

Konstrukcja anteny UHF typu PIFA do monitoringu wylądowań niezupełnych w transformatorze energetycznym

Streszczenie. W artykule przedstawiono prototypową konstrukcję anteny typu "odwrócone F" (PIFA) przeznaczoną do monitoringu wylądowań niezupełnych (wnz) w transformatorach energetycznych przy użyciu metody UHF. Konstrukcję anteny przystosowano mechanicznie do montażu w oknie dielektrycznym kadzi transformatora, a jej pasmo przenoszenia zostało zoptymalizowane do detekcji wylądowań niezupełnych występujących w izolacji papierowo-olejowej. Przeprowadzone testy laboratoryjne wykazały, że opracowana antena charakteryzuje się około dwukrotnie wyższą skutecznością detekcji wnz w porównaniu do standardowej anteny dyskowej.

Abstract. The paper presents design a prototype Planar Inverted-F Antenna (PIFA) designed for partial discharges (PD) monitoring in power transformers using the UHF method. The antenna structure was mechanically adapted for assembly in the dielectric window of the transformer tank, and its frequency response has been optimized for the detection of partial discharges occurring in paper and oil insulation. The laboratory tests carried out showed that the developed antenna has about twice the effectiveness of the PD detection comparing to the standard disk antenna. (**Construction UHF antenna PIFA type for partial discharges monitoring in power transformer**).

Słowa kluczowe: metoda UHF, antena PIFA, monitoring wylądowań niezupełnych, transformator energetyczny.

Keywords: UHF method, PIFA antenna, partial discharges on-line monitoring, power transformer.

Wstęp

Dane statystyczne dotyczące uszkodzeń i awarii katastrofalnych transformatorów energetycznych przedstawione w broszurze CIGRE nr 642 pt. *Transformer Reliability Survey* wskazują na defekty uzwojeń, jako główną przyczynę awarii transformatorów [1]. Odształcenia uzwojeń zwykle są skutkiem przepięć piorunowych lub łączeniowych. Siły dynamiczne towarzyszące prądom zwarciovym mogą przesunąć lub odształcić cewki i zmniejszyć przerwy olejowe pomiędzy nimi, co bezpośrednio skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości elektrycznej układu, szczególnie w obszarze, gdzie występuje wysokie natężenie pola. Sytuacja taka sprzyja inicjacji groźnego dla układu izolacyjnego transformatora zjawiska wylądowań niezupełnych. Zarządzający majątkiem sieciowym świadomi zagrożenia, jakie niesie ze sobą jego obecność, decydują się na kompleksowe wdrożenia systemów monitoringu ciągłego wnz, których działanie może być oparte na: (i) analizie gazów rozpuszczonych w oleju (DGA), (ii) detekcji sygnałów emisji akustycznej (EA) lub detekcji impulsów elektromagnetycznych w szerokim paśmie częstotliwości radiowych (HF/VHF/UHF) [2].

Monitoring transformatora przy użyciu metody UHF

W ostatnich kilkunastu latach coraz większe znaczenie zyskuje metoda ultra wysokich częstotliwości (UHF). Jej popularność wynika z szeregu zalet, z których najważniejsze to:

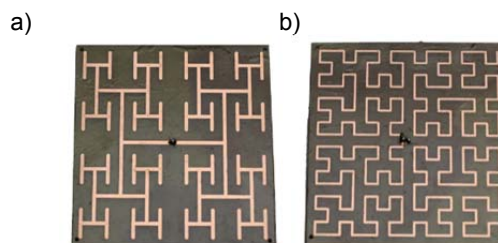
- wysoka czułość detekcji wylądowań niezupełnych,
- duża odporność na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne,
- możliwość przestrzennej lokalizacji źródeł wnz przy zastosowaniu co najmniej 4 sensorów pomiarowych,
- możliwość przeprowadzenia pomiaru na włączonym do ruchu transformatorze (instalując antenę w zaworze spustowym oleju),
- coraz większa liczba dostępnych na rynku kompletnych, zaawansowanych technologicznie systemów monitoringu opartych na metodzie UHF,
- ciągły rozwój i doskonalenie metody przez ośrodki naukowo-badawcze.

W kraju metoda UHF jest od kilku lat rozwijana w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej [2-4]. W tym roku wdrożony zostanie pierwszy, opracowany

wspólnie z firmą MIKRONIKA, system monitoringu wnz w transformatorze energetycznym, którego działanie oparte jest na równoczesnym wykorzystaniu trzech metod: EA, HF i UHF. Według stanu na dzień dzisiejszy, metodą UHF monitoruje się jedynie dwa dławiki kompensacyjne zainstalowane na linii 400 kV. Zgodnie jednak z wymaganiami Polskich Sieci Elektroenergetycznych, wszystkie nowe autotransformatory najwyższych napięć muszą być konstrukcyjnie przystosowane do montażu anten UHF wprowadzanych do wnętrza kadzi przy użyciu co najmniej dwóch specjalnych "okien dielektrycznych". Specyfikacja techniczna dopuszcza również alternatywne rozwiązania polegające na wykorzystaniu w tym celu otworów rewizyjnych zakrywanych pokrywami z materiału dielektrycznego [5].

Przegląd konstrukcji anten stosowanych do detekcji impulsów wnz w paśmie UHF

W literaturze napotkać można wiele publikacji omawiających różne rodzaje anten przeznaczonych do detekcji wnz w paśmie UHF, przy czym w ostatnich kilku latach najczęściej badanymi i rozwijanymi konstrukcjami były mikropaskowe anteny fraktalne [2-4,6-10]. Przykładowe konstrukcje takich anten zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe konstrukcje mikropaskowych anten fraktalnych do detekcji wylądowań niezupełnych o geometrii opartej na krzywej typu H (a) oraz krzywej Hilberta (b)

Mikropaskowe anteny fraktalne, dzięki swoim licznym zaletom, stanowią ciekawą alternatywę dla powszechnie stosowanych w systemach komercyjnych anten dyskowych. Za ich najważniejsze walory użytkowe uważa się możliwość miniaturyzacji rozmiarów przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej sprawności. Wynika to z cechy samopodobieństwa

fraktali, która pozwala na skuteczniejsze wypełnienie przestrzeni zajmowanej przez antenę, obniżenie częstotliwości rezonansowej w stosunku do anten o tradycyjnym kształcie i podobnych wymiarach, czy na tworzenie konstrukcji wielorezonansowych o szerokim paśmie przenoszenia. Inną ważną zaletą mikropaskowych anten fraktalnych, szczególnie z ekonomicznego punktu widzenia, jest możliwość ich wykonania przy użyciu techniki PCB, co znacznie przyspiesza proces prototypowania oraz obniża koszty produkcji. Niestety, anteny fraktalne, podobnie jak inne alternatywne konstrukcje (np. anteny kołowo-krzyżowe, spiralne) charakteryzują się niewiele wyższym od anten dyskowych zyskiem energetycznym.

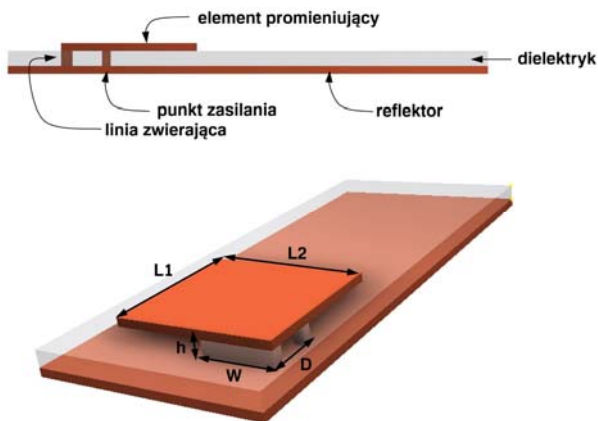
Dlatego w celu opracowania czułego detektora wnz pracującego w paśmie UHF, autorzy poddali analizie najnowsze konstrukcje anten GSM stosowanych w nowoczesnych urządzeniach mobilnych. Anteny GSM pomimo niewielkich rozmiarów charakteryzują się bardzo wysoką skutecznością oraz szerokim pasmem przenoszenia. Analizując różne rozwiązania konstrukcyjne anten GSM, autorzy skupili swoją uwagę na standardowych oraz modyfikowanych konstrukcjach planarnych typu „odwrócone F” (*ang. PIFA – Planar Inverted F Antenna*).

Antena mikropaskowa typu PIFA

Konwencjonalna konstrukcja planarna typu "odwrócone F", której schemat ideowy przedstawiono na rysunku 2, jest anteną wąskopasmową a jej częstotliwość rezonansową można w przybliżeniu wyznaczyć korzystając z poniższej zależności:

$$(1) \quad f = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_r}(L1 + L2 - W)}$$

gdzie: c – prędkość fali elektromagnetycznej, ϵ_r – względna przenikalność elektryczna, $L1$, $L2$ – długość i szerokość elementu promieniującego, W – szerokość linii zwierającej.



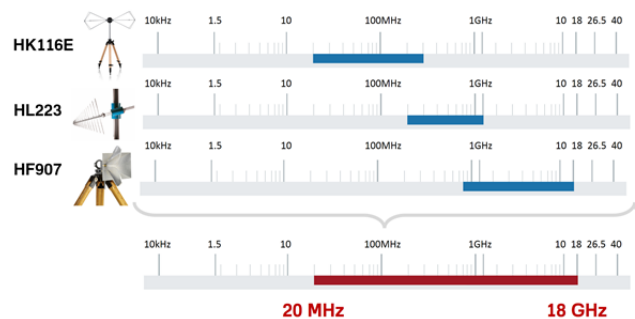
Rys.2. Konwencjonalna konstrukcja anteny PIFA

W celu zapewnienia wielopasmowości anteny PIFA, do jej konstrukcji wprowadza się dodatkowe elementy rezonansowe [11-13]. Analogiczny efekt można uzyskać poprzez wprowadzenie pasożytniczych płaszczyzn o długościach odpowiadających rezonansowym pasmom częstotliwości, w których wymagana jest poprawna przepustowość sygnału [14, 15]. Dodanie jednej lub kilku szczelin w płaszczyźnie reflektora może przyczynić się do poprawy odbioru sygnałów o niższej częstotliwości [16,17]. Z kolei wykonanie podobnych szczelin w płaszczyźnie promiennika pozwala wydatnie zwiększyć szerokość pasma przenoszenia [18]. Jeszcze innym sposobem na uzyskanie

szerokopasmowego charakteru anteny jest zastosowanie wielowarstwowych rezonatorów, które umieszcza się pomiędzy promiennikiem a reflektorem [19]. Ponadto, niektórzy autorzy proponują równoczesne wprowadzenie kilku z opisanych wyżej zmian konstrukcyjnych w stosunku do standardowej konfiguracji typu "odwrócone F" [20].

Częstotliwość sygnałów UHF generowanych przez wnz w izolacji papierowo-olejowej

W publikacjach [21, 22] zamieszczono wyniki analizy częstotliwościowej sygnałów radiowych generowanych przez wnz w izolacji papierowo-olejowej. Ponieważ rejestracji impulsów dokonywano przy użyciu anten wąskopasmowych lub wielorezonansowych, dlatego uzyskane wyniki analiz częstotliwościowych wyraźnie różnią się między poszczególnymi publikacjami. Dlatego autorzy zdecydowali się wykonać badania, w których sygnały UHF pochodzące od wnz rejestrowano przy użyciu szerokopasmowych anten badawczych typu *HK116*, *HL223*, *HF907* produkcji firmy *Rohde&Schwarz*. Równoczesne wykorzystanie trzech anten pozwoliło na rejestrację impulsów wnz w bardzo szerokim paśmie częstotliwości radiowych zawartym z zakresie od 20 MHz do 18 GHz (rys.3).



Rys.3. Zestawienie częstotliwościowych zakresów pracy szerokopasmowych anten badawczych użytych do rejestracji impulsów wnz występujących w izolacji papierowo-olejowej

Do badań wytypowano pięć, typowych dla układu izolacyjnego transformatora, defektów generujących wyładowania niezupełne: (i) ślizgowe, (ii) powierzchniowe, (iii) w klinie olejowym, (iv) w pęcherzykach gazowych oraz (v) wyładowania z ostrza w oleju.

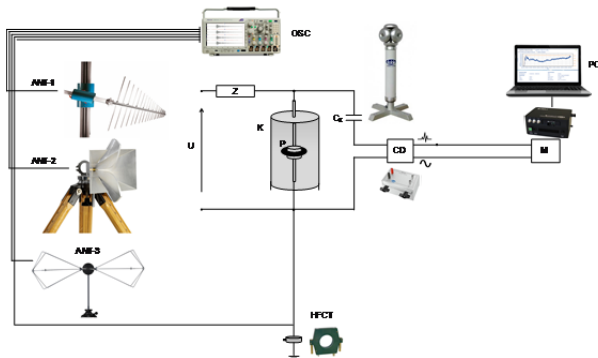
W tym celu przygotowano różne konfiguracje elektrod i próbki izolacji celulozowej, które następnie umieszczano w szklanej, cylindrycznej komorze badawczej wypełnionej olejem mineralnym (rys.4).



Rys.4. Zdjęcie komory badawczej wypełnionej olejem mineralnym (a) oraz układu elektrod do generacji wnz w klinie olejowym (b)

Anteny badawcze zostały rozstawione w odległości trzech metrów od źródła wnz. Sygnały radiowe pochodzące od wyładowań niezupełnych rejestrowano równocześnie trzema antenami, przy czym proces akwizycji uruchamiany był sygnałem z przekładnika prądowego wysokiej

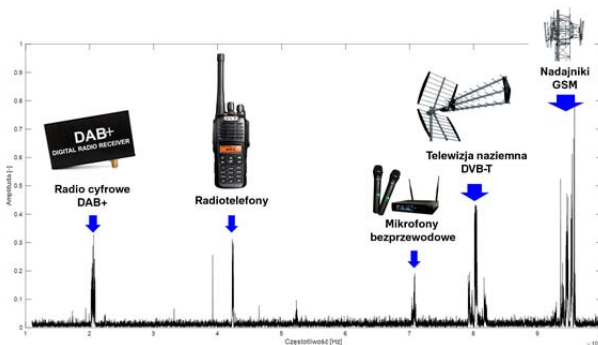
częstotliwości zainstalowanego na przewodzie uziemiającym układ elektrod. Impulsy wyładowań niepełnych generowano przy napięciu od 14 kV do 30 kV, a ich energię monitorowano przy użyciu standardowego miernika zgodnego z normą PN-EN 60270. W zależności od typu badanego wnz oraz poziomu napięcia przyłożonego do układu elektrod, wartość ładunku pozornego oscylowała w granicach od 140 pC (dla wnz w pęcherzykach gazowych) do 6750 pC (dla wnz w klinie olejowym). Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego: ANT-1 – antena typu R&S HL223 (pasmo: 20-300 MHz), ANT-2 – antena typu R&S HF907 (pasmo: 0,8-18 GHz), ANT-3 – antena typu R&S HK116 (pasmo: 0,2-1,3 GHz), HFCT – przekładnik prądowy wysokiej częstotliwości typu RFCT-4, OSC – oscyloskop, U – źródło napięcia, Z – filtr, K – komora badawcza, P – defekt, C_k – pojemność wzorcowa, CD – układ sprzęgający, M – miernik zgodny z normą 60270, PC – komputer

Ponieważ badań eksperymentalnych, głównie z powodu trudności logistyczno-technicznych, nie udało się przeprowadzić w komorze bezodbiorniczej, dlatego w pierwszej kolejności podjęto próbę zidentyfikowania wszystkich źródeł interferencji elektromagnetycznych mogących zakłócić detekcję i interpretację sygnałów pochodzących od wnz. Analiza częstotliwościowa tła radiowego (rys.6) wykazała, że wąskopasmowe sygnały zakłócające pochodziły przede wszystkim od:

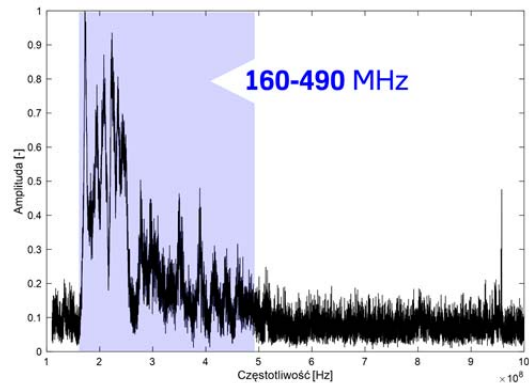
- nadajników cyfrowego radia DAB+,
- radiotelefonów,
- mikrofonów bezprzewodowych,
- nadajników telewizji naziemnej DVB-T,
- nadajników telefonii komórkowej.



Rys.6. Źródła interferencji radiowych zidentyfikowanych w laboratorium wysokiego napięcia

Analiza częstotliwościowa sygnałów badanego rodzaju wnz wykazała, że niemal cała ich energia przenoszona jest w paśmie od 160 MHz do 490 MHz. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg uśrednionego i znormalizowanego widma FFT opracowanego dla

zarejestrowanych impulsów wnz, natomiast w tabeli 1 zestawiono zakresy pasm częstotliwościowych poszczególnych rodzajów wnz.



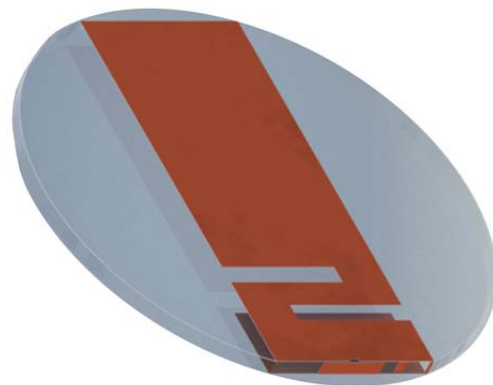
Rys.7. Uśrednione i znormalizowane widmo częstotliwościowe uzyskane dla badanych typów wyładowań niepełnych

Tabela 1. Zakresy pasm częstotliwościowych badanych rodzajów wnz generowanych w izolacji papierowo-olejowej

Rodzaj wnz	Pasmo częstotliwościowe [MHz]
Ślizgowe	200-480
Powierzchniowe	180-490
Klin olejowy	170-390
Pęcherzyki gazowe	160-260
Ostrze w oleju	190-390

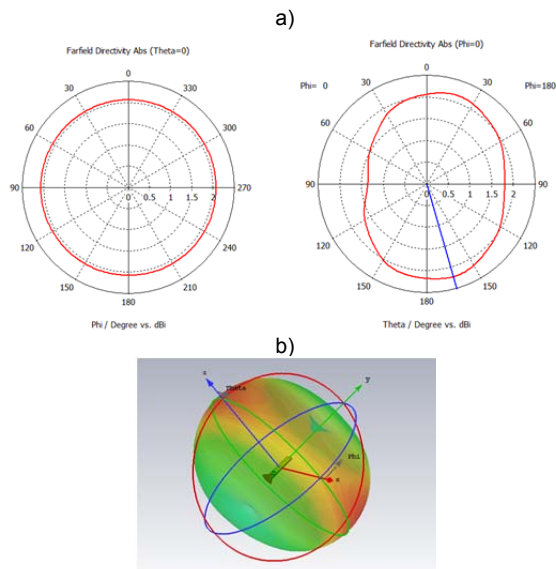
Projekt i wykonanie anteny typu PIFA zoptymalizowanej do detekcji wnz w transformatorze energetycznym

W oparciu o uzyskane wyniki badań modelowych oraz wytyczne dotyczące maksymalnych wymiarów włączonych w rezerwację i okien dielektrycznych, przyjęto następujące założenia projektowe: (i) maksymalny wymiar anteny nie powinien przekraczać 150 mm, (ii) pasmo pracy anteny powinno pokrywać zakres od 160 do 490 MHz, przy czym częstotliwość rezonansowa powinna wynosić ok. 300-350 MHz, (iii) czułość detekcji wnz powinna być zdecydowanie wyższa od standardowej anteny dyskowej o tej samej średnicy. W procesie projektowania i optymalizacji parametrów anteny, takich jak charakterystyka promieniowania i współczynnik fali stojącej VSWR, posłużono się programem CST Microwave. Na podstawie wyników symulacji wybrano konstrukcję anteny o średnicy 150 mm, której schemat pokazano na rysunku 8.



Rys.8. Schemat prototypowej konstrukcji anteny do monitoringu wyładowań niepełnych

Opracowana konstrukcja posiada dookólną charakterystykę promieniowania (rys.9), co gwarantuje skuteczny odbiór sygnału radiowego wnz niezależnie od położenia defektu (kierunku nadejścia sygnału).

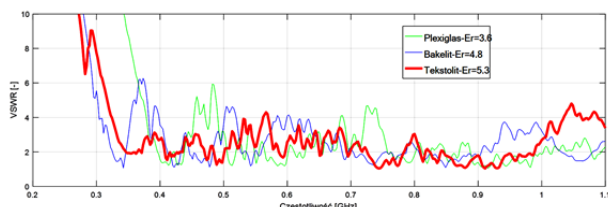


Rys.9. Charakterystyka promieniowania poziomego i pionowego (a) oraz charakterystyka promieniowania anteny w przestrzeni trójwymiarowej (b)

Opracowując prototypową konstrukcję zbadano również wpływ zastosowanego materiału dielektrycznego na charakterystykę przenoszenia anteny. W tym celu przetestowano materiały dielektryczne o różnej wartości względnej przenikalności elektrycznej, tj.:

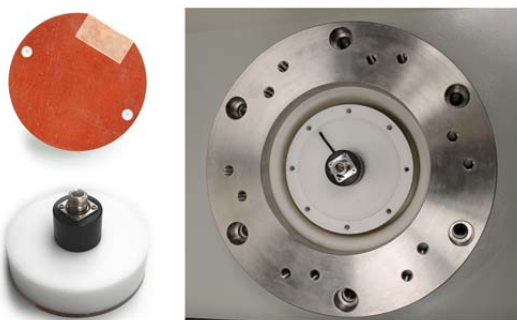
- plexiglas ($\epsilon_r = 3,6$),
- bakelit ($\epsilon_r = 4,8$),
- tekstolit ($\epsilon_r = 5,3$).

Analizując przebiegi charakterystyk VSWR (rys.10) można zauważyć, że rodzaj zastosowanego materiału dielektrycznego znajdującego się pomiędzy elementem promieniującym a reflektorem w istotny sposób wpływa na parametry pracy anteny. W tym przypadku, najszersze pasmo przenoszenia oraz najbardziej płaską charakterystykę uzyskano dla tekstolitu, czyli materiału o najwyższej wartości współczynnika ϵ_r .



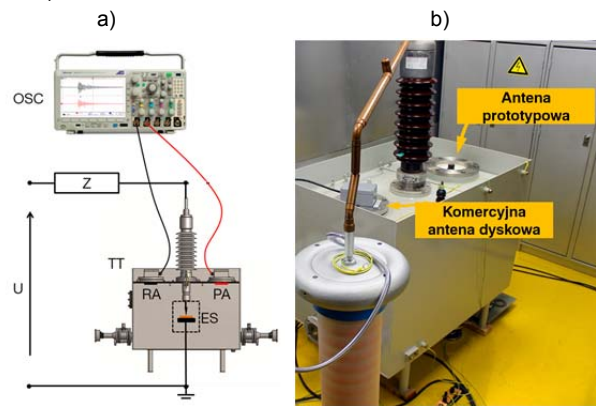
Rys.10. Wpływ zastosowanego materiału dielektrycznego na kształt charakterystyki VSWR

Wykonane prototypy anten wyposażono w obudowę ułatwiającą instalację w oknie dielektrycznym oraz złącze sygnałowe w.c.z. typu N (rys. 11).



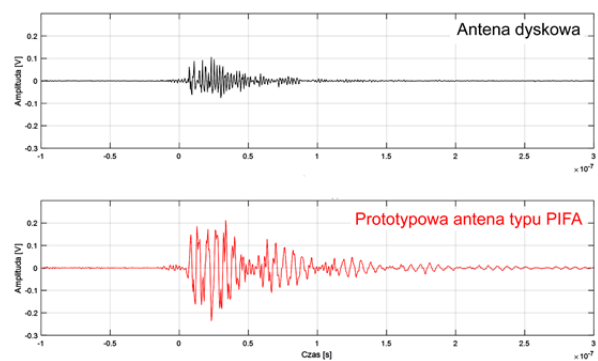
Rys.11. Prototypowa antena UHF przystosowana do montażu w oknie dielektrycznym transformatora energetycznego

Ostatni etap badań laboratoryjnych miał na celu wykazanie, czy prototypowa antena oparta na zmodyfikowanej konstrukcji typu "odwrócone F" jest wydajniejsza od standardowej anteny dyskowej. Badania wykonano przy użyciu modelu kadzi transformatora wyposażonego w dwa okna dielektryczne, symetrycznie rozmieszczone względem izolatora przepustowego. Referencyjna, komercyjna antena dyskowa o średnicy 150 mm oraz antena prototypowa znajdowały się w tej samej odległości (ok. 60 cm) od układu elektrod, w którym generowano wyładowania ślizgowe na próbce preszpanu (rys.12).



Rys.12. Schemat ideowy (a) oraz zdjęcie stanowiska badawczego (b): U – źródło napięcia, Z – filtr, OSC – oscyloskop, TT – model kadzi transformatora wypełniony olejem mineralnym, RA – komercyjna antena dyskowa, PA – prototypowa antena typu PIFA, ES – układ elektrod do generacji wznz ślizgowych

Analiza zarejestrowanych przebiegów czasowych wykazała, że impulsy zarejestrowane anteną prototypową mają ok. dwukrotnie wyższą amplitudę niż impulsy rejestrowane komercyjną anteną dyskową (rys. 13).



Rys.13. Porównanie przebiegów czasowych impulsów wznz ślizgowych zarejestrowanych komercyjną anteną dyskową oraz prototypową anteną typu PIFA

Podsumowanie

W publikacji przedstawiono konstrukcję oraz wyniki testów laboratoryjnych prototypowej, szerokopasmowej anteny typu "odwrócone F". Konstrukcja anteny została zoptymalizowana do detekcji wznz generowanych w izolacji papierowo-olejowej oraz przystosowana mechanicznie do instalacji w oknie dielektrycznym kadzi transformatora energetycznego. Antena charakteryzuje się płaską i szeroką charakterystyką przenoszenia (od 320 MHz do 1 GHz) i ok. dwukrotnie wyższą czułością detekcji wyładowań niepełnych w porównaniu do standardowej anteny dyskowej.

Artykuł finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Programu Badań Stosowanych w ramach projektu PBS3/A4/12/2015 pt. "System monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym oparty na wykorzystaniu metod EA, HF i UHF.

Autorzy: mgr inż. Cyprian Szymczak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: cyprian.szymczak@put.poznan.pl ; dr inż. Wojciech Sikorski, E-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl , dr hab. inż. Krzysztof Siodła prof. PP, E-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl, dr inż. Michał Grabia E-mail: michal.grabia@ilim.poznan.pl, Wyższa Szkoła Logistyki w Poznaniu, ul. Estkowskiego 6, 61-755 Poznań

LITERATURA

- [1] WG A2.37, Brochure 642, Transformer reliability survey, December 2015
- [2] Szymczak C., Sikorski W., Projektowanie i optymalizacja anten do monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2016, 75-79
- [3] Sikorski W, Szymczak C., Siodła K., Polak F., Hilbert curve fractal antenna for detection and on-line monitoring of partial discharges in power transformers. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (3): 343–351
- [4] Szymczak C., Sikorski W., Analiza wybranych konstrukcji i parametrów anten UHF do monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Poznan University of Trchnology Academic Journals. Electrical Engineering*, Poznań 86/2016, 415-424
- [5] Standardowa specyfikacja techniczna, Autotransformatory 220/110 kV, 400/220 kV, 400/110 kV, Wymagania konstrukcyjne, eksploatacyjne i próby, PSE, Konstancin-Jeziorna, 12/2014
- [6] Albarracin R., Ardila-Rey A. J., Mas'ud A. A., On the Use of Monopole Antennas for Determining the Effect of the Enclosure of Power Transformers Tank in Partial Discharges Electromagnetic Propagation, *Sensors*, 16/2016 1-18
- [7] Zhang J., Zhu M., Liu Q., Shao X., He W., Yao H., Design and Development of Internal UHF Sensor for Partial Discharge Detection in GIS, *IEEE Conference*, 12/2016, 709-712
- [8] Gonzalez-Posadas V., Segovia-Vargas D., Rajo-Iglesias E., Vazquez-Roy J.L., Martin-Pascual C., Approximate Analysis of short-circuited Ring Patch Antenna Working at TM₀₁ Mode, *IEEE Antennas and Propagation Society*, 06/2016, 1875-1879
- [9] Lopez-Roland J., Tang T., Gaskin M., Optimization of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharges in Power transformers by the UHF Method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11/2008, 1634-1639
- [10] Yao C., Chen P., Huang C., Chen Y., Qiao P., Study on the Application of an Ultra-High-Frequency Fractal Antenna to Partial Discharge Detection in Switchgears, *Sensors* 12/2013, 17362-17378
- [11] Bhatti R. A., Im Y., Park S., Compact PIFA for mobile terminals supporting cellular and non-cellular standards, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57/2009, 2534–2540
- [12] Guo Y., Chia M. Y. W., Chen Z. N., Miniature built-in multiband antennas for mobile handsets, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52/2004, 1936–1944
- [13] Chiu C. W., Lin F. L., Compact dual-band PIFA with multi-resonators, *IEE Electronics Letters*, 38/2002, 538–540
- [14] Karkkainen M. K., Meander multiband PIFA with coplanar parasitic patches, *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, 15/2005, 630–632
- [15] Cho Y. J., Hwang S. H., Park S. O., A dual-band internal antenna with a parasitic patch for mobile handsets and the consideration of the handset case and battery, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4/2005, 429–432
- [16] Picher C., Anguera J., Cabedo A., Puente C., Kahng S., Multiband handset antenna using slots on the ground plane: considerations to facilitate the integration of the feeding transmission line, *Progress In Electromagnetics Research*, 7/2009, 95–109
- [17] Anguera J., Sanz I., Mambu J., Puente C., Multiband handset antenna with a parallel excitation of PIFA and slot radiators, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58/2010, 348–356
- [18] Martinez-Vazquez M., Litschke O., Geissler M., Heberling D., Martinez-Gonzalez A. M., Sanchez-Hernandez D., Integrated planar multiband antennas for personal communication handsets, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54/2006, 384–391
- [19] Byndas A., Hossa R., Bialkowski M. E., Kabacik P., Investigations into operation of single- and multi-layer configurations of planar inverted-F antenna, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49/2007, 22–33
- [20] Gomez-Villanueva R., Linaresy Miranda R., Tirado-Mendez J., Jardon-Aguilar H., Ultra-wideband planar inverted-F antenna (PIFA) for mobile phone frequencies and ultra-wideband applications, *Progress In Electromagnetics Research*, 43/2013, 109-120
- [21] Raja K., Devaux F., Lelaidier S., Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures, *Electrical Insulation Magazine, IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 8-14
- [22] Jahangir H., Akabari A., Werle P., UHF characteristics of different types of PD sources in power transformers, *IEEE Conference Tehran, Iran*, 2017, 1242-1247