

Możliwości praktycznego zastosowania metody emisji akustycznej do oceny stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zacze- pów

Streszczenie. Tematyka artykułu związana jest z opracowaniem nowej metody diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zacze- pów (PPZ). Proponowana metoda bazuje na wykorzystaniu sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanych przez PPZ. W artykule przedstawiono praktyczny przykład zastosowania metody EA do oceny stanu technicznego trójfazowych PPZ charakteryzujących się konstrukcją z osobnym przełącznikiem mocy i wybierakiem.

Abstract. Subject of this article is connected with development of new on-load tap changers (OLTCs) diagnostic method. Proposed method is based on usage of acoustic emission (AE) signals generated by OLTC. This article presents practical example of application AE method to evaluate technical condition of OLTCs build as three phase units with separate power switch and tap selector. **New diagnostic method of on-load tap changers (OLTCs)**

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

doi:10.12915/pe.2014.01.48

Wprowadzenie

Dla spółek dystrybucyjnych niezmiernie ważnym zagadnieniem jest utrzymanie odpowiednich parametrów jakościowych dostarczonej energii elektrycznej. Z tego powodu konieczne jest umożliwienie wykonywania regulacji wartości napięcia w sieci. Zapewnienie odpowiednich poziomów napięcia związane jest z koniecznością prowadzenia właściwej gospodarki mocą bierną. Ze względu na możliwości regulacyjne napięcia ważnym elementem systemu elektroenergetycznego są PPZ, stanowiące jeden z elementów transformatorów elektroenergetycznych. Urządzenia te są przystosowane do współpracy z automatycznymi regulatorami napięcia sieci, które porównując zadaną wartość napięcia z wartością mierzoną, dokonują zmiany położenia zacze- pów PPZ [2, 10, 11].

Transformatory pracujące w polskim systemie elektroenergetycznym wyposażone są w PPZ różnych typów. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych PPZ przedstawiono w m. in. pracach [1, 3, 5, 7, 9].

Od wielu lat poszukuje się metody oceny stanu technicznego PPZ w sposób on-line, czyli bez konieczności wyłączenia transformatora spod napięcia. Proces łączeniowy PPZ związany jest z generacją sygnałów akustycznych, co stwarza możliwość zastosowania metody EA do diagnostyki ich stanu technicznego [4, 6].

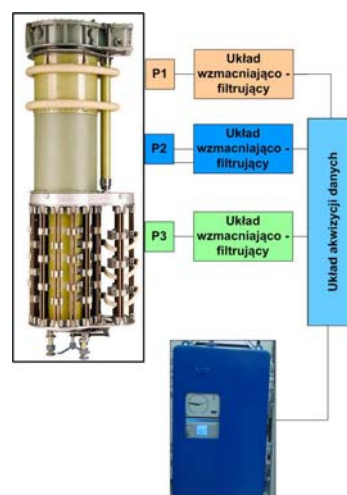
W czasie procesu łączeniowego sygnały te mogą być generowane przez układ mechaniczny przełącznika, pracę styków lub wyładowania elektryczne. Dla większości typów PPZ, środowiskiem pracy jest olej izolacyjny, w którym powstająca fala ciśnienia akustycznego propaguje i dociera do metalowej kadzi. Istnieje 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].

W artykule przedstawiono praktyczny przykład oceny stanu technicznego PPZ ze szczególnym uwzględnieniem analiz sygnałów generowanych przez przełącznik mocy i wybierak. Przeprowadzono również badania zmierzające do detekcji wyładowań niezupełnych (WZN) w obszarze pracy PPZ.

Charakterystyka układu pomiarowego

Układ pomiarowy wyposażono w trzy przetworniki stykowe mocowane do zewnętrznej części kadzi PPZ. Na

rysunek 1 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego.



Rys. 1 Schemat blokowy układu pomiarowego

Badania wykonano trzema torami pomiarowymi. Dwa przetworniki P1 i P2 umieszczono w górnej części kadzi PPZ, w okolicach przełącznika mocy. Trzeci przetwornik P3, przeznaczony był do rejestracji sygnałów akustycznych wybieraka i przymocowany w dolnej części kadzi.

Stosowano dwa rodzaje przetworników. W punktach P1 i P3 zastosowano szerokopasmowy przetwornik typu WD AH 17. Wykorzystany przetwornik charakteryzuje się wysoką czułością ($55 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$ w odniesieniu do 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. Odbierany sygnał EA poddano wzmocnieniu w układzie przedwzmacniacza typu 2/4/6, który posiada możliwość skokowej regulacji wzmocnienia: 20, 40, 60 dB.

Zaletą stosowania szerokopasmowego przetwornika stykowego jest możliwość łatwego mocowania do

badanego obiektu i analiza rejestrowanych sygnałów EA w szerokim paśmie częstotliwości.

Drugim rodzajem przetwornika był akcelerometr typu 4514-B-001, mocowany w punkcie P2. Zastosowanie takiego przetwornika pozwoliło na analizę drgań generowanych podczas pracy PPZ w paśmie częstotliwości od 1 Hz do 10 kHz. Próg pobudzenia akcelerometru wynosił 10,09 mV/ms² (98,99 mV/g). Sygnał z przetwornika pomiarowego poddawano wzmocnieniu i filtracji we wzmacniaczu typu NEXUS.

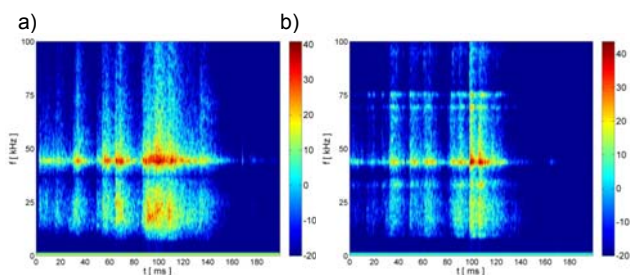
Częścią wspólną wszystkich zastosowanych układów pomiarowych jest element akwizycji sygnałów pomiarowych. Przebiegi czasowe sygnałów EA odbieranych za pomocą scharakteryzowanych przetworników zapisywano za pomocą czterokanałowej karty pomiarowej firmy Acquiretek CH 3160.

Metodologia wykonywania pomiarów

Wszystkie rodzaje pomiarów przeprowadzono podczas normalnej pracy transformatora pod obciążeniem. Zakres zmiany położenia styków PPZ wynikał z możliwości regulacyjnych wynikających z aktualnego stanu systemu elektroenergetycznego. W trakcie pomiarów przeprowadzono kilka rodzajów analiz m. in.:

- rejestrację sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy w paśmie wysokich częstotliwości, z wykorzystaniem przetwornika P1,
- rejestrację sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy w paśmie niskich częstotliwości, z wykorzystaniem przetwornika P2,
- pomiary sygnałów EA generowanych przez wybierak w trakcie procesu łączeniowego, z wykorzystaniem przetwornika P3,
- detekcję WNZ w obszarze pracy wybieraka w czasie pracy bez przełączeń.

Z badanej populacji PPZ, na początku badań wytypowano dwa przełączniki, z których jeden (PPZ 1) charakteryzował się dobrym stanem technicznym, a drugi (PPZ 2), w wyniku długotrwałej eksploatacji i bardzo dużej liczby przełączeń był podejrzany o uszkodzenie. W PPZ nr 1 przeprowadzono generalny remont przełącznika mocy, dlatego zarejestrowane sygnały akustyczne dla tego urządzenia stanowią tzw. „odcisk palca” dla całej badanej populacji. Natomiast PPZ nr 2 charakteryzował się względnie długim czasem eksploatacji, a wyniki jego badań elektrycznych mogły wskazywać na możliwość występowania zużycia styków w głowicy przełącznika mocy.



Rys. 2. Przykładowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy w trakcie cyklu łączeniowego zarejestrowany przetwornikiem P1: a) PPZ 1, b) PPZ 2

Analiza wyników pomiarowych

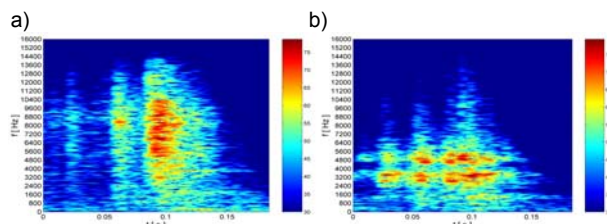
Ocenę sygnałów EA badanych PPZ przeprowadzono w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, wyznaczając dwuwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy lub skalogramy ciągłej transformaty falkowej. Na wszystkich omawianych rysunkach symbolem "a" oznaczono wyniki

analizy sygnałów EA generowanych podczas cyklu łączeniowego PPZ 1, natomiast symbolem "b" – PPZ 2.

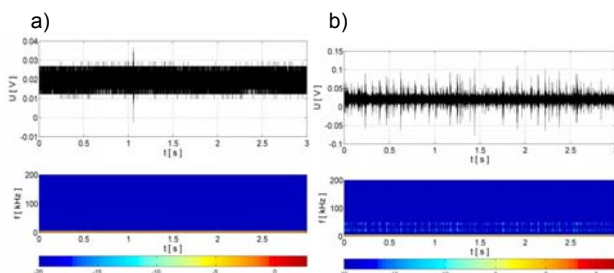
Na rysunku 2 przedstawiono spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy, zarejestrowanych szerokopasmowym przetwornikiem P1.

Na przedstawionych spektrogramach widmowej gęstości mocy widoczne są struktury czasowo – częstotliwościowe, których pasmo dominujących częstotliwości zawiera się w przedziale 10 – 100 kHz. Największą amplitudą odznaczają się struktury występujące na końcu analizowanego przebiegu. Na obrazach widmowej gęstości mocy można wyróżnić dwa główne przedziały częstotliwości, w których występują lokalne maksima. Pierwszy zawiera częstotliwości z zakresu (10 – 30 kHz), natomiast drugi (45 – 55 kHz). Analiza wyników pomiarowych wykazała także, że sygnały odpowiadające pracy PPZ 1 posiadają struktury czasowo – częstotliwościowe o najwyższych amplitudach (rys. 2a). Na podstawie analizy spektrogramów, wyznaczonych dla sygnałów EA generowanych przez PPZ nr 2 (rys. 2b), stwierdzono występowanie wyraźnych różnic w ich strukturze czasowo – częstotliwościowej. Zaobserwowano znaczne rozwarstwienie ostatniej struktury akustycznej analizowanego sygnału EA, jak również odmienne rozmieszczenie poszczególnych struktur częstotliwościowych w czasie, oraz inną zawartość udziałów amplitudowych z przedziału 10 – 30 kHz.

Na rysunku 3 przedstawiono spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy, zarejestrowanych akcelerometrem (P2).



Rys. 3. Przykładowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez przełącznik mocy w trakcie cyklu łączeniowego zarejestrowany przetwornikiem P2: a) PPZ 1, b) PPZ 2



Rys. 4. Przykładowe przebiegi czasowe i skalogramy CWT sygnałów EA generowanych przez wybierak w trakcie cyklu łączeniowego zarejestrowany przetwornikiem P3: a) PPZ 1, b) PPZ 2

W przypadku PPZ 1 (rys 3a) sygnały EA rejestrowane w zakresie niskich częstotliwości za pomocą akcelerometru P2 zawierają składowe z przedziału częstotliwości od 0 do 15 kHz. Dla PPZ 2 (rys. 3b) sygnały te pasmo dominujących częstotliwości w przedziale (0 – 8 kHz). W tym przypadku obserwuje się zanik składowych z pasma (8 – 15 kHz).

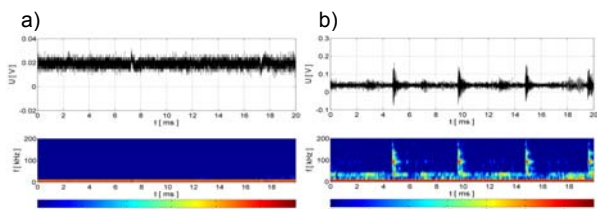
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi czasowe i spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanych przez wybierak, w trakcie procesu łączeniowego, zarejestrowanych przetwornikiem P3.

Sygnaly akustyczne zarejestrowane podczas pracy wybieraka w trakcie procesu łaczeniowego pod obciazeniem, charakteryzujacy sie znacznie nizsza amplituda niz sygnaly generowane przez przelacznik mocy. Sygnaly te nie majaa rowniez tak charakterystycznych i powtarzalnych struktur.

Analizujac wyniki pomiarow mozna stwierdzic, ze w przypadku PPZ 1 (rys. 4a) sygnaly akustyczne generowane przez wybierak mialy charakter szumu. Na spektrogramach widmowej gestosci mocy nie wystepuja struktury swiadczace o uszkodzeniach natury elektrycznej i mechanicznej.

W przypadku sygnalow akustycznych generowanych przez wybierak w PPZ 2 (rys. 4b) zaobserwowano wystepowanie regularnych struktur akustycznych. Wystepuja one w calym analizowanym przebiegu, podczas kazdego przelaczenia. Podczas analizy czasowo – czestotliwosciowej stwierdzono wystepowanie struktur w pasmie niskich czestotliwosci do 50 kHz. Wyniki te swiadczą o uszkodzeniu natury mechanicznej. Regularnosc wystepowania ww. struktur moze swiadczyc o powstaniu defektu zwiazanego z uszkodzeniem lozyska posredniczacego w układzie przeniesienia napedu.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasowe i spektrogramy widmowej gestosci mocy sygnalow EA rejestrowanych w obszarze pracy wybieraka, w układzie pracy bez przelaczen.



Rys. 5. Przykladowe przebiegi czasowe i spektrogramy widmowej gestosci mocy sygnalow EA rejestrowanych w obszarze pracy wybieraka, w układzie pracy bez przelaczen: a) PPZ 1, b) PPZ 2

Przedstawione przebiegi czasowe sygnalow EA rejestrowanych w obszarze pracy wybieraka w układzie bez przelaczen w przypadku PPZ 1 majaa charakter szumu. Analiza struktur czasowo – czestotliwosciowych rowniez nie wskazuje na obecnoaa WNZ w badanym obszarze. W przypadku PPZ 2 wystepuja regularne zdarzenia akustyczne o duzo wiekszej amplitudzie powtarzajace sie w czasie. Analiza czasowo – czestotliwosciowa sygnalu zawiera skladowe z pasma od 0 do 200 kHz co swiadczy o powstawaniu regularnych wykladowaa niezupealnych.

Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych w artykule rezultatow mozna stwierdzic, ze dzieki zastosowaniu nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnalow w dziedzinie czasu i w dziedzinie czasowo-czestotliwosciowej, istnieje

mozliwosc wykorzystania metody EA do oceny stanu technicznego PPZ o konstrukcji z osobnym wybierakiem i przelacznikiem mocy, podczas ich normalnej eksploatacji. Porownanie wynikow analizy sygnalow EA generowanych przez PPZ 1 i PPZ 2 pozwala na wyznaczenie wyraźnych różnic pozwalajacych na diagnozowanie uszkodzen PPZ w trakcie normalnej pracy PPZ.

Aktualnie sa prowadzone badania weryfikujace opisanaa w artykule metode diagnostycznaaa dla PPZ innych typow.

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]. Cichoaa A.: Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciazeniowych przelacznikow zaczeptow, *Studia i Monografie*, Wyd. Pol. Op., z. 259, Opole, 2011
- [3]. Cichoaa A.: Ocena stanu technicznego podobciazeniowych przelacznikow zaczeptow metodaaa emisji akustycznej, *Studia i Monografie*, Wyd. Politechnika Opolska, z. 352, Opole, 2013
- [4]. Cichoaa A., Berger P., Borucki S.: Analiza porownawcza wynikow badaaa w zakresie oceny stopnia zuzycia stykowaa PPZ metodaaa akustycznaaa i oscylograficznaaa, *Pomiary, Automatyka Kontrola*, nr 2, 2013, 152 - 155
- [5]. Dazhong Shen, Kraemer A., Dohnal, D.: Vacuum Switching Technology Improves the Switching Capacity of On-Load Tap-Changers in HVDC Applications, 2006, International Conference on Power Systems Technology, POWERCON Chongqing China, 22-26 October 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, 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, EPE 2007 - 12th European Conference on Power Electronics and Applications 2 - 5 September 2007, Aalborg, Denmark
- [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, April 21-24, 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*, 2002 Proceedings, 259 – 272

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