

Andrzej CICHON<sup>1</sup>, Paweł FRĄCZ<sup>1</sup>, Marcin LORENC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, ul. Prószkowska 76, Budynek 2, 45-578 Opole

<sup>2</sup>POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I LOGISTYKI, ul. Sosnowskiego 31, 45-272 Opole

## Analiza czasowo–częstotliwościowa sygnałów emisji akustycznej generowanych przez podobciążeniowy przełącznik zaczepów o konstrukcji z osobnym wybierakiem i przełącznikiem mocy

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. Paweł FRĄCZ

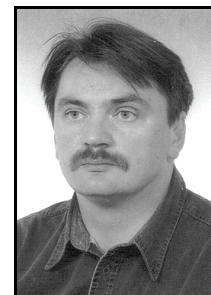
Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, pracownik Katedry Wysokich Napięć. Autor ponad 40 publikacji głównie z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych w szczególności metody emisji akustycznej i spektrofotometrii optycznej.



e-mail: p.fracz@gmail.com

Dr hab. inż. Marcin LORENC

Pracownik Instytutu Innowacyjności Procesów i Produktów, Wydziału Inżynierii Produkcji i Logistyki Politechniki Opolskiej. Autor ponad 50 publikacji z zakresu diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych.



e-mail: lem@op.home.pl

power switch were analyzed in detail. The analysis of time-frequency components of the signals generated by the OLTC was carried out with the short time Fourier transform (STFT) and continuous wavelet transform (CWT). Based on the comparison of the AE signals generated by the power changer and the selector, two measuring paths endowed with wide band contact transducers were proposed for practical application.

**Keywords:** on load tap changer (OLTC), electric power transformer diagnosis, acoustic emission method.

### 1. Wstęp

Średni czas pracy transformatorów znajdujących się w eksploatacji na terenie Polski wynosi ponad 20 lat. Przeprowadzenie zmian strukturalnych w przedsiębiorstwach energetycznych działających w Polsce, które miały miejsce w ostatnich latach oraz wprowadzenie wolnego rynku energii spowodowały zmianę sposobu zarządzania majątkiem sieciowym. Dodatkowo zmniejszenie nakładów inwestycyjnych przeznaczanych na odtworzenie majątku sieciowego przyczyniło się do wprowadzenia zasad eksploatacji opartych o znajomość aktualnego stanu technicznego urządzeń. Taki sposób podejścia do problemu eksploatacji wymaga zastosowania wieloparametrycznej oceny stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych wykonywanej przy wykorzystaniu wielu metod pomiarowych. Ciągłe wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną, prowadzone prace remontowe oraz ograniczone możliwości przełączeń wynikające ze struktury sieci powodują, że w praktyce eksploatacyjnej coraz częściej występują problemy związane z koniecznością wyłączeń transformatorów w celu przeprowadzenia okresowych badań diagnostycznych. Problem ten w głównej mierze dotyczy transformatorów przesyłowych dużej mocy oraz w mniejszym stopniu transformatorów rozdzielczych zasilających strategicznych odbiorców przemysłowych. Stąd koniecznym staje się poszukiwanie nowych metod diagnostycznych umożliwiających przeprowadzenie oceny stanu technicznego jednostek w sposób on-line [1, 7, 8, 9].

Ważną częścią transformatorów są podobciążeniowe przełączniki zaczepów (PPZ), które umożliwiają regulację napięcia w sieci. Niezawodna praca tych urządzeń jest szczególnie istotna dla transformatorów rozdzielczych będących własnością spółek dystrybucyjnych, ale również jednostek pracujących w hutach lub zakładach przemysłowych podatnych na występowanie zmian wartości napięcia w sieci. Diagnostyka tych urządzeń w polskich warunkach eksploatacyjnych w głównej mierze oparta jest obecnie na badaniach oscylograficznych, w stanie pracy off-line [6].

W niniejszym artykule scharakteryzowano sygnały EA generowane przez PPZ o konstrukcji z osobnym wybierakiem i przełącznikiem mocy.

### Streszczenie

Podobciążeniowe przełączniki zaczepów (PPZ) są jednym z głównych elementów transformatora, który zapewnia możliwość regulacji napięcia w sieci elektroenergetycznej. Ich awarie są częstą przyczyną wyłączeń transformatorów rozdzielczych. W artykule przedstawiono wyniki prac naukowo-badawczych mających na celu scharakteryzowanie sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanych przez PPZ o konstrukcji z osobnym wybierakiem i przełącznikiem mocy. Zaletą metody EA jest możliwość wykonywania pomiarów w warunkach normalnej pracy urządzenia. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Analizę sygnałów EA przeprowadzono w dziedzinie czasu i czasowo–częstotliwościowej. Ocenę składowych czasowo–częstotliwościowych przeprowadzono z wykorzystaniem krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT) i ciągłej (CWT) transformaty falkowej.

**Słowa kluczowe:** podobciążeniowe przełączniki zaczepów (PPZ), diagnostyka transformatorów elektroenergetycznych, metoda emisji akustycznej.

### Time-frequency analysis of acoustic emission signals generated by on load tap changer constructed from separated selector and power switch

#### Abstract

An important part of an electric power transformer is the on load tap changer (OLTC) which enables voltage regulation in the network. Due to high level of failure frequency of these devices, it is necessary to look for new diagnostic methods which enable their technical state estimation under transformer normal operating conditions. Presently at the Electric Power Institute of the Opole University of Technology there are works in progress aspiring to determine the application possibility of the AE method for OLTC diagnosis. Results of the research works aiming at characterizing the acoustic emission (AE) signals generated by the OLTC constructed from a separated selector and a power switch are presented in the paper. Measurements were taken in a setup with a model of the OLTC type VEL – 110 – 27 from ELIN as the main element. AE signals generated during the whole OLTC joining cycle are presented. Within the signal there were enhanced four characteristic acoustic structures which regard to succeeding stages of the joining process. The AE signals generated by the selector and

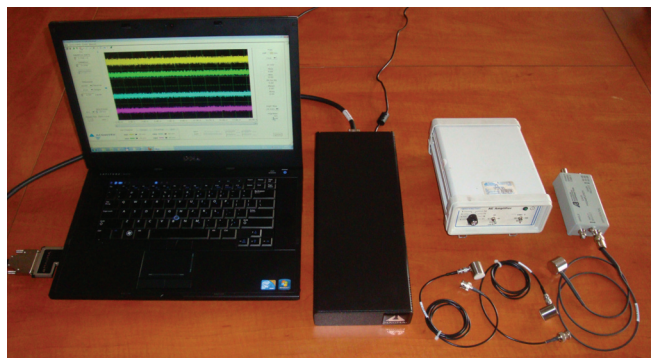
## 2. Charakterystyka układu pomiarowego

Rejestrację sygnałów akustycznych generowanych podczas pracy PPZ przeprowadzono przy zastosowaniu kompletnego modelu przełącznika typu VEL-110-27 firmy ELIN, który składał się z osobnego przełącznika mocy i wybieraka. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego, w skład którego poza modelem PPZ wchodzi m.in.: kadź we wnętrzu której znajduje się model PPZ, układ napędowy umożliwiający automatyczną zmianę zaczepek, zaciski pomiarowe służące do wymuszenia prądu na stykach PPZ. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1. W celu maksymalnego przybliżenia laboratoryjnych warunków pomiarowych do rzeczywistych warunków panujących podczas pracy przełącznika w transformatorze, kadź wypełniono olejem izolacyjnym.



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska pomiarowego  
Fig. 1. General view of the measuring setup

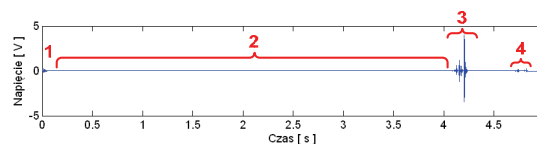
Pomiary sygnałów akustycznych wykonano za pomocą szerokopasmowego przetwornika pomiarowego typu WD AH 17 firmy PAC, który przymocowywano do zewnętrznej części kadzi za pomocą uchwytu magnetycznego. Rejestrowany za pomocą przetwornika sygnał akustyczny poddano wzmocnieniu w układzie przedwzmacniacza typu 2/4/6 preamplifier firmy PAC. Z przedwzmacniacza sygnał pomiarowy podłączono do układu wzmacniającego poddając sygnał akustyczny wzmocnieniu o wartości 20 dB. W układzie zastosowano filtr pasmowo – przepustowy o częstotliwościach odcięcia 10 i 500 kHz [2, 3, 4, 5]. W skład mobilnego zestawu pomiarowego wchodzi również: karta pomiarowa Acquiretek CH-3160, kasetka pomiarowa PCI Expansion System, oprogramowanie do karty pomiarowej AcquiFlex Software Toolbox i przenośny komputer pomiarowy Dell Latitude E6510. Ogólny widok wykorzystanej aparatury pomiarowej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widok ogólny mobilnego układu pomiarowego  
Fig. 2. General view of the mobile measuring setup

## 3. Charakterystyka sygnałów EA generowanych przez PPZ

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy przebieg sygnałów EA generowanych podczas pełnego cyklu łączeniowego PPZ.



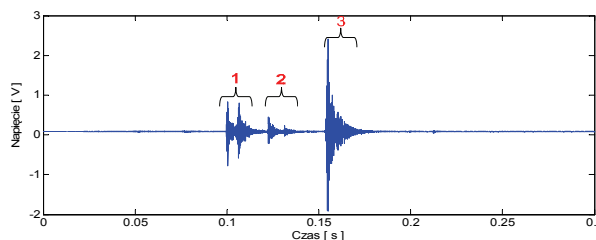
Rys. 3. Przebieg sygnałów EA generowanych podczas pełnego cyklu łączeniowego PPZ

Fig. 3. Time course of AE signals generated by the OLTC during the whole joining cycle

Na zaprezentowanym przebiegu czasowym można wyróżnić cztery obszary charakterystyczne. Zdarzenia akustyczne oznaczone nr 1 powstają podczas uruchomienia silnika napędu PPZ. Nie mają one istotnego znaczenia w dalszej analizie zarejestrowanego sygnału EA. Struktury te mogą być wykorzystane jedynie w celach pomiarowych, jako impuls wyzwalający początek rejestracji sygnału. Obszar oznaczony nr 2 charakteryzuje pracę wybieraka. Na podstawie występujących w nim zdarzeń akustycznych możliwe jest m. in. zdiagnozowanie defektów toru prądowego powstających na stykach wybieraka. Obszar ten odznacza się długim czasem, który wynosi ok. kilku sekund. Sygnały generowane w obszarze nr 2 charakteryzują się również bardzo małą wartością maksymalną w porównaniu ze strukturami występującymi w obszarze oznaczonym nr 3, który charakteryzuje pracę przełącznika mocy. Zmiana położenia styków w przełączniku mocy odbywa się w czasie nie przekraczającym kilkudziesięciu ms. Powstający na tym etapie pracy PPZ sygnał EA jest związany z mechaniczną pracą styków oraz ze zjawiskiem generacji łuku elektrycznego występującego podczas rozłączania obwodu prądowego. W tym obszarze pracy występują więc dwa źródła generacji sygnałów EA o zróżnicowanych wartościach maksymalnych. Na końcu sygnału EA charakteryzującego pracę PPZ występuje obszar nr 4, w którym znajdują się zdarzenia akustyczne powstające podczas zatrzymania pracy silnika w układzie napędu.

## 4. Analiza sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy

Na rysunku 4 zilustrowano przebieg czasowy sygnałów akustycznych generowanych podczas pracy przełącznika mocy.



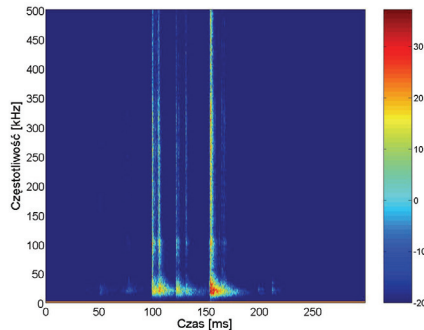
Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału akustycznego generowanego przez PPZ  
Fig. 4. Time course of acoustic signal generated by the OLTC

Przebieg akustyczny zarejestrowany podczas pracy przełącznika mocy zawiera struktury czasowe, które odznaczają się charakterystycznym kształtem i są specyficzne dla danego typu urządzenia. W przypadku przełącznika typu VEL-110 poddanego badaniom laboratoryjnym w rejestrowanych sygnałach akustycznych można wyróżnić trzy struktury, które na rysunku 4 oznaczono cyframi od 1 do 3. Przyjęty sposób oznaczenia kolejnych zdarzeń akustycznych w badanym sygnale zostanie wykorzystany podczas omawiania wyników pomiarowych przedstawianych w dalszej części artykułu. Struktura nr 3 charakteryzuje się wyraźnym poje-



dynczym maksimum, natomiast w strukturze nr 1, jak i 2 można wyróżnić dwie składowe odznaczające się różnymi wartościami amplitud.

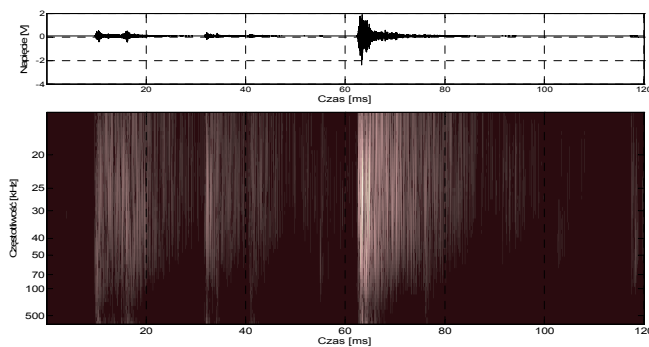
Analizę czasowo–częstotliwościową przeprowadzono wykorzystując przekształcenia: STFT i CWT. Wyniki przekształcenia STFT przedstawiono na rysunku 5 w postaci dwuwymiarowego spektrogramu widmowej gęstości mocy.



Rys. 5. Spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów akustycznych generowanych przez przełącznik mocy

Fig. 5. Power spectrum density graph (spectrogram) of acoustic signals generated by power switch

Obserwowane na spektrogramie składowe czasowo–częstotliwościowe powstają w przedziale czasowym (100–200) ms. W strukturach tych występują składowe częstotliwościowe w zakresie od 10 do 500 kHz. Ze względu na wielkość amplitudy i czas trwania za szczególnie istotne można uznać pasmo częstotliwości 10–50 kHz. Składowe o podwyższonej amplitudzie widoczne są również w przedziale 100–120 kHz. Obrazy czasowo–częstotliwościowe powyżej 120 kHz charakteryzują się krótkim czasem trwania, jak również niższą wartością amplitudy. W celu dokładniejszej analizy poszczególnych składowych wyniki analizy czasowo–częstotliwościowej wykonanej przy pomocy STFT uzupełniono wykorzystując przekształcenie CWT. Skalogram CWT wyznaczony dla skróconego do 120 ms przedziału czasowego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Skalogram CWT sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy

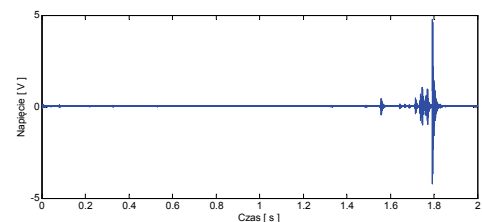
Fig. 6. CWT scale graph of AE signals generated by the power switch

Na skalogramie CWT widoczne są trzy grupy struktur czasowo–częstotliwościowych, które odpowiadają kolejnym fazom przełączeń przełącznika. Struktury falkowe odpowiadające pierwszemu zdarzeniu akustycznemu, charakteryzują się zawartością częstotliwości od 0 do ok. 100 kHz. Składowe powyżej tej częstotliwości posiadają małą amplitudę i charakteryzują się krótkim czasem trwania. Pasmo odpowiadające częstotliwościom z przedziału 0–70 kHz jest charakterystyczne dla drugiego zdarzenia akustycznego. Największą amplitudą i czasem trwania odznaczają się fluktuacje odpowiadające strukturze nr 3. Poza dominującym udziałem pasma niskich częstotliwości struktura ta charakteryzuje się składowymi o dużej amplitudzie i krótkim czasie trwania fluktuacji w zakresie częstotliwości powyżej 100 kHz.

## 5. Analiza sygnałów EA generowanych przez wybierak

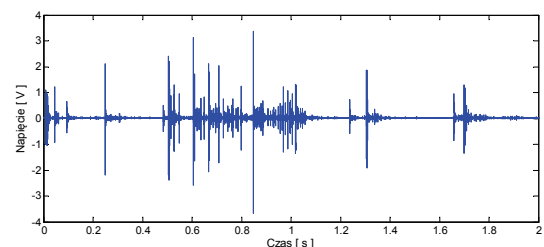
W trakcie pracy wybieraka występuje płynny ruch styków, podczas którego generowane są sygnały EA o bardzo małej wartości maksymalnej (w porównaniu do przełącznika mocy). Sygnały te nie mają również tak charakterystycznych i powtarzalnych struktur. Bardzo ważnym parametrem wybieraka jest stan techniczny jego styków, który bezpośrednio wpływa na jeden z najważniejszych parametrów transformatora, jakim jest rezystancja uzwojeń. W praktyce eksploatacyjnej często dochodzi do uszkodzeń styków ruchomych. Pod wpływem tych uszkodzeń siła docisku między stykami ruchomymi i nieruchomymi zmniejsza się, co może prowadzić do występowania wyładowań elektrycznych podczas procesu zmiany zaczerwów lub podczas normalnej pracy transformatora. Zjawisko powstawania szkodliwych dla styków wyładowań zostało wykorzystane jako wskaźnik diagnostyczny podczas oceny stanu technicznego wybieraka metodą EA. Wykonanie tej oceny możliwe jest więc w trakcie operacji łączeniowej PPZ pod obciążeniem. Ze względu na niską wartość maksymalną rejestrowanych sygnałów EA generowanych przez wyładowania elektryczne, konieczne jest zastosowanie większej wartości wzmocnienia układu pomiarowego.

W dalszej części artykułu przedstawiono przykładowe wyniki analizy sygnałów EA generowanych przez wybierak w układzie bez defektu i z zamodelowanym uszkodzeniem styku ruchomego. Pomiary wykonano przy przepływie prądu znamionowego przez styki wybieraka. Przebieg czasowy sygnałów EA zarejestrowane dla pełnego cyklu przełączenia PPZ, w układzie bez defektów wybieraka, przedstawiono na rysunku 7. Sygnały EA charakteryzujące pracę wybieraka znajdują się w pierwszej części przebiegu, w przedziale (0–1,5) s. W analizowanym przypadku charakteryzują się one małą wartością maksymalną, która nie przekracza 0,1 V i niską częstotliwością występowania. Struktury czasowe pojawiające się w sygnale po 1,5 s, generowane są przez układ mechaniczny PPZ i pracę przełącznika mocy.



Rys. 7. Przebieg czasowy sygnałów EA generowanych przez wybierak w układzie pracy bez defektów

Fig. 7. Time course of AE signals generated by selector operation in a setup without any defects



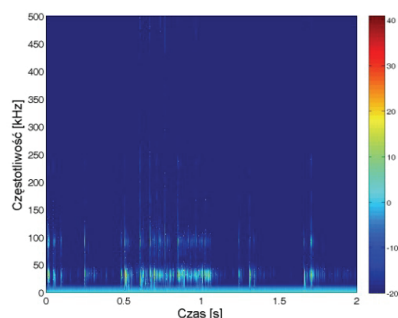
Rys. 8. Przebieg czasowy sygnałów EA generowanych przez wybierak z uszkodzonym stykiem ruchomym

Fig. 8. Time course of AE signals generated by selector operation in a setup with defected mobile conjunction

W przypadku rejestracji sygnałów EA w układzie z uszkodzonym stykiem ruchomym wybieraka występują zdarzenia akustyczne o stosunkowo dużej wartości maksymalnej rejestrowanych sygnałów i wysokiej intensywności wyładowań występujących praktycznie w całym cyklu pracy wybieraka. Zakresem o wzmożonej częstotliwości zdarzeń akustycznych jest przedział czasowy

(0,5-1) s. Struktury występujące w tym czasie charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami maksymalnymi występującymi w zakresie od 0,5 do 4,5 V. Na rysunku 8 przedstawiono przebieg czasowy sygnałów EA generowanych przez wybierak w układzie z uszkodzonym stykiem ruchomym wybieraka.

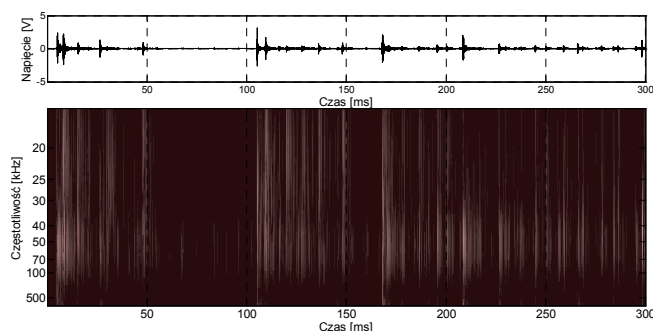
Spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez wybierak z uszkodzonym stykiem ruchomym przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych w układzie z uszkodzonym stykiem ruchomym wybieraka.

Fig. 9. Power spectrum density graph (spectrogram) of AE signals generated in a setup with defected selector mobile conjunction

Zaprezentowany obraz czasowo-częstotliwościowy charakteryzuje się dużą zawartością struktur zawierających częstotliwości z przedziału (20–150) kHz. W przedstawionym spektrogramie widoczne są również struktury, dla których pasmo dominujących częstotliwości jest szersze i obejmuje składowe od 20 do ok. 250 kHz. Szersze pasmo częstotliwości występuje szczególnie dla składowych charakteryzujących się większą wartością gęstości mocy sygnału w dziedzinie czasu. Szczegółowy obraz czasowo-częstotliwościowy dla przedziału czasowego skróconego do 300 ms, przedstawiono za pomocą skalogramów CWT zilustrowanych na rysunku 10.



Rys. 10. Skalogram CWT sygnałów EA generowanych w układzie z uszkodzonym stykiem ruchomym wybieraka.

Fig. 10. CWT scale graph of AE signals generated in a setup with defected selector mobile conjunction

Analizowany sygnał EA, odznacza się dużą ilością zdarzeń akustycznych. W obserwowanych strukturach falkowych odpowiadających tym zdarzeniom można wyróżnić pasmo częstotliwości dominujących, które charakteryzuje dłuższy czas występowania. Pasmo to obejmuje składowe z przedziału (0-150) kHz. Struktury zawierające częstotliwości ponad 150 kHz, charakteryzują się mniejszą wartością i krótszym czasem. Zakres występujących częstotliwości dominujących świadczy o tym, że w analizowanym sygnale EA znaczna część zdarzeń akustycznych była generowana przez wyładowania elektryczne, powstałe między stykami.

## 6. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że sygnały EA generowane przez przełącznik mocy i wybierak różnią się zarówno pod względem amplitudy jak i zakresu dominujących częstotliwości. Sygna-

ły EA generowane przez przełącznik mocy odznaczają się powtarzalną wartością amplitudy i charakterystycznym kształtem przebiegu czasowego. Natomiast sygnały EA powstające w wybieraku mają charakter stochastyczny i odznaczają się małą wartością amplitudy.

Podczas praktycznych pomiarów sygnałów EA generowanych przez PPZ celowe staje się zastosowanie co najmniej dwóch układów pomiarowych wyposażonych w szerokopasmowe przetworniki stykowe tego samego typu. Przetworniki te umożliwiają rejestrację sygnałów EA w szerokim paśmie częstotliwości, co pozwala na analizę zdarzeń akustycznych generowanych zarówno przez mechaniczną pracę styków jak i łuk elektryczny powstający podczas procesu łączeniowego. Jeden z przetworników piezoelektrycznych powinien być umiejscowiony w pobliżu przełącznika mocy w górnej części kadzi transformatora. Ze względu na duże wartości maksymalne sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy, należy zwrócić uwagę, aby wzmocnienie w tej części układu pomiarowego było dobrane w taki sposób, aby nie następowało przekroczenie zakresu pomiarowego. Drugi przetwornik pomiarowy powinien być przeznaczony do oceny sygnałów EA generowanych przez wybierak. Na podstawie doświadczeń pomiarowych można stwierdzić, że ze względu na małą wartość amplitudy sygnałów powstających w tej części PPZ, wzmocnienie sygnału z tego przetwornika winno być co najmniej dwukrotnie większe niż w przypadku pierwszego przetwornika.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER.



## 7. 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, Piekary Śląskie, 2007.
- [2] Boczar T., Borucki S., Cichoń A.: Dobór parametrów sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niepełnych dla potrzeb systemu ekspertowego, Studia i Monografie, Of. Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole 2009.
- [3] Cichoń A.: Diagnostyka podobciążeniowych przełączników zacze- pów z zastosowaniem metody emisji akustycznej, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11b, 2010, s. 198–201.
- [4] Cichoń A.: Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zacze- pów, Studia i Monografie, Wyd. Pol. Op., z. 259, Opole, 2011.
- [5] Cichoń A., Borucki S., Boczar T.: Diagnostyka niejednoczesności działania styków podobciążeniowego przełącznika zacze- pów metodą emisji akustycznej, Materiały Konferencyjne, 57 Otwarte Seminarium z Akustyki 2010 Gliwice, pp. 41–44.
- [6] Praca zbiorowa pod redakcją R. Malewskiego: Transformatory w Eksploatacji, wydawnictwo Energo-Complex, tom 1, Piekary Śląskie, 2005r.
- [7] Sokolov V.V.: Considerations on Power Transformer Condition - Based Maintenance, EPRI Substation Equipment Diagnostic Conference VIII, 20-23 February 2000, New Orleans.
- [8] Szrot M., Płowucha J., Subocz J., Borucki S., Cichoń A., Rzeczkowski A.: Eksploatacja transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem systemu TrafoGrade, Rynek Energii, ISSN 1425-5960, 2009, s. 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, s. 65-68.