

# Zastosowanie Zoptymalizowanego Algorytmu Multikomparacyjnego do klasyfikacji sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne, uszeregowane w zmodyfikowanej bazie danych

Paweł Kurtasz, Tomasz Boczar

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

W artykule scharakteryzowano możliwości zastosowania Zoptymalizowanego Algorytmu Multikomparacyjnego (ZAM) do klasyfikacji sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanej przez podstawowe formy (klasy) wyładowań niezupełnych (WNZ), jakie mogą występować w izolacji papierowo-olejowej transformatorów elektroenergetycznych. W algorytmie ZAM zastosowano deskryptor czasowo-częstotliwościowy z optymalnie dobranymi parametrami w dziedzinie czasu i częstotliwości. Za pomocą tak skonstruowanego algorytmu przebadano bazę wiedzy poszerzoną o dodatkową klasę WNZ. Dotychczas wykorzystywana baza wiedzy, zawierająca osiem klas przebiegów EA, została opracowana w Katedrze Wysokich Napięć Politechniki Opolskiej. Stanowiła podstawę do testowania algorytmu ZAM, uzupełniono ją o dodatkową formę WNZ modelowanych w iskierniku ostrze-płyta umieszczonym w oleju izolacyjnym ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami gazowymi. Układ wyładowczy reprezentujący tę klasę, podobnie jak wszystkie pozostałe układy został zamodelowany w oleju elektroizolacyjnym. W artykule szczególną uwagę poświęcono omówieniu zasady działania zastosowanego algorytmu oraz wynikom skuteczności rozpoznawania podstawowych form WNZ, uzyskiwanym przy jego użyciu. Skuteczność rozpoznawania form WNZ została wyznaczona dla każdej z klas z osobna i całościowo dla bazy danych. Całkowita skuteczność klasyfikacji (dla całej bazy danych) wyniosła 95,95 %.

**Słowa kluczowe:** klasyfikator multikomparacyjny, zoptymalizowany klasyfikator multikomparacyjny, wyładowanie niezupełne, sygnał emisji akustycznej, defekt izolacji papierowo-olejowej

W artykule przedstawiono zastosowanie Zoptymalizowanego Algorytmu Multikomparacyjnego (ZAM) do klasyfikacji sygnałów emisji akustycznej (AE) generowanej przez podstawowe formy (klasy) wyładowań niezupełnych (WNZ), które mogą występować w układach izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych dużych mocy.

Algorytm ZAM jest elementem bloku klasyfikatora systemu ekspertowego wykorzystywanego do oceny stanu izolacji papierowo-olejowej wykonywanej podczas normalnej eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, z zastosowaniem metody EA. Umożliwia on rozpoznawanie zdefiniowanych klas sygnałów EA, które są powiązane ze ściśle określonymi typami defektów diagnozowanej izolacji. ZAM wykorzystuje bazę danych zawierającą przebiegi czasowe zarejestrowanych sygnałów EA, usystematyzowanych w określoną liczbę klas.

Dotychczas stosowana baza wiedzy, zawierająca osiem klas przebiegów EA, została opracowana w Katedrze Wysokich Napięć Politechniki Opolskiej. Stanowiła podstawę do testowania algorytmu ZAM, uzupełniono ją o dodatkową formę WNZ modelowanych w iskierniku ostrze-płyta umieszczonym w oleju izolacyjnym ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami gazowymi. Układ wyładowczy reprezentujący tę klasę, podobnie jak wszystkie pozostałe układy został zamodelowany w oleju elektroizolacyjnym. Tym samym uzupełniona baza danych zawiera dziewięć klas defektów wysokonapięciowej izolacji papierowo-olejowej:

- Klasa 1 – wyładowania w układzie ostrze-ostrze, które można powiązać z WNZ powstałymi na skutek uszkodzenia izolacji dwóch sąsiadujących zwojów uzwojenia transformatora
- Klasa 2 – wyładowania w układzie ostrze-ostrze ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami gazowymi, które mogą odzwierciedlać WNZ w oleju zagazowanym i spowodowane są uszkodzeniem izolacji dwóch sąsiadujących uzwojeń transformatora
- Klasa 3 – wyładowania w układzie ostrze-płyta, które mogą modelować WNZ występujące między uszkodzoną częścią izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi); wyładowania w układzie powierzchniowym dwóch elektrod płaskich, między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa, jest to najczęstsza forma WNZ występująca w tzw. punkcie potrójnym, w którym powierzchnia elektrody styka się z dielektrykiem stałym i ciekłym
- Klasa 4 – wyładowania w układzie dwóch elektrod płyty, między którymi znajduje się izolacja papierowa, jest to najczęstsza forma WNZ występująca w tzw. punkcie potrójnym, w którym powierzchnia elektrody styka się z dielektrykiem stałym i ciekłym
- Klasa 5 – wyładowania w układzie z jedną elektrodą wieloostrową a drugą płytową, między którymi znajduje się izolacja papierowa, inny rozkład natężenia pola elektrycznego w porównaniu z wyładowaniami w układzie powierzchniowym z dwiema elektrodami płaskimi
- Klasa 6 – wyładowania w układzie wieloostrowo-płyta, które mogą modelować WNZ występujące między

wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi)

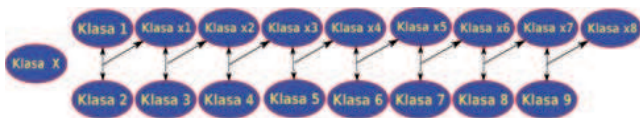
- Klasa 7 – wyładowania w układzie wielostrze- płyta ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami gazowymi, które mogą być powiązane z WNZ występującymi między wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi), w zagazowanym oleju
- Klasa 8 – wyładowania w układzie wielostrze- płyta ze swobodnie przemieszczającymi się cząstkami stałymi o nieokreślonym potencjale, które mogą modelować WNZ występujące w oleju zawierającym cząsteczki włókien celulozowych powstałych w procesie stopniowej degradacji izolacji papierowo-olejowej spowodowanej procesami starzeniowymi
- Klasa 9 – wyładowania w układzie ostrze- płyta ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami gazowymi, inny rozkład natężenia pola elektrycznego w porównaniu z wyładowaniami Klasy 2.

Powstała konieczność uzupełnienia utworzonej bazy danych o kolejną formę WNZ, gdyż defekt przez nią reprezentowany jest rozpoznawalny, a nie był on uprzednio sklasyfikowany. Wszystkie rozpatrywane klasy WNZ są bezpośrednio powiązane ze ściśle określonymi defektami izolacji papierowo-olejowej, jakie mogą występować w transformatorach elektroenergetycznych.

Badania prowadzono w oparciu o bazę danych zawierającą 900 przebiegów czasowych zarejestrowanych sygnałów EA generowanych przez podstawowe formy WNZ, usystematyzowanych w 9 klas, z których każda zawierała 100 przebiegów.

## Mechanizm działania Zoptymalizowanego Algorytmu Multikomparacyjnego

Algorytm ZAM wykorzystuje bardzo skuteczne klasyfikatory binarne, które wykonują pojedyncze operacje w układzie wielokrotnych porównań. W celu sklasyfikowania pojedynczego przebiegu czasowego EA wykonywane są operacje, których liczba jest o jeden mniejsza niż liczba rozpoznawanych klas. Dla analizowanego przypadku wynosi ona 8. Strukturę zaproponowanego algorytmu ZAM przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Struktura algorytmu ZAM

Fig. 1. The structure of optimized multi-comparational algorithm

Każda z klas jest reprezentowana przez jedną elipsę. Strzałki o dwóch grotach symbolizują porównania cząstkowe, a strzałki z jednym grotom wskazują wyniki porównań. Elipsy o nazwach od Klasa x1 do Klasa x7 reprezentują wyniki cząstkowe, a elipsa o nazwie Klasa x8 wynik końcowy. Algorytm ZAM jest wydajny obliczeniowo, a jego skuteczność klasyfikacji w dużym stopniu zależy od deskryptora oraz zastosowanego klasyfikatora binarnego.

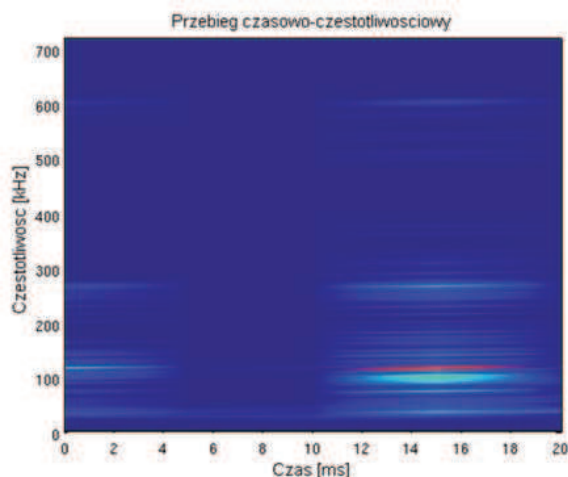
## Charakterystyka zastosowanego deskryptora

Na potrzeby klasyfikatora ZAM został skonstruowany i przetestowany [6] deskryptor oparty na przekształceniu czasowo-częstotliwościowym. Dla uzyskania możliwie najwyższej skuteczności klasyfikacji dobrano optymalne parametry tego przekształcenia, odpowiednie dla zarejestrowanych przebiegów czasowych. Przebiegi zgromadzone w bazie danych były próbkowane z częstotliwością 2,56 MHz, ich czas trwania wynosił 20 ms, co daje liczbę 51 200 próbek dla każdej z rejestracji. Zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu [4] pozwala to mierzyć sygnały o częstotliwości granicznej 1,28 MHz.

Na podstawie literatury i obserwacji własnych autorzy stwierdzili, że pasmo dominujących częstotliwości dla sygnałów EA generowanych przez WNZ występuje w przedziale 0–700 kHz [1, 5]. Ze względu na potencjalną możliwość występowania zakłóceń o charakterze akustycznym, nie brano pod uwagę zakresu częstotliwości w paśmie 0–20 kHz. Ponadto z sygnału usunięto pasma z przedziału 700 kHz – 1,28 MHz, które nie zawierały użytecznych informacji. Pominięcie tych zakresów częstotliwości nie zmniejsza skuteczności klasyfikacji.

Na podstawie wcześniejszych prac autorów, z wykorzystaniem deskryptora częstotliwościowego [2, 3], dobrano rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości na poziomie 130 detali. Jest ona wystarczająca do poprawnego procesu klasyfikacji. Dalsze zwiększanie rozdzielczości w tej dziedzinie nie przynosi poprawy skuteczności klasyfikacji. Zastosowana rozdzielczość dotyczy pasma użytecznego sygnału.

Ponadto dobrano optymalną rozdzielczość w dziedzinie czasu, która wynosi 5 detali [6]. Przyjęta rozdzielczość wynikała z braku wpływu momentu czasowego wystąpienia WNZ na wyniki klasyfikacji generowanych sygnałów EA. Natomiast z punktu widzenia poprawności rozpoznawania istotne jest, czy WNZ występowały tylko w jednym czy w obu półokresach napięcia zasilającego, oraz czy generowane sygnały EA



Rys. 2. Widmo czasowo-częstotliwościowe badanego przebiegu EA od WNZ generowanych w układzie ostrze- płyta z pęcherzykami gazowymi w oleju izolacyjnym, dla rozdzielczości w dziedzinie czasu na poziomie pięciu detali

Fig. 2. The spectrum of time-frequency of the AE signals, generated by partial discharges (PDs) in the system blade-plate with gas bubbles in the insulation oil, the resolution in the time at five details

miały charakter gasnący, czy trwały przez cały półokres napięcia (rys. 2). Te informacje można uzyskać przy zaledwie 5 detalach rozpatrywanych w dziedzinie czasu. Modyfikacja liczby tych detali prowadzi do zmniejszenia skuteczności klasyfikacji (tab.1)

**Tab. 1.** Zestawienie skuteczności klasyfikacji form WNZ dla ośmiu rozpoznawanych klas, wykonywanych za pomocą klasyfikatora ZAM, z użyciem deskryptora czasowo-częstotliwościowego, w funkcji liczby detali w dziedzinie czasu

**Tab. 1.** Comparison of the effectiveness of the classification of forms of PD recognized for eight classes, performed by optimized multi-comparational algorithm classifier, using the descriptor time-frequency, the function of the amount of detail in the time domain

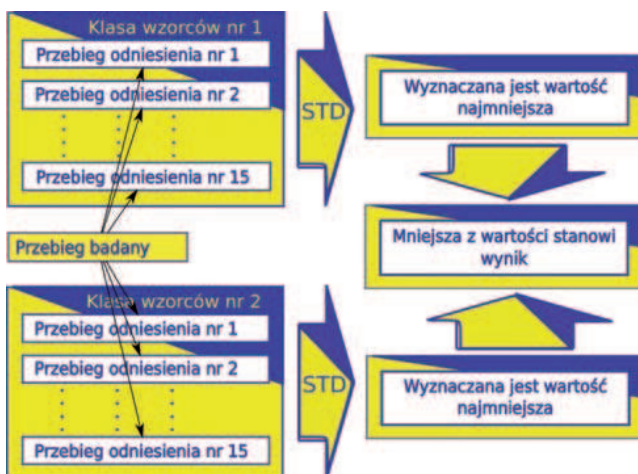
Liczba detali w dziedzinie czasu	Całkowita skuteczność klasyfikacji
100	93,44 %
10	93,44 %
5	95,31 %
3	94,22 %
2	92,97 %

Tak skonstruowany deskryptor jest funkcjonalnym narzędziem, opisującym w sposób jednoznaczny poszczególne formy WNZ.

## Klasyfikator binarny

Jako klasyfikator binarny zastosowano algorytm „najbliższy sąsiad” (ang. *nearest neighbour NN*) i zaimplementowano w nim, jako kryterium oceny, odchylenie standardowe. Wyboru dokonano na podstawie wcześniejszych prac [2, 3].

Pojedyncza iteracja klasyfikatora binarnego (KB) ma strukturę przedstawioną na rys. 3. Pierwszy krok pojedynczej iteracji KB polega na odejmowaniu badanego przebiegu od każdego z przebiegów wzorcowych. Przebiegi wzorcowe usystematyzowane są w dwie grupy, każda składa się z piętnastu przebiegów. Reprezentują one dwie, analizowane w tym kroku, klasy WNZ. Następnie dla każdego z uzyskanych wyników wyznaczana jest wartość odchylenia standardowego. Otrzymane w ten sposób wartości odchylenia porównywane są w ra-

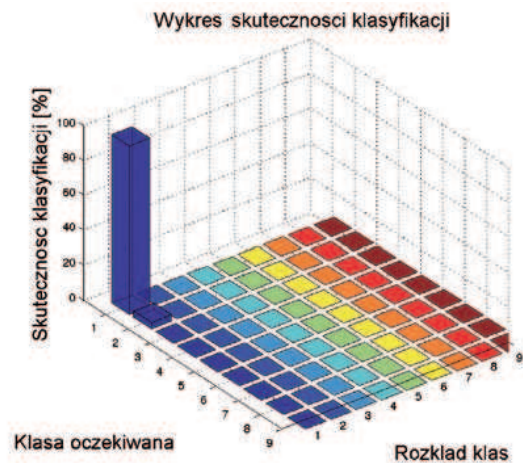


**Rys. 3.** Struktura klasyfikatora binarnego  
**Fig. 3.** The structure of a binary classifier

mach danej klasy wzorców w celu wskazania najmniejszej z nich. Ostatnią czynnością wykonywaną w ramach danej iteracji przez KB jest porównanie wyników istniejących w ramach klasy wzorców i zakwalifikowanie badanego przebiegu do jednego z nich.

## Wyniki badań przeprowadzonych dla zmodyfikowanej bazy danych

Badania dla zmodyfikowanej bazy danych przeprowadzono zgodnie z przyjętymi założeniami, stosowanymi we wcześniejszej wersji. Ze stu przebiegów reprezentujących każdą z klas defektów izolacji typowano losowo piętnaście, które przyjmowano jako przebiegi wzorcowe. Każdy z pozostałych 85 przebiegów poddawano klasyfikacji. Oznacza to, że nie mogła zaistnieć sytuacja, w której przebieg rozpoznawany był jednocześnie wzorcowym. Operację klasyfikacji wykonano dla każdej z 9 klas. Tym samym proces rozpoznawania przeprowadzono oddzielnie dla każdego z 765 przebiegów.



**Rys. 4.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy pierwszej względem klas pozostałych

**Fig. 4.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the first class of other classes

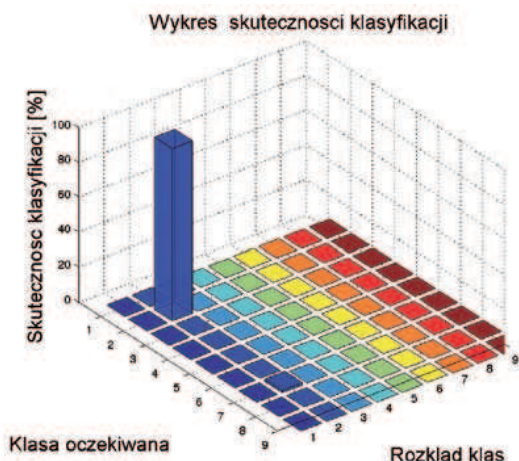
Na rys. 4 przedstawiono skuteczność klasyfikacji klasy pierwszej względem klas pozostałych, gdzie można zaobserwować, że klasa pierwsza jest z dużą skutecznością rozpoznawalna. Jedyne błędne sklasyfikowania nastąpiły względem klasy drugiej, w nieznacznej liczbie przypadków.

Na rys. 5 i 7 przedstawiono skuteczność klasyfikacji dla dwóch klas defektów izolacji. Są one klasyfikowane niemal w całości poprawnie. Odsetek niepoprawnych sklasyfikowań przebiegów wynosi 1,2 %. Skuteczność klasyfikacji wynika ze struktury czasowo-częstotliwościowej sygnałów EA reprezentujących te klasy. Struktura ta jest powtarzalna i nie wykazuje istotnych odstępstw.

W przypadku klasy trzeciej i piątej (rys. 6 i 8) sytuacja jest porównywalna z opisywaną w poprzednich przypadkach. Z tą jednak różnicą, że nie nastąpiło ani jedno niepoprawne sklasyfikowanie.

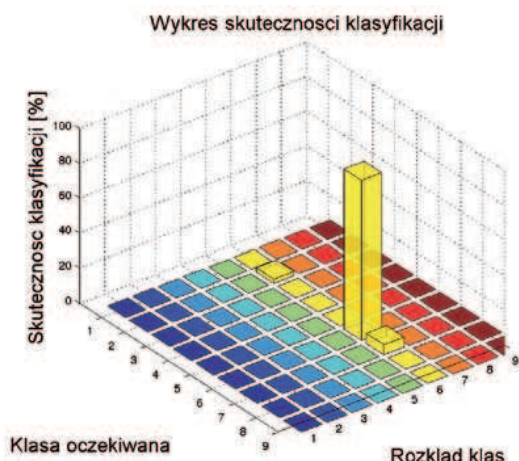
Dla klas szóstej i siódmej następują liczne błędne sklasyfikowania. Wynika to z dużego podobieństwa sygnałów EA generowanych przez obie klasy. Dzieje się tak ponieważ reprezentują one ten sam typ układu wyładowczego, to jest wielo-





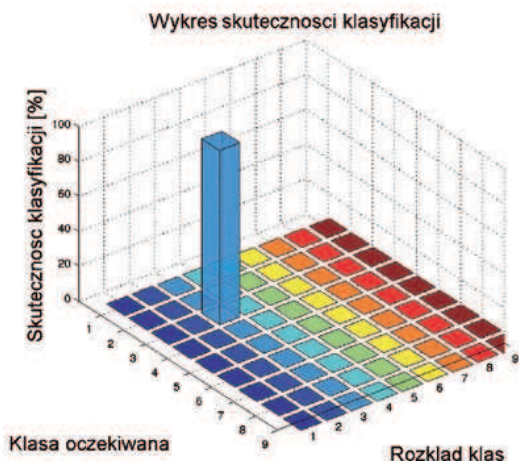
**Rys. 5.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy drugiej względem klas pozostałych

**Fig. 5.** The effectiveness of the classification optimised multi-comparational algorithm for the second class of other classes



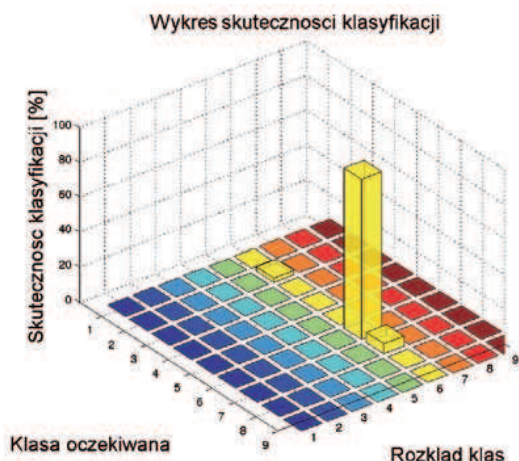
**Rys. 8.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy piątej względem klas pozostałych

**Fig. 8.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the fifth class of other classes



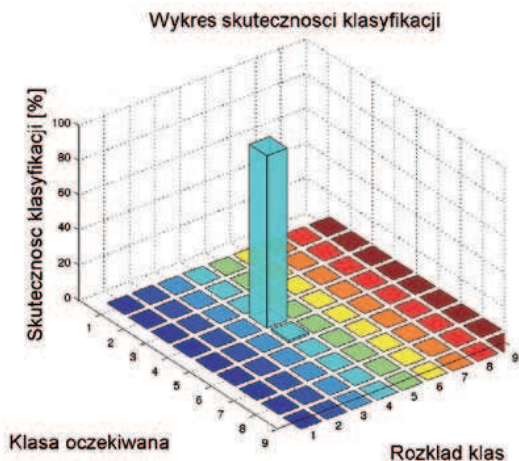
**Rys. 6.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy trzeciej względem klas pozostałych

**Fig. 6.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the third class of other classes



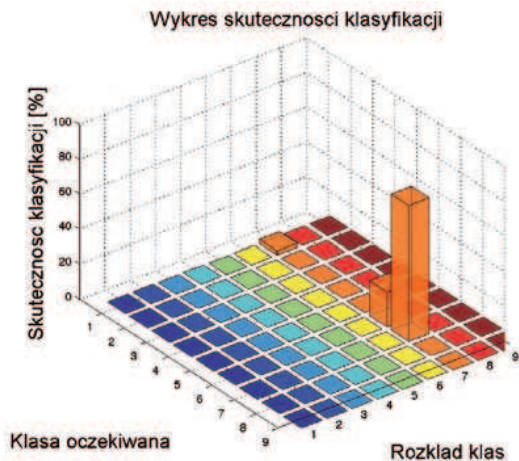
**Rys. 9.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy szóstej względem klas pozostałych

**Fig. 9.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the sixth class of other classes



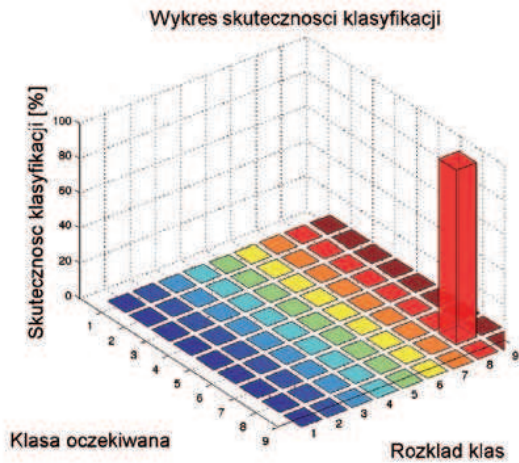
**Rys. 7.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy czwartej względem klas pozostałych

**Fig. 7.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the fourth class of other classes



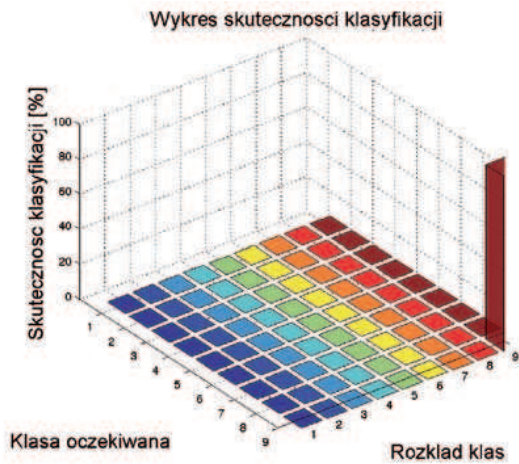
**Rys. 10.** Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy siódmej względem klas pozostałych

**Fig. 10.** The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the seventh class of other classes



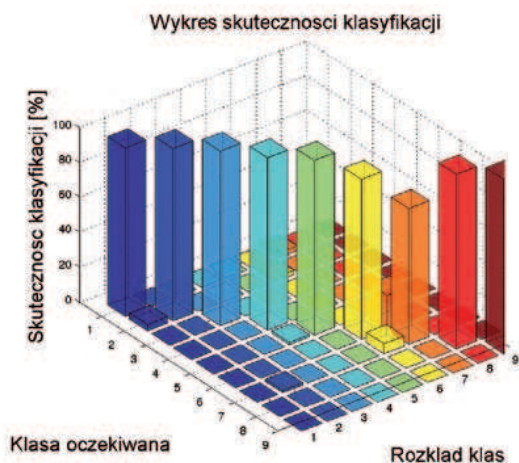
Rys. 11. Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy ósmej względem klas pozostałych

Fig. 11. The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the eighth class of other classes



Rys. 12. Skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM dla klasy dziewiątej względem klas pozostałych

Fig. 12. The effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm for the ninth class of other classes



Rys. 13. Całkowita skuteczność klasyfikacji algorytmu ZAM

Fig. 13. The overall effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm

Tab. 2. Całkowita skuteczność algorytmu ZAM dla badanej bazy wiedzy oraz jej częściowe składniki

Tab. 2. The overall effectiveness of the classification optimized multi-comparational algorithm to test the knowledge base and its sub-components

Klasa	1	2	3	4	5
Częstkowa skuteczność klasyfikacji (%)	96,5	98,8	100,0	98,8	100,0
Klasa	6	7	8	9	–
Częstkowa skuteczność klasyfikacji (%)	91,8	77,6	100,0	100,0	–
Całkowita skuteczność klasyfikacji (%)	95,95				

ostrze-płyta, przy czym w przypadku klasy siódmej występowały dodatkowo przemieszczające się swobodnie pęcherzyki gazowe. Mogło więc dojść do sytuacji, w której WNZ nie wystąpiło na pęcherzyku gazowym lecz bezpośrednio w oleju elektroizolacyjnym. To częściowo tłumaczy dużą liczbę niepoprawnie sklasyfikowanych przebiegów względem klasy szóstej. Ponadto istotna jest również struktura czasowo-częstotliwościowa sygnału EA generowanego przez obydwie formy. Występują w nim równocześnie składowe częstotliwościowe w szerokim spektrum. Istnieje więc dodatkowa trudność w znalezieniu częstotliwości charakterystycznych dla obydwu tych form.

Klasa ósma i klasa dziewiąta (rys. 11 i 12) są poprawnie rozpoznawane dla wszystkich badanych przebiegów. Potwierdza to słuszność uzupełnienia bazy wiedzy o dodatkową klasę dziewiątą.

Na rys. 12 przedstawiono całkowitą skuteczność klasyfikacji dla wszystkich badanych klas. Uzyskane wyniki uzupełniono o zestawienie tabelaryczne (tab. 2).

## Podsumowanie

W artykule scharakteryzowano mechanizm działania algorytmu ZAM oraz deskryptora czasowo-częstotliwościowego. Przedstawiono wyniki badań, które przeprowadzono przy jego wykorzystaniu dla bazy danych, zawierającej przebiegi EA generowane przez 9 podstawowych form WNZ, które mogą występować w wysokonapięciowych układach izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych podczas ich normalnej eksploatacji.

Wykazano również konieczność uzupełnienia opracowanej bazy danych o kolejną klasę przebiegów, związaną z nie skatalogowanym wcześniej defektem izolacji.

*Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego oraz z projektu badawczego własnego nr TBW-3511/B/T02/2009/37.*

## Bibliografia

1. Boczar T., Borucki S., Cichoń A.: *Wzorce wyładowań niezupełnych mierzonych metodą emisji akustycznej*. Energetyka 5 (659), 2009, s. 278–283.



2. Kurtasz P., Boczar T., Witkowski P., Lorenc M.: *Zastosowanie algorytmu multikomparacyjnego do klasyfikacji sygnałów akustycznych pochodzących od wyładowań niezupełnych*. Przegląd Elektrotechniczny, 07.2010.
3. Kurtasz P., Boczar T.: *Analiza porównawcza Zoptymalizowanego i Klasycznego Algorytmu Multikomparacyjnego w zastosowaniu do klasyfikacji sygnałów akustycznych generowanych przez wyładowania niezupełne*. PAK 9/2010.
4. Szabatin J.: *Podstawy teorii sygnałów*. WKiŁ, Warszawa 2000.
5. Boczar T.: *Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w izolacji olejowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2000.
6. Kurtasz P., Boczar T.: *Klasyfikacja sygnałów akustycznych pochodzących od wyładowań niezupełnych z zastosowaniem Zoptymalizowanego Algorytmu Multikomparacyjnego oraz deskryptora czasowo-częstotliwościowego*. Przegląd Elektrotechniczny (w druku), IWN 2010. ■

**The application of the optimized multi-comparative algorithm for classifying acoustic signals, generated by partial discharges, catalogued in the modified database**

In the paper application is described of the optimized multi-comparational and classic multi-comparational algorithms for classification of acoustic emission (AE) signals generated by the basic forms of partial discharges (PDs) which can occur in of paper-oil insulation systems of power transformers. This is a new implementation of the classical multi-comparational

algorithm. The optimized multi-comparational algorithm was especially designed for needs on classification of the AE methods and it is result of research works performed by authors of this paper. Implementation of a time-frequency descriptor into the optimized multi-computational algorithm has been proposed. It was demonstrated that both algorithms indicate high, over 95,95 %, classification efficiency.

**Keywords:** multi-comparational classic, optimized multi-comparative algorithm, partial discharge, acoustic emission signal, defect in paper-oil insulation

**mgr inż. Paweł Kurtasz**

Student studiów doktoranckich w dyscyplinie elektrotechnika prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z klasyfikacją sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne.

e-mail: [pawelkurtasz@gmail.com](mailto:pawelkurtasz@gmail.com)



**dr hab. inż. Tomasz Boczar, prof. PO**

Prodziekan ds. organizacyjnych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 220 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych, badań wibroakustycznych, oceny klimatu akustycznego w środowisku przemysłowym i odnawialnych źródeł energii.

e-mail: [t.boczar@po.opole.pl](mailto:t.boczar@po.opole.pl)

