

# Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matryc sensorowych

**Streszczenie.** W artykule poruszono problematykę lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matryc sensorowych oraz wysokorozdzielczej techniki estymacji kierunku nadejścia sygnału. W pracy przedstawiono wyniki symulacji, w których sygnały, generowane przez defekty układu izolacyjnego transformatora energetycznego, rejestrowane były za pomocą kwadratowej matrycy sensorowej, natomiast do estymacji kierunku nadejścia tych sygnałów użyto algorytmu MVDR.

**Abstract.** This article raises the issue of partial discharge sources location using sensor arrays and the high-resolution direction of arrival estimation technique. The paper presents the results of the simulations, in which the signals generated by defects in power transformer insulation system are collected using a rectangular sensor array, while the direction of arrival estimation of those signals is done by the MVDR algorithm. (**Location of partial discharges sources using sensor arrays**).

**Słowa kluczowe:** lokalizacja wyładowań niezupełnych, estymacja kierunku nadejścia sygnału, matryce sensorowe, MVDR.

**Keywords:** partial discharges location, direction of arrival estimation, sensor arrays, MVDR.

doi:10.12915/pe.2014.10.19

## Wstęp

Awarie dużych transformatorów energetycznych są zazwyczaj skutkiem występowania defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego, stanowiących źródła wyładowań niezupełnych (wnz). Możliwość precyzyjnego wyznaczenia miejsca występowania defektu zdecydowanie usprawniłaby proces diagnostyki transformatorów pracujących w systemie energetycznym. Problematyka dotycząca detekcji, identyfikacji i lokalizacji źródeł wnz stanowi obecnie przedmiot szeroko prowadzonych prac badawczych, których celem jest, m.in. rozwój i poprawa wiarygodności aktualnie stosowanych technik diagnostyki i monitoringu transformatorów energetycznych opartych na detekcji zjawiska wnz [1-8].

Prace badawcze autorów niniejszego artykułu koncentrują się na poszukiwaniu nowych rozwiązań teoretycznych i technologicznych, które pozwoliłyby wydawnie poprawić dokładność lokalizacji defektów wysokonapięciowego układu izolacyjnego. Jedną z koncepcji zakłada zastosowanie techniki matryc sensorowych (ang. *Sensor Array*) do oszacowania kierunku nadejścia sygnału (ang. *DOA – Direction-of-Arrival Estimation*) generowanego przez wnz. Genezą podjęcia prac nad tym zagadnieniem jest fakt, że popularne techniki lokalizacji (standardowa i zaawansowana technika osłuchowa oraz technika triangulacyjna), w bardzo trudnych warunkach polowych, tj. przy występowaniu wielu źródeł wnz, czy rejestrowaniu sygnałów silnie zaszumionych, nie pozwalają z oczekiwaną dokładnością wyznaczyć współrzędnych XYZ defektu. Technologia matryc sensorowych, wsparta dodatkowo najnowszymi, wysokorozdzielczymi algorytmami estymacji kierunku nadejścia sygnału (*MUSIC*, *Root-MUSIC*, *ESPRIT*, *MVDR* itp.) jest, przynajmniej teoretycznie, pozbawiona wad i ograniczeń wspomnianych wcześniej technik konwencjonalnych [2, 4, 7, 8].

## Estymacja kierunku nadejścia sygnału

Pierwszy algorytm lokalizacji źródeł sygnałów, wykorzystujący matryce sensorowe oraz wysokorozdzielcze techniki estymacji widma częstotliwościowego został opracowany i opublikowany w 1984 r. przez R.O. Schmidta [1]. W następnych latach opracowano nowe koncepcje i algorytmy, które jednak, z uwagi na wysoką złożoność obliczeniową i jednocześnie niewystarczającą wydajność ówczesnych komputerów, mogły być zaimplementowane

oraz efektywnie wykorzystane dopiero na początku XXI wieku.

Dokonanie estymacji kierunku nadejścia sygnału jest możliwe, gdy spełnione zostaną następujące założenia:

- Liniowe i izotropowe medium transmisyjne, tzn.  $d$  źródeł emituje  $d$  sygnałów, które propagują się w medium i padają na  $M$ -elementową matrycę sensorów. Spełnienie tego założenia zapewnia, że medium transmisyjne posiada takie same właściwości fizyczne w każdym kierunku, a sygnały lub fale w dowolnym punkcie podlegają zasadzie superpozycji.
- Założenie pola dalekiego:  $d$  źródeł sygnałów zlokalizowanych jest tak daleko od matrycy, że fala generowana przez każde ze źródeł dociera na każdy element matrycy z jednakowego kierunku propagacji, a czoło fali jest płaskie (przybliżenie pola dalekiego). Zatem linie propagacji  $d$  sygnałów docierających do matrycy rozpatrywane są jako równoległe do siebie. To założenie może być zrealizowane poprzez ustawienie matrycy w dużo większej odległości od źródła sygnału niż rozmiar samej matrycy. W praktyce stosuje się odległość większą niż  $2D^2/\lambda$ , gdzie  $D$  to rozmiar matrycy, a  $\lambda$  długość fali sygnału.
- Odległość między elementami matrycy  $\Delta$  nie może być większa niż połowa długości fali  $\lambda$  odbieranego sygnału, co można zapisać w postaci nierówności:

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

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

- Założenie wąskopasmowości:  $d$  sygnałów pochodzących od  $d$  źródeł posiada tą samą częstotliwość dominującą, a ich częstotliwości składowe są skupione w tym samym paśmie częstotliwości. Matematycznie, każdy z chwilowych sygnałów pochodzący od źródeł może być opisany równaniem:

$$(2) \quad s_i^r(t) = \alpha_i(t) \cos[2\pi f_c t + \beta_i(t)], \quad 1 \leq i \leq d$$

gdzie:  $\alpha_i(t)$  – amplituda sygnału,  $f_c$  – częstotliwość dominująca,  $\beta_i(t)$  – przesunięcie fazowe,  $d$  – liczba źródeł sygnałów.

Oznacza to, że amplitudy  $\alpha_i(t)$  i fazy  $\beta_i(t)$  zmieniają się powoli w odniesieniu do  $\tau$ , który jest czasem propagacji fali między kolejnymi elementami matrycy. Prawdziwe są zatem stwierdzenia:

$$(3) \quad \alpha_i(t - \tau) \approx \alpha_i(t), \quad \beta_i(t - \tau) \approx \beta_i(t)$$

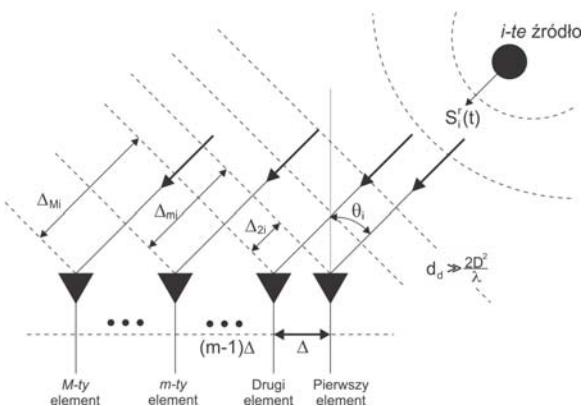
Wolno zmieniające się wartości amplitudy  $\alpha_i(t)$  i fazy  $\beta_i(t)$  zapewniają, że w wyniku transformaty Fouriera równania (1) otrzyma się większość częstotliwości składowych w bliskim sąsiedztwie częstotliwości dominującej  $f_c$ . Zależność (1) można również przedstawić w postaci obwiedni zespolonej (ang. *complex envelope*), lub w postaci tzw. fazora (wskazu), czyli z pominięciem pulsacji [3]:

$$(4) \quad s_i^{env}(t) = \alpha_i(t) e^{j\beta_i(t)}$$

takiej, że:

$$(5) \quad s_i^r(t) = \text{Re}\{s_i^{env}(t) e^{j2\pi f_c t}\}$$

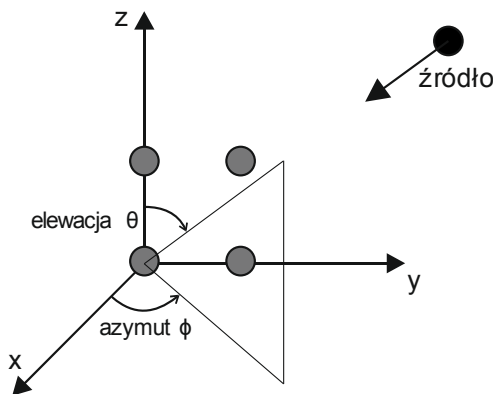
Zobrazowanie powyższych założeń przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Model danych estymacji kierunku nadejścia sygnału za pomocą  $M$ -elementowej liniowej matrycy sensorowej

### Kwadratowa matryca sensorowa

Najprostszy przypadek, czyli odbiór sygnału przy pomocy jednowymiarowej liniowej matrycy sensorowej oraz wyznaczenie kąta wyłącznie w jednej płaszczyźnie, został opisany w pracy [4]. Estymacja kierunku nadejścia sygnału w przestrzeni trójwymiarowej możliwa jest jednak tylko przy zastosowaniu planarnej matrycy (np. kwadratowej – rys.2).



Rys.2. Schemat ideowy kwadratowej matrycy sensorowej o wymiarach  $2 \times 2$  przedstawionej w kartezjańskim układzie współrzędnych

Wymiary matrycy planarnej można zapisać w postaci  $M_x \times M_y$ . Kolejne elementy matrycy ponumerowane są według zasady  $1 \leq k_x \leq M_x$  i  $1 \leq k_y \leq M_y$ . Według opisanego

wcześniej modelu danych zakłada się, że  $d$  sygnałów wąskopasmowych o długości falowej  $\lambda$  emitowanych jest z  $d$  źródeł a płaskie czoło fali sygnału pochodzącego z  $i$ -tego źródła pada na matrycę pod kątem azymutu  $\phi_i$  i elewacji  $\theta_i$ . Jeśli przyjmiemy, że:

$$(6) \quad \mu_i = \cos \phi_i \sin \theta_i \quad \text{oraz} \quad \nu_i = \sin \phi_i \sin \theta_i, \quad 1 \leq i \leq d$$

oraz:

$$(7) \quad \xi_i = \mu_i + j\nu_i = \sin \theta_i e^{j\phi_i}$$

wtedy zależności do wyznaczania kąta azymutu  $\phi_i$  i elewacji  $\theta_i$  przyjmują następującą postać:

$$(8) \quad \phi_i = \arg(\xi_i) \quad \text{oraz} \quad \theta_i = \arcsin(\|\xi_i\|)$$

Jeśli dane odebrane przez elementy matrycy ( $k_x, k_y$ ) są podane w postaci  $x_{k_x, k_y}(t_n)$  to w każdym z okien czasowych  $t_n$  jest  $M = M_x \cdot M_y$  próbek.

Wszystkie sygnały  $s_i(t)$  generowane przez  $d$  źródeł oraz szumy  $n(t)$  rejestrowane przez przetwornik  $k_x, k_y$  w chwili czasowej  $t$ , możemy przedstawić za pomocą następującej zależności:

$$(9) \quad x_{k_x, k_y}(t_n) = \sum_{i=1}^d s_i(t_n) \sum_{i=1}^d e^{j(k_x-1)\mu_i} e^{j(k_y-1)\nu_i} + n_{k_x, k_y}(t_n)$$

Jeśli dwuwymiarowa macierz  $\chi(t_n) \in C^{M_x \times M_y}$  zawiera dane odebrane przez wszystkie  $M_x \times M_y$  elementy matrycy w oknie czasowym  $t_n$ , macierz  $\chi(t_n)$  może być wtedy zapisana jako:

$$(10) \quad \chi(t_n) = \sum_{i=1}^d \mathbf{a}(\mu_i) \mathbf{a}^T(\nu_i) s_i(t_n) + N(t_n)$$

gdzie:  $\mathbf{a}(\mu_i) \in C^{M_x}$  i  $\mathbf{a}(\nu_i) \in C^{M_y}$  są definiowane przez tablicę wektorów sterujących (11) i mogą być interpretowane jako oddzielne liniowe wektory sterujące macryc liniowych o wymiarach odpowiednio  $M_x$  i  $M_y$ . Macierz  $N(t_n)$  zawiera wartości szumu.

$$(11) \quad \mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\mu_1, \nu_1) \quad \mathbf{a}(\mu_2, \nu_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\mu_d, \nu_d)]$$

gdzie:

$$(12) \quad \mathbf{a}(\mu_i, \nu_i) = \mathbf{a}(\nu_i) \otimes \mathbf{a}(\mu_i)^T$$

### Algorytm kształtowania wiązki Capona (MVDR)

Pierwszą próbą automatycznej lokalizacji źródeł sygnałów z zastosowaniem macryc sensorowych było wykorzystanie metod kształtowania wiązki, definiowanej jako wąski strumień energii propagujący się w przestrzeni. Założeniem tych metod jest ustawienie matrycy w pewnym kierunku w celu zarejestrowania sygnału i określenia jego mocy. Pozycja matrycy, w której rejestrowany był sygnał o największej wartości mocy, określa kierunek nadejścia sygnału. W celu połączenia danych odebranych przez matrycę w jeden sygnał wyjściowy wprowadza się wektor wagowy  $\mathbf{w}$ . Odpowiedź matrycy, w formie ujednoczonego sygnału, można zapisać w postaci [5, 6]:

$$(13) \quad y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)$$

Średnią moc  $N$  przebiegów czasowych odebranych przez matrycę, w funkcji wag, oblicza się według wzoru:

$$(14) P(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(t_n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w^H x(t_n) x^H(t_n) w$$

Wykorzystując właściwość, że sygnał dochodzący do matrycy składa się ze skorelowanych sygnałów właściwych i nieskorelowanego szumu, do oddzielenia sygnału użytecznego od szumu można zastosować macierz kowariancji, która w tym przypadku przyjmie postać:

$$(15) \hat{R}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n) x^H(t_n)$$

Łącząc ze sobą dwa powyższe wzory otrzymujemy:

$$(16) P(w) = w^H \hat{R}_{xx} w$$

Konwencjonalny algorytm (Bartletta) kształtowania wiązki jest rozszerzeniem klasycznej analizy widmowej Fouriera. Sygnałom odebranych przez wszystkie elementy sensorowe nadawane są wagi  $w$ . Wartość wagi zależy od opóźnienia czasowego występującego podczas docierania sygnału do kolejnych elementów matrycy. Kierunek nadejścia sygnału wyznaczany jest na podstawie wskazania sygnału o najwyższej wartości mocy. Algorytm ten posiada niską rozdzielczość, co przekłada się na aplikacyjność w przypadku występowania tylko jednego sygnału.

Wspomnianym problemom naprzeciw wychodzi algorytm Capona, inaczej nazywany (w literaturze o tematyce akustycznej) filtrem MVDR (ang. *Minimum Variance Distortionless Response*). W algorytmie tym minimalizowana jest funkcja (14), z zastrzeżeniem, że  $w^H A(\theta) = 1$ . Tak więc minimalizowana jest moc sygnału pochodząca od szumu, jednocześnie zachowując ustaloną wartość wzmocnienia w kierunku  $\theta$ . Optymalna wartość  $w$  może być wyznaczona np. za pomocą mnożników Lagrange'a, co daje:

$$(17) w = \frac{\hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)}{a^H(\theta) \hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)}$$

Podstawiając powyższą zależność do (15), otrzymujemy:

$$(18) P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta) \hat{R}_{xx}^{-1} a(\theta)}$$

Minimalizację mocy można interpretować jako poświęcenie skuteczności tłumienia szumu na rzecz bardziej skoncentrowanego „zerowania” w kierunkach, z których dochodzi sygnał od innych źródeł.

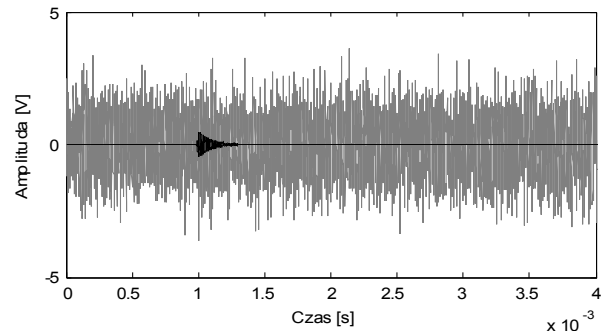
### Lokalizacja źródeł wnz w transformatorze energetycznym – wyniki przykładowych symulacji

Wyładowania niezupełne, w zależności od typu defektu i układu izolacyjnego, w którym występują, emitują fale elektromagnetyczne o częstotliwościach zawierających się w szerokim zakresie (od kiloherców do gigaherców). W przeprowadzonych symulacjach, sygnał elektromagnetyczny modelowano w postaci kombinacji funkcji sinusoidalnej i wykładniczej:

$$(19) f(t) = \begin{cases} 0,5e^{(-2 \cdot 10^5(t-t_0))} \sin(2\pi ft) & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0,5e^{(-10^4(t-t_0))} \sin(2\pi ft) & t_0 < t \leq t_1 \end{cases}$$

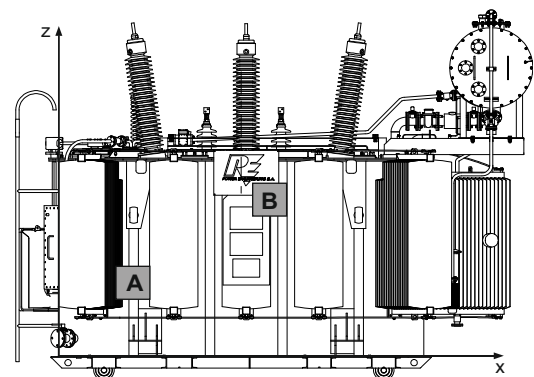
gdzie:  $t_0 = 0,001$  s – punkt, w którym występuje maksymalna amplituda sygnału,  $t_1 = 0,0041$  s – koniec sygnału,  $f = 37$  MHz – częstotliwość sygnału.

Wybór wartości  $f$  podyktowany był faktem, iż dla układu pomiarowego wykorzystującego sondę pojemnościową opisaną w [9] jest to jedna z częstotliwości charakterystycznych dla impulsów wyładowań powierzchniowych o dominującej stałej normalnej pola elektrycznego, które stanowią największe zagrożenie dla papierowo-olejowego układu izolacyjnego transformatora [7]. W celu jak najdokładniejszego odzwierciedlenia trudnych warunków pomiarowych panujących w trakcie rzeczywistych badań diagnostycznych (wysoki poziom szumów i szerokopasmowych zakłóceń), do niezasumionych sygnałów harmonicznym dodawano biały szum gaussowski. Tak zamodelowane sygnały charakteryzowały się stosunkowo niską wartością współczynnika SNR (ang. *Signal-to-Noise Ratio*), która określa stosunek sygnału użytecznego do szumu (rys. 3)

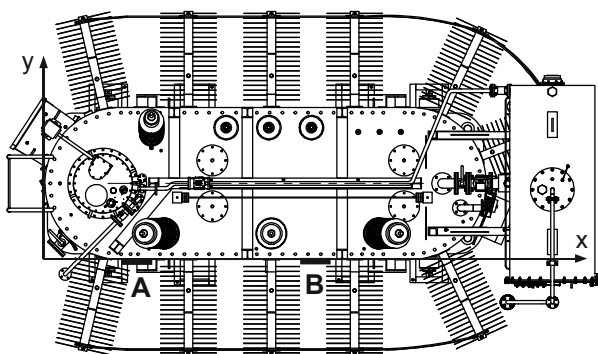


Rys.3. Symulowany przebieg czasowy sygnału zaszumionego o niskiej wartości stosunku sygnału użytecznego do szumu (SNR = 0,05)

Jako obiekt badań zamodelowano kadź transformatora energetycznego typu TORc o długości  $x = 4,75$  m, szerokości  $y = 1,5$  m i wysokości  $z = 2,7$  m. Przyjęto, że punkt o współrzędnych  $[0,0,0]$  położony jest w lewym dolnym rogu przy frontowej ścianie kadzi. Aby wyznaczyć współrzędne XYZ defektu, należy umieścić matrycę przetworników w co najmniej dwóch różnych miejscach kadzi (w efekcie tego otrzymamy co najmniej dwa różne kierunki nadejścia sygnału). Następnie wystarczy poprowadzić półproste (pod wyznaczonymi kątami nadejścia sygnału) od punktów wyznaczających środek matrycy przetworników. Wtedy współrzędne punktu przecięcia się tych półprostych definiują nam położenie defektu. Jako, że w przestrzeni trójwymiarowej, przecięcie się dwóch linii jest tylko szczególnym przypadkiem, a kąty, określające kierunek nadejścia sygnału, mogą zostać wyznaczone z pewnym przybliżeniem, miejsce występowania defektu wyznaczane jest w połowie najkrótszej odległości między rozważanymi półprostymi.



Rys.4. Transformator typu TORc (widok od frontu) z zaznaczonymi osiami oraz miejscami umieszczenia matryc (punkty A i B)



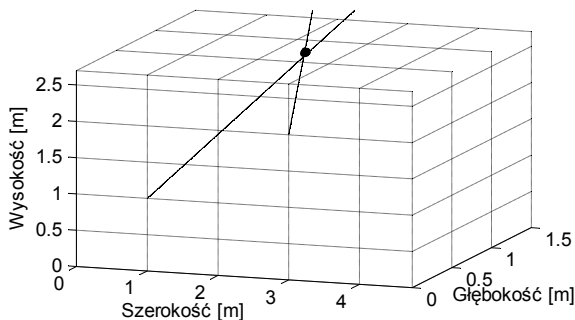
Rys.5. Transformator typu TORc (widok z góry) z zaznaczonymi osiami oraz miejscami umieszczenia matryc (punkty A i B)

Na potrzeby artykułu wybrano jedną przykładową konfigurację, w której matryce przetworników zostały umieszczone w dwóch miejscach na przedniej ścianie kadzi transformatora (rys. 4). Współrzędne środków matryc wynoszą  $A = (1,0,1)$  oraz  $B = (3,0,2)$  – wartości w metrach.

Przyjęty w symulacji scenariusz zakładał, że defekt występuje w okolicach wyprowadzenia fazy pierwszej po stronie niskiego napięcia. Współrzędne źródła sygnału wynosiły:  $D_s = (1,9; 1,2; 2,4)$ .

Pojedyncza matryca składała się z czterech elementów sensorycznych, rozmieszczonych w układzie kwadratowym  $2 \times 2$ . Spełniając warunek o minimalnej odległości pomiędzy elementami matrycy, która powinna być mniejsza lub równa połowie długości falowej  $\lambda$ , przyjęto, że są one rozmieszczone w odstępach  $\Delta = 25$  cm.

Wynikiem przeprowadzonych symulacji jest przestrzeń rozwiązań (punktów) wyznaczająca zlokalizowane źródło emisji sygnałów elektromagnetycznych (rys. 6). Punkty te określone zostały na podstawie 100 zebranych impulsów.



Rys.6. Zlokalizowane miejsce występowania defektu wraz z półprostymi wyznaczającymi kierunki nadejścia sygnału do matryc

W celu określenia jednego miejsca występowania źródła sygnału, na podstawie współrzędnych cząstkowych (z przestrzeni rozwiązań), obliczono średnie wartości współrzędnych XYZ. Na podstawie tych wartości określony został średni błąd lokalizacji w trzech kierunkach: wzdłuż osi OX, OY i OZ oraz odchylenie standardowe. Dane te zawarte są w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie obliczonych wartości

	X	Y	Z
Współrzędne średnie [m]	1,8991	1,2026	2,3986
Średni błąd lokalizacji [mm]	0,9	2,6	1,4
Odchylenie standardowe [mm]	13,8	12,7	7,5

Błędy rzędu pojedynczych milimetrów są pomijalnie małe, z kolei odchylenie standardowe rzędu centymetrów świadczy o niewielkim rozrzucie otrzymanych wyników cząstkowych.

## Podsumowanie

Artykuł prezentuje założenia teoretyczne oraz wyniki rekonesansowych prac badawczych, dotyczących określenia możliwości zastosowania technologii matryc sensorowych i algorytmu kształtowania wiązki do lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych w transformatorach energetycznych. Uzyskane wyniki symulacji pokazują, że dzięki zastosowaniu wyżej wspomnianych rozwiązań możliwe jest bardzo dokładne wyznaczenie kierunku nadejścia sygnału (nawet, w przypadku, gdy rejestrowane sygnały są silnie zaszumione) pochodzącego od wyładowań niezupełnych, a co za tym idzie – wyznaczenie lokalizacji występowania defektu.

Metoda proponowana przez autorów może stanowić korzystną alternatywę dla klasycznej techniki triangulacyjnej – praktycznie jedynej wykorzystywanej obecnie metody lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych.

## LITERATURA

- [1] Schmidt R.O., Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, Vol. AP-34 (1986)
- [2] 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
- [3] Zhizhang Chen, Gopal Gokeda, Yiqiang Yu, Introduction to Direction-of-Arrival Estimation, Artech House
- [4] Polak F., Sikorski W., Siodła K., Lokalizacja źródeł wyładowań niezupełnych przy użyciu matrycy przetworników, *Poznan University of Technology Academic Journals*, Issue 78, (2014), 157-166
- [5] Krim H., Viberg M., Two Decades of Array Signal Processing Research, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 13, No. 4, (1996), 67-94
- [6] Haykin S., Ray Liu K. J., Handbook on Array Processing and Sensor Networks, *John Wiley & Sons*, 29-58
- [7] Sikorski W., Ziomek W., Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method (Chapter 3), *Acoustic Emission*, InTECH Publisher, (2012)
- [8] 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, Issue 6, (2012), 1948-1956
- [9] Walczak K., Defect Location in Epoxy Resin Insulator Using Capacitive Sensors, *Nordic Insulation Symposium – Nord-IS 09*, (2009), 79-82

## Autorzy:

mgr inż. Filip Polak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [filip.r.polak@doctorate.put.poznan.pl](mailto:filip.r.polak@doctorate.put.poznan.pl); dr inż. Wojciech Sikorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [wojciech.sikorski@put.poznan.pl](mailto:wojciech.sikorski@put.poznan.pl); dr hab. inż. Krzysztof Siodła prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [krzysztof.siodla@put.poznan.pl](mailto:krzysztof.siodla@put.poznan.pl);