



Tomasz BOCZAR, Andrzej CICHÓN, Sebastian BORUCKI, Marcin LORENC

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki, Katedra Wysokich Napięć

Analiza korelacyjna sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania elektryczne w oleju

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analizy korelacyjnej sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanej przez podstawowe formy wyładowań niepełnych (WZN), jakie mogą występować w izolacji papierowo-olejowej transformatorów elektroenergetycznych. Analizę korelacyjną wykonano oddzielnie w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości. Przedstawiono przebiegi funkcji autokowariancji, kowariancji wzajemnej oraz koherencji, które obliczono oddzielnie dla impulsów EA generowanej przez podstawowe formy WZN.

Abstract. (Correlative analysis of the acoustic emission signals generated by electrical discharges in oil). The paper presents the results of the correlative analysis of the acoustic emission (AE) signals generated by basic forms of partial discharges (PDs) that can occur in paper-oil insulation of power transformers. The correlative analysis has been carried out separately in the time and frequency domains. The runs of the autocovariance, mutual covariance and coherence functions, which were calculated separately for the AE pulses generated by basic PD forms, are presented.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, metoda emisji akustycznej, analiza korelacyjna, diagnostyka układów izolacyjnych.

Keywords: partial discharges, acoustic emission method, the correlation analysis, the diagnostics of isolating systems.

Wstęp

Obecnie do oceny stanu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych wykorzystywana jest metoda elektryczna oraz chromatografii gazowej natomiast metoda emisji akustycznej (EA) może stanowić ich ważne uzupełnienie. Wykonuje się również pomiary o charakterze szacunkowym, wielkości powstającego ciepła, emitowanego światła i zmian ciśnienia w obszarze generacji wyładowań niepełnych (WZN).

W ostatnich latach rozwój metody EA, powodowany jest głównie poprzez doskonalenie układów umożliwiających pomiar i analizę sygnałów EA, w których stosuje się najnowsze osiągnięcia elektroniki cyfrowej i technologii komputerowej. Ponadto związany jest z zastosowaniem coraz bardziej zaawansowanych procedur numerycznych i wyrafinowanych metod obliczeniowych wykorzystywanych do przetwarzania i analizy mierzonych sygnałów. Obecnie coraz częściej problemem nie jest wykonanie pomiarów EA generowanej przez WZN, ale poprawnie przeprowadzona analiza, właściwa interpretacja uzyskiwanych wyników i w konsekwencji prawidłowa ocena badanego zjawiska [1-3].

Podczas pomiarów WZN wykonywanych przy użyciu metody EA pojawiają się obiektywne trudności związane z interpretacją uzyskiwanych wyników, ponieważ ich ocena w dużym stopniu zależy od doświadczenia osób przeprowadzających pomiary. To z kolei zwiększa ich koszt, wprowadza czynnik niepewności związany z subiektywną oceną uzyskiwanych wyników oraz uniemożliwia ich porównywanie w różnych ośrodkach naukowo-badawczych i technicznych. Ponadto aktualną kwestią pozostaje zagadnienie identyfikacji podstawowych form WZN mierzonych metodą EA, co ma istotne znaczenie przy ocenie stanu mierzonej izolacji.

Głównym celem przeprowadzonych prac naukowo-badawczych, których wyniki są prezentowane w niniejszym artykule było określenie możliwości i przedstawienie zakresu zastosowań analiz korelacyjnych do charakterystyki i oceny impulsów EA generowanej przez układy modelujące podstawowe formy WZN, jakie mogą występować w papierowo-olejowych układach izolacyjnych. Badania dotyczyły następujących form WZN: ostrze-płyta, wieloostrze-płyta, powierzchniowe, generowane na cząstkach o nieokreślonym potencjale i w pęcherzykach

gazowych, które były modelowane w oleju izolacyjnym. Szczegółową charakterystykę wykorzystanych iskierników oraz układów do pomiaru i analizy zarejestrowanych impulsów EA generowanej przez WZN przedstawiono w pracach [1-3].

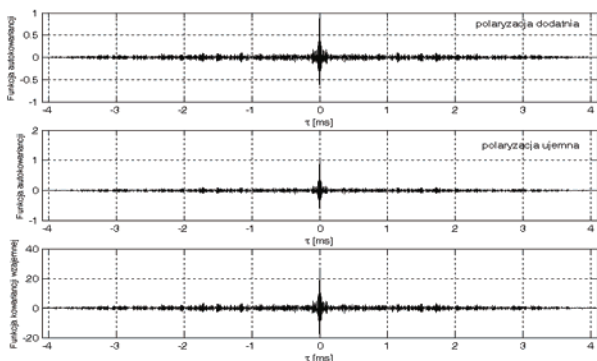
Aby określić zależności czasowe i częstotliwościowe dla zmierzonych impulsów EA generowanej przez badane formy WZN zastosowano funkcje autokowariancji i kowariancji wzajemnej (interkowariancji) oraz funkcję koherencji. Analizę z wykorzystaniem funkcji autokowariancji i kowariancji wzajemnej zastosowano w celu określenia charakteru generowanych przez badane formy WZN impulsów EA oraz dla rozpoznania towarzyszących pomiarom szumów i zakłóceń. Natomiast funkcję koherencji zastosowano w celu określenia struktur skorelowanych oraz obszarów pozbawionych cech wspólnych dla charakterystyk częstotliwościowych impulsów EA generowanej przez modelowane formy WZN. Zależności matematyczne oraz procedury numeryczne, jakie wykorzystano w obliczeniach zostały przedstawione w monografii [4].

Należy podkreślić, że metody analiz korelacyjnych znalazły zastosowanie w metodzie elektrycznej pomiaru WZN, gdzie w szczególności wykorzystywane są do wykrywania i identyfikacji form WZN, jakie mogą występować w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych [5, 6]. Ponadto wyniki przetwarzania sygnałów uzyskanych przy zastosowaniu funkcji korelacji własnej i wzajemnej mogą być pomocne przy doborze filtrów cyfrowych oraz do oceny własności energetycznych mierzonych sygnałów [7-10].

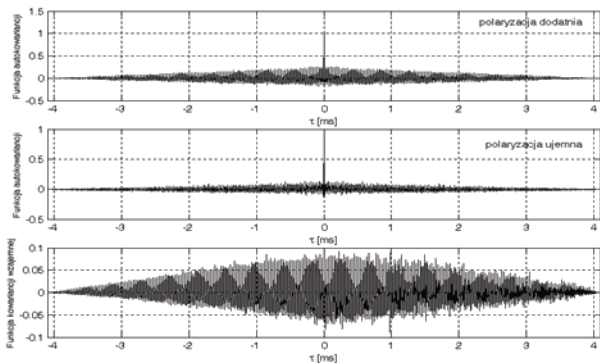
Analiza korelacyjna impulsów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niepełne

Dla zmierzonych impulsów emisji akustycznej generowanej przez rozpatrywane formy wyładowań niepełnych wyznaczono przebiegi funkcji autokowariancji oraz kowariancji wzajemnej. W ramach prezentacji graficznej dla danej formy WZN przedstawiono kolejno przebiegi funkcji autokowariancji obliczone dla dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz przebieg funkcji ich kowariancji wzajemnej. Wyniki uzyskane dla poszczególnych form WZN zostały zaprezentowane na rysunkach od 1 do 6.

Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi funkcji autokowariancji i kowariancji wzajemnej dla impulsów EA generowanych przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale, które przemieszczają się w oleju izolacyjnym. Niezależnie od polaryzacji napięcia funkcja autokowariancji ma zbliżony kształt, o dużej wartości dla zerowego przesunięcia oraz rozciągającym się w całym zakresie analizowanego czasu rozmytym przebiegiem bez widocznych ekstremów. Wskazuje to na duży udział szumu w generowanym przebiegu. Dla czasów opóźnienia mniejszych niż 0,2 ms widoczne są w obu półokresach napięcia pojedyncze składowe deterministyczne o dużym stopniu skupienia i zbliżonych wartościach amplitudy. Funkcja korelacji wzajemnej również nie wskazuje na występowanie liniowej zależności między impulsami EA generowanymi przez WNZ dla dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia.



Rys. 1. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej

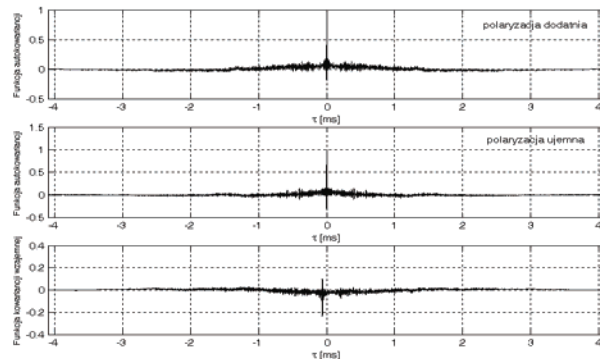


Rys. 2. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ w pęcherzykach gazowych w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej

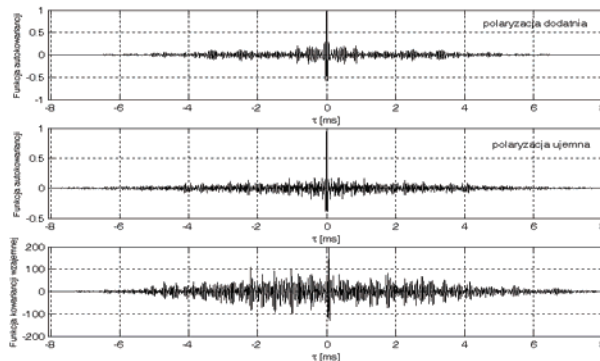
Wyniki analizy korelacyjnej otrzymane dla impulsów EA generowanej przez WNZ w układzie z pęcherzykami gazowymi występującymi w oleju izolacyjnym zaprezentowano na rysunku 2. Otrzymane przebiegi funkcji autokowariancji, niezależnie od polaryzacji napięcia, charakteryzują się oprócz występowania szerokopasmowej składowej stochastycznej również istnieniem składowej deterministycznej. Natomiast przebieg funkcji kowariancji wzajemnej składa się prawie wyłącznie ze składowej deterministycznej, co wskazuje na istnienie wyraźnej liniowej relacji między okresowymi strukturami generowanymi przy dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia.

Przebiegi funkcji autokowariancji i kowariancji wzajemnej wyznaczone dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu ostrze- płyta w oleju przedstawiono na

rysunku 3. Otrzymane dla obu półokresów napięcia przebiegi funkcji autokowariancji charakteryzują się dużym udziałem składowej stochastycznej, natomiast składowe okresowe występują w ograniczonej ilości. Uzyskany charakter przebiegów jest zbliżony do wyników otrzymanych dla impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale, co dotyczy również wykresu funkcji kowariancji wzajemnej.



Rys. 3. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu ostrze- płyta w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej

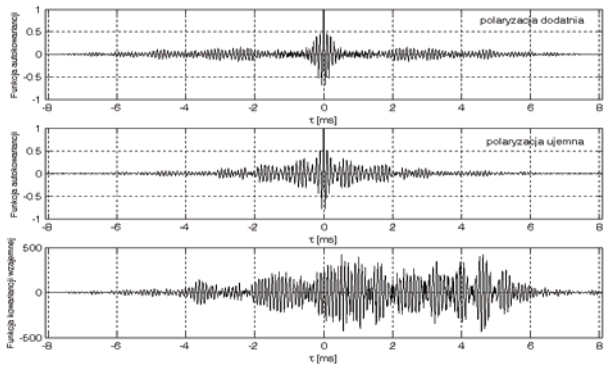


Rys. 4. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu wieloostrze- płyta w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej

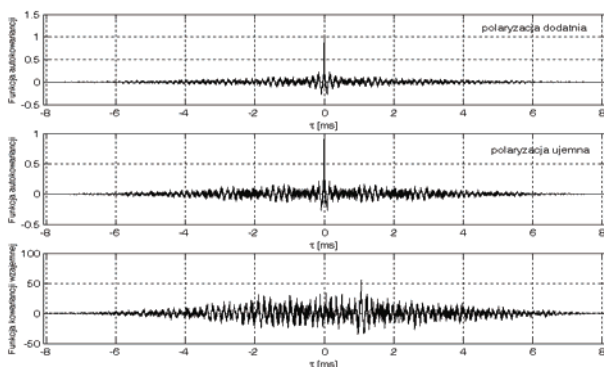
Na rysunku 4 zilustrowano wykresy funkcji autokowariancji i kowariancji wzajemnej otrzymane dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu wieloostrze- płyta w oleju izolacyjnym. Na przebiegach funkcji autokowariancji, wykreślonych zarówno dla dodatniej jak i ujemnej polaryzacji napięcia, występuje większa liczba składowych o charakterze okresowym niż dla WNZ typu ostrze- płyta i na cząstkach o nieokreślonym potencjale. Charakterystyki uzyskane dla różnych polaryzacji napięcia wykazują różnice w kształcie wyznaczonych przebiegów funkcji autokowariancji. Natomiast funkcja kowariancji wzajemnej wykrywa pewną okresowość dla generowanych w dodatnim i ujemnym półokresie napięcia impulsów EA. W zakresie przesunięć czasowych do 6 ms występują duże ilości pojedynczych maksimum o zróżnicowanej amplitudzie, co świadczy o dużym stopniu skorelowania generowanych w dodatnim i ujemnym półokresie napięcia impulsów EA.

Dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu powierzchniowego wyniki analizy korelacyjnej zostały przedstawione na rysunku 5. Polaryzacja napięcia miała wpływ na kształt wyznaczonych wykresów funkcji autokowariancji. Dla przebiegów funkcji autokowariancji impulsów EA generowanych przez WNZ dla ujemnej polaryzacji napięcia występują aktywne składowe okresowe

o dużej częstotliwości, co odpowiada ekstremom dla niewielkich przesunięć czasowych. Składowe te są mniej aktywne przy polaryzacji ujemnej. Natomiast dla impulsów EA generowanych przy dodatniej polaryzacji napięcia bardziej aktywny jest przedział niskich częstotliwości, co związane jest z występowaniem wartości ekstremalnych w przedziale czasowym od 2 do 5 ms. Natomiast przebieg funkcji kowariancji wzajemnej wykazuje istnienie dużej ilości maksimum o różnej wartości zarówno dla niewielkich przesunięć czasowych do 2 ms jak i w zakresie przesunięć większych, co świadczy o dużej korelacji analizowanych dla obu polaryzacji napięcia impulsów EA.



Rys. 5. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu powierzchniowego w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej



Rys. 6. Przebieg funkcji autokowariancji dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu wielostrze- płyta z warstwą izolacji preszpanowej w dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia oraz ich funkcji kowariancji wzajemnej

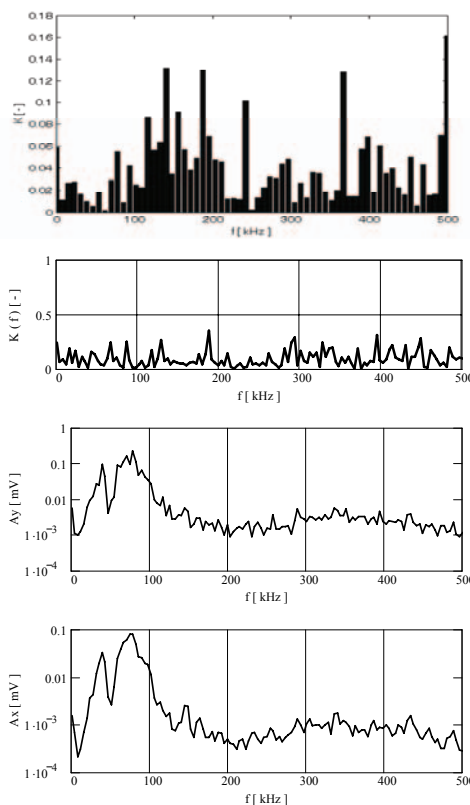
Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi funkcji autokowariancji i kowariancji wzajemnej obliczone dla impulsów EA generowanej przez WNZ typu wielostrze- płyta z warstwą izolacji preszpanowej, które występują w oleju izolacyjnym. Dla obu polaryzacji napięcia uzyskano znaczny udział składowej stochastycznej oraz widoczne składowe o charakterze deterministycznym. Dla ujemnej polaryzacji napięcia udział składowych okresowych większy i występuje w dłuższym przedziale czasowym do 4 ms, niż dla polaryzacji dodatniej, gdzie amplitudy są mniejsze i zanikają po czasie 2 ms. Na przebiegu funkcji kowariancji wzajemnej widoczne jest dla przesunięcia czasowego równego 1 ms maksimum, co świadczy o wystąpieniu dużej korelacji pomiędzy analizowanymi w dodatnim i ujemnym półokresie impulsami EA.

Reasumując, dla badanych form WNZ otrzymano różniące się przebiegi funkcji autokowariancji oraz kowariancji wzajemnej, przy czym dla każdej z form widoczny był duży udział składowej stochastycznej oraz

zróznicowany dla poszczególnych typów WNZ pod względem amplitudy, czasu występowania i ilości udział składowych deterministycznych [3].

Analiza wyników korelacji w dziedzinie częstotliwości uzyskanych przy zastosowaniu funkcji koherencji

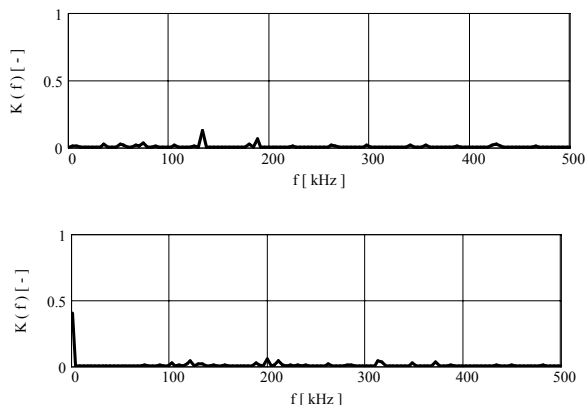
W ramach graficznej prezentacji otrzymanych wyników analizy korelacyjnej przeprowadzonej w dziedzinie częstotliwości, dla wszystkich badanych form WNZ, wyznaczono przebiegi widm gęstości mocy obliczonych dla impulsów EA generowanej w dodatnim (A_x) i ujemnym półokresie napięcia (A_y) oraz przebiegi funkcji koherencji ($K(f)$), które wykreślono w postaci wykresu kolumnowego oraz za pomocą interpolacji liniowej. Ponadto w celach porównawczych obliczono charakterystyki funkcji koherencji wyznaczone dla różnych form WNZ przy tej samej polaryzacji napięcia.



Rys. 7. Przebiegi widm gęstości mocy impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale przy dodatniej (A_x) i ujemnej (A_y) polaryzacji napięcia oraz przebieg ich funkcji koherencji $K(f)$

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki uzyskane dla impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale, które przemieszczają się w oleju izolacyjnym. Przebieg funkcji koherencji oscyluje wokół wartości 0.1, przy czym na wykresie występuje szereg lokalnych ekstremów. Zbliżony kształt widm częstotliwościowych, z dużym udziałem mocy składowych w zakresie niższych częstotliwości do 150 kHz dla dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia znajduje potwierdzenie w charakterze wykresu funkcji koherencji. W szczególności dotyczy to tendencji zwiększania się wartości mocy na wykresach widm częstotliwościowych dla obu polaryzacji napięcia w paśmie od 5 do 30 kHz, tendencji spadkowej w zakresie od 100 do 240 kHz, oraz dla przebiegu w zakresie od 240 do 500 kHz, gdzie widmo mocy po

osiągnięciu wartości 0,001 mV dla dodatniej i 0,01 mV dla ujemnej polaryzacji ma przebieg ustalony bez wyraźnych obszarów wartości ekstremalnych. Wykres funkcji koherencji w tym przypadku szczególnie skutecznie identyfikuje obszary występujące na charakterystykach częstotliwościowych, które charakteryzują się dużym gradientem zmian wartości. Dotyczy to zarówno tendencji związanych z gwałtownym obniżaniem się jak również z dynamicznym zwiększaniem wartości na przebiegach widm gęstości mocy. Ponadto na przebiegu funkcji koherencji widoczne są dwa lokalne minima w okolicy 40 kHz i 240 kHz, które można również zauważyć na przebiegach widm gęstości mocy dla obu polaryzacji napięcia [3].



Rys. 8. Przebiegi funkcji koherencji impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale i w pęcherzykach gazowych przy dodatniej (rysunek górny) i ujemnej polaryzacji napięcia (rysunek dolny)

Na rysunku 8 zaprezentowano przebieg funkcji koherencji dla impulsów EA generowanej przez WNZ na cząstkach o nieokreślonym potencjale oraz w pęcherzykach gazowych w oleju, oddzielnie dla dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia. Funkcja koherencji przyjmuje wartości bliskie zero jedynie z jednym wyraźnym ekstremum w ujemnym półokresie napięcia dla częstotliwości poniżej 5 kHz.

Podsumowanie

Wykorzystanie analizy opartej na funkcjach autokowariancji i kowariancji wzajemnej może stanowić przydatne narzędzie obliczeniowe do określania udziału składowych stochastycznych związanych z szerokopasmowym lub wąskopasmowym szumem i deterministycznych w analizowanych impulsach EA generowanej przez badane formy WNZ. Ponadto wyniki uzyskane za pomocą funkcji kowariancji wzajemnej, zawierając informacje jedynie o wspólnych harmonicznym, umożliwiają określanie wspólnych skorelowanych przedziałów czasowych i odpowiadających im zakresów częstotliwości. Dodatkowo funkcja kowariancji wzajemnej zachowuje informacje o przesunięciu fazowym pomiędzy skorelowanymi sygnałami.

Analiza z wykorzystaniem funkcji koherencji może stanowić narzędzie porównawcze umożliwiające określenie

struktur skorelowanych oraz obszarów pozbawionych cech wspólnych dla charakterystyk częstotliwościowych impulsów EA generowanej przez różne formy WNZ.

Wyniki uzyskane za pomocą funkcji kowariancji wzajemnej, które zawierały jedynie informacje o wspólnych harmonicznym, umożliwiły wskazanie wspólnych skorelowanych przedziałów czasowych dla zmierzonych impulsów EA i odpowiadających im zakresów częstotliwości.

Niezależnie od polaryzacji napięcia, dla impulsów EA generowanej przez badane formy WNZ, uzyskano dla danego typu wyładowania zbliżone kształty przebiegów widm gęstości mocy. Wyjątek stanowią WNZ typu ostrzeżyła, co zostało potwierdzone na wykresach funkcji koherencji. Natomiast przebiegi funkcji koherencji nie wykazują aktywnych struktur przy porównaniu widm gęstości mocy dla dwóch różnych typów WNZ oraz dla widm częstotliwościowych akustycznych sygnałów zakłócających i impulsów EA generowanej przez WNZ [3].

Praca finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy – rozwojowy nr R01 006 01 oraz projekt badawczy nr N511 019 31/3638

LITERATURA

- [1] Boczar T., Identification of a Specific Type of Partial Discharges from Acoustic Emission Frequency Spectra, *IEEE Trans. on DEIS*, 8, (2001), No 4, 598-606.
- [2] Boczar T., Zmarzły D., Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges, *IEEE Trans. on DEIS*, 11, (2004), No 3, 433-449.
- [3] Boczar T., Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niepełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania, *Studia i Monografie*, Of. Wyd. Pol. Op., z. 147, Opole, (2003)
- [4] Boczar T., Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niepełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów, *Studia i Monografie*, Of. Wyd. Pol. Op., z. 146, Opole, (2003)
- [5] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydróż P.: Mechanizmy, pomiary i analiza wnz w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, IPPT PAN, Warszawa, 2001
- [6] Zydróż P., Wybrane zagadnienia analizy czasowo-częstotliwościowej wyładowań niepełnych, WEAlIE AGH, Kraków, 2001
- [7] Bendat J. S., Piersol A. G., Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, New York, John Wiley & Sons, 1993.
- [8] Howells E., Norton E. T., Detection of PD in Transformers Using AE Techniques, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 97, No. 5, 1998, pp. 1538-1549.
- [9] Rosołowski E., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce elektroenergetycznej, Akad. Of. Wyd. EXIT, Warszawa, 2002
- [10] Wilson A., The Application of Correlation Analysis to PDs Measurements, Diagnostic Testing of High-Voltage Power Apparatus in Service, IEE Conf. Publ. 94, Pt. 1, 1973, pp. 8-13.

Autorzy: dr hab. inż. Tomasz Boczar prof. PO, E-mail: t.boczar@po.opole.pl; dr inż. Andrzej Cichoń, E-mail: a.cichon@po.opole.pl; dr inż. Sebastian Borucki, E-mail: s.borucki@po.opole.pl, dr inż. Marcin Lorenc, E-mail: lem@op.home.pl; Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole