

Projektowanie i optymalizacja anten UHF do monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym

Streszczenie. Artykuł ma na celu przybliżyć tematykę projektowania i optymalizacji anten UHF wykorzystywanych do monitoringu wyładowań niezupełnych (wnz) występujących w wysokonapięciowym układzie izolacyjnym transformatora energetycznego. Przedstawione zostały różne konstrukcje płaskich anten UHF, przystosowanych do montażu w oknie rewizyjnym transformatora. Dla opracowanych prototypów wyznaczono podstawowe parametry takie jak: zysk anteny, kierunkowość i napięciowy współczynnik fali stojącej (VSWR). Ponadto w laboratorium wysokich napięć w układzie modelowym kadzi transformatora wykonano testy, których wyniki posłużyły do oceny czułości detekcji wnz opracowanych prototypów.

Abstract. Article aims to introduce the subject of design and optimization of UHF antennas used for partial discharge (PD) monitoring in power transformers. There were presented different designs of flat UHF antennas - suitable for installation in the dielectric window of transformer tank. For developed prototypes the set of basic parameters such as antenna gain, directivity and voltage standing wave ratio (VSWR) were obtained. In addition, the high voltage tests in a model of transformer tank were performed. The investigation results were used to assess the PD detection sensitivity of developed UHF antennas. (**Design and optimization of UHF antennas for partial discharge monitoring in power transformer**).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, monitoring transformatorów, anteny UHF.

Keywords: partial discharges, power transformer online monitoring, UHF antennas.

Wstęp

Transformator energetyczny w czasie swojej pracy jest często narażony na obciążenia elektryczne i termiczne, które mogą prowadzić do degradacji jego układu izolacyjnego. Według doniesień zawartych w wydanej przez CIGRE broszurze pt. *Transformer reliability survey*, główną przyczyną awarii transformatorów dużej mocy jest uszkodzenie uzwojeń oraz izolacji głównej [1]. Defekty mechaniczne (odkształcenia uzwojeń) i osłabienie właściwości elektroizolacyjnych mogą doprowadzić do inicjacji zjawiska wyładowań niezupełnych.

Obecnie obserwuje się trend polegający na wdrażaniu różnych systemów monitoringu wnz w celu wykrycia, śledzenia i ostrzegania przed rozwijającymi się defektami układu izolacyjnego. Systemy te najczęściej działają w oparciu o jedną z trzech szeroko rozpowszechnionych i stosunkowo dobrze rozwiniętych i dopracowanych metod diagnostycznych, tj.: (i) analizy gazów rozpuszczonych w oleju (metoda DGA), (ii) detekcji fali emisji akustycznej (metoda EA), oraz (iii) rejestracji fali elektromagnetycznej (metody elektromagnetyczne HF/VHF/UHF).

Metody elektromagnetyczne detekcji wnz są obecnie bardzo intensywnie rozwijane, zaś największe nadzieje w przypadku transformatorów energetycznych wiąże się z metodą ultra wysokiej częstotliwości (UHF). W metodzie tej jako detektory wyładowań niezupełnych wykorzystuje się anteny (pracujące zwykle w paśmie do 1-2 GHz) instalowane w zaworze spustowym lub oknie inspekcyjnym kadzi transformatora.

Projektowanie anten do detekcji wnz w paśmie UHF – wymagania ogólne

Układy do wykrywania wyładowań niezupełnych przy użyciu radiowych fal decymetrowych stały się ostatnio przedmiotem intensywnych badań z powodu swojej względnie wysokiej czułości i odporności na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne. Aby skutecznie wykrywać sygnały wyładowań niezupełnych, należy sprecyzować pożądane parametry elektryczne oraz mechaniczne anten detekcyjnych. Parametry te stanowią punkt wyjścia do zaprojektowania anteny optymalnej dla rozważanego zastosowania. Jednym z podstawowych parametrów anteny jest jej *pasmo pracy*. W przypadku wyładowań niezupełnych jest ono określone przez widmo częstotliwościowe

generowanych przez nie sygnałów wysokiej częstotliwości. Opis charakterystyk elektrycznych sygnałów pochodzących od wnz można znaleźć m.in. w pracach [2-7]. Gęstość widmowa sygnałów zależy od wielu czynników i jest dość zmienna. Górna granica częstotliwości może sięgać nawet 3 GHz, jednak powszechnie uznaje się, że do obserwacji wyładowań wystarczy pasmo ograniczone od góry do 1,5 GHz. Za dolną granicę uznaje się zwykle częstotliwość 300 MHz. Obserwuje się pewne maksima dla wyróżnionych częstotliwości widma sygnału pochodzącego od wyładowań, na przykład w okolicach 850 MHz czy 1 GHz. Pożądane byłoby zatem, aby antena w miarę możliwości miała jak najszersze pasmo pracy, szczególnie w przypadku stosowania jej do dokładniejszych badań sygnałów wyładowań. Do zastosowań polegających na wykryciu wyładowań niezupełnych w transformatorach wystarczą anteny wąskopasmowe pracujące na określonych częstotliwościach. Anteny wąskopasmowe mogą mieć pewne zalety (np. mechaniczne), które sprawiają, że będą one preferowane w niektórych przypadkach.

Kolejnym parametrem anteny jest *impedancja wejściowa*. Ze względu na połączenia wykonane kablami koncentrycznymi, użyte złącza, impedancję wejść wzmacniaczy oraz sprzęt pomiarowy wykorzystywany do kontroli parametrów, impedancja wejściowa anteny powinna być równa lub zbliżona do 50 Ω. Jest to standard przyjęty powszechnie w radiokomunikacji. Stopień dopasowania impedancyjnego określa się za pomocą *napięciowego współczynnika fali stojącej VSWR* (ang. *Voltage Standing Wave Ratio*) lub *strat odbicia RL* (ang. *return loss*).

Dla anten nadawczo-odbiorczych w systemach półprofesjonalnych przyjmuje się wartość VSWR = 2 (RL = 9,5 dB), co oznacza, że 11,1% mocy odbije się od wejścia anteny (sygnał zmaleje o 0,5 dB). W praktyce np. dla anten w telefonach komórkowych powszechnie przyjętą granicą jest VSWR = 2,5 lub RL = 7,4 dB (odbicie 18,4% mocy od wejścia anteny lub wzrost tłumienia sygnału o 0,9 dB). Dla anten odbiorczych, służących na przykład do monitoringu widma elektromagnetycznego, wartością akceptowalną jest jeszcze VSWR = 3 lub RL = 6 dB (odbicie 25% mocy lub tłumienie sygnału równe 1,25 dB). Tłumienie sygnału rzędu 3 dB jest akceptowalne w przypadku detekcji wyładowań, szczególnie wtedy, jeśli stosuje się wzmacniacz

podnoszący poziom mocy odbieranych sygnałów. Należy tu zwrócić uwagę, że na impedancję wejściową anteny bardzo wpływa bezpośrednio otoczenie anteny (szczególnie obiekty wykonane z materiałów przewodzących).

Antena posiada również *charakterystykę promieniowania* oraz powiązany z nią parametr zwany *zyskiem energetycznym*. W przypadku anten umieszczonych wewnątrz transformatora pożądanym jest użycie konstrukcji posiadających, przynajmniej w jednej płaszczyźnie, dookólną charakterystykę promieniowania. Dla anten umieszczonych w specjalnym oknie dielektrycznym kadzi transformatora, charakterystyka promieniowania powinna być bardziej kierunkowa i wykazywać maksimum promieniowania w stronę okna. Dzięki temu nastąpi zwiększenie zysku energetycznego i wzrost czułości detektora wyładowań (wzrost wartości zysku energetycznego oznacza zwiększenie napięcia na zaciskach anteny przy tym samym natężeniu pola elektrycznego odbieranej fali). Z wartością zysku energetycznego jest bezpośrednio związana poprawka antenowa, która może być użyteczna w przypadku badań bezwzględnych wartości natężenia pola elektrycznego w transformatorze.

Antena zastosowana w transformatorze energetycznym powinna spełniać również inne wymagania. Można do nich zaliczyć odporność na wysoką temperaturę rzędu 80-90°C, odporność na szkodliwe działanie oleju (warunek stawiany antenom zanurzonym w oleju) czy odporność na wibracje mechaniczne. Antena umieszczona w oknie dielektrycznym powinna być, w miarę możliwości, ekranowana od otoczenia. Ekranowanie powinno zmniejszyć poziom sygnałów zakłócających (radiofonia, telewizja, systemy telefonii komórkowej itp.). Ograniczenia na wymiary mechaniczne nakładają rozmiary okna dielektrycznego (średnica ok. 150 mm) oraz otworu spustowego oleju (średnica ok. 20 mm). Ponadto antena powinna charakteryzować się jak najprostszą konstrukcją i przystępną ceną. Złącze anteny powinno również spełniać powyższe warunki. Wydaje się, że optymalnym ze względu na rozmiar, cenę i parametry jest złącze typu N, które w niektórych przypadkach może być zastąpione złączami BNC, TNC lub SMA.

Zaburzenia przedostające się do wnętrza kadzi transformatora

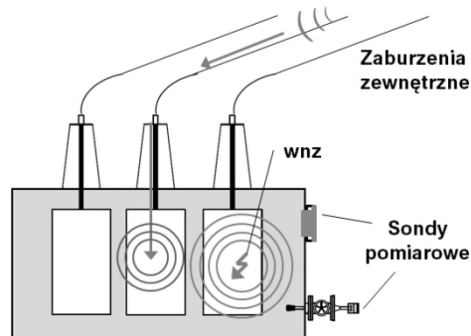
Kadź transformatora nie stanowi idealnej klatki Faradaya. Zaburzenia zewnętrzne mogą przedostawać się do wnętrza transformatora poprzez izolatory przepustowe (rys.1). Ich źródłem mogą być między innymi:

- radiowe stacje nadawcze (60-120 MHz),
- nadajniki cyfrowej telewizji naziemnej DVB-T(474-797 MHz),
- nadajniki telefonii komórkowej GSM (890-960 MHz),
- internet bezprzewodowy LTE (790-862 MHz).

Podane powyżej źródła sygnałów VHF/UHF mogą oddziaływać z różną intensywnością w danym obszarze. Ich występowanie w głównej mierze zależy od położenia stacji transformatorowej (np. jej odległości od nadajników radiowych czy ukształtowania terenu, na którym jest położona). Analizując kwestię sygnałów zaburzających (zakłócających) nie można zapominać o zaburzeniach pochodzących z samej stacji elektroenergetycznej, których źródłem mogą być wszelkie operacje łączeniowe (działanie wyłączników, przełącznika zaczepów transformatora) oraz wyładowania ulotowe z linii przesyłowych.

Dlatego projekt optymalnej anteny UHF do detekcji wnz powinien uwzględniać aspekt zakłóceń. Dobra antena powinna mieć właściwości filtra wielopasmowego, tzn.

powinna jednocześnie zapewnić wysoką czułość w tych zakresach częstotliwości, w których przenoszona jest energia sygnałów wnz i niską w zakresach częstotliwości typowych dla sygnałów zakłócających.



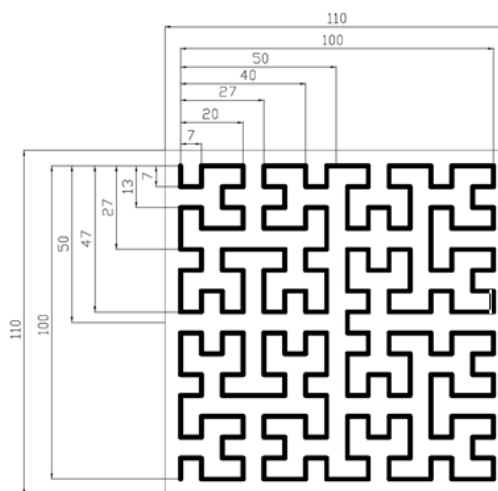
Rys.1. Zaburzenia wnikaające do wnętrza kadzi transformatora

Projektowanie i symulacje komputerowe anten UHF do detekcji wyładowań niezupełnych

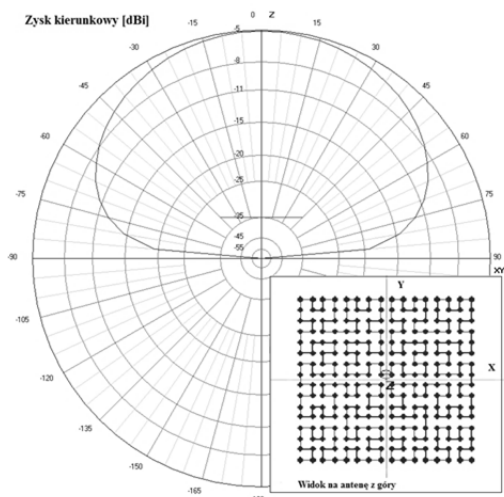
Z uwagi na ograniczenia konstrukcyjne kadzi, przyjęto że średnica anteny UHF montowanej w oknie rewizyjnym nie powinna przekraczać 150 mm. Powinna również posiadać jak najmniejszą grubość, aby nie wystawała poza płaszczyznę wewnętrzną kadzi transformatora.

W pierwszym etapie projektowania, w oparciu o studia literaturowe, wybrano różne rodzaje anten UHF, które następnie poddano matematycznej analizie symulacyjnej w programie 4nec2[®]. Bazując na otrzymanych wynikach symulacji wybrano pięć najciekawszych konstrukcji, tj. antenę: (a) H-fraktalną, (b) Hilberta, (c) spiralną, (d) dyskową oraz (e) kołowo-krzyżową. W następnej kolejności wykonano ich prototypy w technologii PCB, na których przeprowadzono badania i testy laboratoryjne.

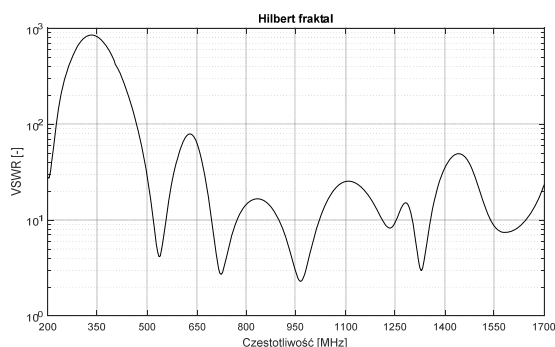
Aby zobrazować efekt końcowy procesu symulacji został przedstawiony przykładowy wynik analizy komputerowej tylko dla anteny fraktalnej Hilberta 4-rzędu. Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy anteny, natomiast na rysunkach 3-5 otrzymane dla niej wyniki symulacji (kierunkowość, VSWR i zysk anteny). Interesująca własność tej konstrukcji polega na tym, że rząd fraktala bezpośrednio determinuje liczbę częstotliwości rezonansowych, w których antena posiada najlepsze dopasowanie impedancyjne do linii transmisyjnej.



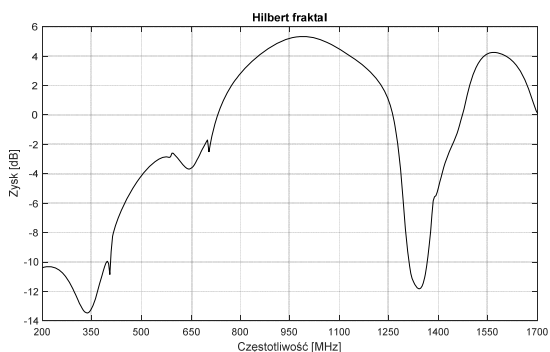
Rys.2. Schemat ideowy anteny fraktalnej Hilberta 4-rzędu



Rys.3. Charakterystyka kierunkowa anteny fraktalnej Hilberta (wynik symulacji komputerowej)



Rys.4. Wartości współczynnika VSWR w funkcji częstotliwości otrzymane dla anteny fraktalnej Hilberta czwartego rzędu (wynik symulacji komputerowej)

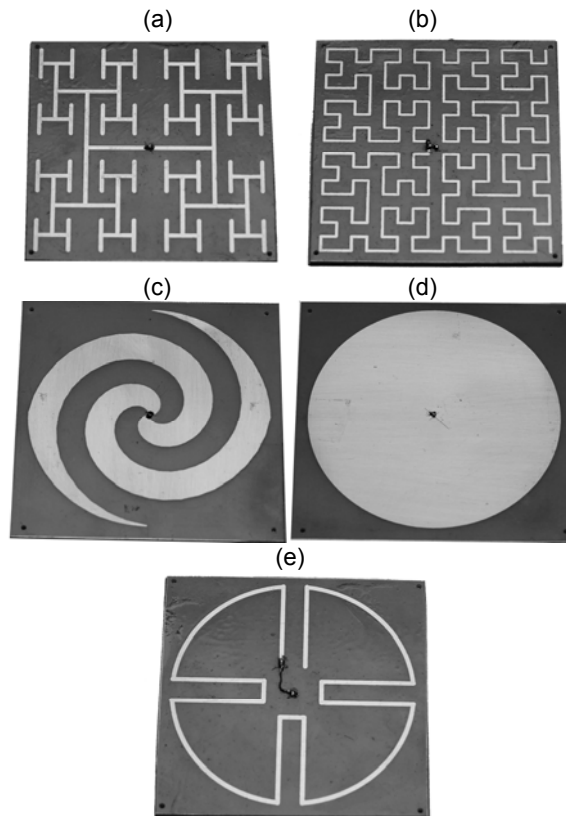


Rys.5. Zysk anteny fraktalnej Hilberta czwartego rzędu w funkcji częstotliwości (wynik symulacji komputerowej)

Kolejnym ważnym argumentem przemawiającym za anteną fraktalną Hilberta jest fakt, że posiada ona sferyczną charakterystykę kierunkową – energia sygnału jest niemal równomiernie wypromieniowywana we wszystkich kierunkach (rys. 3). Oznacza to również, że antena ma szeroką pionową i poziomą widoczność kątową. Z kolei z przebiegu charakterystyki współczynnika VSWR (rys. 4) uzyskanej na drodze symulacji wynika, iż charakteryzuje się ona wysoką czułością dla częstotliwości 530, 710, 960 i 1300 MHz. Ostatnim symulowanym parametrem był średni zysk anteny w funkcji częstotliwości (rys. 5). Z analizy wynika, że antena fraktalna posiada dodatnie wartości wzmacnienia sygnału w zakresie od 750 MHz do 1250 MHz. Poza przedstawionym zakresem symulacje wykazały dużą tłumienność sygnału.

Prototypowe konstrukcje anten UHF

Przeprowadzone symulacje pozwoliły na wstępne określenie przydatności wybranych konstrukcji anten UHF. Po dokonanej analizie symulacyjnej zostały wybrane i wykonane prototypy. Wszystkie przedstawione na rysunku 5 konstrukcje zostały wykonane metodą nadruku na płytce PCB i posiadają wymiary 110x110 mm. Każda z przedstawionych anten została wyposażona w reflektor płaski.



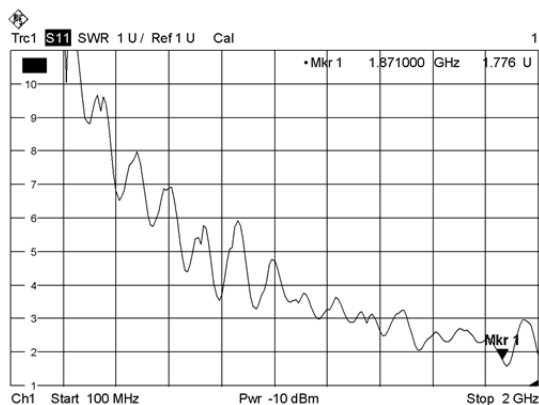
Rys.6. Prototypy anten UHF: a) antena o konstrukcji H-fraktalnej, b) antena o konstrukcji fraktalnej Hilberta, c) antena spiralna, d) antena dyskowa, e) antena o konstrukcji kołowo-krzyżowej

Prototypowe anteny zostały wyposażone w złącze sygnałowe SMA, które posłużyło do wyprowadzania odebranego sygnału. Grubość płytek PCB, na których został wykonany nadruk wynosiła 0,8 mm, natomiast grubość warstw miedzianych ścieżek stanowiących antenę wynosiła 18µm. Konstrukcje zostały przystosowane do instalacji na stelażu antenowym umieszczanym podczas badań wewnątrz modelu kadzi transformatora.

Testy laboratoryjne prototypowych anten UHF

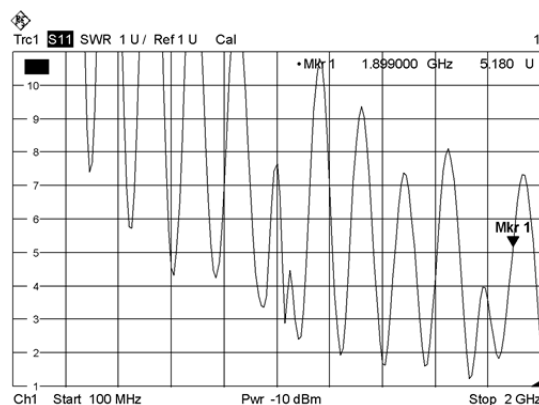
Wykonane prototypy anten UHF zostały poddane badaniom laboratoryjnym przy pomocy analizatora widma typu ZVL Vector Network Analyzers firmy Rohde & Schwarz. Na rysunku 6 oraz 7 przedstawione zostały przykładowe charakterystyki uzyskane dla anteny fraktalnej Hilberta oraz anteny kołowo-krzyżowej, które okazały się mieć najlepsze parametry spośród wykonanych prototypów.

Dla anteny fraktalnej Hilberta, wartość napięciowego współczynnika fali stojącej (rys. 6) w porównaniu do wyników symulacji (rys. 3) charakteryzuje się lepszym dopasowaniem impedancyjnym do linii transmisyjnej w paśmie od 800 do 2000 MHz.



Rys.7. Zmierzone wartości współczynnika VSWR w funkcji częstotliwości dla prototypu anteny fraktalnej Hilberta

Zadawalające wyniki pomiarów uzyskano również dla anteny kołowo-krzyżowej (rys.7). W tym wypadku potwierdzony został wielorezonansowy charakter anteny. Jak już wcześniej wspomniano, własność ta jest przydatna przy projektowaniu konstrukcji posiadającej selektywnie dużą czułość detekcji dla wybranego typu wyładowania niepełnego, przy jednoczesnej eliminacji zaburzeń zewnętrznych występujących w danych zakresach częstotliwości.



Rys.8. Zmierzone wartości współczynnika VSWR w funkcji częstotliwości dla prototypu anteny kołowo-krzyżowej

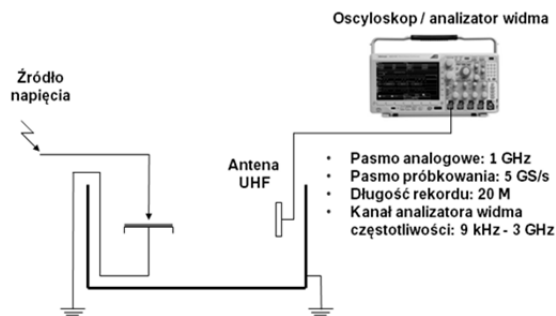
Detekcja wyładowań niepełnych przy użyciu prototypowych anten UHF

Wykonane prototypy anten zostały poddane testom w laboratorium wysokonapięciowym, które polegały na generowaniu wyładowań niepełnych w izolacji papierowo-olejowej i rejestrowaniu pochodzących od nich sygnałów UHF przy użyciu prototypowych anten. Do badań wybrano wyładowania ślizgowe, gdyż stanowią jedną z najbardziej niebezpiecznych i destrukcyjnych form wyładowań niepełnych dla układu izolacyjnego transformatora [8]. Wyładowanie tego typu zwykle rozwija się od skrajnego zwoju uzwojenia transformatora w kierunku bariery przespanowej. Dotarcie czoła wyładowania do bariery powoduje indukowanie składowej stycznej pola elektrycznego do powierzchni dielektryka, które umożliwia dalszy rozwój wyładowania po powierzchni bariery przespanowej [9]. Oddziaływujące na powierzchnię bariery iskry ślizgowe powodują jej stopniowe zwęglenie. Zwęglona powierzchnia dielektryka charakteryzuje się wysoką przewodnością, co w znacznym stopniu osłabia wytrzymałość elektryczną fragmentu izolacji [8, 9].

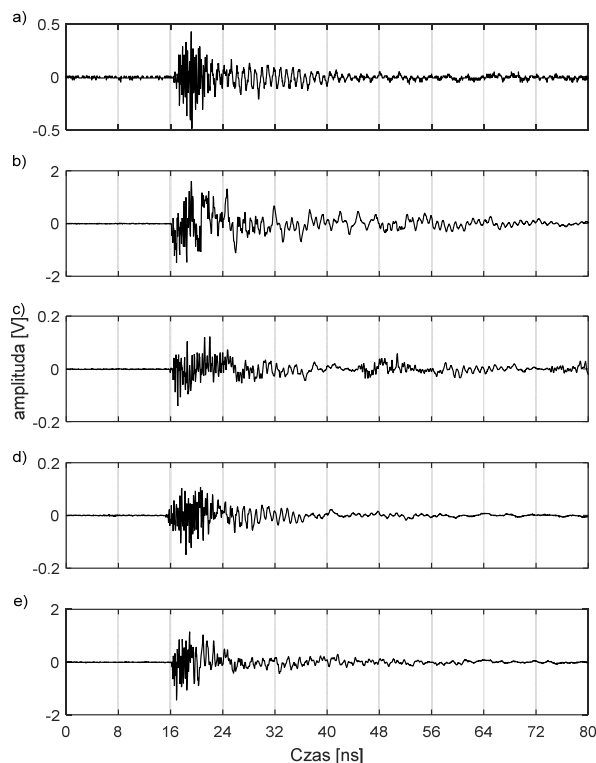
Prototypy anteny UHF wraz ze źródłem wzn zostały umieszczone w modelu kadzi transformatora wypełnionej olejem mineralnym (rys. 9).

Rejestrację sygnałów pochodzących od wzn wykonano przy użyciu czterokanałowego oscyloskopu typu MDO 3100 firmy Tektronix (pasmo przenoszenia 1 GHz) wyposażonego w moduł analizatora widma pracującego w paśmie od 9 kHz do 3 GHz.

Średnia wartość napięcia zapłonu wzn ślizgowych wyniosła 21 kV. Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów UHF zarejestrowanych dla poszczególnych konstrukcji anten przedstawiono na rysunku 10.



Rys.9. Schemat stanowiska pomiarowego

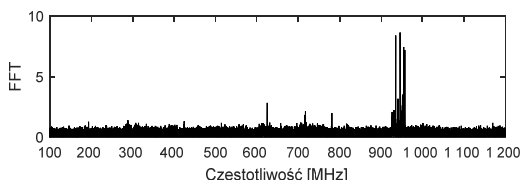


Rys.10. Przykładowe przebiegi czasowe impulsów wzn ślizgowych zarejestrowanych przez: a) antenę o konstrukcji H-fraktalnej, b) antenę o konstrukcji fraktalnej Hilberta, c) antenę spiralną, d) antenę dyskową, e) antenę o konstrukcji kołowo-krzyżowej

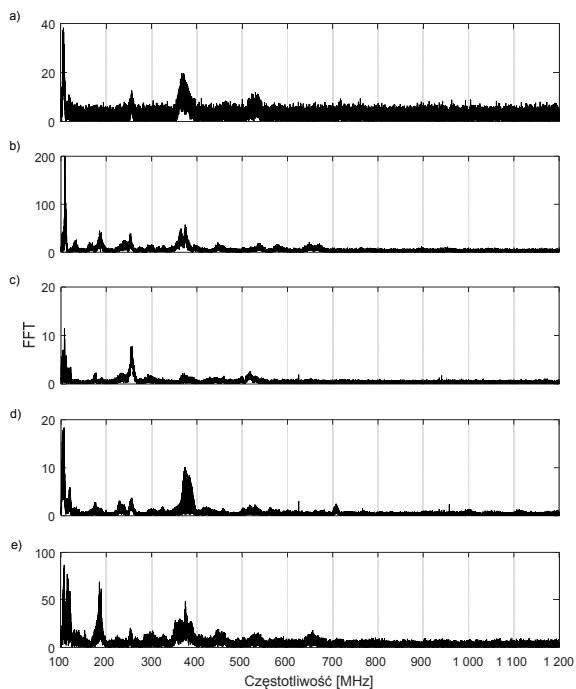
Porównując przedstawione przebiegi można zauważyć znaczącą różnicę w wartościach amplitudy sygnałów UHF rejestrowanych przez poszczególne anteny. Najsilniejsze sygnały uzyskano dla anteny fraktalnej Hilberta, których amplituda była o prawie rząd wielkości większa niż dla najmniej efektywnej anteny dyskowej oraz spiralnej. Spowodowane jest to prawdopodobnie jej znacznie lepszym dopasowaniem impedancyjnym. Dwie najbardziej

efektywne konstrukcje pod względem czułości detekcji wnz tj. wspomniana już wcześniej antena fraktalna Hilberta oraz antena kołowo-krzyżowa (o ok. 20-30 % mniejszej wydajności) charakteryzowały się również zadowalającymi wartościami współczynnika VSWR.

Wszystkie zarejestrowane przebiegi czasowe wyładowań ślizgowych oraz sygnały zaburzeń (tła) zostały następnie poddane analizie częstotliwościowej w programie MATLAB. Na rysunku 11 został przedstawiony wynik analizy FFT sygnału zaburzeń wnikających do modelu kadzi transformatora użytej w badaniach. Analiza wykazała, że wnikające do niej wąskopasmowe sygnały zaburzeń charakteryzowały się częstotliwościami 640, 730, 790 MHz, zaś szerokopasmowe zaburzenia występowały w paśmie 920-980 MHz.



Rys.11. Analiza częstotliwościowa zaburzeń wnikających do laboratoryjnego modelu kadzi transformatora



Rys.12. Analiza częstotliwościowa sygnałów generowanych przez wnz ślizgowe dla: a) anteny o konstrukcji H-fraktalnej, b) anteny o konstrukcji fraktalnej Hilberta, c) anteny spiralnej, d) anteny dyskowej, e) anteny o konstrukcji kołowo-krzyżowej

Z analizy charakterystyk FFT (rys.12) wynika, iż powtarzalne dla każdej z anten jest występowanie częstotliwości z zakresu od 100 do 120 MHz oraz od 350 do 400 MHz. Dodatkowo antena kołowo-krzyżowa rejestrowała sygnały o częstotliwości 200 MHz. Otrzymane charakterystyki w dużej mierze pokrywają się z charakterystykami otrzymanymi dla wyładowań ślizgowych przedstawionych w publikacji [4].

Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione prototypowe konstrukcje anten UHF, które mogą zostać wykorzystane do detekcji wyładowań niepełnych w transformatorze energetycznym. Przeprowadzone symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne potwierdziły szczególną przydatność dwóch konstrukcji, tj. anteny fraktalnej Hilberta oraz anteny kołowo-krzyżowej. Pozostałe badane konstrukcje charakteryzowały się niestety zbyt niską czułością odbioru sygnału UHF pochodzącego od wnz ślizgowych, aby mogły być wykorzystane do monitorowania transformatora.

W kolejnym etapie prac badawczych wybrane konstrukcje anten zostaną przystosowane do montażu w oknie rewizyjnym kadzi, a następnie ich działanie zostanie przetestowane w fabryce produkującej transformatory. Równolegle prowadzone będą prace nad konstrukcją szerokopasmowego i niskoszumnego wzmacniacza UHF, który powinien poprawić skuteczności detekcji wnz.

Artykuł finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Programu Badań Stosowanych w ramach projektu PBS3/A4/12/2015 pt. "System monitoringu wyładowań niepełnych 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.j.szymczak@doctorate.put.poznan.pl; dr inż. Wojciech Sikorski, Email: wojciech.sikorski@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] WG A2.37, Brochure 642: Transformer reliability survey, December 2015
- [2] Judd M.D., Yang Li, Hunter I. B., Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors. Part 1: Sensors and Signal Interpretation, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, March/April 2005, 5-14
- [3] Pinpart T., Judd M.D., Differentiating between partial discharge sources using envelope comparison of ultra-high-frequency signals, IET Science, Measurement and Technology, 2010, Vol. 4, Iss.5, 256-267
- [4] Raja K., Devaus F., Lelaidier S., Recognition of Discharge Sources Using UHF PD Signatures, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 5, September/October 2002, pp. 8-14
- [5] Szóstka J., Fale i anteny, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [6] Szóstka J. Mikrofałe. Układy i systemy, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [7] Sikorski W., Stanek P., Siodła K., Diagnostyka transformatorów energetycznych z zastosowaniem metody emisji akustycznej, PAK, 54 (2008), nr 11, 760-762
- [8] Lapworth J. A., Wilson A., Transformer Internal Over-Voltages Caused by Remote Engrgisation, IEEE PES Power Africa 2007 Conference and Exposition Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007
- [9] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT Warszawa 1983
- [10] Polak F., Sikorski W., Przegląd metod lokalizacji źródeł wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych, Przegląd Naukowo-Metodyczny „Edukacja dla Bezpieczeństwa”, 2014, 604-916
- [11] Ye Hai-feng, Qian Yong, Dong Yue, Sheng Ge-hao, Jiang Xiuchen1, Development of multi-band ultra-high-frequency sensor for partial discharge monitoring based on the meandering technique, IET Science, Measurement and Technology, 2014, 327-335