

## Możliwości zastosowania metody emisji akustycznej do diagnostyki zestawu trzech jednofazowych przełączników zaczepów zainstalowanych w transformatorze elektroenergetycznym

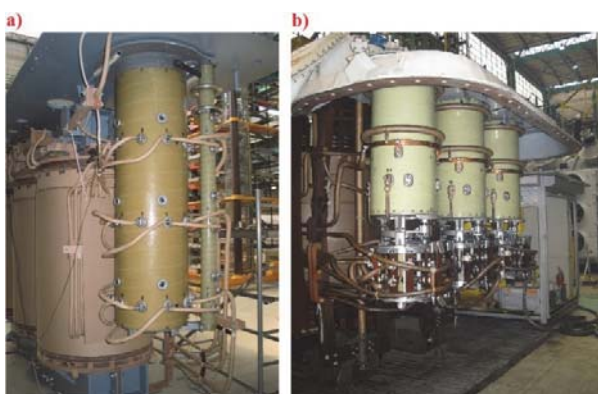
**Streszczenie.** W artykule przedstawiono praktyczny przykład diagnostyki podobciążeniowych przełączników zaczepów (PPZ) z wykorzystaniem metody emisji akustycznej (EA). Badania przeprowadzono dla zestawu trzech przełączników jednofazowych typu 3xVRC I 701 zainstalowanych w trójfazowym transformatorze o mocy 12 MVA. Pomiary wykonano dla jednostki nowej na stacji prób. Analizę uzyskanych wyników wykonano w dziedzinie czasowej i czasowo – częstotliwościowej. Opis sygnałów EA generowanych przez PPZ w dziedzinie czasowej wykonano za pomocą przebiegów czasowych, modułu transformaty Hilberta i czasów charakterystycznych. W dziedzinie czasowo – częstotliwościowej mierzone sygnały opisano za pomocą spektrogramów widma gęstości mocy przy wykorzystaniu krótkoczasowej transformaty Fouriera. Dodatkowo wyniki pomiarów uzyskanych metodą emisji akustycznej porównano z rezultatami badań oscylograficznych.

**Abstract.** In this paper, practical example of application of acoustic emission method (AE) to on-load tap changer diagnostics (OLTC) is presented. Research was performed on three single phase OLTCs of 3xVRC I 701 type, mounted in three-phase transformer which rated power is 12 MVA. Measurements were carried out in manufacturers transformers test facility for brand new unit. Analysis of obtained results was performed in time and time-frequency domains. In time domain, EA signals generated by OLTC were described by its time-amplitude composition, Hilbert transform modulus and characteristic times. In time-frequency domain measured signals were described by power spectral density obtained by application of short-time Fourier transform. Additionally, results of measurements obtained with application of EA method were compared with results obtained with oscillographic analysis. (**Possibilities of application of acoustic emission method for diagnostic purposes of three single-phase on-load tap changers mounted in power transformer**).

**Słowa kluczowe:** podobciążeniowy przełącznik zaczepów, diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych, metoda emisji akustycznej.  
**Keywords:** on-load tap changer, power electric equipment diagnostics, acoustic emission method.

### Wprowadzenie

Większość transformatorów eksploatowanych w polskim systemie elektroenergetycznym jest wyposażona w podobciążeniowe przełączniki zaczepów (PPZ), które umożliwiają regulację napięcia poprzez zmianę ich przekładni. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych PPZ przedstawiono w m. in. pracach [1, 3, 5, 7, 9]. Urządzenia te są przystosowane do współpracy z automatycznymi regulatorami napięcia sieci, które porównując zadaną wartość z wartością mierzoną, dokonują zmiany położenia zaczepów PPZ [2, 6, 10, 11].



Rys. 1. Widok ogólny PPZ trójfazowego (a) i zestawu trzech przełączników jednofazowych (b)

W praktyce eksploatacyjnej spotyka się dwa rozwiązania technologiczne związane z montażem PPZ w kadzi transformatora. Większość przełączników charakteryzuje się budową trójfazową i umożliwia wykonanie procesu łączeniowego we wszystkich fazach równocześnie (rys. 1a). Ze względu na dużą wartość prądów łączeniowych stosuje się również rozwiązania jednofazowe, w których wewnątrz kadzi transformatora

instaluje się zestawy trzech jednofazowych przełączników wykonujących procesy łączeniowe w poszczególnych fazach (rys. 1b).

Analizując przyczyny występowania awarii transformatorów wysokiego napięcia można stwierdzić, że jednym z najczęstszych powodów wyłączeń jednostek z ruchu są uszkodzenia PPZ. Od kilku lat prowadzi się prace zmierzające do opracowania nowych metod diagnostycznych pozwalających na ocenę stanu technicznego bez konieczności wyłączenia transformatora z ruchu energetycznego. Jedną z takich metod jest metoda EA bazująca na wykorzystaniu sygnałów akustycznych generowanych przez PPZ. Sygnały te mierzone są zarówno w paśmie niskich jak i wysokich częstotliwości.

W czasie procesu łączeniowego sygnały te mogą być generowane przez układ mechaniczny przełącznika, pracę styków lub wyładowania elektryczne. Dla większości typów PPZ, środowiskiem pracy jest olej izolacyjny, w którym powstająca fala ciśnienia akustycznego propaguje i dociera do metalowej kadzi. Istnieje więc możliwość rejestracji sygnałów EA przez przetwornik piezoelektryczny przymocowany do zewnętrznej części kadzi. Uzyskany w ten sposób sygnał EA zawiera informacje charakteryzujące pracę przełącznika mocy i wybieraka [8]. Wyniki prac związanych z wykorzystaniem metody EA do diagnostyki PPZ trójfazowych przedstawiono mi w pracach [2, 3, 4]

W artykule przedstawiono przykład diagnostyki zestawu trzech jednofazowych PPZ umieszczonych we wspólnej kadzi transformatora.

### Charakterystyka układu pomiarowego

Pomiary wykonano dwoma przetwornikami pomiarowymi przymocowanymi do zewnętrznej ścianki kadzi transformatora w obszarze pracy PPZ. Zastosowano dwa rodzaje przetworników: szerokopasmowy przetwornik stykowy typu WD AH 17 (rejestrujący sygnał akustyczny)

służący do rejestracji sygnałów w paśmie wysokich częstotliwości i akcelerometr typu 4514-B-001 rejestrujący drgania mechaniczne – sygnał wibroakustyczny, w paśmie niskich częstotliwości.

Przetwornik WD AH 17 charakteryzuje się wysoką czułością ( $55 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$  w odniesieniu do  $\text{V/ms}^{-1}$ ) i szerokim pasmem przenoszenia: od 100 kHz do 1 MHz w zakresie  $\pm 10 \text{ dB}$ . Przetwornik ten wyposażony jest w układ

różnicowy pomiaru sygnałów EA. Zastosowanie tego układu pozwala na eliminację sygnałów zakłócających, które mogą pojawić się pod wpływem pola elektromagnetycznego oddziałującego na przetwornik i przewód pomiarowy. Ma to szczególne znaczenie podczas wykonywania pomiarów przy przepływie prądu podczas procesu przełączania PPZ.



Rys. 2. Widok ogólny układu pomiarowego: a) przetworniki pomiarowe, b) układ akwizycji danych, c) system Pulse DYN-XI

Drugim rodzajem przetwornika był akcelerometr typu 4514-B-001. Do rejestracji i analizy sygnałów wibroakustycznych generowanych podczas procesu przełączania badanych PPZ wykorzystano tor pomiarowy bazujący w systemie Pulse DYN-XI, firmy Brüel&Kjaer (rys 2).

Wykorzystany system Pulse DYN-XI posiadał 4 kanały, możliwość równoległych pomiarów bez multipleksowania w zakresie do 51,2 kHz oraz cechował się dużą dynamiką, która pokrywała zakres napięć wyjściowych typowego akcelerometru z wbudowanym przedwzmacniaczem. Rozdzielczość przetwarzania systemu Pulse wynosiła 24 bity bez względu na wartość zadanej częstotliwości próbkowania. Podczas pomiarów stosowano akcelerometry typu 4514-B-001, firmy Brüel & Kjaer, które charakteryzowały się czułością  $10 \pm 12\% \text{ mV/ms}^{-2}$  ( $f = 160 \text{ Hz}$ ), częstotliwością rezonansową  $f_{\text{rez}} = 32 \text{ kHz}$  i liniowym pasmem w zakresie 5 – 10000 Hz z tolerancją  $\pm 10\%$ . Natomiast jako wzorzec drgań wykorzystano kalibrator typu 4294 firmy Brüel & Kjaer o częstotliwości wzorcowej  $f = 159,15 \pm 0,02\%$  i przyśpieszeniu  $g = 10 \pm 3\% \text{ m/s}^2$ .

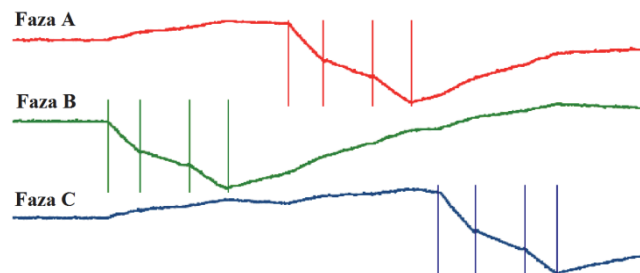
Pomiary przeprowadzono podczas pracy transformatora pod obciążeniem. Zakres zmiany położenia styków PPZ wynikał z możliwości regulacyjnych przyłączonego układu. W trakcie pomiarów przeprowadzono: rejestrację sygnałów wibroakustycznych generowanych przez PPZ w paśmie niskich częstotliwości oraz rejestrację sygnałów akustycznych generowanych w paśmie wysokich częstotliwości.

### Analiza wyników pomiarowych

Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie pomiarów metodą oscylograficzną. Podczas pomiarów tą metodą w badanym układzie PPZ wymuszano przepływ prądu stałego, a następnie rejestrowano jego przebiegi czasowe w trakcie przełączeń na kolejne zaczepty. Rejestrację prowadzono osobno dla każdej fazy. Przykładowy przebieg prądów rejestrowanych w badanym PPZ przedstawiono na rys. 3.

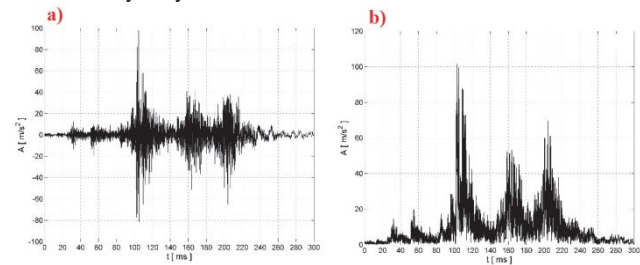
Cechą charakterystyczną pracy zestawu trzech jednofazowych PPZ jest przesunięcie w dziedzinie czasu cyklu łączeniowego przełączników w poszczególnych fazach. Wynika ono z budowy układu PPZ i sposobu jego regulacji. Zjawisko to można zaobserwować również na rys. 3. Cykl łączeniowy rozpoczyna się zadziałaniem

przełącznika w fazie B, następnie po jego zakończeniu rozpoczyna się przełączenie w fazie A, a na końcu po pewnym czasie można zaobserwować cykl łączeniowy w fazie C.



Rys. 3. Wyniki pomiarów oscylograficznych badanego zestawu przełączników

Zjawisko nierównoczesnego zadziałania przełączników w poszczególnych fazach umożliwia wyodrębnienie z sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych za pomocą akcelerometru i z sygnałów akustycznych zarejestrowanych za pomocą szerokopasmowego przetwornika stykowego struktur odpowiadającym kolejnym cyklom łączeniowym w poszczególnych fazach. Na rys. 4 przedstawiono przebiegi czasowe i moduły transformaty Hilberta sygnałów wibroakustycznych.

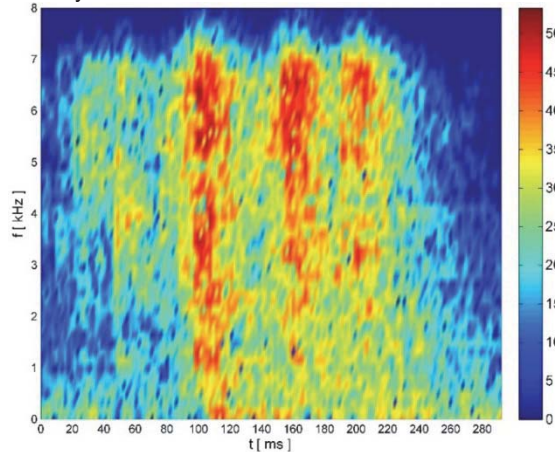


Rys. 4. Przebieg czasowy (a) i moduł transformaty Hilberta (b) sygnałów wibroakustycznych

Na rys. 4a przedstawiono struktury czasowe sygnału wibroakustycznego. Widoczne są wyraźne trzy składowe odpowiadające pracy poszczególnych PPZ. Struktury te odpowiadają kolejno przełączeniom odpowiednio w fazach: B, A i C. Charakteryzują się one podobną kompozycją lecz

zróznicowaną amplitudą, co w głównej mierze wynika z metody prowadzenia pomiaru. Czas przerwy między zadziałaniem kolejnych przełączników jest zbliżony do czasów zarejestrowanych metodą oscylograficzną. Obserwacja sygnałów wibroakustycznych w dziedzinie czasu umożliwia wyodrębnienie z zarejestrowanego sygnału składowych odpowiadających kolejnym cyklom łączeniowym PPZ zainstalowanym w poszczególnych fazach. Na ich podstawie możliwe jest określenie czasów niejednoczesności działania zestawu trzech jednofazowych PPZ zainstalowanych w transformatorze.

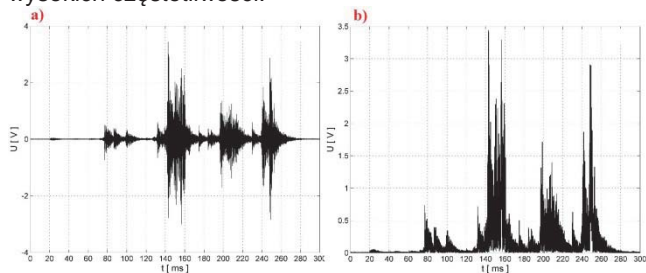
Ocenę zarejestrowanych sygnałów w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, wykonano za pomocą dwuwymiarowych spektrogramów widmowej gęstości mocy. Na rys. 5 przedstawiono spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów wibroakustycznych generowanych przez badany zestaw PPZ



Rys. 5. Spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów wibroakustycznych generowanych przez zestaw trzech jednofazowych PPZ zainstalowanych w transformatorze elektroenergetycznym

Analiza czasowo – częstotliwościowa prowadzona jest w paśmie niskich częstotliwości w zakresie od ~0 do 8 kHz. Umożliwia ona wykrycie defektów związanych z mechanicznym zużyciem styków przełącznika oraz defektami związanymi z układem przeniesienia napędu. W omawianym przypadku zarówno kształt jak i zawartość składowych częstotliwościowych nie wskazują na występowanie defektów natury mechanicznej.

Zastosowanie akcelerometrów nie pozwala na obserwację intensywności zjawisk elektrycznych występujących podczas procesu łączeniowego. Dlatego wyniki badań zestawu PPZ metodą akustyczną powinny być uzupełnione o pomiary wykonane za pomocą szerokopasmowego przetwornika stykowego. Na rys. 6 przedstawiono przebiegi czasowe i moduł transformaty Hilberta sygnałów akustycznych rejestrowanych w paśmie wysokich częstotliwości.

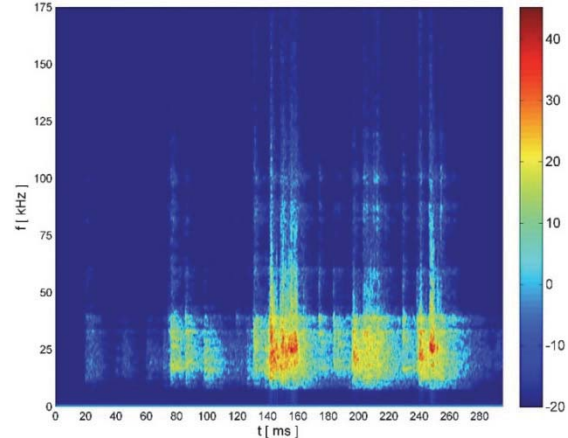


Rys. 6. Przebieg czasowy (a) i moduł transformaty Hilberta (b) sygnałów akustycznych rejestrowanych w paśmie wysokich częstotliwości

W przedstawionym na rys. 6a przebiegu czasowym widoczna jest większa liczba zdarzeń akustycznych niż

w przebiegu wibroakustycznym zaprezentowanym na rys. 4a. Wynika to z większej czułości zastosowanego przetwornika i większej częstotliwości próbkowania sygnału.

Poza mechaniczną pracę styków głównych badanych PPZ w analizowanym sygnale widoczne są również zdarzenia akustyczne generowane przez pracę styków rezystancyjnych. Na rys. 7 przedstawiono spektrogram widmowej gęstości mocy sygnałów akustycznych rejestrowanych w paśmie wysokich częstotliwości.



Rys. 7. Spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów akustycznych generowanych przez zestaw trzech jednofazowych PPZ zainstalowanych w transformatorze elektroenergetycznym

Na przedstawionych spektrogramach widmowej gęstości mocy widoczne są struktury czasowo – częstotliwościowe, których pasmo dominujących częstotliwości zawiera się w przedziale ok. 10 – 100 kHz. Największą amplitudą odznaczają się struktury związane z mechaniczną pracą styków głównych PPZ. Na obrazach widmowej gęstości mocy można wyróżnić dwa główne przedziały częstotliwości, w których występują lokalne maksima. Pierwszy zawiera częstotliwości z zakresu (10 – 40 kHz), natomiast drugi (50 – 100 kHz). Przedstawiony na rys. 7 udział składowych czasowo – częstotliwościowych jest typowy dla badanego typu PPZ i nie wskazuje na istnienie defektów natury elektrycznej.

## Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych w artykule rezultatów można stwierdzić, że dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu i w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, istnieje możliwość wykorzystania metody EA do oceny stanu technicznego zestawu trzech jednofazowych PPZ zainstalowanych w transformatorze elektroenergetycznym. Główną zaletą zastosowanej metody jest możliwość wykonywania pomiarów podczas normalnej pracy transformatora bez konieczności wykonywania wyłączeń. Istnieje więc możliwość budowy systemu diagnostyki PPZ działającego on-line.

Ważnym kierunkiem dalszych prac prowadzonych nad tym zagadnieniem jest również stworzenie bazy tzw. „odcisków palca” dla różnych typów PPZ znajdujących się w eksploatacji. Powinna ona zawierać sygnatury akustyczne wraz z ich parametrami charakterystycznymi wyznaczone dla przełączników nowych lub po remoncie. Wykonanie takiego cyklu badań może pozwolić na uszczegółowienie parametrów sygnałów EA charakteryzujących poszczególne typy uszkodzeń występujących w warunkach rzeczywistych.

## LITERATURA

- [1] Ainetter J., Brauner G., Mauer H., Strof T., Kalinintchenko A., Thyristor Aided Diverter Switch "TADS" - a Progressive

- Concept for the Prolongation of maintenance - free intervals, CIREC 1999
- [2] Cichoń A., Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zaczepów, *Studia i Monografie*, Wyd. Pol. Op., z. 259, Opole, 2011
- [3] Cichoń A., Ocena stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zaczepów metodą emisji akustycznej, *Studia i Monografie*, Wyd. Politechnika Opolska, z. 352, Opole, 2013
- [4] Cichoń A., Berger P., Borucki S., Analiza porównawcza wyników badań w zakresie oceny stopnia zużycia styków PPZ metodą akustyczną i oscylograficzną, *Pomiary, Automatyka Kontrola*, nr 2, 2013, 152-155
- [5] Dazhong S., Kraemer A., Dohnal, D., Vacuum Switching Technology Improves the Switching Capacity of On-Load Tap-Changers in HVDC Applications, *International Conference on Power Systems Technology POWERCON*, Chongqing, China, 2006, 1-6
- [6] Kang P., On-Line Condition Assessment of Power Transformer On-Load Tap Changers: Transient Vibration Analysis Using Wavelet Transform and Self-Organizing Map, Ph.D. Dissertation, Queensland Univ. Technol., Brisbane, Australia, 2000
- [7] Kramer W., On - Load Tap Changers, Maschinenfabrik Reinhausen, Regensburg, 2000
- [8] Ledonard F., Foata M., Paquin J-Y., Vibroacoustic Signature Comparison and Time - Warping Correction with Multi-Scale Correlation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 14, 2000, 443-458
- [9] Oates C., Barlow A., Levi V., Tap Changer for Distributed Power, *12th European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2007
- [10] Seitz P. P., Quak B., Erbrink J. J., Galski E., Leich R., Advanced On-Site Diagnosis of Power Transformers, 2008 *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008
- [11] Schellhase H.-U., Pollock R.G., Rao A.S., Korolenko E.C., Ward B., Load Tap Changers: Investigations of Contacts, Contact Wear and Contact Coking, *Electrical Contacts, Proceedings*, 2002, 259 – 272
- 
- Autorzy:** dr hab. inż. Andrzej Cichoń, prof. PO, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnych, 45-758, Opole, ul. Prószkowska 76, e-mail: a.cichon@po.opole.pl; dr hab. inż. Sebastian Borucki, prof. PO, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnych, 45-758, Opole, ul. Prószkowska 76, e-mail: s.borucki@po.opole.pl; mgr inż. Paweł Berger, EthosEnergy Poland S.A., 42-701 Lubliniec, ul. Powstańców Śląskich 85, e-mail: pawel.berger@turbocare.pl