

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

CZUJNIKI I PRZYRZĄDY DO POMIARÓW WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

DETECTORS AND DEVICES FOR MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGES IN ELECTRIC MACHINES

Abstract: Operation of electric machines is accompanied by partial discharges. Partial discharges have a very complex nature. Together with progressing use of machines, there is a change in the intensity of partial discharges with typical phase-resolved distributions. The diagnostics can be carried out using available partial charge detectors, in particular based on factory Pt100 thermoresistors equipped additionally in antenna assemblies. The author's solutions regarding detectors for measurements of partial discharges in electric machines in industrial conditions have proved to be successful. Results of measurements of partial discharges in motors depend on: the condition of their insulation, motor load, temperature of windings, humidity, level of external interference, and characteristics of partial discharge detectors and partial discharge analysing devices.

1. Wstęp

Układy izolacyjne silników WN pracują w warunkach wieloczynnikowego narażenia, co powoduje, że w czasie eksploatacji maszyn powiększają się defekty już istniejące oraz powstają nowe. Procesowi starzenia się izolacji towarzyszy zjawisko wyładowań niezupełnych – (wnz). Wyładowania niezupełne są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko częściowo zwierają izolację między przewodnikami, które mogą być przyległe lub nie do przewodnika [7]. Są one ogólnie uważane za wyładowania lokalne w izolacji i w wielu przypadkach ze znacznym wyprzedzeniem poprzedzają całkowite przebićcie izolacji. Ogólnie wnz mają zwykle postać impulsów o czasie trwania krótszym od $1\mu\text{s}$ [7]. Jeżeli lokalne pole elektryczne przekroczy określoną granicę inicjacji wyładowania w obecności elektronu startowego formuje się lawina elektronów [7]. Zjawisko to jest ograniczone w przestrzeni i ma charakter przejściowy. Skutkiem oddziaływania tego typu zjawisk na układ izolacyjny jest stopniowe jego osłabienie, w szczególności w wyniku kumulowania się uszkodzeń przy niegasnących wnz [7]. Jest to składnik starzenia eksploatacyjnego izolacji. Jak wynika z badań [4, 6], wnz są głównym objawem uszkodzenia izolacji wywołanego jej zestarzeniem. Z tego powodu detekcja wnz izolacji jest ważnym elementem oceny jej stanu. Z badań eksperymentalnych wynika, że: uszkodzenia izolacji maszyn elektrycznych znajdują swoje odbicie w sygnale

wnz i w charakterystyczny sposób różnicują go w zależności od miejsca wystąpienia.

2. Pomiary wnz

Według autora w przemyśle światowym do najbardziej rozpowszechnionych urządzeń służących do pomiarów on-line wnz maszyn i urządzeń elektrycznych należą:

- PDA Premium firmy Adwel.
- InsulGard firmy Cutler–Hammer.
- R-500, R-1500 firmy Vibrocenter.
- PD Trac firmy Iris.

Każde z wymienionych urządzeń pomiarowych jest przygotowane do ciągłego monitorowania wnz i zapamiętywania wyników pomiarowych. Prowadząc regularne pomiary wnz w trybie on-line uzyskuje się możliwość wyznaczenia zmian poziomu wnz w czasie. Gwałtowne, trwałe zmiany poziomu wnz mogą wskazać na pojawiające się nowe uszkodzenie izolacji lub zintensyfikowanie się uszkodzenia istniejącego. W trybie on-line poszczególne pomiary wnz nie zawsze uzyskiwane są w takich samych warunkach pomiarowych, ponieważ parametry pracy maszyn zmieniają się w czasie eksploatacji. Metoda porównywania pomiarów wnz w trybie on-line z bazą danych producentów maszyn lub producentów urządzeń, zawierającą tysiące wyników pomiarów, która coraz częściej jest prowadzona w Kanadzie i USA, przynosi szereg cennych i oczekiwanych przez służby techniczne informacji diagnostycznych. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych metodą wnz w

trybie on-line nie są pozbawione pewnych ograniczeń. Do najistotniejszych należy zaliczyć wpływ zakłóceń. Oceniając pomiary wykonywane w warunkach przemysłowych, trzeba odróżnić wzn występujące w badanej maszynie od zakłóceń. Problem zakłóceń po części rozwiązują same przyrządy pomiarowe, które wykonują pomiary w układzie różnicowym (przyrząd PDA). PDA dokonuje porównania różnicowego impulsów wzn. W oparciu o różnicę w czasie przejścia impulsów do PDA przeprowadzana jest klasyfikacja na impulsy wzn pochodzące z izolacji uzwojenia oraz impulsy pochodzące od zakłóceń]. Wpływ zakłóceń na pomiar wzn można podzielić na sześć grup [7, 9]:

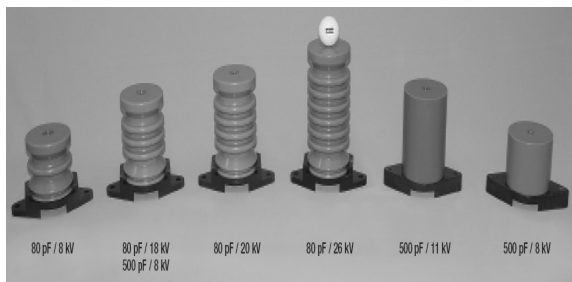
- impulsy generowane przez energoelektronikę,
- sygnały radiowe,
- wyładowania ulotowe,
- przesłuchy,
- wyładowania niezupełne od innych urządzeń,
- impulsy przypadkowe innego pochodzenia.

WZN są impulsami wysokiej częstotliwości występującymi w różnych częściach systemu izolacyjnego. Impulsy te zawierają ładunki i generują napięcia. W ocenie autora wyróżnić można cztery podstawowe metody stosowane do pomiaru wzn maszyn elektrycznych:

- z zastosowaniem sprzęgaczy pojemnościowych,
- z zastosowaniem anten,
- z zastosowaniem cewek Rogowskiego,
- z zastosowaniem czujników RFCT (przekładników wysokiej częstotliwości).

2.1 Sprzęgacze pojemnościowe

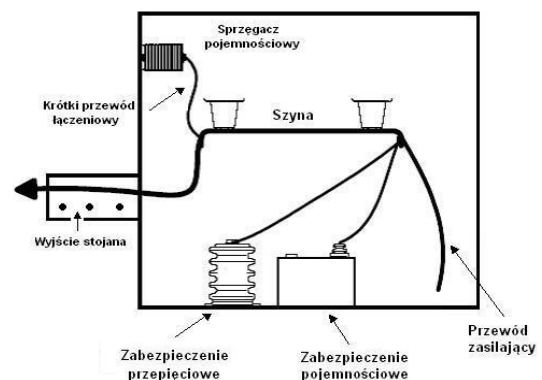
Kondensatory sprzęgające (rys.1) montuje się pomiędzy wysokonapięciowe zaciski przyłączeniowe np. silnika, a uziemiony zacisk w skrzynce przyłączeniowej (rys. 2 i rys.3). Generalnie



Rys. 1. Kondensatory sprzęgające

montuje się pomiędzy wyjścia lub wybrane fragmenty przewodów: silników, generatorów, rozdzielni, a ich wybrane uziemione zaciski.

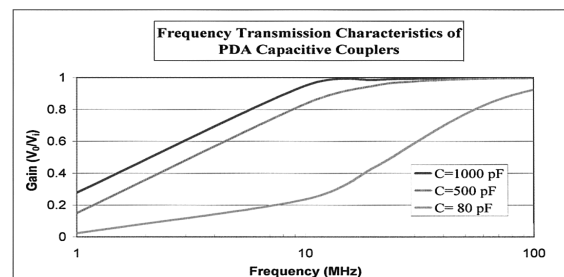
Następnie kondensatory sprzęgające łączy się ekranowanymi kablami z jednostką monitorującą przy użyciu układów zabezpieczających. pomiędzy wyjścia lub wybrane fragmenty przewodów: silników, generatorów, rozdzielni, a ich wybrane uziemione zaciski. Kondensatory sprzęgające są to bezwyładowaniowe, epoksydowo-mikowe czujniki wzn wysokich częstotliwości. Są nieczułe na zakłócenia pochodzące od innych przyrządów elektrycznych i elektronicznych. Pracują one w przedziale częstotliwości od kilku do setek MHz (rys.4), w zależności od pojemności sprzęgacza. Mają najczęściej pojemność 80 pF, 500pF i 1000 pF.



Rys. 2. Schemat podłączenia sprzęgacza do uzwojeń stojana badanej maszyny elektrycznej

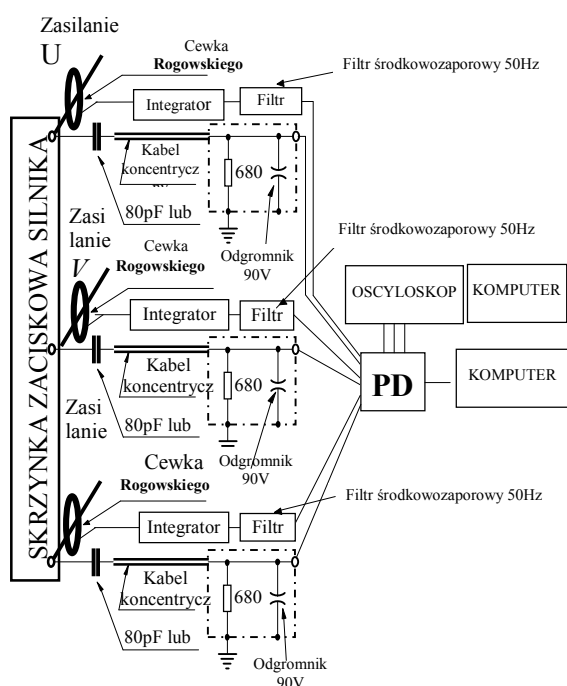


Rys. 3. Przykład podłączenia sprzęgacza do uzwojeń stojana badanej maszyny elektrycznej



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe kondensatorów pomiarowych

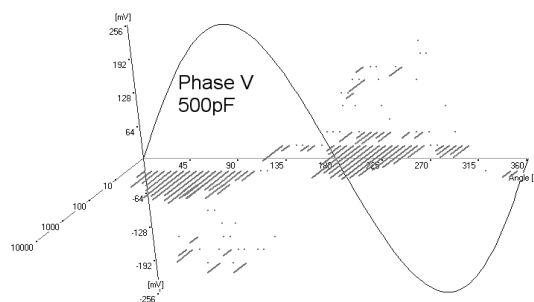
Im większa pojemność zastosowanego sprzęgacza, tym dokładność pomiaru wnz większa. Sprzęgacze pojemnościowe przystosowane są do pracy w pomieszczeniach zamkniętych, ale istnieje również możliwość pracy na wolnym powietrzu w przedziale temperatur $-40^{\circ}\text{C} \div +80^{\circ}\text{C}$. Stosowany przez autora układ do pomiaru wnz on-line z użyciem analizatora PDA PREMIUM przedstawiono na rys. 5. Kondensatory sprzęgające 80 pF lub 500 pF były bezpośrednio podłączone do zacisków fazowych silnika, a więc znajdowały się na



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego PDA [1]

potencjale 6 kV. Kondensatory te skutecznie tłumią przejście napięcia o częstotliwości sieciowej 50 Hz do analizatora. Impedancja (Z) kondensatora 80 pF dla $f=50$ Hz, $Z=39,8$ M Ω , dla sygnałów w.cz czyli wnz; dla $f=1$ MHz, $Z=1,99$ k Ω , a dla $f=150$ MHz, $Z=13,27$ Ω . Dla sygnałów w.cz kondensator pomiarowy 80 pF praktycznie nie stanowi przeszkody. Dla kondensatora 500 pF impedancje są 6,25 razy mniejsze. Można więc stwierdzić, że sygnały napięciowe pochodzące od wnz izolacji badanego silnika w wybranym zakresie pomiarowym, które docierają do zacisków fazowych silnika przechodzą bez większych strat do analizatora wnz (rys. 5). Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki kondensatorów pomiarowych – sprzęgających 80 pF, 500 pF i 1000 pF stosowanych przez czołowych producentów aparatu

diagnostycznej do oceny stanu izolacji w oparciu o pomiary wnz on-line. Kondensatory te mają dolną częstotliwość graniczną odpowiednio 40, 6,4 i 3,2 MHz [1]. Zważywszy na parametry kondensatorów sprzęgających, w tym przede wszystkim na ich czułości, impedancję dla 50 Hz i wnz oraz cenę, najkorzystniejszym w ocenie autora wydaje się stosowanie kondensatorów sprzęgających 500 pF (cena za 3 szt. ok. 3000 Euro). Na rys.6 przedstawiono wynik pomiaru wnz przykładowego silnika.



Rys. 6. Wynik pomiaru wnz przykładowego silnika w fazie V analizatorem PDA przy użyciu kondensatora 500 pF, wykres fazoworozdzielczy [1]

2.2 Anteny

Do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych, można stosować anteny pomiarowe między innymi na bazie czujników typu termorezystory – RTD (Resistance Temperature Detector), czujniki pętlowe oraz czujniki paskowe SSC (Stator Slot Couplers) [1, 2]. Autor artykułu zajmuje się tym zagadnieniem od kilku lat. Dobór anten do pomiarów wnz w silnikach, zdaniem autora powinien być poprzedzony wyborem zakresu pomiaru wnz ze względu na wpływ zakłóceń przemysłowych. Należy ustalić zakres częstotliwości sygnału wnz, w którym jest najkorzystniejszy stosunek sygnału do szumu. Długoletnie badania przemysłowe w tym zakresie prowadziła firma ADWEL. Ustalono, że najkorzystniejszy jest zakres od 1÷150 MHz [1]. Firma VIBROCENTER prowadząc podobne badania w późniejszym okresie ustaliła, że najkorzystniejszy jest zakres od 1 ÷ 20 MHz. Autor w swoich badaniach przyjął do pomiarów wnz silników zakres od 1÷20 MHz. Ważnym elementem w doborze anten są [8]:

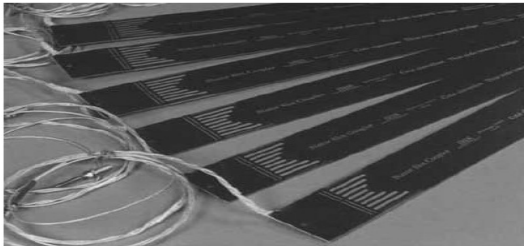
1. Wybór rodzaju anten.
2. Możliwości formalne i techniczne ich zainstalowania oraz dostrojenia.
3. Możliwości kalibracji toru pomiarowego.

Anteny paskowe

Opracowano je w latach osiemdziesiątych w kanadyjskiej firmie Iris [7]. Na rys. 7. przedstawiono przykładowe rozwiązania anten paskowych wspomnianej firmy. Anteny paskowe skonstruowano specjalnie jako czujniki do badań diagnostycznych stanu izolacji w oparciu o pomiary wnz dla dużych generatorów. Wykonane są na bazie szkła epoksydowego.

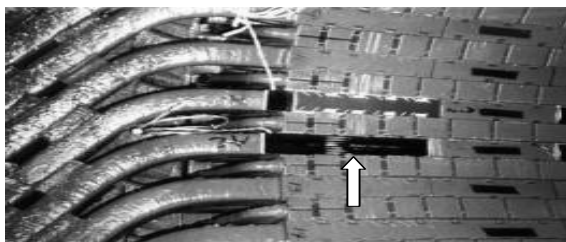
Podstawowe parametry anten firmy Iris :

- pasmo 10 MHz – 100 MHz,
- grubości 2 mm,
- długość do 53 cm.



Rys. 7. Anteny paskowe firmy Iris przygotowane do montażu

Istnieje możliwość dopasowania szerokości anteny do rozmiarów żłobka. Antena mierzy wnz zarówno przy wyjściu uzwojenia ze żłobka jak i z wnętrza żłobka. Czujniki paskowe instalowane są w generatorach i silnikach w żłobkach pod klinami - rys.8. Zazwyczaj do pełnego monitoringu wystarcza komplet 6 anten, jednak dla większych generatorów liczba czujników wzrasta. Antena ma bardzo dobrą czułość, a ponadto jest odporna na wszelkiego rodzaju zakłócenia zewnętrzne i wewnętrzne, wszystkie impulsy o czasie trwania dłuższym niż 6 ns są traktowane jak zakłócenia [7].

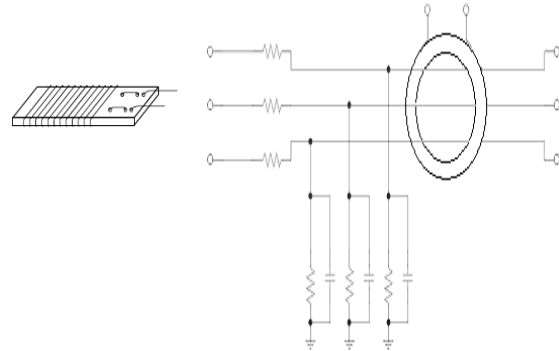


Rys. 8. Antena paskowa umieszczona w żłobku, widok ogólny

Anteny wykorzystujące termorezystory RTD i anteny pętlowe

Anteny do pomiarów wnz w silnikach, wykorzystujące czujniki temperatury typu termorezystory Pt100 oraz anteny pętlowe autor opracował we własnym zakresie [8]. Termorezystory Pt100 są powszechnie stosowane

w silnikach elektrycznych do pomiaru temperatury uzwojeń stojana. Montuje się je fabrycznie w danym żłobku w miejsce wyciętej przekładki międzywarstwowej uzwojenia. Autor na drodze eksperymentalnej opracował antenę, której części składowe przedstawiono na rys. 9. Antena to otwarty obwód drgający LC. Obwód



Rys. 9. Rysunek poglądowy idei anteny na bazie termorezystora Pt100

staje się „otwarty”, to znaczy przekształca się w antenę, gdy jego długość stanowi istotną część długości fali, na którą obwód został nastrojony. Jakość anteny, jako elementu odbierającego jest tym wyższa, im długość jej jest bardziej zbliżona do $\frac{1}{4}$ lub $\frac{1}{2}$ długości fali. Antena zaczyna wydajnie pracować, jeżeli jej długość przekracza $\frac{1}{10}$ długości fali [6]. Długość anteny musi być odpowiednią wielokrotnością długości fali λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

gdzie: λ - długość fali [m],

c - prędkość światła (3×10^8 m/s),

f - częstotliwość [Hz]. Zależność między pojemnością, indukcyjnością, a częstotliwością w obwodzie rezonansowym można wyrazić wzorem:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}} \quad (2)$$

gdzie: f - częstotliwość [Hz],

L - indukcyjność układu antenowego [H]

C - pojemność układu antenowego [F].

W układach antenowych zastosowanych w silnikach, autor starał się ustawić częstotliwość rezonansową anten na 10 MHz, wykorzystując do tego indukcyjności i pojemności: Pt100, przewodów dołączonych do termorezystorów

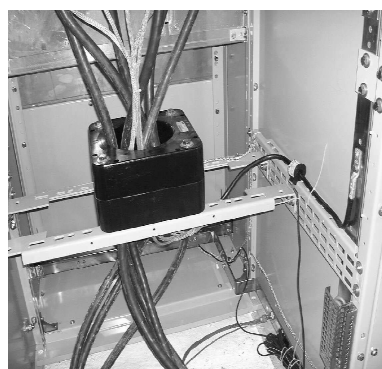
oraz umieszczone na płycie drukowanej zespołu antenowego pojemności i indukcyjności. Przy zamontowaniu termorezystora w żłobku i wyposażeniu go w układ antenowy, układ taki posiada dobrą czułość dla obszaru w strefie $\pm 15^\circ$ (spadek o 20 dB), a mierzy wzn w strefie $\pm 30^\circ$ (spadek o 40 dB). Ważnym uzupełnieniem termorezystorów zainstalowanych fabrycznie mogą być termorezystory zainstalowane dodatkowo od strony napędowej i przeciwnapędowej silnika w obszarach najbliższych części czołowej uzwojeń. Szczególnie ważny jest obszar początków uzwojeń fazowych, połączeń międzycewkowych, międzygrupowych [10]. Anteny do pomiarów wzn na bazie termorezystorów Pt100 można zainstalować w każdym silniku, który już posiada w uzwojeniach stojana termorezystory. Do ich podłączenia nie jest konieczne zatrzymywanie silnika. Zespół czujników oparty na wykorzystaniu termorezystorów można dodatkowo uzupełnić czujnikami antenowymi typu długi przewód ($L \gg d$), ulokowanymi wokół czoł w postaci elementów typu pętla, bądź fragment pętli. Ten rodzaj czujnika jest szczególnie interesujący, bo przy sprzyjających okolicznościach (możliwość nawinięcia wokół czoł pełnej wielokrotnej pętli) ma strefę widzenia wzn pełne 360° . Oznacza to możliwość mierzenia wszystkich wyładowań w strefie czoł [10].

2.3. Czujniki RFCT

Czujniki RFCT (Radio Frequency Current Transformer) mają wysokoczęstotliwościową charakterystykę przenoszenia, co oznacza, że w prądzie przepływającym przez przewód prądowy objęty czujnikiem mogą być mierzone wysokoczęstotliwościowe impulsy od wyładowań niepełnych w zakresie częstotliwości od $600\text{kHz} \div 30\text{MHz}$. Czujniki RFCT umieszcza się np. na osobnym przewodzie zerowym transformatora, uziemionym oplocie kabla zasilającego, uziemieniu kondensatora sprzęgającego, na uziemieniu silnika. Ponieważ niektóre pomiary wyładowań niepełnych są przeprowadzane w przewodach ułożonych na stałe, nierozłącznych, stąd różne wykonania konstrukcyjne czujników RFCT.



Rys. 9. Przykładowe czujniki RFCT



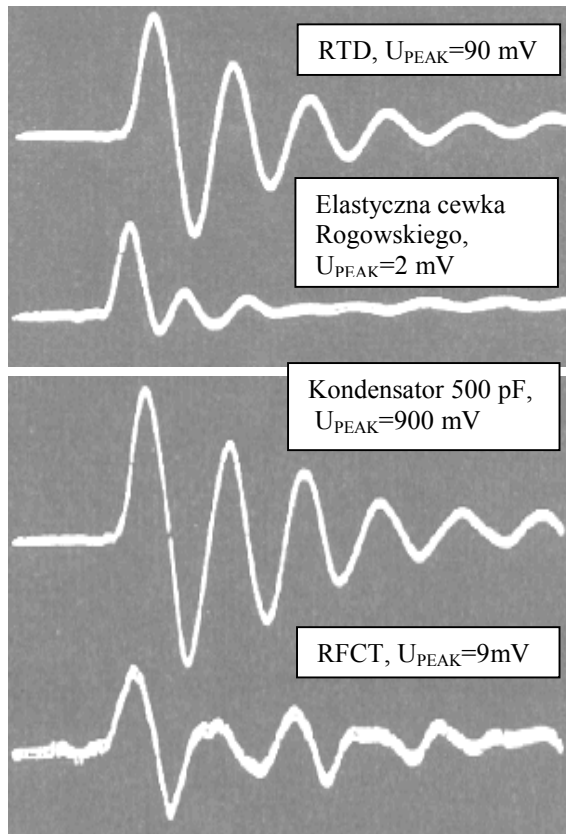
Rys. 10. Przykład montażu czujnik RFCT

3. Uwagi ogólne

Generalnie mierzony poziom wzn on-line maszyn elektrycznych zależy przede wszystkim od stanu izolacji, stopnia jej degradacji, obciążenia maszyny, temperatury uzwojeń, wilgotności, rodzaju czujników wzn, ich charakterystyki oraz od aparatury analizującej (zakres mierzonych częstotliwości). Autor nie stwierdził wyraźnej zależności mierzonego poziomu wzn on-line od miejsca położenia czujników (w żłobkach lub na czołach). Dla ilustracji jak mierzony poziom wzn zależy od rodzaju czujnika na rys. 11 przedstawiono porównanie wyników pomiarów autora, wykonanych różnymi czujnikami w tym samym czasie, „wyładowania” dla przykładowego silnika. Czujniki umieszczono możliwie obok siebie. Porównanie wzajemne czułości czujników w tym konkretnym przypadku wskazuje na następujące relacje:

Elastyczna cewka Rogowskiego	-	1
RFCT	-	4,5
RTD	-	45
Kondensator 500 pF	-	450

Sztywna cewka Rogowskiego, której do badań nie użyto, ma czułość co najmniej 10-krotnie większą od cewki elastycznej.



Rys. 11. Porównanie wyników pomiarów „wyladowania” różnymi czujnikami wnz

4. Uwagi końcowe

Pracy maszyn elektrycznych towarzyszą wyladowania niezupełne. Charakter wnz jest bardzo złożony. W miarę upływu czasu eksploatacji maszyn, obserwuje się zmianę intensywności wnz przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych. Diagnostykę można prowadzić w oparciu o wszystkie dostępne czujniki wnz w szczególności w oparciu o zamontowane fabrycznie w silnikach termorezystory Pt100 wyposażone dodatkowo w zespoły antenowe. Proponowane przez autora własne rozwiązania czujników do pomiarów wnz w maszynach elektrycznych w warunkach przemysłowych sprawdziły się. Wyniki pomiarów wnz silników zależą od: stanu ich izolacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wnz i aparatury analizującej wnz.

5. Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikac. 2003.
 [2]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.

- [3]. Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, C. Kane: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*, IEEE PES'98, February 1-5, Tampa
 [4]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
 [5]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME, Katowice 1998.
 [6]. 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.
 [7]. Gulski E.: *Diagnostowanie wyladowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
 [8]. PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyladowań niezupełnych*.
 [9]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
 [10]. 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.
 [11]. Tułodziecka E., Andrzejewski K., Pietrzak K.: *Monitorowanie układów izolacyjnych uzwojeń stojanów turbogeneratorów GTHW-360 w Elektrowni Belchatów na podstawie pomiarów wnz w systemie off-line*. XIV Konferencja Energetyki, Książ 7-9.09.2005, Materiały Konferencyjne, str. 331-350.
 [12]. Warren V.: *Partial Discharge Testing: A Progress Report*. Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica, June 2003, pp. 1-13.

Autor

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO
 Politechnika Opolska.
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki.
 Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej.
 45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
 s.szymaniec@po.opole.pl