

Aparaturowe aspekty pomiaru wyładowań niezupełnych maszyn elektrycznych. Część 2

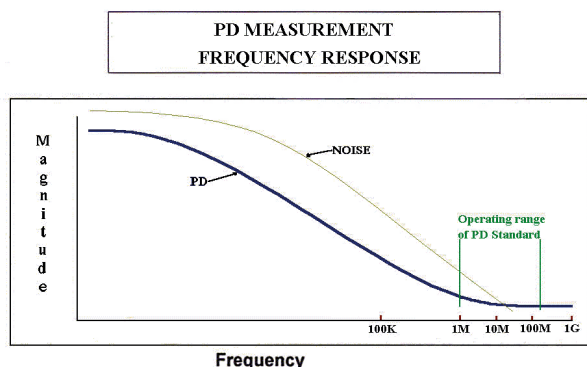
Piotr Paduch, Sławomir Szymaniec

1. RTD (Resistance Temperature Detector)

[1, 3-5, 8, 9, 11, 12, 18, 24, 25]

RTD to najczęściej stosowane czujniki termorezystorowe w maszynach elektrycznych, 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 [24, 25], 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]. Podobne badania przeprowadzone przez VIBROCENTER ograniczyły ten zakres do 20 MHz [18] – rys. 1. Detekcja wyładowań niezupełnych odbywa się w układzie jak na rys. 2 i 3.

Do detekcji impulsów *wnz* wykorzystano 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. Tak wykonany czujnik *wnz* pozwala na jednoczesny pomiar temperatury i *wnz*. Termorezystor w roli anteny umożliwia pomiar *wnz* przy pełnej izolacji, a sygnał indukuje się

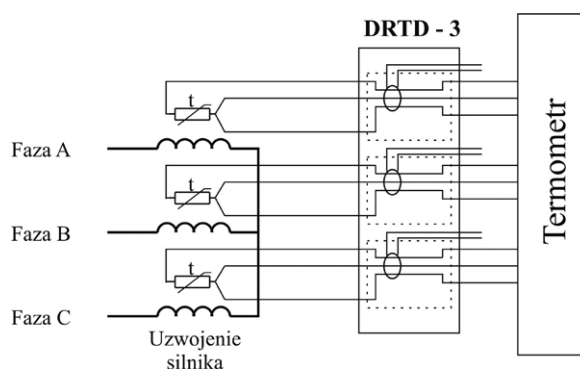


Rys. 1. Widmo *wnz* (PD) maszyn elektrycznych w czasie ich eksploatacji oraz widmo zakłóceń wg firmy ADWEL [1]

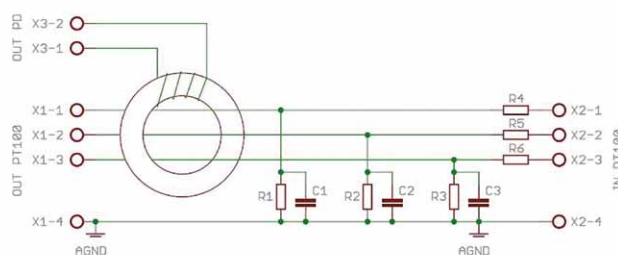
🇬🇧 EQUIPMENT ASPECTS OF ELECTRIC MACHINE DIAGNOSTICS BASED ON A PD – PART II

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

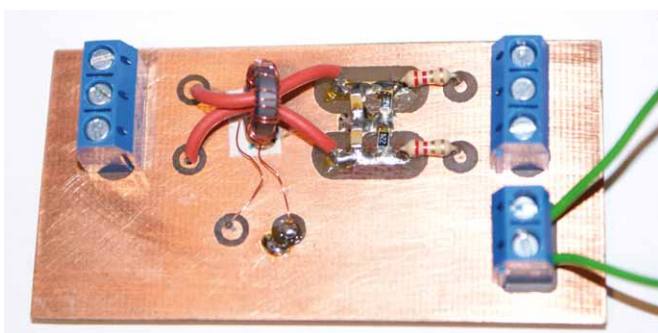
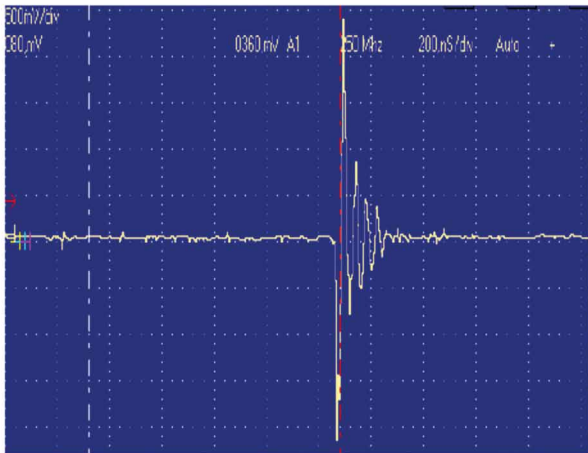
Keywords: insulation diagnostics of the high voltage electric machines



Rys. 2. Termorezystory Pt-100 w silniku wraz z zespołami antenowymi [12, 18]



Rys. 3. Schemat układu czujnika wyładowań niezupełnych [12]



Rys. 4. Przykład oscylogramu napięcia z anteny na bazie czujnika Pt100 (pomiaru wzn silnika w Cementowni ODRA) i fotografia wykonanego prototypu [12]

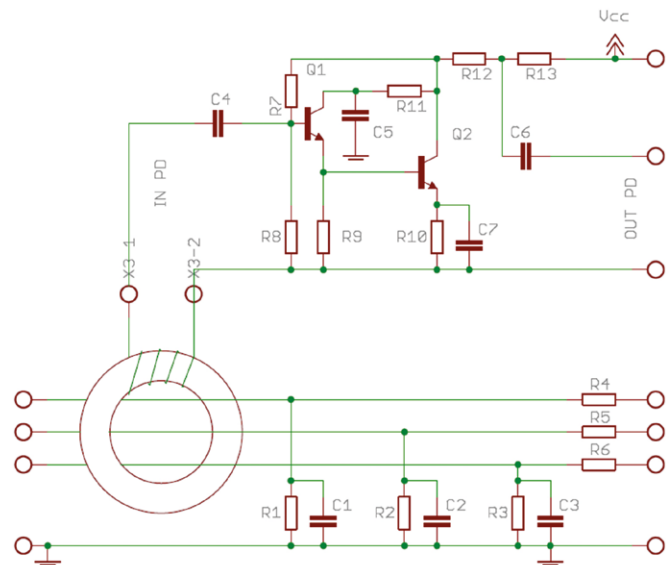
w uzwojeniu pomiarowym nawiniętym na rdzeniu toroidalnym. W warunkach pomiarowych jest możliwe podłączenie czujników Pt100, zarówno dwuprzewodowych, jak i trójprzewodowych. Znajdujące się na płytce filtry (elementy $R1$ do $R6$ i $C1$ do $C3$) zapewniają bezzakłócenowy monitoring temperatury. Przeprowadzone testy wykazały pełną przydatność tak wykonanego czujnika do monitoringu wyładowań niezupełnych. Koszt wykonanego czujnika stacjonarnego wynosi 50–120 złotych.

2. Prototyp aktywnego czujnika typu RTD do wyładowań niezupełnych

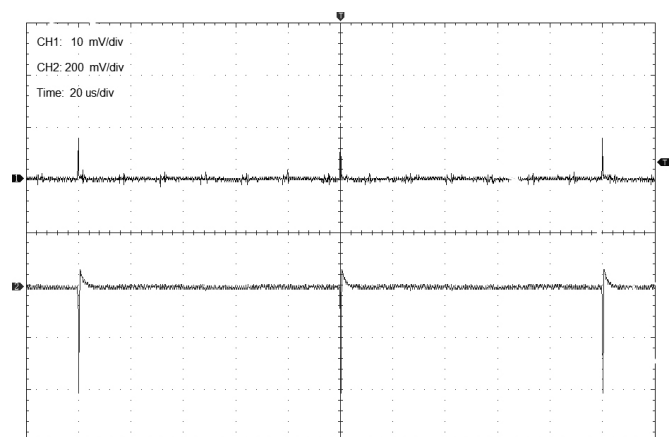
Kierując się głównie potrzebami przemysłu i energetyki krajowej, podjęto zadanie budowy niskokosztowego aktywnego czujnika typu RTD do pomiaru wyładowań niezupełnych.

2.1. 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

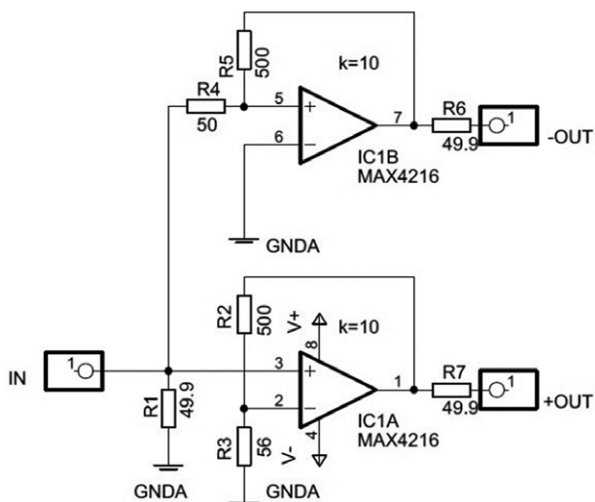


Rys. 5. Schemat aktywnego czujnika ze wzmacniaczem wstępnym na bazie tranzystorów dyskretnych [12]



Rys. 6. Oscylogramy impulsów wejściowych (CH1) i wyjściowych przedwzmacniacza [12]

może być czujnik aktywny RTD z wbudowanym wzmacniaczem wstępnym [12]. Rys. 5 przedstawia schemat ideowy proponowanego czujnika aktywnego *wzn* z przedwzmacniaczem tranzystorowym. 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 wtórника impulsy podawane są na stopień wzmacniająco wykonany na bazie tranzystora *npn* w układzie OE. Wyjście wzmacniacza obciążono obustronnie dopasowaną linią przekazującą sygnał. 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 rys. 6 przedstawiono oscylogramy impulsów na wejściu (CH1) i wyjściu (CH2) przedwzmacniacza zainstalowanego w czujniku RTD [12]. Jako źródło impulsów wejściowych zastosowano generator arbitralny



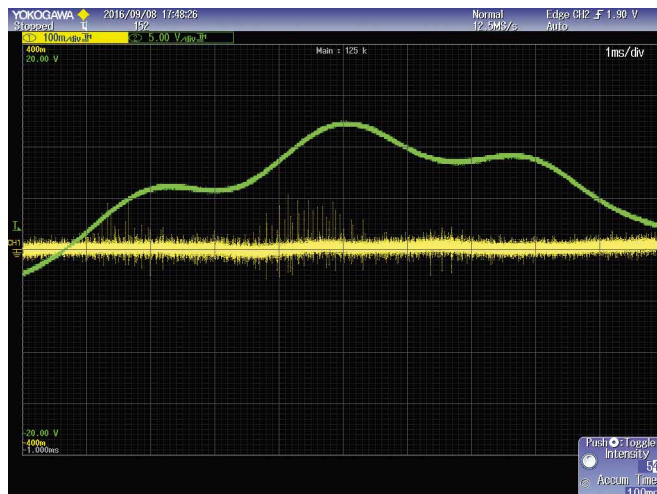
Rys. 7. Schemat ideowy wzmacniacza końcowego [12]



Rys. 8. Prototyp aktywnego czujnika RTD [12]

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 [12].

Dodatkowo opracowano wzmacniacz końcowy, aby uzyskać sygnał o amplitudzie umożliwiającej współpracę z modułem mikroprocesorowym. Zapewnia to pomiar częstotliwości powtarzania n w_{nz} . Sygnał wyjściowy układu z rys. 7 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 wzmacniacza. Wskazana jest zatem kontrola mierzonych impulsów na oscyloskopie. Moduł końcowy wzmacniacza zaprojektowano, wykorzystując podwójny wzmacniacz operacyjny MAX4216 pracujący do częstotliwości 300 MHz, tzw. *Rail-to-Rail*. Rys. 7 przedstawia schemat ideowy wykonanego wzmacniacza końcowego [12]. Wzmacniacz zawiera dwa tory: odwracający i nieodwracający. Dzięki temu otrzymano dwa przebiegi o takiej samej amplitudzie, lecz o przeciwnej polaryzacji.



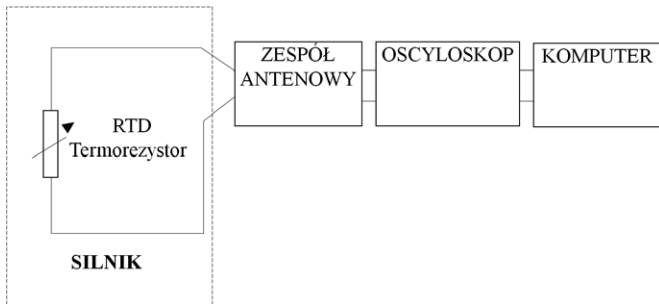
Rys. 9. Przykładowy pomiar w_{nz}



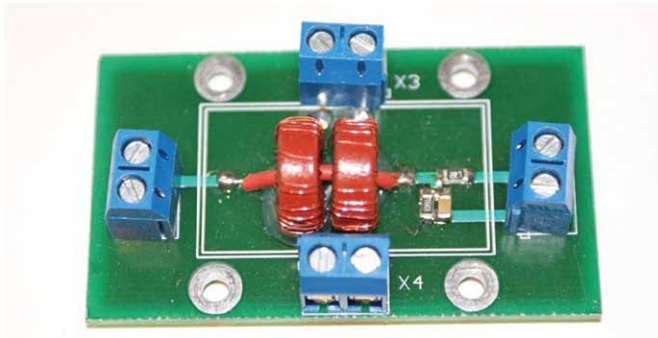
Rys. 10. Zestaw czujników RTD o dwu wyjściach [12]

Taka konfiguracja wzmacniacza umożliwia wybór polaryzacji impulsów potrzebny do dalszej obróbki sygnału na wejściach przetwornika pomiarowego. Rys. 8 przedstawia fotografię wykonanego prototypu aktywnego czujnika RTD. Rys. 9 to zarejestrowany przebieg przykładowego wyładowania. Za jego wadę można uznać konieczność stosowania zasilania, ale w przyrządach i analizatorach w_{nz} zawsze istnieje możliwość skorzystania z dodatkowo wyprowadzonego napięcia lub można zasiląć czujnik z własnego zasilacza DC. Przydatność i skuteczność czujników typu RTD została wielokrotnie przez autorów sprawdzona podczas badań przeprowadzonych w ramach kontroli stanu izolacji silnika napędowego młyna cementu w Cementowni ODRA. W wyniku doświadczeń przemysłowych opracowano zestaw czujników pomiarowych RTD o dwu wyjściach (rys. 10 i rys. 12).

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. 11. Przykładowe pomiary z wykorzystaniem czujników RTD ilustrują rysunki 13 a, b, c, d [24, 25].



Rys. 11. Układ do pomiarów wzn silników przy użyciu RTD [24, 25]



Rys. 12. Czujnik RTD o dwu wyjściach (X3,X4) [12]

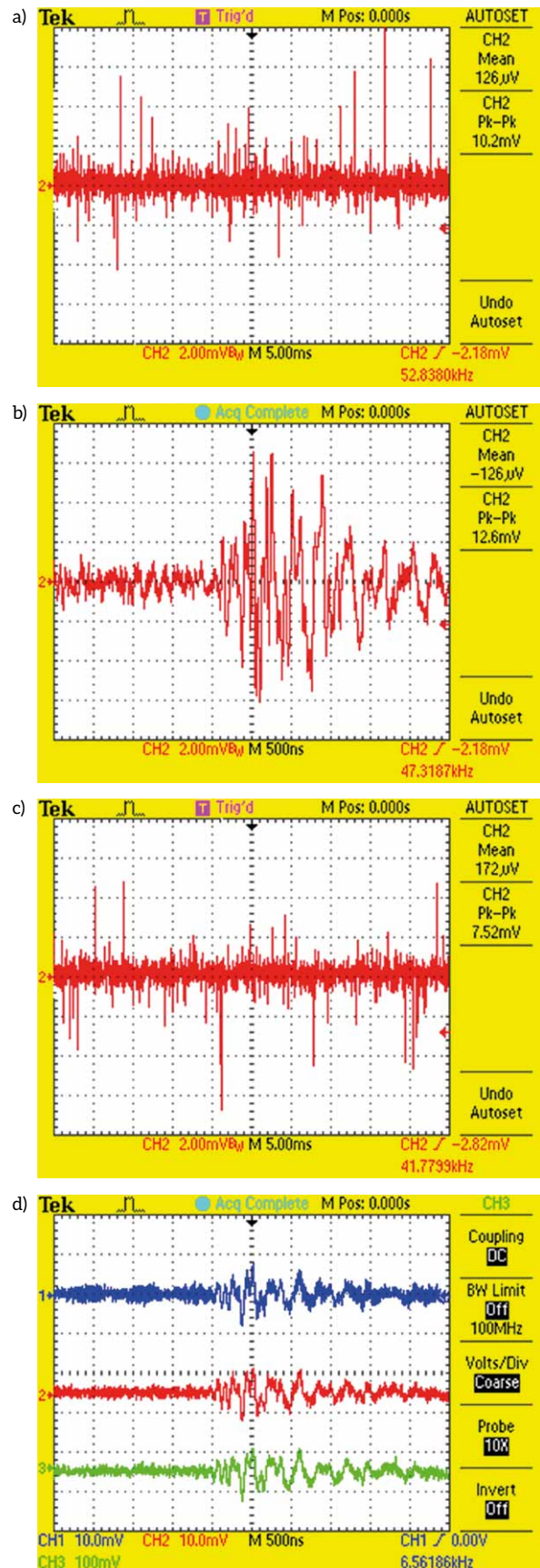
3. Impedancja pomiarowa

Na kształt impulsu prądowego wyładowania mogą wpływać elementy układu pomiarowego. Ideałem 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 ma duży wpływ na rozdzielczość amplitudową i czasową całego pomiaru [12].

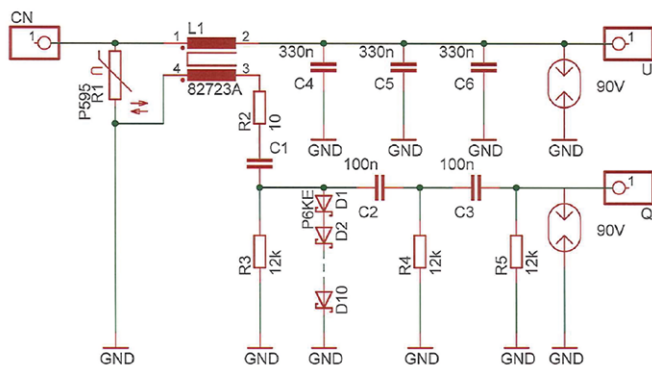
Dla EthosEnergy Poland SA w Lublińcu wykonano przy współpracy z dr. inż. Wojciechem Kandorą impedancję pomiarową, której schemat przedstawiono na rys. 14 [12]. Pasmo przenoszenia impedancji, którą przedstawia schemat, jest zgodne z wymaganiami normy IEC60270, która proponuje, aby mieściło się ono poniżej 20 dB wartości maksymalnej pasma pomiarowego [12]. Wejście układu jest dopasowane do pojemności sprzęgającej 1 nF i napięcia $U = 60$ kV. Urządzenie posiada wbudowany filtr środkowoprzepustowy (20 dB – C1–C3, R2–R5) i zabezpieczenia przeciwprzepięciowe (D1–D10, iskrownik 90 V) oraz obwód pomiaru wysokiego napięcia ($U_{wyj} = 50$ Vrms) [168].

Rys. 15 przedstawia wykonaną impedancję pomiarową [12]. Sygnał wzn 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 15.

Moduł impedancji nie ustępuje firmowym fabrycznym impedancjom, które na co dzień są używane w EthosEnergy Poland SA w Lublińcu. Autor [12] testował je podczas serwisowania.



Rys. 13. Pomiary wzn 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 [24, 25]



Rys. 14. Schemat ideowy prototypowej impedancji pomiarowej wykonanej dla EthosEnergy Poland SA w Lublińcu [12]



Rys. 15. Moduł wykonanej impedancji pomiarowej [168]

4. Uniwersalny zestaw aparaturowy do pomiarów *wnz* silników własnej konstrukcji

W trakcie badań własnych opracowano uniwersalny zestaw aparaturowy do pomiarów *wnz* silników przemysłowych – rys. 16, którego zasadniczym elementem była cyfrowa karta oscyloskopowa DSO2904 i analizator *wnz* R500. Opracowany zestaw aparaturowy może być wykorzystany jako przenośny mobilny lub stacjonarny.

Czujnikami *wnz* są: 3 kondensatory sprzęgające bezindukcyjne, bezwyładowaniowe w opcji 300 pF, konstrukcji dr. inż. Wojciecha Kandory [10], 6 aktywnych czujników typu RTD własnej konstrukcji. Mogą być podłączone równocześnie dalsze czujniki, np.: 3 cewki Rogowskiego, czujniki HFCT, RFCT, SSC [24, 25]. Prąd silnika jest mierzony dodatkową cewką Rogowskiego (niskoczęstotliwościową). Równocześnie mierzona jest temperatura uzwojeń silnika oraz wilgotność względna. Pomiarów mogą być wykonywane w dowolnej opcji czasowej, poczynając od okresu co 5 sekund. Wielkościami mierzonymi są: n , q , φ , Q_m , PDI , $NQN+$, $NQN-$. Oprogramowanie umożliwia wizualizację wyników w opcji: wartości maksymalne, uśrednione, minutowe, godzinowe, dobowe, tygodniowe, za różne czasookresy pracy, w jednostkach bezwzględnych i względnych. Istnieje możliwość liczenia współczynników korelacji. Podstawową jednostką dla Q_m są mV i V. Jeżeli tory pomiarowe są

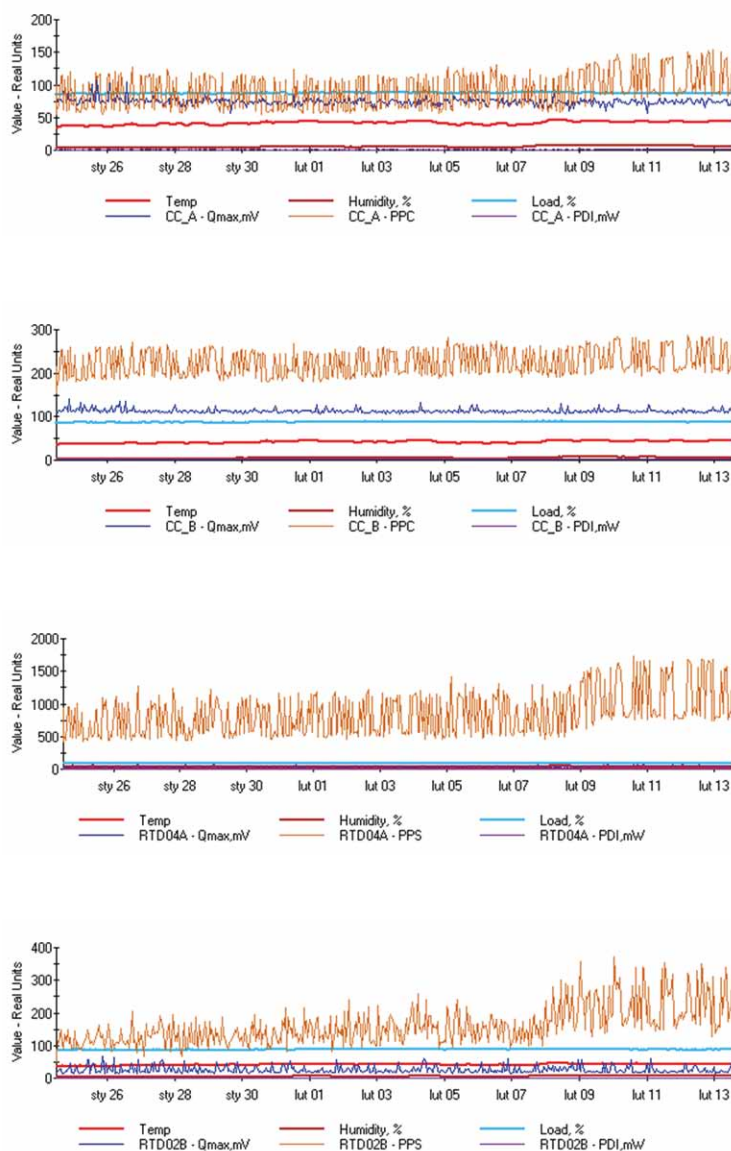


Rys. 16. Przenośny zestaw aparaturowy do pomiarów *wnz* silników [24, 25]

wcześniej wykalibrowane (przypadek bardzo rzadki), wtedy Q_m można wyrażać w jednostkach ładunku. Ograniczenie wpływu zakłóceń jest podobne jak w systemach do oceny stanu izolacji generatorów i hydrogeneratorów PDA [24, 25]. Układ pomiarowy ma tzw. „kanał szumowy”. Istnieje możliwość dodatkowego wykorzystania kanału szumowego, co umożliwia ustawienia wartości progowych poziomu sygnału uznanego za użyteczny [24, 25]. Urządzenie posiada możliwość podania na układ przekaźnikowo-stycznikowy informacji o przekroczeniu progów alarmowych dla Q_m , PDI i trendu. Przykładowe wyniki pomiarów wykonanych przez autorów w jednej z cementowni przedstawiono na rys. 17. Był to monitoring stanu izolacji silnika z pomiarami wykonywanymi co godzinę. Pomiarów *wnz* wykonywane były przy użyciu 3 kondensatorów pomiarowych 300 pF – CC_A, CC_B i CC_C, podpiętych do zacisków fazowych silnika: U, V, W oraz przy użyciu 6 termorezystorów – RTD01A, RTD04A, RTD02B, RTD05B, RTD03C i RTD06C, z czego 3 znajdowały się od strony napędowej, dalsze 3 od strony przeciwnapędowej, po 2 termorezystory na fazę U(A), V(B), i W(C). Równocześnie mierzone były prąd stojana, temperatura uzwojeń stojana oraz wilgotność względna.

Z analizy wyników pomiarów *wnz* badanego silnika wynikają następujące wnioski ogólne:

- Analiza fazowa-rozdzielcza *wnz* wykazuje stan zrównoważenia *wnz* o polaryzacji ujemnej i dodatniej z lokalnymi przewagami polaryzacji dodatniej, oznacza to występowanie punktów generacji *wnz* w środku izolacji oraz w okolicach czoł.
 - W okresie miesięcznym nie stwierdzono wyraźnej zależności intensywności *wnz* od temperatury, wilgotności względnej i obciążenia silnika.
 - Ogólnie stan izolacji silnika 1,4 MW, 6 kV, izol. F, napędu o znaczeniu krytycznym na podstawie wyników pomiarów *wnz* nie budzi zastrzeżeń.
- Wnioski z badań diagnostycznych przekazano właścicielowi silnika.



Rys. 17. Silnik o mocy 1,4 MW, 6 kV, izol. F, napędu o znaczeniu krytycznym, pomiar wnz przy użyciu kondensatorów i RTD, wykresy: Q_{max} , częstotliwości wnz - (PPS), PDI, temperatury, wilgotności i obciążenia silnika dla trybu dziennego

5. Wnioski końcowe

W zespole prof. dr. hab. inż. Sławomira Szymańca od roku 2000 trwają prace nad opracowaniem metodyki pomiarów wnz dla potrzeb krajowego przemysłu i energetyki, nad własnymi rozwiązaniami czujników do pomiarów wnz, nad konstrukcją sond pomiarowych oraz aparatury pomiarowej, w tym nad opracowaniem analizatorów mobilnych wnz. Opracowano i wykonano między innymi zespoły antenowe. Czujniki do pomiaru temperatury w silnikach typu termorezystory RTD, np. Pt100, wyposażone w zespoły antenowe własnej konstrukcji, stają się anteną służącą do pomiarów wnz w zakresie 1–20 MHz. Zespół antenowy umożliwia przeniesienie sygnału w.cz. z termorezystorów do układu pomiarowego wnz. W zespoły antenowe można wyposażyć dowolne RTD znajdujące się w silniku, jak również zamontować według potrzeb dodatkowe RTD w przestrzeniach czoł uzwojeń silników i wyposażyć je we

wspomniane zespoły antenowe. Zespół antenowy umożliwia podłączenie RTD o dowolnej konfiguracji (2, 3, 4 druty), zapewnia również bezpieczeństwo mierzącemu i chroni aparaturę pomiarową przed ewentualnym uszkodzeniem przez galwaniczne oddzielenie stojana od układu pomiarowego.

Opracowano również i wykonano bardzo prosty oraz tani czujnik wnz typu antena pętlowa. Antenę tworzy; długi przewód ($L \gg d$, L – długość, d – średnica przewodu) poprowadzony wokół czoł uzwojeń silnika na elemencie wspornikowym, pierścieniu mocującym itp. Jest to najprostsza antena odbiorcza w MHz-owym zakresie częstotliwości, dobrana eksperymentalnie, wyposażona we wspomniany już zespół antenowy własnej konstrukcji [24, 25]. Szczegóły konstrukcji czujników antenowych stacjonarnych i mobilnych w oparciu o termorezystory RTD – Pt100 w wersji bierniej i aktywnej przedstawiono w pracy doktorskiej dr. inż. Piotra Paducha [12]. Opracowane konstrukcje są niskokosztowe co przedstawia tabela. 1.

Tabela 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

Na podstawie przeprowadzanych przez autorów badań przemysłowych można stwierdzić, że czujniki typu RTD, pasywne i aktywne, skutecznie umożliwiają detekcję wyładowań i mogą być alternatywą dla sprzączaczy pojemnościowych pod warunkiem, że w obiekcie mierzonym zostały zainstalowane czujniki temperatury Pt100 lub anteny pętlowe.

Literatura

- [1] ADWEL: PD monitoring. Nota Aplikacyjna 2003.
- [2] ANDRZEJEWSKI K., TUŁODZIECKA E.: *Analiza intensywności wyładowań niepełnych prototypowego układu izolacyjnego VPI stojana hydrogeneratora 200MW 15,75 kV*. „Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne”, 64/2002.
- [3] BERTENSHAW D., SASIC M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [4] BLOKHINTSEV, GOLOVKOV M., GOLUBEV A., KANE C.: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*, IEEE PES'98, February 1–5, Tampa.
- [5] DIMRUS: Analizator R2200, nota aplikacyjna, dokumentacja 2011.
- [6] FLORKOWSKA B., FLORKOWSKI M., WŁODEK R., ZYDRON P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych*

- w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [7] FLISOWSKI Z.: *Technika wysokich napięć*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
- [8] GOLUBEV A., PAOLETTI G.: *Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment*. 2000 IEEE. Reprinted, with permission, from Paper 99-25 presented at the IAS 34th Annual Meeting, Oct 3–7, '99, Phoenix, AZ.
- [9] GULSKI E.: *Diagnostowanie wylądowań niepełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji*. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [10] KANDORA W.: *Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin – Rich*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole 2012.
- [11] KANDORA W., SZYMANIEC S.: *Badania i diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin – Rich*. Studia i Monografie, Politechnika Opolska z. 439, Oficyna Wydawnicza PO, Opole 2016.
- [12] PADUCH P.: *Aparaturowe aspekty diagnostyki izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych*. Rozprawa doktorska. Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole 2017.
- [13] PAOLETTI G., GOLUBEV A.: *Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment, Diagnostics*. Cutler-Hammer Engineering Services 2001.
- [14] *PD diagnostics – its history and future, PD Workshop*, Alexandria, Virginia, December 3&4 2001
- [15] PLUTECKI Z.: *Analiza wpływu mikroklimatu na emisję wylądowań niepełnych maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 325. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
- [16] PLUTECKI Z., SZYMANIEC S.: *An analysis of the influence of microclimate on partial discharge emissions of electric machines in the conditions of industrial operation – own research*. Archives of Electrical Engineering, No 4, 2013., pp. 629–648.
- [17] PN-EN 60270. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiar wylądowań niepełnych*.
- [18] Русов В.А.: *Измерение частотных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования*. Издательство УрГУПС 620034, г. Екатеринбург 2011.
- [19] RUSSWURM D.: *On-Site Partial Discharge Monitoring Using the differentia Lemke Probe LDP-5 and its accessories*. HV Testing, Monitoring and Diagnostics Workshop 2000.
- [20] RUX L.M., BERTENSHAW D.R.: *Assessing the condition of rotating machines stator winding insulation using the ramped direct high-voltage method*. INSUCON 2002, 18–20 June 2002, Berlin.
- [21] SASIC M., BERTENSHAW D.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors – Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods*, SDEMPED, ITALY 1–3 Sept. 2001, pp. 1–5.
- [22] SASIC M.: *Partial discharge measurement on rotating machines*. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.
- [23] STONE G.C., BOULTER E.A., CULBERT I., DHIRANI H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [24] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [25] SZYMANIEC S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt 333.
- [26] Tettex Information 310: *Technika pomiaru wylądowań niepełnych*.
- [27] Tettex Information 311: *Pomiary wylądowań niepełnych. Problemy i możliwości ich rozwiązania z pomocą uniwersalnego systemu pomiarowego*.
- [28] Tettex Instruments: *Ultrasonic partial discharge detector 925*.
- [29] Tettex Instruments: *True Digital Partial Discharge Analysing System*.
- [30] TUŁODZIECKA E., ANDRZEJEWSKI K.: *Komputerowa diagnostyka izolacji maszyn elektrycznych wysokiego napięcia metodą pomiaru wylądowań niepełnych*. Wyd. BOBRME, Katowice 1995, Zeszyty Problemowe Komel nr 50, s. 65–73.
- [31] TUŁODZIECKA E., ANDRZEJEWSKI K.: *Wykrywanie stanów przedawaryjnych izolacji uzwojeń stojanów generatorów metodą bezpośredniego pomiaru wylądowań niepełnych w układzie off-line*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne”, 52/1996.
- [32] ZUBELIK P., NADACZNY K., ANDRZEJEWSKI K., ZAJĄCZEK M.: *System oceny układów izolacyjnych hydro- i turbogeneratorów dużej mocy najnowszymi metodami, głównie przez pomiary i analizę wylądowań niepełnych*. Instytut Energetyki – Zakład Izolacji, Poznań 2006.
- [33] ZYDROŃ P.: *Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wylądowań niepełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2001.



prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Elektrowni, Diagnostyki i Inżynierii Komputerowej, e-mail: s.szymaniec@po.edu.pl;

dr inż. Piotr Paduch

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, e-mail: p.paduch@po.edu.pl

artykuł recenzowany