

ZASTOSOWANIE SZYKÓW ANTENOWYCH W LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Józef ROEHRICH, Bartłomiej SZAFRANIAK, Paweł ZYDRON

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

tel.: +12 6174416, +12 6172835 e-mail: roehrich@agh.edu.pl, szafrani@agh.edu.pl, przydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Wyładowania niezupełne (wnz) są źródłami impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych o bardzo szerokim widmie. Dzięki temu dla ich wykrywania i lokalizowania mogą być stosowane metody antenowe, wykorzystujące różne techniki pomiarowe. W szczególności dotyczy to lokalizowania wyładowań powstających w liniach napowietrznych i urządzeniach stacji elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć. W artykule przedstawiono podstawy i rozważania teoretyczne dotyczące zastosowania w tym celu szyków (macierzy) antenowych o różnych konfiguracjach oraz wybrane wyniki badań laboratoryjnych. Przedstawione zostały m.in. analizy zastosowania metody TDOA (Time Difference Of Arrival), pozwalającej na określenie położenia źródeł wyładowań niezupełnych w oparciu o pomiar różnic czasów detekcji przebiegów impulsowych rejestrowanych przez poszczególne anteny wchodzące w skład szyku antenowego.

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, systemy lokalizacyjne, szyki antenowe, metody TOA/TDOA.

1. WPROWADZENIE

Przesył energii elektrycznej, w szczególności na duże odległości, wymaga stosowania wysokonapięciowych układów przesyłowych napięcia przemiennego (HVAC) lub stałego (HVDC). W dokumentach organizacji międzynarodowych (IEC - International Electrotechnical Commission oraz CIGRÉ - Conseil International des Grands Réseaux Électriques) oraz publikacjach naukowych i technicznych wyróżnia się trzy główne zakresy napięć stosowanych w systemach przesyłowych energii elektrycznej: HV – High Voltage, EHV – Extra High Voltage oraz UHV – Ultra High Voltage, jednak ich przedziały napięciowe na wyższych poziomach napięć nie są precyzyjnie określone [1-5]. Odpowiadające im, najczęściej podawane zakresy napięć, dla systemów AC, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zakresy napięć wysokonapięciowych systemów przesyłowych AC

System	Zakres napięciowy
HV	35 kV – 230 kV
EHV	245 kV – 750 kV
UHV	≥ 800 kV

W polskim systemie elektroenergetycznym sieci przesyłowe wysokich i najwyższych napięć pracują przy nominalnych napięciach międzyfazowych 110 kV, 220 kV i 400 kV. Są one projektowane w taki sposób, aby konstrukcja

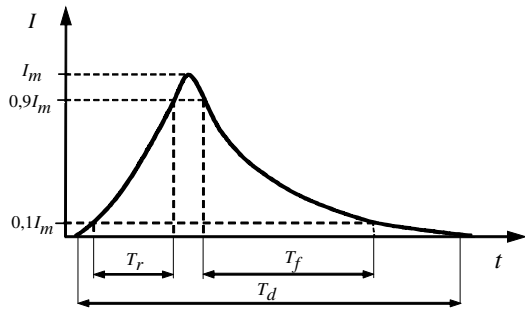
poszczególnych elementów składowych i urządzeń eliminowała lub, co najmniej ograniczała, powstawanie wyładowań niezupełnych (wnz), w różnych ich formach (ulotowe, powierzchniowe, wewnętrzne). Z tego względu obecność tych wyładowań oznacza zawsze pojawienie się zjawiska o niepożądanym charakterze.

W przypadku napowietrznych, przesyłowych układów wysokonapięciowych sprawdzenie występowania wyładowań: w urządzeniach, na przewodach fazowych, izolatorach i osprzęcie liniowym metodami antenowymi dokonywane jest zarówno podczas prób w warunkach laboratoryjnych, jak i po wybudowaniu linii lub stacji elektroenergetycznej – jako próby odbiorowe, dla oceny jakości wykonania prac i/lub poprawności konstrukcji [6, 7]. Wartościami progowymi są wówczas dopuszczalne poziomy generowanych zaburzeń radioelektrycznych, mierzonych przy zastosowaniu przyrządów, metod i procedur określonych w odpowiednich normach [8-11]. Badania takie, wykonywane są, od wielu już lat, ze względu na potencjalny wpływ powstających zaburzeń radioelektrycznych na otoczenie [12-14]. Jest to związane z koniecznością spełnienia przez instalacje elektroenergetyczne wymagań odnośnie do środowiskowej kompatybilności elektromagnetycznej EMC (*Electromagnetic Compatibility*).

Innym aspektem wykonywania badań umożliwiających wykrywanie wyładowań elektrycznych w liniach i stacjach elektroenergetycznych jest lokalizowanie przestrzenne (geometryczne) defektów, będących źródłami tych wyładowań. Przyczynami powstawania wyładowań niezupełnych mogą być: defekty elementów konstrukcyjnych linii napowietrznych (pęknięcia i rozploty drutów przewodów fazowych, pęknięcia i zabrudzenia izolatorów, itp.) oraz uszkodzenia powstające w urządzeniach stacji elektroenergetycznych, charakteryzujące się lokalnym podwyższeniem wartości natężenia pola elektrycznego ponad wartość krytyczną. Wyładowania mogą przyjmować różne formy, determinowane konfiguracją elektrod, właściwościami materiałów tworzących układ izolacyjny oraz rodzajem i parametrami jego defektów [15]. Dla wykrywania i lokalizowania źródeł wyładowań stosowane są liczne metody diagnostyczne, przede wszystkim elektryczne, w tym również stosujące detekcję antenową zaburzeń elektromagnetycznych [16-20].

Objawem defektów powstających w liniach przesyłowych oraz na urządzeniach stacji napowietrznych są m.in. wyładowania ulotowe. Ich impulsy prądowe (rys. 1) cechują się krótkim czasem narastania i niewielką szerokością

(tabela 2) [21]. Sprawia to, że są one źródłem elektromagnetycznych zaburzeń szerokopasmowych, umożliwiającą ich detekcję antenową w zakresach częstotliwości od fal długich aż do zakresu UHF [12, 15, 18]. Wyładowania niezupełne powstające w mikroszczelinach gazowych, mogą charakteryzować się jeszcze krótszymi czasami narastania oraz szerokościami impulsów prądowych [15, 21].



Rys. 1. Kształt i parametry impulsu prądowego wyładowania [17]: I_m - wartość maksymalna prądu, T_r - czas narastania, T_f - czas opadania, T_d - szerokość impulsu.

Tabela 2. Typowe wartości parametrów czasowych impulsów prądowych wyładowań w powietrzu [17]

Rodzaj impulsu	I_m [mA]	T_r [ns]	T_f [ns]	T_d [ns]	Częstość [1/s]
wyładowania w mikroszczelinach	1000	1	2	5	do 2000
ulot dodatni	50	10	100	200	do 10000
ulot ujemny	2	3	80	100	do 100000

Podczas badań diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych, w tym również wchodzących w skład linii przesyłowych i stacji napowietrznych, oczekuje się, że ich efektem będzie zarówno wykrycie obecności defektów będących źródłami wyładowań niezupełnych, jak również zlokalizowanie ich położenia. W wielu przypadkach metoda antenowej detekcji impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych pozwala na spełnienie tych oczekiwań.

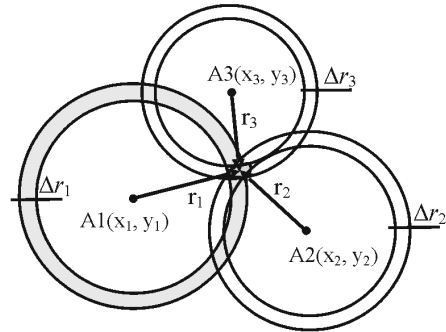
W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczących zastosowania szyków antenowych dla określania lokalizacji źródeł wzn metodą radiopelengacyjną opartą na pomiarze różnicy czasów propagacji sygnałów impulsowych. Badania były prowadzone w Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektrotechniki i Elektroenergetyki AGH w Krakowie.

2. METODY CZASOWE LOKALIZOWANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Jednym z celów badań diagnostycznych w elektroenergetyce jest zlokalizowanie źródeł wzn występujących w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Pewna grupa metod służących osiągnięciu tego celu bazuje na pomiarach i analizie czasów propagacji TOA (*Time of Arrival*) lub różnic czasów propagacji TDOA (*Time Difference of Arrival*) sygnałów impulsowych propagujących od źródła wzn do miejsc, w których rozlokowane są czujniki wykrywające ich obecność. Pierwsza z metod jest stosowana do lokalizowania źródeł wzn w transformatorach energetycznych przy zastosowaniu detekcji emisji akustycznej. Początek pomiaru czasu jest wówczas wyzwalany detekcją

impulsu elektrycznego wzn o nieporównanie krótszym czasie propagacji aniżeli sygnału akustycznego [22].

Uwzględniając współrzędne położenia poszczególnych czujników akustycznych A1÷A3 oraz zmierzone, bezwzględne czasy propagacji impulsów szacowane są odległości źródła sygnału impulsowego od tych czujników: r_1 , r_2 , r_3 . Na tej podstawie estymowane jest położenie defektu, źródła wzn. Na rysunku 2 przedstawiono ideę tej metody dla uproszczonego problemu dwuwymiarowego.

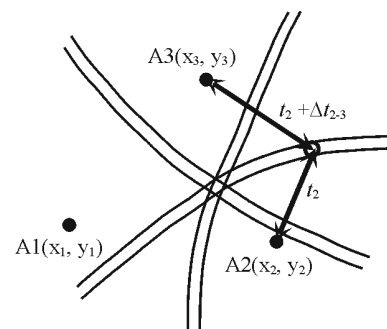


Rys. 2. Wizualizacja graficzna idei metody TOA

Dla lokalizowania źródeł wzn w liniach przesyłowych i stacjach napowietrznych metodami antenowymi stosowane mogą być układy anten (macierze anten, szyki antenowe), współpracujących ze sobą poprzez wspólny wielokanałowy system cyfrowej, synchronicznej rejestracji sygnałów. W przypadku anten bezkierunkowych (dookólnych, izotropowych) możliwe jest określanie położenia źródeł wyładowań, np. w oparciu o metodę triangulacyjną, bazującą na analizie różnic czasów rejestracji pojedynczych impulsów TDOA [23-27]. Minimalna wymagana liczba anten dla poprawnego zastosowania tej metody wynosi 3. Podobnie jak dla metody TOA, w celu określenia położenia źródła wyładowań konieczna jest dokładna znajomość współrzędnych usytuowania anten detekcyjnych: A1(x_1 , y_1), A2(x_2 , y_2) oraz A3(x_3 , y_3). Sygnały impulsowe wykrywane przez poszczególne anteny muszą być rejestrowane:

- synchronicznie,
- na wspólnej podstawie czasu,
- z odpowiednią częstotliwością próbkowania.

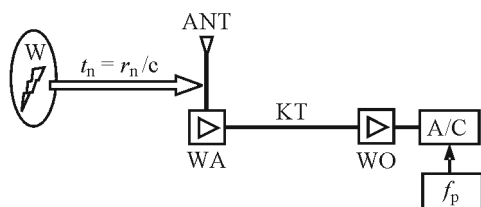
Ponieważ informacjami uzyskiwanymi z pomiarów są różnice czasów propagacji, więc algorytm lokalizacyjny musi wyznaczać krzywe na płaszczyźnie, dla których punkty na nich położone są tak odległe od pary dowolnych anten, że różnica czasów propagacji z tych punktów do wybranych anten odpowiada różnicy czasu Δt_m dla nich zmierzonej (rys. 3). Prowadzi to do konieczności rozwiązania układu równań hiperbolicznych.



Rys. 3. Wizualizacja graficzna idei metody TDOA

W przypadku lokalizowania położenia źródeł wnz w liniach i stacjach napowietrznych prędkość propagacji fali elektromagnetycznej $E-M$ jest niemal równa prędkości światła w próżni ($c \cong 299792458$ m/s). Oznacza to, że w czasie równym 1 ns fala pokonuje drogę ok. 0,3 m. Niepewność lokalizacji defektu jest uzależniona od niepewności określenia współrzędnych poszczególnych anten oraz niepewności wyznaczenia krzywych hiperbolicznych dla każdej pary anten Δr_{1-2} , Δr_{2-3} , Δr_{3-1} . Rozmycie to jest powiązane, poprzez prędkość propagacji fali $E-M$ w powietrzu, z niepewnością pomiaru różnic czasów propagacji Δt_{1-2} , Δt_{2-3} , Δt_{3-1} .

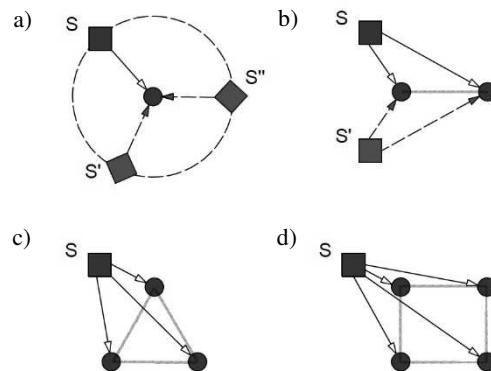
Wyznaczając czas propagacji t_n sygnału impulsowego od źródła wyładowania W do anteny detekcyjnej AN (gdzie $n = 1, 2$ lub 3) lub różnicę czasów propagacji Δt impulsów $E-M$ od źródła do dowolnych dwóch anten należy brać pod uwagę wszystkie czynniki wpływające na szacowanie ich wartości. Są to (rys. 4): charakterystyka częstotliwościowa anteny ANT , czas opóźnienia wzmacniacza antenowego WA , czas propagacji sygnału w kablu transmisyjnym KT , czas opóźnienia wzmacniacza oscyloskopu WO oraz opóźnienia powstające w procesie przetwarzania analogowo-cyfrowego. W tym ostatnim przypadku, również te, które są związane z rozdzielczością czasową rejestracji próbek sygnałów (a więc ze skończoną wartością częstotliwości próbkowania f_p). Weryfikacją jakości torów transmisji i przetwarzania sygnałów, rozumianej jako równość czasów propagacji sygnałów impulsowych w tych torach, jest wyznaczenie wartości wnoszonych przez nie opóźnień czasowych pomiędzy zarejestrowanymi w poszczególnych torach pomiarowych sygnałami pochodzącymi ze źródła zaburzeń impulsowych o znanej lokalizacji, równoodległego od każdej z anten detekcyjnych. W idealnie skonfigurowanym i skalibrowanym systemie różnice czasowe czasów propagacji sygnałów w poszczególnych torach pomiarowych powinny być zerowe lub znane.



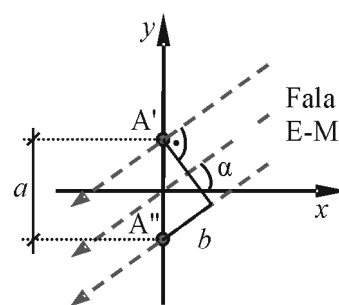
Rys. 4. Schemat toru pomiarowego impulsów zaburzeń $E-M$

Alternatywną metodą, badaną w niniejszej pracy, służącą lokalizowaniu źródeł wnz jest zastosowanie szyków antenowych, dzięki którym możliwe jest określenie kierunku, na którym znajduje się źródło zaburzenia impulsowego. W przypadku jednej anteny bezkierunkowej (rys. 5a) nie jest możliwe wskazanie kierunku położenia źródła sygnału. Zastosowanie szyku antenowego składającego się z takich anten pozwala rozwiązać ten problem. Szyki antenowe mogą być formowane w postaci szyków liniowych, planarnych, a nawet 3D. Na rysunku 5 przedstawiono kilka konfiguracji prostych szyków antenowych.

Jeśli odległości pomiędzy sąsiednimi antenami w szyku są jednakowe wówczas szyk jest regularny. Najprostszym szykiem liniowym jest szyk zawierający jedynie dwie anteny (rys. 5b). Pozwala on na określenie kierunku, na którym znajduje się źródło sygnału impulsowego metodą analizy różnicy czasu rejestracji sygnału impulsowego przez anteny tworzące szyk antenowy (rys. 6).



Rys. 5. Konfiguracje prostych szyków antenowych pozwalających na określenie kierunku na którym znajduje się źródło impulsowego sygnału wyładowań: a) pojedyncza antena wszechkierunkowa; b) najprostszzy szyk 2-antenowy; c) szyk 3-antenowy; d) szyk 4-antenowy (kwadraty S, S', S'' – źródła zaburzeń impulsowych; kółka – anteny bezkierunkowe)



Rys. 6. Najprostszzy szyk liniowy, 2-antenowy (A', A'' – anteny tworzące szyk; a – odległość pomiędzy antenami, α – kąt, pod którym znajduje się źródło fali płaskiej względem osi x szyku

Różnica czasu Δt_{obl} wynikająca z długości odcinka b (rys. 6) oraz prędkości propagacji fali $E-M$ zależy od kąta α , pod którym znajduje się kierunek źródła sygnału względem osi x szyku antenowego:

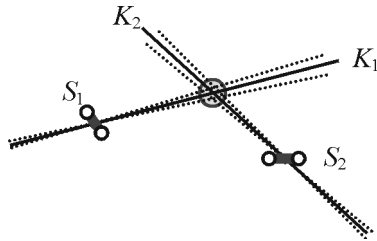
$$\Delta t_{obl}(\alpha) = \frac{b}{c} = \frac{a \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{c} = \frac{a \cdot \sin \alpha}{c} \quad (1)$$

W tabeli 3 przedstawiono obliczone zależności pomiędzy wartością kąta kierunku fali α , a długością odcinka b i opóźnienia czasowego Δt_{obl} dla wybranej konfiguracji szyku 2-antenowego, tj. dla odległości a pomiędzy antenami wynoszącej 2 m.

Tabela 3. Teoretyczne wartości długości odcinka b (różnica dróg fali $E-M$) oraz opóźnienia Δt_{obl} obliczone dla szyku antenowego utworzonego przez 2 anteny bezkierunkowe, z odstępem $a = 2$ m

α	b	Δt_{obl}
[°]	[m]	[ns]
0	0,00	0,00
10	0,34	1,16
15	0,52	1,74
20	0,68	2,28
30	1,00	3,34
45	1,42	4,72
60	1,74	5,78
75	1,94	6,48
90	2,00	6,68

Dla określenia położenia defektu, będącego źródłem wyładowań generujących falę $E-M$ koniecznym jest zastosowanie co najmniej dwóch szyków antenowych S_1 i S_2 , wyznaczających kierunki K_1 i K_2 (rys. 7). Podobnie jak w metodach triangulacyjnych błędy estymacji położenia źródła wznz wynikają z niepewności określenia współrzędnych szyków oraz niepewności wyznaczenia różnicy czasów determinujących kąty α_1 i α_2 , każdego z szyków.



Rys. 7. Zastosowanie dwóch szyków antenowych S_1 i S_2 wyznaczających kierunki K_1 i K_2 położenia źródła zaburzeń impulsowych na podstawie różnicy czasów propagacji fali $E-M$

3. STANOWISKO POMIAROWE I WYNIKI TESTÓW

Celem przeprowadzonych eksperymentów laboratoryjnych było dokonanie weryfikacji możliwości zastosowania szyku antenowego 2-elementowego dla określenia kąta α położenia źródła zaburzeń $E-M$ względem osi szyku. Źródłem zaburzeń impulsowych był kalibrator ładunku pozornego CAL2A (Power Diagnostix), będący generatorem skoku napięciowego o specyfikowanym czasie narastania $t_r \leq 300$ ps. Przyjmując, że czas narastania zbocza skoku t_r jest determinowany stałą czasową członu inercyjnego pierwszego rzędu, jego częstotliwość graniczna f_{3dB} może być szacowana zależnością:

$$f_{3dB} = \frac{0,35}{t_r} \quad (2)$$

Przyjmując najdłuższy katalogowy czas narastania t_r , częstotliwość graniczna f_{3dB} tego sygnału wynosi ok. 1,2 GHz. Kalibrator wyposażono w ćwierćfalową anteną prętową o częstotliwości rezonansowej ok. 400 MHz.

Anteny użyte do utworzenia szyku stosowanego podczas badań wykonano jako anteny prętowe $\lambda/4$ (izotropowe unipole ćwierćfalowe) o wysokości $h = 180$ mm i średnicy $2r = 4$ mm, z przeciwwagą, dopasowane do impedancji falowej kabla 50Ω . Częstotliwość rezonansowa tych anten, szacowana na podstawie wzoru [28]:

$$h + r = 0,24 \cdot \lambda \quad (3)$$

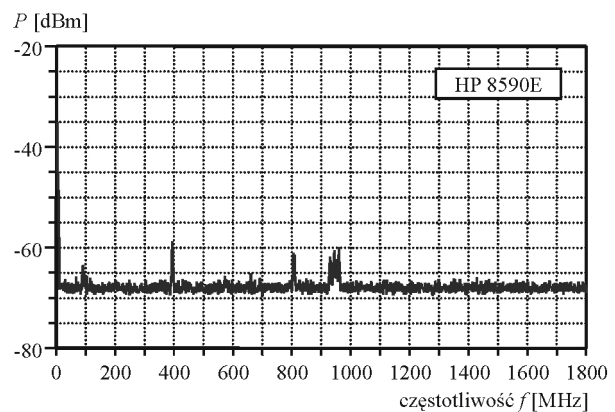
gdzie λ jest długością fali elektromagnetycznej w powietrzu ($\lambda \cong c / f$), wynosi ok. 396 MHz.

Podczas badań, dla rejestracji przebiegów uzyskiwanych z 2-elementowego szyku antenowego zastosowano oscyloskop cyfrowy Tektronix TDS784D-1M o paśmie przenoszenia w torach analogowych każdego z jego 4 kanałów $f_{3dB} = 1$ GHz. Przy aktywnych dwóch kanałach pomiarowych najkrótszy możliwy do uzyskania odstęp czasu Δt_m między sąsiednimi próbkami mierzonego sygnału jest zależny od zastosowanego trybu rejestracji [29, 30]. Dla rejestracji sygnałów niepowtarzalnych (akwizycja w trybie *real-time sampling*) wynosi on 0,5 ns (rzeczywista częstotliwość próbkowania $f_p = 2$ GHz). Jeżeli rejestrowane są sygnały powtarzalne, co ma miejsce w tym przypadku, wówczas można

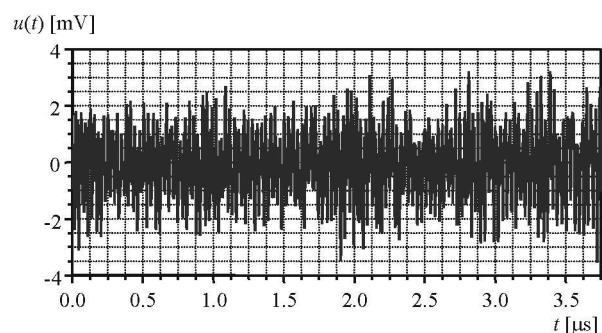
zastosować tryb *equivalent-time sampling*, w którym najwyższa uzyskiwana rozdzielczość czasowa wynosi 0,004 ns (ekwiwalentna częstotliwość próbkowania $f_p = 250$ GHz). Dodatkowo, wbudowany, wydajny procesor sygnałowy daje możliwość dokonania interpolacji danych z zastosowaniem algorytmów interpolacji liniowej lub funkcją $\sin x/x$.

Podczas badań, dzięki powtarzalnemu sygnałowi testowemu uzyskiwanemu z kalibratora wznz stosowano rejestrację w drugim z wymienionych trybów, zapisując dane pomiarowe w buforach pamięci o długości 100 000 próbek. Korzystając z możliwości oscyloskopu, dla potrzeb analizy i wizualizacji dane te były interpolowane z zastosowaniem funkcji $\sin x/x$.

Dla oceny parametrów tła elektromagnetycznego, towarzyszącego wykonywanym testom dokonano rejestracji widma sygnału odbieranego przez jedną z przygotowanych anten (rys. 8), stosując analizator widma HP 8590E. Ze względu na zarejestrowany podwyższony poziom zakłóceń $E-M$ w zakresie bardzo niskich częstotliwości ograniczono ich wpływ na pomiary poprzez zastosowanie dostępnej w oscyloskopie filtracji górnoprzepustowej z częstotliwością graniczną 100 kHz. Rejestrując sygnał z anteny za pomocą oscyloskopu (rys. 9) oszacowano poziom szumu przy braku sygnałów modelujących obecność wznz. Wartość skuteczna napięcia rejestrowanych szumów U_{Nrms} nie przekraczała 1,25 mV, a ich wartość międzyszczytowa U_{Np-p} 7 mV.



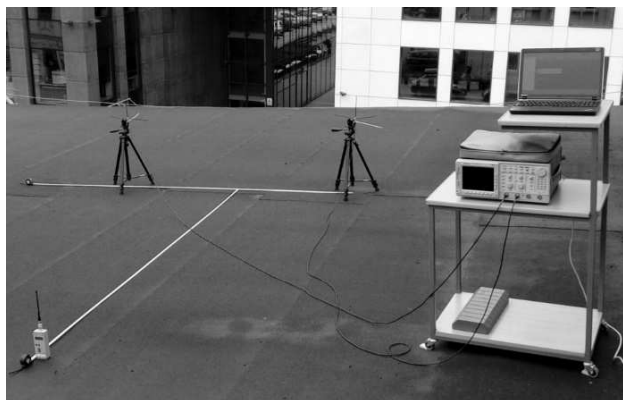
Rys. 8. Widmo sygnału napięciowego z anteny przy nieobecności sygnałów wznz modelowanych przez kalibrator wyładowań, wyznaczone z zastosowaniem analizatora widma HP 8590E



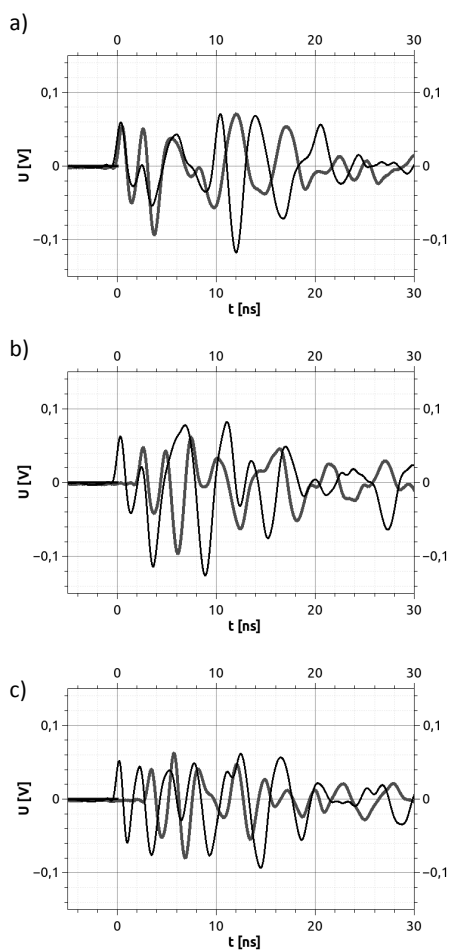
Rys. 9. Przykładowy przebieg sygnału napięciowego tła rejestrowanego z anteny przy nieobecności sygnałów wznz modelowanych przez kalibrator wyładowań

Przed zasadniczymi pomiarami dokonano weryfikacji opóźnień w torach pomiarowych przy kącie $\alpha = 0^\circ$ (rys. 10). Następnie zmieniano położenie kalibratora, określając przy tym kąt α względem osi szyku. Rejestrowano przebiegi

napięciowe uśredniając wyniki 16 kolejnych rejestracji. Wybrane przebiegi napięciowe uzyskane z anten A' i A'' przedstawiono na rysunku 11. Badania ze źródłem zaburzeń umieszczonym na osi x szyku antenowego wykazały różnice w czasach propagacji sygnałów wykrywanych przez anteny o wartości ok. 0,3 ns. Oznacza to, że różne są parametry transmisyjne obu torów pomiarowych i w dalszych badaniach uwzględniono ten fakt, wprowadzając odpowiedni współczynnik korekcyjny dla toru pomiarowego z większym opóźnieniem. Zestawienie wyników pomiaru dla wybranych kątów przedstawiono w tabeli 4.



Rys. 10. Konfiguracja pomiarowa podczas weryfikacji właściwości szyku antenowego utworzonego przez 2 anteny bezkierunkowe



Rys. 11. Wybrane przebiegi napięciowe sygnałów rejestrowanych z anten szyku antenowego (odstęp $a = 2$ m), źródło sygnału omieszczone na kierunku o różnym kącie α względem osi x szyku: a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 15^\circ$, c) $\alpha = 30^\circ$

Tabela 4. Wyznaczone pomiarowo wartości różnic czasowych Δt_m i korygowanej $\Delta t_m'$ dla szyku antenowego utworzonego przez dwie anteny bezkierunkowe, z odstępem $a = 2$ m

α	Δt_{obl}	Δt_m	$\Delta t_m'$	$\delta_{\Delta t}$
[$^\circ$]	[ns]	[ns]	[ns]	[%]
0	0,00	0,30	0,00	0,0
15	1,74	2,20	1,90	9,2
30	3,34	3,40	3,10	-7,2
45	4,72	5,20	4,90	3,8

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Właściwości anten i zestawów antenowych pracujących w zakresach częstotliwości VHF/UHF umożliwiają ich zastosowanie do lokalizowania źródeł wnz (np. ulotu elektrycznego) obecnych na urządzeniach napowietrznych stacji elektroenergetycznych oraz na przewodach, osprzęcie i urządzeniach linii przesyłowych wysokich i najwyższych napięć. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych prowadzonych dla oceny możliwości zastosowania 2-elementowych szyków antenowych w lokalizowaniu źródeł wnz metodą kierunkową (radiopelengacyjną), w oparciu o pomiar różnicy czasów propagacji impulsów $E-M$, bez rozwiązywania układów równań hiperbolicznych.

Biorąc pod uwagę parametry tła elektromagnetycznego rejestrowanego w miejscu wykonywania pomiarów oraz parametry rejestrowanych, modelowych impulsów wnz oszacowano, że wartość współczynnika SNR podczas pomiarów nie była mniejsza niż 42 dB. Wykonane badania potwierdzają możliwość zastosowania szyków antenowych dla lokalizowania źródeł impulsów $E-M$ metodą kierunkową. Dla efektywnego ich wykorzystania konieczne jest jednak zapewnienie odpowiednich parametrów torów transmisji sygnałów oraz aparatury pomiarowej rejestrującej przebiegi impulsowe, w szczególności w zakresie wnoszonych przez nie opóźnień czasowych. Ma to duże znaczenia dla poprawnej realizacji metod pomiarowych TDOA. Dla uzyskania rozdzielczości lokalizacji wystarczającej dla identyfikacji miejsc występowania wnz w napowietrznych urządzeniach elektroenergetycznych (od 0,1 m do 1 m) wymagana rozdzielczość pomiaru różnic czasów propagacji impulsów w torach pomiarowych powinna być rzędu 10^{-10} s. Równocześnie należy jednak zauważyć, że identyczne problemy dotyczą również pozostałych lokalizacyjnych metod czasowych, bazujących na pomiarze różnic czasu detekcji impulsów $E-M$.

Problemem technicznym i naukowym związanym z opisanymi w artykule pomiarami jest wpływ towarzyszących im w warunkach środowiska przemysłowego zaburzeń elektromagnetycznych, obniżających wartość współczynnika SNR, a więc utrudniających analizę rejestrowanych sygnałów. Zagadnienie to nie było rozważane na tym etapie i będzie przedmiotem dalszych badań.

7. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN60038:2012 Napięcia znormalizowane CENELEC
2. PN-EN 60071-1:2008 Koordynacja izolacji – Część 1: Definicje, zasady i reguły.
3. CIGRÉ Brochure no. 542: Insulation coordination for UHV AC Systems, 2014.

4. CIGRÉ Brochure no. 400: Technical requirements for substations exceeding 800 kV, 2009.
5. Kiessling, F., Nefzger, P., Nolasco, J.F., Kaintzyk, U., Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction, Springer-Verlag, 2003.
6. Kosztaluk R. (red.) Technika badań wysokonapięciowych, WNT, Warszawa.
7. Mikulski J., Aktualna procedura badań układów izolacyjnych linii napowietrznych 400 kV, Przegląd Elektrotechniczny, R. 92, no. 10, pp. 138-141, 2010.
8. PN-CISPR 16-2: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Wymagania dotyczące urządzeń i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne – Metody pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne.
9. CISPR TR 18-2:2010 Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Part 2: Methods of measurement and procedure for determining limits.
10. IEEE Std 430-2017, IEEE Standard procedures for the measurement of radio noise from overhead power lines and substations.
11. PN-E-05118:1977 Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne – Elektroenergetyczne linie i stacje wysokiego napięcia – Dopuszczalny poziom zakłóceń – Ogólne wymagania i badania terenowe.
12. Pakala W.E., Chartier V.L., Radio noise measurements on overhead power lines from 2.4 to 800 kV, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 90, no 3, pp. 1155- 1165, 1971.
13. Chartier V.L., Sheridan R., DiPlacido J.N., Loftness M.O., Electromagnetic interference measurements at 900 MHz on 230 kV and 500 kV transmission lines, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 1, no. 2, pp. 140-149, 1986.
14. Loftness M.O., Power line RF interference – Sound, patterns and myths, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 2, pp. 934-940, 1997.
15. 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.
16. Florkowska B., Zydrón P., Florkowski M.: Localization and identification of corona forms based on phase-resolved images, Measurement Science and Technology, vol. 12, pp. 1304-1310, 2001.
17. 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, str. 119-122, 2015.
18. Moore P. J., Portugues I. E., Glover I. A.: Remote diagnosis of overhead line insulation defects, IEEE Power Eng. Society Gen. Meeting, vol. 2, pp. 1831-1835, 2004.
19. Judd M. D.: Radiometric partial discharge detection, Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 1025-1030, 2008.
20. Roehrich J., Zydrón P., Szafraniak B., Kwaśny D., Szeląg D., Kierunkowe układy detekcji VHF/UHF dla lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych w liniach napowietrznych i urządzeniach stacji elektroenergetycznych, ZN WEiA Politechniki Gdańskiej, nr 51, str. 159-162, 2016.
21. CIGRÉ Brochure no. 61, Interferences produced by corona effect of electric systems, Paris, 1966
22. Markalous S.M, Tenbohlen S., Feser K., New robust non-iterative algorithms for acoustic PD-localization in oil/paper-insulated transformers, 14th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH-2005, paper G-040, Beijing, China, 2005.
23. Stewart B.G., Nesbitt A., Hall L.: Triangulation and 3D location estimation of RFI and partial discharge sources within a 400kV substation, IEEE EIC, pp. 164-168, 2009.
24. Portugues I. E. et al.: RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 20-29, 2009.
25. 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, pp. 1960-1968, 2013.
26. 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, 472-479, 2015.
27. Robles G., Fresno J. M., Sánchez-Fernández M., Martínez-Tarifa J. M., Antenna deployment for the localization of partial discharges in open-air substations, Sensors, vol. 16, no. 4, 541, 2016.
28. Kumar G., Ray K.P., Broadband microstrip antennas, Artech House, Boston, 2002
29. TDS 500D, TDS 600B & TDS 700D Digitizing Oscilloscopes User Manual, Tektronix Inc.
30. <https://www.tek.com/document/application-note/real-time-versus-equivalent-time-sampling> (20.11.2017).

APPLICATION OF ANTENNA ARRAYS IN THE LOCATION OF PARTIAL DISCHARGE SOURCES

Partial discharges (PD) are sources of very short impulsive electromagnetic disturbances with extra wide spectrum. As a result, aerial methods using various measuring techniques can be used to detect and locate them. In particular, this refers to locating partial discharges occurring at overhead transmission lines and power station equipment of high and very high voltages. The paper, which presents the continuation of the work of authors in this field, describes theoretical foundations and theoretical considerations as well as the results of laboratory investigations of the use of antenna arrays of various configurations for PDs source location. The analysis of the application of the TDOA method (Time Difference of Arrival) to determine the position of the discharge sources is based on the measurement of the time differences of pulse waveforms received by the individual antennas – members of particular antenna array.

Keywords: partial discharges, locating systems, antenna arrays, TOA/TDOA methods.