Zastosowanie analizy MUSIC do oceny sygnałów zakłócających pomiary diagnostyczne układów izolacyjnych metodą emisji akustycznej

Tomasz Boczar

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

W artykule zostaną przedstawione wyniki analizy pseudospektralnej (*Pseudo-Spectral Analysis*) uzyskane dla akustycznych sygnałów zakłócających. Analizowane będą źródła zakłóceń, które mogą występować podczas pomiarów diagnostycznych układów izolacyjnych wykonywanych on-line metodą emisji akustycznej podczas normalnej eksploatacji transformatorów elektroenergetycznych. Uzyskane wyniki zostaną porównane z rezultatami otrzymanymi przy zastosowaniu transformaty Fouriera (*Fast Fourier Transform*).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, metoda emisji akustycznej, sygnał zakłócający, analiza sygnałów

Do głównych przyczyn powstawania awarii, a także trwałych uszkodzeń transformatorów dużej mocy (udział od 15 % do 55 %) należą defekty występujące w ich układach izolacyjnych, które bezpośrednio powodowane są zjawiskiem generacji wyładowań niezupełnych (WNZ) [4, 14–16]. Obecnie do oceny wyładowań elektrycznych wykorzystywane są następujące metody diagnostyczne: elektryczna, chromatografii gazowej oraz emisji akustycznej (EA). Wykonuje się również pomiary o charakterze szacunkowym wielkości powstającego ciepła, emitowanego światła i zmian ciśnienia w obszarze generacji WNZ [1–3, 5–13, 17–19]. Podstawową zaletą metody EA jest możliwość jej stosowania w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych, podczas normalnej pracy urządzeń elektroenergetycznych, w których wykonywanie pomiarów WNZ innymi metodami było do tej pory w dużym stopniu utrudnione lub niemożliwe. W oparciu o rezultaty uzyskiwane metodą akustyczną istnieje możliwość detekcji, czyli stwierdzenia występowania WNZ oraz określenia miejsc ich generacji w badanym układzie izolacyjnym. Natomiast istotny problem stanowi poprawny pomiar intensywności i ocena wielkości zmierzonych metodą akustyczną WNZ. Jest to spowodowane występowaniem na drodze propagacji sygnałów EA generowanej przez WNZ wielu warstw izolacyjnych, najczęściej o różnych wartościach współczynników tłumienia i odbicia fal akustycznych [3].

Podczas diagnostyki papierowo-olejowych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych metodą akustyczną należy uwzględnić możliwość występowania sygnałów zakłócających, które mogą niekorzystnie wpłynąć na rejestrowane sygnały EA. Ich obecność może ograniczyć poprawną ocenę uzyskanych wyników, a w konsekwencji uniemożliwić skuteczną identyfikację występujących form WNZ i powiązanych z nimi defektów badanej izolacji. Tym samym mogą mieć wpływ na poprawną ocenę stanu mierzonego układu izolacyjnego transformatora elektroenergetycznego. Problem identyfikacji, a następnie eliminacji zakłóceń towarzyszących pomiarom WNZ wykonywanych metodą EA jest zagadnieniem trudnym i dość złożonym z metrologicznego punktu widzenia. Powodem tego jest przede wszystkim duża czułość metody, wynikająca z pomiaru relatywnie małych amplitud sygnałów akustycznych generowanych przez WNZ. Jednocześnie poziom występujących w warunkach przemysłowych zakłóceń może w niektórych przypadkach przewyższać wartość sygnałów użytecznych. Generowane podczas eksploatacji transformatorów elektroenergetycznych zakłócenia mogą mieć źródła o różnym charakterze: akustycznym, elektrycznym i mechanicznym. Niektóre z nich mogą oddziaływać w sposób dualny na rejestrowane sygnały EA, np. na drodze elektrycznej i akustycznej (wyładowania ulotowe, powierzchniowe itp.) lub mechanicznej i akustycznej (zderzenia cząsteczek stałych o kadź transformatora). Źródła zakłóceń mogą występować zarówno w badanym obiekcie i wpływać na warunki generacji, a także propagację sygnałów EA od WNZ, jak również powstawać na zewnątrz badanej izolacji i oddziaływać na poszczególne elementy stosowanych układów pomiarowych [3].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy pseudospektralnej uzyskane dla akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą pomp i wentylatorów podczas normalnej eksploatacji autotransformatora elektroenergetycznego. Dla każdego z badanych źródeł zakłóceń przedstawiono kolejno: uzyskane przebiegi czasowe oraz widma gęstości mocy i pseudowidma MUSIC (*Multiple Signal Classification*).

Wyniki pomiarów sygnałów zakłócających występujących w warunkach przemysłowych na stacji elektroenergetycznej

Pomiary akustycznych sygnałów zakłócających, jakie mogą występować podczas badań diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych wykonywanych metodą EA, przeprowadzono w warunkach eksploatacyjnych, w napowietrznej stacji przesyłowo-rozdzielczej GPZ Dobrzeń Mały, pracującej na napięciach znamionowych 400/220/110 kV [3].

Przeprowadzono badania autotransformatora wysokiego napięcia typ TLSRB 250000/400 PN (rys. 1), który wyposażony był w siedem niezależnie działających chłodnic, przy czym każda była wyposażona w zespół trzech wentylatorów chłodzących. Podczas pomiarów autotransformator pracował przy obciążeniu równym ok. 65 % jego mocy znamionowej. Zakres badań obejmował rejestrację zakłóceń emitowanych pracą wentylatorów zainstalowanych na chłodnicach oraz pomp wymuszających obieg oleju izolacyjnego au-

totransformatora. W celach porównawczych wykonano także pomiary na powierzchni bocznej kadzi, na której nie było umieszczonych chłodnic, stanowiących odniesienie dla rejestrowanych zakłóceń [3].



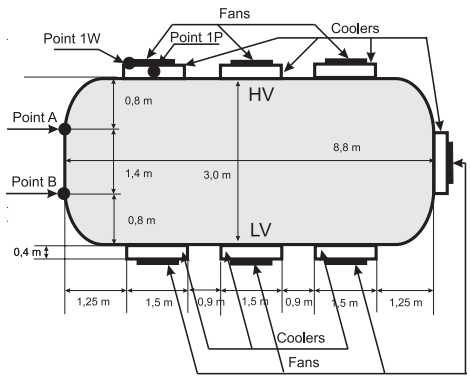
Rys. 1. Ogólny widok badanego autotransformatora typ TLSRB 250000/400 PN

Fig. 1. Overall view of the under study autotransformer type TLSRB 250000/400 PN

Pomiary sygnałów zakłócających wykonano oddzielnie dla każdego z wentylatorów zainstalowanych na siedmiu chłodnicach znajdujących się odpowiednio: trzy po stronie górnego napięcia (GN), trzy po stronie dolnego napięcia (DN) i jedna na powierzchni bocznej kadzi. W celach porównawczych, a także aby uzyskać wyniki odniesienia, przeprowadzono rejestracje sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora na bocznej powierzchni jego kadzi – punkt A (rys. 2) [3].

Pomiary akustycznych sygnałów zakłócających wywołanych pracą pomp wymuszających obieg czynnika chłodzącego wykonano na górnej powierzchni chłodnicy, bezpośrednio przy połączeniu rury doprowadzającej do niej olej izolacyjny. W ten sposób przeprowadzono rejestracje dla każdej z siedmiu pomp autotransformatora. W każdym przypadku odległość między przetwornikiem pomiarowym, a działającą pompą wynosiła 50 cm. Jako punkt odniesienia wykonano pomiary sygnałów akustycznych na powierzchni bocznej kadzi w punkcie B (rys. 2) [3].

Do pomiarów sygnałów akustycznych wykorzystano standardowy układ firmy Physical Acoustics Corporation (PAC), składający się z przetworników piezoelektrycznych szerokopasmowych stykowych serii WD typ AH 17, przedwzmacniaczy typu



Rys. 2. Szkic rozmieszczenia punktów pomiarowych dla badanego autotransformatora

Fig. 2. Distribution of measurement points around under study autotransformer

2/4/6 Preamplifier, wzmacniaczy typ AE2A i czterokanałowej karty pomiarowej CH-3160 firmy Acquitek [3].

Na rys. 3–8 przedstawiono kolejno: przebiegi czasowe (rys. 3, 6), widma gęstości mocy (rys. 4, 7) i pseudowidma MUSIC (rys. 5, 8), które wyznaczono oddzielnie dla sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora (dla punktu pomiarowego A) oraz zakłóceń wywołanych pracą wentylatorów chłodnicy (punkt pomiarowy 1W).

Poddając analizie porównawczej wyniki uzyskane przy zastosowaniu transformaty Fouriera i przekształcenia MUSIC, można stwierdzić, że:

- dla punktu odniesienia A, pasmo dominujących częstotliwości dla widma i pseudowidma mieści się w zakresie 0–114 kHz. Największa gęstość mocy (średnio od 20 dB), występuje w przedziale 0–42 kHz, w którym widoczne są dwa szpilkowe ekstrema dla częstotliwości: 21 kHz i 37 kHz. W zakresie od 42 kHz do 114 kHz następuje gwałtowny spadek amplitudy średnio o ok. 25 dB. W przedziale tym można wyróżnić jeszcze jedno lokalne wąskopasmowe ekstremum dla częstotliwości w paśmie od 100 kHz do 108 kHz. W przedziale częstotliwości 160–1200 kHz widmo jest praktycznie płaskie, jednakże można w nim wyróżnić cztery lokalne piki rezonansowe w następujących pasmach częstotliwości: 230–240 kHz, 260–275 kHz, 415–430 kHz, 493–533 kHz.
- dla punktu pomiarowego 1W (praca wentylatora) zakres dominujących częstotliwości dla widma gęstości mocy i dla pseudowidma MUSIC zawiera się w szerszym niż w omówionym przypadku zakresie, od 0 do 160 kHz. Największa moc rejestrowanych sygnałów akustycznych jest w przedziale częstotliwości 0–50 kHz, w którym przebiegi osiągają swoje maksymalne ostre ekstremum. W paśmie 50–160 kHz następuje spadek amplitudy o ok. 20 dB względem wartości maksymalnej. Ponadto w przedziale tym widoczne są dwa wąskopasmowe ekstrema lokalne odpowiednio dla częstotliwości: 57 kHz i 100 kHz, między którymi znajduje się charakterystyczna dolina o mniejszej o 5 dB amplitudzie. Charakterystyka widmowa w zakresie 0–160 kHz różni się kształtem przebiegu od wyników uzyskanych dla punktu pomiarowego A. Natomiast w paśmie 160–1200 kHz uzyskane zależności wykazują takie same cechy jak przebiegi widma gęstości mocy i pseudowidma MUSIC, które zostały obliczone dla sygnałów akustycznych generowanych pracą badanego autotransformatora (punkt pomiarowy A). Dotyczy to zarówno kształtu przebiegu, jak i uzyskiwanych wartości.

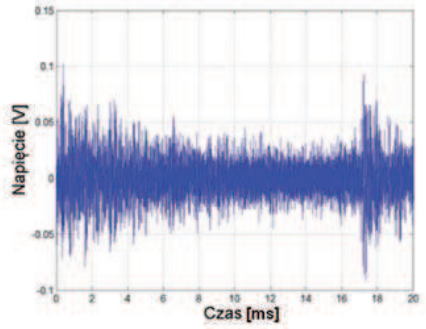
Na rys. 9–14 przedstawiono kolejno następujące charakterystyki: przebiegi czasowe (rys. 9, 12), widma gęstości mocy (rys. 10, 13), pseudowidma MUSIC (rys. 11, 14). Przedstawione wykresy wyznaczono oddzielnie dla sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora i zarejestrowanych w punkcie pomiarowym B oraz dla akustycznych sygnałów zakłócających towarzyszących pracy jego pomp zmierzonych w punkcie 1P [3].

Analizując wyniki przekształceń częstotliwościowych, tj. przebiegów widm gęstości mocy i pseudowidm MUSIC, wyznaczonych dla zarejestrowanych sygnałów, można stwierdzić, że:

- dla punktu pomiarowego B, pasmo dominujących częstotliwości mieści się w przedziale 5–115 kHz, w którym można wyróżnić dodatkowo dwa charakterystyczne zakresy. Pierwszy w paśmie 5–35 kHz, gdzie przebieg widma gęsto-

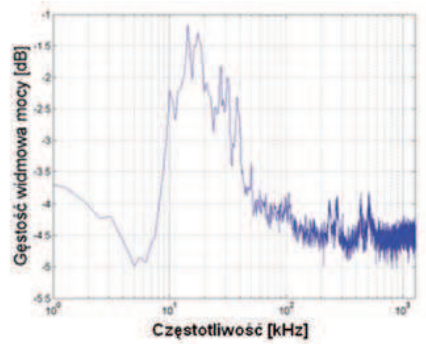
ści mocy i pseudowidma osiąga ostre, o charakterze szpilkowym, ekstremum dla częstotliwości 14,5 kHz. Drugi charakterystyczny zakres obejmuje pasmo częstotliwości od 35 kHz do 115 kHz, gdzie osiągane wartości amplitud są o przeszło 20 dB mniejsze od przedziału pierwszego. W zakresie tym następuje wykładniczy spadek mocy sygnału o wartość 10 dB. W paśmie 115–1200 kHz widmo ma ustalony przebieg płaski, w którym można jednak wskazać cztery wąskopasmowe piki rezonansowe, w następujących zakresach częstotliwości: 235–245 kHz, 265–285 kHz, 415–440 kHz i 500–545 kHz. Mają one amplitudy większe średnio o 5 dB od części płaskiej charakterystyk.

- Dla punktu pomiarowego 1P uzyskano szersze i mieszczące się w zakresie 7–143 kHz pasmo dominujących częstotliwości zarówno dla przebiegu widma gęstości mocy, jak również dla pseudowidma MUSIC. Dodatkowo, w przedziale tym można wyróżnić trzy charakterystyczne zakresy częstotliwości: 7–43 kHz, 43–100 kHz, 100–143 kHz, w których kształt widma i pseudowidma różni się od uzyskanych dla punktu pomiarowego B. W pierwszym zakresie występują dwa ostre szpilkowe ekstrema dla częstotliwości: 27 kHz i 31 kHz (o 5 dB mniejsza amplituda). W drugim podprzedziale, w którym amplitudy są średnio o 25 dB mniejsze niż w paśmie od 7 kHz do 43 kHz, również można wskazać dwa piki rezonansowe dla częstotliwości: 71 kHz i 88 kHz. W trzecim z charakterystycznych podprzedziałów częstotliwości następuje wykładniczy spadek amplitudy średnio o 10 dB względem wartości dla zakresu 43–100 kHz.



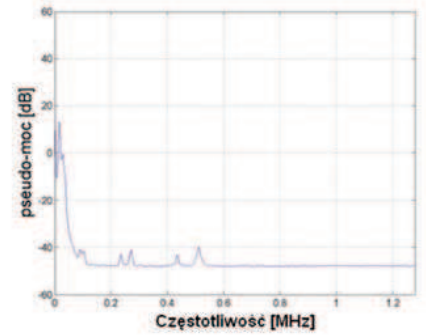
Rys. 3. Przebieg czasowy sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy A

Fig. 3. The time run of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point A



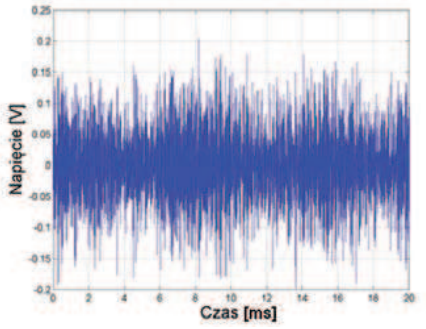
Rys. 4. Widmo gęstości mocy sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy A

Fig. 4. PSD of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point A



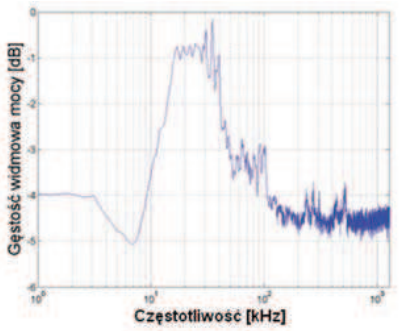
Rys. 5. Pseudowimo MUSIC sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy A

Fig. 5. Pseudospectrum MUSIC of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point A



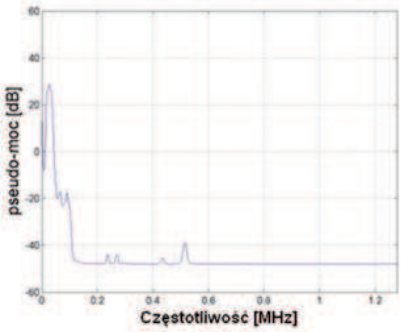
Rys. 6. Przebieg czasowy akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą wentylatorów chłodnicy

Fig. 6. The time run of the acoustic disturbance signals generated by the cooler fans of the autotransformer



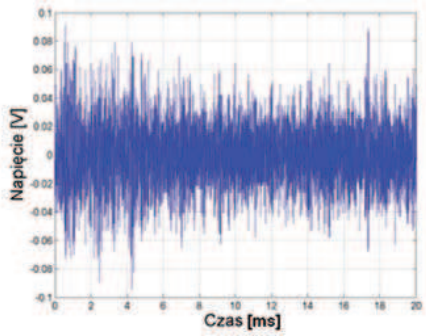
Rys. 7. Widmo gęstości mocy akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą wentylatorów chłodnicy autotransformatora

Fig. 7. PSD of the acoustic disturbance signals generated by the cooler fans of the autotransformer



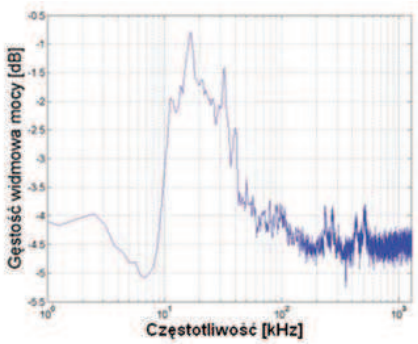
Rys. 8. Pseudowimo MUSIC mocy akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą wentylatorów chłodnicy autotransformatora

Fig. 8. Pseudospectrum MUSIC of the acoustic disturbance signals generated by the cooler fans of the autotransformer



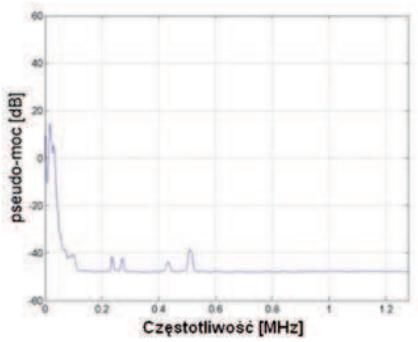
Rys. 9. Przebieg czasowy sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy B

Fig. 9 The time run of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point B



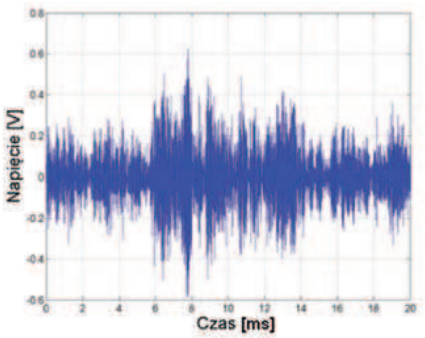
Rys. 10. Widmo gęstości mocy sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy B

Fig. 10. PSD of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point B



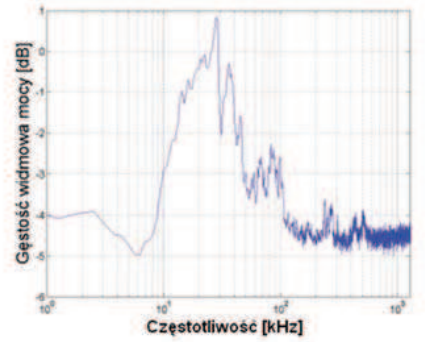
Rys. 11. Pseudowimo MUSIC sygnałów akustycznych generowanych pracą autotransformatora – punkt pomiarowy B

Fig. 11. Pseudospectrum MUSIC of the acoustic disturbance signals generated by the work of the autotransformer – measuring point B



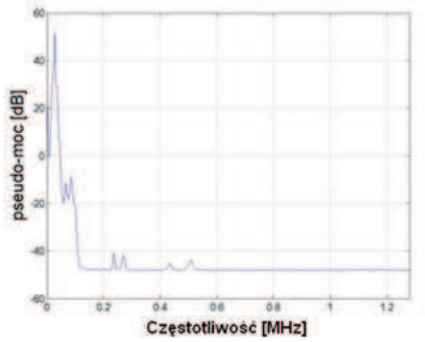
Rys. 12. Przebieg czasowy akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą pomp autotransformatora

Fig. 12. The time run of the acoustic disturbance signals generated by the cooling pumps of the autotransformer



Rys. 13. Widmo gęstości mocy akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą pomp autotransformatora

Fig. 13. PSD of the acoustic disturbance signals generated by the cooling pumps of the autotransformer



Rys. 14. Pseudowimo MUSIC akustycznych sygnałów zakłócających generowanych pracą pomp autotransformatora

Fig. 14. Pseudospectrum MUSIC of the acoustic disturbance signals generated by the cooling pumps of the autotransformer

Kształt charakterystyk częstotliwościowych powyżej 143 kHz jest analogiczny do wykresów uzyskanych dla punktu pomiarowego B, przy czym amplitudy czterech pików rezonansowych dla punktu 1P mają mniejsze o ok. 2 dB wartości [3].

Podsumowanie

Na podstawie analizy danych, jakie uzyskano przy zastosowaniu analiz częstotliwościowych, można sformułować dwa wnioski.

- Dla badanych źródeł sygnałów zakłócających uzyskano zróżnicowane zakresy pasm dominujących częstotliwości i różniące się kształtem przebiegi czasowe, widm gęstości mocy, pseudowidm MUSIC.
- Niezależnie od badanego źródła, największy udział energetyczny mają akustyczne sygnały zakłócające, w paśmie nieprzekraczającym 50 kHz. W uzyskanych przebiegach częstotliwościowych widoczny jest także (bardzo zróżnicowany w zależności od rodzaju zakłóceń) wpływ lokalnych ekstremów w zakresie wyższych częstotliwości. Mają one najczęściej charakter wąskopasmowy i znacznie mniejszą amplitudę (średnio o ok. 15 dB) w stosunku do ekstremów z zakresu 0–50 kHz.

Reasumując, zarówno dla eksperymentów przeprowadzanych w warunkach laboratoryjnych, jak również w czasie pomiarów diagnostycznych wykonywanych w warunkach eksploatacyjnych, przy zastosowaniu metody EA należy mieć na uwadze możliwość występowania różnego typu i o różnym charakterze

sygnałów zakłócających. Mogą one mieć wpływ na poprawną interpretację uzyskiwanych wyników. Prezentowane w artykule rezultaty świadczą o możliwości pokrywania się, przede wszystkim w niskich zakresach, pasm dominujących częstotliwości badanych źródeł zakłóceń oraz podstawowych form WNZ [3].

Rozpoznawanie poszczególnych form WNZ i powodowanych ich występowaniem defektów izolacji na podstawie analizy zarejestrowanych sygnałów EA uzależnione jest bezpośrednio od poprawności wykonania pomiarów. Przeprowadzona w sposób właściwy procedura diagnostyczna powinna zapewnić skuteczne i możliwie w jak największym stopniu odseparowanie się od sygnałów zakłócających, które mogą nakładać się na użyteczne, z diagnostycznego punktu widzenia, pasmo częstotliwościowe WNZ. Niespełnienie tak postawionych wymagań może skutkować nie tylko błędną interpretacją otrzymanych wyników pomiarowych, ale przede wszystkim niewłaściwym rozpoznawaniem poszczególnych form WNZ, a co się z tym wiąże niepoprawną oceną stopnia zestarzenia badanego papierowo-olejowego układu izolacyjnego. Zagadnienie rozpoznawania, a następnie eliminacji zakłóceń ma także podstawowe znaczenie dla poprawnego działania skomputeryzowanych systemów ekspercckich, które umożliwiają diagnostykę układów izolacyjnych, na podstawie pomiarów on-line, wykonywanych w czasie normalnej eksploatacji urządzeń, w warunkach przemysłowych [3].

Bibliografia

1. Aschenbrenner D., Kranz H. G., Rutgers W.R., Aardweg P.: *On line PD Measurements and Diagnosis on Power Transformers*. IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, 2005, p. 216–222.
2. Bengtsson T., Leijon M., Ming L.: *Acoustic Frequencies by PD in Oil*. 8th Int. Symp. on High Vol. Eng., Yokohama (Japan) 1993, p. 113–116.
3. Boczar T.: *Analiza zakłóceń w pomiarach akustycznych wyładowań niezupełnych*. Studia i Monografie z. 259, Wyd. Pol. Op., Opole 2010.
4. CIGRE-WG 12-05: *An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service*. Electra No. 88 1983, p. 21–48.
5. Du B.X., Wei G.Z., Ouyang M.J.: *A New Detection Method of PD Pulse Signal Based on Multi-sensor*. Proc. Annu. Rep. Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004, p. 450–453.
6. Dunaev F.N.: *Relation of Magnetostriction for Cold-rolled Transformer Steel to Shape of Specimen and Internal Stress*. Russian Physics Journal Vol. 8 No. 3, May 1965, p. 76–78.
7. Eleftherion P.M.: *PD. AE Based PD Source Location in Transformers*. IEEE Elect. Insul. Mag Vol. 11 No. 6, 1995, p. 22–26.
8. Fuqi L., Lei J., et al.: *JFY-3 On-line PD Monitoring System for Power Transformers*. Advanced Technology of Electrical Engineering Vol. 19. No. 3, 2000, p. 69–72.
9. Grossmann E., Feser K.: *Sensitive On-line PD-Measurements of Onsite Oil/Paper-Insulated Devices by Means of Optimized AE Techniques (AET)*. IEEE Trans. Power Del. Vol. 20 No. 1, 2005, p.158–162.
10. Haessig H., Brumlich R., Fuhr J., Aschwanden T.: *Assessment of insulation condition of large power transformer by on-site electrical diagnostic methods*. IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul. (ISEI) Anaheim (USA) 2000, p. 368–372.
11. Khan S.Z., Deheng Z., Xianhe J., Kexiong T.: *A new Adaptive Technique for On-line PD Monitoring*. IEEE Trans. on DEI Vol. 5. No. 6, 1995, p. 700–707.
12. Kweon D.J., Chin S.B., Kwak H.R., Kim J.Ch., Song K.B.: *The Analysis of Ultrasonic Signals by PD and Noise From the Transformer*. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 20 No. 3, 2005, p. 1976–1982.
13. Li J., Du L., Sun C., Liao R., Chen W.: *A Practical PD Online Monitoring System Used for Transformers*. Proceedings of ISEIM, 2001, p. 785–788.
14. Praca zbiorowa red. Subocz J.: *Transformatory w eksploatacji*. Energo-Complex, Piekary Śląskie 2007.
15. Praca zbiorowa pod redakcją Subocz J.: *Podstawy opracowania specyfikacji technicznej transformatorów energetycznych*. Seria Eksploatacja Transformatorów Energetycznych, tom I, Energo-Complex, Piekary Śląskie 2007.
16. Raport PTPiREE: *Analiza awaryjności stacji transformatorowych SN/nn na przykładzie wybranych Spółek Dystrybucyjnych*, Poznań 2002.
17. Sahoo N.C., Salama M.M.A., Bartnikas R.: *Trends in PD Pattern Classification: A Survey*. IEEE Trans. on DEI. Vol. 12 No. 2, 2005, p. 248–264.
18. Skubis J.: *EA w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*. IPPT-PAN, Warszawa 1993.
19. Zhang H., Blackburn T.R., Phung B.T., Sen D.: *A Novel Wavelet Transform Technique for On-line PD Measurements Part 1: WT De-noising Algorithm*. IEEE Trans. on DEI. Vol. 14, 2007, p. 3–14.

Application of the MUSIC analysis for evaluation of the signals interfering diagnostic measurements of insulation systems using acoustic emission method

This paper discusses the problems connected with frequency analysis and multiple signal classification (MUSIC) of disturbances that can accompany the measurements of partial discharges in industrial conditions using the acoustic emission method. It presents different kinds of interfering signals that can deform the measured acoustic emission signals generated by partial discharges in electric power devices. In addition, it includes the results of the measurements and frequency and MUSIC analyses of interfering signals in the form of power density spectra and of pseudo-spectrum.

Keywords: partial discharges, acoustic emission method, interfering signal, signal analysis

dr hab. inż. Tomasz Boczar, prof. PO



Prodziekan ds. organizacyjnych Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 220 publikacji, głównie 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