

# Ocena stanu technicznego konstrukcji mechanicznej rdzeni transformatorów oparta na analizie skumulowanego widma gęstości mocy mierzonych drgań

**Streszczenie.** W publikacji zaprezentowano wyniki wskazujące na możliwość opracowania bezinwazyjnej metody diagnostycznej oceny sztywności konstrukcji mechanicznej rdzeni transformatorów. Opracowywana metoda bazuje na wynikach analizy zmian w czasie skumulowanego widma gęstości mocy wibracji monitorowanego transformatora. W artykule scharakteryzowano badany obiekt, zastosowany system pomiarowy i omówiono zaproponowaną metodykę oceny stanu technicznego rdzenia z wykorzystaniem tzw. zmodyfikowanej metody wibroakustycznej.

**Abstract.** The paper presents the results indicate the possibility of developing non-invasive diagnostic method assessment of the mechanical stiffness of transformer cores. The developed method is based on the results of the analysis of changes over time the cumulative spectral power density vibration monitored transformer. This paper describes the test object, used measuring system and discussed the proposed methodology for the assessment of the technical condition of the core use of so-called modified vibroacoustic method. (**Assessment of mechanical construction of power transformer cores based on an analysis of the cumulative spectral power density measured vibrations**).

**Słowa kluczowe:** transformator elektroenergetyczny, rdzeń, diagnostyka, metoda wibroakustyczna.

**Keywords:** power transformer, core, diagnostic, vibroacoustic method.

doi:10.12915/pe.2014.01.60

## Wstęp

Transformator elektroenergetyczny podczas pracy poddawany jest wpływowi wielu niekorzystnych czynników, które skracają okres jego eksploatacji i mogą powodować nieoczekiwane awarie. Drgania magnetostrykcyjne powodują stopniowe poluzowanie śrub, klinów oraz dystansowych wstawek izolacyjnych belek ściskających części aktywnej i mogą powodować wyraźne obniżenie niezawodności pracy danego transformatora. Poluzowanie pakietów blach obwodu magnetycznego transformatorów dużej mocy powoduje zwiększenie strat jałowych, a konsekwencją takiego stanu rzeczy może być występowanie lokalnych przegrzań i wzrost temperatury oleju elektroizolacyjnego w miejscu zaistnienia defektu. Wielomiesięczna eksploatacja transformatora z rozwijającym się defektem konstrukcji rdzenia nie tylko znacznie przyspiesza procesy starzeniowe układu izolacyjnego, ale także może spowodować nagły przyrost koncentracji gazów palnych i awaryjne wyłączenie urządzenia przez zabezpieczenie gazowo-przepływowe.

W celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia awarii katastrofalnych transformatorów opracowano i wdrożono szereg metod pomiarowych, które w mniej czy bardziej doskonałym stopniu pozwalają na wczesną detekcję występujących w nich uszkodzeń. Oprócz scharakteryzowanych w literaturze metod diagnostycznych [1-5], do identyfikacji uszkodzeń mechanicznych rdzeni coraz powszechniej wykorzystuje się metodę wibroakustyczną. Polega ona na pomiarze drgań badanego obiektu podczas jego normalnej eksploatacji (pracy pod obciążeniem), a następnie na analizie wartości skutecznych przyspieszeń i amplitud składowych częstotliwościowych widma [6-10]. Niestety bezkrytyczne stosowanie podawanych w literaturze kryteriów diagnostycznych często okazuje się mało skuteczne i trudne do zastosowania.

Tematyka niniejszego artykułu dotyczy oceny stanu technicznego rdzeni transformatorów na podstawie pomiaru i analizy sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych podczas ich załączania w stanie jałowym. Podjęta problematyka stanowi rozwinięcie prowadzonych na przestrzeni kilku lat przez zespół Instytutu Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Politechniki Opolskiej prac naukowo-badawczych nad zastosowaniem i wykorzystaniem tzw. *zmodyfikowanej metody wibroakustycznej*, która polega na pomiarach i analizie drgań transformatorów w stanie pracy

nieustalonej – podczas ich załączania. Wyniki realizowanych w tym zakresie badań przedstawiono m.in. w publikacjach [11–12]. Głównym celem zrealizowanych badań, których wyniki są prezentowane w niniejszym artykule, jest propozycja nowej metody diagnostycznej, która w oparciu o wyniki analizy zmian w czasie skumulowanego widma gęstości mocy wibracji mierzonych podczas rozruchu transformatora, umożliwiała ocenę stanu technicznego jego obwodu magnetycznego.

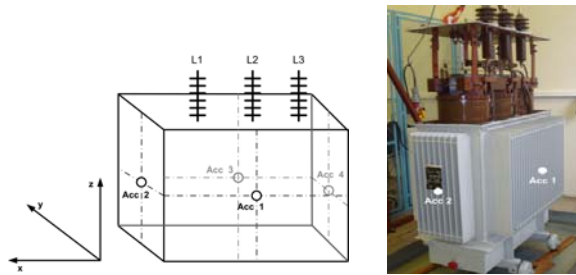
## Charakterystyka badanego obiektu i użytej aparatury pomiarowej

Przedstawione w artykule wyniki badań otrzymano na podstawie analizy zarejestrowanych w Laboratorium Diagnostyki Układów Izolacyjnych Politechniki Opolskiej sygnałów wibroakustycznych, które mierzono podczas załączania w stan pracy jałowej transformatora olejowego o mocy 250 kVA. Badany transformator zasilano od strony dolnego napięcia (400 V). Jako element załączający zastosowano trójbiegunowy rozłącznik mechaniczny o wywołaniu ręcznym, którego działanie nie wpływało na sygnał mierzonych drgań. Transformator, którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 1, charakteryzował się następującymi parametrami znamionowymi: typ - TAOB250/10, moc znamionowa - 250 kVA, napięcie dolne - 400 V, napięcie górne - 6300 V, grupa połączeń - Yzn5, napięcie zwarcia - 4,08 %, rok produkcji 1981.



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska pomiarowego-badawczego

Drgania mechaniczne diagnozowanego transformatora, zarówno bez, jak również z zamodelowanymi uszkodzeniami rdzenia, mierzono akcelerometrami typu 4514 firmy Brüel & Kjær. Zastosowane przetworniki, za pomocą uchwytów magnetycznych, umieszczono w osiach symetrii każdej z jego ścian bocznych (rysunek 2).



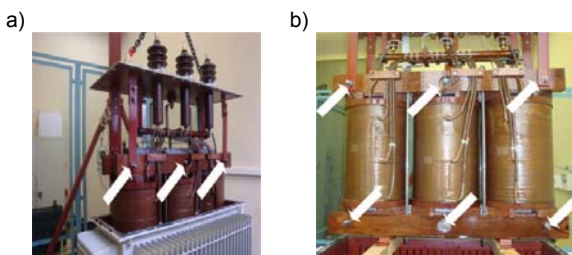
Rys. 2. Rozmieszczenie akcelerometrów na kadzi transformatora

Sygnały odbierane przez przetworniki podawano na wejście kasyty pomiarowej systemu Pulse Dyn-XI typu 3050 firmy Brüel & Kjær. Inicjację procedury pomiarowej rozpoczynano każdorazowo w chwili załączania napięcia zasilającego z użyciem funkcji trigger, którą wyzwalano za pomocą przetwornika Acc1. Do rejestracji przebiegów czasowych wibracji wykorzystano komputer pomiarowy wraz z zainstalowanym pakietem Pulse Time Data Recorder, natomiast analizę zmian w czasie skumulowanego widma gęstości mocy przyspieszenia drgań wykonano za pomocą aplikacji zaimplementowanych w środowisku Matlab.

### Metodyka wykonywania pomiarów

Próby laboratoryjne mające na celu określenie możliwości wykorzystania zmian w czasie skumulowanego widma gęstości mocy przyspieszenia drgań mierzonych w chwili rozruchu transformatora do diagnostyki rdzeni przeprowadzono na jednostce olejowej średniego napięcia. Przeprowadzony eksperyment obejmował pomiary wibroakustyczne urządzenia dla trzech przypadków jego pracy. Pierwszy dotyczył rejestracji drgań podczas załączania jednostki z poprawnie skręconym rdzeniem. Drugi związany był z pomiarami wibracji obiektu z poluzowanymi śrubami jarzma górnego (I stopień defektu), a trzeci przeprowadzono podczas rozruchu transformatora z jednoczesnym rozkręceniem śrub belek jarzma górnego i dolnego (II stopień uszkodzenia).

Pierwszą fazę modelowania uszkodzenia części aktywnej transformatora (defekt I-go stopnia) zrealizowano poprzez poluzowanie każdej z trzech śrub skręcających belki jarzma górnego (rysunek 3a). Natomiast fazę drugą (uszkodzenie II-go stopnia) wykonano poprzez jednoczesne poluzowanie wszystkich sześciu śrub skręcających jego belki jarzmowe (rysunek 3b).



Rys. 3. Widok transformatora z zamodelowanym uszkodzeniem rdzenia: a) defekt I-go stopnia, b) defekt II-go stopnia

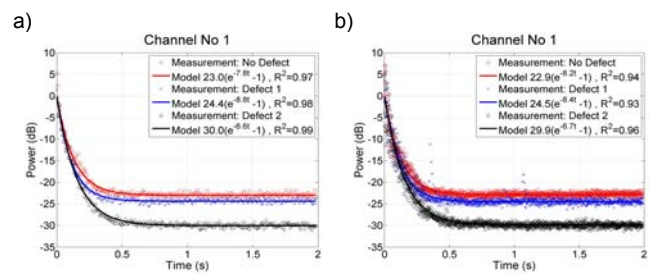
W celu eliminacji zakłóceń towarzyszących pomiarom drgań rdzenia, a wynikających z wibracji jego uzwojeń, nie symulowano defektów cewek – były one fabrycznie skręcone i nie wykazywały relatywnie znaczących oddziaływań dynamicznych na skutek przepływającego przez nie prądu. Dodatkowo, podczas rejestracji sygnałów wibroakustycznych każdorazowo wykonywano procedurę kalibracji całego toru pomiarowego z wykorzystaniem kalibratora drganiowego typu 4294 firmy Brüel & Kjær.

### Analiza uzyskanych wyników

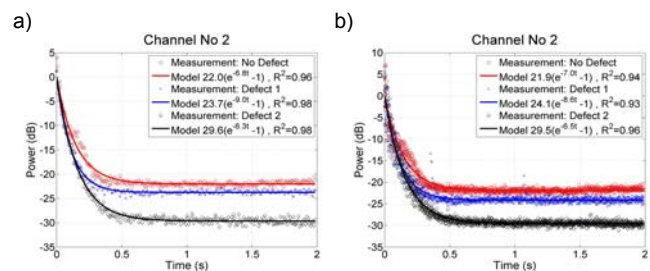
Analizę sygnałów wibroakustycznych transformatora o mocy 250 kVA przeprowadzono na podstawie zmian w czasie skumulowanej wartości widma gęstości mocy przyspieszenia drgań. Na rysunkach 4 - 7 przedstawiono wyniki uzyskane na podstawie cyfrowego przetwarzania danych zmierzonych w pozycjach Acc1 - Acc4. Charakterystyki oznaczone literą "a)" dotyczą wyników analizy drgań zarejestrowanych podczas pojedynczego załączenia urządzenia. Natomiast przebiegi oznaczone literą "b)" reprezentują rezultaty uzyskane podczas prób dziesięciokrotnego rozruchu diagnozowanego obiektu energetycznego. Dodatkowo, w celu określenia charakteru zmian wyznaczonego deskryptora, dla zgromadzonych danych pomiarowych, wyznaczono z użyciem metody Nelder-Mead funkcje aproksymujące ("Model"). Tworząc model matematyczny, dla którego wyznaczano współczynniki równania, przyjęto funkcję:

$$(1) \quad f(x) = A * e^{B*x} - 1$$

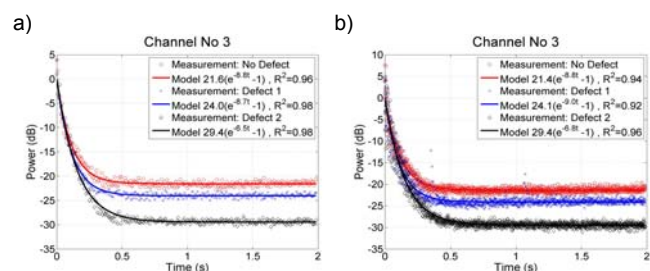
Na rysunkach przyjęto następujące oznaczenia:  $\circ$  - punkty pomiarowe przy braku defektów rdzenia,  $\times$  - punkty pomiarowe dla I st. defektu,  $\diamond$  - punkty pomiarowe dla II st. defektu.



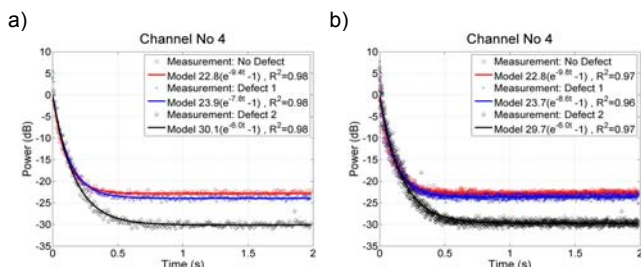
Rys. 4. Przebiegi skumulowanego widma gęści mocy drgań, zarejestrowanych w punkcie pomiarowym P1, przy załączaniu transformatora bez defektu, z defektem I stopnia i z defektem II stopnia: a) załączenie jednokrotne, b) załączenie dziesięciokrotne



Rys. 5. Przebiegi skumulowanego widma gęści mocy drgań, zarejestrowanych w punkcie pomiarowym P2, przy załączaniu transformatora bez defektu, z defektem I stopnia i z defektem II stopnia: a) załączenie jednokrotne, b) załączenie dziesięciokrotne



Rys. 6. Przebiegi skumulowanego widma gęści mocy drgań, zarejestrowanych w punkcie pomiarowym P3, przy załączaniu transformatora bez defektu, z defektem I stopnia i z defektem II stopnia: a) załączenie jednokrotne, b) załączenie dziesięciokrotne



Rys. 7. Przebiegi skumulowanego widma gęści mocy drgań, zarejestrowanych w punkcie pomiarowym P4, przy załączeniu transformatora bez defektu, z defektem I stopnia i z defektem II stopnia: a) załączenie jednokrotne, b) załączenie dziesięciokrotne

Analiza przedstawionych na rysunkach 4 - 7 przebiegów zmian w czasie wartości skumulowanej gęstości mocy przyspieszenia drgań, w zależności stopnia złożoności defektu obwodu magnetycznego transformatora, wykazała występowanie zauważalnych różnic gęstości. Porównując wzajemnie wykreślone krzywe zaobserwowano, że wraz ze zwiększaniem stopnia defektu mechanicznego rdzenia następuje osłabienie udziału energetycznego wyznaczonego parametru. Przeprowadzona analiza wykazała, że im bardziej były poluzowane śruby jarzmowe (mniejsza sztywność rdzenia), tym wartości wyznaczonego deskryptora, dla tych samych chwil czasowych, miały mniejszą wartość (np. rysunek 4). Stwierdzono również, że sygnały wibroakustyczne zarejestrowane jednocześnie na czterech ścianach bocznych kadzi transformatora cechują się analogiczną tendencją w przebiegu zmian skumulowanej gęstości mocy przyspieszenia drgań. Na uwagę zasługuje również fakt, iż wyznaczone z użyciem metody Neldera - Meada funkcje aproksymujące, określające charakter zmian w czasie widma gęstości mocy przyspieszenia drgań cechują się wysokim współczynnikiem determinacji ( $R^2 > 0,9$ ). Pozwala to stwierdzić, że przyjęta funkcja aproksymująca opisana zależnością (1) jest poprawna. Dodatkowo, wyznaczone współczynniki równania dla danych zarejestrowanych w czterech różnych punktach pomiarowych na powierzchni kadzi monitorowanego transformatora mają zbliżoną wartość.

### Podsumowanie

Analiza zmian w czasie wartości skumulowanej gęstości mocy przyspieszenia drgań, w zależności od zamodelowanego defektu rdzenia, wykazała występowanie wyraźnych różnic gęstości. Porównując między sobą otrzymane wyniki stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem stopnia przykładowego uszkodzenia konstrukcji mechanicznej obwodu magnetycznego transformatora, następuje widoczne ograniczenie udziału energetycznego skumulowanej gęstości mocy rejestrowanego sygnału wibroakustycznego. Przeprowadzone prace naukowo-badawcze wykazały, że im bardziej złożonym defektem rdzenia cechowała się diagnozowana jednostka, tym szybciej w czasie ulegały zmniejszeniu wartości wyznaczonego deskryptora (np. rysunek 6). Zauważono także, że wibracje zmierzone równolegle na czterech ścianach bocznych kadzi badanego transformatora, również przy próbach wielokrotnego jego załączenia, charakteryzują się analogiczną tendencją w przebiegu zmian skumulowanej gęstości mocy przyspieszenia drgań (rysunki 6 - 9). Zaproponowany przez autorów sposób analizy wibracji rejestrowanych z użyciem zmodyfikowanej metody wibroakustycznej umożliwia więc identyfikację zamodelowanego w warunkach laboratoryjnych defektu rdzenia transformatora elektroenergetycznego.

Autorzy pracy przedstawili potencjalną możliwość wykorzystania analizy zmian w czasie skumulowanego widma gęstości mocy przyspieszenia drgań do oceny stanu technicznego rdzeni transformatorów z użyciem zmodyfikowanej metody wibroakustycznej. Otrzymane w ramach eksperymentu rezultaty wskazują zatem na możliwość opracowania i wdrożenia w warunkach przemysłowych bezinwazyjnej metody oceny stanu technicznego konstrukcji mechanicznej obwodu magnetycznego eksploatowanych transformatorów, w szczególności tych o strategicznym znaczeniu.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER

### LITERATURA

- [1] Baird P. J., Herman H., Stevens G. C., Non-destructive measurement of the degradation of transformer insulating paper, *IEEE Trans. on Dielect. and El. Ins.*, 13 (2006), no. 1, 309-318
- [2] Bolhuis J. P., Gulski E., Smit J. J., Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation, *IEEE Trans. Power Delivery*, 17(2002), n.2, 528-536
- [3] Gubanski S. M., Boss P., Csépes G., Der Hauhanessian V., Filipini J., Guunic P., Gáfvrt U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., Zaengl W., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, *IEEE El. In. Mag*, 19 2003, n. 3, 12-18
- [4] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Zmarzły D., Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method, *IEEE Trans. on Dielect. and El. Ins.*, 16 (2009), n. 1, 214-223
- [5] Duval M., A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers", *IEEE El. Ins. Mag.*, 18 (2002), n. 3, 8-17
- [6] Bucci G., Fiorucci E., Ometto A., Rotondale E., Effects of voltage amplitude modulation on mechanical vibration in low voltage transformers", in *Proc. 2006 Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 15-25
- [7] Berler Z., Golubev A., Rusov V., Tsvetkov V., Vibro-acoustic method of transformer clamping monitoring", in *Proc. 2000 IEEE International Symposium on El. In., USA*, 263-266.
- [8] Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., Sacerdoti G., Salvatori F., Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformer", *IEEE Trans. Power Delivery*, 19 (2004), n. 1, 221-229
- [9] Garcia B., Burgos J. C., Alonso A., Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformation, part I: Theoretical foundation", *IEEE Trans. Power Delivery*, 21 (2006), n. 1, 157-163
- [10] Praca zbiorowa, Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów, wyd. *Energopomiar-Elektryka, Zakład Pomiarowo - Badawczy Energetyki*, Gliwice 2012
- [11] Borucki S., Diagnosis of Technical Condition of Power Transformers Based on the Analysis of Vibroacoustic Signals Measured in Transient Operating Conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27 (2012), n. 2, 670-676
- [12] Borucki S., Cichoń A., Skubis J., Diagnostyka stanu technicznego obwodu magnetycznego transformatorów energetycznych z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody wibroakustycznej, *PAK*, 02 (2013), 102-105

**Autorzy:** 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](mailto:s.borucki@po.opole.pl); dr hab. inż. Andrzej Cichoń, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: [a.cichon@po.opole.pl](mailto:a.cichon@po.opole.pl); prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: [s.skubis@po.opole.pl](mailto:s.skubis@po.opole.pl)