

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki



ROZPRAWA DOKTORSKA

Aparaturowe aspekty diagnostyki izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych

Autor pracy:

mgr inż. Piotr Paduch

Promotor:

prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec

Opole 2016

Spis treści

1. Wprowadzenie	1
1.1 Uwagi ogólne.....	1
1.2 Pomiar wnz - rys historyczny.....	3
1.3 Teza i cel pracy.....	4
2. Metody diagnostyki izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych	7
2.1 Model układu izolacyjnego.....	8
2.2 Diagnostyka izolacji metodą Prof. Tadeusz Glinki.....	8
2.3 Test Meggera.....	10
2.4 Rampa wysokonapięciowa.....	13
2.5 Metody prądu przemiennego, współczynnik strat dielektrycznych.....	13
2.6 Metody impulsowe diagnostyki.....	14
3. Wyładowania niezupełne	16
3.1 Schemat zastępczy układu izolacyjnego z pojedynczą wtrąciną gazową (inkluzją).....	16
3.2 Schemat zastępczy typowych uszkodzeń izolacji maszyny elektrycznej...	23
3.3 Podstawowe wielkości charakteryzujące wnz wg IEC 60270 i ujęte w PNEN60270.....	24
3.4 Rejestracja impulsów wnz.....	26
3.5 Nielektryczne metody pomiaru wyładowań niezupełnych według IEC60270.....	29

4. Tor pomiarowy elektrycznego pomiaru wnz.....	31
4.1 Charakterystyka toru pomiarowego wg normy IEC60270.....	31
4.2 Podstawowe elementy toru pomiarowego.....	38
4.3 Pomiary wnz oscyloskopem.....	51
5. Prototyp aktywnego czujnika typu RTD do wyładowań niezupełnych.....	55
5.1 Schemat ideowy, budowa, zasada działania.....	55
6. Prototyp kondensatora do pomiarów wnz o pojemności 1000 pF.....	61
6.1 Wykonanie prototypu kondensatora i weryfikacja parametrów.....	61
7. Impedancja pomiarowa.....	69
7.1 Charakterystyka impedancji pomiarowej, wykonanie prototypu do badań.....	69
8. Kalibrator wyładowań niezupełnych, skalowanie kalibratorów i torów pomiarowych.....	71
9. Analizatory wnz w przemyśle.....	81
10. Zakłócenia i niebezpieczeństwa środowiskowe podczas pomiarów wnz oraz metody ich eliminacji.....	88
10.1 Źródła i rodzaje zakłóceń.....	88
10.2 Niebezpieczeństwa środowiskowe.....	90
10.3 Zagrożenia cybernetyczne.....	92
10.4 Metody ograniczania zakłóceń.....	93
11. Wnioski.....	100
12. Literatura.....	102

Wykaz ważniejszych oznaczeń, terminów i skrótów

AC – napięcie przemiennie
C - pojemność
CIV – corona inception voltage (napięcie
c – prędkość światła
CH – kanał
CPLD – (ang. Complex Programmable Logic Device)
d – grubość dielektryka
DC – napięcie stałe
DD – depolaryzacja dielektryka
DFŁ – współczynnik diagnostyczny izolacji
E – natężenie pola elektrycznego
EMC – (ang. ElectroMagnetic Compatibility)
 ε - przenikalność elektryczna
 ε_g - przenikalność elektryczna inkluzji gazowej
 ε_S - przenikalność elektryczna dielektryka izolacji
f – częstotliwość
F – iskiernik
FPGA – układ programowalny (Field Programmable Gate Array)
 φ_i – kat fazowy wyladowania
GND – masa układu
 γ – konduktywność
HV – wysokie napięcie
i – prąd
k – współczynnik absorpcji
 k_{75} – współczynnik temperaturowy izolacji
L – indukcyjność
l – długość fali
LED – (ang. light-emitting diode)
N – całkowita liczba zarejestrowanych impulsów
n – średnia liczba impulsów wnz
NIR – niska podczerwień
Notch Filter – filtr pasmowy zaporowy
NQN – (Normalized Quantity Number) - całkowita aktywność wnz
Off-line – czas na postoju maszyny
On-line – czas normalnej pracy urządzenia
P – moc czynna
PD – Partial Discharge (wyladowanie niezupełne)
 PD^+ – wyladowanie w połówce dodatniej napięcia
 PD^- – wyladowanie w połówce ujemnej napięcia
PI – współczynnik polaryzacji izolacji

q – ładunek elektryczny

qV – krzywa zależności ładunku od napięcia

ρ – opór właściwy

R_{15}, R_{60}, R_{600} – wartości rezystancji izolacji po 15s, 60s, 600s.

RDT – rezystancyjny czujnik temperatury

RFCT – przekładnik prądowy wysokich częstotliwości

S – moc pozorna

S_n – znamionowa moc pozorna

S/N – (ang. Signal-to-Noise Ratio SNR) odstęp od szumów

SV – test napięciem schodkowym

σ – konduktywność, odchylenie standardowe

τ – czas

T – temperatura

t – stałą czasowa

t_{od} – czas odbudowy napięcia

$tg\delta$ – współczynnik strat dielektrycznych

U – napięcie

U_n – napięcie znamionowe

U_p – napięcie przebicia

U_T – napięcie udaru

UV – promieniowanie ultrafioletowe

U_Z – napięcie zapłonu wyladowania

U_g – napięcie gaśnięcia

VIS – światło widzialne

W – energia układu

WN – wysokie napięcie

wnz – wyladowanie niezupełne

Z_g – zastępcza impedancja kanału wyladowania w źródle

Z_m – impedancja pomiarowa

ω – pulsacja

1.Wprowadzenie

1.1 Uwagi ogólne

Izolacja uzwojeń w maszynie elektrycznej według prof. Mirosława Dąbrowskiego [18] jest złem koniecznym, bo nie bierze udziału w wytwarzaniu momentu elektromagnetycznego, natomiast powoduje zwiększenie rozmiarów i masy maszyny. Dodatkowo izoluje cieplnie uzwojenia i pogarsza odprowadzanie powstającego ciepła w czasie pracy maszyny [18]. Stan techniczny układu elektroizolacyjnego maszyny elektrycznej decyduje o możliwościach jej bezpiecznej eksploatacji.

Wykonanie dobrego układu elektroizolacyjnego w maszynach elektrycznych jest trudnym zadaniem projektowym, technologicznym i wykonawczym [18,66,117,124,132,142]. Obejmuje: konstrukcję uzwojenia, rdzenia stojana, klinowanie, mocowanie czół uzwojenia, dobór materiałów elektroizolacyjnych i technologii izolacji [18,66,117,124,132,142].

Układ elektroizolacyjny maszyn elektrycznych powinien być tak wykonany, aby na częściach składowych ich konstrukcji poza uzwojeniami nie występowało napięcie elektryczne, nie powinien przez nie płynąć prąd. Obwody elektryczne maszyn muszą być odizolowane od ich konstrukcji.

Prof. Mirosław Dąbrowski [18] w układzie elektroizolacyjnym maszyn elektrycznych wyróżnia izolację główną i zwojową. Izolacja główna według autora [18] to izolacja obwodu elektrycznego względem pozostałych elementów konstrukcyjnych maszyny. Zalicza się do niej również izolację poszczególnych obwodów elektrycznych względem siebie (izolacja międzyfazowa). Izolację zwojową tworzą izolacje poszczególnych składowych tego samego obwodu elektrycznego względem siebie [18].

W kraju jak i na świecie dominują dwie podstawowe technologie wykonywania izolacji maszyn elektrycznych nowych i poddanych remontom [18,66,117,124,132,142].

1. Izolacja termoutwardzalna, izolacja prasowana z zastosowaniem termoutwardzalnych taśm mikowych z dużą zawartością lepiszcza. W specjalistycznej literaturze nazywana Resin-Rich (RR) [18,66,117,124,132,142]. Technologia RR jest „technologią naprawialną” [73,124,132] to znaczy uzwojenie maszyny elektrycznej, które jest wykonane w tej technologii można z technicznego punktu widzenia naprawić.
2. Izolacja wykonana technologią próżniowo-ciśnieniową VPI (Vaccum Pressure Impregnation), izolacja z zastosowaniem porowatych taśm mikowych o małej zawartości lepiszcza [18,66,117,124,132,142]. Uzwojenie wykonane w tej technologii nie nadaje się

w zasadzie do remontu [73]. Remont taki z punktu widzenia ekonomicznego jest nieopłacalny i technicznie bardzo skomplikowany.

Izolacja uzwojeń maszyn elektrycznych powinna zapewnić okres użytkowania maszyn w przewidzianych dla nich warunkach eksploatacji przez okres co najmniej 15÷20 lat. Przyczyny uszkodzeń izolacji uzwojeń w maszynach elektrycznych są przedstawione w literaturze [1,7,8,26,32,45,66,93,96,105,106,116,124,132,139÷143].

Można je podzielić następująco [124,132]:

- narażenia elektryczne,
- narażenia termiczne,
- narażenia mechaniczne,
- narażenia termomechaniczne,
- narażenia klimatyczne,
- narażenia chemiczne,
- narażenia wywołane promieniowaniem.

Układ elektroizolacyjny maszyn elektrycznych przemysłowych WN pracuje najczęściej w bardzo trudnych warunkach wieloczynnikowych zagrożeń. Dodatkowo proces degradacji izolacji zwiększa się przez [116,124,132]:

- wzrost liczby godzin pracy,
- wzrost liczby rozruchów,
- stany nieustalone, w szczególności przez zwarcia.

Występowanie wyżej wymienionych czynników powoduje proces starzenia się izolacji i degradację układu elektroizolacyjnego maszyny elektrycznej. Proces ten może mieć gwałtowny przebieg [42,45,116]. 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. [42,66,116,132].

Jak wykazują badania [1,8,26,38,42,45,66,105,106,116,124,132] 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 [132]. W kraju można spotkać pojedyncze przypadki ich stosowania [132].

Diagnostyka stanu technicznego izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych należy do grupy najważniejszych działań technicznych służb utrzymania ruchu w danym zakładzie przemysłowym. Wchodzi w zakres podstawowych ich obowiązków. Prowadzą ją najczęściej działy diagnostyki lub grupy diagnostyczne. W zakładach produkujących i remontujących maszyny elektryczne powyższe działania prowadzą najczęściej wydziały kontroli jakości.

1.2 Pomiary wnz – rys historyczny

Historia rozwoju tzw. PD diagnostyki jest dosyć długa i istnieje na ten temat duża ilość publikacji. W związku z tym trudne 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 wynalezione go przez Aleksandra VOLTE'ę do elektryzowania cząstek pyłu [94].

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 [94].

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 [94].

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 parallelogramu [94].

Również w 1928 roku BYRSTLYN stworzył schemat zastępczy dla wyładowania niepełnego dla prądu przemiennego. Prace kontynuowali w 1932 roku GEMANT i PHILIPPOFF [94].

W 1936 r. ARMAN i STARR wykorzystali wąskopasmowe wzmacniacze oparte na obwodach rezonansowych [94].

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 [94].

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 (pasmo do 1GHz) [94].

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 [94].

W 1978 TANAKA i OKAMOTO stworzyli komputerowy system do analizy PD [94].

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 eliminacji szumów [94].

W 1975 BLACK zaprezentował system dyskryminatora impulsów PD w silnie zaszumionym środowisku [94].

Inne późniejsze podejścia do tematu szumów obejmowały:

- 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.

1.3 Teza i cel pracy

Monitorowanie i pomiary stanu izolacji urządzeń i maszyn elektrycznych stały się w ostatnich latach stałym elementem zapewniającym ich bezawaryjną pracę. Element ten nabrał

szczególnego znaczenia, kiedy w przemyśle zaczęto stosować powszechnie wysokie napięcia zasilające, gdyż wymusiło to zwrócenie uwagi na zjawisko tzw. wyładowania niepełnego – nie powodującego natychmiastowego zniszczenia izolacji, ale poważnie pogarszającego jej jakość. Na podstawie licznych obserwacji i badań wyładowań niepełnych stwierdzono, że nasilająca się ich częstotliwość, moc i miejsce występowania mogą w niedługim czasie, przy sprzyjających warunkach (temperatura, wilgotność), doprowadzić do trwałego uszkodzenia izolacji a w efekcie do awarii [8,28,42,93,116,124].

Konieczne stało się zatem konstruowanie urządzeń umożliwiających diagnozowanie izolacji i pomiar parametrów wyładowań niepełnych. W krótkim czasie powstało wiele, mniej lub bardziej udanych, konstrukcji tzw. analizatorów PD współpracujących z różnego rodzaju detektorami wyładowań. Ich funkcjonalność, jednak do dzisiejszego dnia, jest proporcjonalna do ceny.

Współczesne analizatory wyładowań umożliwiają kompleksową analizę stanu izolacji maszyn elektrycznych. Niestety koszt ich zakupu jest jeszcze bardzo duży i mogą sobie na nie pozwolić firmy specjalizujące się w tego typu pomiarach. Do współpracy z analizatorami niezbędne są również detektory (czujniki) wyładowań niepełnych, których koszt też bywa bardzo duży. W dalszym ciągu brak na rynku prostych wskaźników wyładowań, które w dużym stopniu ułatwiłyby wstępną diagnozę stanu izolacji [12,94].

Niniejsza praca jest próbą wykazania, że jest możliwe opracowanie i wykonanie, nie wymagające dużych kosztów, detektorów wyładowań niepełnych w uzwojeniach maszyn elektrycznych wysokonapięciowych (WN) w warunkach przemysłowych oraz układów służących do ich kalibracji.

Teza pracy doktorskiej jest następująca:

Jest możliwe opracowanie i wykonanie niskokosztowych czujników do pomiarów wyładowań niepełnych w uzwojeniach maszyn elektrycznych wysokonapięciowych (WN) 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 elektrycznych.

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 wyładowań niepełnych 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 w przemyśle.

Bezpośrednim celem pracy było opracowanie i wykonanie czujników do pomiarów wnz typu:

- a) antenowego - stacjonarnych i mobilnych w oparciu o stosowane w maszynach elektrycznych czujniki do pomiaru temperatury – termorezystory typu RTD (z ang. Resistance Temperature Detector) np. PT100 wraz z układami do ich kalibracji, w wersji pasywnej i aktywnej,
- b) pojemnościowego – z użyciem kondensatorów pomiarowych bezwyładowaniowych (same z siebie nie powinny emitować wnz) wyposażonych w impedancję pomiarową umożliwiającą pomiary wnz.

Opracowane i wykonane czujniki, impedancje pomiarowe oraz kalibratory powinny spełniać wymagania stosowanych norm dotyczących pomiarów wnz [48,49,51,53], w szczególności umożliwić pomiary wnz maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych, to znaczy w warunkach zakłóceń i uwarunkowań środowiskowych.

Niniejsza praca doktorska była w dużej mierze wykonywana przez jej autora w trakcie realizacji projektu badawczego własnego nr NN 510536639 pt. „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Projekt był kierowany przez prof. dr hab. inż. Sławomira Szymańca.

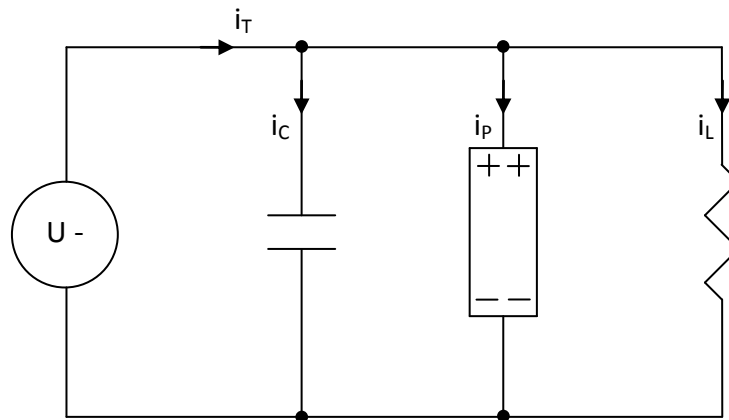
2. Metody diagnostyki izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych

Poprawny stan układu izolacyjnego maszyny wymaga ciągłej lub okresowej kontroli parametrów odpowiedzialnych za jej kondycję. Wczesne wykrycie defektów i określenie tendencji zmian w strukturze izolacji ma wpływ na przedłużenie bezawaryjnej pracy maszyny. Diagnostyka prowadzona, zarówno w trakcie pracy czyli on-line, jak i na etapie produkcji maszyny w znaczny sposób może przyczynić się do wydłużenia tzw. „czasu życia” maszyny.

Obecnie przeprowadza się diagnostykę różnymi metodami, spośród których należałoby wyróżnić:

- diagnostykę prądem stałym - wielokryterialna metoda prof. Tadeusza Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym, metodę cechuje: prostota, brak zakłóceń, proste przyrządy pomiarowe, daje możliwości oceny izolacji głównej [18,19,20,21,22,38,39,40],
- test Meggera (metoda w oparciu o pomiary PI, DD, SV, C) - Megger, Fluke, Adwel, Vanguard Instruments Company, AEMC Instruments [53,66,81,82,84,85], metodę cechuje: konieczność posiadania specjalistycznej aparatury, jest bardzo popularna w krajach zachodnich, daje możliwość oceny izolacji głównej,
- tzw. rampa wysokonapięciowa [62,63,67,72,74, 82], metodę cechuje konieczność posiadania specjalistycznej aparatury wysokonapięciowej, do oceny izolacji głównej,
- metody prądu przemiennego przy częstotliwości sieciowej (odzwierciedlające faktyczne warunki pracy maszyny, wymagają zastosowania transformatorów probierczych, podatne na zakłócenia) [7,67,13,18,23,77,28],
- metody impulsowe [72,128,151], konieczność posiadania specjalistycznej aparatury, daje możliwość oceny izolacji zwojowej,
- metoda pomiaru wyładowań niezupełnych (oparta w większości przypadków na pomiarze impulsów prądowych wysokiej częstotliwości mierzonych w sposób pośredni lub bezpośredni przy pomocy różnych czujników zwykle pojemnościowych, antenowych lub innych), wymaga uwzględniania wpływu zakłóceń przemysłowych.

2.1 Model układu izolacyjnego



Rys. 2.1.1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego [36,45,46,68,72,151]

Na rys. 2.1.1 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy układu izolacyjnego, w którym na całkowity prąd i_T obwodu składają się [36,45,46,68,72,151]:

i_C – prąd pojemnościowy ładowania izolacji (magazynuje energię w polu kondensatora i zanika do zera w krótkim czasie) [72]

$$i_C = C \frac{du}{dt} \quad (2.1.1)$$

i_P – prąd polaryzacji powstający na skutek ruchu ładunków lub spolaryzowanych cząsteczek w materiale izolacyjnym, pod wpływem pola elektrycznego, zanika dużo wolniej niż prąd pojemnościowy

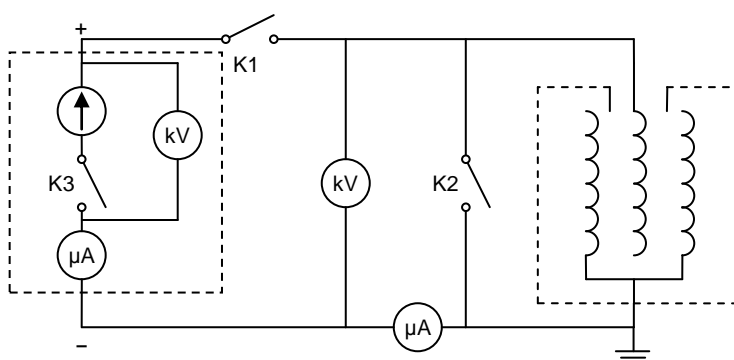
i_L – prąd upływu izolacji głównej skutkujący wydzielaniem ciepła zależny od warunków środowiskowych (temperatura, wilgotność).

2.2 Diagnostyka izolacji metodą Prof. Tadeusza Glinki

Diagnostyka izolacji metodą prof. Tadeusza Glinki stała się wzorcem do badań napięciem stałym i została zapisana w polskiej normie PN-E-04700. Obejmuje następujące próby:

- Wyznaczanie charakterystyki $R_{60}=f(U)$ w zakresie od 0 do $2U_N$. [18,19,20,36,74,94]

- Pomiar prądu upływu i_p (przebieg czasowy) po skokowym załączeniu napięcia stałego o wartości U_N [18,19,20, 36,74,94]
- Ładowanie układu do ustalonego napięcia U_N , odłączenie napięcia i zwarcie na określony czas t_z oraz rozwarcie i pomiar charakterystyki odbudowy napięcia $U_{od}(t)$ w układzie izolacyjnym [19,20,21,22, 40,81,]
- Pomiar współczynnika absorpcji [18,19,20, 36,74,94]
- Wyznaczenie poziomu wahań upływu prądu po upływie co najmniej 1 minuty [18,19,20, 36,74,94]



Rys.2.2.1. Schemat pomiarowy do badania izolacji metodą prof. Tadeusza Glinki [39,20]

Charakterystyki i parametry wyznaczone w układzie pomiarowym jak na rys. 2.2.1 pozwalają jednoznacznie określić techniczny stan izolacji głównej układu. Określają je warunki kryterialne wg tabeli 2.2.1.

Tabela 2.2.1. Kryteria oceny stanu technicznego izolacji [18,19,20, 36,74,94]

L.p	Parametr układu izolacyjnego		Ocena stanu technicznego izolacji					
			5	4	3	2	1	izolacja zawilgocona
1	Napięcie przebicia U_p/U_N		> 3	> 3	> 2	~1,5	~1	~1
2	Rezystancja $R_{60N}/U_N [k\Omega/V]$	przy $U_N = 6kV$	> 50	> 20	> 10	> 10	> 10	< 3
		przy $U_N < 1kV$	> 50	> 20	> 10	> 3	> 1	< 1
3a	Czas zwarcia dla $t_z[s]$							
	dla $U_N = 6kV$		30	30	30	1	1	0
	dla $U_N < 6kV$		10	10	10	1	0	0
3b	Maksymalna wartość odbudowanego napięcia U_{odMAX}/U_o		> 0,1	> 0,1	> 0,05	> 0,01	0	0
	Czas odbudowy napięcia $t_{od}[s]$	dla $U_N = 6kV$	> 240	> 120	> 30	~10	0	0

		dla $U_N < 1kV$	> 120	> 60	> 15	~5	0	0
4	Wahania prądu upływu przy U_N $\frac{I_{p60max} - I_{p60min}}{I_{p60sr}}$		< 0,5	< 1	> 1	> 1	> 2	0
5	i_{p15}/i_{p60}	$U_N = 6kV$	> 1,5	> 1,2	> 1	1	1	1
		$U_N < 1kV$	> 1,3	> 1,1	> 1	1	1	1

Oceny odpowiadające stanowi technicznemu są następujące:

- 5 – izolacja bardzo dobra (nowa)
- 4 – izolacja dobra
- 3 – dostateczna
- 2 – mniej niż dostateczna
- 1 – niedostateczna
- 0 – uszkodzenie trwałe izolacji

Zaobserwowane podczas badań korelacje pomiędzy napięciem przebicia, prądem upływu i czasem odbudowy [46,81] pozwoliły na sformułowanie współczynnika diagnostycznego

$$DF\dot{L} = \frac{I_{PU} \cdot U_n}{t_{od} \cdot U_p} \quad (2.2.1)$$

gdzie:

I_{PU} – ustabilizowany prąd upływu układu izolacyjnego,

U_n – napięcie znamionowe,

t_{od} – czas odbudowy napięcia,

U_p – napięcie przebicia.

Współczynnik diagnostyczny badanej maszyny o dobrej izolacji powinien spełniać warunek [81]:

$$DF\dot{L}_{WZ} < DF\dot{L} \quad (2.2.2)$$

a jego wartość zależy od napięcia pracy danej maszyny [46,81].

2.3 Test Meggera

Najszybszym sposobem na zbadanie stanu izolacji jest pomiar jej rezystancji przy stałym napięciu pomiarowym. Jego wartość może być różna w zależności od napięcia znamionowego badanego urządzenia i może dochodzić do 10 kV jeśli napięcie znamionowe, np. uzwojenia jest wyższe od 12 kV [53,81,82,83,85]. Współczynniki związane z testem to:

- Wartość minimalna rezystancji izolacji po czasie $t = 60$ s [53,66]:

$$R_{60|40C} > 100 \quad R_{(60|75C)} > k_{75} \frac{U_n}{1000+10 \cdot S_n} \quad (2.3.1)$$

gdzie:

k_{75} – współczynnik temperaturowy izolacji podany w normie [66],

U_n – napięcie znamionowe maszyny wyrażone w V,

S_n – znamionowa moc pozorna maszyny wyrażona w MVA.

- Współczynnik absorpcji k (coraz rzadziej)

$$k = R_{60} / R_{15} \quad (2.3.2)$$

gdzie: R_{15}, R_{60} – wartości rezystancji izolacji po 15s i 600s,

co może stanowić informację dla użytkownika o czystości izolacji (brak zanieczyszczeń) i zawilgoceniu. Jednak może też być obarczony błędem temperaturowym. Dla uzwojeń w klasie izolacji F (Termiczna klasa izolacji uzwojenia silnika jest przedmiotem normy IEC 60085) wartości współczynnika absorpcji powinny przyjmować wartości:

	1,5	dla 20°C	
$k >$	1,4	dla 40°C	[50,53,66,121]
	1,3	dla 60°C	

- Współczynnik polaryzacji PI – podstawowa wielkość testu

$$PI = R_{600}/R_{60} \quad (2.3.3)$$

gdzie:

R_{60} , R_{600} – wartości rezystancji izolacji po 60 s i 600 s,

co jest szczególnie istotne podczas obserwacji zmian i ich trendu przy badaniach okresowych. Podobnie jak w przypadku współczynnika absorpcji określa się kryterium (minimalne wartości PI) dla klasy izolacji F [50,121].

Tabela 2.3.1 Kryterium oceny izolacji na podstawie współczynnika polaryzacji

Wynik pomiaru PI	Stan izolacji
<1,0	Zły
1÷2	Wątpliwy
2÷4	Dobry
>4	Bardzo dobry

W przypadku wysokonapięciowych maszyn elektrycznych posiadających izolację wielowarstwową, istotnych informacji o kondycji izolacji może dostarczyć współczynnik depolaryzacji DD , którego wartość określa zależność:

$$DD = \frac{I_{1min}}{U \times C} \quad (2.3.4)$$

gdzie:

I_{1min} – prąd po 1 minucie od rozpoczęcia rozładowywania izolacji,

U – napięcie pomiarowe cyklu ładowania,

C – pojemność badanego układu izolacji.

Pomiar współczynnika przeprowadza się ładując w długim okresie czasu (powyżej 30 minut) pojemność izolacji. Po takim czasie następuje również polaryzacja. Następnym krokiem jest rozładowanie izolacji i pomiar prądu po upływie 1 minuty [47]. Stan izolacji silników wysokonapięciowych dla współczynnika DD określa tabela 2.3.2.

Tabela 2.3.2 Współczynnik DD i stan izolacji dla silników WN [47]

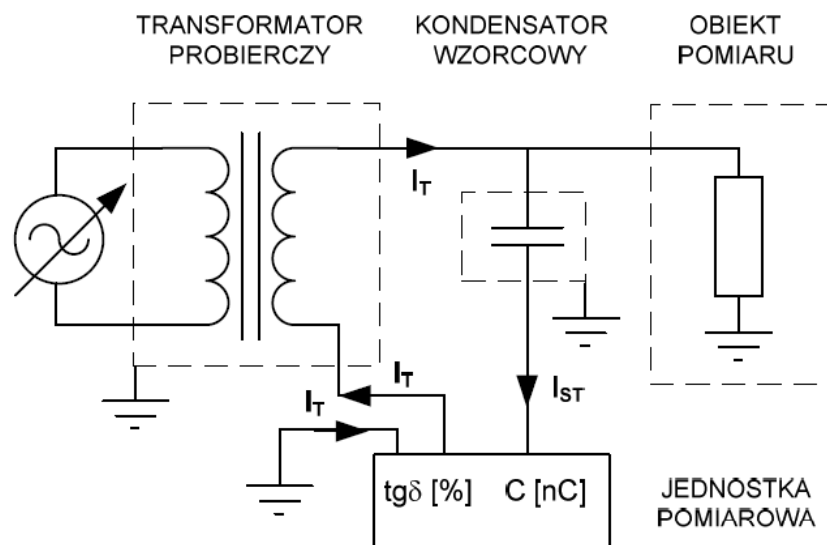
Wynik pomiaru DD	Stan izolacji
>7	Zły
>4	Wątpliwy
$2 \div 4$	Dobry
>2	Bardzo dobry

- Pojemność układu izolacji C
- Badanie napięciem narastającym schodkowo – SV (Step Voltage) - napięcie podwyższa się co 1 min o np.1 kV. Rezystancja jest w tym czasie sekwencyjnie rejestrowana wraz z pojemnością.

2.4 Rampa wysokonapięciowa

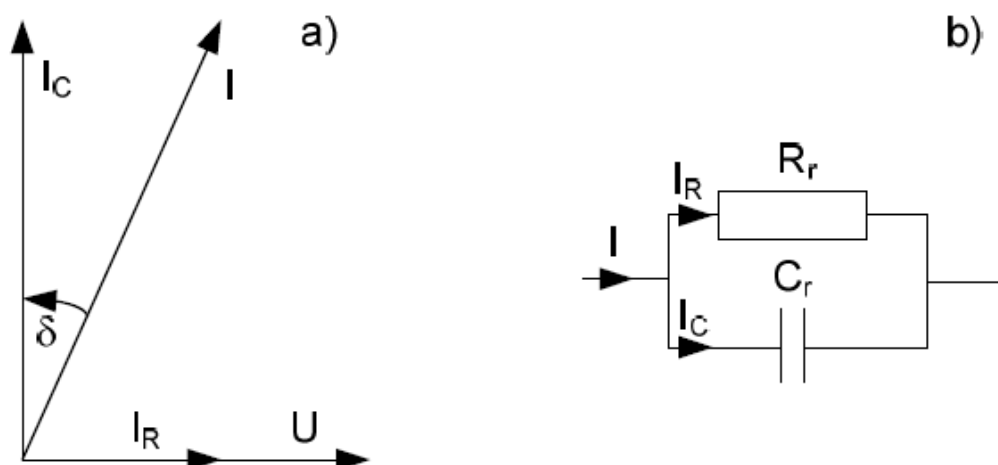
„Wykonywanie testów izolacji wysokonapięciowych maszyn prądu przemiennego napięciem stałym” to metoda, która zawiera się w standardzie IEEE 95-2002. Pomiar przeprowadza się zwiększając liniowo napięcie od zera do wartości $1,25 \div 1,5 U_n$ zachowując stałą prędkość narastania w określonym czasie. Dzięki liniowo narastającemu napięciu prąd ładowania jest stały i zależy od stromości narastania i pojemności obiektu a prąd polaryzacji przyjmuje małe wartości. Prąd upływu ma charakter rezystancyjny i w przypadku idealnym liniowo zależy od napięcia. Jego nietypowy przebieg może świadczyć o występujących defektach izolacji [62]. Metoda wymaga posiadania bardzo drogiej aparatury.

2.5 Metody prądu przemiennego, współczynnik strat dielektrycznych



Rys. 2.5.1 Schemat układu pomiarowego do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych obiektów uziemionych [66]

Układ do pomiaru współczynnika $\text{tg} \delta$ jest zwykle układem mostkowym zasilanym z transformatora probierczego. W jednej gałęzi mostka umieszcza się kondensator wzorcowy (bezwładowaniowy) w drugiej obiekt badany. Prąd jest mierzony po stronie wtórnej (niskonapięciowej), a próbę przeprowadza się od wartości zasilania $20\% U_n$ do U_n .



Rys. 2.5.2. a) Wykres wskazowy prądów w dielektryku
b) Schemat zastępczy kondensatora rzeczywistego

Współczynnik strat dielektrycznych dla zastępczego układu równoległego dielektryka (kondensatora) jest określony tangensem kąta stratności δ [79]:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega R_r C_r} \quad (2.5.1)$$

Za straty w dielektryku odpowiedzialna jest składowa czynna prądu I_R na którą składają się: prąd upływu w izolacji, prąd polaryzacji i prąd wyładowań niezupełnych. Przy występowaniu nieprawidłowości i defektów izolacji składowa ta ulega zwiększeniu [66,72].

2.6 Metody impulsowe diagnostyki

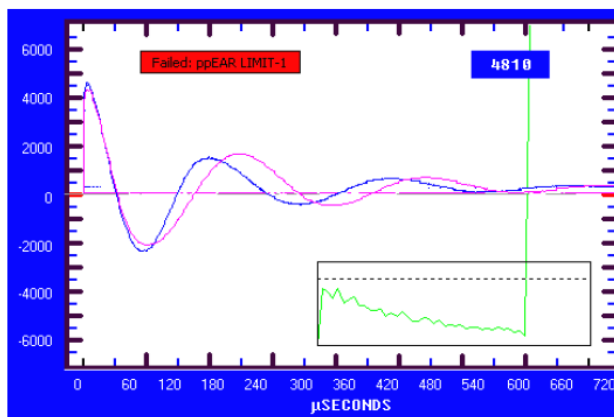
Metodą stosowaną coraz częściej do diagnostyki izolacji zwojowej jest tzw. test Bakera, opracowany w firmie Baker w USA. Polega on na porównaniu odpowiedzi na uderzenie napięciowe z przebiegiem wzorcowym [53,63,65,71]. Wartość napięcia uderzenia zawierają normy IEEE 522-2004 lub IEC 60034-18-3; dla nowych uzwojeń maszyn wysokonapięciowych z cewkami wzorcowymi $U_T = 2,86U_n$ i $U_T = 0,65(4U_n + 5kV)$. Dla maszyn używanych wartość napięcia jest obniżona do 75%.

Pomiar polega na naładowaniu kondensatora wysokonapięciowego i wykorzystania go jako źródła energii do wyzwolenia impulsu o krótkim czasie narastania rzędu kilkudziesięciu ns, który podany na uzwojenie wysokonapięciowe, spowoduje powstanie fali odbitej o częstotliwości [71]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.6.1)$$

gdzie: L, C – zastępcza indukcyjność oraz pojemność badanego obwodu.

Wzrost częstotliwości przebiegu w porównaniu z przebiegiem wzorcowym może świadczyć o występowaniu miejsc w których izolacja jest osłabiona (rys. 2.6.1) [53,63,65,71].



Rys. 2.6.1. Przebieg fali odbitej dla uzwojenia z osłabioną izolacją zwojową [66]

3. Wyładowania niezupełne

Wyładowania niezupełne są wyładowaniami występującymi wewnątrz układu izolacyjnego, częściowo zwierającymi izolację między przewodnikami. Zjawisko to jest pojęciem węższym niż używane wcześniej przebicie jonizacyjne [76,77,78]. W wielu przypadkach wnz mogą z dużym wyprzedzeniem w czasie informować o możliwości całkowitego przebicia izolacji! Zwykle mają postać krótkich impulsów mniejszych od 1 μ s o charakterze przejściowym. Niegasnące i powtarzające się wnz w okresie dłuższego czasu powodują osłabienie izolacji w miejscu występowania. Mówimy o zjawisku starzenia się eksploatacyjnego i w efekcie końcowym o uszkodzeniu z tego tytułu izolacji.

Wykrywanie i technika pomiaru wnz jest intensywnie rozwijana przez światowe koncerny aparaturowe, takie jak: Adwel, Dimrus, Eaton, Iris, Lemke, Vibrocenter. Główne problemy to opisanie zjawisk, które prowadzą do przebicia.

Według nie obowiązującej już Polskiej Normy PN86/E-04066 wnz to wyładowanie elektryczne rozwijające się tylko na części odstepu izolacyjnego między elektrodami.

Warunkiem powstania wyładowania jest przekroczenie krytycznej wartości natężenia pola w danym obszarze dielektryka oraz obecność w tym obszarze elektronów swobodnych i wtórnych. Generacja elektronów swobodnych może odbywać się przestrzennie lub powierzchniowo [72], natomiast wtórnych w wyniku jonizacji powierzchniowej [68,69,70].

W każdym izolatorze występują niejednorodności w postaci gazowych wtrącin, w pobliżu których natężenie pola może podnieść się do wartości przekraczającej wartość natężenia krytycznego na jakie izolator został zaprojektowany. Sprzyja to inicjacji wyładowania niezupełnego.

Do wyładowań niezupełnych można zaliczyć: prądy pełzające, wyładowania jarzące („ogień św. Elmy”), iskry ślizgowe, niepełne łuki, wyładowania we wtrącinach gazowych lub drażnienie kanałów tzw. drzewienie („treeing”). Najczęstsze czynniki fizyczne i chemiczne towarzyszące takim wyładowaniom to: emisja fal elektromagnetycznych i akustycznych z miejsca wyładowania, rozbłyski świetlne w zakresie widzialnym, przemiany chemiczne w dielektryku, lokalny wzrost temperatury.

W czasie wnz w powietrzu powstaje wyczuwalny ozon i dwutlenek azotu, związki silnie agresywne, wchodzące w reakcje chemiczne ze składnikami izolacji. Mogą być słyszalne trzaski (efekt akustyczny). Wnz powodują również przepływ wyindukowanego ładunku elektrycznego, o dużej częstotliwości, w uzwojeniach i przewodach łączących silnik, np. z falownikiem.

Przewody zachowują się jak anteny i emitują fale elektromagnetyczne do otoczenia. Mogą one przy zbyt dużym poziomie wpływać negatywnie na pracę innych urządzeń elektrycznych, np. komputery, regulatory, sterowniki itp.

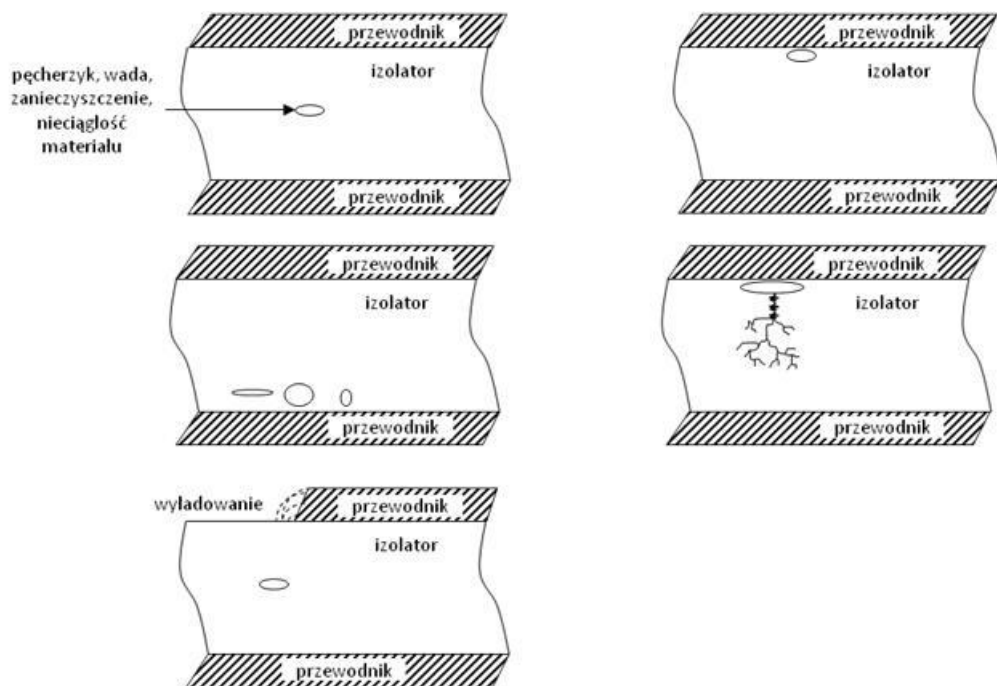
W przypadku silników wytrzymałość na przebicie izolacji głównej jest 10 razy większa od izolacji międzywojowej, która jest bardziej narażona na przebicie. Wnz może wystąpić w powietrzu, pomiędzy sąsiednimi przewodami w żłobku, jeśli natężenie pola elektrycznego przekroczy wytrzymałość elektryczną powietrza (3kV/mm) [104]. Określa się tzw. napięcie korony wyładowań niezupełnych tj. napięcie podawane na silnik, przy którym zaczyna się zjawisko wyładowań niezupełnych (z ang. CIV – corona inception voltage).

Dlatego na izolację dobiera się materiały, które odporne są na wnz np. izolacja z miki w postaci tzw. mikanitu (mikanit twardy-odporny na przebicie do 20kV/mm) wytrzymuje ładunki wnz rzędu tysięcy pC. Stosuje się folie mikowe, taśmy mikowe i papier mikowy[66].

Jako lepsze używa się najczęściej syntetycznych żywic epoksydowych charakteryzujących się bardzo dobrymi właściwościami elektrycznymi i mechanicznymi [66,67,68].

Lakiery elektroizolacyjne - roztwory żywic, asfaltów oraz olejów służą do izolowania przewodów nawojowych. Wszystkie wykorzystywane materiały izolacyjne są odporne na wysoką temperaturę i trudne warunki atmosferyczne (wilgoć, zapylenie) [66,67].

Istnieje wiele możliwych scenariuszy wyładowań niezupełnych. Niektóre z nich przedstawia rysunek 3.1 [90].

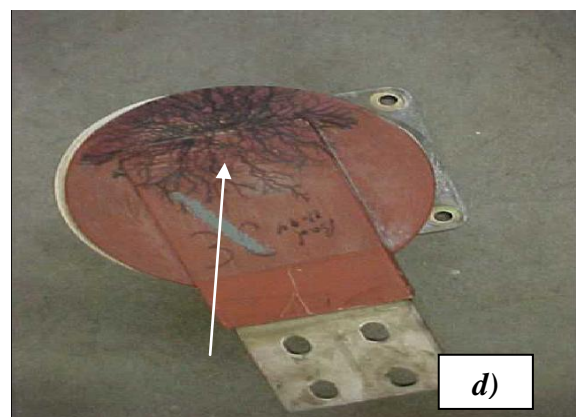
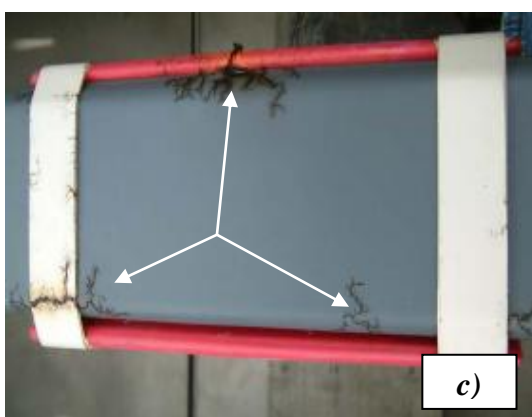
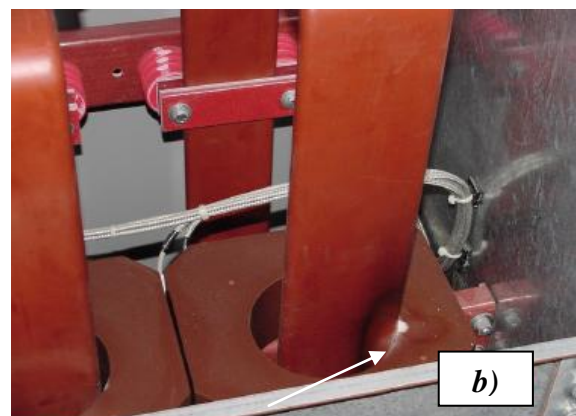
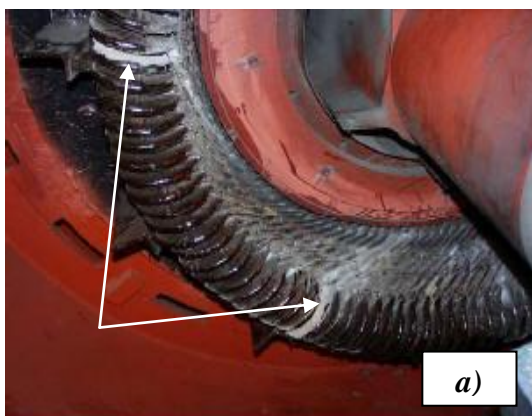


Rys.3.1. Możliwe scenariusze występowania wyładowania niezupełnego [90]

Przykłady skutków wyładowań niezupełnych w silniku przedstawiono na rysunkach 3.2 oraz 3.3.



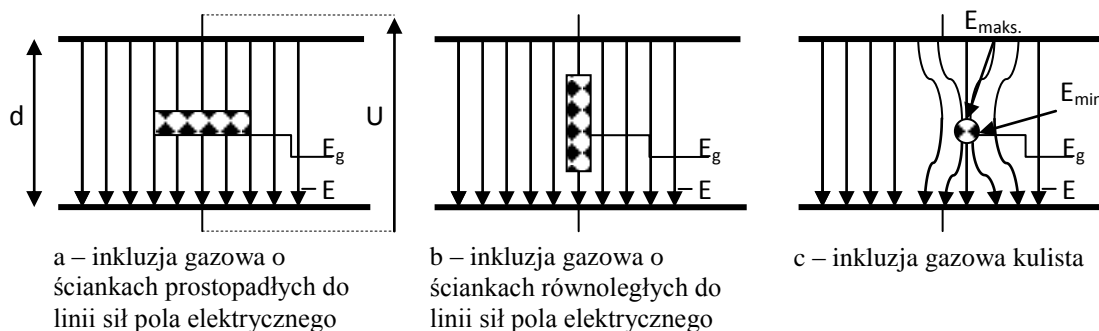
Rys. 3.2. Zniszczone miejsca wyprowadzenia uzwojenia ze żłobka [152]



Rys. 3.3. Uszkodzenia spowodowane przez wnz:
a),b) zjawisko ulotu, c) uszkodzona szyna łączeniowa - zjawisko drzewienia, d) drzewienie [82]

3.1 Schemat zastępczy układu izolacyjnego z pojedynczą wtrąciną gazową (inkluzją)

Uprozczone modele dielektryków, z inkluzjami gazowymi, do których odnosi się wielu autorów opracowań przedstawia rys. 3.1.1 [76,77,78].



Rys. 3.1.1. Modele dielektryków z inkluzją gazową o różnym kształcie [78]

Na rysunku 3.1.1a przedstawiono najprostszy model dielektryka z inkluzją gazową usytuowaną prostopadle do linii sił pola elektrycznego. Natężenie pola w całej objętości inkluzji można w takim przypadku wyznaczyć z zależności:

$$E_g = E \frac{\epsilon_s}{\epsilon_g} \approx \epsilon_s E \quad (3.1.1)$$

gdzie:

E – natężenie pola elektrycznego w dielektryku stałym

$$E \approx \frac{U}{d} \quad (3.1.2)$$

ϵ_s - przenikalność elektryczna dielektryka izolacji,

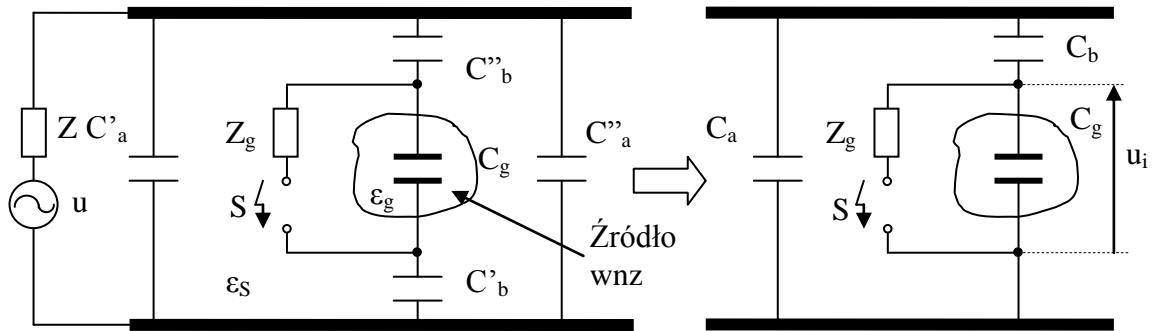
ϵ_g - przenikalność elektryczna inkluzji gazowej.

Jeżeli wymiary inkluzji są wielokrotnie mniejsze od całej grubości d dielektryka, natężenie pola w dielektryku nie ulega większym zmianom.

Przy inkluzji usytuowanej prostopadle (rys. 3.1.1b) natężenie pola jest mniejsze niż w poprzednim przypadku.

Dla wtrącin o innym kształcie (rys. 3.1.1c) pole jest niejednostajne i przyjmuje wartość maksymalną w miejscu prostopadłym do linii pola [78].

Niezależnie od kształtu inkluzji, elektryczny schemat zastępczy, który często przyjmowany jest w literaturze, przedstawia rys. 3.1.2.



Rys. 3.1.2. Schemat zastępczy modelu układu izolacyjnego z inkluzją gazową jako źródło wnz [31, 134,135,136,137] oraz równoważny uproszczony [134,135,136,137]

gdzie:

ϵ_S - przenikalność elektryczna dielektryka izolacji,

ϵ_g - przenikalność elektryczna inkluzji gazowej,

C_g - pojemność inkluzji gazowej,

C_a' , C_a'' - pojemności składowe równoległe do źródła wnz,

C_b' , C_b'' - pojemności składowe szeregowo z inkluzją gazową,

u – napięcie przemiennie źródła,

u_i – napięcie na pojemności inkluzji,

Z – impedancja źródła,

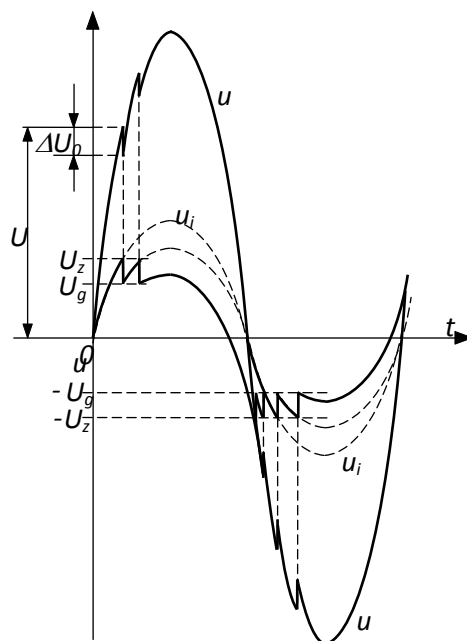
Z_g - zastępcza impedancja kanału wyładowania w źródle,

S - łącznik sterowany wartością pola elektrycznego źródła.

W przypadku inkluzji gazowej (nazywanej też kawerną) przenikalność elektryczna dielektryka izolacji $\epsilon_S > \epsilon_g$, dlatego natężenie pola elektrycznego w inkluzji gazowej jest większe od natężenia w dielektryku izolacji a pojemność C_g jest wielokrotnie mniejsza od C_a i C_b .

Jeżeli natężenie pola w miejscu kawerny przekroczy wartość krytyczną (napięcie zapłonu U_i), nastąpi wyładowanie, przy czym wartość napięcia zapłonu zależy od ciśnienia we wtrącinie i jej rozmiarów (zwykle μ metrów).

Przebiegi napięć w układzie z rys. 3.1.2 zilustrowano na rys. 3.1.3.



Rys. 3.1.3. Przebiegi napięć u i u_i na inkluzji [78]
 U_z – napięcie zapłonu wyładowania
 U_g – napięcie gaśnięcia
 ΔU_0 – spadek napięcia zasilającego po zapłonie wnz

Rzeczywisty przebieg napięcia na inkluzji przedstawiono linią ciągłą. Linia przerywana obrazuje napięcie przy braku wnz. Przy założeniu, że napięcie zostało podane do układu w chwili $t=0$ oraz wytrzymałość inkluzji jest zbliżona dla dodatniej i ujemnej połówki napięcia, zjawisko (ząbki na wykresie) powtarza się. Różnica w ilości wnz wynika z faktu, że w ujemnej połówce napięcie U_z jest wcześniejsze w fazie i stąd większa ilość zapłonów. Przebieg stanie się symetryczny po upływie dłuższego czasu [78].

Spadek napięcia ΔU_0 na pojemności C_a (rys. 3.1.2) można wyrazić zależnością [78]:

$$\Delta U_0 = (U_z - U_g) \frac{C_g C_b}{C_b C_a + C_g C_a + C_b C_g} \quad (3.1.3)$$

Gdy napięcie źródła u odbuduje swoją wartość, do układu dopłynię ładunek pozorny o wartości [78]:

$$q = (U_z - U_g) \frac{C_g C_b}{C_b + C_g} \quad (3.1.4)$$

Ponieważ zwykle $C_a \gg C_g$ i $C_a \gg C_b$ to ładunek dopływający ze źródła można określić jako [111]:

$$q = C_a \Delta U_0 \quad (3.1.5)$$

Pomiędzy ładunkiem q i ładunkiem q_g zneutralizowanym we wtrącinie zachodzi zależność [111]:

$$q = q_g \frac{C_b}{C_g + C_b} \quad (3.1.6)$$

Średnia wartość prądu dopływającego ze źródła do pojedynczej wtrąciny zależy od liczby wyładowań N i można ją określić jako [111]:

$$I = Nq \quad (3.1.7)$$

W przypadku gdy wtrącin jest wiele należy używać sum (3.3.3).

Analizując układ zastępczy napięciowo można obliczyć ubytek energii układu po wyładowaniu [111]:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (C_g + C_b) \left[1 - \left(\frac{U_g}{U_z} \right)^2 \right] U_z^2 \quad (3.1.8)$$

i moc traconą w układzie [111]:

$$P = N\Delta E \quad (3.1.9)$$

Zależność 3.1.9 dotyczy jednej wtrąciny. W przypadku większej liczby należy również, jak w przypadku prądu, używać sum (3.3.4).

Powyższe zależności dotyczyły schematu zastępczego dla pojedynczej wtrąciny gazowej (rys. 3.1.2). W przypadku innego typu wyładowań np. powierzchniowych, rozważania należy przeprowadzać przy użyciu innych schematów zastępczych.

Wyładowania niezupełne mogą występować przy napięciu przemiennym i stałym. Wytrzymałość dielektryków przy napięciu stałym jest jednak nawet kilkukrotnie większa niż przy napięciu przemiennym. Wynika to z faktu, że natężenie pola w inkluzji jest przy napięciu stałym osłabiane przez pole ładunków powierzchniowych, które zubożniają się bardzo wolno [78].

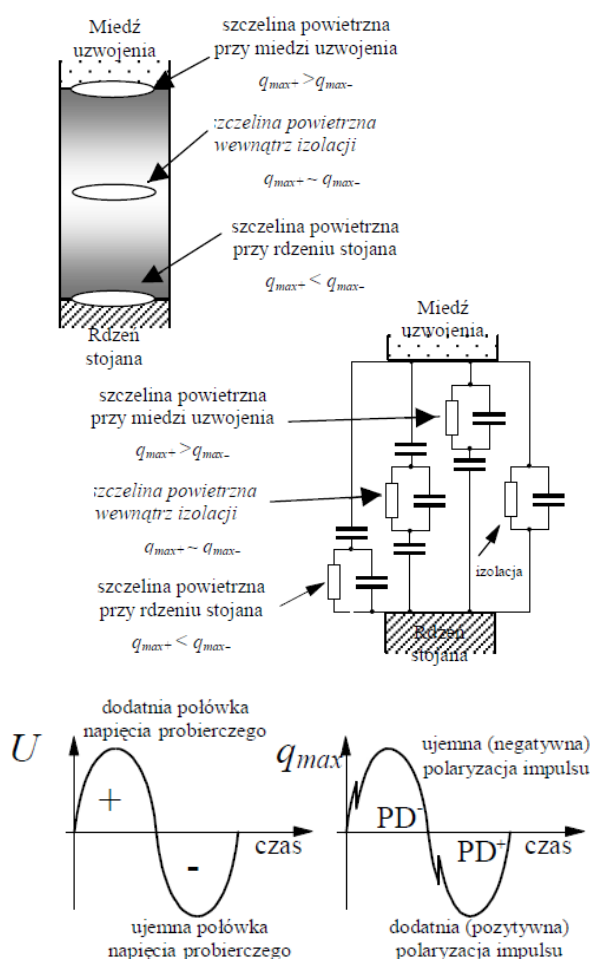
3.2 Schemat zastępczy typowych uszkodzeń izolacji maszyny elektrycznej

Rysunek 3.2.1 przedstawia typowe uszkodzenia w izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych oraz ich schemat zastępczy [41,42].

Inkluzja gazowa na styku izolacji z miedzią uzwojenia skutkuje występowaniem impulsów wnz w dodatniej połówce napięcia, których intensywność jest większa niż dla połówki ujemnej $q_{max+} > q_{max-}$ ($PD^+ < PD^-$).

Zbliżona intensywność wyładowań w obu połówkach napięcia probierczego $q_{max+} \approx q_{max-}$ ($PD^+ \approx PD^-$) może być wynikiem obecności szczeliny powietrznej w izolacji.

Większą intensywność wnz w ujemnej połówce napięcia - $q_{max+} < q_{max-}$ ($PD^+ > PD^-$) można zaobserwować w przypadku uszkodzeń izolacji na styku z rdzeniem, nie działającej prawidłowo ochronie przeciwjarzeniowej żłobków lub występujących wyładowań na czołach uzwojeń.



Rys. 3.2.1. Schemat zastępczy typowych uszkodzeń maszyny elektrycznej i cechy charakterystyczne impulsów wnz [41, 42]

3.3 Podstawowe wielkości charakteryzujące wnz wg IEC 60270 [48]

i ujęte w PN-EN60270 [102]

Podstawowe i najczęściej stosowane wielkości, które opisują zjawisko wyładowań niezupełnych ujęte w normie IEC60270 to:

- Ładunek pozorny q (apparent charge q) – ładunek podany na zaciski obiektu badanego w postaci impulsu prądowego, który wywołałby taką samą zmianę jak wyładowanie niezupełne
- Częstotliwość powtarzania impulsów n (pulse repetition rate n) – średnia liczba impulsów wyładowań na sekundę:

$$n = \frac{N}{T} \quad (3.3.1)$$

gdzie:

N – całkowita liczba zarejestrowanych impulsów

T – czas pomiaru

- Kąt fazowy impulsu wyładowania (phase angle φ_i , and time t_i of occurrence of a PD pulse) φ_i

$$\varphi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad (3.3.2)$$

gdzie:

t_i – czas mierzony od przejścia przez zero napięcia do pojawienia się impulsu

T – okres napięcia probierczego

- Średni prąd wyładowań (average discharge current) I

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots |q_i|) \quad (3.3.3)$$

gdzie:

q_i – ładunek pozorny pojedynczego wyładowania

T_{ref} – określony przedział czasowy

- Moc wyładowań (discharge power) P

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad (3.3.4)$$

gdzie:

u_i – wartość chwilowa napięcia przy którym nastąpiło wyładowanie q_i

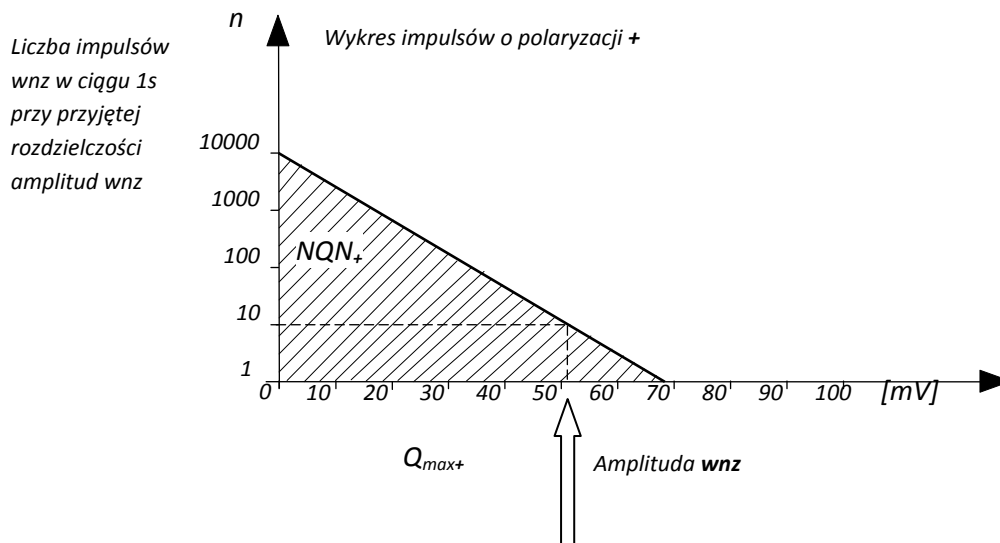
- Wskaźnik wyładowań (quadratic rate) D

$$D = \frac{1}{T_{ref}} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2) \quad (3.3.5)$$

- Napięcie zapłonu wyładowań (partial discharge inception voltage) U_i (U_z) – najniższa wartość skuteczna napięcia, przy którym można zaobserwować wystąpienie wyładowania niezupełnego, podczas zwiększania napięcia
- Napięcie gaszenia wyładowań (partial discharge extinction voltage) U_e (U_g) – najniższa wartość skuteczna napięcia, przy którym można zaobserwować wystąpienie wyładowania niezupełnego, podczas obniżania napięcia

Do wielkości charakteryzujących wnz w czasie pomiarów zalicza się również [1,5,6, 29]:

- q_{max} maksymalny ładunek wyładowań - największy powtarzalny ładunek wnz,
- Q_m współczynniki normalizujące:
 - **Współczynniki Q_m** - amplituda wnz odpowiadająca 10 impulsom na sekundę. Q_m określa głębokość degradacji izolacji w najgorszym miejscu i wyznacza się go oddzielnie dla dodatniej i ujemnej polaryzacji Q_{m+} i Q_{m-} (rys. 3.3.1) [1,2],
 - **Współczynnik NQN** (Normalized Quantity Number) - całkowita aktywność wnz przy danej polaryzacji impulsów. NQN jest proporcjonalny do całkowitej ilości miejsc o pogorszonych właściwościach izolacyjnych i jest wyznaczany oddzielnie dla dodatniej i ujemnej polaryzacji impulsów: $NQN+$ i $NQN-$ (rys 3.3.1) [1,2].



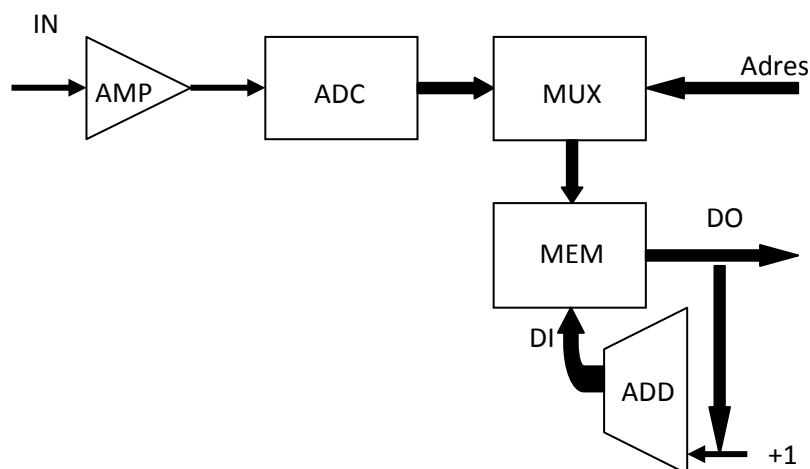
Rys. 3.3.1. Wyznaczanie współczynników normalizujących Q_{max+} i NQN wg ADWEL [1,2]

3.4 Rejestracja impulsów wnz

Klasyczne **metody analogowe rejestracji** impulsów wnz to: obserwacja oscyloskopowa impulsów (rozd. 4.2), pomiary miernikami zakłóceń lub pomiar maksymalnego ładunku [29,30,31].

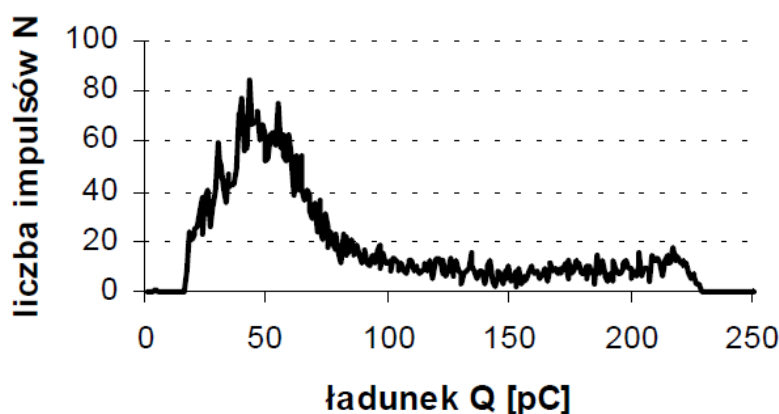
Przy **pomiarach cyfrowych** dokonuje się analizy, z wykorzystaniem najczęściej wielokanałowych analizatorów, amplitudy, częstości wyładowań i analizy czasowej [29,30,31].

Podstawowy analizator amplitudy wyładowań powinien zawierać wzmacniacz impulsów wejściowych, przetwornik analog-cyfra, multiplexer, sumator i pamięć (rys. 3.4. 1) [31].



Rys. 3.4.1. Schemat blokowy analizatora amplitudy [31]:
IN – wejście układu, *AMP* - wzmacniacz wejściowy, *ADC* – przetwornik analog-cyfra, *MUX* – multiplexer, *MEM* – blok pamięci, *ADD* – sumator, *DI*, *DO*, linie danych

Impuls analogowy podany na wejście układu, dla poprawności pomiaru, musi zawierać się w określonych granicach (między tzw. poziomem dolnym – *Low Level Discrimination LLD* a poziomem górnym *Upper Level Discrimination ULD*) a jego częstość powtarzania musi być mniejsza od czasu martwego przetwarzania. Czas ten zależy od amplitudy impulsu lub jest stały. Zależy to od typu analizatora. Wartość amplitudy impulsu bywa najczęściej przypisana do numeru kanału i adresuje pamięć. Sumator zwiększa zawartość pamięci (w danym kanale) po każdym impulsie o wartość 1. Wynik pomiaru to rozkład amplitudowy i czasowy impulsów [31].

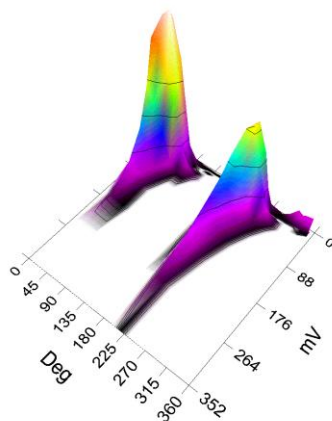


Rys. 3.4.2. Przykładowy przebieg częstościowo–amplitudowy ładunku uzyskany przy pomocy wielokanałowego analizatora amplitudy [45].

Wielokanałowy analizator wnz pozwala w łatwy sposób analizować i przetwarzać wyniki pomiarów zapisane w pamięci komputera. Ma jednak zasadniczą wadę – nie pozwala uzyskać informacji na temat rozkładu impulsów względem fazy napięcia zasilającego obiekt. Rozwinięciem tej metody jest analiza amplitudowo-fazowa, która uzupełnia poprzednią o wartości charakterystyczne rozkładów fazowych wyładowań [31].

Wady tej nie posiada **rejestracja wyładowań w czasie rzeczywistym**. Impulsy wyładowań są rejestrowane po przejściu przez zero napięcia synchronizującego. Następnie są wzmacniane i przetwarzane na postać cyfrową. Taki sposób rejestracji pozwala na tworzenie rozkładów amplitudowych i fazowych skumulowanych. System taki (BUFOR) został skonstruowany między innymi w Zakładzie Elektroenergetyki AGH [31]. Inne systemy rejestracji fazowo-rozdzielczej działają w oparciu o detekcję wartości szczytowej wyładowania a sama rejestracja odbywa się po przekroczeniu ustalonego poziomu szumów a następnie przetworzeniu na sygnał cyfrowy [155].

Efektom rejestracji wyładowań w systemie amplitudowo-fazowym i czasie rzeczywistym są trójwymiarowe obrazy fazowo-rozdzielcze.



Rys. 3.4.3. Przykład trójwymiarowego wykresu przy pomiarze czujnikiem typu RTD w pobliżu czół uzwojeń silnika [121,122,123,129]

Cechą charakterystyczną impulsów wyładowań jest ich polaryzacja, która w określonych przedziałach czasowych nie ulega zmianom. Została ona wykorzystana do rejestracji w przyrządach typu „*boxcar averager*”. Działają one w oparciu o uśrednianie impulsów w czasie przez wielokrotne pomiary całkowitego sygnału i ich sumowanie w powtarzających się sekwencjach czasowych. Sygnał szumu zmniejsza się sukcesywnie gdyż nie jest synchronizowany z sygnałem wyzwalającym. Sposób pomiaru i rejestracji w wydatnym stopniu poprawia stosunek sygnał – szum. Istnieje jednak niebezpieczeństwo kumulowania się zakłóceń synchronicznych z napięciem probierczym [31].

Pomiary czasowo-rozdzielcze TRM (*Time Resolved Measurement*) polegają na dokładnej szerokopasmowej rejestracji kształtu impulsu prądu wyładowania (w paśmie UHF). Metoda jest wykorzystywana głównie w warunkach laboratoryjnych [31].

Uzupełnieniem metody TRM może być **metoda analizy widmowej sygnałów wyładowań niepełnych** [31] w której dokonuje się porównania widma referencyjnego z aktualnie mierzonym. Wadą systemu jest możliwość analizy tylko pojedynczych impulsów ze względu na krótki czas rejestrowanego przebiegu.

Według autora pracy bardzo trudno określić dokładnie, która metoda jest najbardziej odpowiednia do diagnostyki określonego obiektu, zwłaszcza że obecnie oferowane na rynku analizatory często posiadają własne systemy eksperckie. Zawierają one zwykle oprogramowanie, przystosowane do analizy wyładowań, na które składają się fragmenty wielu metod rejestracji. Właściwa obsługa takich analizatorów wymaga zarówno precyzji, jak i dużego doświadczenia operatora.

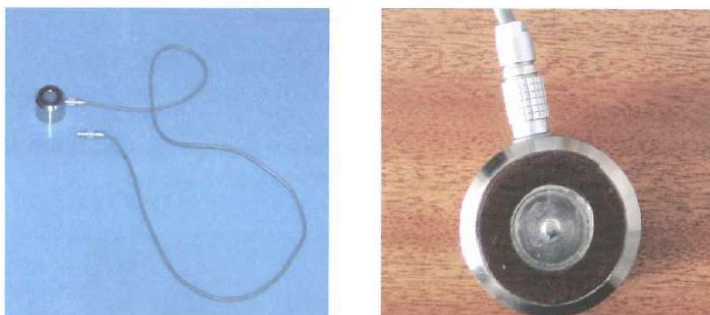
3.5 Nieelektryczne metody pomiaru wyladowań niezupełnych wg IEC60270

Ocenę degradacji izolacji na podstawie wnz umożliwiają obecnie cztery najczęściej stosowane metody pomiarowe [9,10,11,33,34,49,74,153]:

- - metoda akustyczna
- - metoda chemiczna (chromatografii gazowej)
- - metoda optyczna (spektrofotometrii)
- - metoda cieplna (pomiaru wydzielanego ciepła za pomocą kamer termowizyjnych)

Metodę akustyczną stosuje się do oceny stanu izolacji urządzeń elektroenergetycznych w celu eliminacji trudności, jakie następują metody elektryczne pomiaru wnz. W szczególności dotyczy to wysokiego poziomu zakłóceń [11]. Intensywne prace naukowo-badawcze doprowadziły do tego, że metoda emisji akustycznej jest bardzo istotnym uzupełnieniem metod elektrycznych przy diagnostyce transformatorów dużej mocy, energetycznych kondensatorów, przekładników prądowych i napięciowych, rozdzielnic.

W torze pomiarowym jako detektory stosuje się przetworniki piezoelektryczne pracujące w paśmie do 1 MHz zwykle ze wzmacniaczem 40 dB. Przykład przetwornika Brüel & Kjær ilustruje rys. 3.5.1 [11]



Rys. 3.5.1. Przetwornik piezoelektryczny stykowy typu 8312 firmy Brüel & Kjær [11]

Do pomiarów wykorzystuje się również wzmacniacze o płynnej regulacji wzmocnienia i regulowanej częstotliwości granicznej filtru górnoprzepustowego. Rejestracji wyników dokonuje się z wykorzystaniem wielokanałowych kart pomiarowych i komputerów przemysłowych [11]. Ograniczeniem w stosowaniu metody akustycznej mogą być zakłócenia

akustyczne i kształt obiektów badanych, uniemożliwiających prawidłowe zamontowanie przetworników pomiarowych.

Metoda chemiczna (chromatografia gazowa) polegająca na analizie gazów rozpuszczonych w oleju jest stosowana do wykrywania rozwijających się uszkodzeń odpowiedzialnych za degradację materiałów izolacyjnych, szczególnie oleju. Wyładowania niezupełne z upływem czasu powodują zmiany chemiczne, które mogą być odpowiedzialne za uszkodzenia izolacji. Niewłaściwe ilości wydzielanych gazów, takich jak: wodór, metan, tlenek węgla, dwutlenek węgla, azot oraz związków, które powstają przy utlenianiu się węglowodorów mogą być przyczyną pogarszania się kondycji izolacji. Norma IEC 60567 podaje granice wykrywalności gazów w $\mu\text{l/l}$ z podziałem na badania fabryczne i eksploatacyjne [49,153].

Metoda optyczna (spektrofotometria) polega na ocenie wyładowań niezupełnych na podstawie emitowanego przez nie światła. W oleju izolacyjnym mogą wystąpić wyładowania niezupełne w postaci świetleń i snopień, które emitują fale elektromagnetyczne w zakresie promieniowania ultrafioletowego (UV), światła widzialnego (VIS) oraz części bliskiej podczerwieni (NIR) [74]. Rejestracja widm emitowanych sygnałów optycznych odbywa się najczęściej przez światłowodową sondę, połączoną ze spektrofotometrem optycznym wysokiej rozdzielczości [33].

Metoda cieplna

Do oceny wyładowań niezupełnych przydatne mogą stać się również pomiary ciepła powstającego podczas tego zjawiska oraz pomiary gradientu ciśnienia w obszarze wyładowania. Obecnie w wielu ośrodkach przeprowadzane są badania w tym zakresie. Coraz popularniejsza staje się również obserwacja wrażliwych dostępnych (widocznych) miejsc nadmiernego wydzielania się ciepła (co jest jednym ze skutków działania wnz), za pomocą kamer termowizyjnych [33,34].

4. Tor pomiarowy elektrycznego pomiaru wnz

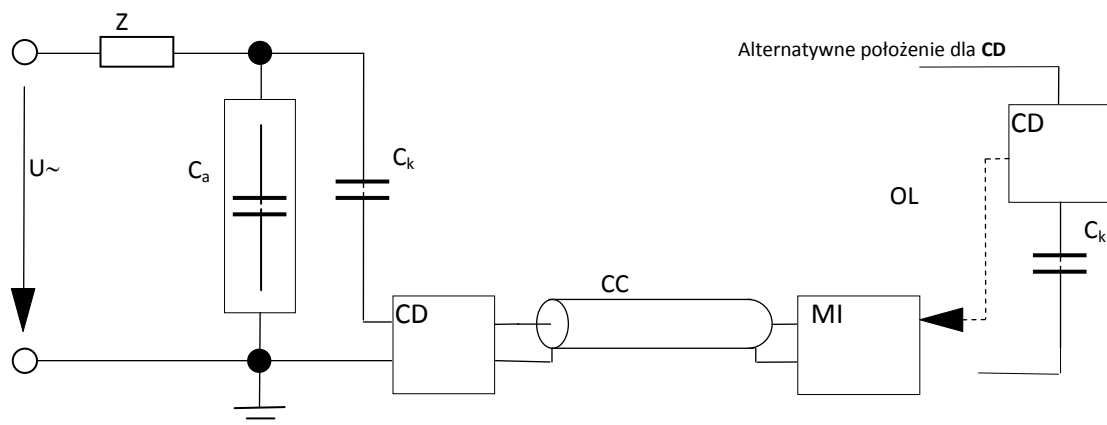
4.1 Charakterystyka toru pomiarowego wg normy IEC60270 [48]

Na rys. 4.1.1 a,b,c,d przedstawiono układy pomiarowe wyładowań niezupełnych według normy IEC60270 [48,102].

Podczas pomiarów bezpośrednich (*straight detection*) impedancję pomiarową CD łączy się często szeregowo z kondensatorem sprzęgającym C_k , co zabezpiecza urządzenie pomiarowe przed przebiciem. 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. 4.1.1 a,b) Pomiary bezpośrednie są jednak narażone na zakłócenia zewnętrzne.

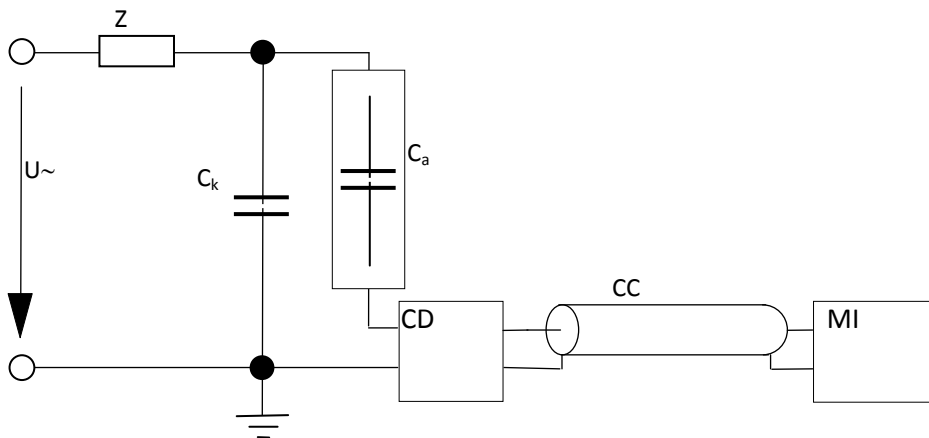
Znacznie lepsze efekty w tłumieniu zakłóceń można uzyskać w układzie mostkowym (*balanced detection*) (rys. 4.1.1 c), w którym impedancja pomiarowa składa się z dwóch części równoważonych oddzielnie i połączonych z masą. Największe tłumienie zakłóceń osiąga się w przypadku, gdy układ jest symetryczny tzn. $C_a = C_k$ [8]. Wadą układu mostkowego jest konieczność jego skalowania przed każdym pomiarem [135]. Stosowane są trzy rodzaje schematów mostkowych [1]: mostek czteropojemnościowy (całkujący bezpośrednio), mostek Scheringa oraz mostek z dyskryminacją impulsów. Jak wykazały badania praktyczne, najlepszym okazał się mostek Scheringa.

a)



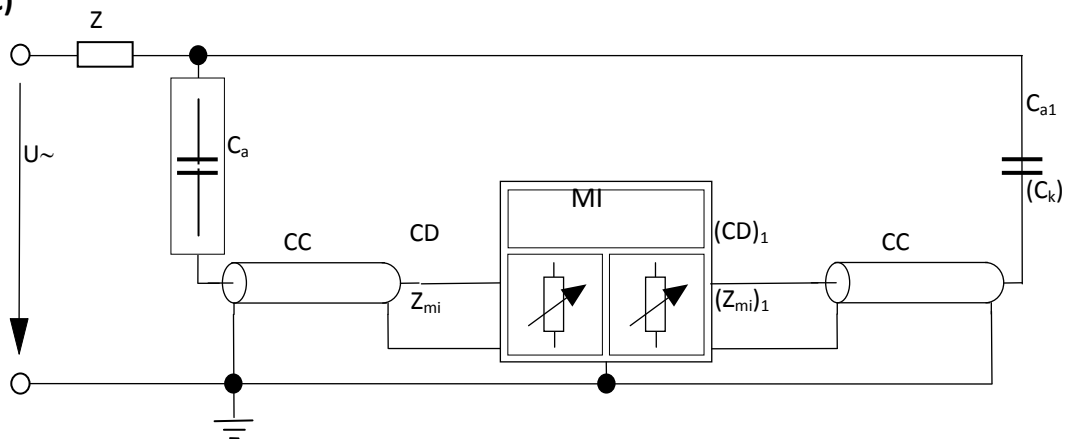
Rys. 4.1.1.a – układ bezpośredni z szeregowym kondensatorem sprzęgającym[48]

b)



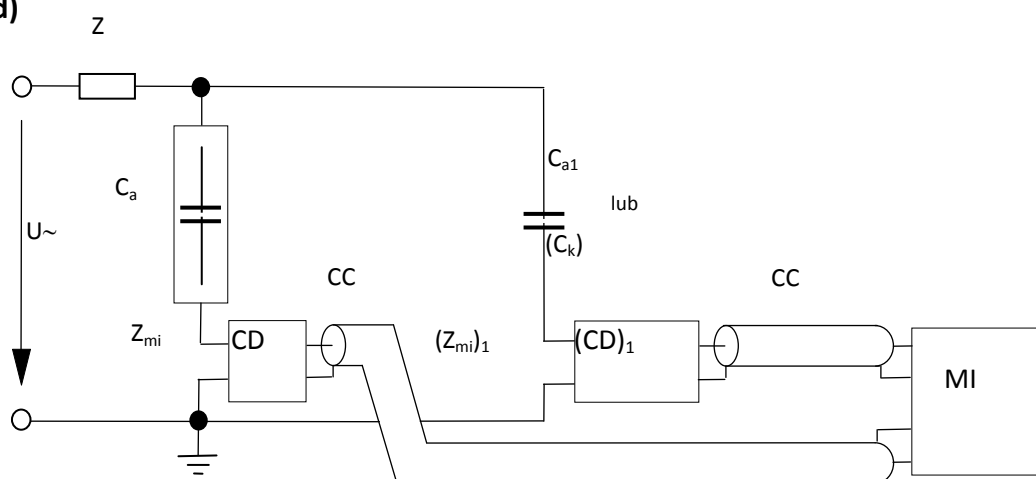
Rys. 4.1.1.b – układ bezpośredni z szeregowo połączonym obiektem[48]

c)



c – układ mostkowy

d)



Rys. 4.1.1. d – układ z detekcją polaryzacji

Rys. 4.1.1. Podstawowe układy pomiarowe PD wg IEC60270 [48]

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

Szerokie widmo impulsu wyładowania mogące zawierać się od kilkuset kHz do jednego MHz umożliwia stosowanie pomiarów z zastosowaniem systemu tzw. „quasi całkowania” [45,116,117].

Praktycznie, ze względu na wykorzystywanie do całkowania aktywnych filtrów pasmowych, wykorzystuje się dwa rodzaje układów pomiarowych – szerokopasmowe i wąskopasmowe.

W **układzie szerokopasmowym** 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. 4.1.2) [134,135,137].

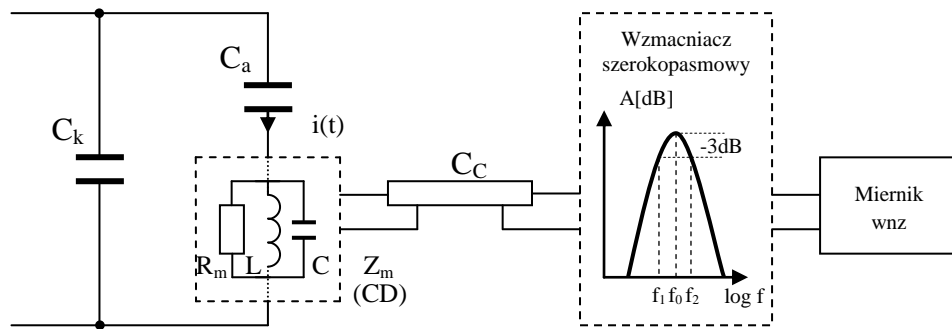
W takiej konfiguracji impulsy prądowe wyładowań niezupełnych są niewrażliwe na zmiany parametrów pojemności sprzęgającej C_k i obiektu badanego C_a . Pojemności te rozpatruje się jako szeregowe połączenie C_k i C_a równoległe do pojemności C impedancji (4.1.2), która stanowi filtr selektywny o częstotliwości rezonansowej [134]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC^*}} \quad (4.1.1)$$

gdzie:

L i C^* indukcyjność i pojemność impedancji sprzęgającej [134]:

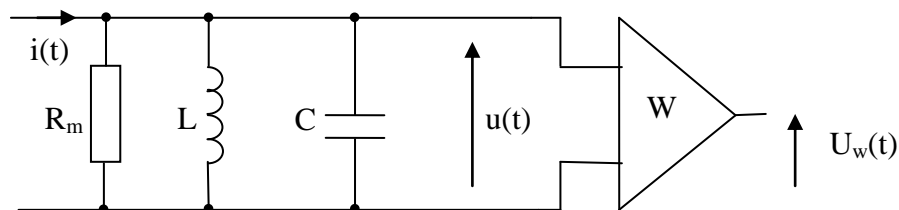
$$C^* = C_c + \frac{C_a C_k}{(C_a + C_k)} \quad (4.1.2)$$



Rys. 4.1.2. Schemat układu pomiarowego w systemie szerokopasmowym [134]

Proporcjonalnie do dobroci obwodu LC , niepożądane 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 wnz jest dobrze tłumiona oscylacja [35,45,117].

Schemat zastępczy impedancji pomiarowej, w dalszej części nazywanej też Z_m , z wyjściem na wzmacniacz przedstawia rysunek 4.1.3 [31].



Rys. 4.1.3. Schemat zastępczy impedancji pomiarowej Z_m ze wzmacniaczem W [31]

Pobudzenie układu impulsem prądowym $i(t)$ spowoduje, że napięcie wejściowe wzmacniacza $u(t)$ można opisać zależnością [31]:

$$u(t) = \frac{q_m}{C} e^{-\alpha t} \left[\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right] \quad (4.1.3)$$

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 4.1.3 uprościć do [31]:

$$u(t) = \frac{q_m}{C} e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (4.1.4)$$

W przypadku gdy $Z_m \approx R_m$ $u(t)$ będzie aperiodycznym impulsem wykładniczym [31]:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \quad (4.1.5)$$

gdzie:

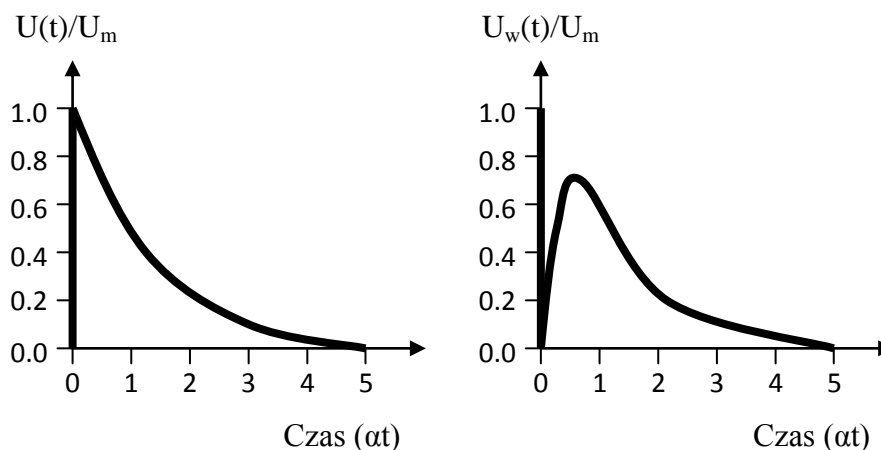
$$\alpha = \frac{1}{R_m C} \text{ - współczynnik tłumienia,}$$

$$\text{Dla } U_m = \frac{q_m}{C} t=0.$$

Dla wzmacniacza o paśmie ograniczonym napięcie wyjściowe $U_w(t)$ można opisać [31]:

$$U_w(t) = \frac{U_m}{1 - \alpha \tau_w} [e^{-\alpha t} - e^{-t/\tau_w}] \quad (4.1.6)$$

$\tau_w = R_w C_w$ zastępcza stała czasowa wzmacniacza (rys. 4.1.4).



Rys. 4.1.4. Napięcie na wejściu wzmacniacza (a) i na wyjściu (b) – $L=0$, $\tau_w=0,3/\alpha$ [31]

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 [48]. Typowa rozdzielczość w paśmie od 40 do 400 kHz wynosi $5 \div 9$ μs [31]. W międzynarodowej normie IEC60270 [48] 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 [48]:

- dla dolnej częstotliwości granicznej

$$f_1: 30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}; \quad (4.1.7)$$

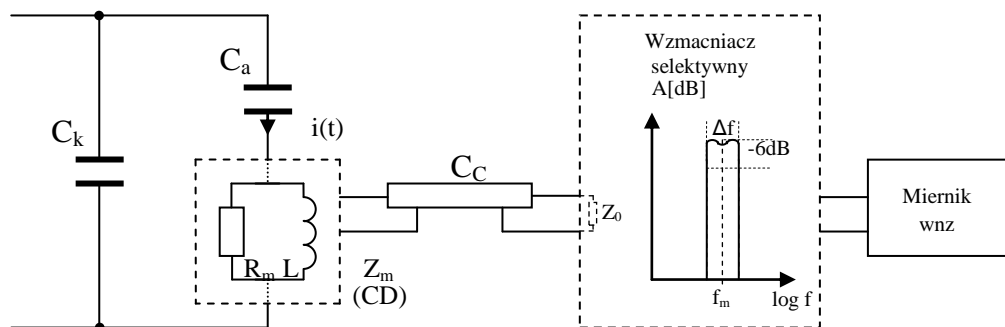
- dla górnej częstotliwości granicznej

$$f_2: f_2 \leq 500\text{kHz}; \quad (4.1.8)$$

- dla wyznaczonego pasma

$$\Delta f: 100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz} \quad (4.1.9)$$

System pomiaru wnz wąskopasmowy charakteryzuje się szerokością pasma filtru aktywnego w granicach kilku do kilkunastu kHz. Zasadę działania ilustruje rys. 4.1.5 [134,135].



Rys. 4.1.5. Schemat układu pomiarowego w systemie wąskopasmowym [135]

W przyrządach pomiarowych o systemie wąskopasmowym częstotliwość rezonansowa i szerokość może być nastawiana płynnie od kilkudziesięciu kHz do kilku MHz [135]. Impedancja pomiarowa Z_m stanowi dla impulsów prądowych wyładowania filtr górnoprzepustowy a jej mała rezystancja powoduje, że impulsy nie są całkowane. Pojemność przewodu C_c jest zwarta falową impedancją Z_0 . Napięcie podawane na wzmacniacz selektywny jest proporcjonalne do impulsu prądowego $i(t)$. Układ nie rozróżnia jednak polaryzacji impulsów [134,135].

W normie IEC60270 pasmo pomiarowe dla pomiarów wąskopasmowych definiuje się następująco [48]:

- szerokość pasma

$$\Delta f: 9\text{kHz} \leq \Delta f \leq 30\text{kHz} \quad (4.1.10)$$

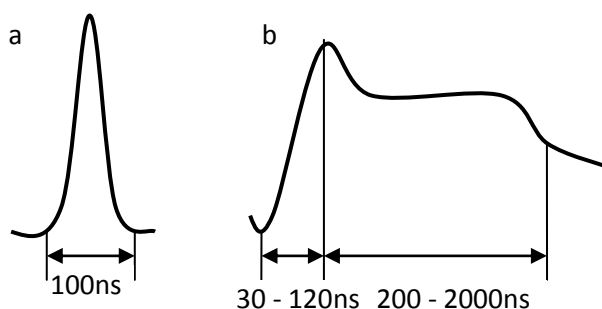
- częstotliwość środkowa

$$f_m: 50\text{kHz} \leq f_m \leq 1\text{MHz}. \quad (4.1.11)$$

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 wyładowania (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 [135].

Duże znaczenie przy pomiarach ma również kształt mierzonego impulsu wyładowczego [104]. Wynika on bezpośrednio z mechanizmu wnz i przy wyładowaniach we wtrącinach gazowych ma zwykle kształt trójkąta o podstawie do 100 ns – rys. 4.1.6a [104].



Rys. 4.1.6. Kształt oscylogramów prądów wnz [104]:

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. 4.1.6b [104]. Istnieje wtedy niebezpieczeństwo wystąpienia błędów na skutek np. nasycenia się wzmacniaczy, gdyż większość przyrządów pomiarowych prawidłowo mierzy krótkie impulsy [104]. 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 . Podawana jest także przez producentów maksymalna częstotliwość powtarzania impulsów wnz [104]:

$$n_r = \frac{1}{T_r} \quad (4.1.12)$$

Prawidłowość pomiaru będzie zachowana, jeżeli czas trwania T_r , odpowiedzi miernika wyładowań, będzie mniejszy od czasu rozdzielczego T_r (1,5-3 razy) [104].

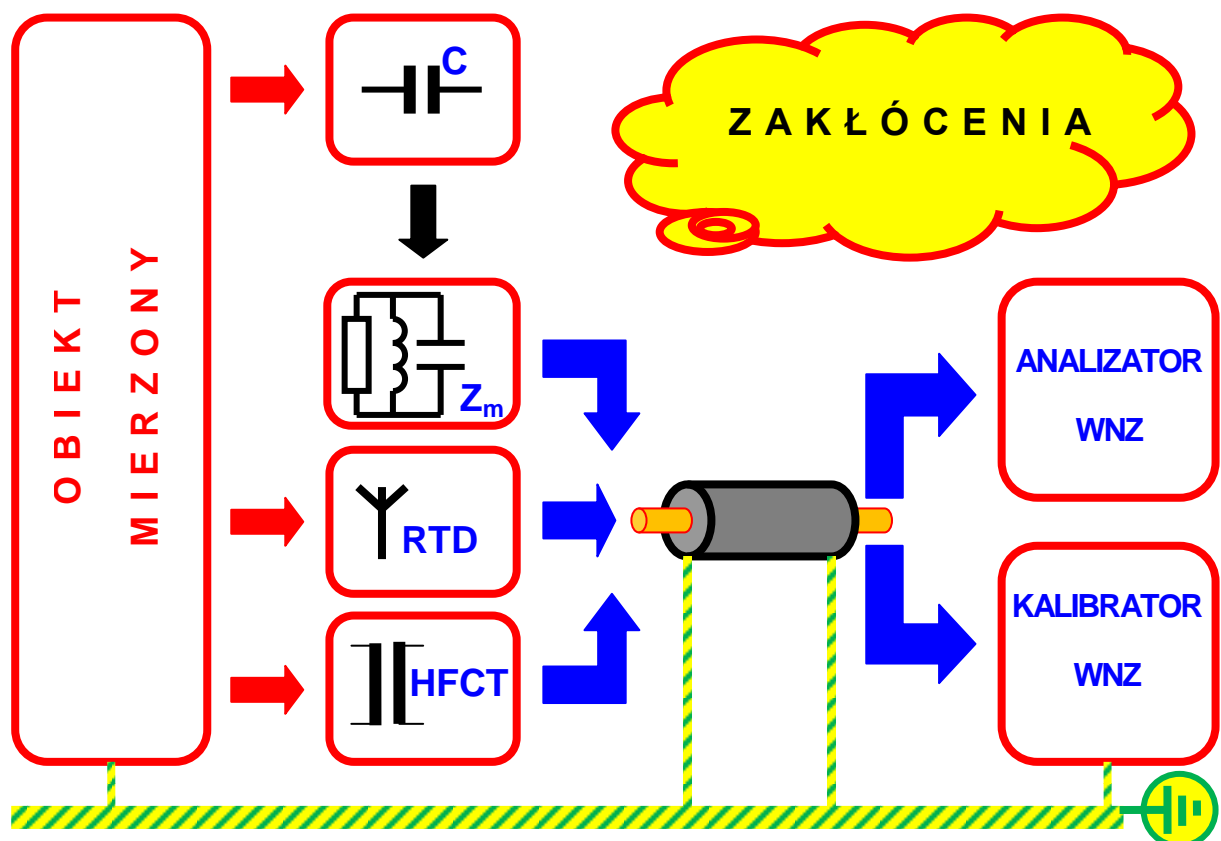
Bardziej rozbudowane analizatory i mierniki wyładowań niezupełnych umożliwiają jednoczesny pomiar parametrów wnz i podgląd oscyloskopowy przebiegów. Pozwala to odróżnić wnz od zakłóceń i potwierdzić prawidłowość pomiaru.

4.2 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. 4.2.



Rys. 4.2. poglądowy schemat elektrycznego toru pomiarowego wyładowań niezupełnych

Obiekt mierzony – z punktu widzenia niniejszej pracy to 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 HFCT lub cewek Rogowskiego.

Detektory (czujniki) do detekcji wnz

Niezależnie od układu pomiarowego tor pomiarowy wyładowań niezupełnych zaczyna się zawsze od obiektu mierzonego i czujnika (detektora) wnz. Pierwszym czujnikiem stosowanym do pomiaru wnz on-line był HFCT (High Frequency Current Transformer) – wysokoczęstotliwościowy przekładnik prądowy nazywany też RFCT (Radio Frequency Current Transformer). Klasyczne metody elektryczne do pomiarów stanu izolacji w trybie on-line wykorzystują cztery rodzaje czujników [2,6,8,16,25,37,90,91,127,130,136]:

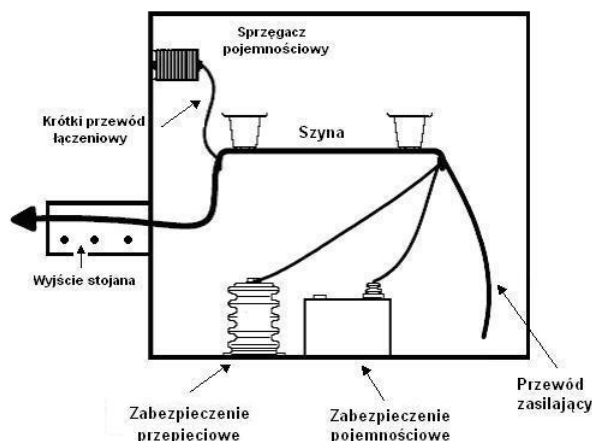
- pojemnościowe [2,43,144],
- przekładniki prądowe w.cz. [69,70],
- cewki Rogowskiego [121,122,123,124],
- anteny [54,55,56,57,58,83,129].



Rys. 4.2.1. Kondensatory sprzęgające [2]

Rys. 4.2.2 przedstawia przykład włączenia kondensatora sprzęgającego do uzwojeń stojana maszyny elektrycznej. Sprzęgacze pojemnościowe zwykle montuje się pomiędzy uziemionym zaciskiem a wyjściem lub określonym fragmentem np. silnika, generatora lub przewodu i przewodem w ekranie z urządzeniem pomiarowym.

Kondensatory sprzęgające (sprzęgacze pojemnościowe – rys. 4.2.1) są elementami bezwyładowaniami, odpornymi na zakłócenia z innych źródeł, pracującymi w szerokim zakresie częstotliwości do setek MHz. Najczęściej stosowane wartości pojemności to 80 pF, 500 pF, 1000 pF [2,43,144].



Rys. 4.2.2. Schemat podłączenia sprzęgacza do uzwojeń stojana badanej maszyny elektrycznej [129]

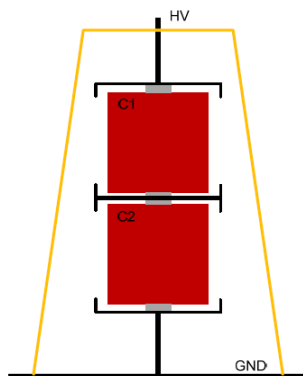
Nowa konstrukcja kondensatora sprzęgającego o pojemności 300 pF do pomiaru stanu izolacji silników powstała w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu, w ramach pracy doktorskiej dr inż. Wojciecha Kandory [66] oraz w ramach projektu badawczego własnego nr NN 510536639 pt. „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”, którego autor niniejszej pracy był współautorem. Opracowany i wykonany kondensator spełnia wszystkie wymogi jakie powinien spełniać sprzęgacz pojemnościowy.

Do budowy sprzęgacza pojemnościowego zastosowano wysokonapięciowe, wysokoczęstotliwościowe, impulsowe kondensatory ceramiczne w których izolację stanowi głównie tytanian strontu. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością elektryczną, niskim $tg\delta < 1\%$ przy stosunkowo niewielkich gabarytach (UHV 560pF, 50kV DC) i niskim koszcie zakupu [66].



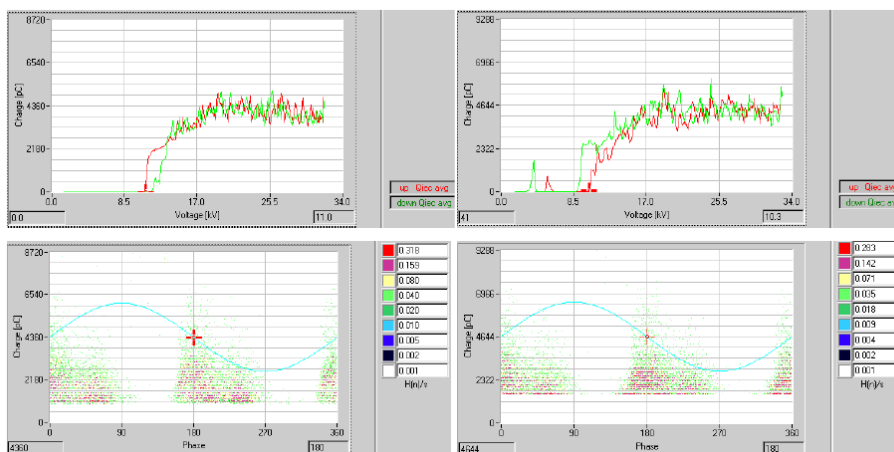
Rys. 4.2.3. Kondensatory ceramiczne wysokonapięciowe [66]

Kondensatory dla zwiększenia bezpieczeństwa połączone szeregowo i rozdzielono ekranami podłączonymi do wyprowadzeń – rys. 4.2.4 [66].



Rys. 4.2.4. Połączenie szeregowe kondensatorów z ekranami ochronnymi [66]

W ten sposób poprawiono znacznie parametry czujnika (zwiększono wydatnie napięcie zapłonu). Parametry skonstruowanego w ten sposób kondensatora nie odbiegają od parametrów czujnika wzorcowego produkcji zachodniej – rys. 4.2.5.

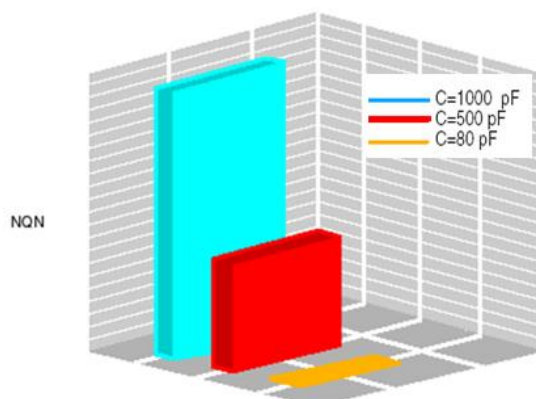


Rys. 4.2.5. Wyniki pomiaru wnz pręta generatora wykonane przy użyciu zbudowanego kondensatora (po lewej stronie) oraz przy użyciu kondensatora wzorcowego (po prawej stronie) [66]

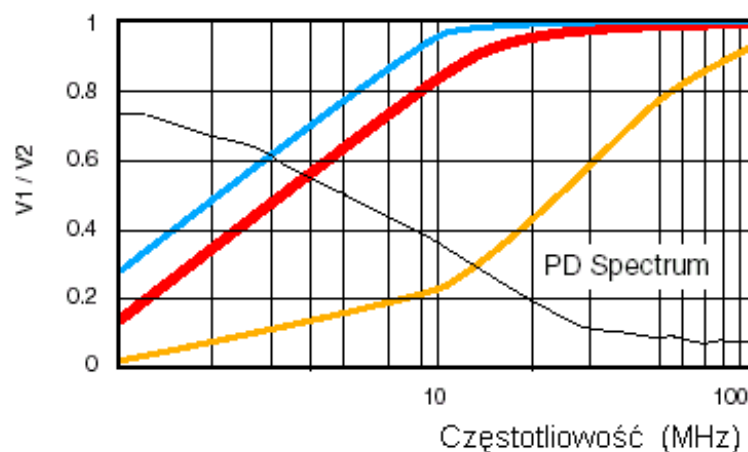


Rys. 4.2.6. Sposób zamontowania kondensatorów na końcu głównej magistrali (z lewej) i na części przejściowej magistrali głównej [123,125,127]

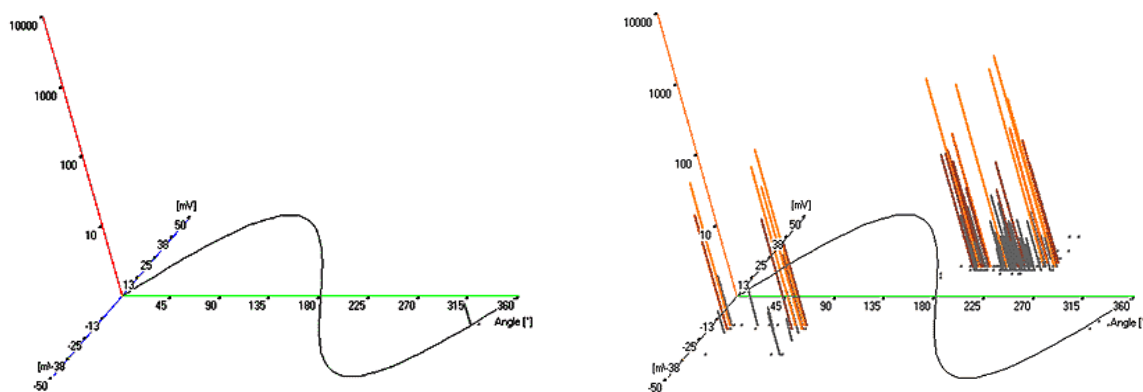
Skuteczność pomiaru wnz maszyn elektrycznych ma związek z wartością pojemności kondensatorów pomiarowych. Na podstawie badań przeprowadzonych w firmie Adwel stwierdzono znacznie większą skuteczność sprzęgaczy o większej pojemności – rys. 4.2.7 [1,2].



Rys. 4.2.7. Pomiar NQN przy różnych wartościach pojemności sprzęgaczy [1,2]



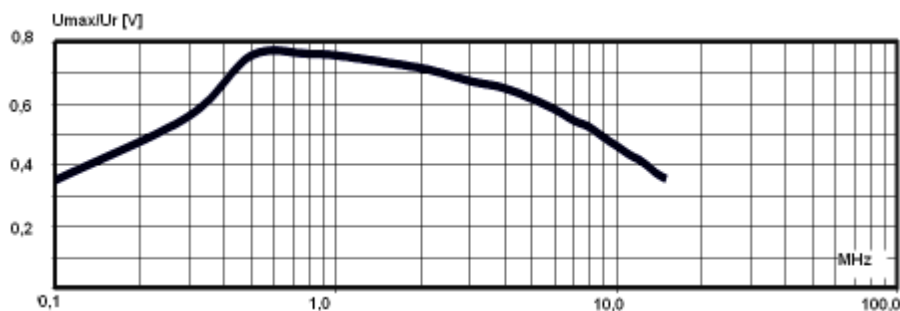
Rys. 4.2.8. Charakterystyki kondensatorów sprzęgających firmy ADWEL [2]



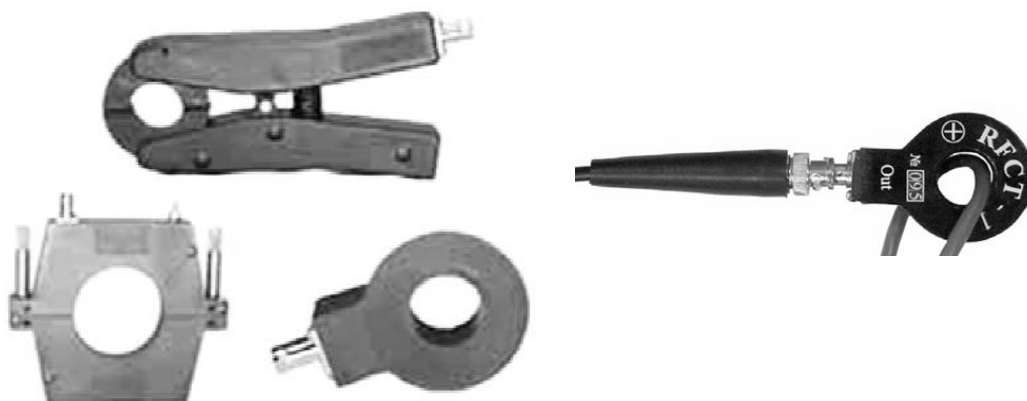
Rys. 4.2.9. Detekcja wnz przy sprzęgaczu 80pF (z lewej) i przy sprzęgaczu 500pF (z prawej) [2]

Gdy poziom wzn jest mały zdecydowanie bardziej przydatne są kondensatory o większej pojemności. Pomiary przy użyciu kondensatorów 500 pF, wartości Q_m dla silników były większe o 40÷200%, a wartości NQN o 60÷160% niż przy stosowaniu kondensatorów 80 pF [1,2].

Przekładniki prądowe w.cz. - czujniki RFCT (Radio Frequency Current Transformer) charakteryzują się wysokoczęstotliwościową charakterystyką przenoszenia, dzięki czemu możliwy jest pomiar impulsów wyładowań niezupełnych w zakresie częstotliwości od 100kHz ÷ 30MHz – rys. 4.2.10 [66,69,70]. Głównym zastosowaniem czujników jest kontrola wyładowań niezupełnych w żyłach, przewodach uziemiających, sygnałowych i pomiarowych. Ze względu na miejsce wykonywania pomiarów i dostęp do przewodów, konstrukcje czujników RFCT mogą być różne (rys. 4.2.11). Mogą być zamontowane np. na przewodzie zerowym transformatora, uziemionym oplocie kabla zasilającego, uziemieniu kondensatora sprzęgającego, na uziemieniu silnika [69]. Mają budowę zbliżoną do przekładnika na dzielonym rdzeniu ferrytowym (dzielony rdzeń ułatwia montaż na próbce).

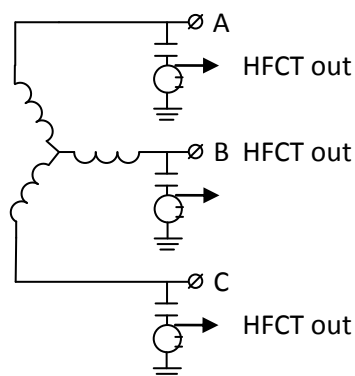


Rys. 4.2.10. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa czujnika RFCT-1 [66,69,70]



Rys. 4.2.11. Różne konstrukcje czujników RFCT [66,69,70]

Przykładowe umiejscowienie przekładnika w maszynie ilustruje rys. 4.2.12.



Rys. 4.2.12. Czujniki typu HFCT w maszynie

Na podstawie pomiarów laboratoryjnych przeprowadzonych w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu [66], stwierdzono, że detektory RFCT mogą być stosowane zamiennie z czujnikami pojemnościowymi. Czułość RFCT okazała się zbliżona do czułości kondensatorów sprężających, przy stosunkowo małych szumach (tabela 4.2.1).

Tabela 4.2.1. Tabela poziomu szumów w zależności od lokalizacji detektora (ładunek wzorcowy 10nC) [66]

	Ładunek Q	Poziom szumów
Kondensator	10000pC	320pC
RFCT lokalizacja 1	5100pC	3700pC
RFCT lokalizacja 2	8600pC	340pC
RFCT lokalizacja 3	8500pC	340pC

Lokalizacja 1 – punkt zerowy transformatora
 Lokalizacja 2 – po stronie wysokiego napięcia
 Lokalizacja 3 – na przewodzie uziemiającym

Cewki Rogowskiego (nazywane „air core HFCTs”)

a)



b)



Rys. 4.2.13. Elastyczne cewki Rogowskiego (a) i sztywne (b)

Cewki pomiarowe Rogowskiego [121,122,123,124] to zwykle rdzeń wykonany z materiału izolacyjnego (elastyczny lub nie) z nawiniętym bifilarnie, dwuwarstwowo w tym samym kierunku, uzwojeniem z cienkiego izolowanego drutu. Końce uzwojenia schodzą się w środku rdzenia, gdzie są wyprowadzone (rys. 4.2.13). Ze względu na przenoszona częstotliwość można je podzielić na niskiej, średniej i wysokiej częstotliwości.

Cewki Rogowskiego to cewki pomiarowe o specjalnych właściwościach. Zmienny strumień magnetyczny indukuje w nich siłę elektromotoryczną

$$e_x = -\frac{d}{dt}\Psi(t) = -n\frac{d}{dt}\Phi(t) \quad (4.2.1)$$

gdzie:

$\Psi(t) = n \varphi(t)$ sprzężenie magnetyczne n zwojów cewki

$\Phi(t)$ – zmienny strumień magnetyczny, który obejmuje cewka pomiarowa

Przy założeniu sinusoidalnie zmiennego strumienia $\Phi(t)$, można wyznaczyć jego wartość maksymalną z zależności:

$$\Phi_m = \frac{E_m}{2\pi n f} \quad (4.2.2)$$

gdzie:

Φ_m - amplituda strumienia

E_m – amplituda napięcia wyindukowanego w cewce

F – częstotliwość strumienia

Zakładając, że pole jest prostopadłe do cewki, znając wartość napięcia wyindukowanego, można wyznaczyć indukcję magnetyczną B z zależności:

$$\Psi = nSB \quad (4.2.3)$$

Ze względu na wykonanie, cewki te można podzielić na elastyczne i sztywne (rys. 4.2.13).

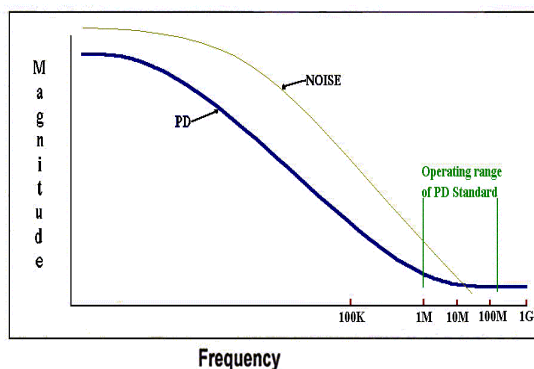
Ze względu na pasmo przenoszonych częstotliwości [122]:

- niskiej częstotliwości 0-100 Hz,
- średniej częstotliwości 100 – 20 kHz,
- wysokiej częstotliwości >20 kHz.

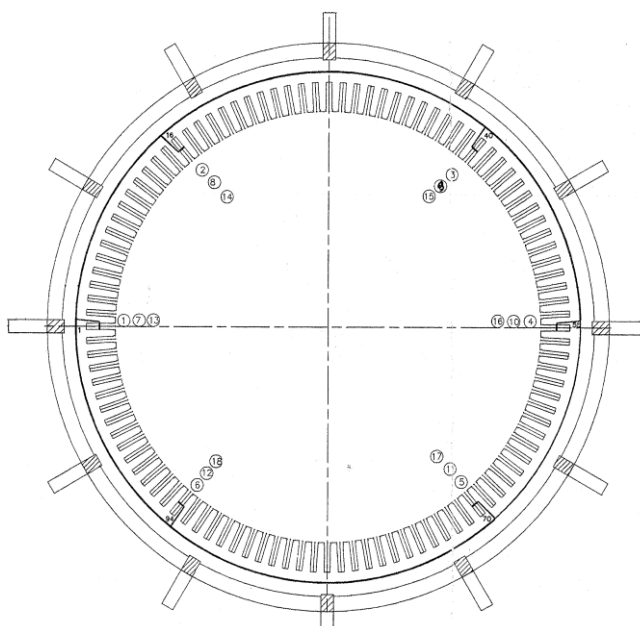
Cewki pomiarowe, w tym cewki Rogowskiego, są często stosowane w diagnostyce technicznej silników, gdyż na podstawie prądów stojana można zidentyfikować wiele podstawowych uszkodzeń maszyny.

RTD (Resistance Temperature Detector) oraz czujniki paskowe SSC (Stator Slot Couplers) [54,55,56,57,58,83,129]. RTD to najczęściej stosowane czujniki termorezystorowe, które oprócz swojej podstawowej funkcji, mogą pełnić również rolę anten do detekcji wyładowań niezupełnych. Koszt stosowanych w maszynach elektrycznych termorezystorów waha się w granicach od kilku do kilkudziesięciu złotych, wyjątkowo kilkaset złotych.

Konfigurację anten przy pomiarach wnz w silnikach, wg [54,55,56,57,58,83,129] należy poprzedzić wyborem zakresu pomiaru wnz ze względu na wpływ zakłóceń przemysłowych oraz ustaleniem zakresu spodziewanych częstotliwości wnz, który zapewni możliwie najniższy poziom zakłóceń i szumów. Z długoletnich badań przemysłowych, jakie prowadziła firma ADWEL wynika, że najkorzystniejszym zakresem częstotliwości jest zakres od 1÷150 MHz (PDA PREMIUM) [1,2]. Podobne badania przeprowadzone przez VIBROCENTER ograniczyły ten zakres do 20 MHz - rys. 4.2.14.



Rys. 4.2.14. Widmo wnz (PD) maszyn elektrycznych w czasie ich eksploatacji oraz widmo zakłóceń wg firmy ADWEL [1,2]



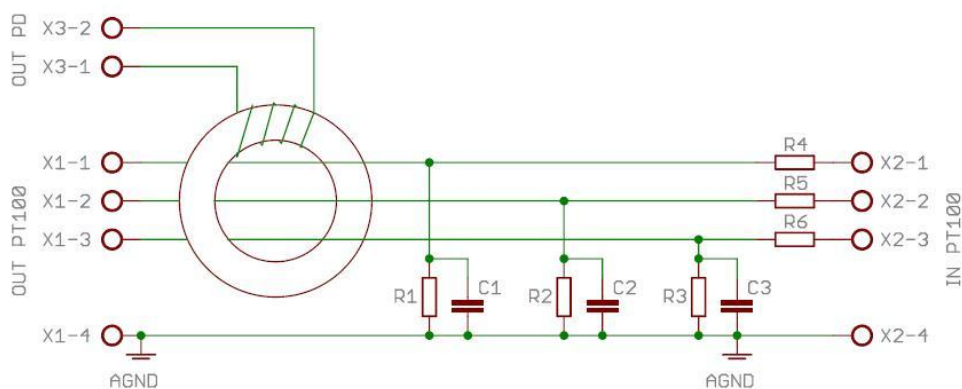
Rys. 4.2.15 a. Rozmieszczenie czujników PT-100 w żłobkach stojana [123,125,127]



Rys. 4.2.15 b. Rozmieszczenie anten paskowych w żłobkach [123,125,127]

Anteny na bazie RTD oraz anteny paskowe montuje się w żłobku w miejscu wyciętej przekładki międzywarstwowej uzwojenia – rys. 4.2.15 a i 4.2.15 b [123,125,127].

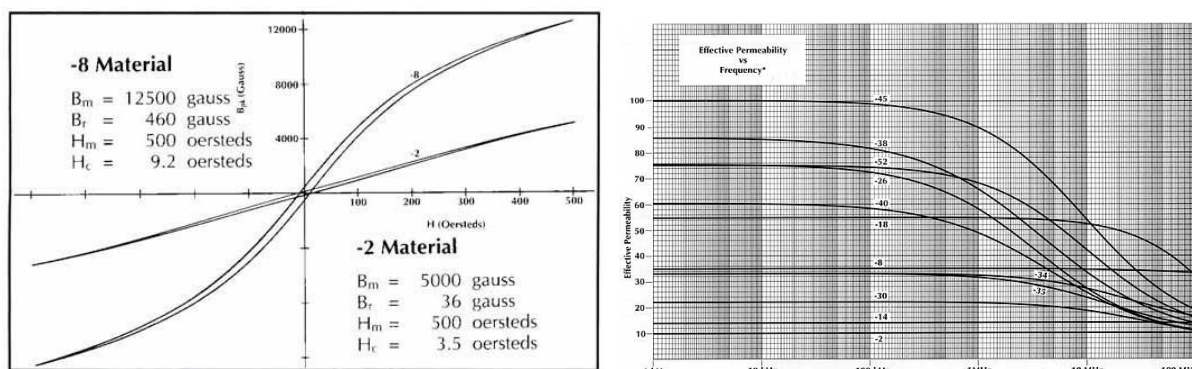
Detekcja wylądowań niepełnych odbywa się w układzie jak na rys. 4.2.16:



Rys. 4.2.16. Schemat układu czujnika wylądowań niepełnych [90,91]

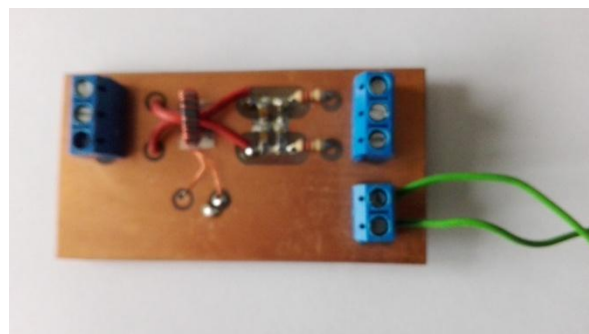
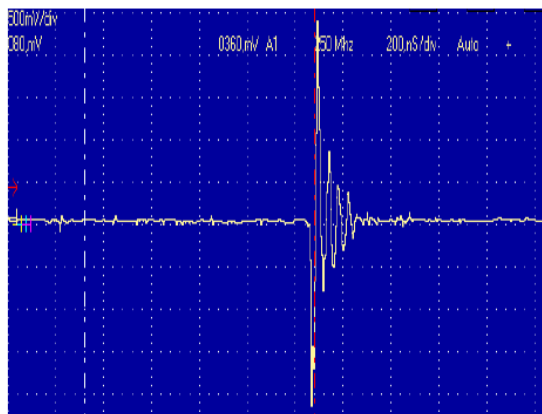
Autor do detekcji impulsów wnz wykorzystał rdzeń toroidalny typu RTP ze sproszkowanego żelaza pracujący w paśmie do 200 MHz, zwykle oznaczony kolorem czarnym lub czerwono-czarnym, o wysokiej stabilności temperaturowej parametrów magnetycznych, często wykorzystywany w obwodach o dużej dobroci, na którym nawinięto uzwojenie pomiarowe.

Przeprowadzone próby i zbudowane prototypy urządzenia z wykorzystaniem innego typu rdzeni nie przyniosły oczekiwanych wyników. Charakterystyki – magnesowania i w funkcji częstotliwości (materiał nr 2) przedstawia rysunek 4.2.17.



Rys. 4.2.17. Charakterystyki rdzenia RTP (Materiał 2) [90,91]

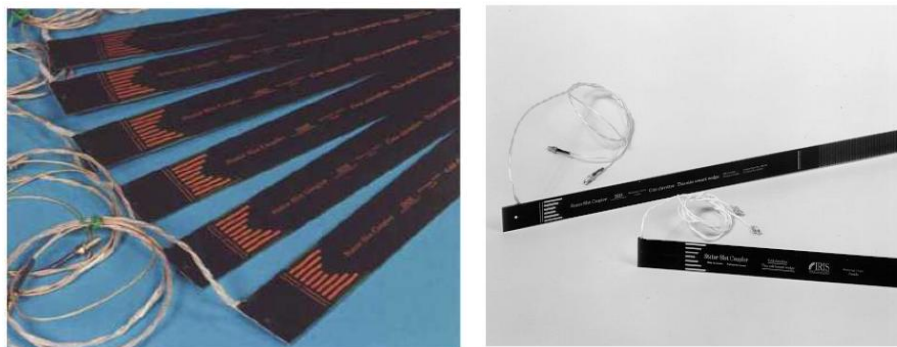
Tak wykonany czujnik wzn umożliwia jednoczesny pomiar temperatury i wzn. Termorezystor w roli anteny umożliwia pomiar wzn przy pełnej izolacji a sygnał indukuje się w uzwojeniu pomiarowym nawiniętym na rdzeniu toroidalnym. W warunkach pomiarowych jest możliwe podłączenie czujników PT100, zarówno dwuprzewodowych jak i trójprzewodowych. Znajdujące się na płycie filtry (elementy $R1$ do $R6$ i $C1$ do $C3$) zapewniają bezzakłóceńowy monitoring temperatury. Przeprowadzone testy wykazały pełną przydatność tak wykonanego czujnika do monitoringu wyładowań niezupełnych. Koszt wykonanego czujnika stacjonarnego wynosi 50÷120 złotych.



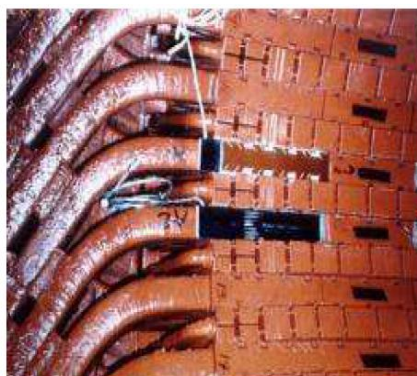
Rys. 4.2.18. Przykład oscylogramu napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 (pomiar wzn silnika w Cementowni ODRA) i fotografia wykonanego prototypu [90,91]

W zakładach remontowych w stacji prób, w czasie postoju maszyny (off-line), szczególnie przydatne do pomiarów wzn są także **anteny paskowe** (rys. 4.2.15-b) lub **pętlowe**.

Anteny paskowe, specjalność kanadyjskiej firmy Iris [54,55,56,57], zostały skonstruowane do badań izolacji dużych generatorów metodą wyładowań niezupełnych. Przykładowe konstrukcje takich anten ilustruje rys. 4.2.19.



Rys. 4.2.19. Konstrukcje anten paskowych wykonane przez firmę Iris [54,55,56,57]



Rys. 4.2.20. Anteny paskowe w żłobkach [123,125,127]

Podłoże anten wykonano ze szkła epoksydowego, dzięki czemu są one odporne na wysoką temperaturę (do 150°C) zachowując bardzo dobre własności dielektryczne. Rozmiary mogą być dopasowane do żłobka, gdzie najczęściej są montowane (zwykle pod klinami) – rys. 4.2.20 [123,125,127].

Podstawowe parametry anten paskowych:

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

Zaletami anten paskowych są: odporność na zakłócenia, duża czułość. Wadą jest dosyć skomplikowany i czasochłonny montaż oraz większa ilość anten potrzebnych do pełnego pomiaru maszyny (przynajmniej 6) [127,129].

Zastąpienie termorezystora Pt100, w antenie RTD, pętlą przewodu nawiniętą wokół czoł uzwojeń silnika czyni z niej tzw. antenę pętlową (rys. 4.2.21) [127,129].



Rys. 4.2.21. Wnętrze stojana z fragmentem anteny pętlowej [127,129]

Dużą pomocą w detekcji wyladowań niezupełnych mogą służyć również różnej konstrukcji **anteny przenośne** używane z powodzeniem przez konstruktorów i personel diagnostyczny [128].

Antena to prosty obwód drgający LC przekształcony w układ otwarty [83]. Zależność dla obwodu rezonansowego anteny można wyrazić następująco [83]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.2.4)$$

gdzie: f – częstotliwość [Hz],
 L – indukcyjność układu antenowego [H],
 C – pojemność układu antenowego [F].

Jej długość czynna musi być ustawiona na wielokrotność długości fali odbieranej. Podczas testów dążono do tego, aby anteny mogły pracować w zakresie 1 do 20 MHz. Jeżeli długość anteny jest zbliżona do $\frac{1}{4}$ lub $\frac{1}{2}$ długości fali λ , jej sprawność jest największa. [83] Antena staje się wydajna, gdy jej długość λ przekracza $1/10$ długości fali i jest jej wielokrotnością.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.2.5)$$

gdzie: λ - długość fali [m],
 c - prędkość światła (3×10^8 m/s),
 f - częstotliwość [Hz].

Przydatność anten przenośnych, własnej konstrukcji, do lokalizacji miejsc emisji wnz została wielokrotnie potwierdzona podczas badań (rys. 4.2.22b) [83]. Stanowią one często

dotychczasowe wyposażenie ręcznych skanerów do wyładowań niepełnych jak np. PD Surveyor Air - rys. 4.2.22a.



Rys. 4.2.22a. Ręczny skaner wyładowań niepełnych



Rys.4.2.22b. pomiary przy pomocy anteny przenośnej

Przyrząd w wyposażeniu dodatkowym posiada antenę paraboliczną z celownikiem laserowym do wykrywania ultradźwiękowych efektów wyładowań niepełnych powierzchniowych.

Rysunek 4.2.23 przedstawia fotografię przenośnej anteny używanej do pomiarów wnz.

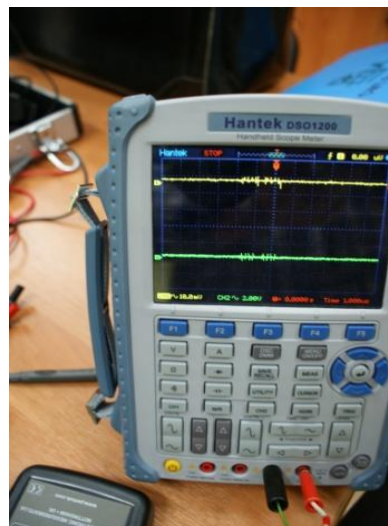


Rys. 4.2.23. Antena przenośna do pomiarów wnz

4.3 Pomiary wnz oscyloskopem

Pomiary wnz w praktyce wykazały, że w wielu przypadkach konieczna jest obserwacja przebiegów wyładowań (impulsów) na oscyloskopie. Szczególną zaletą takiej kontroli jest możliwość oddzielenia właściwych impulsów od zakłóceń i zobrazowanie ich na przebiegu napięcia (synchronizacja i informacja o fazie).

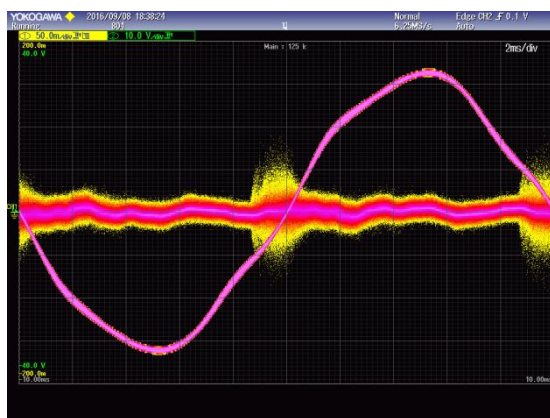
Najbardziej przydatnymi do tego celu są zwykle oscyloskopy o dobrych parametrach – szerokie pasmo rejestracji najlepiej do 1GHz. Autor z powodzeniem używał oscyloskopów: YOKOGAWA DLM2034 (2,5GS/s, 350MHz), LeCroy Wavesurfer 3054 (4GS/s, 500MHz), Hantek DSO1200 (200MHz), zestaw pomiarowy z kartą oscyloskopową DSO2904 – rys. 4.3.1.



Rys. 4.3.1.. Fotografie oscyloskopów używanych przez autora do obserwacji wyładowań wnz

Najczęściej impulsy nałożone są na przebiegu sinusoidalnym napięcia (jeden okres) lub przebiegi synchronizacyjny i wyładowań rejestrowane są w oddzielnych kanałach oscyloskopu.

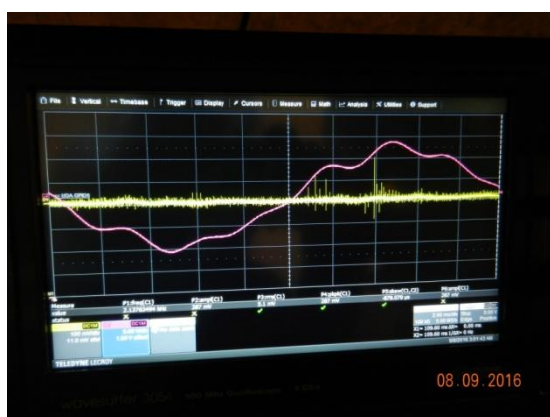
Rysunek 4.3.2 ilustruje różne przypadki występowania wyładowań zobrazowanych na oscyloskopie na tle okresu napięcia probierczego. Zniekształcenie przebiegu napięcia wynika z faktu, że transformator separujący pracował na jałowo. Metoda ta wymaga dużego doświadczenia w diagnozowaniu uszkodzenia, na podstawie miejsca występowania wnz i właściwej interpretacji. Dużym ułatwieniem bywają w tym przypadku różne bazy danych pracowników diagnostyki i ich konsultacje. Przykładowo na ilustracji 4.3.2a przedstawiono wyładowania na pręcie – detekcja przy użyciu kondensatora sprzęgającego 1nF – wyładowania wokół przejścia przez zero napięcia sieci.



a)



b)



c)



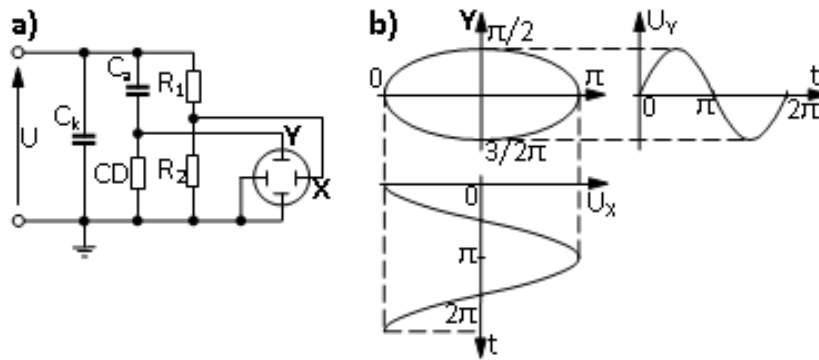
d)

Rys. 4.3.2. Przykłady wyładowań wnz zobrazone na oscyloskopie:
 a) wyładowania na pręcie uzwojenia
 b) wyładowanie ostrze-plyta
 c) wyładowanie ostrze-plyta elektroda od strony wysokiego napięcia
 d) wnz kalibracyjne na kondensatorze (wartość ładunku 5nC)

Inne zarejestrowane przypadki wyładowań ilustrują fotografie na rysunku 4.3.2 b,c,d.

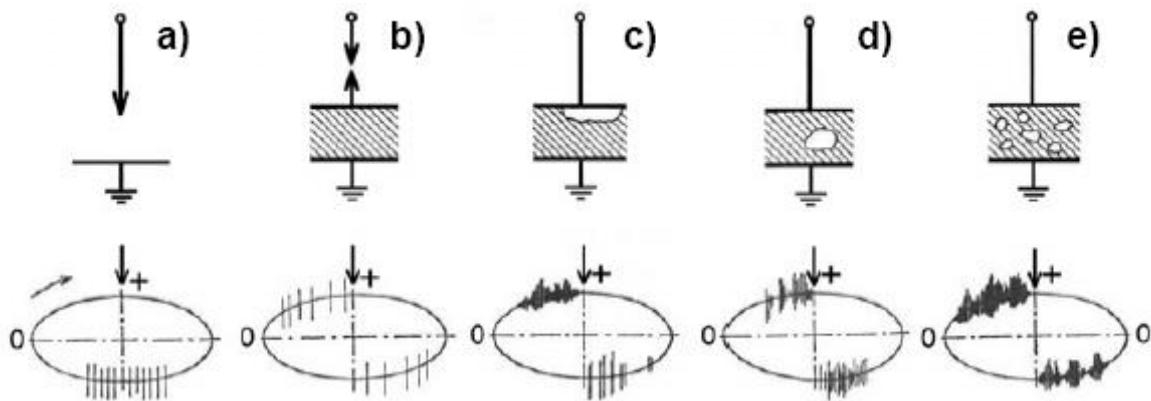
W ubiegłym wieku popularna była oscyloskopowa rejestracja przebiegów wyładowań w układzie eliptycznym – rys. 4.3.3 przedstawia sposób wyzwalania oscyloskopu. Identyfikacji defektów dokonywano na podstawie obrazu oscylograficznego impulsów wnz na tle eliptycznej podstawy czasu [85]. Defekty izolacji identyfikowano przez porównanie przebiegu zarejestrowanego z przebiegami w bazie danych defektów (rys.4.3.4). Taka ocena była niestety bardzo subiektywna i wymagała dużego doświadczenia osoby zajmującej się diagnostyką.

Przykłady obrazów oscylograficznych wg [156] z wykorzystaniem detekcji na tle elipsy ilustrują rysunki 4.3.4 oraz 4.3.5.

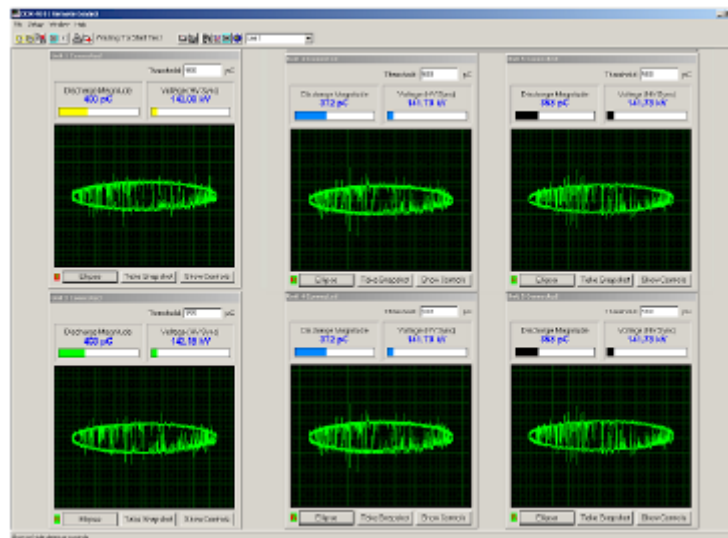


Rys. 4.3.3. Badanie wnz metodą oscylograficzną z użyciem elipsy [24]

Przykłady detekcji charakterystycznych wyładowań przedstawia rysunek 4.3.4.



Rys. 4.3.4. Detekcja charakterystycznych wyładowań na tle elipsy [23,24]
 a) ulot ostrze – płyta b) iskrzenie c) wnz WE wtrącinie przy elektrodzie d) wnz WE wtrącinie pojedynczej e) wnz przy większej ilości wtrącin



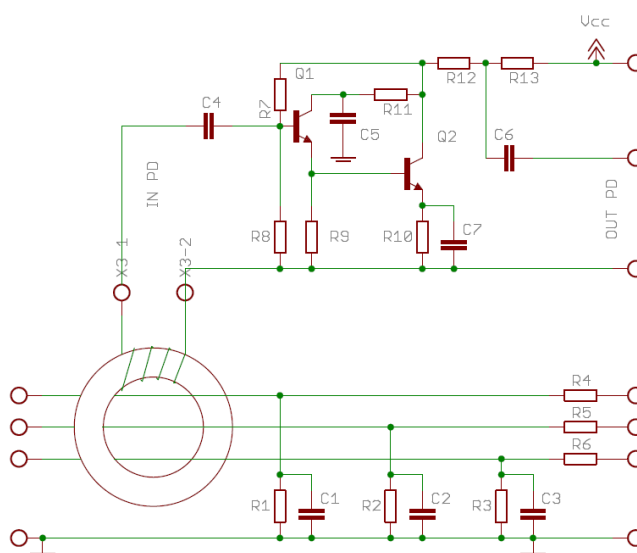
Rys. 4.3.5. Detekcja rodzaju wyładowań na podstawie obrazu oscylograficznego [156]

5. Prototyp aktywnego czujnika typu RTD do wyładowań niezupełnych

5.1 Schemat ideowy, budowa, zasada działania

W mobilnych analizatorach wyładowań niezupełnych do ich właściwej detekcji, wymagana jest amplituda impulsów na poziomie minimum kilkudziesięciu mV. Przy założeniu, że jako jedno ze źródeł sygnału wykorzystywane będą termorezystory typu PT100 wchodzące w skład tzw. czujników antenowych (anteny), należy uwzględnić, że amplituda sygnału wyjściowego z takich czujników może okazać się zbyt mała. Rozwiązaniem problemu zbyt małej amplitudy sygnału pomiarowego może być czujnik aktywny RTD z wbudowanym wzmacniaczem wstępnym [91].

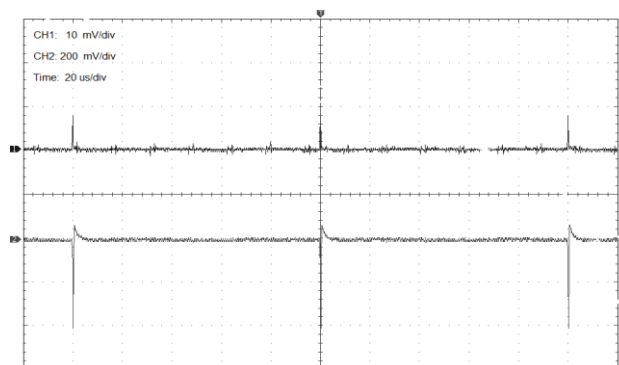
Rys. 5.1.1 przedstawia schemat ideowy proponowanego czujnika aktywnego wnz z przedwzmacniaczem tranzystorowym.



Rys. 5.1.1. Schemat aktywnego czujnika ze wzmacniaczem wstępnym na bazie tranzystorów dyskretnych [91]

W obwodzie wejściowym wzmacniacza zastosowano wtórnik emiterowy. Takie rozwiązanie stosowane jest m.in. w sondach scyntylacyjnych, np. w sondzie SSU-70 produkcji ZZUJ „Polon”. Z wyjścia wtórnika impulsy podawane są na stopień wzmacniający wykonany na bazie tranzystora npn w układzie OE. Wyjście wzmacniacza obciążono obustronnie dopasowaną linią przekazującą sygnał wyjściowy do urządzenia pomiarowego.

W układzie zastosowano przewód trzyżyłowy wykorzystując go do zasilania układu przedwzmacniacza napięciem 12 V i wyprowadzenia sygnału wyjściowego. Separację sygnału użytecznego od obwodu zasilania zapewniają elementy $R13$ i $C6$. Na rysunku 5.1.2 przedstawiono oscylogramy impulsów na wejściu (CH1) i wyjściu (CH2) przedwzmacniacza zainstalowanego w czujniku RTD [91].

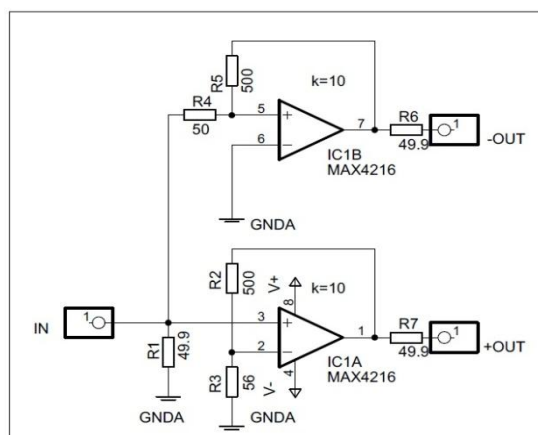


Rys. 5.1.2. Oscylogramy impulsów wejściowych (CH1) i wyjściowych przedwzmacniacza [91]

Jako źródło impulsów wejściowych zastosowano generator arbitralny DG4062, który umożliwia generację impulsów o regulowanej szerokości do częstotliwości 60 MHz. Amplituda impulsów wejściowych wynosiła 10 mV. Na wyjściu przedwzmacniacza otrzymano odwrócone impulsy o amplitudzie dochodzącej do 400 mV. Jest to poziom sygnału użytecznego zapewniający możliwość dobrej współpracy ze sprzętem pomiarowym [91].

Dodatkowo opracowano wzmacniacz końcowy aby uzyskać sygnał o amplitudzie umożliwiającej współpracę z modułem mikroprocesorowym. Umożliwia to pomiar częstotliwości powtarzania n wnz. Sygnał wyjściowy układu z rys. 5.1.3 może być wykorzystany do sterowania szybkiego licznika częstotliwości. Należy zwrócić jednak uwagę na możliwe do popełnienia błędy pomiaru wynikające z dużej czułości licznika oraz innych zakłóceń w tym szumów wzmacniaczy. Wskazana jest zatem kontrola mierzonych impulsów na oscyloskopie [102,104,105].

Moduł końcowy wzmacniacza zaprojektowano wykorzystując podwójny wzmacniacz operacyjny MAX4216 pracujący do częstotliwości 300 MHz, tzw. „Rail-to-Rail”. Rys. 5.1.3 przedstawia schemat ideowy wykonanego wzmacniacza końcowego [91].



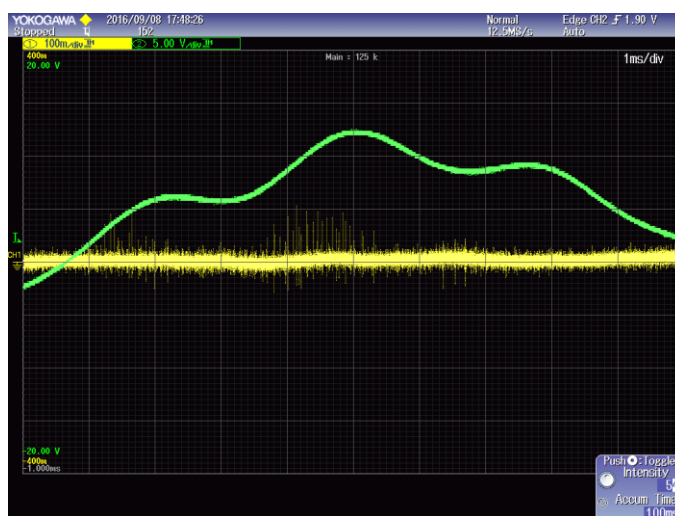
Rys.5.1.3. Schemat ideowy wzmacniacza końcowego [91]

Wzmacniacz zawiera dwa tory: odwracający i nieodwracający. Dzięki temu otrzymano dwa przebiegi o takiej samej amplitudzie, lecz o przeciwnej polaryzacji. Taka konfiguracja wzmacniacza umożliwi wybór polaryzacji impulsów potrzebny do dalszej obróbki sygnału na wejściach przetwornika pomiarowego.

Rys. 5.1.4 przedstawia fotografię wykonanego przez autora prototypu aktywnego czujnika RTD, rys. 5.1.5 zarejestrowany przebieg wyładowań.



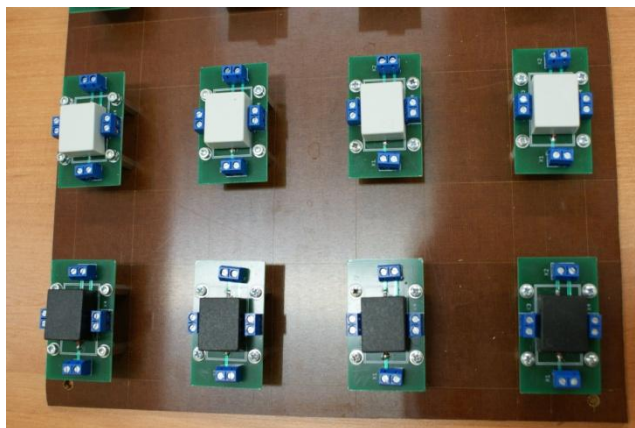
Rys. 5.1.4. Prototyp aktywnego czujnika RTD [91]



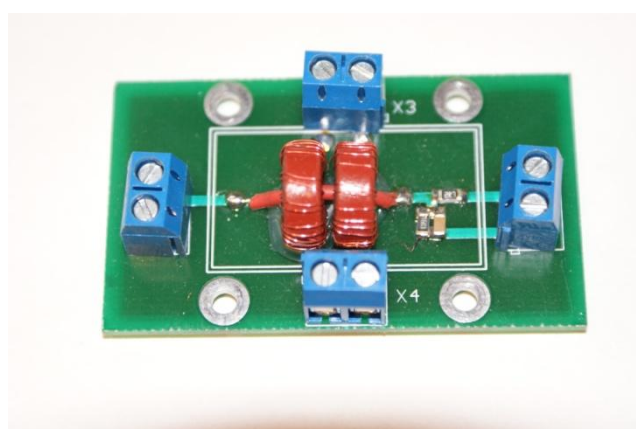
Rys. 5.1.5. Przykładowy pomiar wnz

Za jego wadę można uznać konieczność stosowania zasilania, ale w przyrządach i analizatorach wnz zawsze istnieje możliwość skorzystania z dodatkowo wyprowadzonego napięcia lub można zasilać czujnik z własnego zasilacza DC.

Przydatność i skuteczność czujników typu RTD została wielokrotnie sprawdzona podczas badań przeprowadzonych w ramach kontroli stanu izolacji silnika napędowego młyna cementu w Cementowni ODRA. Autor opracował zestaw czujników pomiarowych RTD o dwu wyjściach (rys. 5.1.6a, 5.1.6b).



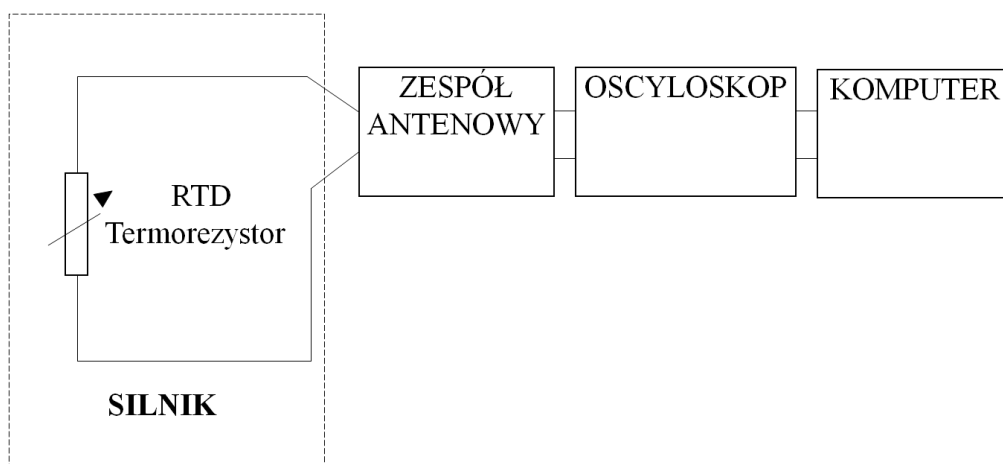
Rys. 5.1.6 a. Zestaw czujników RTD o dwu wyjściach [126]



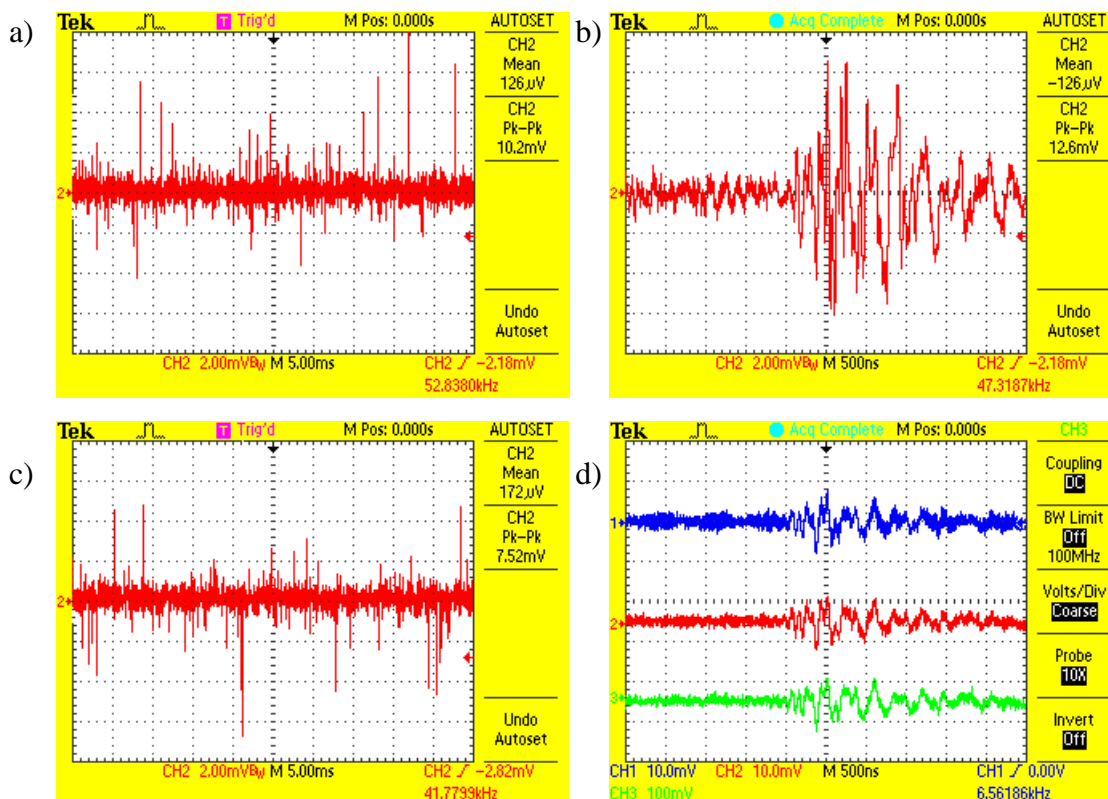
Rys. 5.1.6 b. Czujnik RTD o dwu wyjściach (X3,X4)

Dwuwyjściowy czujnik umożliwia jednocześnie, niezależne wykorzystanie tego samego sygnału do pomiarów za pomocą różnych analizatorów stacjonarnego i mobilnego.

Skuteczność czujników RTD sprawdzana była w układzie pomiarowym jak na rys. 5.1.7 [126,127,129].



Rys. 5.1.7. Układ do pomiarów wzn silników przy użyciu RTD[126]



Rys. 5.1.8. Pomiary wnz dla przykładowego silnika WN, oscylogramy napięć: a) i b) pomiary czujnikiem własnym (dla różnych skal czasu), c) pomiar RTD, dla innej chwili czasowej, d) pomiar RTD - wykres górny, pomiar czujnikiem własnym – wykresy środkowy i dolny, dla tej samej chwili czasowej [126]

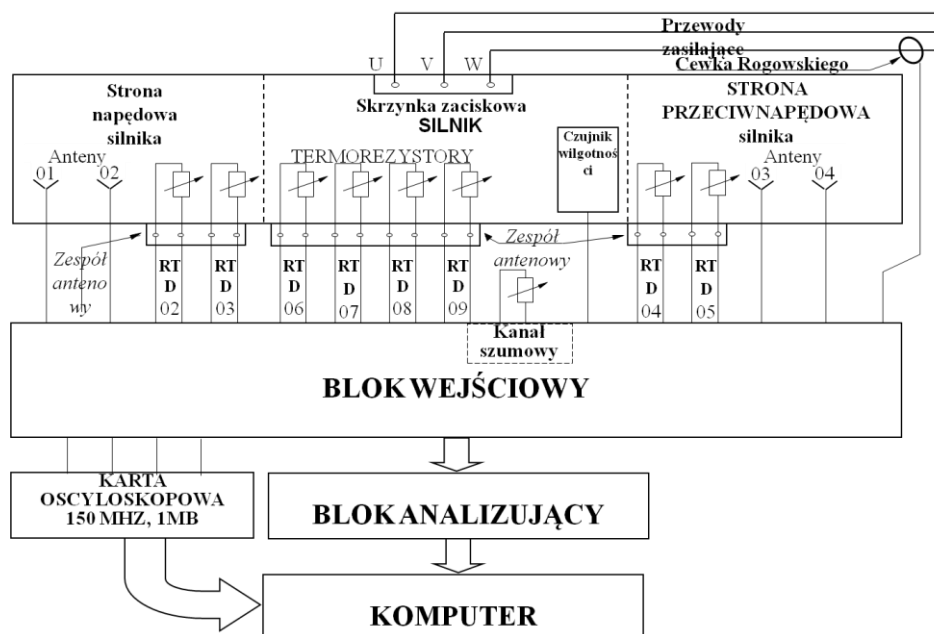
Przykładowe pomiary z wykorzystaniem czujników RTD ilustrują rysunki 5.1.8 a, b, c, d [126].

Podczas przeprowadzanych badań zestawu czujników RTD opracowano mobilny układ pomiarowy – rys. 5.1.9, którego zasadniczym elementem była cyfrowa karta oscyloskopowa DSO2904 i analizator wnz R500.



Rys. 5.1.9. Przenośny zestaw aparaturowy do pomiarów wnz silników [126]

Schemat blokowy układu przedstawia rys. 5.1.10.



Rys. 5.1.10. Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego silnika o mocy 1,4 MW z wykorzystaniem własnego przenośnego zestawu aparaturowego do pomiarów wnz silników [126]

Układ pomiarowy umożliwił wykorzystanie ośmiu czujników RTD do pomiarów wnz, czujnika wilgotności oraz tzw. „kanału szumowego” [126]. Wyniki pomiarów zapisywano w pamięci komputera.

Na podstawie przeprowadzanych badań można stwierdzić, że czujniki typu RTD, pasywne i aktywne skutecznie umożliwiają detekcję wyładowań i mogą być alternatywą dla sprzęgaczy pojemnościowych pod warunkiem, że w obiekcie mierzonym zostały zainstalowane czujniki temperatury PT100 lub anteny pętlowe.

6. Prototyp kondensatora do pomiarów wnz o pojemności 1000pF

6.1 Wykonanie prototypu kondensatora i weryfikacja parametrów

Wykonywanie pomiarów wnz metodą on-line ze względu na duże koszty aparatury pomiarowej i detektorów (szczególnie sprzęgaczy pojemnościowych) nie jest szeroko stosowane w kraju.

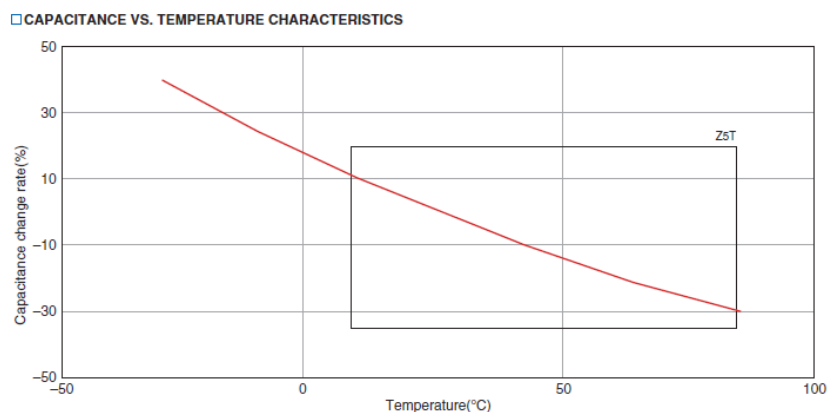
Przy współpracy z dr inż. Wojciechem Kandorą i pracownikami z EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu autor opracował czujnik pojemnościowy o pojemności 1000pF o konstrukcji różniącej się od pierwowzoru – kondensator o pojemności 300 pF (rozdz. 4). W nowej konstrukcji zastosowano połączenie dwóch kondensatorów ceramicznych, ale o pojemności 2000pF każdy serii UHV (z ang. *ultra high voltage*) (rys. 6.1.1).



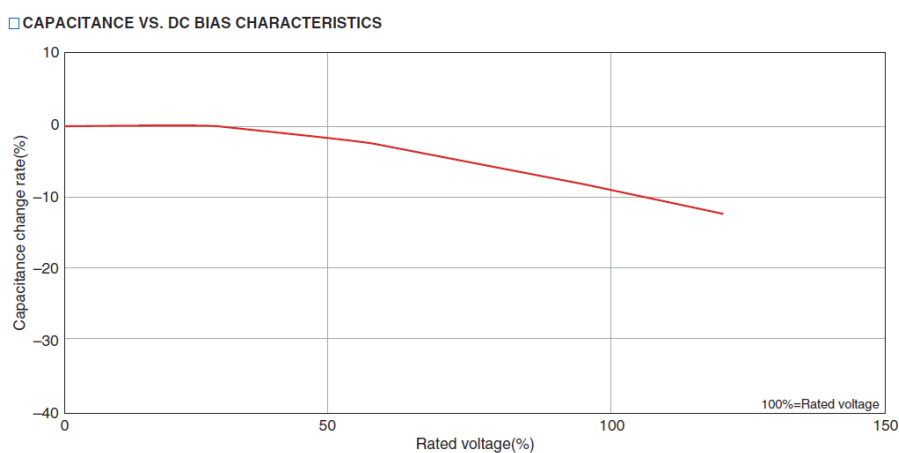
Rys. 6.1.1. Kondensator ceramiczny wielowarstwowy 2nF 40 kV $\pm 10\%$ Z5T dielektryk montaż śrubowy TDK (wg RS-Electronic)

Producent (TDK) kondensatorów zastosował dielektryk z tzw. kompozytowego tytanianu strontu, zapewniającego bardzo niskie straty. Epoksydowa obudowa zapewniła wysoką wytrzymałość na przebicie (do 40 kV). Cena nowego kondensatora jest niewielka, rzędu 200-300 zł, co w porównaniu z cenami specjalistycznych sprzęgaczy firmowych rzędu 3000 Euro, stanowi jego istotną zaletę.

Stabilność pojemności w funkcji temperatury i napięcia probierczego ilustrują rysunki 6.1.2 i 6.1.3. Kondensatory zostały połączone szeregowo, co dało wypadkową pojemność 1000 pF. Ze względu na dosyć niekorzystną charakterystykę pojemności kondensatora w funkcji napięcia (rys. 6.1.3), do pomiaru napięcia wykorzystano dzielnik napięcia składający się ze 100 kondensatorów 100pF połączonych szeregowo z kondensatorem 2nF. Został on zamontowany wokół kondensatorów głównych (rys. 6.1.4a).

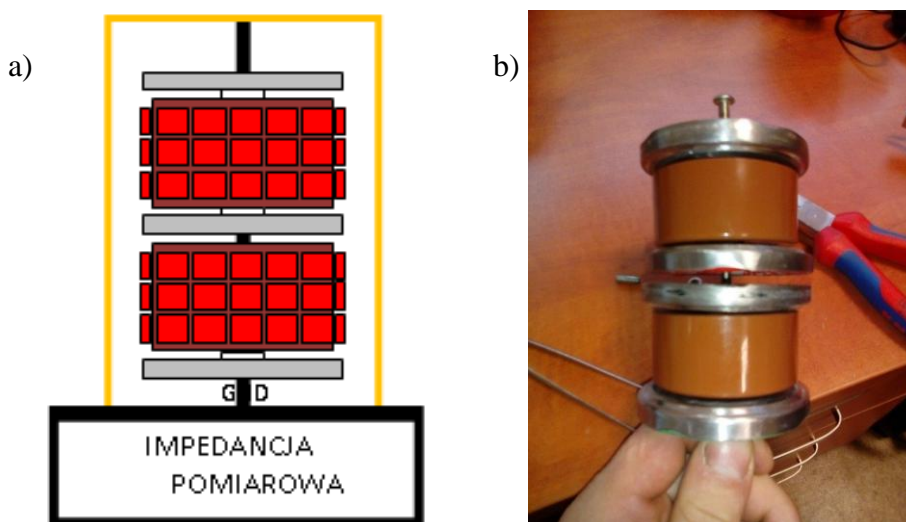


Rys. 6.1.2. Charakterystyka zależności pojemności kondensatora od temperatury [TDK Datasheet, Ultra High Voltage Ceramics Capacitors, May 2014]



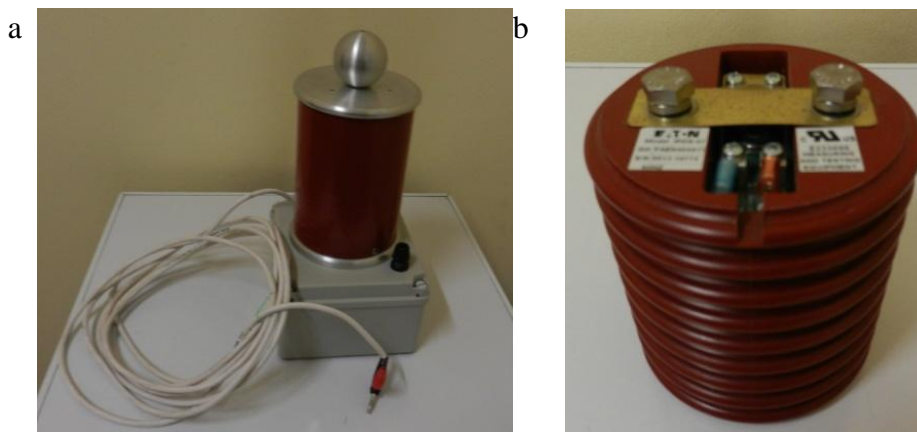
Rys. 6.1.3. Charakterystyka zależności pojemności kondensatora od napięcia [TDK Datasheet, Ultra High Voltage Ceramics Capacitors, May 2014]

W konstrukcji zastosowano również ekrany ochronne przyłączone do elektrod kondensatorów (rys. 6.1.4b).

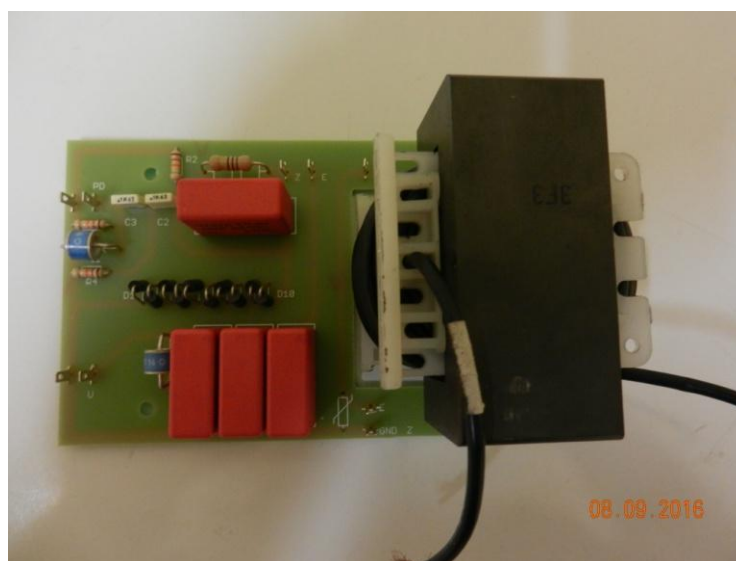


Rys. 6.1.4. a) kondensator z dzielnikiem napięcia i impedancją pomiarową w podstawie, b) połączenie szeregowe kondensatorów i montaż ekranów ochronnych do elektrod.

Całość konstrukcji została umieszczona w wydrążonym izolatorze wsporczym i zalana żywicą epoksydową. Dodatkowo w podstawie czujnika zamontowano impedancję pomiarową (rys. 6.1.6) o konstrukcji szczegółowo zaprezentowanej w rozdz. 7, eliminując w ten sposób dodatkowy element niezbędny przy pomiarach (rys. 6.1.4a). Gotowy kondensator z dzielnikiem i impedancją przedstawiono na rys. 6.1.5.



Rys. 6.1.5. Kondensator nowej konstrukcji (a) i kondensator oryginalny f-my Eaton (b)



Rys. 6.1.6. Impedancja pomiarowa dla kondensatora o pojemności 1000 pF

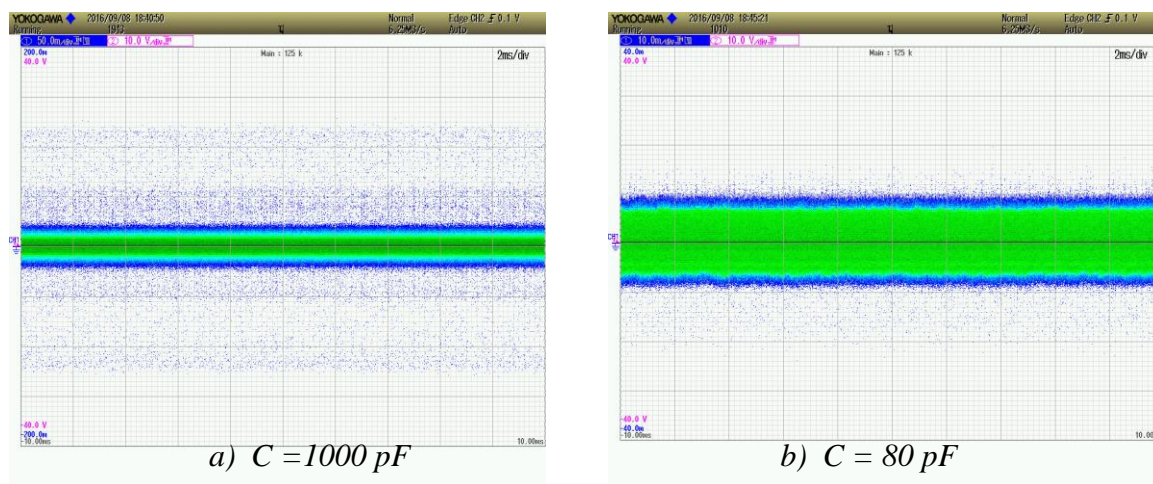
Jakość i przydatność tak skonstruowanego czujnika oceniono przez porównanie jego właściwości z kondensatorem oryginalnym firmy Eaton USA (rys. 6.1.5b) oraz kondensatorem (pierwowzorem) powstałym wcześniej o pojemności 300 pF (rys. 6.1.7).



Rys. 6.1.7. Pierwowzór kondensatora sprzęgającego powstałego w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu - o pojemności 300 pF

Przebiegi porównawcze sygnałów kalibracyjnych o wartości 2nC, 5nC i 10 nC przy użyciu trzech rodzajów czujników obrazują rys. 6.1.9, 6.1.10, 6.1.11.

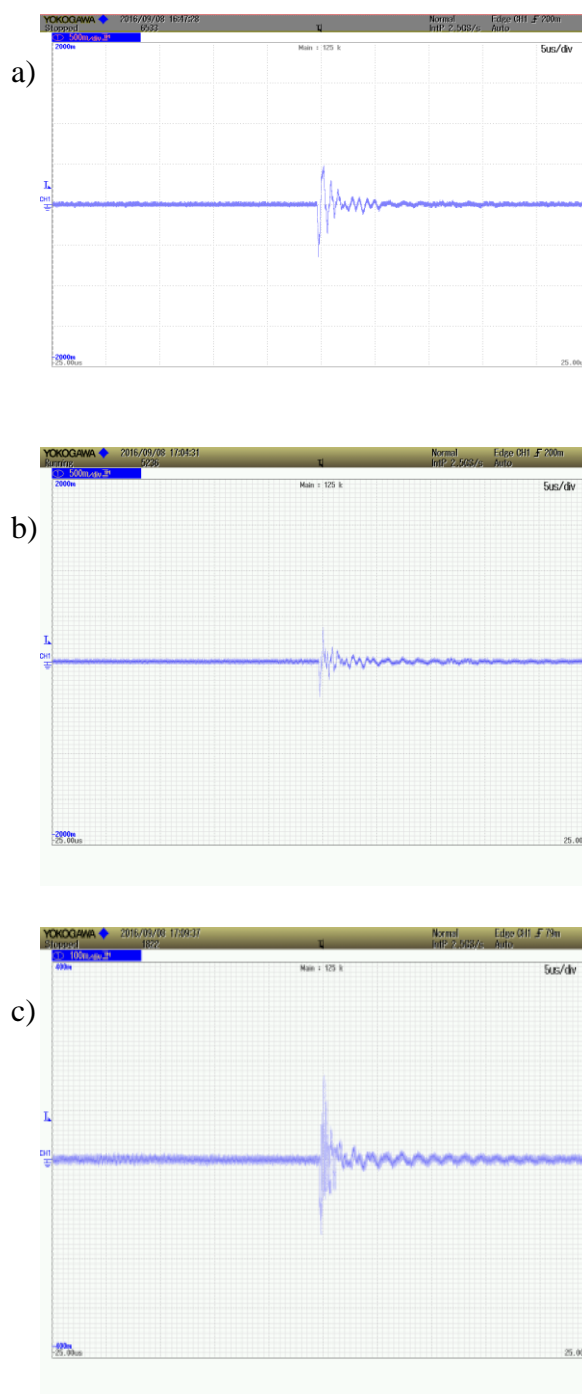
Ładunek kalibracyjny 2 nC



Rys. 6.1.9. Przebiegi sygnałów kalibracyjnych wnz 2nC dla kondensatorów: a) – kondensator nowej konstrukcji 1000pF, b) – kondensator Eaton USA 80 pF

Przebiegi z rys. 6.1.9 specjalnie zarejestrowano przy podstawie czasu uwydatniającej szumy. Z analizy przebiegów wynika, że dla nowego typu kondensatora sprzęgającego można zaobserwować znacznie korzystniejszy stosunek sygnału wnz do szumu. Dla przebiegu z rys. 6.1.9 a wynosi on ok. 36 dB a dla przebiegu z rys. 6.1.9 b tylko 11 dB.

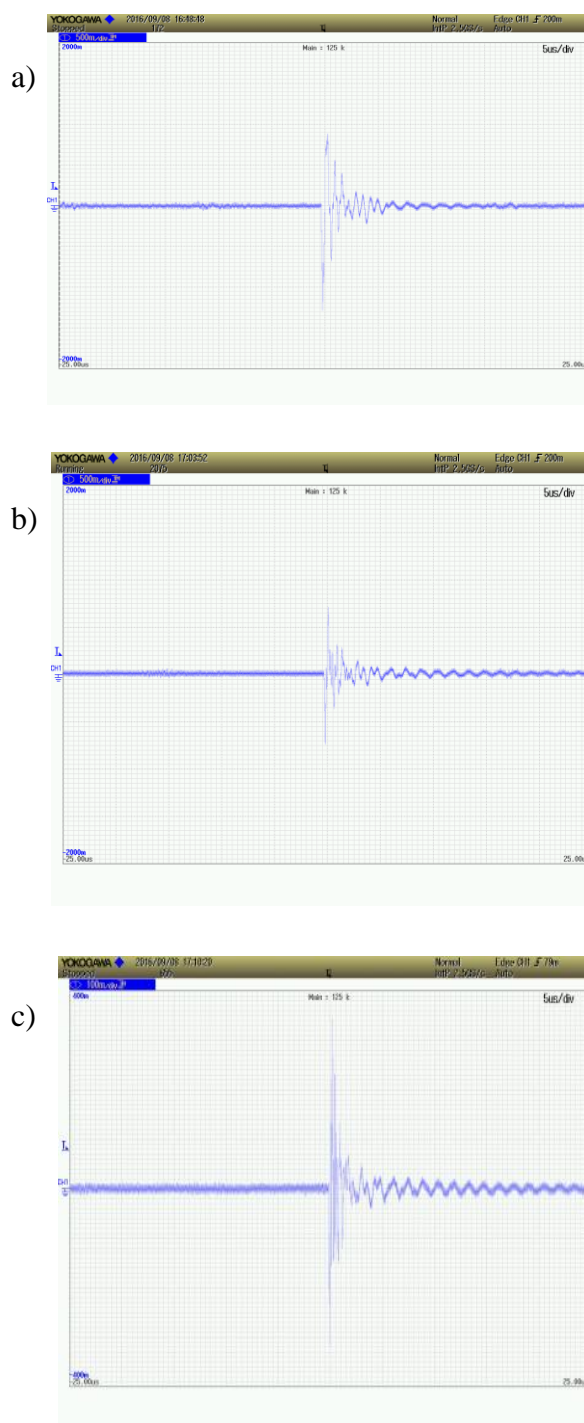
Ładunek kalibracyjny 5 nC



Rys. 6.1.10. Przebiegi sygnałów kalibracyjnych wzn 5nC dla kondensatorów: a – kondensator nowej konstrukcji 1000pF , b - kondensator pierwowzór 300pF c – kondensator Eaton USA 80pF

Porównując przebiegi z rysunku 6.1.10 można zauważyć wpływ wartości pojemności na wielkość rejestrowanego przebiegu wzn. Najbardziej skutecznym jest nowy typ kondensatora 1nF – rys. 6.1.10 a.

Ładunek kalibracyjny 10 nC



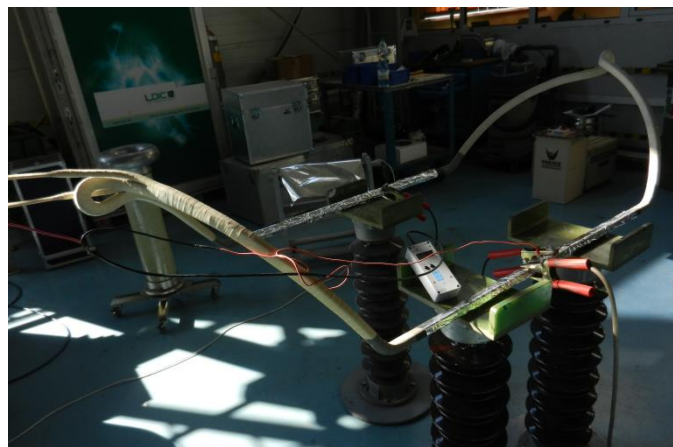
Rys. 6.1.11 Przebiegi sygnałów kalibracyjnych wnz 10nC dla kondensatorów: a – kondensator nowej konstrukcji 1000pF, b - kondensator pierwowzór 300 pF c – kondensator Eaton USA 80 pF

Kalibracja ładunkiem 10 nC jeszcze bardziej potwierdza skuteczność nowego kondensatora 1000 pF i wpływ wartości pojemności na wielkość rejestrowanego sygnału.

Przeprowadzono również testy wyładowań z użyciem nowego kondensatora i kondensatora Eaton w układzie ostrze płyta (elektroda od strony wysokiego napięcia) oraz na pręcie stojana – rys. 6.1.12, 6.1.13.



Rys. 6.1.12. Wyładowania w układzie ostrze płyta

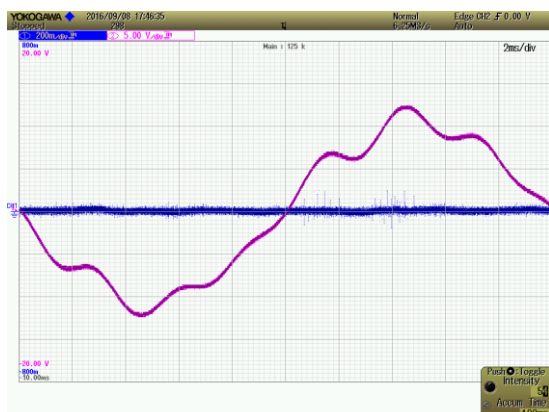


Rys. 6.1.13. Wyładowania na pręcie stojana

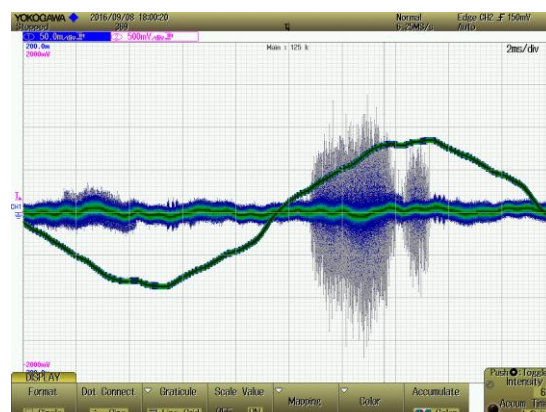
Podczas pomiarów korzystano z oprzyrządowania laboratorium wysokonapięciowego dzięki uprzejmości firmy EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu. Pomiary wykonano z użyciem mostka Sheringa 2820a Tettex oraz analizatora LDS6 PD Measurement System.

Zarejestrowane przebiegi wyładowań ilustrują rysunki 6.1.14, 6.1.15.

kondensator nowej konstrukcji

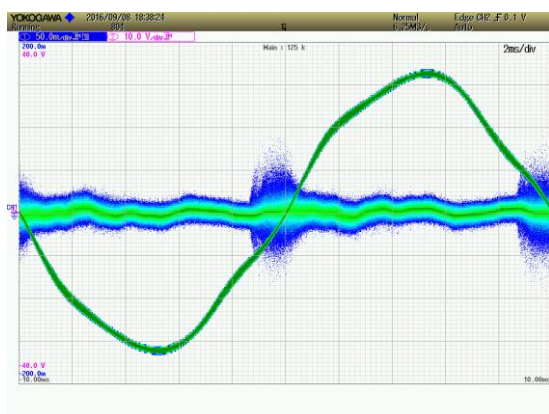


kondensator Eaton

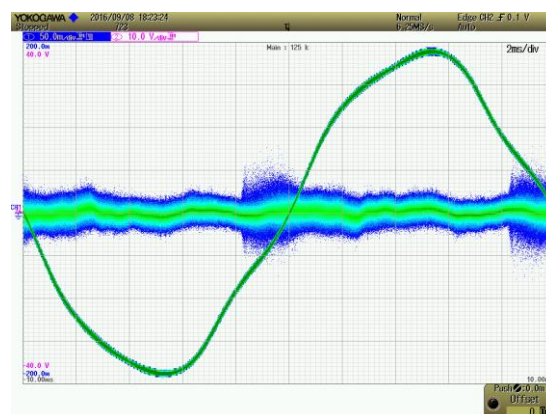


Rys. 6.1.14 Wyladowania ostrze plyta elektroda od strony wysokiego napiecia

kondensator nowej konstrukcji



kondensator Eaton



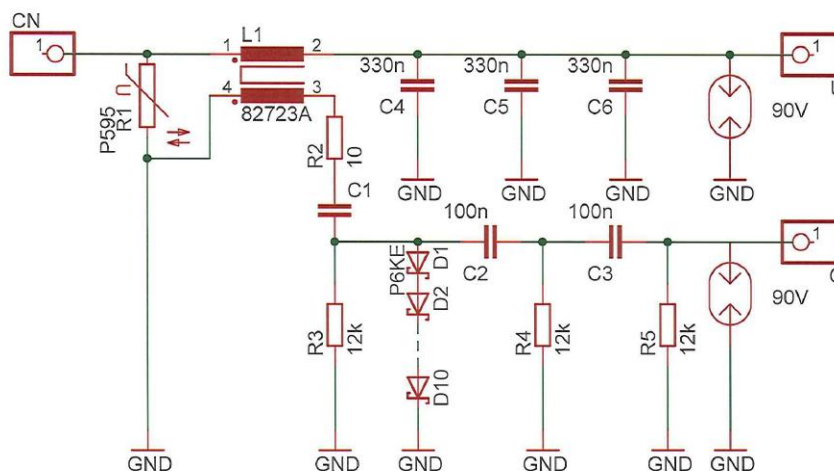
Rys. 6.1.15. Wyladowania na pręcie stojana

Badania nowej konstrukcji kondensatora dowiodły jednoznacznie, że lepszą skuteczność pomiaru wnz uzyskuje się przy jego większej pojemności. Dodatkową zaletą jest dobry stosunek sygnał szum, co wynika między innymi z braku długich połączeń między kondensatorem a impedancją pomiarową (impedancja znajduje się w podstawie konstrukcji czujnika) oraz ekranowania szeregowo połączonych kondensatorów od siebie. Moduł czujnika umożliwia również bezpieczny pomiar wysokiego napięcia, gdyż zawiera dzielnik napięcia. Moduł czujnika pojemnościowego nowej konstrukcji spełnia założenia projektowe i sprawdza się podczas rutynowych pomiarów.

7. Impedancja pomiarowa

7.1 Charakterystyka impedancji pomiarowej, wykonanie prototypu do badań

Na kształt impulsu prądowego wyładowania mogą wpływać elementy układu pomiarowego. Idealem byłoby odtworzenie kształtu impulsu czasowego, co pozwoliłoby zidentyfikować przebieg fizyczny procesu wyładowania i określić prawdopodobną wadę lub uszkodzenie izolacji w obiekcie. W rzeczywistości przebieg jest odkształcony i przy pomiarach rutynowych wartości impulsów prądowych są zwykle całkowane. Oceny wyładowań dokonuje się na podstawie ładunków pozornych. Dlatego w procesie pomiarowym bardzo istotny jest właściwy dobór impedancji pomiarowej, która w sposób istotny ma wpływ na rozdzielczość amplitudową i czasową całego pomiaru [30,31].



Rys.7.1.1. Schemat ideowy prototypowej impedancji pomiarowej wykonanej dla EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu

Dla EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu autor przy współpracy z dr inż. Wojciechem Kandorą opracował impedancje pomiarową, której schemat przedstawiono na rys. 7.1.1.

Pasmo przenoszenia impedancji, którą przedstawia schemat, jest zgodne z wymaganiami normy IEC60270, która proponuje, aby mieściło się ono poniżej 20dB wartości maksymalnej pasma pomiarowego.

Wejście układu jest dopasowane do pojemności sprzęgającej 1nF i napięcia $U=60kV$. Urządzenie posiada wbudowany filtr środkowoprzepustowy (20dB – C1-C3, R2-R5) i zabezpieczenia przeciwprzebieżowe (D1-D10, iskrownik 90V) oraz obwód pomiaru wysokiego napięcia ($U_{wyj}=50V_{rms}$).

Rys. 7.1.2 przedstawia wykonaną impedancję pomiarową. Sygnał wnz wyprowadzono z gniazda typu BNC (PD), podobnie jak sygnał mierzonego napięcia (U). Do podłączenia kondensatora służą zaciski bananowe o oznaczeniach C_N i GND jak na rysunku.



Rys. 7.1.2. Moduł wykonanej przez autora impedancji pomiarowej

Moduł impedancji nie ustępuje firmowym fabrycznym impedancjom, które na co dzień używane są w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu, a które autor miał okazję testować podczas ich serwisowania.

8. Kalibrator wyładowań niezupełnych, skalowanie kalibratorów i torów pomiarowych

Podczas pomiarów wyładowań niezupełnych istotną wielkością jest wartość ładunku pozornego q impulsów prądowych wyładowań. Zastosowany do pomiarów układ, w zależności od wyboru czujnika sprzęgającego (kondensator, antena), pozwala zmierzyć tylko określoną część ładunku pozornego. Dlatego bardzo ważnym elementem pomiaru wyładowań niezupełnych jest wyskalowanie toru pomiarowego.



Rys. 8.1. Przykład kalibracji torów pomiarowych w nowo zbudowanym silniku o mocy 1,4 MW [126]

W celu zminimalizowania błędów pomiarowych, kalibrację należy przeprowadzać dla każdego toru pomiarowego i to wielokrotnie przy każdej zmianie warunków pomiaru (rys.8.1) [126].

Do tego celu służy kalibrator wyładowań niezupełnych czyli generator krótkich impulsów, o dokładnej wartości ładunku wzorcowego q_w , podawanego do układu pomiarowego. Przyrząd pomiarowy, który mierzy ładunek pozorny może dzięki temu zostać prawidłowo wyskalowany z uwzględnieniem całego toru pomiarowego. Kalibratory wyładowań niezupełnych uzupełniają zwykle właściwy analizator. Są urządzeniami mobilnymi, zasilanymi z baterii R6 lub 6F22.

Podstawowe założenia dotyczące kalibratorów wg normy IEC-60270 są następujące:

Kalibrator powinien umożliwić wygenerowanie impulsu ładunkowego unipolarnego lub bipolarnego. W spotykanych kalibratorach stosuje się najczęściej dwa impulsy na okres napięcia probierczego (100 do 120 impulsów na sekundę). Wartość ładunku przenoszonego przez impuls można określić rejestrując na oscyloskopie impuls prądowy na rezystorze (zwykle 50 Ω).

Całkując w czasie wartość prądu otrzymujemy wartość ładunku [31]:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt = \frac{1}{R_0} \int_{t_1}^{t_2} U(t)dt \quad (8.1)$$

gdzie:

R_0 - rezystancja obciążenia R

$I(t)$ - impuls prądu

$U(t)$ - napięcie na rezystorze

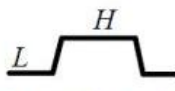
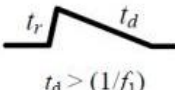
Można też zastosować układ całkujący i zmierzyć ładunek bezpośrednio. Idealnym jednak przyrządem do tego celu wydaje się oscyloskop z modułem całkowania. Zastosowanie oscyloskopu upraszcza znacznie wzorcowanie kalibratora i daje wynik wprost. Autor wykorzystywał do tego celu między innymi:

oscyloskop YOKOGAWA typ DLM2034 300 MHz

oscyloskop LECROY Wavesurfer 3054 500MHz.

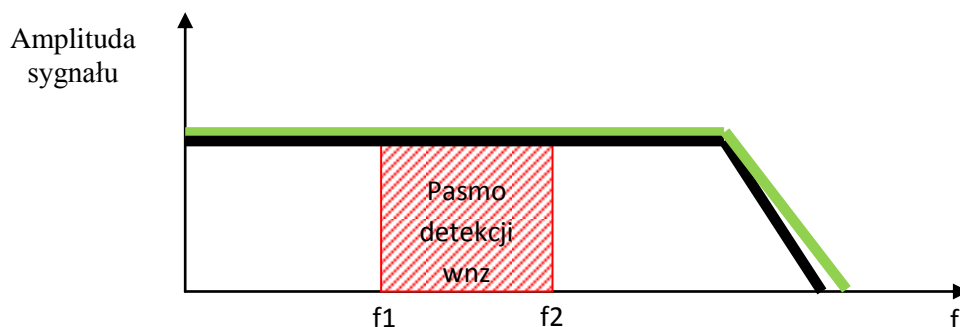
oscyloskop Hantek DSO 1200 200 MHz

Tab. 8.1. Wymagania dla impulsów skalujących wg normy IEC-60270 [48]:

Parametr	Wartość	Komentarz
czas narastania t_r	$t_r \leq 60 \text{ ns}$ dla $f_2 < 500 \text{ kHz}$ $t_r \leq \frac{0,03}{f_2}$ dla $f_2 > 500 \text{ kHz}$	f_2 - górna częstotliwość graniczna układu detekcji
kształt impulsu napięciowego	 poziom H nie może się zmienić więcej niż o 5%	na wyjściu kalibratora impulsy dwóch biegunowości
	 $t_d > (1/f_1)$	1) na wyjściu kalibratora impulsy jednej biegunowości 2) f_1 - dolna częstotliwość graniczna układu detekcji

Widmo wyładowań impulsów kalibrujących powinno być porównywalne z widmem wyładowań niepełnych (rys. 8.2). Impulsy wyładowań niepełnych charakteryzują się szerokim pasmem generacji, co umożliwia detekcję przy zastosowaniu układów pasmowo-przepustowych. Jest to klasyczna metoda pomiaru wnz, na której opiera się norma IEC-60270.

Zaleca ona stosowanie obwodu detekcyjnego o górnej częstotliwości granicznej f_2 wielokrotnie niższej od częstotliwości granicznej widma wyładowań (500 kHz) [48].



Rys. 8.2. Widma wyładowań niepełnych (I) i impulsów kalibrujących (II) względem pasma

Norma dotyczy zatem pomiarów w niskich zakresach częstotliwości. Przy wyższych częstotliwościach z zakresu VHF czy UHF, które są najbardziej interesujące z punktu widzenia maszyn wirujących, gdzie mamy do czynienia z czasami trwania impulsów wnz rzędu nanosekund, jedynym możliwym sposobem pomiaru jest wykorzystanie sond kondensatorowych i antenowych. Prawidłowe określenie ładunku pozornego jest już niestety utrudnione. Pomiar w tym zakresie nie zostały jeszcze określone w normach.

Na rys. 8.3 przedstawiono dwa typy kalibratorów produkowane przez Doble Lemke GmbH.



Rys. 8.3. Przykładowe kalibratory oferowane przez firmę Doble Lemke GmbH
Zschoner Ring 9, 01723 Kesselsdorf / Dresden Germany [107]

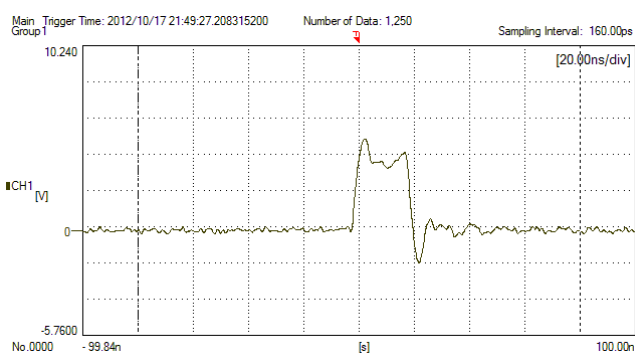
Dla celów badawczych z zakładu EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu wypożyczono oryginalny kalibrator firmy LDIC LDC-5/S6 (Rys. 8.4)



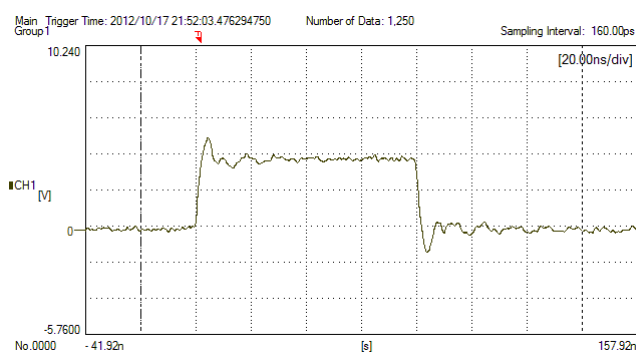
Rys. 8.4. Kalibrator LDC-5/S6

Kalibrator LDC-5/S6 dostarcza na siedmiu wyjściach impulsy prądowe o ładunkach od 200 pC do 20000 pC. Jest zasilany z dwóch baterii R6.

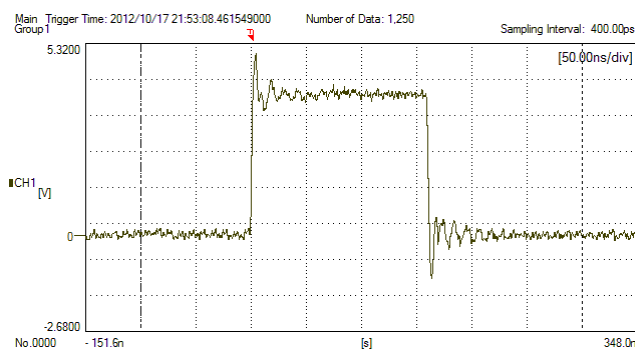
Zmierzono poziom i zarejestrowano kształty impulsów wzorcowych na obciążeniu 50Ω (w.cz.) dla ładunków 1000 pC, 5000 pC, 10 000 pC (Rys. 8.5 a, b, c).



Rys. 8.5. a) 1000 pC

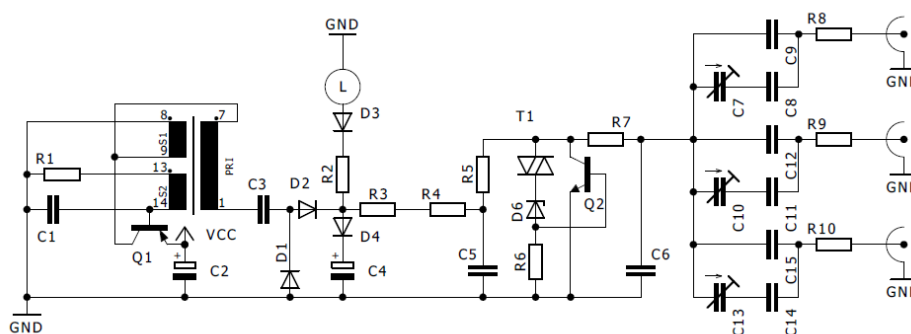


Rys. 8.5. b) 5000 pC



Rys. 8.5. c) 10000 pC

Jak wynika z pomiarów, kalibrator dostarcza impulsy o różnym czasie trwania i różnej amplitudzie, w zależności od wartości wymaganego ładunku. Większość urządzeń tego typu działa na podobnej zasadzie. Wynika to z konstrukcji i sposobu wytwarzania krótkich impulsów, polegającego na wykorzystaniu diaka jako elementu wyzwalającego tranzystor zasilany napięciem rzędu 350 V oraz zastosowanych elementów RC . Schemat ideowy kalibratora przedstawiono na rys. 8.6. W większości kalibratorów spotykanych na rynku zasada działania i schemat nie odbiegają od siebie. Różnią się tylko sposobem wyprowadzenia impulsów wyjściowych – jedno gniazdo wyjściowe i przełącznik zakresów lub n (2,3,4,5,6,7) gniazd wyjściowych o różnych wartościach ładunku wzorcowego q_w .



Rys. 8.6. Standardowy schemat ideowy popularnych kalibratorów

Napięcia o wartości 350 V dostarcza zazwyczaj przetwornica (zbudowana na bazie generatora samodławnego), z której ładowany jest kondensator elektrolityczny $C4$. Impulsy z tranzystora wyjściowego $Q2$ podawane są przez integrator $R7$, $C6$ i szeregowo-równoległe kondensatory wyjściowe o znanych wartościach do testowanego układu. Trymery $C7$, $C10$, $C13$ pozwalają na precyzyjne wyskalowanie impulsów wyjściowych. Autor wielokrotnie współpracował z EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu przy wzorcowaniu tego typu kalibratorów wykorzystując do rejestracji impulsów oscyloskop YOKOGAWA typ DLM2034,

nr fabr. 91L641753 prod. japońskiej i rezystor pomiarowy 50Ω prod. Meratronik. Oscyloskop oblicza wartość scałkowaną przebiegu, którą należy przeliczyć na wartość ładunku znając wartość pojemności wyjściowej w układzie wg zależności 8.1.

Dla Ethos Energy autor wykonał również kalibrator zbudowany i zaprojektowany w sposób tradycyjny (rys. 8.6) – fotografia – rys. 8.7.



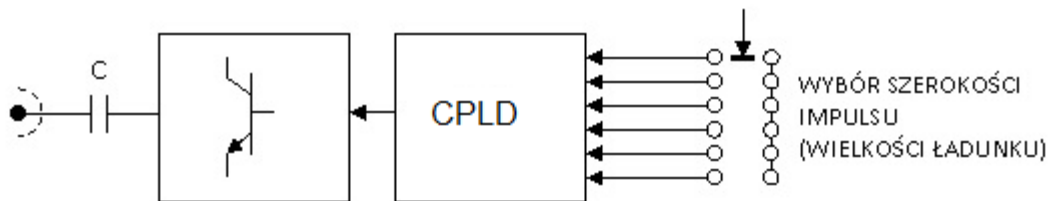
Rys. 8.7. Kalibrator 5 nC, 10 nC, 20 nC

Do badań związanych z prototypem mobilnego analizatora wnz, w oparciu o doświadczenia związane ze wzorcowaniem kalibratorów LDC, zaprojektowano i wykonano nowy kalibrator wnz [92]. Przy jego konstruowaniu sprawdzono inne możliwości uzyskania wysokiego napięcia rzędu 200 do 350 V niż w tradycyjnych układach, między innymi układy przetwornic typu *step up*. Do prób wykorzystano scalone układy przetwornic i różnych sterowników typu PWM. Mimo osiągnięcia dobrych wyników jeśli chodzi o czas ładowania kondensatora i wartość napięcia, zrezygnowano z tych rozwiązań, ze względu na większy pobór prądu ze źródła zasilania i nadmierne rozbudowanie układów. Ponadto stopień miniaturyzacji niektórych elementów, jak np. scalony układ tzw. „*charger*”, (stosowany w aparatach cyfrowych) nastęrczał trudności przy montażu.

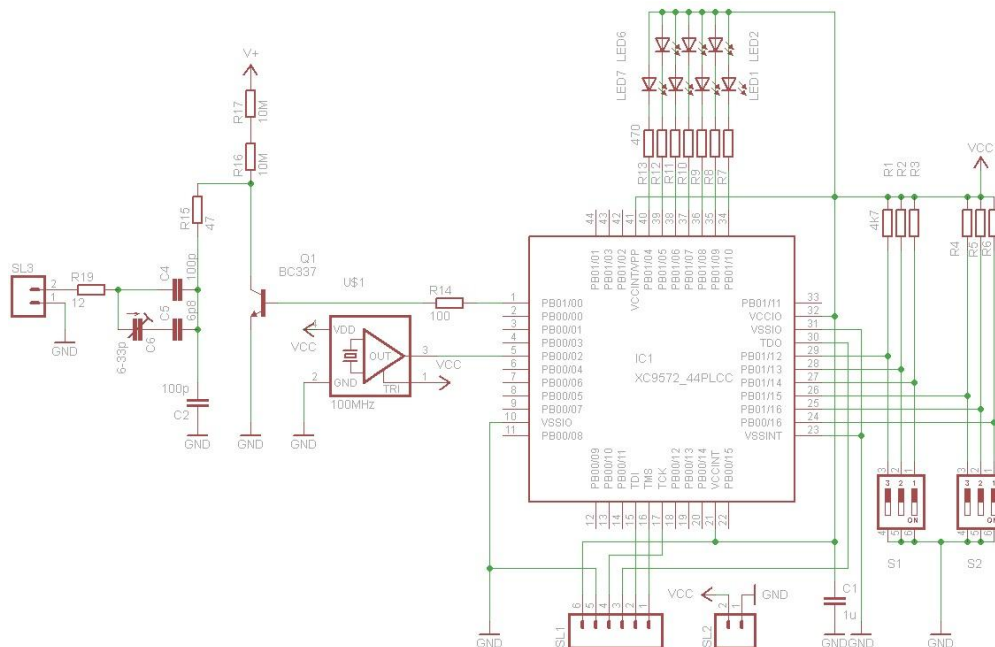
W prototypowej konstrukcji urządzenia wykorzystano zatem sprawdzony i oszczędny energetycznie układ generatora samodławnego do ładowania kondensatora. Zastosowano jednak zupełnie nowy sposób wytwarzania impulsów ładunkowych [91]. Do tego celu wykorzystano generator krótkich impulsów nanosekundowych, który zbudowano na bazie układu FPGA (**Field Programmable Gate Array**) XC9572 (Xilinx). XC9572 zawiera 72 programowalne komórki, może pracować przy częstotliwości do 125 MHz i działa już przy napięciu zasilania 3,3 V. Może być zatem zasilany z baterii akumulatorów, gdyż takie przyjęto założenie przy projektowaniu.

Macierz zaprogramowano w taki sposób, żeby uzyskać na wyjściu impulsy o różnym czasie trwania (15, 20, 25, 30, 40 ns) z możliwością wyboru za pomocą przełącznika. O wartości ładunku elektrycznego decyduje w tym przypadku przede wszystkim szerokość impulsu. Upraszcza to znacznie konstrukcję układu i kalibrację. Impulsy z FPGA sterują tranzystorem a następnie z kolektora Q_1 przez kondensatory C_4, C_5, C_6 i rezystor R_{19} podawane są na gniazdo BNC i stanowią sygnał wyjściowy urządzenia. Tranzystor Q_1 na schemacie w pierwszej fazie prób spełniał swoje zadanie jedynie przy impulsach o większej szerokości (pasmo do 100 MHz). Do uzyskania impulsów rzędu 15 i 20 ns konieczne stało się zastosowanie tranzystora impulsowego typu 2N2369 o paśmie 500 MHz.

Rysunek 8.8 przedstawia schemat poglądowy kalibratora, rysunek 8.9 schemat ideowy.



Rys. 8.8. Schemat poglądowy kalibratora



Rys. 8.9. Schemat ideowy kalibratora

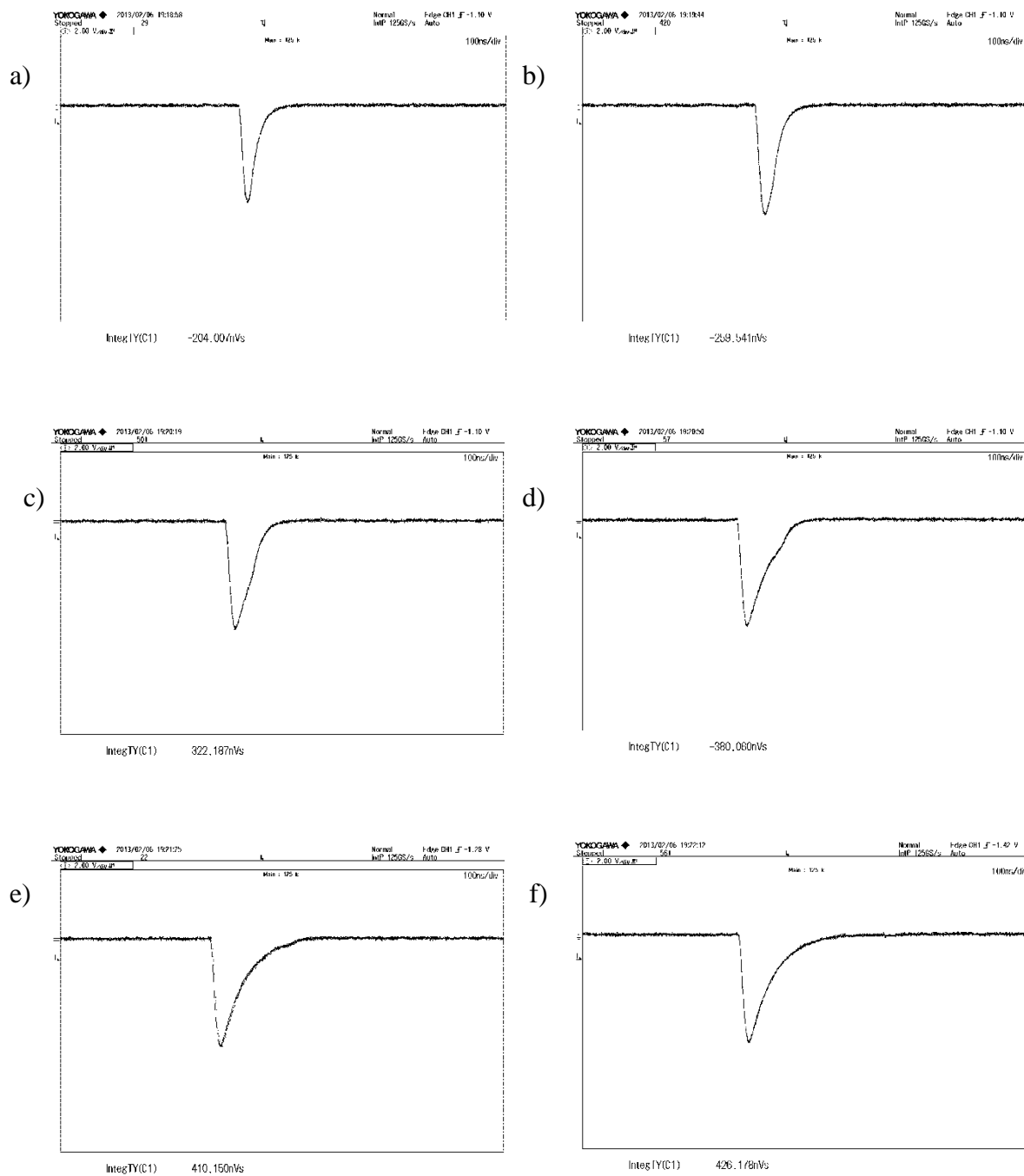
Przełączniki *S1* i *S2* na schemacie służą do wyboru szerokości impulsu wyjściowego. Złącze *SL1* umożliwia programowanie układu xilinx, *SL3* – wyjście urządzenia wyprowadzone za pomocą złącza BNC 50 ohm. Diody *LED1* do *LED6* sygnalizują pracę układu i wybraną szerokość impulsu a co za tym idzie wartość ładunku. Układ xilinx jest taktowany z generatora kwarcowego 100 MHz. Dla układu XC9572 zaprojektowano płytę drukowaną generatora przystosowaną do pracy przy wysokich częstotliwościach. Zdjęcie wykonanego modułu i gotowego prototypu kalibratora przedstawiają fotografie na rysunkach 8.10 i 8.11.



Rys. 8.10. Płytką generatora 100 MHz



Rys. 8.11. Prototyp kalibratora wnz



Rys. 8.12. Uzyskane na wyjściu impulsy kalibrujące na obciążeniu 50Ω

Kalibrator posiada przetwornicę z generatorem samodławnym, zapewniającą uzyskanie napięcia rzędu 300V ($V+$ na rys. 8.9). Pozostała część urządzenia jest zasilana z czterech akumulatorów typu R6 połączonych szeregowo co daje napięcie (V_{cc} na rys. 8.9) 4,8 V. Prototyp został również wyposażony w automatyczną ładowarkę akumulatorów co zwiększa jego niezawodność zasilania [91,92].

Zbudowany prototyp kalibratora do mobilnego analizatora wyładowań niezupełnych spełnia przyjęte założenia projektowe oraz wymagania normy IEC-60270. Otrzymane w urządzeniu impulsy kalibrujące (rys. 8.12) charakteryzują się zboczami narastającymi o czasie trwania <10 ns. Amplitudy impulsów są stałe. Zmienia się tylko czas ich trwania czyli wartość ładunku. Upraszcza to sposób wyznaczania wartości ładunku (w prototypie-przełącznik) i eliminuje konieczność stosowania wielu gniazd wyjściowych. Zastosowanie w kalibratorze generatora impulsów zbudowanego na bazie układu programowalnego CPLD również znacznie rozszerza możliwości urządzenia pod względem przystosowania do różnych obiektów pomiarowych (możliwość przeprogramowania układu CPLD).

Jak wynika z uzyskanych oscylogramów polaryzacja impulsów jest ujemna. Taki system przyjęto w większości produkowanych kalibratorów. Wynika to przede wszystkim z uproszczenia konstrukcji i nie ma znaczenia dla funkcjonalności urządzenia.

9. Analizatory wnz w przemyśle

Pomiary wnz w trybie on-line prowadzone regularnie mogą przyczynić się do wykrycia nowego uszkodzenia izolacji lub pogorszenia się już istniejącego. Obecnie na świecie stosuje się porównywanie wyników pomiarów przeprowadzanych w różnym czasie i różnych warunkach. Powstała w ten sposób baza danych dostarcza szeregu cennych informacji i wskazówek dla osób zajmujących się diagnostyką izolacji [156,147,148].

Największą wadą pomiarów on-line jest podatność na zakłócenia.

Większość obecnie produkowanych urządzeń, np. PDA [1] dokonuje pomiaru różnicowego impulsów i rozdzielania w czasie dzięki czemu możliwe jest odseparowanie impulsów zakłócających.

Pomiar wyładowań niezupełnych metodami tradycyjnymi, w przypadku podejrzeń co do jakości izolacji, polega na tym, że badane urządzenie wyłącza się z eksploatacji. Badania przeprowadza się zatem tzw. metodą off-line. W wielu przypadkach jest to jednak niemożliwe. Dlatego wskazany jest monitoring wnz w trybie on-line, co umożliwi wczesną profilaktykę i może zapobiec awarii.

Spośród firm specjalizujących się w profesjonalnych analizatorach i przyrządach do wykrywania wnz, główną rolę wiodą między innymi: Eaton Cutler-Hammer (InsuldGard), Vibrocenter, Tettex. Najbardziej znane urządzenia do pomiarów „off-line” to: Heaflyely Trench – Tettex TE 571, Teas 570, Hipotronix - DDX 7000, Adwel Corona Probe.



Rys. 9.1. Badania wyładowań niezupełnych izolacji uzwojeń stojana turbogeneratora o mocy 300 MW, TEAS 570 firmy Haefely, w elektrowni Moneypoint w Irlandii [157]



Rys. 9.2. Urządzenie firmy Hipotronicz - DDX 7000 [158]

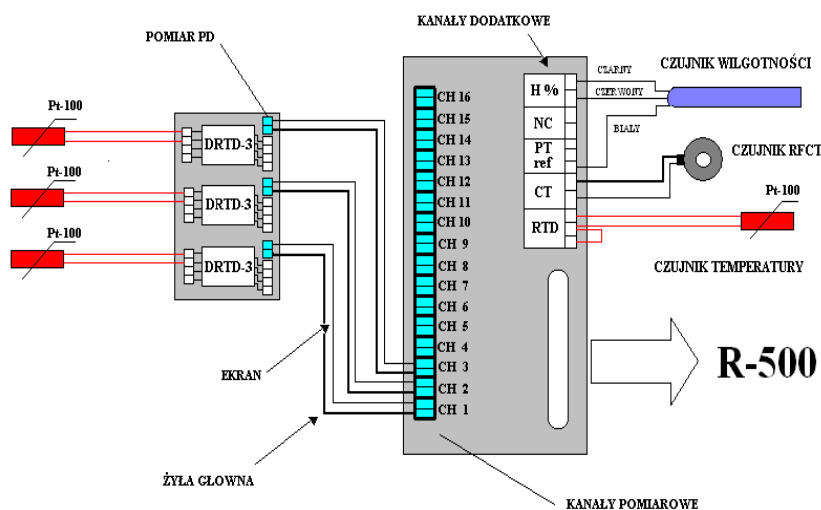
Autor korzystał podczas pomiarów z zestawu pomiarowego R-500 oraz R-2200 firmy Vibrocenter. R500 to system pomiarowy wnz przeznaczony do monitoringu stanu izolacji maszyn elektrycznych w trybie on-line. Jest wyposażony w szereg alarmów, dzięki którym może informować o przekroczeniu parametrów wnz a w szczególności ich intensywności.

R500 może rejestrować dane z 15 czujników pomiarowych. Posiada również możliwość indywidualnego strojenia czułości na każdym z kanałów, co pozwala na współpracę z różnymi detektorami wnz. Autor uczestniczył w przystosowaniu systemu z analizatorem R500 do pomiarów w Cementowni ODRA. Tabela 9.1 zawiera podstawowe dane przyrządu R500 [158].

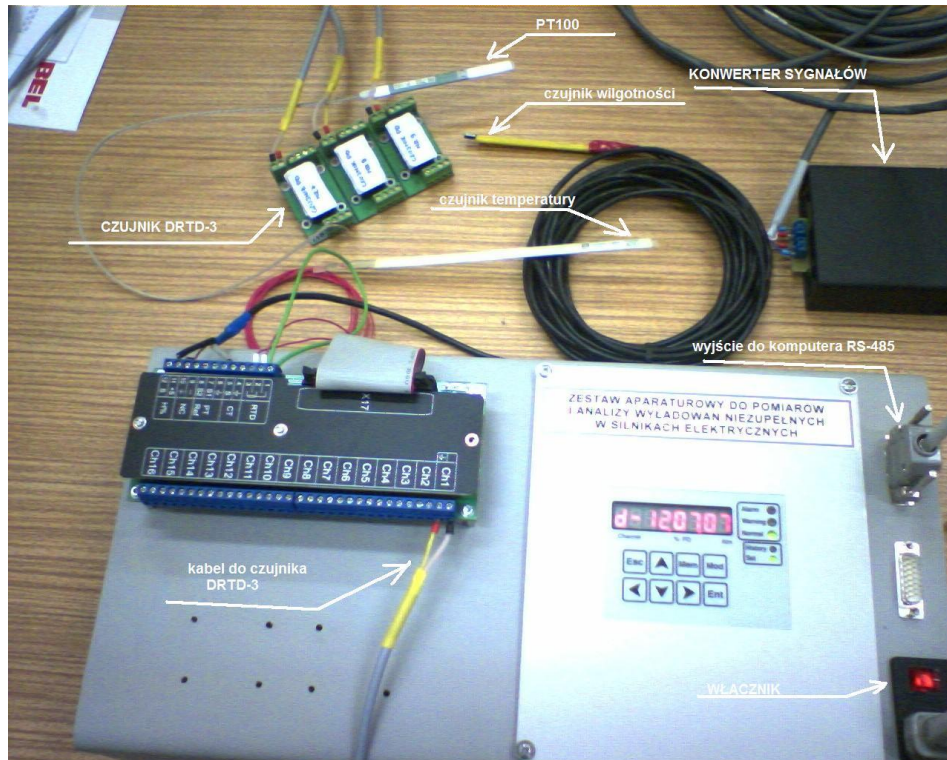
Tabela 9.1. Parametry przyrządu R500 [158]

Wymiary przyrządu	210 x 180 x 80 mm
Napięcie zasilania	120 / 230 V AC \pm 10% (50 / 60 Hz)
Pobór mocy	10 W
Temperatura pracy	- 45°C do +85°C
Poziom wilgotności	15% - 90%
Izolowane kanały pomiarowe	15
Izolowany kanał szumu	1
Dodatkowe wejście czujnika temperatury (rezystancja czujnika 10, 100, 1000 Ω)	1
Dodatkowe wejścia analogowe – napięcie, prąd i wilgotność	3
Przełączone przekaźniki stanu awaryjnego i alarmowego	2 230V, 10A
Przełączony przekaźnik stanu urządzenia	1 230V, 10A
Optycznie izolowany interfejs 4 -20mA, sygnalizujący intensywność wnz lub amplitudę w % od ustawionego progu awaryjnego	1 mA na 10% ustawionej wartości

Optycznie izolowany interfejs RS – 485 zgodny z protokołem ModBus	1
Pamięć wewnętrzna (pozwala przechowywać dane za okres 2000 dni)	2 MB
Wyświetlacz	8 – cyfrowy
Klawiatura	4 klawisza ze strzałkami i 4 klawisze funkcyjne
Diody świecące (wskazujące stan normalny, ostrzegawczy i awaryjny oraz określające stan przekaźników i stan pracy urządzenia)	5 diod
Ustawianie parametrów pracy przyrządu	Z klawiatury i PC
Zastosowanie	Urządzenia średniego i wysokiego napięcia (maszyny elektryczne, wyłączniki, kable, szyna przewody)
Obliczane parametry dla każdego kanału	Intensywność wyładowań (PDI), maksymalna amplituda impulsu (Q_{02}), liczba impulsów w 1s (pps)
Parametry oceny stanu awaryjnego	PDI, Q_{02} , trend
Zapis danych	Pełny / Skrócony
Podstawowy rodzaj danych	Macierz rozłożenia impulsów
Dynamiczny poziom kanału wyładowań niepełnych	68 dB
Ilość działek amplitudy (3.23 dB / działkę)	21
Ilość działek fazy (15° / działkę)	24
Częstotliwość napięcia zasilającego badanego obiektu	25 – 120 Hz
Maksymalna mierzona szybkość powtórzenia sygnału	367,300 pps przy 60 Hz 306,000 pps przy 50 Hz
Samodzielne testowanie	Przy włączeniu i przed każdym pomiarem
Maksymalna długość przewodu koaksjalnego	Do 50m



Rys. 9.3. Przykładowy schemat poglądowy podłączenia elementów do systemu R500 [158]



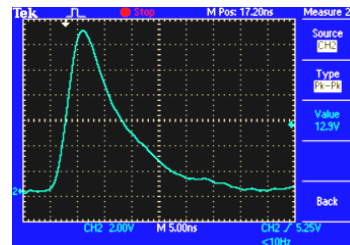
Rys. 9.4. Widok systemu pomiarowego wraz z podłączonymi elementami R500 [158]

Rysunek 9.3 przedstawia schemat poglądowy podłączenia elementów pomiarowych (detektorów) w systemie R500, a na rysunku 9.4 pokazano podłączone do układu rzeczywiste elementy. Urządzenie R500 wyposażone jest również we własny kalibrator wnz (rys. 9.5).

a)

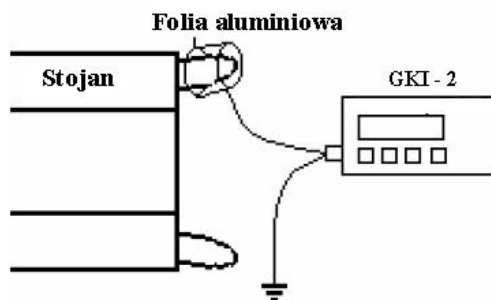


b)

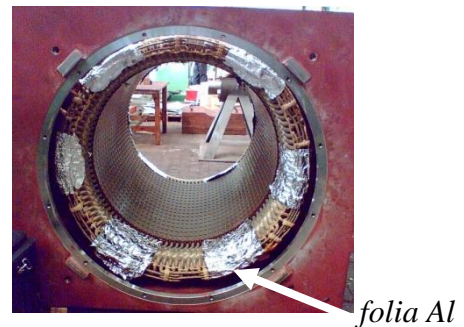


Rys. 9.5. a) Kalibrator wnz GKI-2 zestawu R500, b) Impuls generowany przez kalibrator

a)

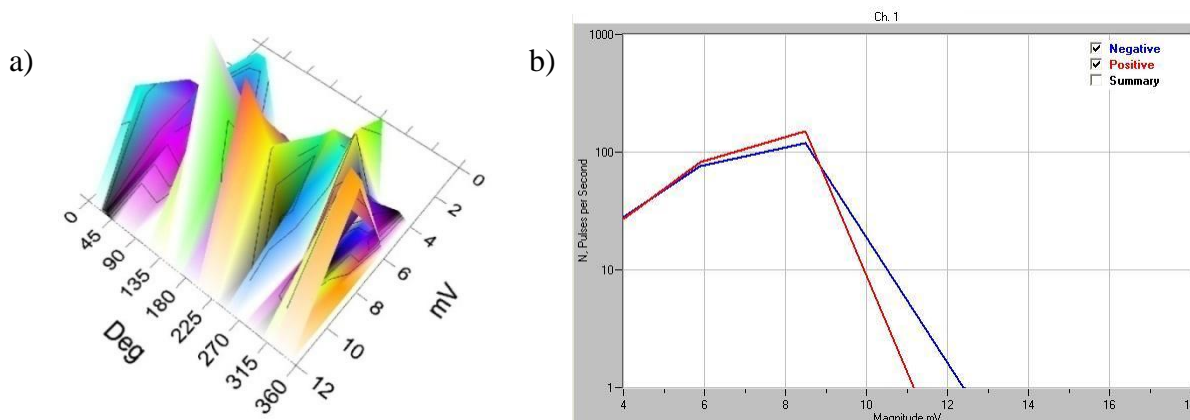


b)

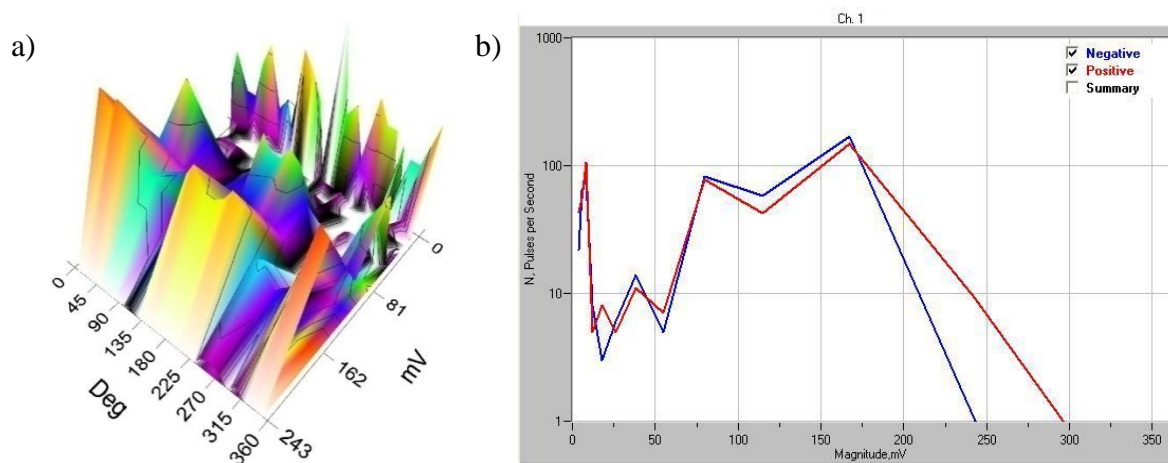


Rys. 9.6. a) Sposób kalibracji toru pomiarowego, b) Kalibracja toru na stojanie silnika

Rysunek 9.6 przedstawia impuls generowany przez kalibrator GKI-2 a na rysunku 9.6 a przedstawiono sposób wykonywania kalibracji toru pomiarowego. Rys. 9.6 b ilustruje przykładowe nawinięcie folii podczas pomiarów kalibracyjnych na stojanie silnika 1,4MW. Przykładowe wyniki pomiarów dla dwóch silników ilustrują rysunki 9.7 i 9.8.



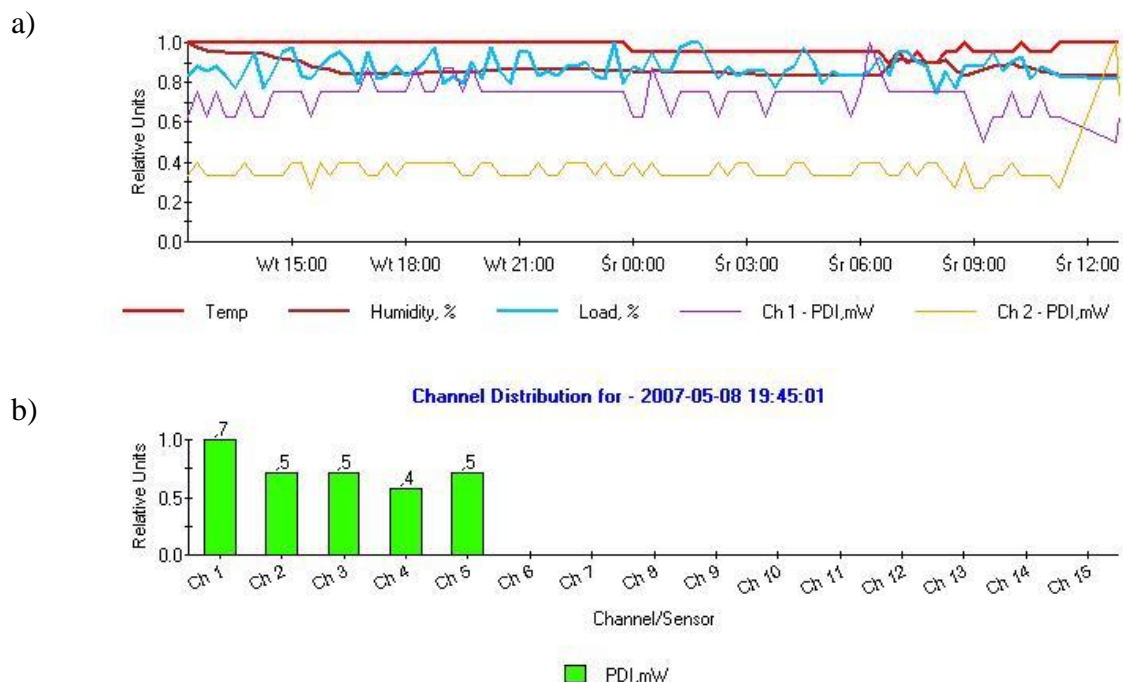
Rys. 9.7. Silnik 1: a) wykres fazowy 3D, b) wykres częstości impulsów N w funkcji amplitudy wyładowań [108]



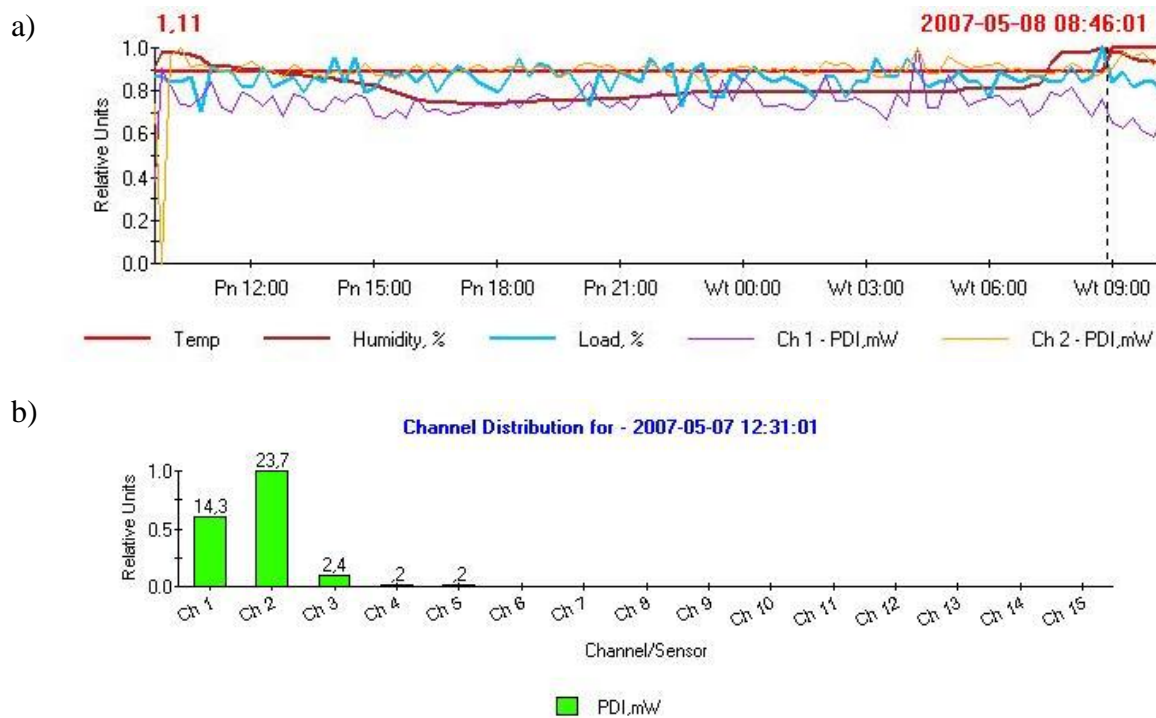
Rys. 9.8. Silnik 2: a) wykres fazowy 3D, b) wykres częstości impulsów N w funkcji amplitudy wyładowań [108]

Analizator R500 umożliwia również przedstawienie w postaci graficznej (wykresy) trendów zmian wnz w czasie dla temperatury, wilgotności, intensywności sygnałów czy ich wartości maksymalnych. Można też uzyskać uśredniony, np. godzinny wykres trendu ilości

N impulsów na sekundę z określonej liczby kanałów. Przykładowe wykresy przedstawiono na rysunkach 9.9 i 9.10.



Rys. 9.9. Silnik 1: a) wykres zmian temperatury, wilgotności, obciążenia oraz intensywności mierzonych sygnałów dla silnika, b) wartości maksymalne [108]



Rys. 9.10. Silnik 1: a) wykres zmian temperatury, wilgotności, obciążenia oraz intensywności mierzonych sygnałów dla silnika, b) wartości maksymalne [108]

Zestaw z analizatorem R500 został zamontowany w Cementowni ODRA, gdzie monitoruje wyładowania niezupełne w trybie ciągłym.

Następcą analizatora R500 jest R2200 – rys. 9.11.



Rys. 9.11. Analizator R2200

Analizator ten w przeciwieństwie do swojego poprzednika zawiera tylko 9 kanałów pomiarowych. Posiada za to budowany własny system ekspercki „PD-Expert”, który umożliwia między innymi:

- analizę cech częstotliwości i kształtu impulsu wejściowego,
- wykorzystanie macierzy do naprzemiennego naprowadzania impulsów z jednego kanału do drugiego, co daje możliwość porównania amplitud impulsów wnz w kanale kontrolowanym z amplitudą impulsów w innych kanałach,
- analizę opóźnienia lub wyprzedzenia impulsów w stosunku do innych kanałów,
- analizę i porównanie biegunowości impulsów.

Analizator jest wykorzystywany do pomiarów wnz w Laboratorium Diagnostyki Politechniki Opolskiej.

Na współczesnym rynku przyrządów do pomiaru wnz wybór jest ogromny. Niestety barierą trudną do pokonania jest zwykle cena urządzenia. Dlatego autor skupił się tylko na analizatorach dostępnych i używanych do pomiarów.

10. Zakłócenia i niebezpieczeństwa środowiskowe podczas pomiarów wnz oraz metody ich eliminacji

10.1 Źródła i rodzaje zakłóceń

Autorzy wielu opracowań na temat zakłóceń i szumów w trakcie pomiaru wnz podają różnego rodzaju klasyfikację zjawiska. Polska norma PN-70/E-4066 wycofana i zastąpiona przez PN-EN60270 określała zakłócenia w układzie probierczym jako wewnętrzne, a poza tym obwodem jako zewnętrzne. Obecnie obowiązująca norma mówi o tym, że szумы i zakłócenia nie mogą przekraczać 50% sygnału mierzonego.

Do najważniejszych źródeł zakłóceń wewnętrznych wg [93] można zaliczyć:

- wyładowania poza badanym obiektem (przewody pomiarowe, kondensator sprzęgający, transformator probierczy),
- złe styki i wyładowania na stykach obiektów metalowych z uziemieniem,
- wzbudzenia i oscylacje w ekranach uziemiających (w tym przydźwięk sieci 50 Hz),
- szумы własne urządzeń pomiarowych,
- nasycanie się rdzeni (transformatory, przekładniki).

Zakłócenia zewnętrzne to najczęściej [31,66]:

- emisje fal radiowych i telewizyjnych,
- wyładowania z innych obiektów,
- zakłócenia wynikające z pracy urządzeń przemysłowych w pobliżu obiektu mierzonego (spawarki, styczniki, przekaźniki, silniki zwłaszcza komutatorowe),
- układy z przełącznikami półprzewodnikowymi (tyrystorowe przetwornice).

Większość obecnie produkowanych urządzeń i sprzętu, zarówno w przemyśle, jak i w gospodarstwach domowych, wyposażonych jest w układy zasilające (ładowarki) impulsowe (przetwornice). Mogą one również stać się potencjalnym źródłem zakłóceń, zwłaszcza że wiele z nich nie spełnia podstawowych norm EMC (ElectroMagnetic Compatibility). Można zaliczyć je również do zakłóceń zewnętrznych.

Zakłócenia można również wyliczać stosując inne kryteria i podzielić je na [8,31,60, 61,104,140]:

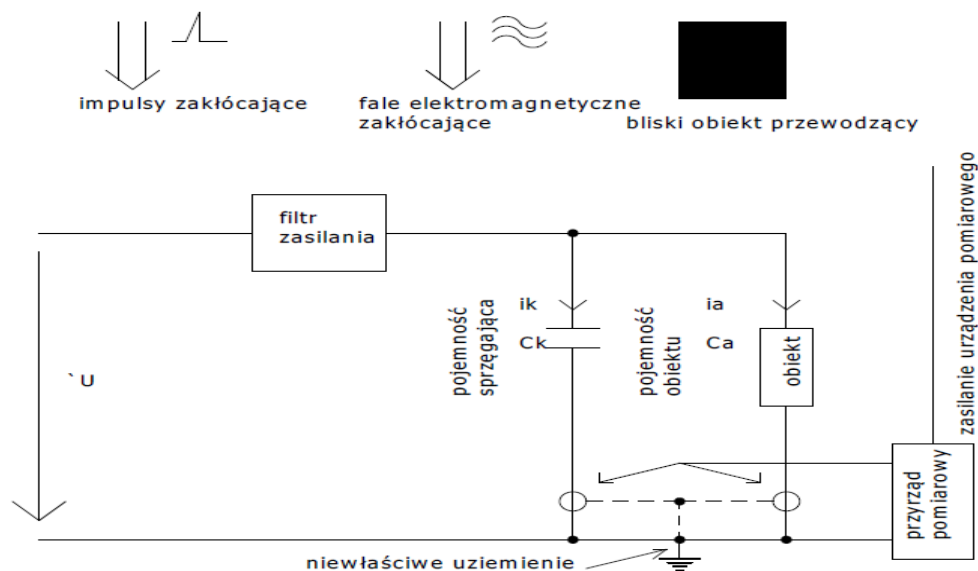
- ciągłe lub impulsowe,
- wąskopasmowe lub szerokopasmowe,
- powtarzalne lub niepowtarzalne,
- synchroniczne lub niesynchroniczne względem napięcia sieci,
- zdeterminowane lub przypadkowe.

Według autorów publikacji [31] zakłócenia można też podzielić ze względu na charakter sygnału – tabela 10.1.1 [31].

Tabela 10.1.1. Wybrane rodzaje zakłóceń przy pomiarach wyładowań niezupełnych [31]

Rodzaj sygnału	Charakterystyka sygnału
- sygnały radiowe - sygnały teletransmisyjne	sygnały zakłócające ciągłe, niepowtarzalne, niesynchroniczne, zdeterminowane częstotliwościowo;
- sygnały zakłócające z tyrystorowych układów sterowania	sygnały zakłócające impulsowe, powtarzalne, synchroniczne, zdeterminowane fazowo (czasowo)
- sygnały zewnętrznego ulotu elektrycznego	Sygnały impulsowe, niepowtarzalne (lub quasi-powtarzalne),quasi-synchroniczne, stochastyczne.

Podstawowym kryterium decydującym o możliwości pomiarów wyładowań niezupełnych w warunkach występowania szumu i zakłóceń jest stosunek sygnału do szumu S/N (ang. Signal-to-Noise Ratio SNR) [27]. Kiedy wartość S/N jest wyrażona w dB, współczynnik ten nazywamy odstępem od zakłóceń. Współczynnik S/N nabiera szczególnego znaczenia, gdy pomiary wyładowań niezupełnych są wykonywane w warunkach przemysłowych i na dodatek on-line czyli w trakcie pracy maszyny.



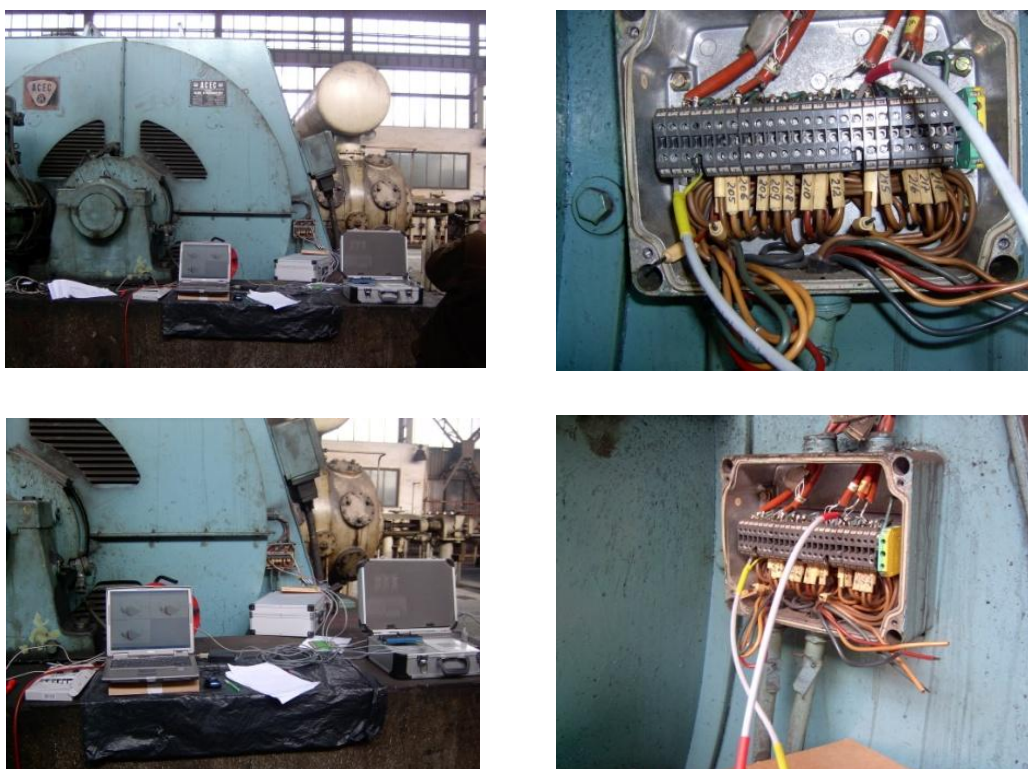
Rys.10.1.1 Różne możliwe źródła zakłóceń [82]

Rysunek 10.1.1 przedstawia charakterystyczne źródła zakłóceń podczas pomiarów wyładowań niezupełnych [82].

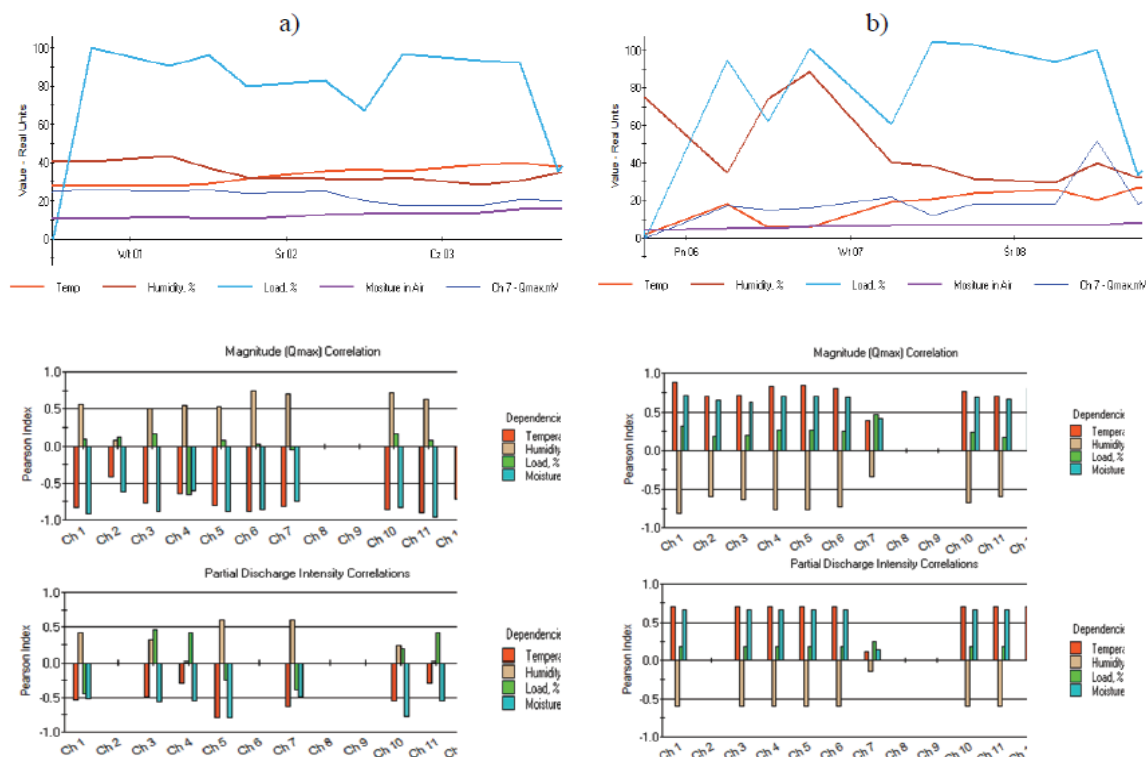
10.2 Niebezpieczeństwa środowiskowe

Wielkość i intensywność emisji wyładowań niezupełnych w świetle współczesnych badań zależy w dużym stopniu od czynników wynikających ze stanu równowagi termokinetycznej między układem elektrycznym obiektu badanego a warunkami otoczenia. Czynnikami opisującymi stan równowagi są: temperatura, wilgotność powietrza, stopień zanieczyszczenia. Jako przykład można podać warunki środowiskowe określone podczas badań dla silnika wysokiego napięcia, stanowiącego napęd krytyczny w jednym z zakładów przemysłowych w kraju [119].

Ze względu na to, że monitorowany napęd musiał pracować w sposób ciągły, pomiary wyładowań niezupełnych prowadzono on-line. Zestaw pomiarowy zawierał: analizator wnz R500 firmy Vibrocenter, 9 czujników DRTD-3 połączonych z termorezystorami Pt100 zainstalowanymi pod klinami w żłobkach uzwojeń stojana silnika, czujnik RFTC na przewodzie neutralnym oraz czujnik temperatury powietrza i czujnik wilgotności względnej – rys. 10.2.1[119].



Rys. 10.2.1. Monitorowanie napędu w jednym z zakładów przemysłowych w kraju[119]



Rys. 10.2.2. Przebieg zmian i korelacje wzajemne badanych wielkości, okres: a) letni (01÷03.06.2010), b) zimowy (06÷08.12.2010)[119]

Na rysunku 10.2.2 autorzy opracowania przedstawili wielkości wnz podczas pracy silnika w okresie letnim i zimowym oraz wzajemną korelację temperatury, wilgotności, obciążenia oraz zawartości wilgoci w powietrzu [119,121].

W okresie letnim można zaobserwować, że wzrost temperatury powoduje zmniejszenie się amplitudy wyładowań a współczynnik korelacji osiąga 80÷90%. Trend zmienia się jednak po przekroczeniu temperatury 35 °C - następuje wzrost wyładowań. W okresie zimowym wzrost temperatury powietrza od 0÷20 °C powoduje, że amplituda wnz rośnie. Natomiast spadek temperatury z 20 do 15 °C spowodował dwukrotny wzrost amplitudy wnz [119]. Widoczny jest zatem wpływ warunków środowiskowych na czas bezawaryjnej pracy maszyny i poprawnych pomiarów parametrów związanych z emisją wyładowań niezupełnych [85].

Intensywność emisji wnz zależy w dużym stopniu od temperatury roboczej obiektu (silnika) [37]. Reakcja materiałów izolacyjnych stosowanych w uzwojeniach przy dużych zmianach temperatury może być gwałtowna. Podobny wpływ na emisję wnz ma wilgotność, która obniża wytrzymałość elektryczną powietrza, co może zwiększyć emisję o 300% [37].

Podczas rejestracji wyładowań niezupełnych konieczne staje się zatem monitorowanie temperatury i wilgotności oraz obserwacja ich trendów.

Wiarygodność i poprawność pomiarów wnz zależy także w dużym stopniu od warunków mikroklimatycznych, w jakich funkcjonują przyrządy pomiarowe i jednostki komputerowe do archiwizacji danych. Autor przekonał się o tym w trakcie pomiarów w Cementowni Odra, współpracując z zespołem badawczym prof. Sławomira Szymańca, w realizacji projektu badawczego „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Używane podczas badań przenośne komputery, czyli popularne laptopy, nie wytrzymały długotrwałej pracy w trudnych warunkach (szczególnie duże zapylenie) i ulegały awariom.

Wskazane jest zatem użycie do zbierania danych komputerów w specjalnym wykonaniu czyli w wersji przemysłowej. Niestety ich koszt zakupu jest dosyć znaczny i nie zawsze można pozwolić sobie na taki wydatek.

10.3 Zagrożenia cybernetyczne

Zakłócenie poprawności działania systemu technicznego to dzisiaj cel działania pojedynczych osób lub organizacji. Może ono być nakierowane na organizacje rządowe, systemy bankowe oraz zakłady przemysłowe. W obliczu powszechnego stosowania urządzeń sterowanych komputerowo, za pomocą specjalistycznych programów i wszechobecnego internetu, mamy obecnie do czynienia z coraz większą liczbą ataków cybernetycznych. Mogą one być zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne (sabotaż). Ocenia się, że 60% ataków przeprowadza się za pomocą malware czyli złośliwego oprogramowania, 22% to ataki z zewnątrz a 18% to sabotaż [78].

Przyczyny mogą być różne. Zwykle bywa to zbyt mały poziom zabezpieczeń oprogramowania, jego niepoprawna konstrukcja lub używanie niewłaściwych interfejsów, szczególnie wtedy, gdy komunikacja odbywa się drogą internetową [78]. Dane z roku 2012 informują o tym, że jedna trzecia cybernetycznych ataków dotyczyła systemów technicznych, zwłaszcza systemów komputerowych [78]. Głównym ich celem było przejęcie kontroli lub zakłócenie działania urządzeń lub całych systemów.

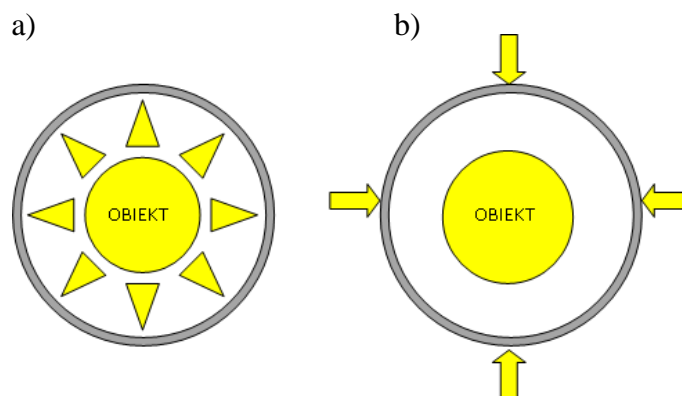
Najbardziej znane z nich to między innymi zawirusowanie komputerów międzynarodowej stacji kosmicznej ISS w 2008 roku, epidemia tzw. robaka STUVnet w 2012 roku, który powielał się na niektórych sterownikach SIEMENS wykorzystywanych do sterowania wirówek wzbogacających uran w Iranie. Powodował on między innymi zwiększenie

i zmniejszanie obrotów wirówek w stosunku do prędkości znamionowej, co powodowało przechodzenie wirnika przez częstotliwość rezonansową i jego kołysanie. Fałszował również dane o obrotach na panelach operatorskich. Taki sposób pracy powodował wzrost naprężeń mechanicznych w elementach składowych wirówek, co doprowadzało do ich uszkodzenia. Ocenia się, że zniszczeniu mogło ulec od 1000 do 5000 wirówek, co spowolniło wzbogacanie uranu o kilka lat [78]. Celowo stworzony Robak STUVnet miał opóźnić rozwój przemysłu jądrowego w Iranie. Niestety, rozprzestrzenił się w elektrowniach jądrowych innych krajów, jak choćby w USA i Rosji [78].

10.4 Metody ograniczania zakłóceń

Eliminacja zakłóceń polega na zwiększeniu energii użytecznej sygnału w stosunku do energii sygnału zakłócającego. Mówimy o odstępie sygnał – szum. Wśród znanych metod eliminacji zakłóceń należy wymienić **ekranowanie wewnętrzne i zewnętrzne** (rys. 10.4.1), **filtrację oraz uziemianie**.

Wśród autorów opracowań poświęconych zakłóceniom podczas pomiarów wnz panuje przekonanie, że najskuteczniejszym sposobem ograniczania zakłóceń, wynikających ze sprzężenia przez pole elektromagnetyczne (wg [104] zakłócenia zewnętrzne), jest zastosowanie ekranowania [31,104]. Dotyczy to szczególnie pomieszczeń laboratorium w którym dokonywane są pomiary off-line. Jak podają autorzy pracy zbiorowej [104], ekrany powinny zapewnić tłumienie od 40 do 60 dB. Ekrany to nic innego tylko blacha stalowa lub miedziana. Im większa grubość tym tłumienie skuteczniejsze. Ekranowanie laboratorium wymaga pokrycia zarówno ścian, sufitu jak i podłogi z zachowaniem ciągłości połączeń blachy. Ekranowanie samego obiektu lub stanowiska pomiarowego również skutecznie eliminuje zakłócenia, zwłaszcza wyładowania w zewnętrznych izolacjach.



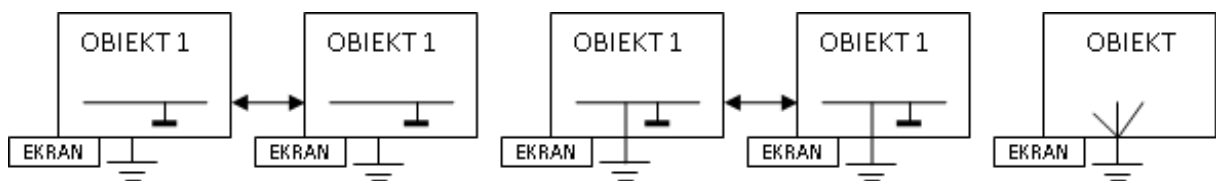
Rys. 10.4.1. Zakłócenia wewnętrzne (z obiektu) (a), zewnętrzne (b)

Należy również na czas pomiaru wyeliminować wszystkie możliwe źródła zakłóceń typu lampy wyładowcze, (światłówki), wyższe harmoniczne w zasilaniu (filtracja niskiego i wysokiego napięcia) metalowe nieziemione przedmioty w pobliżu transformatora probierczego i obiektu, niewłaściwe doprowadzenia i przewody wysokiego napięcia (możliwość ulotu).

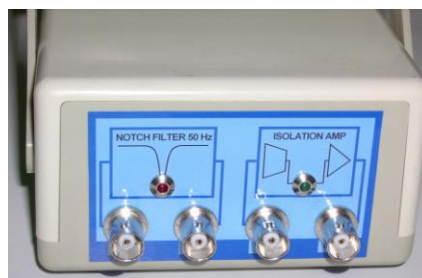
Przy konfigurowaniu aparatury pomiarowej w stanowisku należy bezwzględnie pamiętać o **uziemieniach**. Praktycznie można wymienić trzy rodzaje stosowanych uziemień (rys. 10.4.2):

- niezależne (z własnymi punktami odniesienia nazywane też „pływającym”),
- wielopunktowe,
- jednopunktowe (jeden potencjał, punkt uziemiający).

Należy pamiętać również bezwzględnie o tym, żeby nie tworzyć niepotrzebnych, długich **pętli mas**. Długi przewód to antena. Im dłuższy tym bardziej podatny na zakłócenia sieci przemysłowej, zwłaszcza pola 50 Hz (przydźwięku sieci). Autor wielokrotnie przekonał się o skuteczności ekranowania konstruując urządzenia wysokiego napięcia (do zasilania fotopowielaczy). Dlatego do pomiarów wykonywanych w Cementowni ODRA został zbudowany przez autora moduł filtru 50 Hz, tzw. *Notch Filter* ze sprzężeniem optycznym sygnału użytecznego (rys. 10.4.3).



Rys. 10.4.2. Różne konfiguracje uziemień:
a) niezależne b) wielopunktowe c) jednopunktowe



Rys. 10.4.3. Prototyp filtru 50Hz ze sprzężeniem optycznym

Największe problemy występują w przypadku, gdy dwa obiekty wchodzące w skład zestawu pomiarowego mają różne typy uziemień. Dotyczy to szczególnie typów a) z b) i a) z c). Mówimy wtedy w języku potocznym, że doszło do „konfliktu mas”. Nie należy zapominać

o tym, że w instalacji uziemiającej bierze udział uziemiający bolec wtyczki zasilającej aparaturę. Przekonał się o tym prawie każdy użytkownik oscyloskopów. Może to prowadzić do niepotrzebnych uszkodzeń przyrządów.

Trudno określić skuteczność poszczególnych metod oddzielnie, gdyż praktycznie powinny być stosowane jednocześnie.

Duże znaczenie ma **ekranowanie urządzeń elektronicznych** używanych do pomiarów, zwłaszcza przed skutkami promieniowania elektromagnetycznego. Profesjonalne przyrządy pomiarowe zbudowane są zwykle w postaci modułów ekranowanych oddzielnie. Całość, zamknięta w obudowie również ekranowanej, pozwala skutecznie zabezpieczyć układ przed szkodliwymi i wypaczającymi wynik pomiaru zakłóceniami.

Energia pola zakłócającego, które przechodzi przez ekran jest tłumiona na skutek odbicia (od i wewnątrz ekranu) i wchłaniania (absorpcji). Tłumienie odbite zależy od rodzaju pola, częstotliwości i właściwości materiału oraz od odległości źródła zakłóceń. Tłumienie wewnętrzne jest zwykle pomijalne.

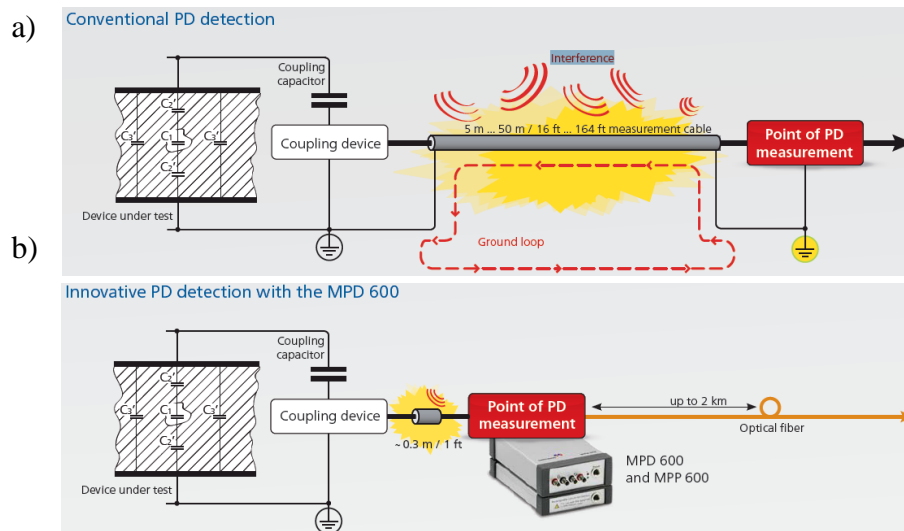
Wchłanianie energii nie zależy od rodzaju pola padającego na ekran lecz od jego elektryczno - magnetycznych właściwości i wymiarów mechanicznych (grubości) i częstotliwości.

Sytuacja jest nieco trudniejsza, gdy pomiary przeprowadza się on-line. Najistotniejsze jest wtedy ekranowanie toru pomiarowego. Dotyczy to wszystkich przewodów pomiarowych i urządzeń używanych w trakcie pomiaru. Należy też zachować wszystkie możliwe działania jakie obowiązywały przy pomiarach off-line, zwłaszcza dotyczące skuteczności uziemień.

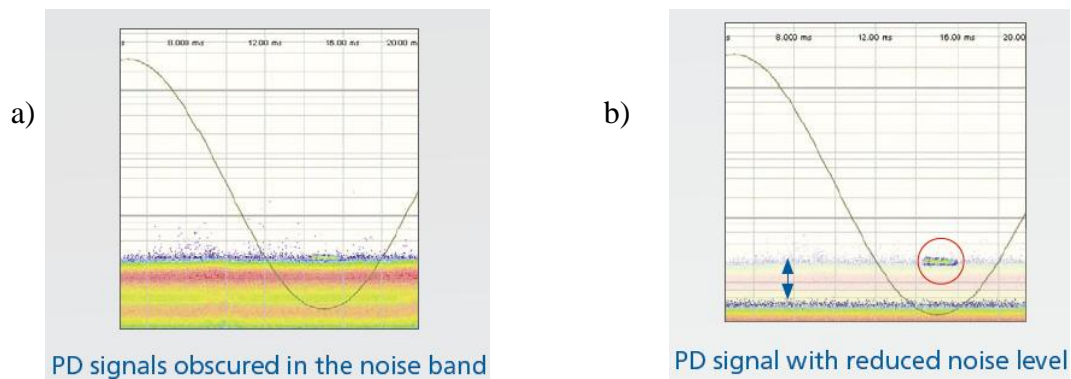
Odpowiedni dobór przewodów łączących obiekt z urządzeniem pomiarowym bardzo znacznie poprawia stosunek sygnał szum. Według noty aplikacyjnej firmy Omicron [80] należy maksymalnie skrócić długość transmisji analogowej do możliwej do uzyskania w danych warunkach technicznych (optymalnie 30 cm). Następnie zastosować przetwornik analogowo-cyfrowy i w takiej postaci przesyłać do przyrządu pomiarowego, najlepiej za pomocą transmisji fotooptycznej (światłowód) – rys. 10.4.4b. Efektem jest znaczna redukcja poziomu zakłóceń – rys. 10.4.5.

Nie tylko właściwe skonfigurowanie środowiska pomiarowego ma wpływ na eliminację niepożądanych zakłóceń. Należy dążyć do stosowania aparatury pomiarowej o jak najmniejszych szumach własnych.

Współczesny sprzęt do pomiarów emisji wnz zawiera urządzenia (moduły) skutecznie ograniczające poziom szumów i zakłóceń.



Rys.10.4.4. Koncepcja ograniczenia zakłóceń wynikających z przesyłu sygnału pomiarowego: a) analogowy przekaz sygnału, b) nowy zalecany układ przekazu sygnału pomiarowego [80,124]



Rys. 10.4.5. Efekt prawidłowego doboru układu pomiarowego:

a) sygnał wnz ukryty w paśmie szumów, b) sygnał wnz po zredukowaniu poziomu szumów – widoczny sygnał z pomiaru wnz [80,124]

Eliminację szumów i zakłóceń uzyskuje się poprzez [31,124]:

- filtrację analogową mierzonego sygnału,
- dyskryminację poziomu i biegunowości,
- selekcję (lokalizacja fazowa) i eliminację (bramkowanie fazowe) z zastosowaniem okna czasowego,
- stosowanie układów wielodetektorowych,
- cyfrowe przetwarzanie sygnałów DSP (Digital Signal Processing),
- filtrację falkową.

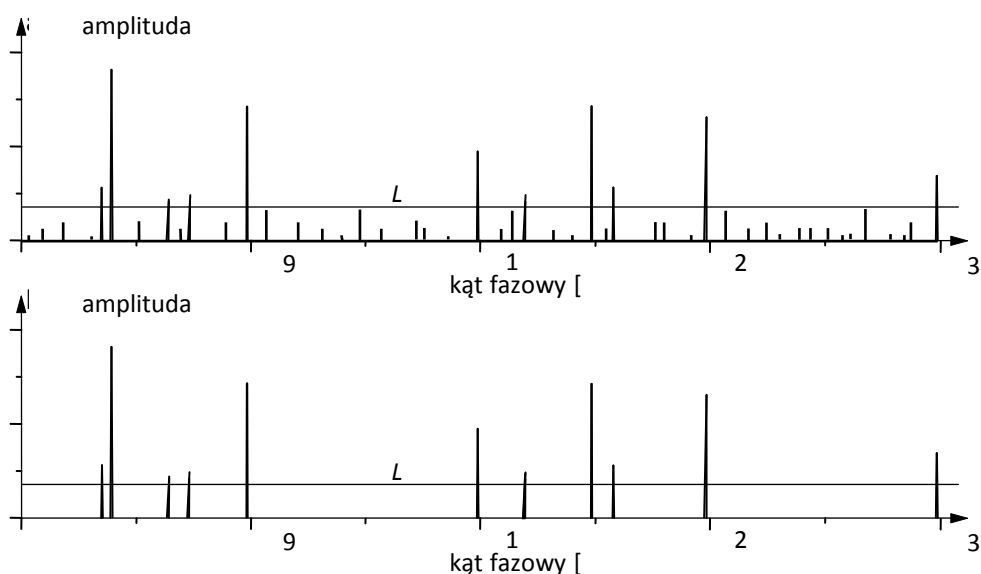
Najbardziej klasyczną z metod eliminacji zakłóceń jest **metoda filtracji analogowej**. Przeprowadza się ją wstępnie w impedancji pomiarowej, która stanowi selektywny obwód detekcji sygnału. Producenci urządzeń diagnostycznych oferują gotowe impedancje pomiarowe do pomiaru wnz.

Autor wspólnie z dr inż. Wojciechem Kandorą z EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu opracował i skonstruował impedancję pomiarową, która z powodzeniem sprawdziła się podczas pomiarów – rozdz. 7. Filtracja analogowa nie spełnia jednak swojej roli w przypadku, gdy mamy do czynienia z szumem szerokopasmowym lub zakłóceniami impulsowymi, ponieważ filtr analogowy o charakterze wąskopasmowym spowoduje zmniejszenie wartości współczynnika S/N czyli pogorszenie właściwości detekcyjnych [31].

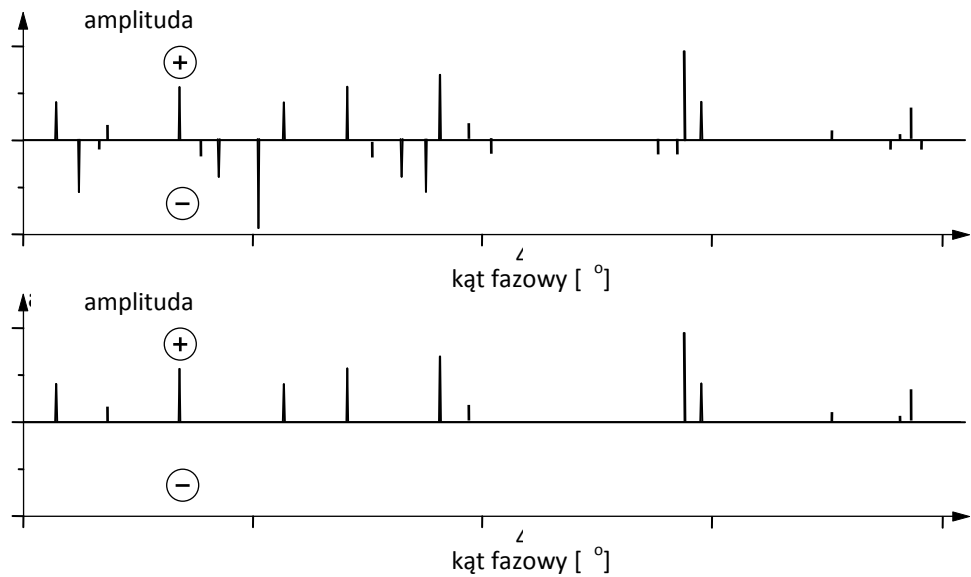
Metoda redukcji zakłóceń oparta o **dyskryminację analogową poziomu sygnału LLD (Low Level Discrimination)** polega na rejestracji impulsów, które mają określoną minimalną amplitudę. Pozwala to na „wycięcie” sygnałów o małych amplitudach, ale może również eliminować małe wnz a rejestrować duże impulsy zakłóceń – rys. 10.4.6 [31]. Dyskryminację poziomu powszechnie stosuje się w wielokanałowych analizatorach wnz.

Dyskryminacja biegunowości impulsów polega na rejestracji impulsów wyładowań tylko jednej biegunowości w wybranych zakresach mierzonej fazy – rys. 10.4.7 [31].

Lokalizacja fazowa i bramkowanie fazowe impulsów wyładowań niezupełnych są metodami wykorzystującymi zależność czasową między sygnałem mierzonym a referencyjnym, którym jest sinusoidalne napięcie wywołujące wyładowania (lokalizacja fazowa) z detekcją jego przejścia przez zero. Umożliwia to utworzenie tzw. okna fazowego o zadanej szerokości i lokalizację impulsów w wybranym fragmencie sinusoidy, eliminując w ten sposób wpływ zakłóceń z innych przedziałów czasowych napięcia. W metodzie bramkowania fazowego sygnałem odniesienia może być sygnał z czujnika antenowego wykrywającego zewnętrzne zakłócenia.



Rys. 10.4.6. Eliminacja zakłóceń przez dyskryminację amplitudy impulsów [27]:
a) sygnał wejściowy, b) sygnał po dyskryminacji amplitudy



Rys. 10.4.7. Dyskryminacja biegunowości impulsów [27]:
a) impulsy na wejściu, b) dyskryminacja impulsów dodatnich

Jedną z odmian tej metody jest dyskryminacja z układem koincydencyjnym. Wymaga ona jednak zastosowania dwóch impedancji: pomiarowej i referencyjnej. Układ koincydencji porównuje biegunowość impulsów z obu impedancji. Zewnętrzne impulsy zakłóceniewe o takiej samej biegunowości są blokowane a o znakach przeciwnych podlegają dalszej obróbce.

W przyrządach pomiarowych tzw. **analizatorach wielokanałowych** (np. R500) jedno z wejść wykorzystuje się do pomiaru sygnału szumu i zakłóceń. Można go realizować poprzez np. czujnik RTD jak w [124] zainstalowany w bliskiej odległości od obiektu. Amplituda sygnału z detektora stanowi LLD (rys. 10.4.6) dla sygnału wnz. Analizator pomiarowy jako użyteczne uznaje te sygnały, których amplituda jest większa od maksymalnej amplitudy zakłóceń zarejestrowanych w kanale szumów.

Filtracja cyfrowa polega na zastosowaniu filtrów cyfrowych, projektowanych i realizujących filtrację w dziedzinie częstotliwości jak i czasu (tzw. filtry adaptacyjne). Algorytm sterowania, a co za tym idzie współczynniki filtrów, zmieniają się w zależności od statystycznych własności sygnału wejściowego [31].

Filtracja w dziedzinie częstotliwości ma szczególne zastosowanie w przypadku wąskiego pasma zakłóceń. Zmierzony sygnał jest dzielony na kilka części, z których każdy jest poddawany szybkiej transformacie Fouriera (FFT). Po eliminacji sygnałów uznanych za zakłócenia dokonuje się odwrotnej szybkiej transformaty (IFFT). Eliminacja zakłóceń, której dokonuje się na widmie sygnału, polega na wyzerowaniu linii uznanych jako zakłócenia (ich wartość przekracza zadany poziom) [31].

Filtracja cyfrowa w dziedzinie czasu wykorzystuje najczęściej dwa filtry: ze skończoną odpowiedzią impulsową (SOI) oraz z nieskończoną odpowiedzią impulsową (NOI). W pierwszym przypadku wartość sygnału wyjściowego jest średnią ważoną tylko próbek sygnału wejściowego, ponieważ współczynniki równania różnicowego liniowego opisującego filtr są zerowane [31]. W drugim przypadku odpowiedź na sygnał wejściowy impulsowy może trwać nieskończenie długo. Oba typy filtrów są wykorzystywane w układach z procesorami sygnałowymi i umożliwiają filtrację w czasie rzeczywistym [31].

W literaturze dotyczącej wnz można także spotkać informacje na temat tzw. **filtracji falkowej**, opartej na transformacji falkowej (**WT – Wavelet Transport**). Metoda ta jest metodą czasowo-częstotliwościową. Poprawia stosunek sygnał-szum i jest często stosowana do tzw. „odszumiania” sygnału użytecznego [31].

11. Wnioski

Niniejsza praca powstała na bazie wieloletnich doświadczeń autora, zdobytych przy konstruowaniu i produkcji urządzeń elektronicznych różnego rodzaju. Autor korzystał również z bogatych doświadczeń prof. Sławomira Szymańca i pracowników EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu w tym dr Wojciecha Kandory, dzięki którym mógł przeprowadzać pomiary w warunkach przemysłowych oraz w laboratorium WN.

Dużą pomocą były również pomiary przeprowadzane w krajowych zakładach przemysłowych zwłaszcza w Cementowni Odra w ramach realizacji projektu własnego Nr N N510 536639 „Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych”. Projekt finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Niniejsza praca doktorska była w dużej mierze wykonana przez jej autora w trakcie realizacji wymienionego projektu badawczego.

Teza pracy doktorskiej została udowodniona a cel pracy został osiągnięty.

Autor udowodnił, że jest możliwe opracowanie i wykonanie niskokosztowych czujników do pomiarów wyładowań niezupełnych w uzwojeniach maszyn elektrycznych WN w warunkach przemysłowych oraz układów służących do ich kalibracji. Opracowana i wykonana aparatura umożliwia wykonanie pomiarów off-line i on-line stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Opracowane czujniki są niskokosztowe. Cechuje je prosta konstrukcja, łatwy montaż i obsługa.

Opracowano i wykonano czujniki do pomiarów wnz typu:

- 1) antenowego stacjonarne i mobilne w oparciu o termorezystory RTD – Pt100 w wersji biernej i aktywnej wraz z układami do ich kalibracji,
- 2) pojemnościowego 1000 pF wraz z impedancją pomiarową.

Opracowane i wykonane czujniki, impedancje pomiarowe oraz kalibratory spełniają wymogi stosowanych norm dotyczących pomiarów wnz [48,51,52], w tym w szczególności umożliwiają pomiary stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych off-line i on-line w warunkach przemysłowych, to znaczy w warunkach zakłóceń i uwarunkowań środowiskowych. Pomiary, które wykonał autor wykazały, że opracowana i wykonana aparatura

poprawnie pracuje przy typowych zakłóceniach elektromagnetycznych przemysłowych przy zmieniających się temperaturach i wilgotności.

Autor wyraża przekonanie, że opracowana aparatura z racji swej wyróżniającej się cechy „niskokosztowności” przyczyni się do rozpowszechnienia w przemyśle krajowym idei oceny stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w oparciu o pomiary wyładowań niezupełnych.

W tabeli 11.1 przedstawiono szczegółowe dane odnośnie niskokosztowności.

Tabela 11.1. Przybliżony koszt wykonanych czujników

Typ czujnika	Koszt w złotych
czujniki wnz antenowe stacjonarne typu RTD pasywne	120
czujniki wnz antenowe stacjonarne typu RTD aktywne	160
czujniki wnz antenowe stacjonarne typu antena pętlowa	160
czujniki wnz antenowe mobilne typu RTD	140
czujniki wnz pojemnościowe , pojemność 1000 pF	800
kalibrator w wersji standardowej (trzy wyjścia)	250
kalibrator zbudowany na bazie FPGA	350

12. Literatura

- [1] ADWEL, PD Monitoring, Nota Aplikacyjna 2003.
- [2] ADWEL - Sprzęgacze pojemnościowe do analizy wyładowań niezupełnych. Noty aplikacyjne 2003.
- [3] Andrzejewski K., Tułodziecka E.: Analiza intensywności wyładowań niezupełnych prototypowego układu izolacyjnego VPI stojana hydrogeneratora 200MW 15,75 kV. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 64/2002.
- [4] Andrzejewski K., Tułodziecka E., Pietrzak K.: Monitorowanie układów izolacyjnych uzwojeń stojanów turbogeneratorów GTHW-360 w Elektrowni Bełchatów na podstawie pomiarów wnz w systemie off-line. XIV Konferencja Energetyki, Książ, 2005r.
- [5] Andrzejewski K., Tułodziecka E.: Pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w próbie starzeniowej typu Resin Rich Compact. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 64/2002.
- [6] Ariastina W.G., Blackburn T.R., James R.E., Liu Z. Phung B.T.: Optimization of measurement error in partial discharge testing. School of Electrical Engineering and Telecommunications University of New South Wales.
- [7] Biernacki A., Zielonka A.: Metody diagnozowania stanu izolacji silników elektrycznych wysokiego napięcia” Wiadomości Elektrotechniczne 1996, nr 12, str.538-544.
- [8] Blokhintsev M., Golovkov A., Golubev Kane C.: Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment. IEEE PES’98, February 1-5, Tampa.
- [9] Boczar T.: Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wyładowań niezupełnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, zeszyt 259/2010.
- [10] Boczar T.: Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w izolacji olejowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, zeszyt 114/2000.
- [11] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych dla potrzeb system eksperckiego, Studia i Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2009
- [12] Bolliger A, Lemke E.: Lemke Diagnostics GmbH, Germany Lemke Diagnostics Ag, Switzerland Hv Technologies Ag, Inc: USA.
- [13] Cempel Cz., Tomaszewski F. i inni: Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. Wyd. MCNEMT, Radom 1992.

- [14] Chang C., Su Q.: Statistical characteristics of partial discharges from a rod-plane arrangement, Department of Electrical & Computer System Engineering Monash University, Clayton VIC 3168 Australia.
- [15] Charoy A.: Zakłócenia w urządzeniach elektrotechnicznych, WNT Warszawa 1999 ISBN: 83-204-2429-1.
- [16] Cichoń A.J., Boczar T., Borucki S.M.: Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych dla potrzeb systemu eksperckiego, Of. Wyd. Politechniki Opolskiej ISBN 978-83-60-691-50-2.
- [17] Czech A. Pomiar wyładowań niezupełnych w systemie off-line i on-line turbogeneratorów oraz hydrogeneratorów. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole, 2009.
- [18] Dąbrowski M.: Konstrukcja maszyn elektrycznych. WNT Warszawa 1965, 1997.
- [19] Decner A.: Badania diagnostyczne stopnia zużycia izolacji głównej i zwojowej w maszynach elektrycznych. Rozprawa doktorska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2009.
- [20] Decner A., Glinka T., Polak A.: Degradacja izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych pod wpływem czasu ich eksploatacji. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006.
- [21] Decner A., Glinka T., Polak A.: Obserwacja procesu starzenia izolacji uzwojeń Maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody napięcia stałego. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007.
- [22] Decner A., Glinka T., Polak A.: Wpływ czasu eksploatacji maszyn elektrycznych na stopień degradacji izolacji uzwojeń. Przegląd Elektrotechniczny 11/2006.
- [23] Fleszyński J. Praca zbiorowa, Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [24] Flisowski Z., Technika wysokich napięć, Wydawnictwa Naukowo– Techniczne, Warszawa 1988.
- [25] Florkowska B., Roehrich J. Zydrón P.: Distributions and phase-resolved patterns of partial discharges forms in non-uniform electric field in air. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 28.
- [26] Florkowska B.: Badania układów elektroizolacyjnych. AGH Kraków 1976.
- [27] Florkowski M.: System diagnostyczny oceny układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia, Rozprawa doktorska, Kraków 1993.

- [28] Florkowska B.: Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. AGH Kraków 2009 ISBN 978-83-7464-193-7.
- [29] Florkowska B.: Wyładowania niezupełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia analiza mechanizmów, form i obrazów. Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1997.
- [30] Florkowski M., Zydrón P.: Pomiarы wyładowań niezupełnych w diagnostyce silników wysokonapięciowych – wpływ zakłóceń i wyższych harmoniczných na pomiary i interpretację wyników. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 4, rok 1998.
- [31] Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [32] Florkowska B., Moskwa Sz., Nowak W., Włodek R., Zydrón P: Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia. AGH – Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
- [33] Frącz P., Boczar T., Zmarzły D.: Możliwości zastosowania spektrofotometrii optycznej w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych, Wiadomości Elektrotechniczne nr 10, 2008.
- [34] Frącz P., Wykorzystanie optycznych sygnałów emitowanych przez wyładowania elektryczne w diagnostyce transformatorów, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, 2011.
- [35] Fruth B.: Monitoring of Generator and Motor Insulation Systems, ICEM 2002.
- [36] Gacek Z. „Wysokonapięciowa technika izolacyjna”, Wyd. 2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [37] Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Maźniewski K.: Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Przegląd Elektrotechniczny rok: 2004, R. 80, nr 9.
- [38] Glinka T., Kulesz B.: Wyładowania niezupełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 49 21/2000.
- [39] Glinka T.: Stan techniczny izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i ich parametry wyznaczone napięciem stałym. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 48, 20/2000.
- [40] Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BOBRME Komel w Katowicach, 2002 r.

- [41] 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.
- [42] Golubev A, Blokhintsev I.: On-line Partial Discharge Application to MV Elctrical Switchgear, 2001 EIC SWG.
- [43] Goodeve T.E.: Experience with compact epoxy-mica capacitors for rotating machine partial discharge detection Iris Power Engineering Inc.
- [44] Greg CX. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani: Electricasl Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, IEEE PRESS series on Power Engineering, Wiley-Interscience a John Wiley&Sons, Inc., Publication 2003.
- [45] Gulski E.: Diagnostowanie wyładowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [46] Hickiewicz J., Ławrowski Z.: Diagnostyka maszyn elektrycznych w Elektrowniach – przykłady praktyczne. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005.
- [47] PN-EN-04700: Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych. Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych.
- [48] IEC60270: 2000, High voltage test techniques – Partial discharge measurements.
- [49] IEC 60567:2005, Oil filled electrical equipment sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases. Guidance.
- [50] IEEE Std 56-1997: Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10 000 kVA and Larger).
- [51] IEEE Std 1434-2000: Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- [52] IEEE Std 43-2000: Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery., 1. A guid to diagnostic insulation above 1kV. Materiały informacyjne Megger.
- [53] IEEE Std 286-2000: Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.
- [54] Iris Power Engineering, Inc - PD Seminar “PD Theory & PD Detection”.
- [55] Iris Power Engineering, Inc - PD Seminar “PD Interpretation & Testing Procedures”.
- [56] Iris Power Engineering, Inc - “Interpretation of PD Results, on-line testing”, 2004.

- [57] Iris Power Engineering, Inc – PDA Coupler EPOXY-MICA Type Sensors Instalation Guide.
- [58] Iris Power Engineering, Inc – Partial Discharge Coupler Calibrator Kit – User Manual.
- [59] Jarząbek J.J.: Badanie wyładowań niezupełnych w izolacji głównej prętów uzwojeń stojanów generatorów, Praca dyplomowa magisterska, Wrocław 1995.
- [60] 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.
- [61] Kacperak M., Szymaniec S.: Kompleksowa diagnostyka eksploatacyjna napędów elektrycznych w przemyśle cementowym – przykład aplikacji część II. Wyd. BOBRME, Katowice 2013, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 99, str. 69-76.
- [62] Kandora W., Smyczek A.: Diagnostyka izolacji uzwojeń generatorów i silników wysokonapięciowych metodą rampy wysokonapięciowej. XV Konferencja Energetyki, Ryn 2007.
- [63] Kandora W.: Badania własne izolacji zwojowej wysokonapięciową metodą impulsową – Of. Wyd. Politechniki Opolskiej V Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Pokrzywna 2011.
- [64] Kandora W.: Diagnostic of the high voltage turbo generator stator insulation with use the partial discharge method. Ofic. Wyd. Politechniki Opolskiej VI Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Pokrzywna 2012.
- [65] Kandora W.: Diagnostyka izolacji zwojowej wirników turbogeneratorów. Nowoczesne metody pomiarowe. XVI Konferencja Energetyki Wojanów 2009.
- [66] 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.
- [67] Kandora W.: Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wyładowań niezupełnych - Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr1/2012.
- [68] Kandora W.: Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń turbogeneratorów metodą pomiarów wyładowań niezupełnych, Napędy i sterowanie 5/2013.
- [69] Kandora W.: Przekładniki prądowe częstotliwości radiowych jako czujniki do pomiaru wyładowań niezupełnych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 91/2011.
- [70] Kandora W.: Radio frequency current transformers as sensors for partial discharge measurement. V Środowiskowe Warsztaty Doktoranckie Politechniki Opolskiej.

- [71] Kandora W.: Wysokonapięciowa metoda impulsowa oceną stanu izolacji zwojowej maszyn wirujących. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.
- [72] Klempner G.: Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance. ISBN 978 – 0470-16767-0.
- [73] Kandora W., Szymaniec S.: Diagnostyka izolacji uzwojeń wysokonapięciowych maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich. Nowa Energia, nr 2-3, 2014, str.76.
- [74] Koziół M.: Zastosowanie spektrofotometru optycznego do badania widm sygnałów optycznych emitowanych przez wyładowania niezupełne w oleju izolacyjnym. Poznań University of Technology, Academic Journals No 82, Electrical Engineering 2015.
- [75] Kuffel E., Kuffel J., Zaengl W.S.: High Voltage Engineering Fundamentals. Butterworth Heinemann 2000.
- [76] Lemke E.: Guide for partial discharge measurements on compliance to IEC 60270. CIGRE 2008.
- [77] Lemke E., Schmiegel P.: Introduction to Fundamentals of PD Diagnostics, 2008.
- [78] Limanowski W.: Zarys teorii wyładowań w dielektrykach. WN-T Warszawa 1988.
- [79] Lisowski M.: Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 2004
- [80] Ławrowski Z.: Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce na przykładzie Elektrowni Opole. Praca doktorska, Pol. Śląska, Wydział Elektryczny, 1999.
- [81] Ławrowski Z.: Badania eksperymentalne izolacji silnika 6kV o mocy 1MW z zastosowaniem nowej konstrukcji aparatury diagnostycznej wykorzystującej metody WMPS i Ramp Test.
- [82] Magin M. Engineer Eaton Corp: Energy 2005 Touch, Handle & Use: Handson Predictive Maintenance Technologies, Long Beach, California. August 14-17, 2005.
- [83] Matuszczyk J.: Poradnik antenowy, WKŁ Warszawa 2002.
- [84] Megger: The Complete Guide to Electrical Insulation Testing. AVO International 2001.
- [85] Morańda H.: Metody identyfikacji defektów – Rozprawa doktorska Politechnika Poznańska 1999.
- [86] Nowicki R. : Problemy bezpieczeństwa cybernetycznego w zakresie stosowania systemów nadzoru stanu technicznego majątku produkcyjnego, Napędy i sterowanie nr 7/8 2016.

- [87] Nota aplikacyjna EDI (Electrical Diagnostic Innovation, Inc), Best Practice – Measurement Bandwidth, The Partial Discharge Experts, Plymouth 2011, www.elec-di.com.
- [88] Nota aplikacyjna OMICRON, High-End Measurement and Analysis System for Partial Discharges, OMICRON L2069, Houston November 2012.
- [89] Osvath P., Weber H.J., Zaengl W.: Technika pomiaru wyładowań niezupełnych. Materiały informacyjne Tettex nr 311.
- [90] Paduch P., Szymaniec S.: Czujniki do pomiaru wyładowań niezupełnych w uzwojeniach maszyn elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 89/2011.
- [91] Paduch P.: Zastosowanie programowalnego układu logicznego do generacji szybkich impulsów kalibrujących, Zeszyty Problemowe - Maszyny elektryczne, nr 98/1/2013, Komel 2013.
- [92] Paduch P.: Prototyp kalibratora miernika wyładowań niezupełnych, Zeszyty Problemowe - Maszyny elektryczne, nr 98/1/2013, Komel 2013.
- [93] Paduch P.: Aktywny czujnik antenowy RTD. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 111/2016.
- [94] Paduch P.: Zakłócenia podczas elektrycznych pomiarów wyładowań niezupełnych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 111/2016.
- [95] Paoletti G., Golubev A.: Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment, Diagnostics Cutler-Hammer Engineering Services 2001.
- [96] PD diagnostics – its history and future, PD Workshop, Alexandria, Virginia, Decmber 3&4 2001
- [97] Plutecki Z.: Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie zeszyt nr 325, Opole 2012.
- [98] Plutecki Z., Szymaniec S.: Pomiary i monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle – doświadczenia własne. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2012, nr 4a, R.88, str. 56-59.
- [99] Plutecki Z., Szymaniec S.: Poprawność oceny wyników pomiaru emisji wnz maszyn elektrycznych w zmiennych warunkach mikroklimatycznych. XVIII Konferencja Energetyki ”Innowacje przyszłością energetyki” Zamek Gniew, 11-13.09.2013. TurboCare Poland S.A. Materiały Konferencyjne, str. 348-356.

- [100] 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.
- [101] Plutecki Z., Szymaniec S.: Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych metodą pomiaru wyładowań niezupełnych. Red: Kabza Z., Zator S. : Diagnostyka inwestycyjno-eksploatacyjna wybranych urządzeń i sieci energetycznych: Oficyna Wydawnicza. PO, Opole 2014, s. 97-115. Studia i Monografie, Politechnika Opolska z. 377.
- [102] PN-EN 60270: 2003: Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiar wyładowań niezupełnych.
- [103] Praca zbiorowa, Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [104] Praca zbiorowa pod redakcją Kosztaluk R.: Technika badań wysokonapięciowych. T. 1 i T. 2, WNT Warszawa 1985 ISBN 83-204-0615-3.
- [105] Przybysz J.: Diagnostyka izolacji uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 49 / 2000.
- [106] Русов В.А.: Измерение частотных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования, Издательство УрГУПС 620034, г. Екатеринбург 2011.
- [107] Russwurm D.: On-Site Partial Discharge Monitoring Rusing the differentia Lemke Probe LDP-5 and its accessories, HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop 2000.
- [108] Rydlik P.: Czujniki RTD do oceny stanu izolacji on-line. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska 2007.
- [109] Sasic M., Bertenshaw D.: On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors –Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods, SDEMPED 2001, ITALY 1-3 September 2001 pp.1-5.
- [110] Sedding H.: The partial discharge calibration problem in rotating machines. IEEE Winter Meeting 1992, Panel Session 92 THO 425-9PWR, 1992.
- [111] Siciński Z: Badanie materiałów elektroizolacyjnych, Wyd. Naukowo-Techniczne Warszawa 1968.
- [112] Skubis J.: Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998 r.

- [113] Strehl T.: On-and Off-Line Measurement, Diagnostics and Monitoring of Partial Discharges on High-Voltage Equipment, HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop 2000.
- [114] Szczepański Z.: Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [115] Stone G.C, Campbel S.R.: Digital Methods of Eliminating Noise in On-Line Generator PD Measurements. IEEE Winter Power Meeting, Publication 92-THO-425-9-PWR, February 1992.
- [116] Stone G.C., Sedding H.G., Costello M. J.: Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 32, No. 2, March/April 1996.
- [117] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: Electrical insulation for rotating machines. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004
- [118] Subocz J., Szrot M., Płowucha J.: Nowoczesne metody diagnostyki izolacji silników i generatorów wn. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006.
- [119] Szymaniec S.: Monitoring stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych w przemyśle – przykład aplikacji część I i II. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 110/2/2016.
- [120] Szymaniec S.: Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych w przemyśle. XLI International Symposium on Electrical Machines - SME 2005. Opole - Jarnołtówek, 14-17.06.2005. Politechnika Opolska. Materiały Konferencyjne, str. 572-579, CD-ROM 91.
- [121] Szymaniec S.: Diagnostyka stanu izolacji silników elektrycznych indukcyjnych wysokonapięciowych off-line w przemyśle, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 4, 2005 r.
- [122] Szymaniec S.: Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 72, 2005.
- [123] Szymaniec S.: Diagnostyka off-line stanu izolacji silników w przemyśle. Wyd. BOBRME, Katowice 2006. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne, nr 74, str. 45-50.
- [124] SZYMANIEC S. – Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Studia i monografie, zeszyt 193, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.

- [125] Szymaniec S.: Diagnostyka off-line i on-line stanu izolacji uzwojeń silników wysokonapięciowych indukcyjnych klatkowych – stan obecny i perspektywy. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2007, nr.4, str. 24-31.
- [126] Szymaniec S.: Analiza wyników pomiarów wyładowań niezupełnych w silnikach elektrycznych. Wyd. BOBRME, Katowice 2007, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, nr 76, str. 95-100.
- [127] Szymaniec S.: Doświadczenia w stosowaniu czujników RTD i SSC w pomiarach wzn silników. *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne*, nr 79, 2008.
- [128] Szymaniec S.: Diagnostyka izolacji uzwojeń silników elektrycznych w oparciu o metodę impulsową. *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, 2009, nr 3, str.45-52.
- [129] Szymaniec S.: Pomiar wyładowań niezupełnych silników elektrycznych przy użyciu czujników antenowych, Komel, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 88/2010.
- [130] Szymaniec S., Paduch P.: Aparaturowe i metrologiczne aspekty diagnostyki maszyn elektrycznych w oparciu o sygnał prądowy , XX Seminarium Techniczne Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych, Ryto 25-27.05.2011.
- [131] Szymaniec S., Plutecki Z.: Wpływ warunków otoczenia na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 2b, rok 2013, str. 154-157.
- [132] Szymaniec S.: Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. *Studia i Monografie zeszyt nr 333*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013.
- [133] Szymaniec S., Plutecki Z.: Poprawność oceny wyników pomiaru emisji wzn maszyn elektrycznych w zmiennych warunkach mikroklimatycznych. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1, rok 2014, str. 229-231.
- [134] Tettex Information 310: Technika pomiaru wyładowań niezupełnych.
- [135] Tettex Information 311: Pomiar wyładowań niezupełnych. Problemy i możliwości ich rozwiązania z pomocą uniwersalnego systemu pomiarowego.
- [136] Tettex Instruments: Ultrasonic partial discharge detector 925.
- [137] Tettex Instruments: True Digital Partial Discharge Analysing System.
- [138] Tułodziecka E., Andrzejewski K.: Komputerowa diagnostyka izolacji maszyn elektrycznych wysokiego napięcia metodą pomiaru wyładowań niezupełnych. Wyd. BOBRME, Katowice 1995, *Zeszyty Problemowe Komel* nr 50, str. 65 – 73.

- [139] Tułodziecka E., Andrzejewski K.: Wykrywanie stanów przedawaryjnych izolacji uzwojeń stojanów generatorów metodą bezpośredniego pomiaru wyładowań niezupełnych w układzie off-line. Wyd. BOBRME, Katowice 1996, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 52, str. 56-63.
- [140] Tułodziecka E., Andrzejewski K.: Wpływ ochrony przeciwjarzeniowej na intensywność wyładowań niezupełnych w izolacji maszyn elektrycznych wysokiego napięcia. IV Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”. Poznań - Kiekrz, 1998. Materiały Konferencyjne, str. 229-240.
- [141] Tułodziecka E., Andrzejewski K.: Pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w próbie starzeniowej izolacji typu *RESIN RICH COMPACT*. Wyd. BOBRME, Katowice 2002, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 64, str. 81-91.
- [142] Tułodziecka E., Andrzejewski K., Pietrzak K.: Pomiary i analiza wyładowań niezupełnych podczas próby starzeniowej prętów stojana hydrogeneratora 125 MW; 13,8kV z izolacją typu *RESIN RICH COMPACT*. IV Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”. Poznań - Kiekrz, 2002. Przegląd Elektrotechniczny nr 10s/2002, str. 282-285.
- [143] Tułodziecka E., Andrzejewski K., Pietrzak K.: Monitorowanie układów izolacyjnych uzwojeń stojanów turbogeneratorów GTHW-360 w Elektrowni Bełchatów na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych w systemie off-line. XIV Konferencja Energetyki. Zamek Książ, 2005. Energoserwis Lubliniec. Materiały Konferencyjne, str. 331-350.
- [144] Ultra-high Voltage Ceramic Capacitors, datasheet TDK.
- [145] Vogelsang R., Fruth B., Farr T., K. Fröhlich: Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements, ICEM 2002
- [146] Warren V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica, June 2003, pp. 1-13.
- [147] Warren V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2009.
- [148] Warren V.: Partial Discharge Testing: A Progress Report. Statistical Evaluation of PD Data, PD Progress Report, IRMC 2010.
- [149] Weber H.J.: Technika pomiaru wyładowań niezupełnych. Materiały informacyjne Tettex nr 310.
- [150] Wierzbicka B., Wierzbicki J.: Tester impulsowy IT 6, Noty aplikacyjne firmy SEITZ Inst.
- [151] WMPS i ramp test. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 89/2011.
- [152] Yahya Asiri Neural Network Based Detection of Partial Discharge in HV Motors, Master of science, Saudi Arabia 2010

- [153] Zakrzewski K: Prace diagnostyczne w dziedzinie dużych transformatorów w Polsce, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Nr 66 Politechniki Wrocławskiej.
- [154] Zielonka A., Gulski E., Brooks R., Turner M.: Analiza wyładowań niezupełnych (PD) w izolacji stojanów turbogeneratorów. HAEFELY TRENCH TETTEX SEMINARIUM. Warszawa, 1-2.06.1998. Materiały Konferencyjne, str. 1-5.
- [155] Zydroń P.: Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badań wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia. Rozprawa doktorska. AGH Wydział Elektrotechniki Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki. Kraków 2001.
- [156] Materiały źródłowe <http://haefely.com/>, 2007-04-05.
- [157] www.ien.poznan.pl/badania/index.html w dn.1.06.2007r.
- [158] www.haefely.com - „D D X™ Digital Partial Discharge Detector” w dn. 18.05.2007r.
- [159] www.vibrocenter.ru - Instrukcja systemu monitorującego wyładowania niezupełne R500 w dn. 17.02.2007