

Praktyczny przykład wykorzystania metody emisji akustycznej w badaniach przesiewowych oceny stanu technicznego olejowych przekładników prądowych o napięciu 110 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono praktyczny przykład zastosowania metody emisji akustycznej (EA) do diagnostyki on-line przekładników prądowych o napięciu 110 kV. Pomiary sygnałów EA wykonano podczas normalnej eksploatacji badanych urządzeń, bez konieczności uwalniania ich spod napięcia i rekonfiguracji układu stacyjnego. Na podstawie przeprowadzonych badań i porównania wyników uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi (on-line/off-line) wykazano skuteczność metody EA w diagnostyce przesiewowej przekładników prądowych typu J110-4a.

Abstract. The article presents a practical example of the method of acoustic emission (AE) for on-line diagnostics of current transformers with a voltage of 110 kV. Measurement of AE signals were taken during normal operation of the appliances without having to release them from the voltage and the reconfiguration of the power station. Based on the survey and comparing the results obtained by different methods measuring (on-line/off-line) demonstrated the efficacy of EA methods in the screening diagnosis of the current transformer, type J110-4a. (A practical example of using acoustic emission method in the screening technical condition assessment of the oil current transformers with a voltage of 110 kV).

Słowa kluczowe: przekładnik prądowy, diagnostyka, układ izolacyjny, metoda emisji akustycznej.

Keywords: current transformer, diagnostics, insulation system, acoustic emission method.

Wstęp

Jedną z podstawowych przyczyn przyspieszonej degradacji papierowo-olejowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia są wyładowania niezupełne (WZN), a jednym ze wskaźników pozwalającym na określenie „czasu życia” tych obiektów jest detekcja i ocena intensywności ich występowania. Aktualnie ocenę stopnia narażenia izolacji pod względem występowania WZN umożliwiają głównie trzy metody diagnostyczne: elektryczna, chromatografii gazowej (DGA) i emisji akustycznej (EA) [1-4].

Nowoczesne techniki monitoringu w coraz szerszym zakresie wykorzystują do oceny WZN metodę EA, która w znacznym stopniu łączy w sobie cechy metody DGA oraz metody elektrycznej. W warunkach normalnej pracy urządzeń elektroenergetycznych pomiar WZN metodami elektrycznymi, ze względu na wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych, jest znacznie utrudniony, a w wielu przypadkach nie jest w ogóle możliwy. Natomiast istotnym problemem w metodzie chromatografii gazowej jest możliwość zafalszowania wyników pomiarowych wynikająca z niewłaściwego sposobu pobierania, a także transportu próbek oleju izolacyjnego. Z kolei rzetelne informacje o występowaniu, intensywności i lokalizacji WZN w układach izolacyjnych mają podstawowe znaczenie dla oceny stanu izolacji urządzenia, a w konsekwencji do właściwego prognozowania jego dalszej bezawaryjnej pracy. Określenie przewidywanego czasu możliwej eksploatacji badanych urządzeń związane jest ściśle z aspektem nie tylko naukowym i poznawczym, ale przede wszystkim, w warunkach konkurencyjnego rynku energii elektrycznej, ma dla przedsiębiorstw energetycznych znaczący wymiar finansowy [5-8].

W niniejszym artykule przedstawiono praktyczny przykład zastosowania metody emisji akustycznej (EA) do przesiewowej diagnostyki on-line przekładników prądowych o napięciu 110 kV. Na podstawie przeprowadzonej analizy zarejestrowanych sygnałów EA na przebadanej populacji wytypowano przekładniki, dla których stwierdzono podejrzenie istnienia defektu w ich układzie izolacyjnym. Dla wskazanych urządzeń przeprowadzono także dodatkowe pomiary diagnostyczne, tj. badania DGA i fizykochemiczne oleju oraz ocenę zawilgocenia ich izolacji stałej metodami polaryzacyjnymi (FDS, PDC, RVM), które następnie skorelowano z wynikami uzyskanymi metodą EA.

Charakterystyka badanych urządzeń i zastosowanej aparatury pomiarowej

Badaniami przesiewowymi objęto populację 33-ch sztuk przekładników prądowych typu J110-4a, które były zainstalowane na jednej ze stacji krajowego systemu przesyłowo-dystrybucyjnego. Pomiary sygnałów EA wykonano podczas normalnej eksploatacji urządzeń, bez konieczności uwalniania ich spod napięcia i ewentualnej rekonfiguracji układu stacyjnego. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry techniczne badanych urządzeń, natomiast na rysunku 1 widok ogólny diagnozowanych obiektów zainstalowanych na stacji elektroenergetycznej.

Tabela 1. Parametry techniczne badanych przekładników

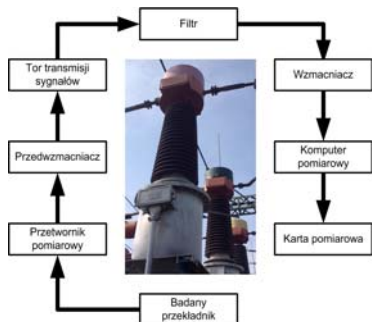
Parametr	Dane przekładnika
Producent	ZWAR Warszawa
Typ	J110-4a
Napięcie znamionowe	110 kV
Prąd znamionowy pierwotny	150A - 300A - 600A
Prąd znamionowy wtórny	5A / 1A / 1A / 1A
Moc znamionowa uzwojeń	60VA / 60VA / 90VA / 90VA
Klasa dokładności	0,5<10 / 10P15 / 10P15 / 10P20
Rok produkcji	1983



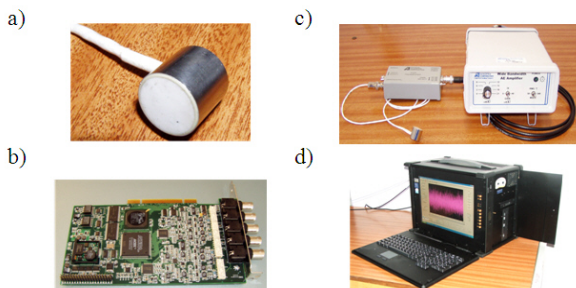
Rys.1. Widok ogólny badanych przekładników typu J110-4a

Schemat blokowy układu do rejestracji sygnałów EA na badanych przekładnikach prądowych zilustrowano na rysunku 2. Zastosowany tor pomiarowy składał się z następujących elementów: przetwornika pomiarowego typu WD AH 17, firmy Physical Acoustics Corporation

(PAC); przedwzmacniacza PAC typu 2 / 4 / 6 Preamplifiers; filtra pasmowo-przepustowego; układu kondycjonującego PAC typu AE2A; karty pomiarowej CH 3160 firmy Acquiretek; komputera pomiarowego Atlas ATXB-150. Widok aparatury pomiarowej wykorzystanej przez pracowników Politechniki Opolskiej podczas wykonanych pomiarów diagnostycznych przedstawiono na rysunku 3.



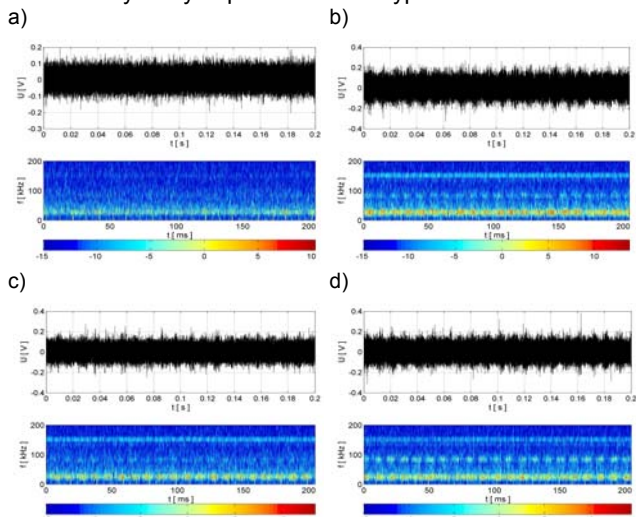
Rys.2. Schemat blokowy układu do rejestracji sygnałów EA



Rys.3. Elementy toru pomiarowego: a) przetwornik WD AH 17, b) przedwzmacniacz PAC 2 / 4 / 6 i wzmacniacz AE2A, c) karta pomiarowa CH 3160, d) komputer Atlas ATXB-150

Wyniki pomiarów diagnostycznych on-line metodą EA

Ze względu na znaczną powtarzalność uzyskiwanych danych pomiarowych, w niniejszym artykule przedstawiono jedynie przykładowe charakterystyki i obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów EA. Na rysunku 4 zilustrowano wyniki analizy czasowej i czasowo-częstotliwościowej sygnałów, które zmierzono na kadziach czterech wybranych przekładników typu J110-4a.



Rys.4. Przykładowe przebiegi czasowe i spektrogramy STFT sygnałów EA zarejestrowanych na wybranych przekładnikach: a) urządzenie z brakiem defektu układu izolacyjnego, b), c), d) przekładniki (nr 1, nr 2, nr 3) z widocznym wzrostem aktywności sygnałów EA – podejrzenie defektu izolacji.

Na podstawie wykonanych pomiarów i przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w 30-stu badanych przekładnikach poziom sygnałów emisji akustycznej ma zbliżoną wartość, a wyznaczone obrazy czasowo-częstotliwościowe są typowe dla szerokopasmowego szumu akustycznego (rys. 4a). W związku z powyższym w urządzeniach tych nie należy spodziewać się znaczącej degradacji papierowo-olejowego układu izolacyjnego. Cyfrowa obróbka sygnałów EA zmierzonych na pozostałych 3-ch przekładnikach wykazała wzrost aktywności akustycznej tych urządzeń (rys. 4b-4d). Zaobserwowane różnice dotyczą zarówno przebiegów czasowych, jak również wyznaczonych dwuwymiarowych obrazów czasowo-częstotliwościowych. W stosunku do badań wykonanych na pozostałej populacji przekładników, w przypadku tych urządzeń, widoczna jest okresowość zmian wartości przebiegu czasowego sygnału EA, wyraźny wzrost udziałów częstotliwościowych w paśmie ok. 20 kHz oraz składowych w paśmie 20 – 100 kHz.

Ze względu na występowanie zauważalnych różnic w sygnałach EA, zarejestrowanych dla trzech przekładników, zalecono wykonanie dodatkowych badań diagnostycznych. W pierwszej kolejności zalecono pobranie próbek oleju izolacyjnego z tych urządzeń i poddanie ich analizie fizykochemicznej i DGA. W przypadku dalszych wątpliwości co do stanu technicznego wytypowanych przekładników, wskazano na wykonanie pomiarów stratności dielektrycznej w szerokim zakresie częstotliwości (FDS) oraz ocenę stopnia zawilgocenia izolacji stałej tych obiektów z użyciem metod polaryzacyjnych.

Wyniki pomiarów diagnostycznych metodami off-line

W celu weryfikacji wyników pomiarowych uzyskanych podczas badań metodą EA (on-line), dla „podejrzanej” grupy trzech przekładników wykonano rozszerzony zakres badań diagnostycznych (off-line). W tabeli 2 przedstawiono wartości wybranych wskaźników fizykochemicznych oleju izolacyjnego pobranego z kadzi tych urządzeń.

Tabela 2. Wyniki badań fizykochemicznych oleju izolacyjnego pobranego z wytypowanych trzech przekładników typu J110-4a

Badanie	Przekładnik Nr 1	Przekładnik Nr 2	Przekładnik Nr 3	Wymag.
Temperatura zapłonu [°C]	138,1	141,1	142,1	> 130
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,425	0,295	0,215	> 0,3
Zawartość wody [ppm]	40,3	12,8	14,1	< 40
Współczynnik tgδ 50°C [%]	0,61	0,23	0,33	< 10
Rezystywność 50°C [Ωm]	117 x 10 ⁹	136 x 10 ⁹	73 x 10 ⁹	5 x 10 ⁹
Napięcie przebicia 20°C [kV]	29,4	73,6	71	> 40

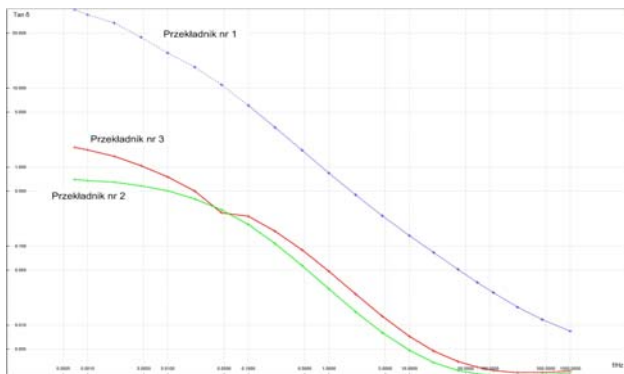
Tabela 3. Wyniki badań DGA oleju izolacyjnego pobranego z trzech wytypowanych przekładników J110-4a

Badanie	Przekładnik Nr 1	Przekładnik Nr 2	Przekładnik Nr 3	Kryterium dla J220
Wodór – H ₂	73,37	3,48	20,25	< 100
Metan – CH ₄	4,43	1,72	15,27	< 60
Etan – C ₂ H ₆	6,99	10,99	233,22	< 150
Etylen – C ₂ H ₄	7,81	2,85	17,88	< 40
Acetylen – C ₂ H ₂	0,0	0,66	0,0	< 10
Propan – C ₃ H ₈	28,79	29,60	204,45	---
Propylen – C ₃ H ₆	25,21	21,60	65,37	---
Tlenek węgla – CO	21,72	33,96	34,30	< 150
Dwutlenek węgla – CO ₂	4165,71	1749,57	1707,93	< 2500
Suma gazów palnych	217,60	140,93	625,26	< 510

Próbę kreślenia aktualnego stanu technicznego wytypowanych urządzeń przeprowadzono także w oparciu o analizę DGA oleju. Za wartości graniczne stężenia poszczególnych gazów przyjęto wartości wyznaczone dla przekładników typu J220, produkowanych w latach 1973 – 1993 [9].

Ocena jakościowa parametrów fizykochemicznych oleju pobranego z kadzi wybranych przekładników wskazuje na zużycie ich układu izolacyjnego (tabela 2). W przypadku urządzenia nr 1 wskaźniki te przekraczają nawet poziom przyjęty za dopuszczalny, a dalsza eksploatacja tego obiektu może doprowadzić do awarii katastrofalnej i pożaru. Natomiast w pozostałych dwóch przekładnikach (nr 2 i 3) stwierdzono przejawy rozwoju zaawansowanych procesów degradacji ich izolacji papierowo-olejowej. Przedstawione w tabeli 3 wyniki analizy DGA jednoznacznie potwierdziły zapoczątkowanie degradacji izolacji urządzenia nr 2 i wyraźne zużycie układu izolacyjnego obiektów nr 1 i 3.

Kolejnym z wykonanych w sposób off-line badań były pomiary spektroskopii dielektrycznej FDS. Na rysunku 5 zilustrowano przebiegi zmian współczynnika stratności dielektrycznej $\tan\delta$ w funkcji częstotliwości wyznaczone dla trzech wytypowanych przekładników typu J110-4a



Rys.5. Przebiegi zmian wartości współczynnika stratności dielektrycznej $\tan\delta$ w funkcji częstotliwości wyznaczone dla trzech wytypowanych przekładników typu J110-4a

Przedstawione na powyższym rysunku krzywe potwierdziły krytyczny stan techniczny układu izolacyjnego przekładnika nr 1, i wskazały na rozwój procesów starzenia izolacji papierowo-olejowej dwóch pozostałych obiektów.

Ostatnimi z przeprowadzonych badań porównawczych były pomiary mające na celu oszacowanie stopnia zawilgocenia izolacji stałej. Pomiary te wykonano trzema metodami polaryzacyjnymi: spektroskopii dielektrycznej (FDS), pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji (PDC) oraz pomiarów napięcia powrotnego (RVM). W tabeli 4 zestawiono wartości procentowego stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej poszczególnych przekładników.

Tabela 4. Zestawienie wartości zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej wybranych przekładników wyznaczone na podstawie badań polaryzacyjnych

Rodzaj pomiarów	Szacowany stopień zawilgocenia [%]		
	Przekładnik Nr 1	Przekładnik Nr 2	Przekładnik Nr 3
FDS	5,2	1,6	2,1
PDC	4,8	1,7	1,9
RVM	---	1,8	2,3

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów FDS, PDC, RVM wykazano krytyczne zawilgocenie izolacji wewnętrznej przekładnika nr 1 i relatywnie, adekwatne do czasu pracy, urządzeń nr 2 i 3. Na uwagę zasługuje także fakt, iż ze względu na bardzo wysokie zawilgocenie obiektu nr 1, nie było możliwości wykonania pomiarów metodą RVM na tym przekładniku (zwarcie układu po podaniu napięcia).

Podsumowanie i wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono praktyczny przykład wykorzystania metody EA do przesiewowej

diagnostyki, realizowanej w sposób on-line, przekładników prądowych wysokiego napięcia. Na podstawie pomiarów i przeprowadzonej analizy zarejestrowanych sygnałów EA przebadanej populacji przekładników, wytypowano trzy urządzenia z podejrzeniem istnienia defektu w ich układzie izolacyjnym. Dla wskazanych obiektów przeprowadzono także dodatkowe pomiary diagnostyczne, tj. badania DGA i fizykochemiczne oleju oraz ocenę zawilgocenia ich izolacji stałej metodami polaryzacyjnymi (FDS, PDC, RVM). Wyniki badań wykonanych w sposób off-line potwierdziły rezultaty uzyskane z użyciem metody EA i wskazały na krytyczny stan układu izolacyjnego jednego z wytypowanych przekładników oraz rozpoczęty proces starzenia izolacji pozostałych dwóch jednostek.

Na podstawie przeprowadzonych badań i porównania wyników uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi (on-line/off-line) wykazano skuteczność metody EA w diagnostyce przesiewowej przekładników prądowych o napięciu 110kV. Główną zaletą wykorzystania metody EA do oceny stanu technicznego przekładników prądowych wysokiego napięcia jest możliwość wykonania pomiarów podczas normalnego ruchu stacji elektroenergetycznej, a w przypadku stwierdzenia defektów, zlecenie wykonania bardziej zaawansowanych badań metodami off-line.

LITERATURA

- [1] Rubio-Serrano J., Rojas-Moreno M.V., Posada J., Martínez-Tarifa J.M., Robles G., Garcia-Souto J.A., Electro-acoustic detection, identification and location of PD sources in oil-paper insulation systems, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19, (2012) No.5, 1569–1578
- [2] Boczar T., Zmarzły D., Application of wavelet analysis to AE pulses generated by PD, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 11 (2004), No. 3, 433–449
- [3] Lin D., Jiang L., Li F., Zhu D., Tan K., Wu C., Jin X., Wang C., Cheng T.C., On-line PD monitoring and diagnostic system for power transformer, *Tsinghua Science and Technology*, 10 (2005), No. 5, 598–604
- [4] Okabe S., Ueta G., Wada H., PD signal propagation characteristics inside the winding of oil-immersed power transformer using the equivalent circuit of winding model in the oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19 (2012), No. 2, 472 – 480
- [5] Skubis J., Boczar T.: Aktualne możliwości i perspektywy zastosowania metody emisji akustycznej w diagnostyce układów izolacyjnych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 10 (2006), 44–45
- [6] Borucki S., Boczar T., Cichoń A., Lorenc M., Zmarzły D., The possibilities of using the AE method in expert systems for the evaluation of insulation systems of power transformers, *Journal de Physique IV*, 137 (2006), 51–56
- [7] Borucki S., Boczar T., The effectiveness of recognizing basic PD forms by artificial neuron networks using the results of the time-frequency analysis of the AE signals, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2006), 41–44
- [8] Fuhr J., Procedure for identification and localization of dangerous PD sources in power transformers, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 12 (2005), No. 1005–1014
- [9] Dybka G., Diagnostyka techniczna przekładników prądowych J220 w oparciu o analizę gazów rozpuszczonych w oleju (DGA), *Materiały Konferencji Zarządzanie eksploatacją transformatorów*, Energopomiar Elektryka, Wisła-Jawornik, 9-11 maj 2012r, 211-217

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: j.skubis@po.opole.pl;
dr hab. inż. Sebastian Borucki, prof. PO, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: s.borucki@po.opole.pl;
dr hab. inż. Andrzej Cichoń, prof. PO, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: a.cichon@po.opole.pl.