

KIERUNKOWE UKŁADY DETEKCJI VHF/UHF DLA LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W LINIACH NAWIETRZNYCH I URZĄDZENIACH STACJI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Józef ROEHRICH, Paweł ZYDRON, Bartłomiej SZAFRANIAK, Damian KWAŚNY, Damian SZELAĞ

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: +12 6174416, +12 6172835 e-mail: roehrich@agh.edu.pl, pzydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Współczesne wymagania dotyczące niezawodności dostaw energii elektrycznej rodzą konieczność prowadzenia badań diagnostycznych i monitorowania poprawności działania pracujących urządzeń elektroenergetycznych. Występujące defekty linii napowietrznych oraz urządzeń stacji elektroenergetycznych, charakteryzujące się podwyższeniem wartości lokalnego natężenia pola elektrycznego ponad wartość krytyczną powodują powstawanie wyładowań niezupełnych, w różnych ich formach. Pozwala to stosować, w celu wykrywania i lokalizowania defektów, metody antenowe, z detekcją szerokopasmową w zakresach VHF/UHF. W artykule dokonano przeglądu zastosowań układów szerokopasmowej detekcji antenowej w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wybranych układów detekcji kierunkowej, służących wykrywaniu różnych form wyładowań elektrycznych w powietrzu poprzez detekcję impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, systemy lokalizacyjne, detekcja VHF/UHF, anteny kierunkowe.

1. WPROWADZENIE

Zadaniem elektroenergetyki jest wyprodukowanie i dostarczenie do odbiorcy końcowego energii elektrycznej o określonych parametrach jakościowych. Współczesne, wysokie wymagania dotyczące niezawodności dostaw energii elektrycznej rodzą konieczność prowadzenia badań diagnostycznych i monitorowania poprawności działania pracujących urządzeń elektroenergetycznych. Występujące defekty elementów konstrukcyjnych linii napowietrznych oraz urządzeń stacji elektroenergetycznych, charakteryzujące się podwyższeniem wartości lokalnego natężenia pola elektrycznego ponad wartość krytyczną powodują powstawanie wyładowań niezupełnych (wnz), w różnych ich formach [1]. Dla wykrycia i lokalizowania tego typu defektów możliwe jest stosowanie licznych metod diagnostycznych, zarówno elektrycznych jak i nieelektrycznych. W drugiej grupie metod wymienić należy przede wszystkim mające długą historię stosowania metody oparte na detekcji sygnałów emisji akustycznej (używane w diagnostyce transformatorów, rozdzielnic z izolacją gazową oraz linii przesyłowych i urządzeń rozdzielni napowietrznych), a także metody umożliwiające selektywne wykrywanie źródeł promieniowania ultrafioletowego, powstającego podczas wyładowań elektrycznych w powietrzu (np. jako jeden z objawów obecności ulotu elektrycznego na defektach przewodów lub osprzętu linii przesyłowych WN) [2, 3].

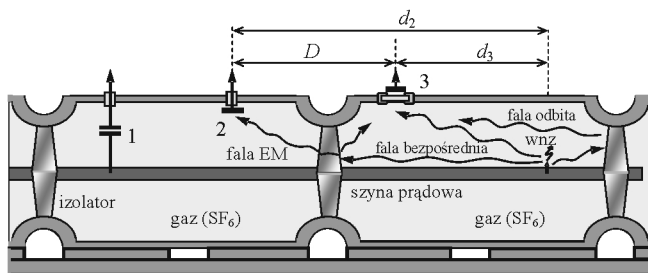
Wśród elektrycznych metod detekcji, rozpoznawania i lokalizowania źródeł wnz, wprowadzanych coraz częściej do praktyki diagnostycznej, wymienić można metody oparte na detekcji zaburzeń elektromagnetycznych, korzystające z różnego rodzaju czujników antenowych. Zakres użytecznych częstotliwości, stosowanych w tych badaniach, jest bardzo szeroki, od zakresu fal krótkich HF ($3 \div 30$ MHz), poprzez częstotliwości zakresu VHF (Very High Frequency, $30 \text{ MHz} \div 300 \text{ MHz}$), aż do końca zakresu UHF (Ultra High Frequency, $0,3 \div 3 \text{ GHz}$) [1, 4, 5]. Dobór częstotliwości pracy systemów detekcyjno-pomiarowych jest uzależniony od rodzaju obiektu oraz parametrów czasowo-częstotliwościowych impulsów wnz powstających w defektach izolacji.

Zwykle oczekuje się, że efektem realizowanej procedury diagnostycznej dotyczącej pomiarów wnz będzie określenie stopnia ich szkodliwości i znaczenia dla stanu układu izolacyjnego oraz zlokalizowanie defektu stanowiącego ich źródło. W wielu przypadkach metoda detekcji zaburzeń elektromagnetycznych w pasmach VHF/UHF pozwala na co najmniej częściowe spełnienie tych oczekiwań.

W artykule dokonano przeglądu zastosowań układów szerokopasmowej detekcji antenowej w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności z uwzględnieniem roli charakterystyk kierunkowych stosowanych w pomiarach czujników antenowych. W opisie ograniczono się do pomiarów wykonywanych w badaniach urządzeń i instalacji przesyłowych. Opisano również wyniki badań laboratoryjnych wybranych kierunkowych układów detekcji wyładowań.

2. DETEKCJA WNZ W UKŁADACH GIS

Ważną grupą urządzeń oraz instalacji przesyłowych i rozdzielczych współczesnej elektroenergetyki są urządzenia i instalacje izolowane sześćfluorkiem siarki SF₆. Należą do nich układy GIS (Gas Insulated Substations) oraz linie przesyłowe GIL (Gas Insulated Lines). Z punktu widzenia wykrywania wnz układy te mogą być traktowane jako obiekty jednowymiarowe, stanowiące linie transmisyjne (falowody), w których rozchodzą się fale elektromagnetyczne (E-M) generowane wskutek występujących we wnętrzu układu GIS/GIL wyładowań. Na rysunku 1 przedstawiono poglądowo strukturę takiego układu oraz możliwe sposoby pozyskiwania sygnałów pomiarowych, pozwalających na detekcję obecności wnz.



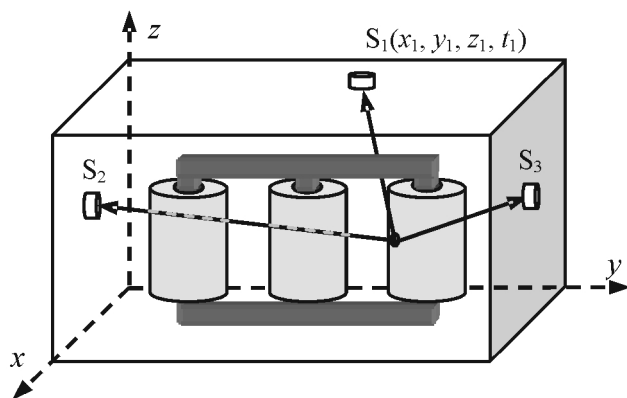
Rys. 1. Detekcja wnz w układach z izolacją gazową GIS: 1 – układ detekcyjny z kondensatorem sprzęgającym, 2 – czujnik UHF umieszczony wewnątrz modułu GIS, 3 – zewnętrzny czujnik UHF instalowany na oknie dielektrycznym modułu GIS, d_2 – odległość od źródła wnz do czujnika 2, d_3 – odległość od źródła wnz do czujnika 3, D – odległość pomiędzy czujnikami 2 a 3

Fale $E-M$ propagujące w instalacjach GIS/GIL ulegają m.in. tłumieniu, odbiciu i rozproszeniu. Zjawiska te są potęgowane przez obecność w strukturze GIS/GIL wykonanych z materiałów kompozytowych izolatorów odstępnikowych, z których część (lub wszystkie) pełnią także funkcje izolatorów grodziowych, separujących poszczególne segmenty całej instalacji na niezależne, szczelne przedziały. Czujniki UHF instalowane wewnątrz danego przedziału gazowego lub na zewnątrz, na oknie dielektrycznym, są budowane z reguły jako pojemnościowe układy sprzęgające [4]. Ze względu na wymagania dotyczące właściwego kształtowania rozkładu pola elektrycznego wewnątrz instalacji GIS/GIL mają one najczęściej postać płaskiego dysku (antena dyskowa) lub odpowiednio profilowanego stożka (antena stożkowa), wkomponowanego w wewnętrzną strukturę metalowej, gazoszczelnej osłony ciśnieniowej [6-9]. Mają one kierunkowe charakterystyki detekcji sygnałów $E-M$ z wartością maksymalną zysku antenowego w obszarze kątowym zwróconym w kierunku wewnątrz przedziału gazowego instalacji GIS/GIL.

Dla lokalizowania defektów stosuje się metody bazujące na pomiarach czasów propagacji impulsowych sygnałów $E-M$ generowanych przez wyładowania. Korzysta się wówczas z wyników pomiarów jedno-, dwu- i wielo-detektorowych obserwując impulsy bezpośrednie i odbite docierające do czujników systemu pomiarowego (rys. 1).

3. DETEKCCJA WNZ W TRANSFORMATORACH

W odróżnieniu od układów GIS/GIL detekcja i lokalizacja wnz w transformatorach energetycznych jest problemem przestrzennym 3D (rys. 2).



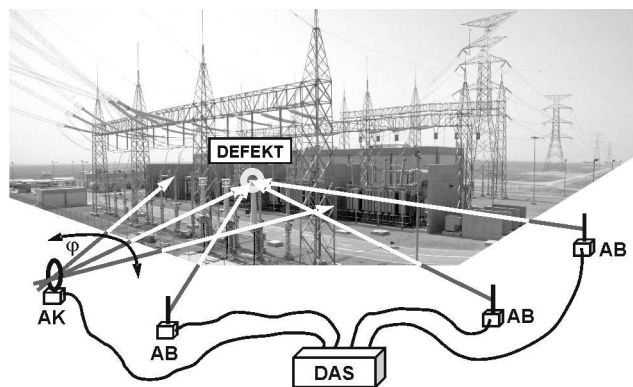
Rys. 2. Lokalizacja źródła wnz w transformatorze energetycznym jako problem 3D (S_1, S_2, S_3 – sygnały z 3 czujników UHF)

Detektorami wnz stosowanymi w badaniach wykonywanych na transformatorach są czujniki antenowe UHF, które mogą być wprowadzane do wnętrza kadzi przez dolny zawór olejowy transformatora lub instalowane na stałe na specjalnie dla tego celu wykonanych oknach dielektrycznych na ścianach lub pokrywie kadzi [6, 7, 10]. Parametry sygnałów docierających do detektorów są zależne od miejsca ich instalacji (współrzędnych x, y, z) oraz od czasu t (rys. 2).

Problemem podczas określania lokalizacji źródeł wnz jest silnie niejednorodna struktura wewnętrzna transformatora (rdzeń, nasycona izolacja papierowa, olej, uzwojenia). Biorąc pod uwagę różnice wartości przenikalności elektrycznej względnej ϵ , fala $E-M$ w czasie 10^{-9} s pokonuje drogę ok. 30 cm w powietrzu, ok. 20 cm w oleju transformatorowym i ok. 15 cm w nasyconym oleju preszpanie [11]. Dla zapewnienia odpowiedniej rozdzielczości geometrycznej, a co za tym idzie również rozdzielczości czasowej rejestrowanych sygnałów impulsowych konieczne jest stosowanie detekcji wnz w górnym zakresie pasma UHF, a nawet wyżej oraz układów próbkujących sygnały z częstotliwościami rzędu $10^9 \div 10^{10}$ Hz. We wcześniej publikowanych badaniach stwierdzono, że papier i olej nie wprowadzają tłumienia, które uniemożliwiłoby detekcję sygnałów wnz w tych zakresach częstotliwości [12].

4. DETEKCCJA WNZ W LINIACH PRZESYŁOWYCH I ROZDZIELNIACH NAPOWIETRZNYCH

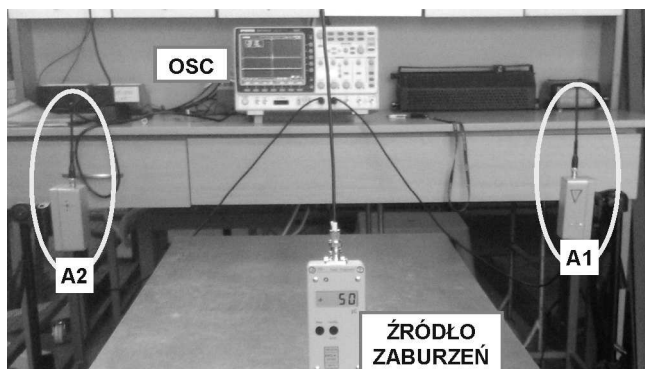
Stosowanie detekcji zaburzeń elektromagnetycznych w badaniach diagnostycznych linii przesyłowych i rozdzielni napowietrznych ma już swoją długą historię. Z jednej strony jest to spowodowane ogólnym wymogiem zachowania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń pracujących w jednym środowisku $E-M$. Z drugiej, ma to związek z możliwością zastosowania tej metody w diagnostyce do wykrywania różnego typu defektów, charakteryzujących się przekroczeniem wartości krytycznej natężenia pola elektrycznego i powstawaniem wnz [14-22]. Tak, jak w przypadku transformatorów energetycznych stosowane są metody, które umożliwiają określenie miejsca występowania defektu w przestrzeni 3D (rys. 3), choć często wystarczającym dla zlokalizowania defektu jest wyznaczenie kierunków w układzie współrzędnych $x-y$. Na rysunku 3 przedstawiono poglądowo schemat systemu antenowej detekcji wyładowań w rozdzielni napowietrznej. W badaniach stosowane są anteny bezkierunkowe i kierunkowe, np.: anteny ramowe (pętlowe), anteny Yagi (Yagi-Uda), anteny spiralne różnego typu oraz matryce antenowe [12-23].



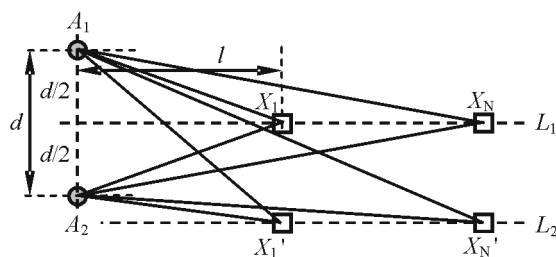
Rys. 3. Detekcja zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych przez wnz w rozdzielni napowietrznej: AK – antena kierunkowa, φ – kąt anteny kierunkowej, AB – antena bezkierunkowa, DAS – system akwizycji sygnałów

5. ANALIZA MOŻLIWOŚCI DETEKCYJNYCH I BADANIA LABORATORYJNE WYBRANYCH UKŁADÓW ANTENOWYCH

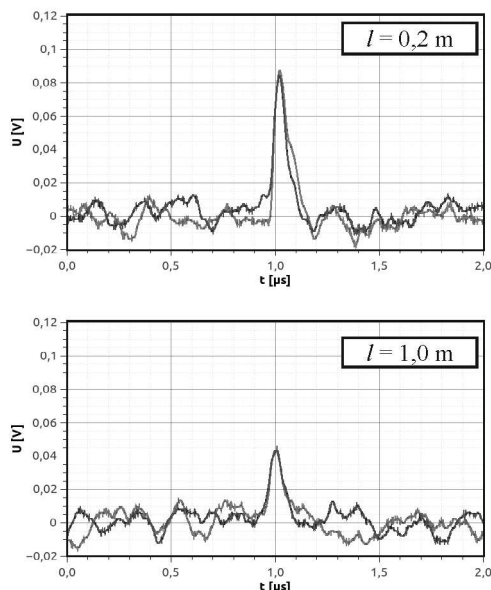
W eksperymentach laboratoryjnych rejestrowano metodami antenowymi sygnały impulsowe generowane przez komercyjny kalibrator ładunku pozornego o bardzo krótkim czasie narastania (rzędu 10^{-9} s) wyposażony w antenę prętową, stanowiący źródło powtarzalnych zaburzeń $E-M$ (rys. 4). W pierwszej kolejności badano układ odbiorczy 2 anten prętowych znajdujących się w odległości $d = 1$ m od siebie, umieszczając źródło zaburzeń w punktach X_n na linii L_1 oraz X'_n na linii L_2 (rys. 5). Zastosowano odbiorniki o jednakowym wzmacnieniu i paśmie przenoszenia wynoszącym 350 MHz. Ze względu na niewielką odległość anten od źródła znajdują się one w strefie indukcji, więc wielkość rejestrowanego sygnału może być miarą ich odległości od tego źródła (rys. 7 i 8).



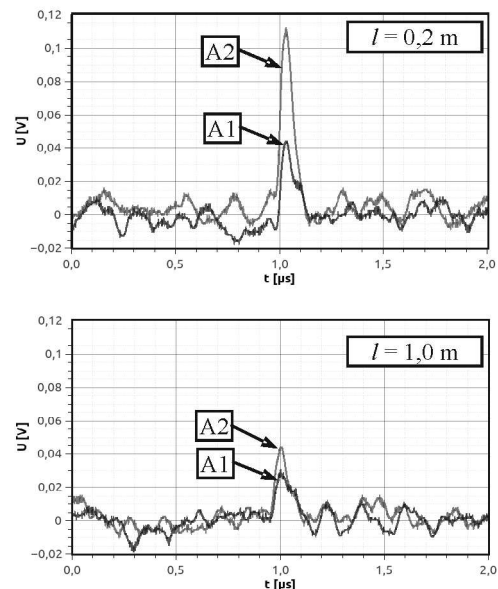
Rys. 4. Konfiguracja układu pomiarowego (A1, A2 – anteny)



Rys. 5. Geometria wzajemnego położenia układu anten i źródła

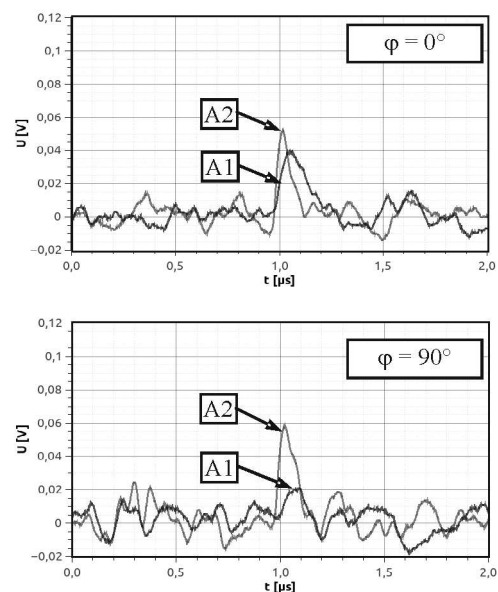


Rys. 6. Przebiegi sygnałów z anten A1 i A2 dla źródła na linii L_1 , wzrost l powoduje obniżenie wartości szczytowych impulsów (amplitudy równe ze względu na równe odległości anten od źródła)



Rys. 7. Przebiegi sygnałów z anten A1 i A2 dla źródła na linii L_2 , wzrost l powoduje obniżenie wartości szczytowych impulsów (amplitudy różne ze względu na różne odległości anten od źródła)

W drugiej kolejności jedną z anten prętowych (A1) zastąpiono anteną dyskową o charakterystyce kierunkowej, znajdującą się w odległości 0,7 m od źródła zaburzeń. Przy ustalonym położeniu źródła zaburzeń zmieniano kąt anteny względem źródła i rejestrowano sygnały z tej anteny oraz drugiej anteny prętowej (A2) – traktowanej jako antena referencyjna (rys. 8).



Rys. 8. Przebiegi sygnałów z anteny kierunkowej dyskowej (A1) i anteny referencyjnej prętowej (A2) dla kątów maksymalnej i minimalnej czułości (zysku) anteny kierunkowej

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Metody detekcji antenowej są stosowane w celu wykrywania defektów układów izolacyjnych charakteryzujących się przekroczeniem krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego, a co za tym idzie powstawaniem wzn, w różnych ich formach. W celu dokonania lokalizacji źródeł wylądowań przy użyciu metod triangulacyjnych opartych na pomiarach czasów propagacji wymagane jest stosowanie urządzeń pomiarowych o bardzo szerokim paśmie często-

tliwości, co najmniej do końca zakresu *UHF*, oraz odpowiednio wysokich częstotliwości próbkowania.

W artykule opisano obszary zastosowań tej metody diagnostycznej oraz przedstawiono wyniki badań dwóch wybranych układów anten: zestawu anten dookólnych oraz anteny kierunkowej. Wykazano, że obie z metod pozwalają na uzyskanie informacji o kierunku, na którym znajduje się źródło wyładowań, z zastosowaniem danych dotyczących wartości szczytowej rejestrowanych impulsowych zaburzeń *E-M*. W przypadku stosowania układu dwóch anten bezkierunkowych położenie źródła zaburzeń wskazuje prosta przechodząca przez środek odcinka *d* łączącego te anteny, prostopadła do niego; jeśli sygnały rejestrowane z obu anten mają jednakowe wartości. Z tego powodu istotnym jest, aby szerokości pasm przenoszenia oraz wzmocnienia obu torów antenowych były identyczne.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 2001
2. Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, IPPT-PAN, W-wa, 1994
3. Zhijin Zhang et al.: Comparison of different characteristic parameters acquired by UV imager in detecting corona discharge, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* vol. 23, no. 3, 2016, pp. 1597-1604
4. Florkowska B., Zydrón P., Florkowski M.: Localization and identification of corona forms based on phase-resolved images, *Measurement Science and Technology*, vol. 12, 2001, s. 1304-1310
5. Zydrón P., Roehrich J., Bonk M., Fuśnik Ł.: Zastosowanie analizatora widma w badaniach diagnostycznych układów izolacyjnych wysokiego napięcia bazujących na detekcji zaburzeń elektromagnetycznych, *ZN WEiA Politechniki Gdańskiej*, nr 46, 2015, str. 119-122
6. Judd M. D. et al.: Dielectric windows for UHF partial discharge detection, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 8, no. 6, 2001, pp. 953-958
7. Hauschild W., Lemke E.: High-voltage test and measuring techniques, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-45351-9, 2012
8. Ito T., Kamei M., Ueta G., Okabe S.: Improving the sensitivity verification method of the UHF PD detection technique for GIS, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 6, 2011, 1847-1853
9. Gao W., Ding D., Liu W., Huang X.: Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial discharge detection using the UHF method in GIS, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 29, no. 1, 2014, 38-47
10. Szymczak C., Sikorski W.: Projektowanie i optymalizacja anten UHF do monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 92, nr 10, 2016, str. 75-79
11. Convery A.R., Judd M.D: Measurement of propagation characteristics for UHF signals in transformer insulation materials, *Proc. 13th ISH*, p. 321, Delft, 2003
12. Sinaga H.H., Phung B.T., Blackburn T.R.: UHF sensor array for partial discharge location in transformers, *IEEE Int. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 979-982
13. Zhiguo Tang et al.: Partial discharge location in power transformers using wideband RF detection, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 6, 2006, pp. 1193-1199
14. Moore P. J., Portugues I. E., Glover I. A.: Remote diagnosis of overhead line insulation defects, *IEEE Power Eng. Society Gen. Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 1831-1835
15. Judd M. D.: Radiometric partial discharge detection, *Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 1025-1030
16. Stewart B.G., Nesbitt A., Hall L.: Triangulation and 3D location estimation of RFI and partial discharge sources within a 400kV substation, 2009 *IEEE EIC*, pp. 164-168
17. Portugues I. E. et al.: RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 1, 2009, pp. 20-29
18. Shan Q. et al.: Estimation of impulsive noise in an electricity substation, *IEEE Trans. on EMC*, vol. 53, no. 3, 2011, pp. 653-663
19. Walczak K.: Lokalizacja defektów izolatora wsporczeo z wykorzystaniem sond pojemnościowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 88, nr 5a, 2012, str. 55-58
20. Hou H., Sheng G., Jiang X.: Robust time delay estimation method for locating UHF signals of partial discharge in substation, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 28, no. 3, 2013, pp. 1960-1968
21. Qingyan Wu et al.: The study of Archimedean spiral antenna for partial discharge measurement, 4th *Int. Conf. Intellig. Control and Inform. Proc.*, 2013, pp. 694-698
22. Hou H., Sheng G., Jiang X.: Localization algorithm for the PD source in substation based on L-shaped antenna array signal processing, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 30, no. 1, 2015, 472-479
23. Khayam U. et al.: Partial discharge pattern of various defects measured by spiral antenna as UHF external sensor on 66 kV GIS model, *Int. Journal on Electr. Eng. and Informatics*, vol. 6, no. 2, 2014, pp. 404-420

DIRECTIONAL VHF/UHF DETECTION SYSTEMS FOR THE LOCATION OF PARTIAL DISCHARGE SOURCES IN OVERHEAD LINES AND SUBSTATIONS EQUIPMENT

Contemporary requirements for a reliable supply of electricity generate the need for diagnostics and monitoring of proper operation of working electrical power equipment. Defects occurring in transmission lines and substations devices, characterized by the increase of the local electric field strength above the critical value, cause the formation of partial discharges (PD), in their various forms. In order to detect and locate defects it is possible to use wideband antenna methods for PD pulses detection in the *VHF/UHF* range.

The article reviews the applications of wideband antenna detection systems in the diagnosis of the electrical power devices. The results of laboratory tests of selected directional detection systems applied for location of various forms of electrical discharges in the air, by detecting pulsed electromagnetic disturbances, are presented.

Keywords: partial discharges, locating systems, *VHF/UHF* detection, directional antennas.