

## Ocena możliwości zastosowania matrycy anten UHF do lokalizacji wyładowań niezupełnych

**Streszczenie.** W artykule poruszona została problematyka lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych. Dzięki wykorzystaniu matrycy anten UHF w połączeniu z algorytmami kształtowania wiązki możliwe jest dokonanie estymacji kierunku nadejścia sygnału. W pracy przedstawiono wyniki badań, w których do rejestracji sygnału wykorzystano liniową matrycę anten monopolowych. Generowany sztucznie sygnał posiadał częstotliwość zbliżoną do rzeczywistej częstotliwości sygnałów emitowanych przez różnego rodzaju wyładowania niezupełne.

**Abstract.** This paper raises the issue of partial discharge sources localization. Through the use of UHF antennas array combined with beamforming algorithms it is possible to estimate the direction of arrival of the signal. The results of studies, in which the signal was registered using linear array of monopole antennas, were presented. Artificially generated signal had a frequency similar to the actual frequency of the signals emitted by different types of partial discharge. (**Possibility evaluation of UHF antennas array application to the localisation of partial discharges**).

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, antena UHF, matryca sensorowa, estymacja kierunku nadejścia sygnału

**Keywords:** partial discharges, UHF antenna, sensor array, Direction-of-Arrival estimation

### Wstęp

Podczas projektowania transformatorów energetycznych przyjmowany jest okres ich eksploatacji na ok. 30 lat. W polskim systemie elektroenergetycznym większość zainstalowanych transformatorów przekroczyła już ten wiek. Dzięki przeprowadzaniu okresowych badań diagnostycznych (m.in. badania stopnia zawilgocenia izolacji metodami polaryzacyjnymi, badania stanu mechanicznego uzwojeń, badania obecności wyładowań niezupełnych) możliwe jest podjęcie odpowiednich działań w celu przedłużenia żywotności transformatorów oraz utrzymania ich w dobrej kondycji.

Pojawiające się w okolicach defektu zestarzonego układu izolacyjnego wyładowania niezupełne (wnz) są najczęstszą przyczyną ewentualnej awarii transformatora.

Problematyka dotycząca detekcji, identyfikacji i lokalizacji źródeł wnz jest obecnie przedmiotem szeroko prowadzonych prac badawczych na całym świecie. Ich celem jest m.in. rozwój aktualnie stosowanych technik diagnostyki i monitoringu transformatorów energetycznych opartych na detekcji zjawiska wnz [1-4].

Autorzy niniejszego artykułu koncentrują się na poszukiwaniu nowych rozwiązań teoretycznych i technologicznych, których zastosowanie poprawiłoby dokładność lokalizacji defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego. Istotnym aspektem jest tutaj możliwość zastosowania danej metody bez przerywania normalnej pracy urządzenia. Obecnie stosowane techniki lokalizacji wnz (standardowa i zaawansowana technika osłuchowa oraz technika triangulacyjna) opierające się na analizie sygnałów emisji akustycznej (EA), w trudnych warunkach polowych, np. przy występowaniu większej liczby źródeł wnz, lub w przypadku rejestracji sygnałów silnie zaszumionych, nie umożliwiają wyznaczenia współrzędnych defektu z oczekiwaną dokładnością.

Postępujący rozwój metod i systemów pomiarowych opartych na, dokonywanych równolegle, wielokanałowych pomiarach tego samego sygnału przy pomocy tzw. matryc sensorowych (ang. *Sensor Array*) przyczynił się do opracowania koncepcji układu pomiarowego przystosowanego do lokalizacji wnz. W efekcie połączenia tej techniki akwizycji z algorytmami kształtowania wiązki, stosowanymi do estymacji kierunku nadejścia sygnału (ang. DOA – *Direction-of-Arrival*), otrzymano obiecującą metodę lokalizacji źródeł sygnałów.

W niniejszym artykule, oprócz założeń teoretycznych estymacji DOA zaprezentowany został prototypowy układ

pomiarowy do określania kierunku nadejścia sygnału elektromagnetycznego wykorzystujący matrycę anten UHF. Przedstawione zostały również wyniki rekonesansowych badań z wykorzystaniem zaprojektowanego układu pomiarowego oraz generatora sygnału UHF.

### Warunki dokonania estymacji kierunku nadejścia sygnału

Dokonanie estymacji kierunku nadejścia sygnału poprzedzone jest wymogiem spełnienia pewnych warunków i założeń. Najważniejsze z nich przedstawiono poniżej:

- Założenie liniowości i izotropowości medium transmisyjnego. Spełnienie tego założenia zapewnia, że medium transmisyjne w każdym miejscu posiada takie same właściwości fizyczne, a sygnały lub fale w dowolnym punkcie podlegają zasadzie superpozycji.
- Założenie pola dalekiego: źródło sygnału zlokalizowane jest tak daleko od matrycy, że czoło fali generowanej przez źródło jest płaskie (przybliżenie pola dalekiego) i na każdy element matrycy fala dociera z jednakowego kierunku propagacji (linie propagacji sygnałów docierających do matrycy rozpatrywane są jako równoległe do siebie). W praktyce stosowana jest odległość większa niż  $2D/λ$ , gdzie  $D$  to rozmiar matrycy, a  $λ$  długość fali sygnału.
- Poszczególne elementy matrycy powinny być rozmieszczone w odległości  $Δ$  nie większej niż połowa długości fali  $λ$  odbieranego sygnału. Można to zapisać w postaci nierówności:

$$(1) \quad \Delta \leq \frac{\lambda}{2}, \text{ przy czym: } \lambda = \frac{v}{f_c}$$

gdzie:  $Δ$  – odległość między elementami matrycy sensorowej,  $λ$  – długość fali,  $v$  – prędkość propagacji sygnału,  $f_c$  – częstotliwość dominująca sygnału.

- Założenie wąskopasmowości odbieranego sygnału. Sygnał generowany przez źródło posiada wyraźną częstotliwość dominującą, a częstotliwości składowe są skupione we względnie wąskim paśmie częstotliwości [5].

### Zasada działania matryc sensorowych

Wyjściową koncepcją określania kierunku nadejścia sygnału przy pomocy algorytmów kształtowania wiązki jest fizyczne ustawianie matrycy w zadanym kierunku i pomiar mocy sygnału wyjściowego. Kierunek nadejścia sygnału określa się jako kąt, dla którego pomiar mocy wyjściowej

wykazywał wartość maksymalną (dla jednego źródła) lub wartości maksymalne (dla kilku źródeł). W momencie, gdy macierz ustawiona jest na wprost źródła sygnału powinna być obserwowana najwyższa wartość mocy wyjściowej.

Poprzez odpowiednie zaprojektowanie tzw. „wektora sterującego” możliwe jest elektroniczne wysterowanie macierzy w zadanym kierunku. W celu otrzymania sygnału wyjściowego  $y(f, t)$ , wykorzystywana jest liniowa zależność między sygnałami odebranymi przez poszczególne elementy macierzy. W celu otrzymania sygnału wyjściowego, dodaje się zarejestrowane sygnały z zespolonymi wartościami wektorów wagowych  $\mathbf{w}(f, t)$ . W poniższych wzorach pojawia się symbol hermitianu  $H$ , co oznacza jednoczesną transpozycję i sprzężenie zespolone macierzy. Sygnał wyjściowy dla wiązki skierowanej w kierunku  $\theta$  można otrzymać korzystając z zależności:

$$(2) \quad y(f, t) = \mathbf{w}(f, t, \theta)^H \mathbf{x}(f, t)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość,  $t$  – czas,  $\theta$  – kąt „obserwacji”.

Całkowita uśredniona moc wyjściowa z kierunku  $\theta$  dla  $N$  przedziałów czasowych wynosi:

$$(3) \quad P(\mathbf{w}) = \frac{1}{KN} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |y(f_k, t_n)|^2 = \\ = \frac{1}{KN} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \mathbf{w}^H x(f_k, t_n) x^H(f_k, t_n) \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}}_{xx} \mathbf{w}$$

gdzie:  $K$  – liczba prążków częstotliwości w krótkiej transformacji Fouriera (ang. *Short Time Fourier Transform*, STFT),  $N$  – liczba ramek w STFT,  $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$  – estymowana macierz kowariancji odebranego sygnału, obliczana ze wzoru:

$$(4) \quad \hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{KN} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x(f_k, t_n) x^H(f_k, t_n)$$

Wzór (3) przedstawia ogólne równanie mocy wyjściowej otrzymanej na drodze kształtowania wiązki. W zależności od sposobu obliczenia wektorów wagowych w otrzymujemy różne metody kształtowania wiązki [5, 6].

#### Algorytmy kształtowania wiązki (ang. *Beamforming*)

W konwencjonalnym algorytmie kształtowania wiązki *Delay-and-Sum* (DAS) we wzorze (3) wartość  $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta)$ , gdzie  $\theta$  jest wartością kąta w obszarze obserwacji kierunkowej  $M$ -elementowej macierzy. Tablica wektorów sterujących  $\mathbf{a}(\theta)$  jest definiowana dla dowolnego kąta obserwacji  $\theta$  jako

$$(5) \quad \mathbf{a}(\theta) = [1 \quad e^{j\mu_i} \quad e^{j2\mu_i} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\mu_i}]^T$$

przy czym:

$$(6) \quad \mu = -\frac{2\pi f_c}{c} \Delta \sin \theta = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta \sin \theta$$

gdzie:  $\mu$  – częstotliwość przestrzenna,  $f_c$  – rozpatrywana częstotliwość dominująca,  $c$  – prędkość rozchodzenia się fali (w tym przypadku prędkość światła),  $\lambda$  – długość fali.

Dla każdego kąta skanowania  $\theta$ , średnia moc wyjściowa  $P(\theta)$  w krótkim przedziale czasowym jest obliczana ze wzoru (3). Można wykazać, że gdy  $\theta = \theta_i$  (czyli dla kąta nadejścia sygnału pochodzącego od  $i$ -tego źródła) moc wyjściowa  $P(\theta)$  osiąga maksymalną wartość.

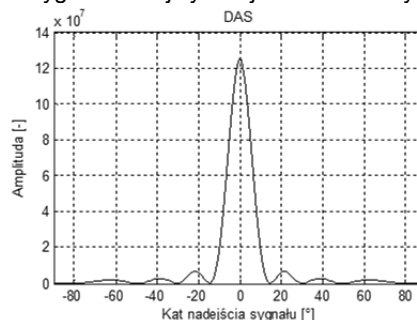
W praktycznych obliczeniach metodą DAS wektor wagowy  $\mathbf{w}(\theta) = \mathbf{a}(\theta)$  jest zdefiniowany jako:

$$(7) \quad \mathbf{w}(\theta) = \frac{\mathbf{a}(\theta)}{\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta)}}$$

Wstawiając równanie (7) do równania (3) otrzymuje się wzór na moc  $P(\theta)$ :

$$(8) \quad P(\theta) = P_{CON}(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{xx} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta)}$$

Wektor wagowy (7) może być interpretowany jako filtr przestrzenny DAS i jest on dopasowany do sygnałów docierających do przetworników w celu eliminacji zakłóceń. Sygnał odebrany przez wszystkie elementy sensorowe nadawane są wagi zawarte w wektorze  $\mathbf{w}$ . Wartość wagi zależy od opóźnienia czasowego występującego podczas docierania sygnału do kolejnych elementów macierzy. Kierunek nadejścia sygnału wyznaczany jest na podstawie wskazania sygnału o najwyższej wartości mocy.



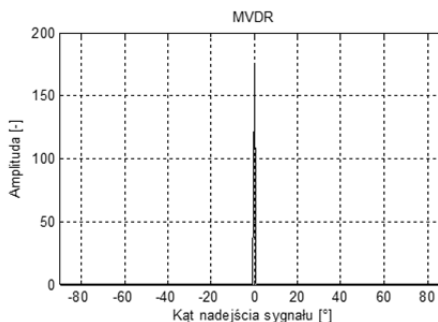
Rys.1. Przykładowy wynik estymacji kąta nadejścia sygnału przy pomocy algorytmu DAS uzyskany na drodze symulacji

Inną metodą kształtowania wiązki umożliwiającą osiągnięcie jej większej kierunkowości jest algorytm Capona, inaczej nazywany (w literaturze o tematyce DOA) algorytmem *MVDR* (ang. *Minimum Variance Distortionless Response*). W algorytmie tym minimalizowana jest moc sygnału wyjściowego zdefiniowanej przez funkcję (3), z zastrzeżeniem, że  $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) = 1$ . Tak więc minimalizowana jest moc sygnału szumu na wyjściu metody kształtowania wiązki, jednocześnie zachowując ustaloną jednostkową wartość wzmocnienia w kierunku  $\theta$ . Optymalna wartość  $\mathbf{w}$  może być wyznaczona np. za pomocą mnożników Lagrange'a, co daje:

$$(9) \quad \mathbf{w}(\theta) = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}$$

Podstawiając powyższą zależność do ostatecznej postaci wzoru (2), otrzymuje się [5, 6]:

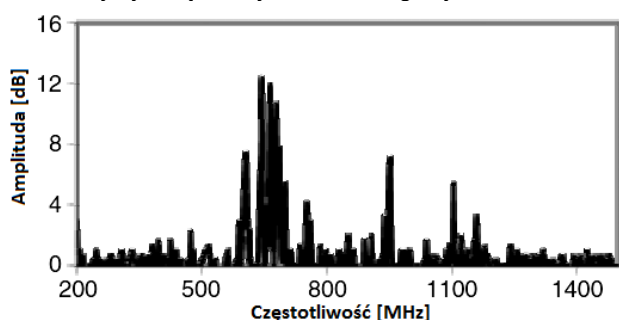
$$(10) \quad P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}$$



Rys.2. Przykładowy wynik estymacji kąta nadejścia sygnału przy pomocy algorytmu MVDR uzyskany na drodze symulacji

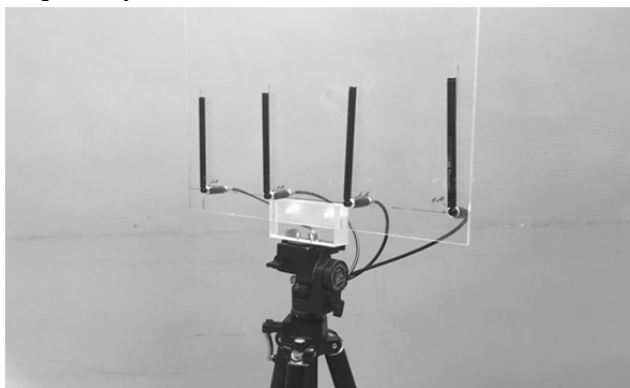
## Układ pomiarowy

Najważniejszym kryterium projektowym modułu odbiorczego układu pomiarowego, czyli matrycy sensorowej, jest określenie częstotliwości odbieranego sygnału. Determinuje to modyfikacje geometryczne zarówno samych anten, jak i matrycy jako całości, w zależności od charakteru sygnału. Elementy odbiorcze matrycy powinny cechować się dookólną charakterystyką kierunkową, a pasmo częstotliwościowe powinno pokrywać się z częstotliwością odbieranego sygnału. W celu poznania częstotliwości dominującej sygnału należy przeprowadzić jego analizę widmową. Istnieje wiele metod analizy widmowej, natomiast najczęściej stosuje się szybką transformatę Fouriera (ang. FFT – *Fast Fourier Transform*). Wstępna kalibracja geometryczna została dokonana na podstawie doniesień literaturowych i jako częstotliwość dominującą obrano 700 MHz [7], jako częstotliwość charakterystyczną dla wyładowań ślizgowych.



Rys.3. Widmo częstotliwościowe sygnału pochodzącego od wyładowania powierzchniowego [7]

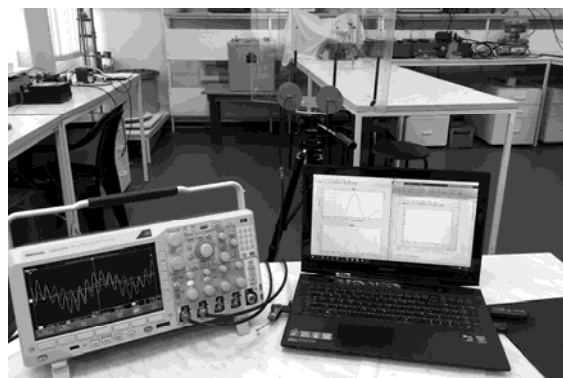
Na podstawie wyników obliczeń zaprojektowano i zbudowano matrycę sensorową składającą się z czterech anten unipolarnych UHF CH-99 firmy Comet. Anteny te, w zależności od konfiguracji geometrycznej, mogą pracować w szerokim zakresie częstotliwości (wg producenta od 70 MHz do 1 GHz). Na potrzeby prototypu wykonany został uchwyt antenowy ze szkła akrylowego. Matryca wyposażona jest w adapter gniazda fotograficznego, dzięki czemu możliwa jest integracja z większością statywów fotograficznych.



Rys.4. Czteroelementowa matryca anten UHF zainstalowana na statywie fotograficznym z podziałką kątową

Za akwizycję danych odpowiedzialny jest czterokanałowy oscyloskop Tektronix MDO3104 o paśmie analogowym 1 GHz/kanał i częstotliwości próbkowania 2,5 GHz.

Analiza danych przeprowadzana jest przy pomocy autorskiego oprogramowania. Otrzymywany wynik jest wartością kąta pod jakim sygnał padał na matrycę sensorową.



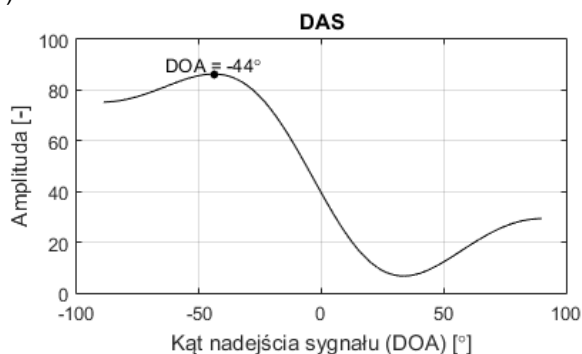
Rys.5. Układ pomiarowy podczas badań wstępnych

## Wyniki badań

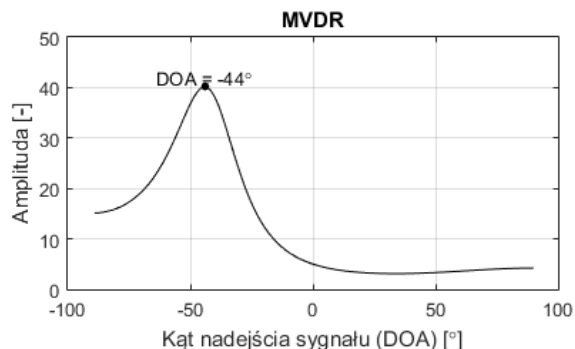
Do przeprowadzenia badań rekonesansowych wykorzystano przenośny generator częstotliwości RF Explorer RFE6Gen podłączony do anteny dysko- stożkowej ustawionej w odległości 3 metrów od matrycy. Generowana częstotliwość dobrana została na podstawie doniesień literaturowych i wynosiła 700 MHz. Matryca sensorowa składała się z czterech anten CH-99 rozmieszczonych co 150 mm. Rejestrowano sygnał podczas płynnego obrotu matrycy w zakresie od  $-45^\circ$  do  $45^\circ$ . Częstotliwość próbkowania wynosiła 2,5 GHz. Analizie poddawano okna czasowe o długości 4  $\mu$ s (10 000 próbek).

Na potrzeby artykułu zaprezentowano wyniki pomiarów dla trzech różnych pozycji matrycy względem modułu generującego sygnał. Dla każdej pozycji dokonano analizy zarejestrowanego sygnału przy pomocy dwóch omówionych wcześniej algorytmów. Każdy pojedynczy sygnał dodatkowo poddawany był analizie widmowej w celu weryfikacji nastawionej częstotliwości. Wyniki przedstawiono na rysunkach 6-8.

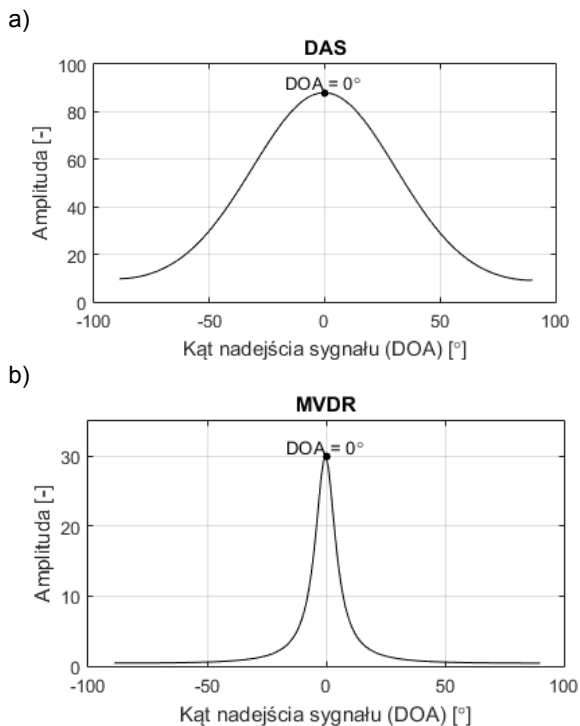
a)



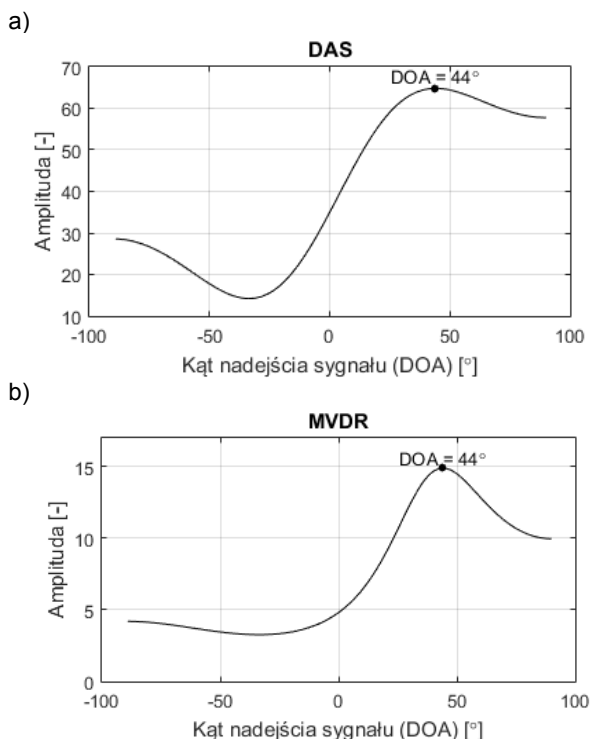
b)



Rys.6. Wyniki estymacji kąta nadejścia sygnału dla matrycy ustawionej pod kątem  $45^\circ$  zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara do modułu generującego sygnał otrzymane poprzez analizę algorytmem (a) DAS i (b) MVDR



Rys.7. Wyniki estymacji kąta nadejścia sygnału dla matrycy stawionej na wprost modułu generującego sygnał otrzymane poprzez analizę algorytmem (a) DAS i (b) MVDR



Rys.8. Wyniki estymacji kąta nadejścia sygnału dla matrycy ustawionej pod kątem 45° przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara do modułu generującego sygnał otrzymane poprzez analizę algorytmem (a) DAS i (b) MVDR

Powyższe wyniki pozwalają stwierdzić, iż układ działa poprawnie. Funkcja wyznaczania kąta nadejścia sygnału jest spełniona przy zastosowaniu obydwu rozpatrywanych algorytmów. Wyniki pokrywają się z założeniami teoretycznymi – widoczna jest wyraźna różnica w rozdzielczości kątowej otrzymanych wyników. Charakterystyka uzyskana za pomocą algorytmu MVDR

jest „bardziej jednoznaczna” niż uzyskana przy użyciu klasycznej metody DAS.

Aby wyznaczyć współrzędne defektu izolacji transformatora, należy użyć co najmniej dwóch matryc umieszczonych w różnych miejscach kadzi (w efekcie tego otrzymamy co najmniej dwa różne kierunki nadejścia sygnału). Półproste poprowadzone pod wyznaczonymi kątami DOA od punktów wyznaczających środek matryc powinny przeciąć się w miejscu występowania źródła sygnału (defektu).

## Wnioski

Matryca sensorowa jest to zbiór przynajmniej dwóch identycznych elementów sensorycznych pracujących równolegle, ułożonych w pewnej strukturze geometrycznej, używanych do akwizycji i przetwarzania sygnałów, głównie elektromagnetycznych lub akustycznych. Takie podejście pozwala na uzyskanie większej ilości parametrów (w stosunku do akwizycji jednym elementem odbiorczym) oraz poprawę osiągnięć ich oszacowania.

Po przeprowadzeniu badań rekonstruowanych można stwierdzić, iż zaimplementowane algorytmy DOA działają poprawnie. Potwierdza to jednocześnie możliwość wykorzystania technologii matryc sensorowych wspieranych zaawansowanymi algorytmami kształtowania wiązki sygnału do wyznaczenia współrzędnych źródła sygnału (przy wykorzystaniu przynajmniej dwóch matryc).

W przypadku techniki triangulacyjnej bardzo ważne jest precyzyjne oszacowanie początków sygnałów, co może być bardzo trudnym zadaniem, gdyż zwykle stosunek sygnału użytecznego do szumu jest bardzo niski. Sygnał rejestrowany przez sondy UHF również charakteryzuje się niskimi amplitudami, jednak w przypadku proponowanej metody algorytmy estymacji kierunku nadejścia sygnału są nieczułe na nieskorelowany z sygnałem szum. Zatem teoretycznie możliwa jest lokalizacja nawet w sytuacji gdy sygnał użyteczny zatopiony jest w szumie tła.

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".

**Autorzy.** mgr inż. Filip Polak, E-mail: Filip.R.Polak@doctorate.put.poznan.pl; dr inż. Wojciech Sikorski, E-mail: Wojciech.Sikorski@put.poznan.pl; dr hab. inż. Krzysztof Siodła prof. PP, E-mail: Krzysztof.Siodla@put.poznan.pl; Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

## LITERATURA

- [1] Yan-Qing Li, Qing Xie, Nan Wang, Xin Xiang, Fang Cheng Lu, Simulation of PD Location in Power Transformer Based on Root Multiple Signal Classification Method, *Properties and Applications of Dielectric Materials*, (2009), 553-556
- [2] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wylądowań niepełnych przy użyciu matryc sensorowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, (2014), 74-77
- [3] Sikorski W., Walczak K., PDtracker – system monitoringu wylądowań niepełnych w transformatorze energetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, (2014), 45-49
- [4] Sikorski W., Siodła K., Moranda H., Ziomek W., Location of Partial Discharge sources in Power Transformers Based on Advanced Auscultatory Technique, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.19, (2012), 1948-1956
- [5] Zhizhang Chen, Gopal Gokeda, Yiqiang Yu, *Introduction to Direction-of-Arrival Estimation*, (2010)
- [6] Balanis C.A., *Antenna theory, analysis and design*, (2005)
- [7] 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