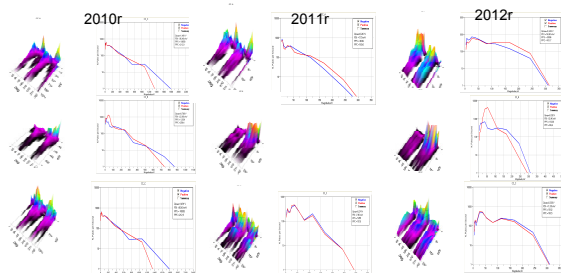


Rys. 3. Wartości pdi (mW), pulse count PPS, Qmax (mV) amplituda wyładowań niepełnych, pomiar wzn przy użyciu kondensatorów dla silnika SZUf-1412LL 1400kW, 6000V, 50Hz, 496 obr/min

Z przedstawionego przykładowo typowego zdarzenia pracy silnika pomiar wzn daje najlepszy obraz różnic stanu izolacji poszczególnych faz uzwojenia dla wartości mocy wyładowań niepełnych (partial discharge intensity) pdi (mW) oraz liczba wyładowań na sekundę PPS. Autor w swojej metodzie koncentruje się na pomiarach pochodzących z kondensatorów oraz na zmianach pdi w czasie eksploatacji. Poziom sygnału wzn rejestrowany z kondensatorów zainstalowanych na zaciskach silnika posiada wysoki poziom do 55 mW. Sygnały pochodzące z czujników RTD osiągają poziom 0,3 mW. W większości punktów pomiarowych poziom pdi jest nieokreślony 0 mW.

Do dyspozycji mamy tylko pomiar  $Q_{max}$  (mV) oraz ilości wyładowań na sekundę PPS, co jest niewystarczające do analizy przyczyn zmian stanu izolacji.

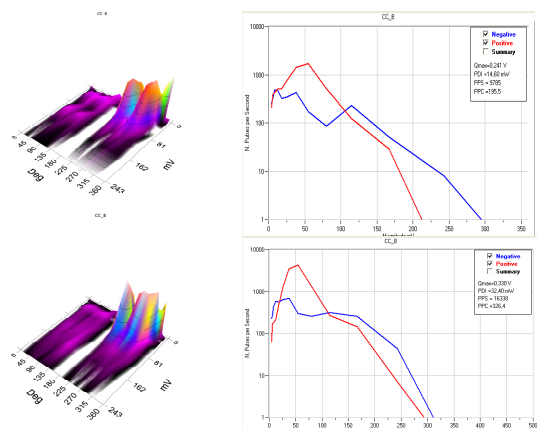
### 3.2. Porównanie wzn zimnych rozruchów w latach 2010, 2011, 2012 po remoncie



Rys. 4. Porównanie wzn na rozkładach fazowo-rozdzielczych dla faz A, B, C w latach 2010, 2011 i 2012

Rysunek przedstawia zmieniający się obraz wyładowań wzn w poszczególnych latach eksploatacji to jest w 2010, 2011, 2012r. Faza B zanotowała największy wzrost poziomu pdi.

Analizując fazę B na czole uzwojenia silnika wykazano przewagę polaryzacji wzn dodatniej nad ujemną, co świadczy o postępującym osłabianiu powłoki przeciwjarzeniowej czola izolacji w rejonie fazy B. Charakterystyczną cechą dla takiego defektu jest większa intensywność wzn w ujemnej połowce napięcia probierczego. [1]. Każda z faz ma swój charakterystyczny obraz w rozkładzie fazowo - rozdzielczym. Powiększające się anomalie w trakcie eksploatacji (Rys.5) pozwalają obserwować i oceniać stopień degradacji izolacji.



Rys. 5. Zmiany wzn na rozkładzie fazowo-rozdzielczym dla wady fazy B w ciągu jednego roku 2011 i 2012

### 3.3. Wybór poziomów odniesienia do analizy stanu izolacji

Wzrost sygnałów pdi dla skrajnych warunków środowiskowych określa warunki brzegowe dla zainstalowanej maszyny:

- wybieramy parametry i sytuacje, które chcemy obserwować,
- obliczamy poziom i dynamikę wzrostu wielkości wyładowań wzn,
- najbardziej reprezentatywne są sytuacje skrajne.

#### Dla badanego silnika przyjęto poziomy startowe (odniesienia):

- wilgotność około 60% i temperatura 15-25°C

Faza A - pdi – 2,2 mW

Faza B – pdi – 6,6 mW

Faza C – pdi – 2,5 mW

- wilgotność około 30% i temperatura 40°C

Faza A - pdi – 43 mW - pdi max (40°C) fazy A

Faza B – pdi– 33 mW -pdi max (40°C) fazy B

Faza C – pdi – 51 mW -pdi max (40°C) fazy C

### 3.4. Współczynniki poziomu wzn w1 i w2

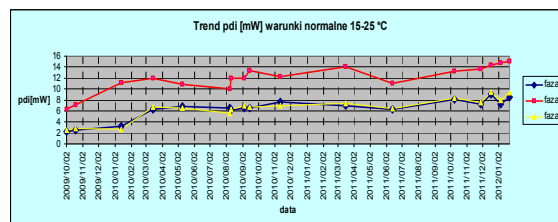
Współczynnik w1 jest to stosunek pdi max (40°C) [mW] dla danej fazy n przez wartość mierzoną pdi [mW] danej fazy n.

$w1 = \text{pdi max (40°C)} / \text{pdi}$  - dla pomiarów w temperaturach do 25°C

Współczynnik w2 jest to stosunek wartość mierzona pdi [mW] danej fazy n przez pdi max (40°C) [mW] dla danej fazy n .

$w2 = \text{pdi} / \text{pdi max (40°C)}$  - dla pomiarów w temperaturach od 35°C

### 3.5. Pomiary wzn podczas pracy silnika SZUF-1412LL 1400kW,6000V



Rys. 7. Zmiany wartości pdi [mW] w temperaturach do 25°C w czasie eksploatacji w latach 2009 do 2012r.

Układ do pomiar wyładowań niepełnych został zainstalowany w październiku 2009 roku. Silnik w stanie nowym zainstalowano na obiek-

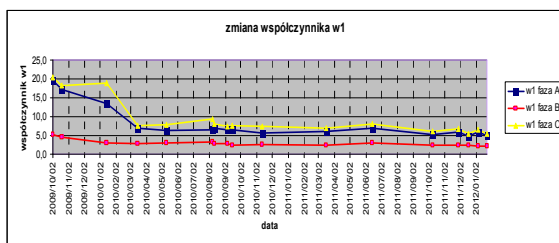
cie w kwietniu 2008 roku. Pierwsze półtora roku nie jest objęte pomiarami. W pierwszych pomiarach odnotowano najniższe wartości mocy wyładowań wzn „pdi” (mW), to jest dla fazy A 2,2 (mW), faza B 6,2 (mW), faza C 2,5(mW). Sukcesywnie wartości te wzrastają, co obserwujemy na wykresie trendu pdi w temperaturze 15-25 °C.

Faza A osiąga we wrześniu 2010r wartość pdi 6,5 (mW), w październiku 2011r 8,1 (mW), w styczniu 2012r 8,5 (mW).

Faza B osiąga we wrześniu 2010r wartość pdi 12 (mW), w październiku 2011r 13,2 (mW), w styczniu 2012r 15 (mW).

Faza C osiąga we wrześniu 2010r wartość pdi 6,7 (mW), w październiku 2011r 8,3 (mW), w styczniu 2012r 9,3 (mW).

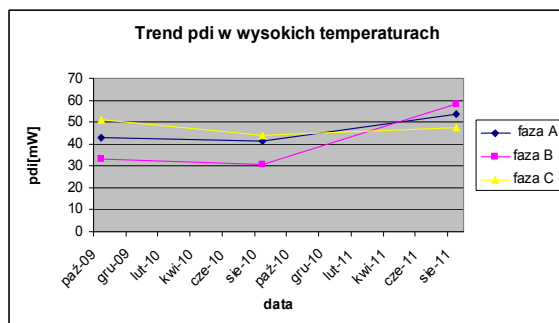
Dla tych danych obliczono współczynnik w1 i przedstawiono na wykresie.



Rys.8. Zmiany współczynnika w1 w czasie eksploatacji w latach 2009 do 2012r.

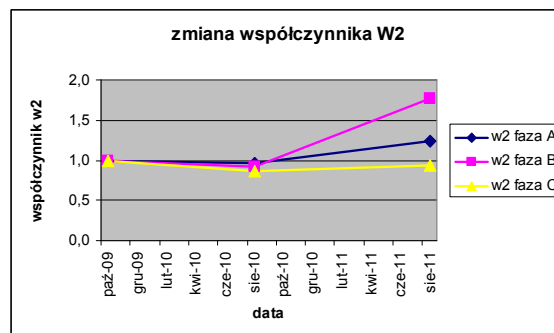
Fazy A i C będące bez defektów izolacji po zainstalowaniu (po 1,5 roku eksploatacji) pomiaru wzn osiągnęły wartość „w1”około 20, następnie w 2010 roku wartości „w1” 9,3 do 6,6 oraz w 2011 roku wartości „w1” 8,0 do 4,7.

Faza B z zdiagnozowanym defektem czoła uzwojenia zmienia wartości „w1” do 5,3 w 2009 roku do „w1” 2,2 w styczniu 2012 roku.



Rys.9. Zmiany wartości pdi [mW] w wysokich temperaturach w czasie eksploatacji w latach 2009 do 2012r.

Wartości pdi przy pracy w wysokiej temperaturze 35÷40°C są pokazane na wykresie Rys.9. Fazy A i C mają wyższy poziom pdi od fazy B w początkowym pomiarze. W 2011 roku faza B ma najwyższą wartość pdi 58,3(mW).



Rys.10. Zmiany współczynnika w2 w czasie eksploatacji w latach 2009 do 2012r.

Wartości współczynnika „w2” zaczynają się do wartości 1. Największą dynamikę wzrostu współczynnika „w2 wykazuje faza B do wartości 1,8 . Faza A wartość współczynnika „w2” to 1,2, faza B wartość „w2” 0,9.

Izolacja w żłobkach stojana wykonana techniką VPI nie obniżyła w sposób istotny wartości izolacji w trakcie eksploatacji w latach 2009 do 2012.

### 3.6. Ocena stanu izolacji czoła uzwojenia w oparciu o współczynnik w1

Obserwując trendy wartości pdi (mW) i współczynnika „w1” widzimy zmianę stanu izolacji czoła uzwojenia stojana .

Tabela 1. Kryteria oceny stanu izolacji czoła uzwojenia stojana

Wartość współczynnika w1	Ocena izolacji
$w1 \geq 20$	Uzwojenie nowe
$20 > w1 > 10$	Bardzo dobry stan izolacji
$10 \geq w1 > 5$	Dobry stan izolacji
$5 \geq w1 > 1$	Obniżony stan izolacji
$1 \geq w1 > 0,1$	Niski stan izolacji

### 3.7. Ocena stanu izolacji żłobkowej stojana w oparciu o współczynnik w2

Współczynnik w2 określa stan izolacji żłobkowej uzwojenia stojana.

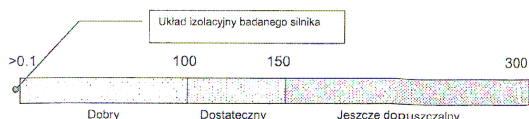
Obecnie autor posiada zbyt małą liczbę punktów pomiarowych, aby określić kryteria podobne jak wyżej.

#### 4. Pomiar kontrolny off-line dokonany w 04.2011r. dla stojana silnika SZUF-1412LL

Pomiaru dokonano metodą prądu stałego WMPS na stanowisku pracy silnika.

Wyniki i wnioski z pomiaru off-line są przedstawione na rys.11

Wykonując diagnostykę stanu izolacji metodą WMPS przeprowadzono serię pomiarów stanu izolacji z wykorzystaniem prądu stałego. W oparciu o uzyskane przebiegi wyznaczono współczynnik kondycji izolacji  $\xi$ . Wielkość wskaźnika  $\xi$  wynosi 0,002



Rys.11. Graficzna prezentacja stanu układu izolacyjnego na podstawie współczynnika  $\xi$ .

Wartości R60/R15, wskaźnik PI, pomiar rezystancji izolacji metodą schodkową, pomiar kąta stratności dielektrycznej przyjmują wartości poprawne. Brak jakichkolwiek obserwacji obniżenia stanu izolacji.[2]

#### 5. Wnioski

- pomiar wzn daje miarodajne i powtarzalne wyniki,
- pomiary wzn w niskiej temperaturze należy analizować pod kątem oceny stanu izolacji czół stojanów,
- pomiary wzn w wysokich temperaturach należy analizować pod kątem oceny stanu izolacji żłobkowej stojanów,
- wyliczanie trendów pdi oraz współczynników  $w_1$  i  $w_2$  pozwala określić miejsce w jakim znajduje się stan izolacji.

#### 6. Podsumowanie

Pomiary on-line wzn są jedyną metodą pomiarową pozwalającą na śledzenie i ocenę stanu izolacji maszyn pracujących w ruchu ciągłym. Jako jedyna metoda daje możliwości obserwacji procesu starzenia się izolacji w początkowej fazie eksploatacji. Wcześniejsze wykrycie defektów pozwala na wyeliminowanie ich przed powstaniem nieodwracalnych zmian. Metody off-line mogą pełnić rolę uzupełniającą pod warunkiem możliwości rozpięcia punktu gwiazdowego stojana i badania poszczególnych faz.

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niepełnych w silnikach elektrycznych

oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

#### 7. Literatura

- [1]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [2]. Energotest-Diagnostyka Spółka z o.o. : *Protokół nr 2011/321 z pomiarów stanu izolacji silnika elektrycznego silnika SZUF-1412LL 1400kW,6000V - kwiecień 2011 roku*.

#### Autor

mgr inż. Marek Kacperak  
Cementownia Odra S.A.  
Politechnika Opolska  
mkacperak@odrasa.com.pl