

Zastosowanie metody UHF do detekcji i analizy zjawiska wyładowań niezupełnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości jakie obecnie daje zastosowanie metody ultra wysokich częstotliwości (UHF) do detekcji i analizy zjawiska wyładowań niezupełnych (WZN) w izolacji olejowej. Badania prowadzone były w warunkach laboratoryjnych na trzech wybranych modelowych źródłach generujących WZN w oleju elektroizolacyjnym: układ ostrze-ostrze, układ powierzchniowy i układ wieloostrze- płyta. Dokonano szczegółowej analizy wyników pomiarowych oraz na tej podstawie zaproponowano metodę identyfikacji wybranych form jednoźródłowych WZN.

Abstract. Various contemporary application abilities of the ultra-high frequency (UHF) method for partial discharge (PD) detection and analysis in oil insulation are presented in the paper. Three different spark gap configuration are selected for PD modeling in oil insulation: point to point, surface type and multipoint to plate. All research are proceeded under laboratory conditions. Identification methodology of the selected single-source PD models is proposed on the grounds of the detailed measurement results analysis. (**Partial discharge detection and analysis using UHF method**).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, metoda UHF, metoda niekonwencjonalna, olej elektroizolacyjny.

Keywords: partial discharge, UHF method, unconventional method, insulation oil.

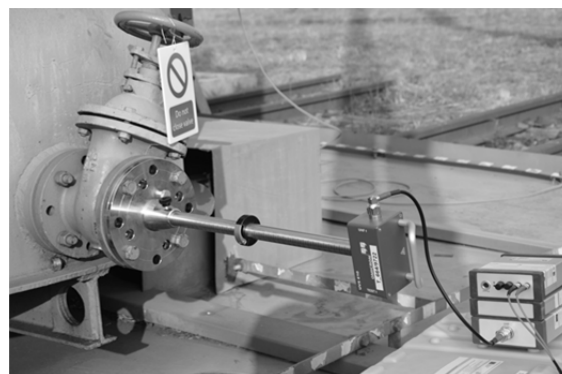
Wstęp

Zjawisko wyładowań niezupełnych (WZN) jest bardzo powszechnym i niekorzystnym aspektem związanym z degradacją izolacji urządzeń wysokonapięciowych. Znaczna część poważnych awarii związanych z dystrybucją zasilania powiązana jest pośrednio lub bezpośrednio ze zjawiskiem WZN [1]. Odpowiednio wczesna detekcja i lokalizacja degradacji układów izolacyjnych kluczowych urządzeń elektroenergetycznych, takich jak generatory czy transformatory, pozwala zaplanować proces remontowy oraz ewentualne odstawienie i zastąpienie konkretnej jednostki w systemie elektroenergetycznym, w taki sposób aby odbyło się to bez wpływu na odbiorcę oraz było procesem w pełni kontrolowanym. Takie podejście do problematyki pozwala zachować ciągłość zasilania oraz znacznie redukuje potencjalne koszty ewentualnej awarii.

Współcześnie znanych i stosowanych jest wiele metod detekcji i analizy WZN [2, 3]. Każda z nich opiera się na różnych zjawiskach fizycznych towarzyszących generacji WZN. Jako najczęściej spotykane w praktyce wskazać należy m.in. metodę emisji akustycznej [4–7], opartą na generacji sygnałów akustycznych, metodę spektrofotometryczną opartą na emisji światła, metodę termowizyjną opartą na pomiarze emitowanego ciepła [8–11], metodę chromatografii gazowej opartej na analizie gazów rozpuszczonych w oleju [12–14], metodę elektryczną opartą na pomiarze zmian pojemności elektrycznej [15–18], metodę TEV opartą na promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie wysokich częstotliwości [19] oraz metodę UHF opartą na emisji fali elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości radiowych [20–23]. Spośród wszystkich wymienionych metod jedynie elektryczna jest metodą pomiaru bezpośredniego WZN, co oznacza, że dostarcza informacji wprost o badanym zjawisku, tj. o wartości ładunku pozornego i umożliwia pomiar kalibrowany. Pozostałe metody są metodami pośrednimi, a więc mierzone wielkości fizyczne są proporcjonalne do cech badanego zjawiska i tym samym pozwalają jedynie na szacowanie intensywności WZN lub wartości ładunku pozornego.

Pomiary wykorzystujące promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie UHF zostały dobrze poznane i są powszechnie stosowane do diagnostyki WZN w układach rozdzielnic izolowanych gazem (GIS) [24]. W odróżnieniu do konwencjonalnej metody elektrycznej, detekcja zdarzeń WZN z wykorzystaniem UHF charakteryzuje się znacznie większą odpornością na

zakłócenia zewnętrzne, zapewniając jednocześnie duży poziom czułości, możliwość lokalizacji WZN (np. poprzez metodę różnic czasu dotarcia) i szerokie możliwości interpretacji przebiegów WZN, poprzez analizy fazowo rozdzielcze przebiegów WZN, które umożliwiają skorelowanie zmierzonych wartości napięcia UHF odpowiadających poszczególnym zdarzeniom WZN z fazą napięcia zasilania. Zalety metody UHF spowodowały w ostatnich latach znaczny wzrost zainteresowania tą techniką i próby zastosowania jej do diagnostyki WZN papierowo olejowych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych [25]. Obok szeregu zalet cechujących tę metodę we współczesnej literaturze naukowej spotkać można również badania, których wyniki wskazują słabe strony metody UHF. Głównymi ograniczeniami metody UHF jest np. konieczność umieszczenia sondy wewnątrz obudowy transformatora, np. poprzez zawór spustowy oleju lub otwór rewizyjny (Rys.1), niejednoznaczność wyników pomiarowych, zwłaszcza w odniesieniu do szacowania intensywności zjawiska WZN (brak możliwości kalibracji) i konieczność identyfikacji zakłóceń zewnętrznych w paśmie UHF oraz umiejętność odseparowania sygnału użytecznego pochodzącego od WZN od zakłóceń zewnętrznych.



Rys.1. Widok ogólny sondy UHF podczas pomiarów WZN w transformatorze elektroenergetycznym

Otwartą sprawą pozostaje również interpretacja wyników pomiarów zawierających sygnały od wieloźródłowych WZN.

Największym problemem związanym ze wszystkimi metodami pomiaru WZN jest stochastyczność samego

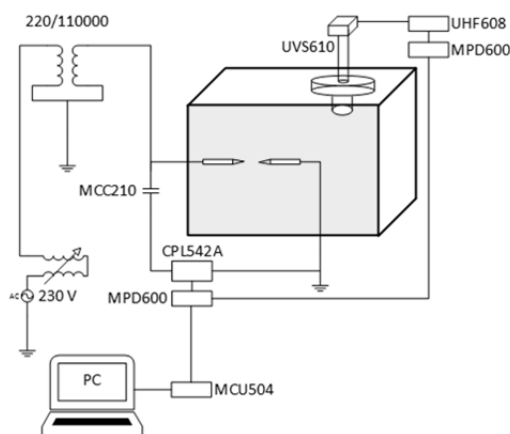
zjawiska WNZ. Najmniejsza zmiana warunków generacji WNZ powoduje znaczne zmiany w rejestrowanych wielkościach fizycznych. Taka sytuacja sprawia, że odpowiednia interpretacja otrzymanych wyników pomiarowych możliwa jest tylko wtedy gdy dysponujemy reprezentatywną bazą danych pomiarowych, z którą możemy porównać otrzymane wyniki, a więc pomiar w znacznej większości przypadków jest relatywny i może być różnie interpretowany w różnych warunkach.

W niniejszym artykule przeprowadzono gruntowną analizę możliwości, jakie dają współczesne narzędzia pomiarowe bazujące na metodzie UHF, dla celów detekcji i oceny zjawiska WNZ w oleju elektroizolacyjnym. Przedstawione badania mają charakter podstawowy i nakierowane są na pogłębienie wiedzy o WNZ oraz towarzyszącym im zjawiskom fizycznym. Zaproponowano ponadto metodologię prowadzenia pomiarów z wykorzystaniem omawianej metody, przedstawiono szereg reprezentatywnych wyników pomiarów i dokonano ich interpretacji oraz wskazano aspekty mogące stanowić uzupełnienie stosowanych obecnie technik detekcji i analizy WNZ. Podjęto także próbę identyfikacji jednoźródłowych WNZ w oparciu o wyniki pomiarowe uzyskane metodą UHF.

Charakterystyka układu pomiarowego

Badania prowadzone były w warunkach laboratoryjnych w laboratorium TWN Politechniki Opolskiej. Jako modelowe źródła generacji WNZ wybrano trzy iskierniki w układach ostrze-ostrze, wieloostre-płyta i powierzchniowym, symulujące typowe awarie układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych. Układ ostrze-ostrze pozwala modelować WNZ generowane przez pojedyncze uszkodzenia izolacji w dwóch sąsiednich zwojach w uzwojeniu, układ wieloostre-płyta – WNZ generowane między wielopunktowymi uszkodzeniami izolacji uzwojeń a uziemionymi powierzchniami płaskimi (ekran, kadź), układ powierzchniowy natomiast – WNZ na styku dielektryków stałych i ciekłych (papier-olej).

Źródło WNZ umieszczone było w stalowym zbiorniku wypełnionym mineralnym olejem elektroizolacyjnym, stosowanym w typowej izolacji papierowo olejowej transformatorów elektroenergetycznych. Układ zasilony był z transformatora pobierczego 220/110000 V/V sterowanego przy pomocy programowalnego pulpitu sterowniczego (Rys.1).



Rys.2. Schemat układu pomiarowego

W przypadku iskierników powierzchniowego i wieloostre-płyta uziemione były elektrody płaskie. Do pomiarów wykorzystano system MPD600 firmy Omicron skradający się z czujnika UHF, model UVS610,

przebiennika UHF608 i modułu MPD600 (Rys.2). Pasma przenoszenia czujnika UHF wynosiło od 150 MHz do 1 GHz, natomiast przebiennika UHF608 od 220 MHz do 850 MHz. Czujnik UHF, poprzez dedykowany zawór w obudowie zbiornika, umieszczony był bezpośrednio w oleju, po stronie niskiego potencjału. W celu dodatkowej izolacji aparatury pomiarowej od wysokiego napięcia zastosowano sygnałowe połączenia światłowodowe oraz zasilanie baterijne wszystkich aktywnych urządzeń. Dodatkowo, w celu precyzyjnej synchronizacji pomiarów metodą UHF z fazą napięcia zasilania, wykorzystano równoległe wpięty tor konwencjonalnej metody elektrycznej, który składał się z kondensatora pomiarowego MCC 210 o pojemności 1 nF, czwórnika sprzęgającego CPL542A, o pojemności 30 μ F (realizującego jednocześnie pomiar impedancji) i kolejnego modułu MPD600. Całość sterowana była z poziomu komputera poprzez moduł MPC, a wszystkie sygnały pomiarowe rejestrowane były w trybie „on-line” do celów dalszej obróbki i analizy. Górny zakres napięcia dla zastosowanego układu wynosił 100 kV.

Metoda prowadzenia badań

W celu przeprowadzenia pomiarów konieczne było ustalenie napięcia zapłonu U_i i napięcia przebiecia zastosowanego iskiernika U_b . Dla każdego z iskierników napięcia te wyznaczono eksperymentalnie i na ich podstawie określono zakresy napięć, przy których prowadzono pomiary. Napięcia zapłonu wyznaczone zostały na podstawie charakterystyk zależności wartości ładunku pozornego od narastającego napięcia, z wykorzystaniem konwencjonalnej metody elektrycznej, natomiast napięcia przebiecia wyznaczono na podstawie serii prób przebieciowych (wg zaleceń normy IEC60156). Znając te wartości można było następnie ustalić poziomy napięć, przy których prowadzone będą dalsze pomiary dla poszczególnych iskierników.

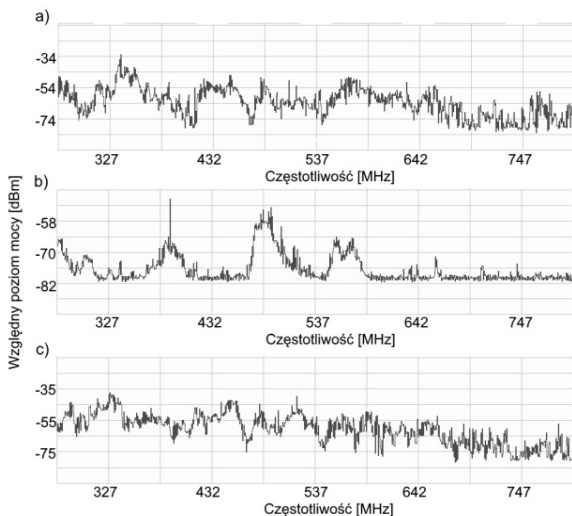
Częstotliwości pomiarowe zostały wybrane doświadczalnie, na podstawie pomiarów przesiewowych pasma UHF prowadzonych dla wybranych poziomów napięć gwarantujących generację WNZ (tu również wykorzystano dodatkowy tor metody elektrycznej) i porównania ich z poziomem tła. Procedurę tę powtórzono dla każdego iskiernika. Zastosowaną metodą analizy w zakresie pasma UHF była metoda wąskopasmowa, pozwalająca na bardzo selektywny pomiar w wąskim oknie pomiarowym. Szerokość okna całkowania ustawiona została na 1,5 MHz i była stała podczas całości badań.

Dla tak dobranych warunków metrologicznych przeprowadzono po 10 rejestracji przebiegów fazowo rozdzielczych dla każdego iskiernika przy wybranych poziomach napięć. Pomiary powtórzono dla wybranych charakterystycznych częstotliwości UHF. Każda pojedyncza rejestracja trwała 1 min. Na podstawie uzyskanej bazy danych wyznaczono charakterystyki zbiorcze wybranych deskryptorów przedstawiające uśrednione wartości maksymalnych amplitud napięcia UHF, średnich amplitud napięcia UHF oraz liczby zdarzeń w funkcji kąta fazowego napięcia zasilania, w odniesieniu do każdego iskiernika i wybranych częstotliwości pomiarowych. Analiza prowadzona była z rozdzielczością 1° – każdy przebieg dzielony był na 360 wektorów odpowiadających zdarzeniom WNZ mających miejsce w obrębie danego kąta fazowego.

Wyniki pomiarowe i dyskusja

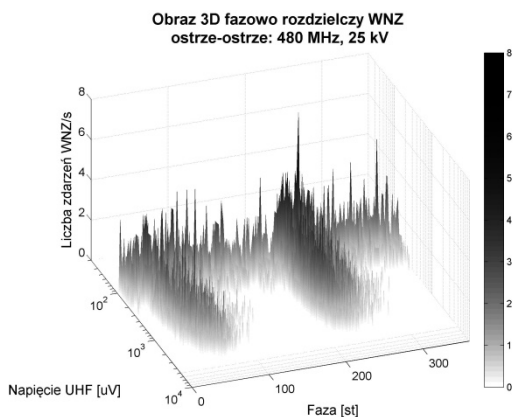
Pierwszym krokiem w prowadzeniu badań metodą UHF było określenie pasm największej aktywności podczas generacji WNZ dla każdego z wybranych iskierników (Rys.3). Najbardziej indywidualny charakter ma przebieg widmowy uzyskany dla iskiernika generującego

wyładowania powierzchniowe, widoczne są trzy dominujące zakresy częstotliwości, których częstotliwości środkowe wynoszą odpowiednio 385, 480 i 570 MHz. Mimo, że w przypadku widm zarejestrowanych dla układów ostrze-ostrze i wieloostre- płyta przebiegi nie są znacząco różne, to można zauważyć pewne indywidualne zależności, zwłaszcza w zakresie powyżej 560 MHz.



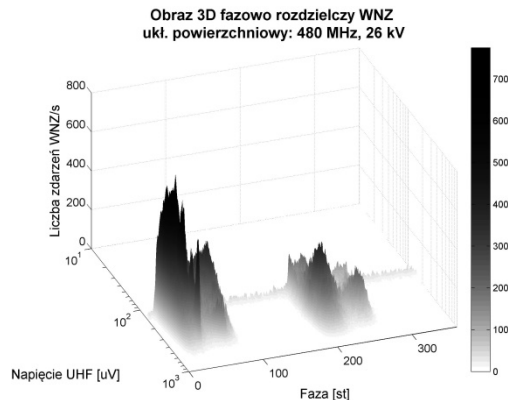
Rys.3. Widmo UHF podczas wyładowań przy napięciu $0,65 U_b$ dla iskiernika: a) ostrze-ostrze, b) powierzchniowego, c) wieloostre-płyta

Kolejny etap badań polegał na zarejestrowaniu, porównaniu i wskazaniu indywidualnych parametrów dla obrazów fazowo rozdzielczych uzyskanych dla każdego z analizowanych układów. Na rysunku 4 pokazano przykładowe przebiegi fazowe uzyskane dla iskiernika ostrze-ostrze. Zaznaczyć należy równy rozkład zdarzeń WNZ zarówno w dziedzinie amplitudy: między $0,1$ a 2 mV, jak i dziedzinie fazy: między ok. 30 a 80° w połowie dodatniej cyklu napięcia zasilania oraz odpowiadającym im kątom fazowym w połowie ujemnej, czyli między 210 a 260° . Jeżeli chodzi o intensywność zjawiska to większą częstotliwość zdarzeń WNZ odnotowano w ujemnym półokresie. Podobny charakter przebiegów odnotowano dla innych częstotliwości środkowych analizowanego okna pomiarowego UHF.



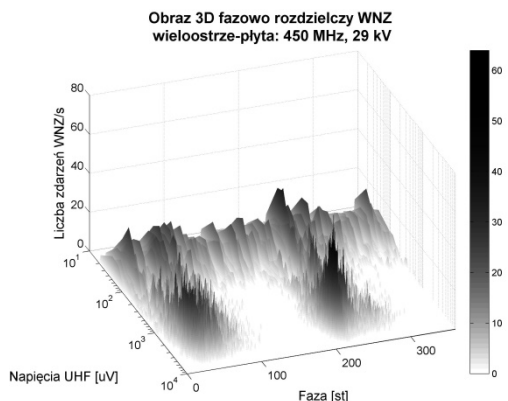
Rys.4. Obraz fazowo rozdzielczy dla iskiernika ostrze-ostrze przy napięciu $0,6 U_b$ dla częstotliwości 480 MHz

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy obraz fazowo rozdzielczy otrzymany dla układu generującego wyładowania powierzchniowe. Najbardziej istotnym wydaje się być fakt znacznie większej intensywności WNZ niż w poprzednim przypadku. Szczytowe częstotliwości zdarzeń WNZ osiągają wartości $700/s$ i mają miejsce w pierwszym, dodatnim półokresie. Częstotliwość zdarzeń WNZ w ujemnym półokresie jest znacznie mniejsza i zwykle nie przekracza wartości $350/s$. Na uwagę zasługują również wyraźnie widoczne dwa podzakresy aktywności WNZ w dziedzinie fazy, zarówno w dodatnim jak i ujemnym półokresie, leżące odpowiednio w zakresie $20-40^\circ$ i $60-80^\circ$ oraz $200-220^\circ$ i $240-260^\circ$. Rozkład WNZ w dziedzinie amplitudy wykazuje znacznie węższy zakres niż w przypadku iskiernika ostrze-ostrze i zawiera się między $0,2$ a $0,6$ mV i jest podobny w obu półokresach.



Rys.5 Obraz fazowo rozdzielczy dla iskiernika powierzchniowego przy napięciu $0,6 U_b$ dla częstotliwości 480 MHz

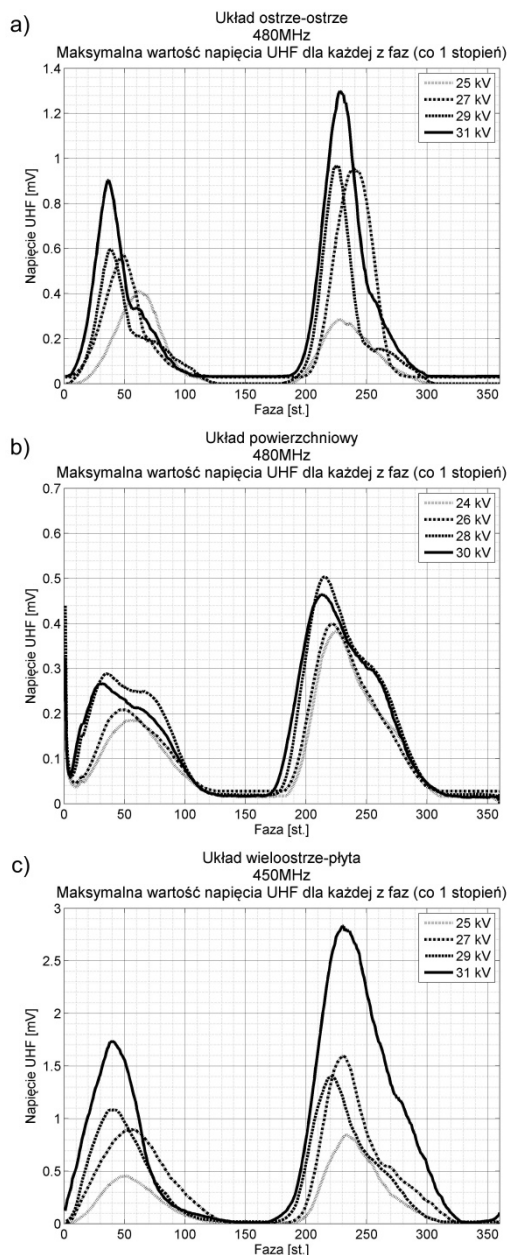
Przykładowe wyniki pomiarów WNZ z wykorzystaniem obrazów fazowo rozdzielczych dla iskiernika w układzie wieloostre-płyta przedstawiono na rysunku 6. Zarejestrowane przebiegi mają charakter bardzo punktowy; zarówno w dziedzinie fazy jak i amplitudy zakres występowania zdarzeń WNZ jest bardzo wąski i wynosi odpowiednio $20-40^\circ$ w dodatnim oraz $200-220^\circ$ w ujemnym półokresie i $0,7-1,2$ mV w dziedzinie amplitudy. Intensywność zjawiska jest porównywalna w obu półokresach i zawiera się między 35 a 60 WNZ/s z niewielką przewagą w ujemnym półokresie.



Rys.6. Obraz fazowo rozdzielczy dla iskiernika wieloostre-płyta przy napięciu $0,6 U_b$ dla częstotliwości 450 MHz

Na podstawie wszystkich zarejestrowanych przebiegów wyznaczono zbiorcze charakterystyki wybranych deskryptorów opisujących obrazy fazowe WNZ uzyskane metodą UHF dla badanych iskierników. Na rysunku 7

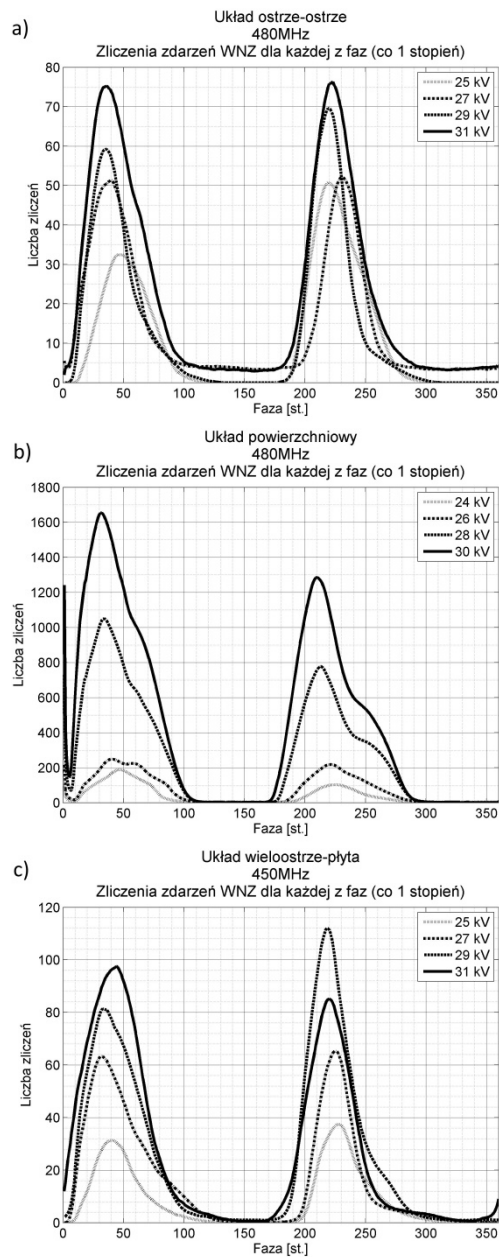
przedstawiono zależności uśrednionych maksymalnych wartości napięcia UHF w funkcji fazy przy wszystkich badanych wartościach napięcia zasilania, dla wybranej częstotliwości, w odniesieniu do każdego badanego iskiernika. Analizując uzyskane przebiegi, zauważyć można inny wpływ poziomu napięcia zasilania na maksymalną wartość napięcia UHF dla każdego iskiernika.



Rys.7. Zestawienia uśrednionych wartości maksymalnych napięcia UHF przy ustalonych poziomach napięć i dla wybranej częstotliwości, uzyskane dla iskiernika: a) ostrze-ostrze, b) powierzchniowego, c) wieloostrze-płyta

Najmniejsze zmiany prezentowanego deskryptora odnotować należy w przypadku iskiernika powierzchniowego, natomiast największy wpływ poziomu napięcia widoczny jest dla iskiernika wieloostrze-płyta. Znaczne różnice widoczne są również w odniesieniu do szerokości charakterystyk w dziedzinie fazy. W tym przypadku najwęższe zakresy - ok. 50° , dotyczą iskiernika ostrze-ostrze, podczas gdy dla dwóch pozostałych zakres wynosi około 100° . W przypadku wszystkich 3 układów największe wartości przebiegów odnotowano w ujemnych półokresach dla każdego z poziomów napięć.

Na rysunku 8 z kolei przedstawiono zależności uśrednionych wartości zliczeń zdarzeń WNZ w funkcji fazy przy wszystkich badanych wartościach napięcia zasilania, dla wybranej częstotliwości, w odniesieniu do każdego badanego iskiernika.



Rys.8. Zestawienia uśrednionych wartości zliczeń zdarzeń WNZ przy ustalonych poziomach napięć i dla wybranej częstotliwości, uzyskane dla iskiernika: a) ostrze-ostrze, b) powierzchniowego, c) wieloostrze-płyta

Największe liczby zdarzeń WNZ i jednocześnie największe zmiany tego parametru odnotowano dla iskiernika powierzchniowego. W przypadku dwóch pozostałych układów zarówno wpływ napięcia i zakres zmian jest bardzo podobny. We wszystkich analizowanych przypadkach liczba zdarzeń WNZ jest proporcjonalna do poziomu napięcia i rośnie wraz z jego wzrostem. Jeżeli chodzi o przebieg omawianych charakterystyk w dziedzinie fazy, to zakresy aktywności w obu półokresach są podobne dla wszystkich układów, z tym że w przypadku iskiernika powierzchniowego charakterystyki mają nieco mniejsze nachylenie.

Podsumowanie

Diagnostyka WNZ stanowi obecnie bardzo istotne ogniwo w łańcuchu dystrybucji energii elektrycznej. Mimo, że powszechnie znanych i stosowanych jest obecnie wiele metod pomiaru WNZ, wciąż trwają prace nad dalszym udoskonalaniem każdej z nich, zwłaszcza w aspekcie interpretacji wyników pomiarowych i upraszczania procedur pomiarowych.

Przeprowadzone badania wykonane zostały w warunkach laboratoryjnych, z zachowaniem określonych rygorów metrologicznych i mają charakter poglądowych badań podstawowych, mających na celu głównie pogłębienie wiedzy na temat WNZ oraz zjawisk fizycznych im towarzyszącym, co pozwoli na dokładniejszy opis tych zjawisk i może posłużyć w dalszej perspektywie do zastosowań w rzeczywistych układach detekcji i analizy WNZ. Przedstawione w artykule wyniki eksperymentalnych badań potwierdzają potencjalną możliwość zastosowania zaproponowanej metody do detekcji i analizy WNZ. Ponadto wykazano, że w określonych warunkach metrologicznych możliwa jest również identyfikacja wybranych, jednoźródłowych form WNZ z wykorzystaniem metody UHF.

Przeprowadzone do tej pory badania stanowią dobrą podstawę do dalszych prac badawczych związanych z modelowaniem charakterystyk wybranych form WNZ, identyfikacją wieloźródłowych WNZ oraz próbą zastosowania przedstawionej metody do pomiarów na obiektach rzeczywistych w normalnych warunkach eksploatacyjnych.

Podziękowania

Badania współfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu Preludium nr: 2015/19/N/ST8/03909

Autor: mgr inż. Michał Kunicki, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, Budynek 2, 45-578 Opole, e-mail: michal.kunicki@hotmail.com

LITERATURA

- [1] Hapeez M. S., Abidin A. F., Hashim H., Hamzah M. K., Hamzah N. R., Analysis and Classification of Different Types of Partial Discharges by Harmonic Orders, *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 19 (2013), n.9, 35–41
- [2] Yaacob M. M., Alsaedi M. A., Rashed J. R., Dakhil A. M., Atyah S. F., Review on Partial Discharge Detection Techniques Related to High Voltage Power Equipment Using Different Sensors, *Photonic sensors*, 4 (2014), n.4, 325–337
- [3] Kunicki M., Cichoń A., Characterization of surface type partial discharges using electrical, acoustic emission and UHF methods, *Measurement Automation Monitoring*, 61 (2015), n.01, 12–15
- [4] Boczar T., Cichoń A., Borucki S., Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21 (2014), n.2, 854–865
- [5] Kunicki M., Cichoń A., Borucki S., Study on Descriptors of Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges under Laboratory Conditions and in On-Site Electrical Power Transformer, *Archives of Acoustics*, 41 (2016), n.2, 265–276
- [6] Berger P., Cichoń A., Deskryptory sygnałów emisji akustycznej generowanych przez nowy podobciążeniowy przełącznik zaczepów zainstalowany w transformatorze elektroenergetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.1, 199–201
- [7] Sikorski W., Walczak K., PDtracker - system monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), n.10, 45–49
- [8] Equipment P., Equipment P., Equipment P., Based on the Fourier Transform Infrared, in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Montevideo, 2014, 14–18
- [9] Zhang X., Liu H., Ren J., Li J., Li X., Fourier transform infrared spectroscopy quantitative analysis of SF6 partial discharge decomposition components, *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136 (2015), 884–889
- [10] Yan J., Liao R., Yang L., Li J., Liu B., Product analysis of partial discharge damage to oil-impregnated insulation paper, *Applied Surface Science*, 257 (2011), n.13, 5863–5870
- [11] Amin E. M., Karmakar N. C., A Passive RF Sensor for Spectroscopy Simultaneous Partial Discharge Signals Using Time-Frequency Analysis, *IEEE Sensors Journal*, 16 (2016), n.8, 2339–2348
- [12] Müller A., Beltle M., Correlation of DGA, UHF PD Measurement and Vibration Data for Power Transformer Monitoring, in *Symposium on High Voltage Engineering, Hannover*, 2011
- [13] Wang Z., Yi X., Wang X., Li S., Hinshaw J. V., Noakhes J., Comparison between online and laboratory measurements of fault gases for mineral oil and natural ester, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 5 (2013), n.2, 173–181
- [14] Duval M., Lamarre L., The Duval Pentagon — A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30 (2014), n.6, 1–4
- [15] Sipahutar T. F., Kemma A. A., Pattanadech N., Pratomosiwi F., Suwarno, Muhr M., Effect of Test Method and Needle Plane Configuration on Partial Discharge Inception Voltage Measurement of Mineral Oil based on Weibull Analysis, *Procedia Technology*, 11 (2013), 411–418
- [16] Cavallini A., Montanari G. C., Tozzi M., PD apparent charge estimation and calibration: A critical review, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17 (2010), n.1, 198–205
- [17] Pompili M., Bartnikas R., On partial discharge measurement in dielectric liquids, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2012), n.5, 1476–1481
- [18] Kunicki M., Cichoń A., Time and frequency domain analysis of partial discharges using electrical method, *Measurement Automation Monitoring*, 62 (2016), n.2, 72–77
- [19] Reid A. J., Judd M. D., Duncan G., Simultaneous measurement of partial discharge using TEV, IEC60270 and UHF techniques, *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, (2012), 439–442
- [20] Zhang X. X., Tang J. Z., Tang J., Chen Y., Xie Y. B., Relationship between UHF PD Detection and Apparent Charge Quantity of Metal Protrusion in Air, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.4A, 266–270
- [21] Sarathi R., Reid A. J., Judd M. D., Partial discharge study in transformer oil due to particle movement under DC voltage using the UHF technique, *Electric Power Systems Research*, 78 (2008), n.11, 1819–1825
- [22] Zheng S., Li C., Tang Z., Chang W., He M., Location of PDs inside transformer windings using UHF methods, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21 (2014), n.1, 386–393
- [23] Robles G., Albarracán R., Martínez-Tarifa J., Shielding effect of power transformers tanks in the ultra-high-frequency detection of partial discharges, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (2013), n.2, 678–684
- [24] Asai M., Nishizawa K., Hayakawa N., Endo F., Yoshida M., Uchida K., Okubo H., Detail Analysis of Particle-Initiated Partial Discharges in SF6 Gas for Condition Monitoring of GIS, in *16th International Symposium on High Voltage Engineering, Johannesburg*, 2009, 1–5
- [25] Coenen S., Tenbohlen S., Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19 (2012), n.6, 1934–1940