

Cyprian SZYMCZAK\*  
Wojciech SIKORSKI\*

## **ANALIZA WYBRANYCH KONSTRUKCJI I PARAMETRÓW ANTEN UHF WYKORZYSTYWANYCH DO MONITORINGU WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH**

W artykule przedstawiono aktualną tematykę diagnostyki i monitoringu transformatorów energetycznych przy zastosowaniu techniki anten pracujących w paśmie VHF/UHF. W pracy przedstawiono wyniki symulacji (m.in. charakterystyki kierunkowe i częstotliwościowe) wybranych konstrukcji anten, które przeprowadzono przy użyciu oprogramowania 4nec2®. Konstrukcje anten optymalizowano w celu osiągnięcia jak najwyższej czułości detekcji impulsów wyładowań niezupełnych generowanych w układzie izolacyjnym transformatora. Jednym z głównych problemów, oprócz konieczności zapewnienia odpowiedniej czułości detekcji wyładowań, jest minimalizacja wpływu zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych (sygnały GSM, telewizji DVB-T, radiostacji itp.), które przenikają do wnętrza kadzi transformatora poprzez przewody liniowe WN.

SŁOWA KLUCZOWE: lokalizacja wyładowań niezupełnych, anteny VHF/UHF, diagnostyka transformatora energetycznego

### **1. WPROWADZENIE**

System elektroenergetyczny składa się z wielu elementów, począwszy od generatorów wytwarzających energię elektryczną, poprzez linie przesyłowe, stacje transformatorowe, linie niskiego napięcia, a na odbiorcach energii kończąc. W dobie obecnego rozwoju cywilizacyjnego dostęp do energii elektrycznej jest praktycznie niezbędny i dłuższe przerwy w dostawie prądu do odbiorców powodują nie tylko społeczny chaos, ale także ogromne straty finansowe. Do odpowiedniej pracy systemu przesyłowego niezbędna jest transformacja energii pomiędzy różnymi stopniami napięć utrzymywanych w sieci. Polski system elektroenergetyczny nie należy do najmłodszych, ponieważ zdecydowana większość transformatorów przekroczyła czas 30 lat eksploatacji. Koszt zakupu i wymiany transformatora jest bardzo wysoki, jednakże ciągle rozwijane i udoskonalane metody diagnostyki tych urządzeń pozwalają bezpiecznie prze-

---

\*Politechnika Poznańska.

dłużyć ich eksploatację. Omawiana w artykule metoda monitoringu i diagnostyki transformatorów oparta na detekcji wyładowań niezupełnych w paśmie HF/UHF stanowi obecnie jedną z najintensywniej rozwijanych technik diagnostycznych.

## 2. WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE

Wyładowania niezupełne (wnz) powstają w wysokonapięciowych układach izolacyjnych i są determinowane przez niejednorodny rozkład linii ekwipotencjalnych pola elektrycznego. Wyładowania niezupełne są zjawiskiem bardzo niebezpiecznym, gdyż wiążą się nie tylko ze stratami mocy czynnej, ale mogą doprowadzić do przebicia izolacji (wyładowania zupełnego) i awarii urządzenia. Podstawowymi rodzajami wnz, w zależności od ośrodka, są:

- ulot i wyładowania snopiaste,
- wyładowania powierzchniowe z dominującą składową styczną lub normalną wektora natężenia pola elektrycznego,
- wyładowania niezupełne wewnętrzne (w izolacji gazowej, w pęcherzykach gazowych w oleju),
- wyładowania drzewiaste.

Zjawisko wnz emituje energię w różnych postaciach, tj.:

- energie świetlną,
- energie cieplną,
- fali elektromagnetycznej o częstotliwości od kilku kHz (HF) do ok 2–3 GHz (VHF, UHF),
- fale akustyczne słyszalne dla człowieka (zakres 20–20000 Hz) oraz fale o częstotliwości większej niż 20 kHz wykorzystywane przez metody emisji akustycznej,
- energie chemiczną (działanie wnz na izolacje powoduje np. wydzielanie się gazów) [2].

## 3. DETEKCCJA I LOKALIZACJA WNZ

Metody detekcji i lokalizacji wnz są przedmiotem ciągłych badań i można je podzielić na dwie podstawowe grupy: konwencjonalne i niekonwencjonalne. Metody konwencjonalne związane z emisyjnością elektryczną wnz zostały opisane w normie PN-EN 60270-04.2003 r. Wszystkie pozostałe techniki detekcji wnz należą do szerokiej grupy tzw. metod niekonwencjonalnych. Jednym z głównych przedstawicieli tej grupy jest metoda polegająca na detekcji impulsów elektromagnetycznych generowanych przez wnz w paśmie częstotliwości radiowych HF/VHF/UHF (od kilkuset kHz do 3 GHz). W przypadku techniki wysokiej częstotliwości (HF) do detekcji impulsów wnz stosuje się przekładniki prądowe wysokiej częstotliwości, które instaluje się zwykle na przewodach

uziemiających. Z kolei w technice VHF/UHF detektorami impulsów wzn bardzo wysokiej i ultra wysokiej częstotliwości są odpowiednio cewka Rogowskiego (stosowana do monitorowania przepustów transformatorowych czy kabli WN) i różnej konstrukcji anteny (stosowane głównie w transformatorach, dławikach i rozdzielnicach GIS/GIL). W przypadku diagnostyki transformatorów anteny UHF montuje się we włączach rewizyjnych oraz w zaworze spustowym oleju. W nowych jednostkach anteny coraz częściej montuje się na stałe w konstrukcji kadzi transformatora co pozwala na stały monitoring podczas eksploatacji. Jeśli na danej jednostce zainstalowano co najmniej cztery anteny, możliwa jest również przestrzenna lokalizacja współrzędnych źródła defektu. Lokalizację przeprowadza się w oparciu o pomiar opóźnień w nadejściu sygnałów do anten (ang. *TDOA – Time Difference of Arrival*). Alternatywna, aktualnie rozwijana technika lokalizacji wzn polega na estymacji kierunku nadejścia sygnału (ang. *DOA – Direction of Arrival*) przy użyciu matrycy anten UHF. Warto również wspomnieć, że dzięki zastosowaniu zoptymalizowanych, szerokopasmowych anten UHF możliwa jest również wiarygodna identyfikacja rodzaju defektu – głównie w oparciu o wyniki analizy częstotliwościowej lub statystycznej (np. rozkłady amplitudowo-fazowe impulsów wzn) [1, 3].

#### 4. PASMO UŻYTECZNE

Rozwój cywilizacyjny zdeterminował powstanie systemów komunikacji opartych na bezprzewodowym przesyłaniu informacji w postaci fali elektromagnetycznej. Niestety zakres działania tych urządzeń pokrywa się często z zakresem częstotliwościowym sygnałów generowanych przez wzn. W pracy [4] przedstawiono przykładowe defekty występujące wewnątrz kadzi transformatora oraz analizę częstotliwościową dla poszczególnych rodzajów wzn. Odpowiedź częstotliwościowa danego defektu jest tak zwanym odciskiem palca określającym rodzaj wzn. Z publikacji tej wynika, iż pasmo, na które muszą być zbudowane anteny, zawiera się w przedziale 200–1500 MHz. Niestety w podanym przedziale częstotliwościowym występują zakłócenia z bardzo silnych nadajników radiowych, są to między innymi:

- nadajniki cyfrowej telewizji naziemnej DVB-T (pasmo 474–797 MHz),
- nadajniki telefonii komórkowej: GSM 900 (pasmo 890–960 MHz), GSM 1800 (pasmo 1710–1880 MHz),
- bezprzewodowy internet LTE 800 (pasmo 791–862 MHz).

Podane powyżej zakłócenia mogą przenikać do wnętrza transformatora energetycznego poprzez linie energetyczne przyłączone za pomocą przepustów do uzwojeń transformatora. Zakłócenia te determinują stworzenie konstrukcji anten w taki sposób, aby sygnał rejestrowany był wąskopasmowy, co oznacza, że powinien posiadać maksymalną wartość wzmocnienia w wybranym paśmie częstotliwości.

## 5. WYBRANE KONSTRUKCJE ANTEN UHF DO DETEKCJI WNZ

Projektując antenę UHF został uwzględniony wymiar okna rewizyjnego transformatora. Powierzchnia czynna zajmowana przez sondę UHF nie powinna zatem przekraczać wymiaru 0,1 x 0,1 m. W oparciu o doniesienia literaturowe [5–7] zostały odtworzone w programie 4nec2® wybrane konstrukcje sond pomiarowych. W niniejszej publikacji przedstawione zostały wyniki symulacji trzech rodzajów anten: unipola prostego, anteny kołowo–krzyżowej oraz anteny o konstrukcji opartej na figurze fraktala Hilberta. Dzięki oprogramowaniu 4nec2® możliwe było zasymulowanie działania podanych powyżej anten.

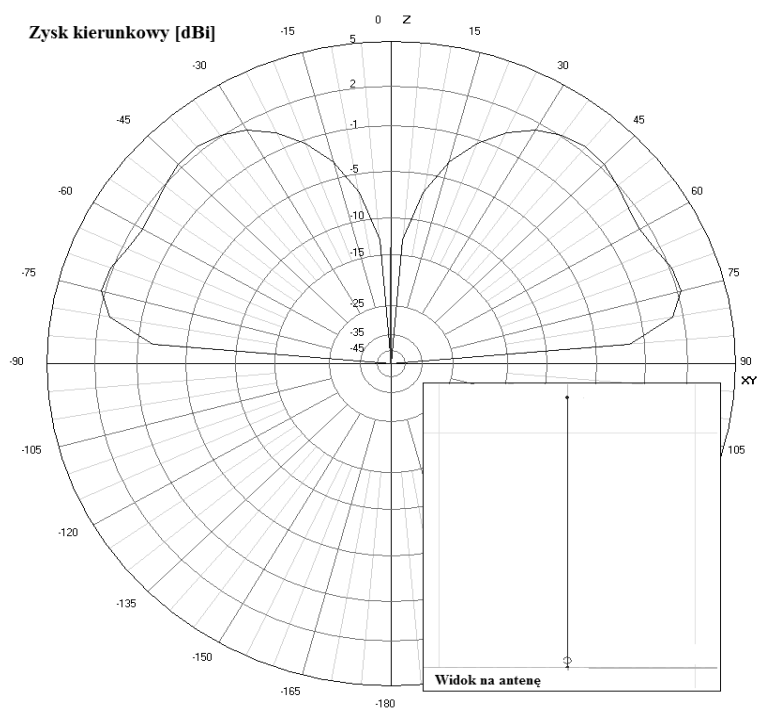
Na potrzeby badań symulacyjnych wyznaczono następujące charakterystyki:

- kierunkowe,
- częstotliwościowe zależne od zysku anteny,
- częstotliwościowe zależne od parametru VSWR (ang. *Voltage Standing Wave Ratio* – napięciowy współczynnik fali stojącej).

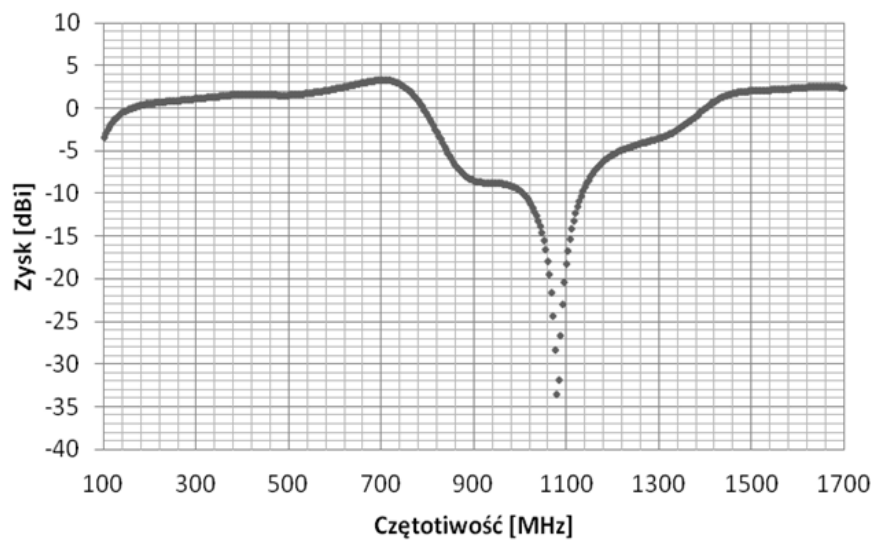
Unipol jako podstawowa konstrukcja antenowa jest punktem odniesienia w projektowaniu i testowaniu nowych anten. W programie symulacyjnym został zamodelowany unipol o długości 0,46 m, długość ta odpowiada częstotliwości 650 MHz, która w przybliżeniu stanowi częstotliwość środkową pasma sygnałów UHF generowanych przez wnz (200 – 1500 MHz) [4]. Wyniki symulacji zostały przedstawiane na rysunkach 1–3.

Przedstawiona na rysunku 1 charakterystyka obrazuje kierunkowe wypromieniowanie energii z anteny. Unipol 650 MHz jest anteną promieniującą wokół części aktywnej w zakresie 65° od powierzchni. Charakterystyka zysku anteny (rys. 2) obrazuje dobre właściwości odbiorcze w zakresie 150–780 MHz oraz powyżej 1400 MHz. Lokalne minimum charakterystyki w okolicach 1100 MHz oznacza konieczność dostarczenia do anteny sygnału o dużej energii. Parametr VSWR pozwala określić, jaka ilość energii zostanie wypromieniowana z anteny w stosunku do energii odbitej przez nią. Im wartość parametru VSWR anteny jest bliższa jedności, tym lepiej wypromieniowuje ona energię dostarczoną do części aktywnej. Dla unipola 650 MHz (rys. 3) można zauważyć liczne częstotliwości rezonansowe, w których parametr VSWR osiąga wartości mniejsze niż 10. Oznacza to, że dla częstotliwości 240, 540, 840, 1140, 1460 MHz około 40% energii zostanie wypromieniowane. Opierając się o wiedzę zgromadzoną w publikacji [4] można wnioskować, że antena będzie sprawdzać się w detekcji wyładowań ślizgowych oraz powierzchniowych. Jest to własność jak najbardziej pożądana, gdyż ten rodzaj wyładowań niezupełnych jest najbardziej destrukcyjny dla układu izolacyjnego transformatora.

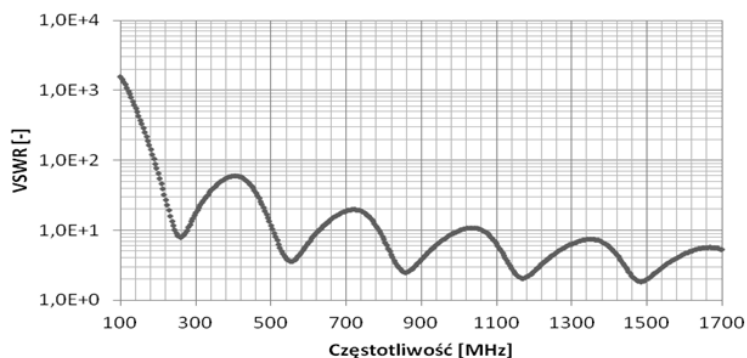
Antena kołowo–krzyżowa, powierzchniowa, drukowana na płycie PCB (ang. *PrintedCircuitBoard* – płytka drukowana) jest konstrukcją opisaną na planie okręgu o promieniu 0,05 m z prostopadłymi wcięciami o długości 0,035 m [5].



Rys. 1. Wykres charakterystyki kierunkowej anteny unipol 650 MHz

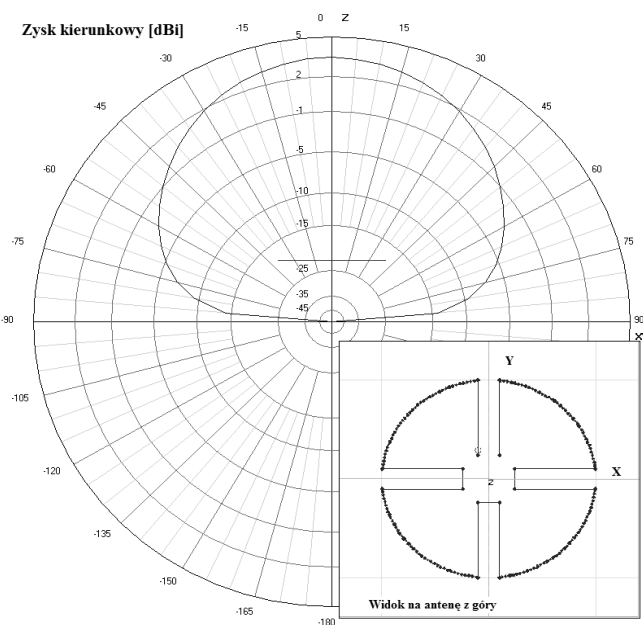


Rys. 2. Zysk anteny unipol 650 MHz w funkcji częstotliwości

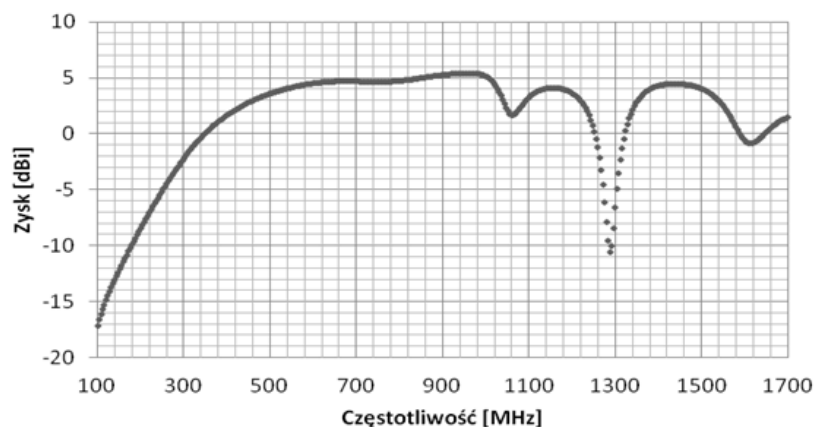


Rys. 3. VSWR anteny unipol 650 MHz w funkcji częstotliwości

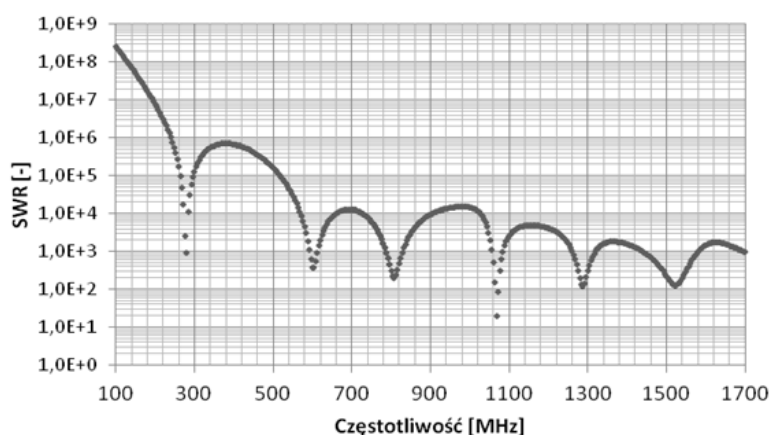
Charakterystyka kierunkowa (rys. 4) anteny kołowo–krzyżowej ma kształt zbliżony do kuli. Energia doprowadzona jest wypromieniowana równomiernie do płaszczyzny prostopadłej anteny. Wykres przedstawiony na rysunku 5 obrazuje zysk anteny w zakresie 340–1240 MHz. Napięciowy współczynnik fali stojącej (rys. 6) przedstawiony dla anteny kołowo–krzyżowej charakteryzuje się dobrym wypromieniowaniem sygnały w pasmach częstotliwości: 600, 800, 1060, 1280, 1508 MHz. Antena o tej konstrukcji może dobrze sprawdzić się w detekcji wielu defektów spowodowanych wnz.



Rys. 4. Wykres charakterystyki kierunkowej anteny kołowo–krzyżowej



Rys. 5. Zysk anteny kołowo–krzyżowej w funkcji częstotliwości

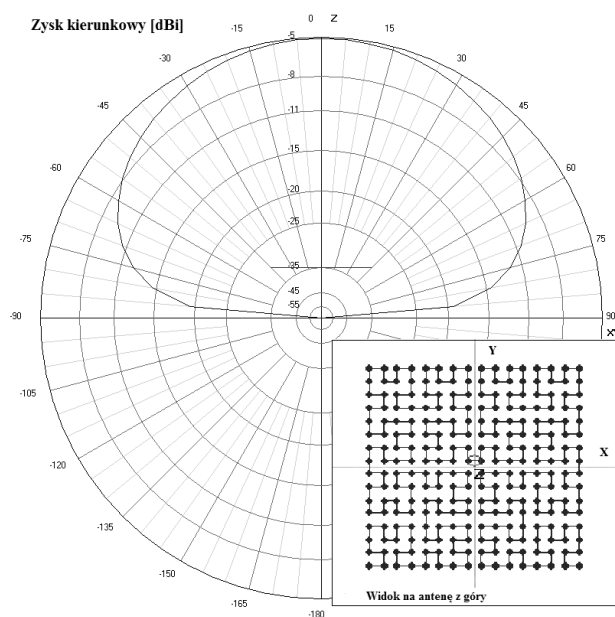


Rys. 6. VSWR anteny kołowo–krzyżowej w funkcji częstotliwości

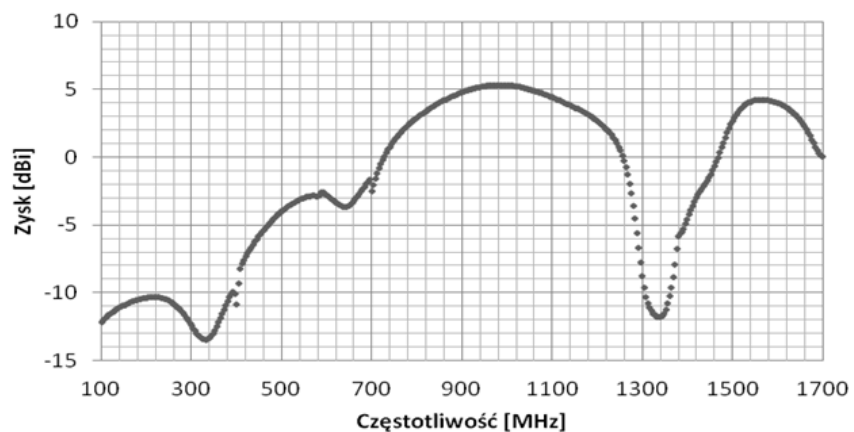
Ostatnia z omawianych konstrukcji, czyli antena oparta o figurę fraktala Hilberta jest innowacyjną konstrukcją pozwalającą na stworzenie szerokopasmowej, a zarazem wielorezonansowej (wielopasmowej) anteny. Fraktal Hilberta jest linią prostą, która wypełnia kwadrat o wymiarach 0,1 x 0,1 m [6].

Antena fraktalna Hilberta posiada zbliżoną charakterystyką kierunkową do anteny kołowo–krzyżowej, jednak wyróżnia się od niej większym wzmocnieniem (rys. 7). Fakt ten, wynika z większej powierzchni czynnej anteny fraktalnej niż anteny kołowo–krzyżowej. Zakres częstotliwościowy, gdzie następuje zysk anteny fraktalnej zawiera się w przedziałach: 720–1250 MHz oraz 1460–1692 MHz. Napięciowy współczynnik fali stojącej przedstawiony na rysunku 9 obrazuje częstotliwości rezonansowe przy których zachodzi prawidłowe

wypromieniowanie energii z anteny. Dla anteny fraktalnej Hilberta częstotliwości te są następujące: 520, 710, 940 i 1310 MHz. Zakres pracy anteny fraktalnej jest unikatowy, ponieważ za jej pomocą można efektywnie wykrywać najważniejsze rodzaje wzn występujące w układzie izolacyjnym papier/olej transformatora [4].

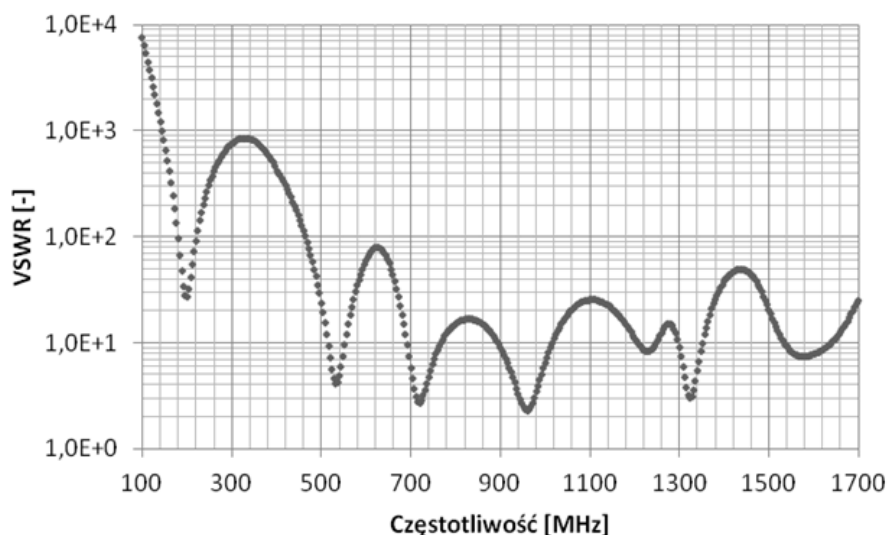


Rys. 7. Wykres charakterystyki kierunkowej anteny fraktal Hilberta



Rys. 8. Zysk anteny fraktalnej Hilberta w funkcji częstotliwości





Rys. 9. VSWR anteny fraktalnej Hilberta w funkcji częstotliwości

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki symulacji (w aspekcie skutecznej detekcji wnz) wybranych konstrukcji anten UHF. Wyniki symulacji pozwoliły ocenić czy dana konstrukcja anteny pozwoli na detekcję wnz w wybranych, wolnych od zakłóceń zewnętrznych (cyfrowa telewizja naziemna DVB-T, telefonia komórkowa GSM, bezprzewodowy Internet LTE), pasmach częstotliwości (np. 400–900 MHz czy 1000–1200 MHz). W pracy szczególną uwagę poświęcono również zagadnieniu czułości i kierunkowości anteny. Na podstawie przedstawionych w artykule charakterystyk częstotliwościowych można założyć, iż fizyczne modele anten UHF będą przydatne do detekcji wnz.

Dalsze badania nad antenami UHF polegać będą na stworzeniu fizycznych modeli anten. Prototypy zostaną przetestowane w warunkach laboratoryjnych na modelach defektów wnz. Na tej podstawie wybrana zostanie optymalna (pod względem czułości) antena UHF, która zostanie następnie zaadoptowana do opracowywanego systemu monitoringu on-line transformatora energetycznego.

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

## LITERATURA

- [1] Polak F., Sikorski W., Przegląd metod lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych, Przegląd Naukowo–Metodyczny „Edukacja dla Bezpieczeństwa”, 2014, 604–916.
- [2] Subocz J., Transformatory w eksploatacji, Rejestracja wyładowań niezupełnych w zakresie bardzo wysokich częstotliwości (UHF), Wydawnictwo Energo–Complex Chorzów 2007.
- [3] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matryc sensorowych, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10/2014, 74–77.
- [4] Raja K., Devaux F., Lelaidier S., Reroginition of Discharge Sorces Using UHF PD Signatures, Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2002, 8–14.
- [5] Ye Hai–feng, Qian Yong, Dong Yue, Sheng Ge–hao, Jiang Xiu–chen1, 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.
- [6] Jian Li, Tianyan Jiang, Changkui Cheng, Hilbert Fractal Antenna for UHF Detection of Partial Discharges in Transformers, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 6; December 2013.
- [7] J. Lopez–Roldan, T. Tang and M. Gaskim, Design and Testing of UHF Sensors for Partial Discharge Detection in Transformers, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21–24, 2008.

## CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF SELECTED PARAMETERS UHF ANTENA USED FOR MONITORING DISCHARGES IN POWER TRANSFORMERS

Article presents diagnostics and monitoring of power transformers using antennas techniques operating in the HF / UHF frequency band. The simulation results of the chosen antenna design (e.g. directional characteristics and frequency) was obtained based on computer program 4nec2®. The antenna structures were optimized to achieve the highest sensitivity on partial discharge (typical for oil/paper insulation system) detection procedure. One of the main problems, apart from the need to ensure adequate discharge detection sensitivity it is to minimize the impact of external electromagnetic interferences (GSM signal, DVB–T TV, radio, etc.), that infiltrate to the inside of the transformer tank through HV power lines.

*(Received: 19. 02. 2016, revised: 4. 03. 2016)*