

Andrzej CICHON¹, Sebastian BORUCKI², Jan SUBOCZ²

¹POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, Prószkowska 76, Budynek 2, 45-578 Opole

²ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGII I DIAGNOSTYKI, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Ocena możliwości wykorzystania sygnałów emisji akustycznej do detekcji wyładowań niezupełnych w izolatorach przepustowych

Dr inż. Andrzej CICHON

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Katedry Wysokich Napięć. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: a.cichon@po.opole.pl

Dr inż. Sebastian BORUCKI

Adiunkt Instytutu Elektroenergetyki, Politechniki Opolskiej. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania nowoczesnych metod pomiarowych w diagnostyce urządzeń elektrycznych i wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Zainteresowania: technika wysokich napięć, diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych przy wykorzystaniu metod nieniszczących (m.in. metody emisji akustycznej, metody wibroakustycznej, pomiarów skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego).



e-mail: s.borucki@po.opole.pl

Dr hab. inż. Jan SUBOCZ

Autor ponad 140 prac z zakresu elektrotechnologii, fizyki procesów relaksacyjnych w dielektrykach oraz diagnostyki urządzeń elektrycznych. Współtwórca systemu zarządzania transformatorami „TrafoGrade”. Specjalizuje się w stosowaniu dynamicznych pomiarów relaksacyjnych do oceny stanu technicznego izolacji. Członek Komitetu Elektrotechniki PAN, Komisji Nauk Elektrycznych o/Poznań PAN, PKME SEP, IEEE.



e-mail: jan.subocz@zut.edu.pl

isolators in terms of PD appearance. During measurements of AE signals two kinds of PDs have been observed: electrical discharges in the inner part of paper-oil isolation and inside the air blebs. Time-frequency analysis has enabled to assign characteristic frequency bands to the particular PD types. This has created a basis for further works aiming development of research methodic enabling for AE signals measurement on bushing isolators under normal operation condition.

Keywords: bushing isolator, partial discharges, acoustic emission method, electric power diagnosis.

1. Wstęp

Zachowanie dużej niezawodności pracy systemu elektroenergetycznego wymaga poprawnie prowadzonej eksploatacji i utrzymania w dobrym stanie technicznym poszczególnych urządzeń energetycznych. Ważnym elementem systemu rozdzielczo-dystrybucyjnego są transformatory mocy, których jednym z podzespołów są wysokonapięciowe izolatory przepustowe. Na skutek coraz wyraźniej zwiększającej się w ostatnich latach awaryjności izolatorów przepustowych celowym stało się poszukiwanie i opracowanie bezinwazyjnych metod umożliwiających skuteczną diagnostykę tych elementów sieci elektroenergetycznej. Konieczność ta wynika przede wszystkim ze znacznych strat finansowych, które mogą zaistnieć podczas uszkodzenia, a następnie rozerwania osłony porcelanowej izolatora. Konsekwencją wystąpienia takiej sytuacji jest zazwyczaj eksplozja i pożar całego transformatora. Natomiast w przypadku wystąpienia tzw. awarii katastrofalnej jednostki transformatorowej, zapoczątkowanej rozerwaniem izolatora przepustowego (np. awaria autotransformator na stacji Tarnów, rok 2008), uszkodzeniu mogą ulec także urządzenia znajdujące się w pobliżu miejsca zainstalowanie transformatora. W ostateczności zaistniałe w systemie elektroenergetycznym zakłócenie może niekontrolowanie rozwinąć się na kolejne zainstalowane na stacji elektroenergetycznej obiekty, konsekwencją czego może być obniżenie poziomu bezpieczeństwa energetycznego w danym regionie [4, 6, 7].

Przeprowadzone w ostatnich latach w Polsce zmiany strukturalne w przedsiębiorstwach energetycznych, a także wprowadzenie wolnego rynku energii elektrycznej, spowodowały zmianę sposobu zarządzania majątkiem sieciowym. Dodatkowo, znaczące zmniejszenie nakładów inwestycyjnych na odtworzenie majątku sieciowego przyczyniło się do wprowadzenia zasad eksploatacji urządzeń opartych na znajomości aktualnego stanu technicznego tych obiektów. Problem ten w głównej mierze dotyczy transformatorów przesyłowych dużej mocy, wyposażonych w izolatory przepustowe na napięcia: 110, 220 i 400 kV, dla których czas eksploatacji przekroczył już okres projektowanego życia, tj. 30-tu lat (około 45 % całej populacji). Koniecznym jest zatem poszukiwanie nowych metod diagnostycznych, które umożliwiają kom-

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac naukowo – badawczych związanych z detekcją wyładowań niezupełnych (WZN) w izolatorach przepustowych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej (EA). Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych wykorzystując model izolatora typu GSKTFK, w którym osłonę porcelanową zastąpiono obudową wykonaną z tworzywa sztucznego. Pomiaru wykonywano w układach modelujących różne rodzaje uszkodzeń. Sygnały EA rejestrowano za pomocą piezoelektrycznego przetwornika stykowego przymocowanego do zewnętrznej części osłony izolatora. Analizę zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono w dziedzinie czasowo – częstotliwościowej z wykorzystaniem krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT). Efektem przeprowadzonych prac było określenie możliwości wykorzystania metody EA do detekcji WZN powstających na skutek różnych rodzajów defektów w izolacji papierowo – olejowej.

Słowa kluczowe: izolatory przepustowe, wyładowania niezupełne, metoda emisji akustycznej, diagnostyka elektroenergetyczna.

Application possibility estimation of acoustic emission signals for detection of partial discharges in bushing isolators

Abstract

Reliable operation of an electric power system is connected with the necessity of maintenance of its particular elements for their good technical state. Important part of the electric power network is the high power transformer, which inherent elements are bushing isolators. Effective detection of PDs in inner part of the paper-oil isolation is one of the main conditions which assure safety operation of bushing isolators. Limited possibility for switching off the electric power devices is a reason for looking for new diagnostic methods enabling on-line measurements execution. Measurements results of AE signals generated in a bushing isolator: with defective inner paper-oil isolation, with presence of air blebs freely moving inside the isolation system, with forced motion of air blebs and with entered natural aging products of cellulose between the particular layers of the insulating system are presented in the paper. Results achieved in the scope of works performed confirmed the application possibility of AE method for technical state diagnosis of paper-oil insulation of bushing

pleksową i wieloparametryczną ocenę stanu technicznego tych jednostek, w szczególności w sposób on-line [1, 5, 8, 9].

Głównym celem przeprowadzonych prac badawczych jest ocena możliwości wykorzystania metody EA w diagnostyce przepustów izolatorowych wysokiego napięcia. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i detekcji WNZ w układzie modelowym izolatora przepustowego typu GSKTFK. Analizę czasowo – częstotliwościową zarejestrowanych sygnałów EA generowanych przez WNZ w układzie z zamodelowanymi uszkodzeniami izolatora wykonano z zastosowaniem krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT).

2. Charakterystyka układu pomiarowego

Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu układu modelowego izolatora przepustowego, w którym zdemonstrowano osłonę porcelanową zastępując ją prostopadłościenną obudową wykonaną z przezroczystego tworzywa sztucznego. W celu odgazowania izolacji papierowo-olejowej izolatora zastosowano pompę próżniową, za pomocą której usuwano zgromadzone w wielowarstwowym układzie izolacyjnym pęcherzyki powietrza. Model zastosowanego podczas badań izolatora przepustowego, wypełnionego olejem izolacyjnym, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model izolatora przepustowego typu GSKTFK z izolacją papierowo – olejową

Fig. 1. Model of bushing isolator type GSKTFK with paper-oil isolation

Sygnały EA generowane przez występujące w układzie izolacyjnym wyładowania elektryczne rejestrowano układem pomiarowym wyposażonym w szerokopasmowy przetwornik typu WD AH 17. Przetwornik przymocowywano do zewnętrznej ścianki modelu izolatora za pomocą opaski zapewniającej stały docisk przetwornika. Zastosowany przetwornik charakteryzował się wysoką czułością ($55 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$) i szerokim pasmem przeniesienia: od 100 kHz do 1 MHz w zakresie $\pm 10 \text{ dB}$. Przetwornik ten wyposażony był także w układ różnicowy, co umożliwiło dodatkową eliminację zewnętrznych sygnałów zakłócających, które towarzyszyły pomiarom [2]. Przetwornik pomiarowy poprzez przedwzmacniacz (2/4/6 preamplifier, firmy PAC) podłączono do układu wzmacniającego (AE2A, firmy PAC), który posiadał możliwość skokowej zmiany wzmocnienia w zakresie $0 \div 61 \text{ dB}$, z krokiem 3 dB [3]. Podczas wykonywania badań całkowite wzmocnienie układu pomiarowego wynosiło 80 dB. Rejestrację mierzonych sygnałów EA wykonano kartą pomiarową typu CH-3160 firmy Acquittek. Ogólny widok przetwornika pomiarowego wraz z układem wzmacniającym przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok przetwornika pomiarowego wraz z układem wzmacniaczy
Fig. 2. General view of measuring transducer with the amplifier system

3. Metodyka wykonywania pomiarów

Badania przeprowadzono przy napięciu roboczym 100 kV. Wykonanie prac badawczych wymagało zasymulowania poszczególnych rodzajów defektów, co związane było z procesem niszczenia wewnętrznej izolacji papierowo – olejowej badanego obiektu. W pierwszym etapie prac zasymulowano częściowe uszkodzenie izolacji w pobliżu rdzenia przepustu. Następnie do wnętrza izolacji, między ekrany sterujące wprowadzono pęcherze powietrza. W ten sposób odwzorowano pewien stan rozwoju wyładowań niezupełnych, który nie powodował zasadniczego obniżenia wytrzymałości elektrycznej całej izolacji przepustu. W końcowej części eksperymentu między poszczególne warstwy izolacyjne punktowo wprowadzano produkty rozkładu oleju i celulozy w postaci rozpuszczonych w oleju izolacyjnym szlamów pochodzących z kadzi transformatora. Składały się one głównie z sadzy, włókien celulozy oraz kwaśnych produktów rozkładu oleju. Substancje te wstrzyknięto w kilka warstw pomiędzy ekranami w pobliżu rdzenia w taki sposób, że nie naruszono pozostałych warstw izolacji.

W celu porównania wpływu poszczególnych rodzajów defektów będących źródłem WNZ na rejestrowane sygnały EA wszystkie uszkodzenia były wykonywane na tym samym modelu izolatora, a rejestracja sygnałów emisji akustycznej (EA) wykonywana w tych samych warunkach pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem poziomu napięcia probierczego.

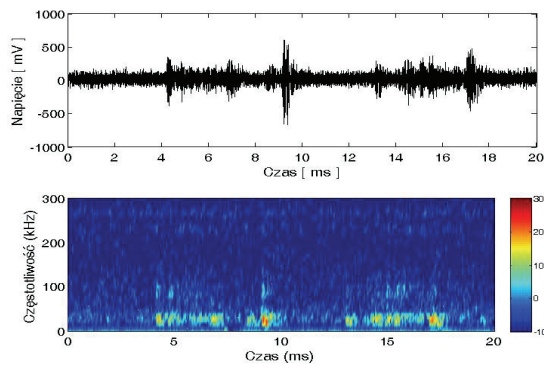
Przeprowadzono cztery serie pomiarowe obejmujące rejestrację sygnałów EA generowanych przez WNZ występujące w izolatorze przepustowym dla następujących przypadków:

- 1) przepustu z zamodelowanymi uszkodzeniami wewnętrznej izolacji papierowo – olejowej,
- 2) przepustu z pęcherzykami powietrza, które swobodnie przemieszczają się w papierowo-olejowym układzie izolacyjnym,
- 3) przepustu z wymuszonym ruchem pęcherzyków powietrza w wewnętrznym układzie izolacyjnym,
- 4) przepustu z wprowadzonymi produktami naturalnego starzenia celulozy między poszczególne warstwy papierowo-olejowego układu izolacyjnego.

Każda seria pomiarowa składała się z 50 pomiarów. Zarejestrowane sygnały EA poddano analizie w dziedzinie czasowo – częstotliwościowej. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wyznaczono pasma dominujących częstotliwości charakterystycznych dla poszczególnych rodzajów uszkodzeń.

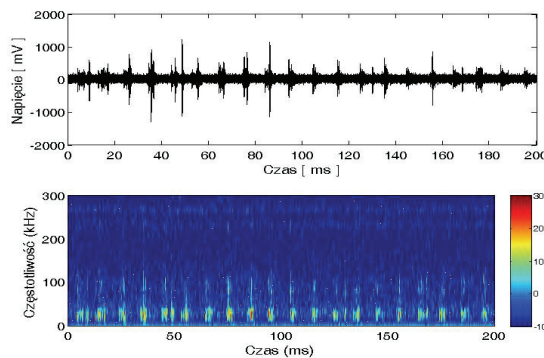
4. Analiza uzyskanych wyników

Na rys. 3 i 4 przedstawiono przebiegi czasowe i wyniki analizy czasowo – częstotliwościowej sygnałów EA generowanych przez WNZ, które występowały w układzie izolacyjnym przepustu transformatorowego z zamodelowanym uszkodzeniem wewnętrznej izolacji papierowo – olejowej.



Rys. 3. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznym układzie izolatora przepustowego, zarejestrowany w czasie 20 ms

Fig. 3. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator, registered within 20 ms



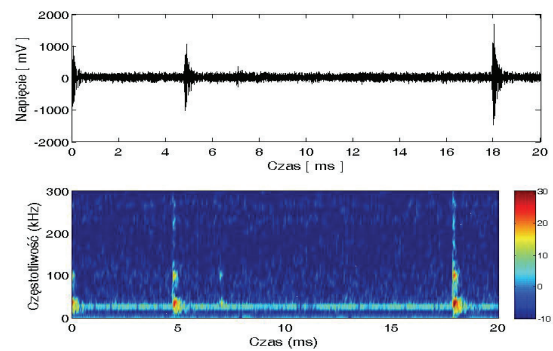
Rys. 4. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznym układzie izolatora przepustowego, zarejestrowany w czasie 200 ms

Fig. 4. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator, registered within 200 ms

Rejestrowane sygnały EA generowane przez WNZ, występujące na skutek zamodelowanego uszkodzenia papierowo – olejowego układu izolacyjnego przepustu, charakteryzują się równomierną intensywnością występowania w czasie oraz wartością nie przekraczającą 1000 mV. Zdarzenia akustyczne występują symetrycznie zarówno w dodatniej jak i ujemnej połowie okresu napięcia zasilania. Analizując przedstawione na rys. 3 i 4 obrazy czasowo – częstotliwościowe można zaobserwować również, że charakteryzują się one zawartością składowych częstotliwościowych z zakresu od 20 do 120 kHz.

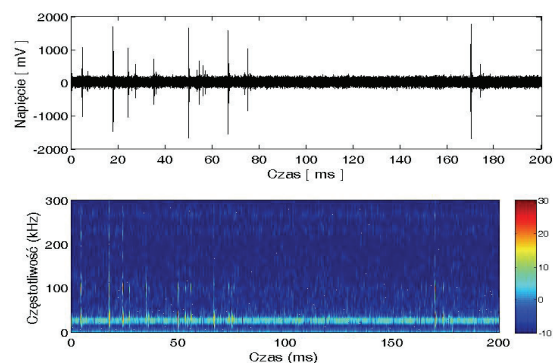
Na rys. 5 i 6 przedstawiono natomiast wyniki pomiarów sygnałów EA generowanych w przepuście z pęcherzykami powietrza, które swobodnie przemieszczają się w papierowo-olejowym układzie izolacyjnym badanego urządzenia.

Sygnały EA generowane przez WNZ w układzie izolacyjnym ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami powietrza charakteryzują się większą, aniżeli poprzednio, wartością amplitudy i zmienną w czasie intensywnością ich występowania. Na spektrogramach widmowej gęstości mocy widoczny jest zakres dominujących częstotliwości w paśmie od 20 do 300 kHz. Ze względu na wielkość maksymalną struktur częstotliwościowych i czas ich trwania za szczególnie istotne można uznać pasmo (20 – 150) kHz. Składowe o podwyższonej wartości gęstości mocy widoczne są również w przedziale (150 – 300) kHz. Struktury w tym paśmie charakteryzują się krótkim czasem, jak również niższą wartością maksymalną.



Rys. 5. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznym układzie izolatora przepustowego ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami powietrza, zarejestrowany w czasie 20 ms

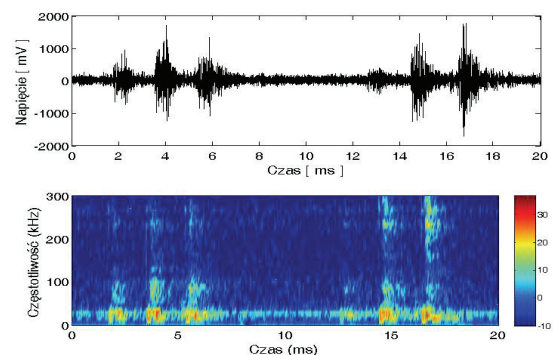
Fig. 5. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator with freely moving air blebs, registered within 20 ms



Rys. 6. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznym układzie izolatora przepustowego ze swobodnie przemieszczającymi się pęcherzykami powietrza, zarejestrowany w czasie 200 ms

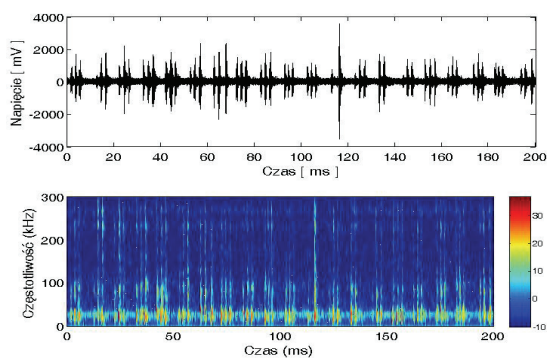
Fig. 6. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator with freely moving air blebs, registered within 200 ms

Wzmocnienie zjawiska generacji WNZ w izolatorze przepustowym następuje na skutek zewnętrznego wymuszenia ruchu pęcherzyków powietrza. Na rys. 7 i 8 przedstawiono wyniki pomiarów sygnałów EA generowanych w izolatorze przepustowym, w którym wymuszono ruch pęcherzyków powietrza za pomocą pompy próżniowej.



Rys. 7. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznym układzie izolatora przepustowego z wymuszonym ruchem pęcherzyków powietrza, zarejestrowany w czasie 20 ms

Fig. 7. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator with forced motion of air blebs, registered within 20 ms

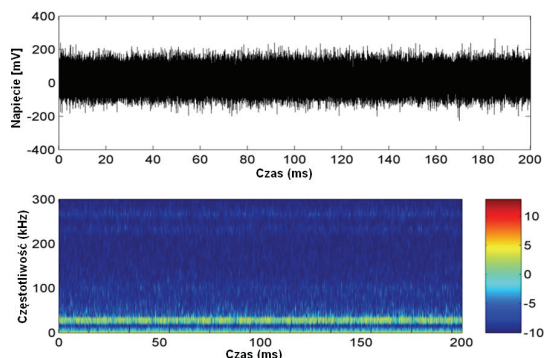


Rys. 8. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznej układzie izolatora przepustowego z wymuszonym ruchem pęcherzyków powietrza, zarejestrowany w czasie 200 ms

Fig. 8. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in the inner system of bushing isolator with forced motion of air blebs, registered within 200 ms

Struktury czasowo – częstotliwościowe przedstawione na rys. 7 i 8 zawierają składowe odpowiadające zarówno generacji WNZ w wewnętrznej części układu papierowo – olejowego izolatora, jak również w pęcherzykach powietrza. Charakterystyczna dla tego typu układu jest obecność trzech struktur akustycznych w jednym półokresie napięcia zasilania.

W ramach prowadzonych badań wykonano także pomiary sygnałów EA generowanych w wewnętrznej układzie izolacyjnym izolatora przepustowego z wprowadzonymi między poszczególne warstwy izolacji produktami naturalnego starzenia celulozy. Wyniki badań w tym układzie przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Przebieg czasowy i dwuwymiarowy spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych w izolacji papierowo – olejowej izolatora przepustowego z wprowadzonymi między warstwy izolacji produktami naturalnego starzenia celulozy

Rys. 9. Time run and two-dimensional power density spectrogram of AE signals generated by PD in paper-oil isolation of bushing isolator with entered natural aging products of cellulose between the insulation layers

Na spektrogramie widmowej gęstości mocy przedstawionym na rys. 9 występują jedynie struktury pochodzące od zakłóceń występujących w układzie pomiarowym. Przeprowadzone pomiary wykazały, że wprowadzenie między poszczególne warstwy izolacji produktów naturalnego starzenia celulozy nie powoduje powstawania dodatkowych źródeł WNZ.

5. Wnioski

Skuteczna detekcja WNZ w wewnętrznej izolacji papierowo – olejowej jest jednym z podstawowych warunków zapewniających bezpieczną eksploatację izolatorów przepustowych. Ograniczone możliwości wyłączeń urządzeń elektroenergetycznych są przyczyną poszukiwania nowych metod diagnostycznych pozwalających na wykonanie pomiarów w sposób on-line.

Celem przeprowadzonych badań było określenie możliwości zastosowania metody EA do detekcji WNZ generowanych przez różne rodzaje uszkodzeń izolacji wewnętrznej wykorzystanego modelu. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość detekcji WNZ generowanych na skutek uszkodzenia poszczególnych warstw izolacyjnych lub powstających w pęcherzykach powietrza. Analiza czasowo – częstotliwościowa pozwoliła na przypisanie poszczególnym typom WNZ charakterystycznych pasm częstotliwości. Dla sygnałów EA generowanych przez WNZ w wewnętrznej części izolacji papierowo – olejowej pasmo dominujących częstotliwości zawiera się w przedziale (20- 120) kHz. W przypadku rejestracji sygnałów EA od WNZ generowanych w pęcherzykach powietrza pojawiają się częstotliwości z przedziału (20 - 300) kHz. Wyniki uzyskane w ramach prowadzonych prac potwierdzają więc możliwość zastosowania metody EA do diagnostyki stanu izolacji papierowo – olejowej pod kątem występowania WNZ.

Należy podkreślić, że prowadzone badania mają charakter pilotażowy. Wykonywane były w laboratorium z zachowaniem ściśle określonych warunków metrologicznych. Stanowią one jednak podstawę do dalszych badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych, zmierzających do opracowania metodyki badawczej pozwalającej na wykonywanie pomiarów sygnałów EA w izolatorach przepustowych w warunkach normalnej eksploatacji.

Pracę zrealizowano w ramach projektu rozwojowego NCBiR R01004406/2009.

6. Literatura

- [1] Abu-Elanien, Ahmed E.B., Salama M.M.A.: Asset Management Techniques for Transformers, Electric Power Systems Research Vol. 80, Issue: 4, April 2010, pp. 456-464. Praca zbiorowa pod red. J. Subocza: „Transformatory w eksploatacji” wyd. 2, Energo-Complex, Piękary Śląskie, 2007.
- [2] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Lorenc M.: Time-Frequency Analysis of the AE Signals Generated by PDs on Bushing and Stand-off Insulators, Archives of Acoustics, Quarterly Vol. 31, No 4, Warszawa 2006, pp. 325-333.
- [3] Borucki S., Cichoń A.: The Influence of Propagation Layers on the Measurement Results of Electrical Discharges Measured by the Acoustic Emission Method – IV Int. Conf. NEET'2005, Zakopane 21-24. 06. 2005 r. str. 23 – 26.
- [4] Boss P. et al.: Economical Aspects and Practical Experiences of Power Transformers On-line Monitoring. Int. Council on Large Electric Systems (CIGRÉ), Paris, France, 2000.
- [5] Sokolov V.V.: Considerations on Power Transformer Condition - Based Maintenance. EPRI Substation Equipment Diagnostic Conference VIII, 20-23 February 2000, New Orleans, LA.
- [6] Sumereder, C.; Muhr, M.; Körbler B.: Lifetime Management of Power Transformers" e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 120, December 2003, pp. 420 – 423.
- [7] Szrot M., Płowucha J., Subocz J., Borucki S., Cichoń A., Rzczkowski A.: System zarządzania majątkiem transformatorowym - TrafoGrade", Energetyka nr 6 (660), czerwiec 2009, ISSN 0013-7294, str. 358 - 362.
- [8] Szrot M., Płowucha J., Subocz J., Borucki S., Cichoń A., Rzczkowski A.: Eksploatacja transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem systemu TrafoGrade, Rynek Energii, ISSN 1425-5960, 2009, str. 245 - 251.
- [9] Szrot M., Płowucha J., Subocz J., Borucki S., Cichoń A.: Ekonomiczne aspekty eksploatacji transformatorów z wykorzystaniem systemu TrafoGrade. PAK vol. 55, nr 1/2009, str. 65 - 68.

otrzymano / received: 18.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany