

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

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

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. Badania diagnostyczne izolacji uzwojeń

W ocenie autorów badania izolacji uzwojeń silników elektrycznych są badaniami najważniejszymi – podstawowymi. Wyniki tych badań decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, warunkują jego bezpieczną eksploatację, a wcześniej na etapie produkcji silnika umożliwiają ocenę jakości uzwojenia. Badania izolacji uzwojeń silników prowadzone w oparciu o wykorzystanie najnowszej aparatury diagnostycznej w ocenie własnej należą do najtrudniejszych, najdłużej trwających i najbardziej kosztownych. W eksploatacji maszyn elektrycznych istotne jest śledzenie procesu starzenia się izolacji uzwojeń. Właściwa ocena stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyny jest podstawą do planowania i przeprowadzania remontów maszyn elektrycznych.

2. Badania diagnostyczne izolacji uzwojeń napięciem stałym off-line

Prowadząc eksploatację silników WN i stosując diagnostykę stanu izolacji metodą prądu stałego możemy wyznaczyć horyzonty czasowe prawidłowej pracy silników. Zachowanie się układu izolacyjnego o dużym stopniu zużycia przy badaniach ich izolacji metodą prądu stałego w sposób zasadniczy różni się od zachowania układu izolacyjnego dobrego. Dla izolacji nowej, dobrej, prąd upływu i_p maleje wykładniczo z upływem czasu do wartości U_0/R_{60} , U_0/R_{600} . Dla izolacji bardzo mocno zużytej prąd upływu nie ustala się.

Na rys. 1 przedstawiono aparaturę do pomiarów izolacji metodą prądu stałego stosowaną w cementowni. Stosując kryteria prof. Tadeusza Glinki określamy stan izolacji silnika.



Rys. 1. Aparatura do pomiarów izolacji metodą prądu stałego stosowana w cementowni

Śledzenie trendów oraz zmian współczynników wymienionej metody spowodowanych eksploatacją, jak również zabiegami konserwacyjnymi pozwala na przewidywalną eksploatację silników - rys.2.

Lp	parametr	Stan techniczny izolacji		nieдостateczny		
		dobry	dostateczny	Zużyta	zawilgocona	
1	Napięcie przebicia $\frac{U_p}{U_N}$	> 3	> 2	< 1,5	≈ 1	
2	R_{60}/U_N przy U_N [kΩ/V]	> 10*	> 3	> 1	< 1	
3	Czas zwarcia t_s [s]	dla $U_N = 6$	≥ 30	≈ 10	1	0
		dla $U_N < 1$	≥ 10	≈ 5	0,5	0
	Maksymalna wartość odbudowanego napięcia $U_{od\ max}$		> 0,1 U_N	> 0,05 U_N	= 0	= 0
		Czas odbudowy napięcia t_{od} [s]	dla $U_N = 6$	> 150	≈ 30	0
		dla $U_N < 1$	> 30	≈ 15	0	0
4	$\frac{i_{p\ max}}{i_{pss}} \cdot 100$	< 2	< 3	< 10	1	
5	$\frac{i_{p15}}{i_{p60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}$	> 1,5	> 1	≈ 1	= 1	

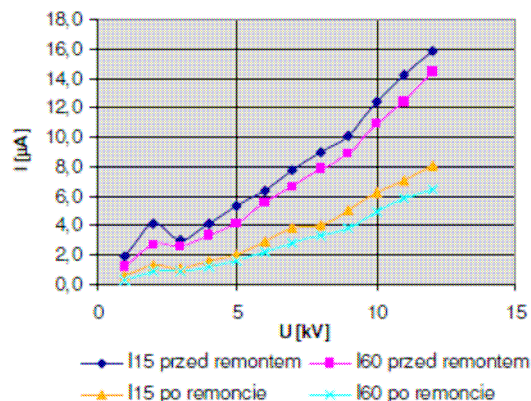
Rys. 2. Kryteria oceny stanu izolacji prof. Tadeusza Glinki [1]

Dla przykładu w ramach prac prowadzonych na silniku typu DSE 1318-6 wykonano następujące czynności remontowe:

- mycie stojana i wirnika,
- suszenie w piecu stojana i wirnika,
- klinowanie luźnych prętów uzwojeń w żłobkach.
- wymiana uszkodzonych bandaży na czołach uzwojeń stojana.

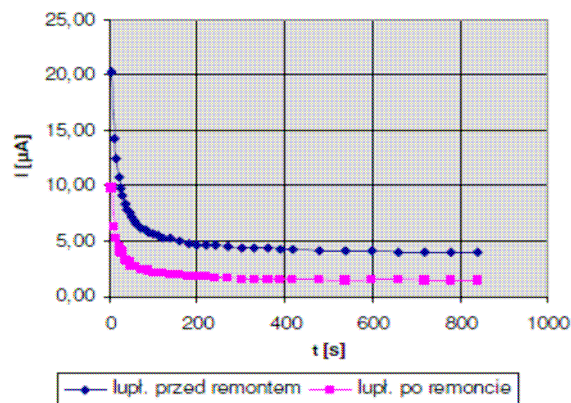
Pomiary przeprowadzone po remoncie wykazały obniżenie charakterystyk zmian prądu upływu - I_{15} , I_{60} przy zmianie napięcia pomiarowego dla uzwojenia stojana - rys.3 z wartości maksymalnej prądu upływu $I_{15} = 16 \mu A$ do wartości $I_{15} = 8 \mu A$ oraz z wartości maksymalnej

prądu upływu $I_{60} = 14,4 \mu A$ do wartości $I_{60} = 6,2 \mu A$. Analizując zarejestrowane przebiegi czasowe prądu upływu $I_{upl.} = f(t)$ uzwojenia stojana obserwujemy obniżenie charakterystyki w osi „y” o wartość $3 \mu A$ - rys.4.



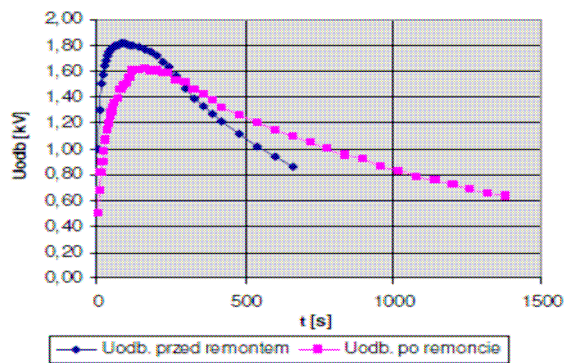
Rys. 3. Wyniki pomiarów prądu upływu - I_{15} , I_{60} silnika typu DSE 1318-6 po remoncie

Zauważamy zmniejszenie wartości początkowej prądu upływu ($I_{upl.}$) z wartości $20 \mu A$ przed remontem do wartości $10 \mu A$ po remoncie, zmniejszenie wartości końcowej $I_{upl.}$ z wartości $4 \mu A$ do wartości $1,5 \mu A$.



Rys. 4. Wyniki pomiarów prądu upływu $I_{upl.} = f(t)$ silnika typu DSE 1318-6 po remoncie

Analizując charakterystyki odbudowy napięcia w układzie izolacyjnym stojana - rys.5, stwierdzamy znaczny wzrost czasu odbudowy z wartości 660 [s] do wartości 1380 [s] przy podobnej wartości szczytowej.



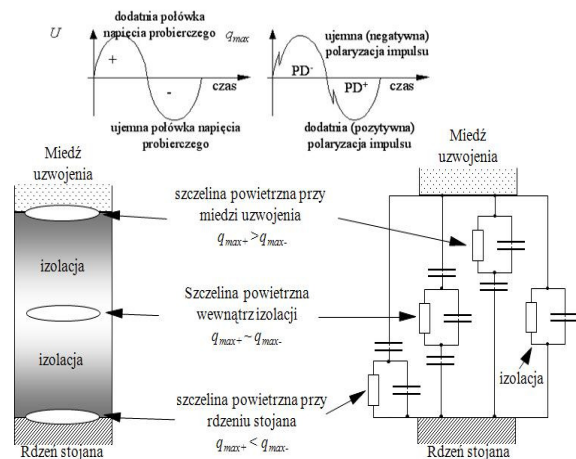
Rys. 5. Wyniki pomiarów odbudowy napięcia silnika typu DSE 1318-6 po remoncie

Wnioski:

Metoda prądu stałego umożliwia prawidłową ocenę stanu izolacji uzwojeń. Umożliwia podjęcie prawidłowej decyzji o ewentualnym remoncie silnika. Prowadząc określoną politykę remontową musimy zdecydować o zakresie napraw, zwracając uwagę na ponoszone koszty. Po dokonanych remoncie istotną sprawą jest potwierdzenie lub nie potwierdzenie poprawy parametrów technicznych remontowanego silnika. Jedynym utrudnieniem prowadzenia tych badań w czasie eksploatacji maszyn w cementowniach jest konieczność zatrzymania urządzenia, co przy ruchu ciągłym jest możliwe raz do roku.

3. Badania diagnostyczne izolacji uzwojeń na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych on-line

Typowe źródła defektów w izolacji maszyn elektrycznych przedstawiono za [4] na rys.6. Przedstawiono typowe źródła defektów w izolacji silnika i schemat zastępczy oraz charakterystyczne cechy sygnałów wnz odpowiadające powstającym defektom. Najtrudniejszym zagadnieniem przy pomiarach wnz maszyn elektrycznych tak off-line jak i on-line jest wpływ zakłóceń na wyniki pomiaru. Zakłócenia mogą pochodzić z różnych źródeł (sprężenia galwaniczne, elektromagnetyczne, charakter zasilania) [1÷5]. Wpływ zakłóceń jest szczególnie istotny, gdy pomiary odbywają się w warunkach przemysłowych gdzie źródeł zakłóceń jest bardzo wiele, a poziom zakłóceń jest duży. Pomiary wnz maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych, a więc w warunkach o wysokim poziomie zakłóceń wymagają opracowania metod pomiaru pozwalających na oddzielenie sygnałów wnz od zakłóceń i szumów.

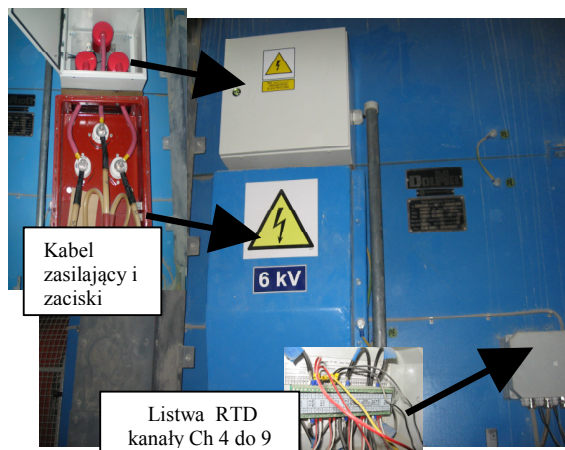


Rys. 6. Typowe uszkodzenia izolacji maszyn elektrycznych oraz odpowiadający im schemat zastępczy [4]

Zagadnienie metod eliminacji zakłóceń przy pomiarach wnz jest przedstawione w literaturze [4, 5]. Metody ograniczenia wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów wnz weryfikowano praktycznie. W ocenie autorów prawdziwym przełomem w poprawie użyteczności i wiarygodności badań on-line przy wykorzystaniu pomiarów wnz było: opracowanie w połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Ontario-Hydro w Kanadzie dla potrzeb diagnozowania hydrogeneratorów metody i aparatury nazwanej PDA (Partial Discharge Analyzer) [4]. Metoda polega na pomiarze wnz w układzie różnicowym, w którym eliminowane są zakłócenia. Metoda ta jest stosowana z powodzeniem w pomiarach wnz maszyn elektrycznych do chwili obecnej. Jej pierwotna wersja była następująca [4]: Dla każdej fazy generatora instaluje się co najmniej 2 kondensatory o pojemności 80 pF, kondensatory bardzo wysokiej jakości, w których nie występują wnz. Kondensatory są połączone kablami koncentrycznymi o dokładnie dobranej długości tak, aby impulsy wnz docierały do przyrządu pomiarowego PDA w ściśle określonym czasie. Przyrząd PDA dokonuje porównania różnicowego impulsów wnz. W oparciu o różnicę w czasie przyścia impulsów do PDA dokonywana jest klasyfikacja na impulsy wnz pochodzące z izolacji uzwojenia oraz impulsy pochodzące od zakłóceń. Usytuowanie kondensatorów jest zależne od geometrii uzwojeń stojana. Przykładowo, z doświadczeń praktycznych firm ADWEL, IRIS [4, 5] wiadomo, że szyny zbiorcze gałęzi równoległych powinny mieć długość co najmniej 1 m. Kondensatory powinny być instalowane co najmniej 2 m je-

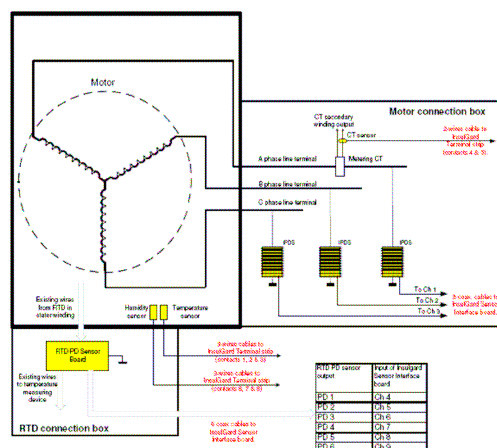
den od drugiego. Wskazania podane wyżej wraz ze specjalnym doбором długości kabli koncentrycznych skutkuje tym, że impulsy przychodzące w tym samym czasie – okienko 5 ns traktuje się jako zakłócenie i eliminuje, impulsy przychodzące w różnym czasie są zaliczane do użytecznych pochodzących od badanego układu izolacji maszyny. W notach aplikacyjnych przyrządu PDA podany jest dokładnie sposób doboru długości kabli. Metoda PDA w sposób wyraźny poprawiła ocenę wykorzystania wnz do oceny stanu izolacji maszyn elektrycznych dzięki skutecznej eliminacji zakłóceń zewnętrznych. Człowiekowi producenci aparatury do diagnostyki stanu izolacji maszyn elektrycznych [2, 4, 5], proponują aparaturę do oceny stanu izolacji silników elektrycznych w trybie pracy on-line, w wersji stacjonarnej i przenośnej, z wykorzystaniem różnego rodzaju czujników wnz. W ocenie autorów należy tu wymienić przede wszystkim rozwiązania techniczne pionierów: firmy ADWEL, CATLER-HAM-MER - EATON, IRIS. Początkowo przedmiotem zainteresowania tych firm były generatory i hydrogeneratory, a dopiero później silniki WN dużej mocy. W oparciu o literaturę [2, 4, 5] oraz rozmowy z producentami urządzeń i doświadczenia własne autorzy stwierdza, że aparatura do diagnostyki stanu izolacji silników elektrycznych on-line jest w zakładach przemysłowych w krajach zachodnich instalowana. Liczba zainstalowanych systemów systematycznie się zwiększa i szacowana jest na tysiące. W kraju znanych jest autorom osobiście już kilkadziesiąt przypadków zainstalowania przez właścicieli zakładów systemów do oceny stanu izolacji on-line silników na stałe w napędach, o krytycznym znaczeniu dla procesu produkcji.

Przykładem aparatury pomiarowej do pomiarów on-line wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych w której ograniczono do przysłowiowego minimum wpływ zakłóceń na wyniki pomiarów, aparatury popularnej w świecie zachodnim jest układ InsulGard firmy EATON. Cementownia zakupiła wymienioną aparaturę dla napędu młyna surowca, silnik typu SZUF-1412LL, 1400kW, 6 kV, 50Hz, 496 obr/min - rys.7 i 8, izolacja wykonana metodą VPI. Sygnały pomiarowe pochodzą z czujników RTD oraz kondensatorów sprzęgających przyłączonych do zacisków wejściowych stojana.



Rys. 7. Aparatura do pomiaru wnz na silniku

- w uzwojeniu zabudowano 18 czujników RTD: 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 $z=108$),
- do zacisków głównych stojana podłączono 3 kondensatory sprzęgające 80 pF, 6 kV,
- w korpusie stojana umieszczono czujnik temperatury oraz czujnik wilgoci.



Rys. 8. Schemat połączeń układów pomiarowych aparatury InsulGard firmy EATON

Opierając się na pomiarach on-line wyładowań niezupełnych prowadzonych od września 2009 roku do nadal, dla silnika SZUF-1412LL 1400kW, 6000V, 50Hz, 496 obr/min autor [3] wprowadził własną metodykę analizy polegającą na badaniu poziomu wyładowań dla powtarzających się cyklicznie zdarzeń wywołanych oddziaływaniem środowiska pracy silnika. Wyselekcjonowane pomiary umożliwią analizę trendu zmian stanu izolacji stojana silnika. Dla maszyny o dobrym stanie izolacji pierwsze cha-

rakterystyczne dla defektów zmiany rozkładu fazowo-rozdzielczego można zaobserwować w niskich temperaturach, podczas rozruchu, przy przeciążeniach maszyny, dla ekstremalnie wysokich temperatur.

Dla ujednoczenia kryteriów oceny stanu technicznego izolacji różnych maszyn autor [3] wprowadził współczynniki stanu izolacji dla niskich temperatur w_1 oraz dla wysokich temperatur w_2 . W oparciu o wyliczanie współczynników w_1 i w_2 oraz wprowadził kryteria oceny stanu izolacji czoła uzwojenia i oceny stanu izolacji w żłobkach można analizować stan izolacji silnika.

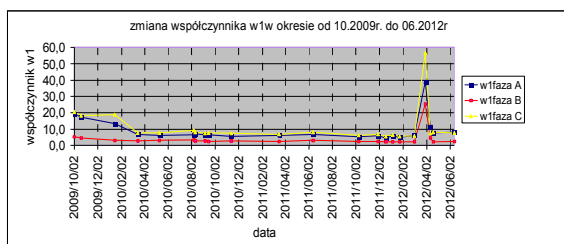
Współczynnik w_1 jest to stosunek stałej wartości poziomu odniesienia $pdi_{\max 40^\circ C(n)}$ [mW] danej fazy n przez wartość pomiaru $pdi_{\text{faza } n}$ [mW], dla którego wyznaczamy w_1 , w obszarze warunków środowiskowych; temperatury z przedziału $20^\circ C \div 25^\circ C$, wilgotność względna powietrza chłodzącego uzwojenie $32\% \div 50\%$.

$$w_1_{\text{faza } n} = pdi_{\max 40^\circ C(n)} / pdi_{\text{faza } n} \quad (1)$$

Współczynnik w_2 jest to stosunek wartości pomiaru $pdi_{\text{faza } n}$ [mW], dla którego wyznaczamy w_2 przez stałą wartość poziomu odniesienia $pdi_{\max 40^\circ C(n)}$ [mW] danej fazy n , w obszarze warunków środowiskowych; temperatury z przedziału $35^\circ C \div 45^\circ C$, wilgotność względna powietrza chłodzącego uzwojenie stojana $20\% \div 35\%$:

$$w_2_{\text{faza } n} = pdi_{\text{faza } n} / pdi_{\max 40^\circ C(n)} \quad (2)$$

Obserwując trendy wartości pdi [mW] - rys. 9

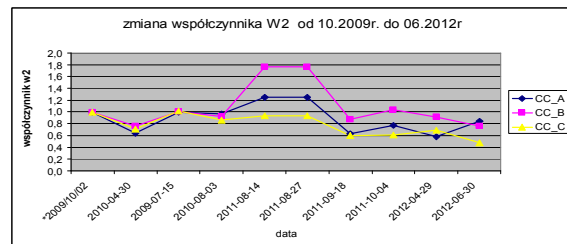


Rys. 9. Zmienność wartości współczynnika w_1 wnz dla kanałów CC_A, CC_B, CC_C w oraz w zakresie temperatur $20^\circ C \div 25^\circ C$ wilgotność względna $32\% \div 50\%$ - pomiary on-line pracy ciągłej silnika wykonane od 10.2009r. do 06.2012r

i współczynnika „ w_1 ” widzimy zmianę stanu izolacji czoła uzwojenia stojana.

Wartości pdi [mW] przy pracy w wysokiej temperaturze $35 \div 40^\circ C$ są pokazane na wykresie wartości współczynnika w_2 wnz dla kanałów CC_A, CC_B, CC_C - rys.10.

Fazy A i C mają wyższy poziom pdi od fazy B w początkowym pomiarze. W 2011 roku faza B osiąga najwyższą wartość pdi 58,3(mW). Brak tendencji wzrostowej wskazuje na stabilny poziom izolacji. Ten obszar środowiskowy nie wykazuje defektów izolacji, jedyne zmiany spowodowane są różnicami temperatury pracy.



Rys. 10. Zmienność wartości współczynnika w_2 wnz dla kanałów CC_A, CC_B, CC_C w oraz w zakresie temperatur $30^\circ C \div 45^\circ C$ wilgotność względna $20\% \div 35\%$ - pomiary on-line pracy ciągłej silnika wykonane od 10.2009r. do 06.2012r

Wartości współczynnika w_2 zaczynają się do wartości 1. Największą dynamikę wzrostu współczynnika w_2 posiada faza B do wartości 1,8, faza A do wartości współczynnika $w_2 = 1,2$, faza B współczynnika $w_2 = 0,9$. Izolacja w żłobkach stojana wykonany techniką VPI nie obniżyła w sposób istotny wartości izolacji w trakcie eksploatacji w latach 2009 do 2012.

Obserwując trendy wartości pdi [mW] - rys.10 i współczynnika „ w_2 ” widzimy zmianę stanu izolacji w żłobkach.

Autor [3] w oparciu o swoje pomiary wprowadził kryteria oceny stanu izolacji - tabela 1 i tabela 2.

Tabela 1. Kryteria oceny stanu izolacji czoła uzwojenia w oparciu o współczynnik w_1

Wartość współczynnika w_1	Ocena stanu izolacji (dobry obraz czoła uzwojenia)
$w_1 \geq 20$	Uzwojenie nowe
$20 > w_1 > 10$	Bardzo dobry stan izolacji
$10 \geq w_1 > 5$	Dobry stan izolacji
$5 \geq w_1 > 1$	Obniżony stan izolacji
$1 \geq w_1 > 0,1$	Niski stan izolacji

Tabela.2. Kryteria oceny stanu izolacji w żłobkach w oparciu o współczynnik w_2

Wartość współczynnika w_2	Ocena stanu izolacji (dobry obraz żłobków)
$w_2 \leq 2$	Uzwojenie nowe
$2 < w_2 < 5$	Bardzo dobry stan izolacji
$5 \leq w_2 < 10$	Dobry stan izolacji
$10 \leq w_2 < 20$	Obniżony stan izolacji
$20 \leq w_2$	Niski stan izolacji

4. Uwagi i wnioski końcowe

Z wykonanych przez autorów badań wynikają następujące wnioski natury ogólnej:

- pracy silników elektrycznych towarzyszą wyładowania niezupełne. Sekwencje impulsów wnz są zdarzeniami losowymi, charakteryzującymi się znacznym rozrzutem wielkości amplitudowych i fazowych,
- charakter wnz towarzyszących pracy silników elektrycznych jest bardzo złożony. Pomiar on-line wymaga specjalistycznych czujników wnz oraz aparatury analizującej sygnały wnz. Analiza sygnałów dla celów diagnostycznych powinna być prowadzona z uwzględnieniem rozkładów fazowo-rozdzielczych. W miarę upływu czasu eksploatacji silników, obserwuje się zmianę intensywności wnz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych. Zmiany intensywności wnz przedstawione w charakterystykach typu trend, zmiany charakterystyk fazowo-rozdzielczych, mogą być wykorzystane do diagnostyki on-line stanu izolacji silników,
- w trakcie pomiarów wnz silników nie mierzy się rzeczywistego wyładowania jakie występuje w danym miejscu w izolacji ale ładunek indukowany tym wyładowaniem na zaciskach układu pomiarowego. Uściślając, mierzy się falę wędrującą od lokalnego wyładowania do czujnika pomiarowego,
- wyniki pomiarów wnz silników zależą od: stanu izolacji uzwojeń, stopnia degradacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wnz i aparatury analizującej wnz,
- każdy mechanizm uszkodzeń izolacji posiada swoje odbicie w obrazie wnz. Pozna-

nie tego obrazu może pomóc w określeniu, który rodzaj mechanizmu uszkodzeń jest dominujący. Podczas konkretnej oceny diagnostycznej można spotkać szereg innych obserwacji wnz, bardzo trudnych w ocenie. Autorzy zwracają uwagę na konieczność uwzględniania przy interpretacji wyników pomiarów wnz wpływu warunków mikroklimatycznych. Obserwowane trendy zmian parametrów oceniających poziom aktywności wnz zmieniają się na tyle istotnie wraz ze zmianą temperatury i wilgotności, że utrudnia to obiektywną ocenę wyników. Temperatura robocza może silnie wpływać na wyniki badania wnz. Różne materiały różnie reagują na zmiany temperatury mechanizmy degradacji,

- wyselekcjonowane pomiary umożliwiły analizę trendu zmian stanu izolacji stojana silnika,
- współczynniki stanu izolacji pomiarów wnz w_1 i w_2 wyznaczone są dla mocy wyładowań pdi,
- prowadząc pomiary wyładowań niezupełnych on-line można w oparciu o wyliczenie współczynników w_1 i w_2 oraz stosując przedstawione kryteria oceny stanu izolacji (tab.1, tab.2) śledzić i analizować stan izolacji silnika.

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 napełdów 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.

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 Dia-
gnostyki.
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. Nr 1
s.szymaniec@po.opole.pl