

Filip POLAK*
Wojciech SIKORSKI*
Krzysztof SIODŁA*

PROTOTYPOWANIE ANTEN UHF PRZY POMOCY PROGRAMÓW SYMULACYJNO–OBLICZENIOWYCH

Metoda ultra wysokich częstotliwości (ang. *UHF – Ultra High Frequency*) znajduje coraz szersze zastosowanie w diagnostyce transformatorów energetycznych. Wykorzystując sondy (anteny) montowane wewnątrz kadzi transformatora możliwa jest detekcja wylądowań niepełnych pojawiających się w miejscach występowania defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego. Sondy takie muszą być odpowiednio zaprojektowane i zoptymalizowane z uwzględnieniem wielu czynników, takich jak np. pasmo częstotliwościowe, kierunkowość, czy konstrukcja geometryczna. W pracy zaprezentowane zostały parametry dwóch typów anten (mikropaskowej oraz dyskowo–stożkowej) uzyskanych na drodze symulacji. Na podstawie obliczeń i symulacji powstaną prototypy anten, które docelowo mają znaleźć zastosowanie w układzie służącym do lokalizacji wylądowań niepełnych wewnątrz transformatorów energetycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: wylądowania niepełne, antena UHF, prototypowanie anten, symulacje

1. WPROWADZENIE

Transformatory energetyczne zazwyczaj projektowane są na okres eksploatacji ok. 30 lat. Szacuje się, że większość transformatorów zainstalowanych w polskim systemie elektroenergetycznym przekroczyła już ten wiek, dlatego prowadzone są okresowe badania diagnostyczne (m.in. badania stopnia zawilgocenia izolacji metodami polaryzacyjnymi, badania stanu mechanicznego, badania na obecność wylądowań niepełnych), dzięki którym możliwe jest podjęcie odpowiednich działań w celu przedłużenia żywotności transformatorów oraz utrzymania ich w dobrej kondycji. Postarzały układ izolacyjny jest bardziej podatny na występowanie defektów, a pojawiające się w ich okolicach wylądowania niepełne (wnz) są najczęstszą przyczyną ewentualnej awarii transformatora.

Na całym świecie prowadzone są prace badawcze, mające na celu przede wszystkim poprawę wiarygodności aktualnie stosowanych metod diagnostyki

* Politechnika Poznańska.

i monitoringu transformatorów energetycznych opartych na detekcji zjawiska wnz. Autorzy niniejszego artykułu koncentrują się na poszukiwaniu nowych rozwiązań teoretycznych i technologicznych, które pozwoliłyby znacząco poprawić dokładność oraz usprawnić procedurę lokalizacji defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego.

Przedstawiana w artykułach [6, 9, 10] koncepcja zakłada zastosowanie techniki matryc sensorowych do oszacowania kierunku nadejścia sygnału emisji akustycznej bądź impulsu elektromagnetycznego (ang. DOA – *Direction-of-Arrival Estimation*) generowanego przez wnz. Wyniki symulacji i rekonesansowych badań potwierdzają zasadność obranej koncepcji.

W niniejszym artykule zaprezentowane zostały wyniki ostatnich prac autorów, które skupiają się obecnie na projektowaniu elementów sensorycznych układu pomiarowego w postaci anten pracujących w paśmie ultra wysokich częstotliwości (ang. UHF – *Ultra High Frequency*).

W dalszej części artykułu zaprezentowane wyniki symulacji dwóch konstrukcji antenowych. Na potrzeby artykułu wybrane zostały tylko niektóre z parametrów, najbardziej istotne z punktu widzenia powstającego układu pomiarowego.

2. WYBRANE PARAMETRY ANTEN

Przestrzeń otaczająca antenę jest zwykle podzielona na trzy strefy: (a) indukcji (inaczej strefa bliska), (b) Fresnela (in. strefa pośrednia) i (c) promieniowania (in. Fraunhofera lub strefa daleka). Strefy te są tak wyznaczone, aby w każdej z nich zidentyfikować strukturę pola. W momencie przekraczania granic poszczególnych stref nie występują gwałtowne zmiany w charakterystyce pola, jednak istnieją wyraźne różnice między nimi. Granice określa się na podstawie wielu przybliżeń i nie są to wartości identyczne dla wszystkich rodzajów anten. Najczęściej używa się warunków, które muszą zostać spełnione, aby rozpatrywać daną strefę.

Strefa bliska jest opisywana jako obszar bezpośrednio otaczający antenę z przewagą pola indukcyjnego. Analiza pól elektrycznych i magnetycznych w tej strefie jest bardzo skomplikowana – są one przesunięte w fazie względem siebie o 90° , energia nie jest promieniowana na zewnątrz a magazynowana w polu elektrycznym i magnetycznym. Dla większości anten przyjmuje się, że strefa ta zamyka się w obszarze mniejszym niż

$$R < 0,62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (1)$$

od środka powierzchni promieniującej (R – odległość od środka anteny, D – największy wymiar anteny, λ – długość fali). Dla anten elektrycznie krótkich przyjęło się stosować granicę wynoszącą $\lambda/2\pi$.

Wraz ze wzrostem odległości od środka anteny (poza strefą bliską) składowe pola elektrycznego przesuwają się w fazie, przez co pojawia się przepływ ener-

gii wzdłuż kierunku propagacji, promieniowanie przeważa nad polem indukcyjnym (które wciąż jest obecne), a rozkład pola zależy od odległości od anteny. Strefa taka nazywana jest strefą pośrednią (Fresnela) i zawiera się w obszarze

$$0,62\sqrt{D^3/\lambda} \leq R < 2D^2/\lambda. \quad (2)$$

Jako strefę daleką (Fraunhofer) uznaje się obszar w odległości

$$R \geq 2D^2/\lambda \quad (3)$$

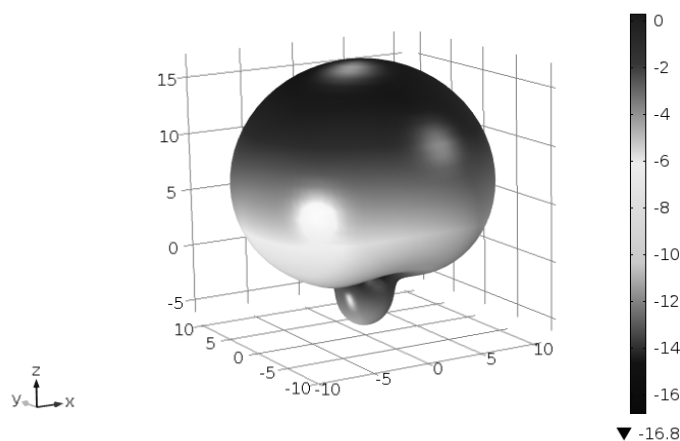
od środka anteny. W tej strefie składowe pola elektrycznego i magnetycznego są prostopadłe względem siebie i kierunku propagacji, co jest cechą fali płaskiej. Zakładając, że fala emitowana przez antenę ma charakter kulisty, traktowanie jej jako falę płaską byłoby możliwe tylko w nieskończenie wielkiej odległości od źródła. Przyjmuje się jednak pewne przybliżenia, z których podstawowym jest założenie, że powyżej wspomnianej odległości promienie poprowadzone od źródła emisji są lokalnie równoległe. Dzięki temu rozkład pola w strefie dalekiej uznaje się za niezależny od odległości od źródła [4, 5, 7].

Aby opisać działanie anteny, konieczne jest zdefiniowanie szeregu różnych parametrów. Niektóre parametry są wzajemnie zależne i nie wszystkie z nich muszą być określone dla pełnego opisu anteny. Opis wszystkich parametrów został zawarty w międzynarodowym standardzie *IEEE Std 145* [8]. Poniżej znajduje się skrócony opis wybranych parametrów.

Charakterystyka promieniowania

Energia wypromieniowana przez źródło fal elektromagnetycznych jest różna w różnych kierunkach propagacji. Graficzne przedstawienie tej właściwości nazywane jest charakterystyką promieniowania, którą definiuje się jako rozkład pola elektrycznego na powierzchni kuli o bardzo dużym promieniu (aby zawierał się w strefie dalekiej) i środkiem pokrywającym się ze środkiem rozpatrywanej anteny. Najczęściej przedstawia się ją w postaci charakterystyk w dwóch odpowiednio dobranych płaszczyznach w układzie współrzędnych biegunowych (np. X–Y, Y–Z). Charakterystyka w przestrzeni trójwymiarowej może być nieczytelna w wersjach drukowanych, jednak jako edytowalny wynik symulacji może okazać się cennym źródłem informacji o kierunkowości anteny (rys. 1). Istotne jest odpowiednie zorientowanie anteny względem ziemi. W celu wyeliminowania trudności w porównywaniu charakterystyk różnych anten (bezwzględne wartości natężenia pola elektrycznego mogą się różnić w zależności od odległości od anteny) stosuje się wartości znormalizowane otrzymywane poprzez podzielenie wartości bieżącej przez maksymalną (w praktyce najczęściej stosuje się skalę logarytmiczną)

$$\mathbf{F}(\theta, \phi) = \frac{E(\theta, \phi)}{E_{\max}}. \quad (4)$$



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka kierunkowa anteny mikropaskowej w przestrzeni 3D

Współczynnik fali stojącej (ang. SWR – Standing Wave Ratio)

Współczynnik fali stojącej (WFS) jest miarą niedopasowania impedancyjnego linii transmisyjnej (np. przewodu koncentrycznego) do obciążenia (anteny). Jeśli obciążenie jest dopasowane do linii transmisyjnej, to cała energia zostaje wypromieniowana przez antenę. Jeśli impedancja obciążenia różni się od impedancji charakterystycznej linii, to część energii odbija się od niego i wraca falowodem w kierunku źródła zasilania. W wyniku superpozycji fali wychodzącej i fali powrotnej, w falowodzie powstaje fala stojąca objawiająca się tym, że amplituda fali biegnącej przez linię transmisyjną zmienia się sinusoidalnie wraz z jego długością. Najczęściej jednak do określenia współczynnika fali stojącej używa się współczynnika odbicia Γ

$$WFS = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (5)$$

Zysk energetyczny anteny

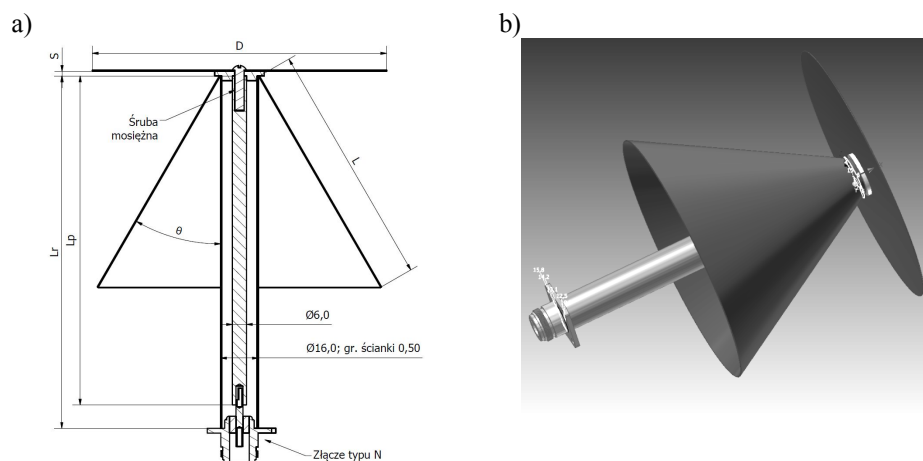
Zyskiem energetycznym anteny nazywa się stosunek gęstości mocy wypromieniowanej przez antenę w danym kierunku do gęstości mocy wypromieniowanej przez antenę wzorcową. W rozważaniach teoretycznych, jako antenę wzorcową najczęściej stosuje się antenę izotropową, zakładając, że do obu anten została doprowadzona taka sama moc. Jednostką zysku w tym przypadku jest dBi. Zysk energetyczny zależy od charakterystyki promieniowania i sprawności anteny

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{we}}. \quad (6)$$

3. WYNIKI SYMULACJI

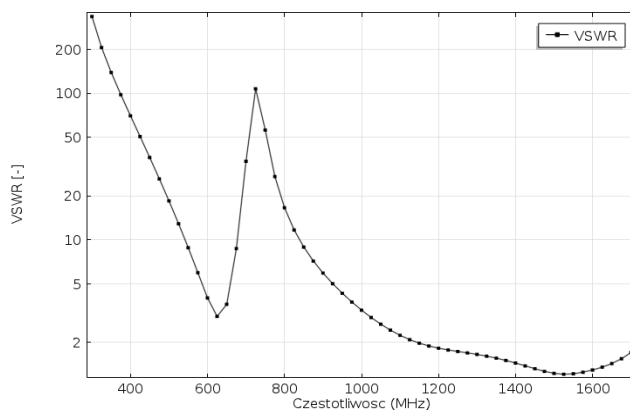
Sondy *UHF* przeznaczone do odbioru sygnałów pochodzących od defektów układu izolacyjnego projektowane są przede wszystkim pod względem dopasowania pasma częstotliwościowego i powinny cechować się najwyższą, możliwą do osiągnięcia, czułością w tym zakresie częstotliwości. Na podstawie charakterystyk częstotliwościowych różnych rodzajów wzn opublikowanych w pracy [1] jako częstotliwość środkową obrano 800 MHz. Bardzo ważnym kryterium w przypadku doboru sond *UHF*, mających znaleźć zastosowanie przy detekcji wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych, jest konstrukcja geometryczna. Spośród wielu rozpatrywanych konstrukcji wybrane zostały dwie: dyskowo–stożkowa oraz mikropaskowa. Podczas prototypowania parametry geometryczne anten wyznaczone zostały na podstawie wzorów dostępnych w literaturze [2–5, 7, 11]. W programie Autodesk Inventor zostały stworzone modele prototypowych anten, które następnie posłużyły do przeprowadzenia symulacji warunków pracy w programie Comsol Multiphysics.

Na potrzeby tej pracy zdecydowano się przedstawić tylko najistotniejsze, z punktu widzenia projektowanego systemu, wyniki symulacji w postaci charakterystyk kierunkowych rozpatrywanych anten oraz ich zysku w zależności od częstotliwości.

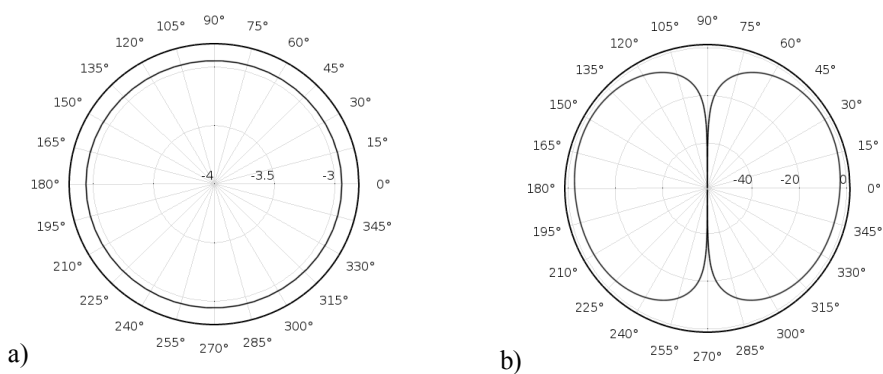


Rys. 2. Rysunek konstrukcyjny (a) anteny dyskowo–stożkowej oraz jej model (b), stworzony w programie Autodesk Inventor

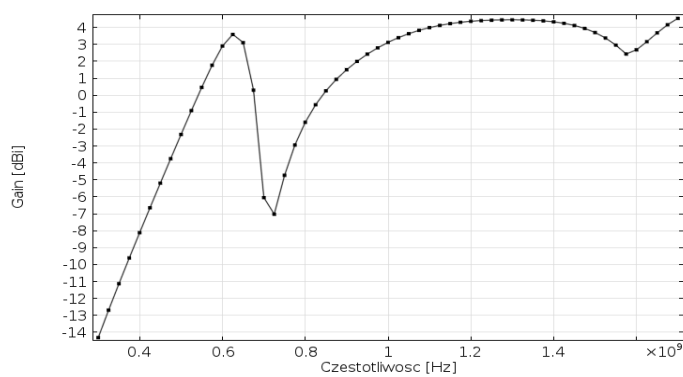
Wyniki symulacji dla anteny dyskowo–stożkowej zoptymalizowanej geometrycznie pod częstotliwość rezonansową 800 MHz przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5.



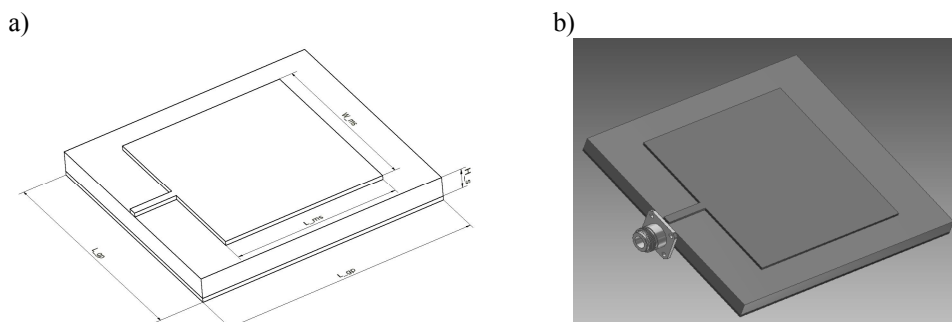
Rys. 3. Współczynnik fali stojącej w zależności od częstotliwości dla anteny dyskowo–stożkowej



Rys. 4. Charakterystyki kierunkowe anteny dyskowo–stożkowej przy częstotliwości 800 MHz w płaszczyźnie (a) horyzontalnej i (b) wertykalnej

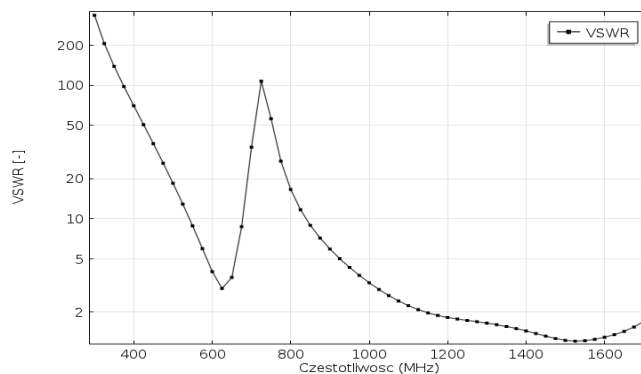


Rys. 5. Zysk (*Gain*) anteny dyskowo–stożkowej (w odniesieniu do anteny izotropowej) w zależności od częstotliwości

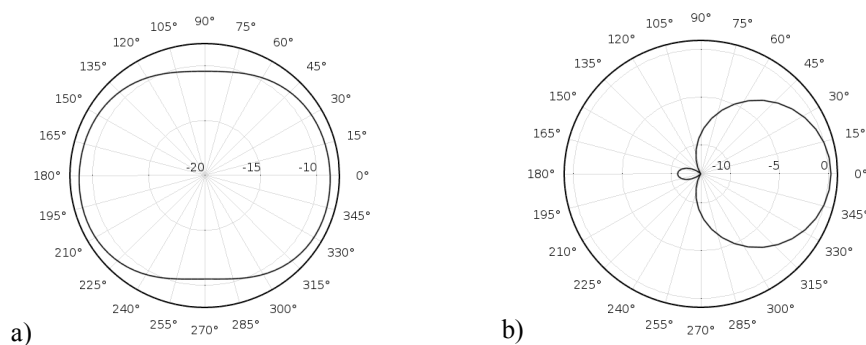


Rys. 6. Rysunek konstrukcyjny (a) anteny mikropaskowej oraz jej model (b), stworzony w programie Autodesk Inventor

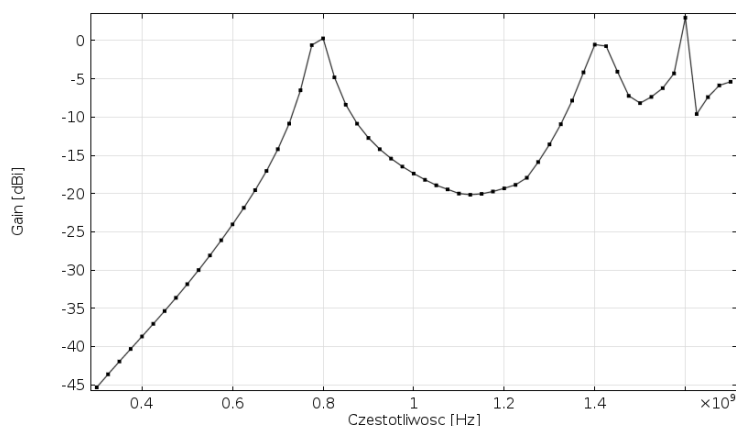
Wyniki symulacji dla anteny dyskowo–stożkowej zoptymalizowanej geometrycznie pod częstotliwość rezonansową 800 MHz przedstawiono na rysunkach 7, 8 i 9.



Rys. 7. Współczynnik fali stojącej w zależności od częstotliwości dla anteny dyskowo–stożkowej



Rys. 8. Charakterystyki kierunkowe anteny mikropaskowej przy częstotliwości 800 MHz w płaszczyźnie (a) horyzontalnej i (b) wertykalnej



Rys. 9. Zysk (*Gain*) anteny mikropaskowej (w odniesieniu do anteny izotropowej) w zależności od częstotliwości

4. PODSUMOWANIE

Wyniki symulacji w dużym stopniu odzwierciedlają założenia teoretyczne. Pasma przenoszenia jest wyraźnie szersze w przypadku anteny dyskowo–stożkowej. Obejmuje ono zakres od ok. 800 MHz do 1700 MHz (przyjęta graniczna wartość częstotliwości podczas przeprowadzanych symulacji), maksimum osiąga przy ok. 1250 MHz. Dla anteny mikropaskowej zaobserwowano 3 użyteczne przedziały pasma, które zawierają się w zakresie ok. 760–820 MHz, 1380–1440 MHz i 1580–1610 MHz. Na podstawie wartości zysku można również definitywnie stwierdzić, że antena mikropaskowa charakteryzuje się wielokrotnie niższą czułością w porównaniu do anteny dyskowo–stożkowej. Obydwie anteny charakteryzują się szeroką wiązką główną (niemal dookólna charakterystyka kierunkowa).

Na potrzeby tej pracy przedstawiono tylko dwie spośród szerokiego wachlarza dostępnych konstrukcji anten UHF. W świetle zastosowania jednej z przedstawionych anten do projektowanego układu pomiarowego do lokalizacji wylądowań niepełnych optymalnym rozwiązaniem będzie zastosowanie anteny mikropaskowej, ze względu na niewielkie wymiary geometryczne. Dalsze badania i symulacje mogą pozwolić na znalezienie korzystniejszej geometrii w celu polepszenia parametrów odbiorczych.

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

LITERATURA

- [1] Raja K., Devaux F., Lelaidier S., Recognition of discharge sources using UHF PD Signatures, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol:18 , Issue: 5, 2002, 8–14.
- [2] Sarkar B., Mishra D.K., Koley C., Roy N.K., Microstrip patch antenna based UHF sensor for detection of partial discharge in high voltage electrical equipments, Annual IEEE India Conference (INDICON), 2014, 1 – 6.
- [3] Verma S., Mishra A., Khan R., Analysis of variation of various parameters on design of disccone antenna, IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC), 2011, 1–6.
- [4] Milligan T.A., Modern antenna design, John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.
- [5] Balanis C.A., Antenna theory, analysis and design, John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.
- [6] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Kowalczyk K., Zastosowanie matrycy mikrofonowej do lokalizacji wyładowań niezupełnych, Między ewolucją a rewolucją – w poszukiwaniu strategii energetycznej, Tom I, Wydawnictwo Fundacja na rzecz Czystej Energii, Poznań 2015, 589–600.
- [7] Szóstka J., Fale i anteny, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [8] IEEE Std 145™–2013, IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas, New York 2013.
- [9] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matrycy przetworników, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering Issue: 78, ISSN: 1897–0737, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2014, 157–166.
- [10] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matryc sensorowych, Przegląd Elektrotechniczny, 10/2014, 74–77.
- [11] Sheets W., Graf R.F., Disccone VHF–UHF Antenna, Poptronix Electronix Handbook, 1997, <http://educyclopedia.karadimov.info/library/disccone.pdf>, dostęp: 14.01.2016.

PROTOTYPING OF UHF ANTENNAS USING SIMULATION SOFTWARE

The method of ultra high frequency is being increasingly applied in the power transformers diagnostics. Using the probe (antenna) mounted inside the transformer tank it is possible to detect partial discharges occurring in defects of high–voltage insulation system. Such probes must be designed and optimized on several factors, such as frequency band, directivity, or the geometrical design etc. This paper presents parameters of the two types of antennas (disccone and microstrip patch) obtained through simulation. Calculations and simulations results will provide basis to rise the prototypes of the antennas, which will eventually find application in the measurement system used for localisation of partial discharges inside power transformers.

(Received: 29. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)