

Piotr Paduch, Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

APARATUROWE ASPEKTY POMIARU WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH - CZĘŚĆ I

EQUIPMENT ASPECTS OF ELECTRIC MACHINE DIAGNOSTICS BASED ON A PD - PART I

Streszczenie: Pracy maszyn elektrycznych towarzyszą wyładowania 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. Proponowane przez autora własne rozwiązania czujników i przyrządów 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.

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. The author's solutions regarding detectors and devices 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.

Słowa kluczowe: diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych
Keywords: insulation diagnostics of the high voltage electric machines

1. Wstęp

Według autorów, w przodujących ośrodkach naukowo-badawczych zajmujących się diagnostyką stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych, zauważyć można cztery kierunkowe obszary prac badawczych:

- prace nad opracowywaniem nowych konstrukcji czujników do pomiarów wnz,
- prace nad opracowaniem uniwersalnego analizatora wnz z ulepszonymi osiąganiami w zakresie tłumienia szumów i zakłóceń,
- prace nad opracowaniem urządzeń przenośnych, mobilnych,
- prace nad opracowaniem coraz to bardziej złożonych analizatorów, umożliwiających pomiary i analizę sygnałów wnz w bardzo szerokim zakresie czasu i częstotliwości, analizatory te umożliwiają wyznaczenie np. funkcji korelacji.

Nowo zaprojektowana aparatura spełnia najczęściej następujące wymagania:

- zastosowanie do różnego rodzaju urządzeń, maszyn wysokonapięciowych (WN),
- duże tłumienia różnego rodzaju szumów, zakłóceń,

- szeroki zakres dynamiki, np. 80dB,
- możliwość pracy w trybie off-line i on-line,
- łatwy i przyjazny dla użytkownika interfejs oprogramowania,
- w miarę rozsądna cena produktu.

Procesy degradacji izolacji są związane z przemianami w strukturze materiałów izolacyjnych. Są to przemiany fizyczne występujące na poziomie molekularnym, przemiany chemiczne, dekompozycja materiału, rozwarstwienie i pękanie materiału, deformacje, powstające szczeliny powietrzne, zerwanie mechanizmu ciągłości izolacji itd. [3, 4, 6, 7, 9, 13]. Jak wykazują badania [14, 18, 19, 20, 21, 23] zjawiskom tym towarzyszą wyładowania niezupełne – wnz, (PD - Partial Discharge). Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń oparta o pomiar wnz, nosi nazwę skrótową PD diagnostyki. Metody te są stosunkowo nowe i w świecie zachodnim coraz częściej stosowane [14, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 30, 32, 33]. W kraju można spotkać pojedyncze przypadki ich stosowania [2, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 30, 31, 32, 33]. Wyładowania niezupełne są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, które tylko czę-

ściowo zwierają izolację między przewodnikami. Mogą być przyległe lub nie do przewodnika [8, 9, 18, 21, 22, 23]. Są one ogólnie uważane za wyładowania lokalne w izolacji i w wielu przypadkach ze znacznym wyprzedzeniem poprzedzają całkowite przebicie [8, 9, 10, 11, 18, 21, 22, 23, 24, 25]. Zagadnienie wykorzystania *wnz* do diagnostyki stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych off-line jest przedstawione w literaturze [1, 2, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 30, 31, 32, 33]. Jak do tej pory, nie ma polskiej normy dotyczącej *wnz* w izolacji uzwojeń silników. W ocenie autorów jednolitych norm w tym zakresie nie ma również na świecie. Znane światowe firmy produkujące uzwojenia maszyn elektrycznych stosują własne, fabryczne normy, wprowadzając kryteria dotyczące intensywności *wnz* głównie dla uzwojeń generatorów. W kraju Instytut Energetyki w Poznaniu doprowadził do wprowadzenia krajowych kryteriów diagnozowania układów izolacyjnych prętów generatorów przez pomiar intensywności *wnz* metodą off-line [2, 30, 31, 32]. *Wnz* w układzie izolacyjnym towarzyszą różne zjawiska fizyczne, których obserwacja i pomiary mogą być wykorzystane do detekcji *wnz* i następnie do wyznaczenia wartości parametrów opisujących *wnz*. Zjawiskami tymi są między innymi [1, 2, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 30, 31, 32, 33]:

- występowanie impulsu prądowego,
- emisja fal elektromagnetycznych,
- zmiany strat dielektrycznych,
- reakcje chemiczne,
- udarowe odkształcenia sprężyste i towarzysząca im emisja fali akustycznej.

1.1. Pomiary *wnz* – rys historyczny

Historia rozwoju tzw. *PD* diagnostyki jest dosyć długa i istnieje na ten temat duża ilość publikacji [1, 2, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 30, 31, 32, 33]. Niełatwe jest zwięzłe przedstawienie szczegółowej chronologii rozwoju badań tego zjawiska. Początki badań sięgają 1777 roku, kiedy LICHTENBERG przeprowadzał eksperymenty w Royal Society w Getyndze. Używał elektroforu czyli generatora ładunków wynalezionej przez Aleksandra VOLTE'ę do elektryzowania cząstek pyłu [14]. W 1873 roku James Maxwell opublikował „Traktat o elektryczności i magnetyzmie”, który ma fundamentalne znaczenie dla projektowania detektorów *PD*, jak i rozwoju modeli fizycznych *PD*, co ułatwiło lepsze zrozumienie tego zjawiska

[14]. Istotny przełom w badaniach *PD* to lata dwudzieste XX wieku, kiedy SCHERING w 1919 zbudował mostek pomiarowy i użył go w 1924 roku do pomiarów. W 1925 roku SCHWAIGER odkrył, że wyładowania koronowe powodują zakłócenia częstotliwości radiowych i dzięki temu można dokonać detekcji *PD*. Ten prosty test nazywa się Radio Interference Voltage RIV [14]. Znaczny postęp w detekcji wyładowań nastąpił w momencie, kiedy pojawiły się oscyloskopy. W 1928 roku LLOYD i STARR zastosowali kondensator i oscyloskop do detekcji *PD*. Sposób ten umożliwił szerokopasmowy pomiar wyładowań koronowych, tzw. metoda paralelogramu [14]. Również w 1928 roku BYRSTLYN stworzył schemat zastępczy dla wyładowania niepełnego dla prądu przemiennego. Prace kontynuowali w 1932 roku GEMANT i PHILIPPOFF [14]. W 1936 r. ARMAN i STARR wykorzystali wąskopasmowe wzmacniacze oparte na obwodach rezonansowych [14]. W 1954 roku stały się dostępne pierwsze przenośne detektory *PD*, zaprojektowane przez MOLE'A, który później (w 1970 roku) opracował pierwsze wytyczne dotyczące kalibratora *PD*. W 1960 DAKIN i MALINARIC zbudowali scalony mostek używany do badań *PD* [14]. W 1966 roku BAILEY oszacował czas trwania *PD* impulsów na kilka nanosekund i ich wpływ na pojemność dielektryka. Potwierdzono to w 1981 roku – prace FUJIMOTO i BOGGS, jak również w 1982 roku prace BOGGS i STONE – wykorzystanie szerokopasmowego oscyloskopu (pasma do 1GHz) [14]. W 1976 roku dr LEMKE zmodyfikował układ zwiększając jego czułość. Zaprojektował również jeden z pierwszych detektorów szerokopasmowych, gdyż do lat osiemdziesiątych używano detektorów w paśmie do 1 MHz. Wykorzystał w nich szerokopasmowe przedwzmacniacze impulsów *PD* (do częstotliwości 10 MHz). Umożliwiło to detekcję i lokalizację wyładowań, a także wyeliminowanie szumów i zakłóceń. Nie było wątpliwości, że pomiary *PD* w zakresie wysokich częstotliwości były znacznie bardziej efektywne [14]. W 1978 TANAKA i OKAMOTO stworzyli komputerowy system do analizy *PD* [14].

Szumy elektromagnetyczne zawsze zakłócały pomiary *PD*

W 1973 roku OKAMOTO poruszył zagadnienie tłumienia szumów przy pomiarach *PD*. W tym samym roku PRAEHAUSER analizował zdolność zrównoważonego mostka do Eli-

minacji szumów [14]. W 1975 BLACK zaprezentował system dyskryminatora impulsów *PD* w silnie zaszumionym środowisku [14]. W późniejszym okresie temat szumów obejmował:

- technikę uśredniania pomiarów,
- technikę korelacji,
- technikę filtrów pasywnych, aktywnych i adaptacyjnych,
- technikę dyskryminatorów okienkowych.

Burzliwy rozwój elektroniki, a szczególnie techniki mikroprocesorowej, spowodował że pomiary wyładowań stały się bardziej dokładne.

1.2. Diagnostyka i monitoring izolacji uzwojeń

Monitorowanie i pomiary stanu izolacji maszyn elektrycznych stały się w ostatnich latach podstawą procedur zapewniających ich bezawaryjną pracę. Nabrało to szczególnego znaczenia, kiedy w przemyśle i energetyce zaczęto stosować powszechnie do zasilania maszyn wysokie napięcia (WN). Wymusiło to zwrócenie uwagi na zjawisko wyładowań niezupełnych – nie powodującego natychmiastowego zniszczenia izolacji, ale poważnie pogarszającego jej jakość. Na podstawie licznych obserwacji i badań *wnz* stwierdzono, że nasilająca się ich częstotliwość, moc i ilość miejsc występowania mogą w niedługim czasie, przy sprzyjających warunkach (temperatura, wilgotność), doprowadzić do trwałego uszkodzenia izolacji a w efekcie do awarii [1, 2, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 30, 31, 32, 33]. Konieczne stało się zatem konstruowanie urządzeń umożliwiających diagnozowanie izolacji i pomiar parametrów wyładowań niezupełnych. W krótkim czasie powstało wiele, mniej lub bardziej udanych, konstrukcji tzw. analizatorów *PD* współpracujących z różnego rodzaju detektorami wyładowań. Ich funkcjonalność, do dzisiejszego dnia, jest proporcjonalna do ceny. Współczesne analizatory wyładowań niezupełnych umożliwiają kompleksową analizę stanu izolacji maszyn elektrycznych. Niestety koszt ich zakupu jest jeszcze bardzo duży i mogą sobie na nie pozwolić zamożne firmy specjalizujące się w tego typu pomiarach. Do współpracy z analizatorami niezbędne są również detektory (czujniki) wyładowań niezupełnych, których koszt też bywa bardzo duży. W dalszym ciągu brak na rynku prostych, przystępnych cenowo wskaźników wyładowań, (czujników, mierników, analizatorów), które w dużym stopniu ułatwiłyby wstępną diagnozę stanu izolacji maszyn elek-

trycznych w przemyśle i energetyce. W niniejszym artykule wykazano, że jest możliwe opracowanie i wykonanie niskokosztowych, czujników *wnz* dla maszyn elektrycznych WN pracujących w warunkach przemysłowych oraz układów służących do ich kalibracji. Opracowana i wykonana aparatura umożliwi wykonanie pomiarów off-line i on-line stanu izolacji uzwojeń maszyn. Podstawowym wymaganiem wobec czujników, od których zaczyna się elektryczny tor pomiarowy, powinna być prostota konstrukcji, łatwy montaż i obsługa. Mogłyby one stać się tanim i powszechnym elementem toru pomiarowego *wnz* i zapewnić prawidłową i skuteczną detekcję *wnz*, zarówno w warunkach pracy on-line, jak i podczas postojów i zaplanowanych remontów – off-line, a co za tym idzie umożliwić nieustanny monitoring i kontrolę stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle i energetyce krajowej. W artykule opisano w szczególności antenowe czujniki *wnz* - stacjonarne i mobilne w oparciu o stosowane w maszynach elektrycznych czujniki do pomiaru temperatury – termorezystory typu RTD (z ang. Resistance Temperature Detector) np. PT100 w wersji pasywnej i aktywnej. Opracowane i wykonane czujniki, impedancje pomiarowe, kalibratory i aparatura pomiarowa spełniają wymagania stosowanych norm dotyczących pomiarów *wnz* [12, 17], w szczególności umożliwiają pomiary *wnz* maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych, to znaczy w warunkach zakłóceń przemysłowych i przy występujących w praktyce uwarunkowaniach środowiskowych.

1.3. Tor pomiarowy elektrycznego pomiaru *wnz*

Elektryczny pomiar *wnz* jest w praktyce przemysłowej najczęstszym pomiarem *wnz*.

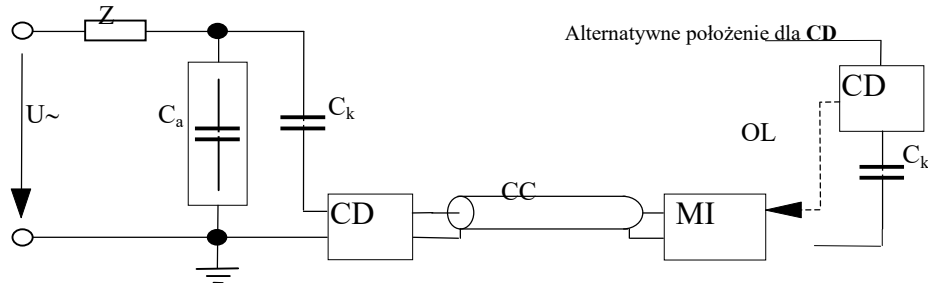
Charakterystyka toru pomiarowego wg normy IEC60270 [17]

Na rys. 1.3.1 a, b, c, d przedstawiono układy pomiarowe *wnz* według normy IEC60270 [17, 34]. Podczas pomiarów bezpośrednich (*straight detection*) impedancję pomiarową *CD* łączy się często szeregowo z kondensatorem sprzęgającym C_k , co zabezpiecza urządzenie pomiarowe przed przebicciem. Nieco większą czułość uzyskuje się w układzie pomiarowym, w którym impedancja pomiarowa jest połączona z obiektem. Wynika to z faktu, że do kondensatora C_k dodają się pojemności rozproszenia. (rys. 1.3.1 a, b) Pomiary bezpośrednie są jednak narażone

na zakłócenia zewnętrzne. Szerokie widmo impulsu wyładowania mogące zawierać się od kilkuset kHz do jednego MHz umożliwia stosowanie pomiarów z zastosowaniem systemu tzw.

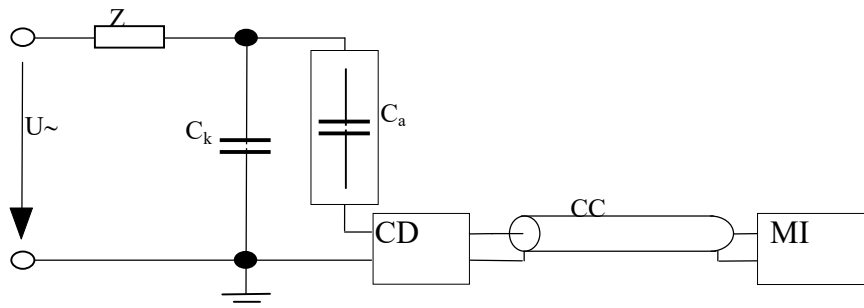
„quasi całkowania” [17, 26÷29, 34]. Praktycznie, ze względu na wykorzystywanie do całkowania aktywnych filtrów pasmowych,

a)



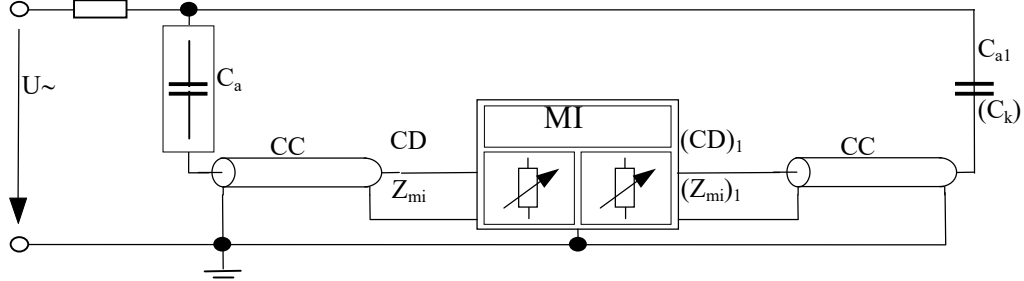
Rys. 1.3.1.a. Układ bezpośredni z szeregowym kondensatorem sprzęgającym [34]

b)



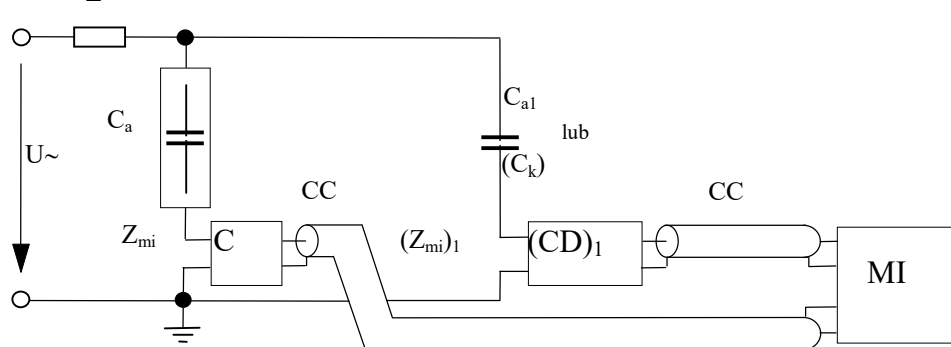
Rys. 1.3.1.b. Układ bezpośredni z szeregowo połączonym obiektem [34]

c)



Rys. 1.3.1.c. Układ mostkowy [34]

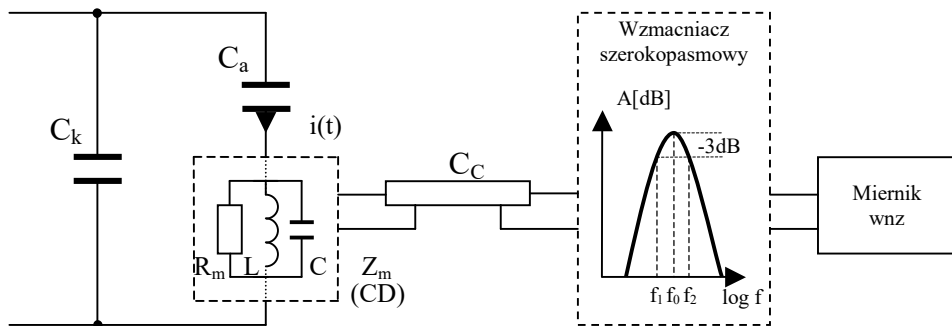
d)



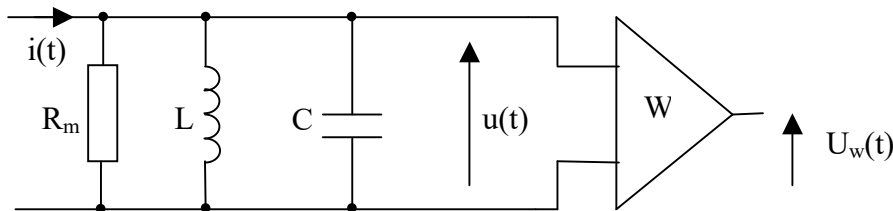
Rys. 1.3.1. d. Układ z detekcją polaryzacji [34]

Rys. 1.3.1. Podstawowe układy pomiarowe PD wg IEC60270 [34]

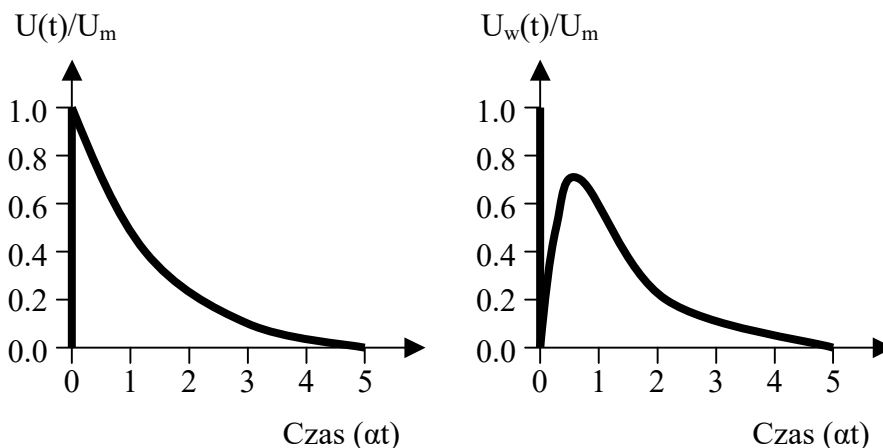
- gdzie: U_{\sim} sieć zasilająca
 Z_{mi} impedancja wejściowa systemu pomiarowego
 CC przewód połączeniowy
 OL połączenie optyczne
 C_a badany obiekt
 C_k kondensator sprzęgający
 CD impedancja pomiarowa - sprzęgająca (coupling device)
 MI urządzenie pomiarowe
 Z filtr



Rys. 1.3.2. Schemat układu pomiarowego w systemie szerokopasmowym [26]



Rys. 1.3.3. Schemat zastępczy impedancji pomiarowej Z_m ze wzmacniaczem W [6]



Rys. 1.3.4. Napięcie na wejściu wzmacniacza (a) i na wyjściu (b) – $L=0$, $\tau_w=0,3/a$ [6]

wykorzystuje się dwa rodzaje układów pomiarowych – szerokopasmowe i wąskopasmowe. Znacznie lepsze efekty w tłumieniu zakłóceń można uzyskać w układzie mostkowym (balanced detection) (rys. 1.3.1 c), w którym impedancja pomiarowa składa się z dwóch części równoważonych oddzielnie i połączonych z masą. Największe tłumienie zakłóceń osiąga się w przypadku, gdy układ jest symetryczny

tzn. $C_a = C_k$ [8]. Wadą szerokie widmo impulsu wyładowania mogące zawierać się od kilkuset kHz do jednego MHz umożliwia stosowanie pomiarów z zastosowaniem systemu tzw. „quasi całkowania” [17, 26÷29, 34]. Praktycznie, ze względu na wykorzystywanie do całkowania aktywnych filtrów pasmowych, wykorzystuje się dwa rodzaje układów pomiarowych – szerokopasmowe i wąskopasmowe. W układzie sze-

rokokopasmowym impedancja pomiarowa zawiera układ równoległy RLC , w którym na L składa się dopasowujący transformator w. cz., galwanicznie oddzielający obwód wysokiego napięcia. Natomiast do pojemności C dołączona jest równoległe pojemność przewodu łączącego impedancję z układem pomiarowym (rys. 1.3.2) [26, 27, 28]. W takiej konfiguracji impulsy prądowe wyładowań niezupełnych są niewrażliwe na zmiany parametrów pojemności sprzęgającej C_k i obiektu badanego C_a . Pojemności te rozpatruje się jako szeregowe połączenie C_k i C_a równoległe do pojemności C impedancji (1.3.2), która stanowi filtr selektywny o częstotliwości rezonansowej [26]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC^*}} \quad (1.3.1)$$

gdzie:

L i C^* indukcyjność i pojemność impedancji sprzęgającej [244]:

$$C^* = C_c + \frac{C_a C_k}{(C_a + C_k)} \quad (1.3.2)$$

Proporcjonalnie do dobroci obwodu LC , niepożądaną częstotliwości harmoniczne mniejsze od f_1 (dolna częstotliwość graniczna) i większe od f_2 (górną częstotliwość graniczną) są tłumione. W układach szerokopasmowych częstotliwości graniczne określone są spadkiem wzmocnienia o 3 dB. Odpowiedzią układu na impuls prądowy w_nz jest dobrze tłumiona oscylacja [26, 27, 28]. Schemat zastępczy impedancji pomiarowej, w dalszej części nazywanej też Z_m , z wyjściem na wzmacniacz przedstawia rysunek 1.3.3 [64]. Pobudzenie układu impulsem prądowym $i(t)$ spowoduje, że napięcie wejściowe wzmacniacza $u(t)$ można opisać zależnością [6]:

$$u(t) = \frac{q_m}{c} e^{-\alpha t} \left[\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right] \quad (1.3.3)$$

gdzie:

q_m – ładunek impulsu,

$\alpha = \frac{1}{2R_m C}$ – współczynnik tłumienia (przy

założeniu dobroci $Q < 1$),

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ – pulsacja drgań własnych,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – pulsacja rezonansowa LC.

Jeżeli założymy dużą dobroć obwodu i współczynnik tłumienia $\alpha \ll \omega$ można zależność 1.3.3 uprościć do [6]:

$$u(t) = \frac{q_m}{c} e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (1.3.4)$$

W przypadku gdy $Z_m \approx R_m$ $u(t)$ będzie aperiodycznym impulsem wykładniczym [6]:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \quad (1.3.5)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{1}{R_m C} \text{ - współczynnik tłumienia,}$$

Dla $U_m = \frac{q_m}{c} e^{-\alpha t=0}$.

Dla wzmacniacza o paśmie ograniczonym napięcie wyjściowe $U_w(t)$ można opisać [6]:

$$U_w(t) = \frac{U_m}{1 - \alpha \tau_w} \left[e^{-\alpha t} - e^{-t/\tau_w} \right] \quad (1.3.6)$$

$\tau_w = R_w C_w$ zastępcza stała czasowa

wzmacniacza (rys. 1.3.4).

Dla różnych wartości pulsacji ω , w stosunku do stałej wartości współczynnika α , napięcie $u(t)$ jest proporcjonalne do ładunku pozornego. Istotnym parametrem w przypadku różnych układów detekcji jest rozdzielczość czasowa impulsów. Jest ona potrzebna do rejestracji amplitudy następujących po sobie impulsów. Określa ją tzw. czas rozdzielczy τ_r , który definiuje się jako czas, po którym wartość sygnału spadnie do 10% wartości szczytowej [6, 26, 27, 28]. Typowa rozdzielczość w paśmie od 40 do 400 kHz wynosi 5÷9 μs [6]. W międzynarodowej normie IEC60270 [17] pasmo częstotliwości dla pomiarów szerokopasmowych określa się przy spadku wzmocnienia o 6 dB, natomiast w dotychczasowej polskiej normie PN-86/E-04066 określano ją przy spadku wzmocnienia o 3dB. W normie IEC60270 pasmo pomiarowe dla pomiarów szerokopasmowych definiuje się następująco [34]:

- dla dolnej częstotliwości granicznej

$$f_1: 30kHz \leq f_1 \leq 100kHz; \quad (1.3.7)$$

- dla górnej częstotliwości granicznej

$$f_2: f_2 \leq 500kHz; \quad (1.3.8)$$

- dla wyznaczonego pasma

$$\Delta f: 100kHz \leq \Delta f \leq 400kHz \quad (1.3.9)$$

System pomiaru w_nz wąskopasmowy charakteryzuje się szerokością pasma filtru aktywnego w granicach kilku do kilkunastu kHz. Zasadę działania ilustruje rys. 1.3.5 [244, 245]. W przyrządach pomiarowych o systemie wąskopasmowym częstotliwość rezonansowa i szerokość może być nastawiana płynnie od kilkadziesiąt kHz do kilku MHz [26, 27, 28]. Impedancja pomiarowa Z_m stanowi dla impulsów prądowych wyładowania filtr górnoprzepustowy

wy, a jej mała rezystancja powoduje, że impulsy nie są całkowane. Pojemność przewodu C_C jest zwarta falową impedancją Z_0 . Napięcie podane na wzmacniacz selektywny jest proporcjonalne do impulsu prądowego $i(t)$. Układ nie rozróżnia jednak polaryzacji impulsów [26, 27, 28]. W normie IEC60270 pasmo pomiarowe dla pomiarów wąskopasmowych definiuje się następująco [34]:

- szerokość pasma

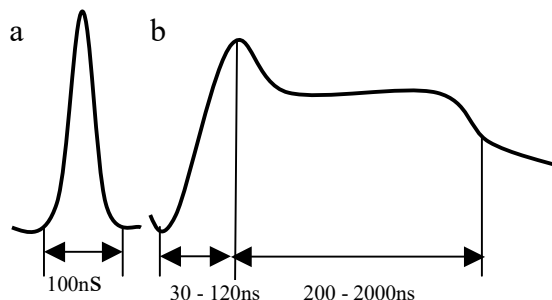
$$\Delta f: 9kHz \leq \Delta f \leq 30kHz \quad (1.3.10)$$

- częstotliwość środkowa

$$f_m: 50kHz \leq f_m \leq 1 MHz. \quad (1.3.11)$$

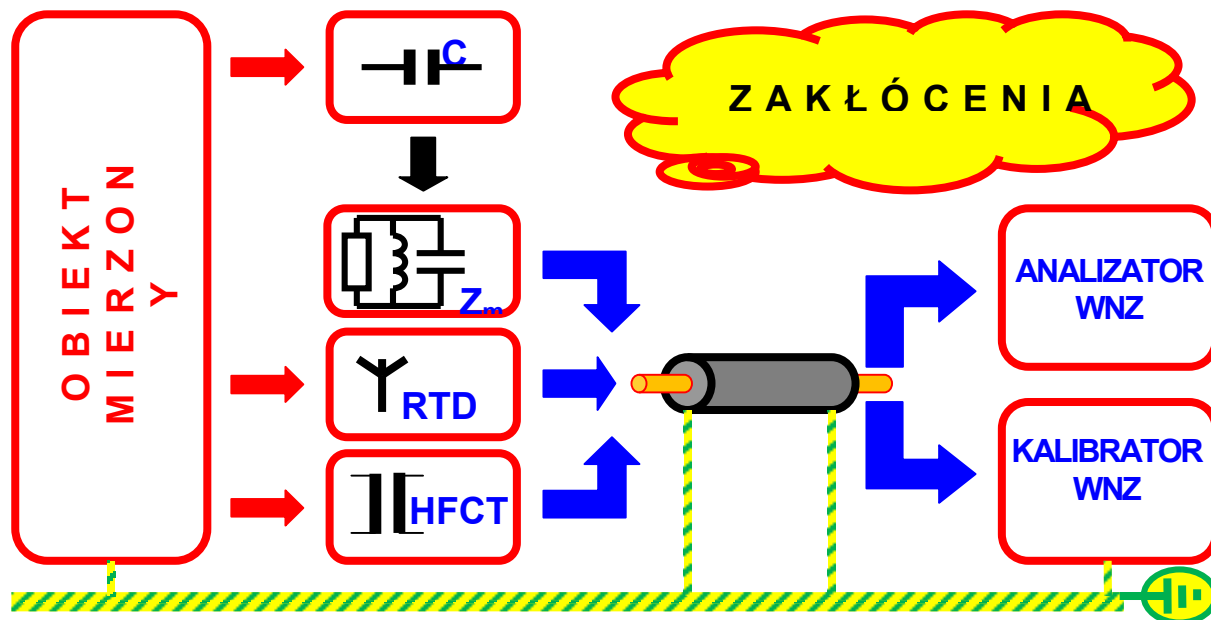
Detekcja wąskopasmowa wykorzystywana jest w miernikach zakłóceń RDV (*Radio Disturbance Voltage*) i cechuje się małą rozdzielczością przy małej odporności na zakłócenia impulsowe. W obu systemach pomiarowych wskazana jest jednak kontrola oscyloskopowa. Istnieją bowiem zagrożenia niekontrolowanych uchybów pomiarowych, wynikających z dopuszczalnego czasu trwania impulsów *wnz* (szczególnie dotyczy to systemu wąskopasmowego, w którym czas zanikania impulsu jest stosunkowo długi). Czas ten jest określony przez górną częstotliwość pasma f_2 w przypadku systemu szerokopasmowego lub f_m –

średnią częstotliwość dla systemu wąskopasmowego [26, 27, 28]. Duże znaczenie przy pomiarach ma również kształt mierzonego impulsu wyładowczego [12, 26, 27, 28]. Wynika on bezpośrednio z mechanizmu *wnz* i przy wyładowaniach we wtrącinach gazowych ma zwykle kształt trójkąta o podstawie do 100 ns – rys. 1.3.6a [12, 26, 27, 28].



Rys. 1.3.6. Kształt oscylogramów prądów *wnz* [12, 26, 27, 28]: a – typowy (trójkątny) we wtrącinie, b – we wtrącinie o dużej średnicy (>5mm) po czasie przyłożenia napięcia >30min

Wyładowania we wtrącinach o większej średnicy mogą mieć kształt prostokątny o czasie trwania ok. 1 μs, lub dłuższym (wyładowania w oleju) - rys. 1.3.6b [12].



Rys. 1.3.7. Poglądowy schemat elektrycznego toru pomiarowego wyładowań niepełnych [12]

Istnieje wtedy niebezpieczeństwo wystąpienia błędów na skutek np. nasycenia się wzmacniacza, gdyż większość przyrządów pomiarowych prawidłowo mierzy krótkie impulsy [12, 26, 27, 28]. Stopień zniekształcenia przebiegów impulsów

na wyjściu wzmacniacza szerokopasmowego lub wąskopasmowego, decyduje o rozdzielczości przyrządu pomiarowego – określa się go tzw. czasem lub okresem rozdzielczym T_r . Jest to okres czasowy, w którym zachodzi jeszcze prawidłowy pomiar ładunku q . Pod-

wana jest także przez producentów maksymalna częstotliwość powtarzania impulsów wnz [12, 26, 27, 28]:

$$n_r = \frac{1}{T_r} \quad (1.3.12)$$

Prawidłowość pomiaru będzie zachowana, jeżeli czas trwania T_b , odpowiedzi miernika wyładowań, będzie mniejszy od czasu rozdzielczego T_r (1,5-3 razy) [12, 26, 27, 28]. Bardziej rozbudowane analizatory i mierniki wyładowań niepełnych umożliwiają jednoczesny pomiar parametrów wnz i podgląd oscyloskopowy przebiegów. Pozwala to odróżnić wnz od zakłóceń i potwierdzić prawidłowość pomiaru.

Podstawowe elementy toru pomiarowego

Do podstawowych elementów toru pomiarowego należy zaliczyć:

- obiekt badany,
- czujniki wnz,
- impedancja pomiarowa,
- przewody połączeniowe,
- kalibratory wnz,
- analizatory wnz.

Schemat poglądowy elektrycznego toru pomiarowego wnz przedstawia rys. 1.3.7.

Obiekt mierzony

Z punktu widzenia niniejszego artykułu obiektem mierzonym jest uzwojenie silnika lub stojana generatora a w zasadzie jego izolacja. Silnik, w którym zainstalowano czujniki RTD typu PT100, oprócz tradycyjnych sprzęgaczy pojemnościowych i impedancji pomiarowej, umożliwia zastosowanie do pomiarów przekładników wysokoczęstotliwościowych HFCT lub cewek Rogowskiego.

Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikacyjna 2003.
- [2]. Andrzejewski K., Tułodziecka E.: *Analiza intensywności wyładowań niepełnych prototypowego układu izolacyjnego VPI stojana hydrogeneratora 200MW 15,75 kV*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 64/2002.
- [3]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [4]. 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.

- [5]. DIMRUS: *Analizator R2200, nota aplikacyjna, dokumentacja 2011*.
- [6]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydróń P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [7]. Flisowski Z., *Technika wysokich napięć*, Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa 1988.
- [8]. 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.
- [9]. Gulski E.: *Diagnostowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [10]. Kandora W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin – Rich*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2012.
- [11]. Kandora W., Szymaniec S.: *Badania i Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich*. Oficyna. Wydawnicza. PO, Opole 2016, Studia i Monografie, Politechnika Opolska z. 439.
- [12]. Paduch P.: *Aparaturowe aspekty diagnostyki izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2017.
- [13]. Paoletti G., Golubev A.: *Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment, Diagnostics*. Cutler-Hammer Engineering Services 2001.
- [14]. *PD diagnostics – its history and future, PD Workshop*, Alexandria, Virginia, Decmber 3&4 2001
- [15]. Plutecki Z.: *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niepełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.325. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
- [16]. Plutecki Z., Szymaniec S.: *An analysis of the influence of microclimate on partial discharge emissions of electric machines in the conditions of industrial operation – own research*. Archives of Electrical Engineering, No 4, 2013., pp.629-648.
- [17]. PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niepełnych*.
- [18]. Русов В.А.: *Измерение частотных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования*. Издательство УрГУПС 620034, г. Екатеринбург??ург 2011.
- [19]. Russwurm D.: *On-Site Partial Discharge Minitoring Rusing the differentia Lemke Probe LDP-5 and its accessories*. HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop 2000.

- [20]. Rux L.M., Bertenshaw D.R.: *Assessing the condition of rotating machines stator winding insulation using the ramped direct high-voltage method*. INSUCON 2002, 18-20 June 2002, Berlin.
- [21]. Sasic M., Bertenshaw D.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors –Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods*, SDEMPED, ITALY 1-3 Sept. 2001 pp.1-5.
- [22]. Sasic M.: *Partial discharge measurement on rotating machines*. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.
- [23]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [24]. 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.
- [25]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i Diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt 333.
- [26]. Tettex Information 310: *Technika pomiaru wyladowań niezupełnych*.
- [27]. Tettex Information 311: *Pomiary wyladowań niezupełnych. Problemy i możliwości ich rozwiązania z pomocą uniwersalnego systemu pomiarowego*.
- [28]. Tettex Instruments: *Ultrasonic partial discharge detector 925*.
- [29]. Tettex Instruments: *True Digital Partial Discharge Analysing System*.
- [30]. Tułodziecka E., Andrzejewski K.: *Komputerowa diagnostyka izolacji maszyn elektrycznych wysokiego napięcia metodą pomiaru wyladowań niezupełnych*. Wyd. BOBRME, Katowice 1995, Maszyny Elektryczne-Zeszyty Problemowe Komel nr 50, str. 65 – 73.
- [31]. Tułodziecka E., Andrzejewski K.: *Wykrywanie stanów przedawaryjnych izolacji uzwojeń stojanów generatorów metodą bezpośredniego pomiaru wyladowań niezupełnych w układzie off-line*. Wyd. BOBRME, Katowice 1996, Maszyny Elektryczne-Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 52, str. 56-63.
- [32]. Zubelik P., Nadacny K., Andrzejewski K., Zajaczek M.: *System oceny układów izolacyjnych hydro - i turbogeneratorów dużej mocy najnowszymi metodami, głównie przez pomiary i analizę wyladowań niezupełnych*. Instytut Energetyki - Zakład Izolacji, Poznań 2006.
- [33]. Zydroń P.: *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyladowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2001.
- [34]. IEC60270: 2000, *High voltage test techniques – Partial discharge measurements*.

Autorzy

prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska. Wydział Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki. Katedra Elektrowni
i Systemów Pomiarowych
dr inż. Piotr Paduch
Politechnika Opolska. Wydział Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. 1
s.szymaniec@po.opole.pl