

**Eugeniusz KORNATOWSKI<sup>1</sup>, Jan SUBOCZ<sup>1</sup>, Sebastian BORUCKI<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin<sup>2</sup>POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole**Wibroakustyczna diagnostyka transformatora w stanie ustalonym****Dr inż. Eugeniusz KORNATOWSKI**

Adiunkt w Katedrze Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Autor ponad 80 publikacji i trzech patentów z zakresu algorytmów i metod przetwarzania sygnałów oraz obiektywnych kryteriów oceny ich jakości.



e-mail: korn@zut.edu.pl

**Dr hab. inż. Jan SUBOCZ**

Autor ponad 140 prac z zakresu elektrotechnologii, fizyki procesów relaksacyjnych w dielektrykach oraz diagnostyki urządzeń elektrycznych. Współtwórca systemu zarządzania transformatorami „TrafoGrade”. Specjalizuje się w stosowaniu dynamicznych pomiarów relaksacyjnych do oceny stanu technicznego izolacji. Członek Komitetu Elektrotechniki PAN, Komisji Nauk Elektrycznych o/Poznań PAN, PKME SEP, IEEE.



e-mail: jan.subocz@zut.edu.pl

**Dr inż. Sebastian BORUCKI**

Adiunkt Instytutu Elektroenergetyki, Politechniki Opolskiej. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania nowoczesnych metod pomiarowych w diagnostyce urządzeń elektrycznych i wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Zainteresowania: technika wysokich napięć, diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych przy wykorzystaniu metod nieniszczących (m.in. metody emisji akustycznej, metody wibroakustycznej, pomiarów skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego).



e-mail: s.borucki@po.opole.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono metodę analizy drgań wibroakustycznych transformatora w stanie ustalonym. Standardowe podejście do tego zagadnienia opiera się na analizowaniu widma częstotliwości wibracji rejestrowanego przy pomocy akcelerometru przytwierdzonego do kadzi transformatora. W celu poprawienia czytelności wyników pomiarów wibroakustycznych w artykule proponuje się metodę analizy względnego współczynnika zawartości częstotliwości harmonicznych  $h_{norm}(f)$ . Jak stwierdzono, na bazie przeprowadzonego eksperymentu, duże wartości  $h_{norm}$  w szerokim zakresie częstotliwości świadczą o odkształceniu uzwojeń i degradacji izolacji stąlej.

**Słowa kluczowe:** transformator, wibracje, diagnostyka.

**Vibroacoustic diagnostics of transformer in steady-state****Abstract**

The paper presents a method for vibroacoustic analysis of a transformer in the steady-state. The standard approach to this problem is based on analysis of the vibration frequency spectrum recorded with an accelerometer attached to the transformer tank. Four transformers (A, B, C and D) were tested with this method. The recorded vibration spectra are shown in Fig. 1. The analysis of the presented data may be ambiguous, as there are not many differences in vibration spectra of the tested transformers. There are significant changes in some harmonic frequencies, but it is difficult to state whether the mechanical construction condition of e.g. transformer A varies from that of C (Fig. 1). To improve legibility of measurement results the paper suggests (in Section 3) the analysis method for the relative coefficient of harmonic frequency contents  $h_{norm}(f)$ . On the basis of experiments (Figs. 2 and 3) one can state that high values of  $h_{norm}$  within the wide frequency range mean that windings are deformed and solid insulation is degraded.

**Keywords:** transformer, vibration characteristic, diagnostics.

**1. Wstęp**

Czas użytkowania transformatora średniej i dużej mocy, liczony od wyprodukowania, przez instalację po okres nominalnej eksploatacji, może obfitować w udary mechaniczne w czasie transportu i instalacji, a następnie: starzenie izolacji, wpływ czynników

termicznych i stanów nadmiernego obciążenia (zwarć). Czynniki te mogą powodować deformację uzwojeń i zmiany w sile docisku rdzenia. W dalszej perspektywie, wymienione defekty mechaniczne, mogą skutkować wzrostem drgań (wibracji) uzwojeń i rdzenia oraz mechanicznego zmęczenia izolacji. Konsekwencją degradacji izolacji mogą być dalej zwarcia międzyzwojowe, wyładowania niezupełne i emisja gazów [1]. Tak więc, znaczenie wczesnego zdiagnozowania deformacji uzwojeń i stanu mechanicznego rdzenia – jest oczywiste. Naturalnie od dawna istnieją i są często wykorzystywane technologie diagnozowania zmian geometrii transformatora, a w szczególności deformacji uzwojeń, np. FRA, LRM [2, 3]. W ostatnich latach pojawił się szereg publikacji, np. [4, 5], w których opisuje się nowoczesne aplikacje pozwalające na diagnostykę on-line lecz, jak do tej pory, proponowane technologie nie wyszły poza zakres testowania off-line.

Wibroakustyczne badanie stanu mechanicznego transformatora, w tym rejestrowanie drgań na powierzchni kadzi w stanie ustalonym, jest źródłem podstawowych informacji o mechanicznym stanie uzwojeń i rdzenia [6, 7]. Analiza wibroakustyczna w stanie ustalonym jest komplementarną techniką w stosunku do FRA i LRM i może być stosowana online w okresach między kolejnymi przeglądami konserwacyjnymi umożliwiając skuteczne zapobieganie katastrofalnym awariom. W publikacjach z ostatnich kilku lat szeroko dyskutuje się metody analizy drgań wibroakustycznych transformatorów dużej mocy. W pracach [8, 9] analizuje się różne modele drgań (sygnałów) wibroakustycznych kadzi transformatora z uwzględnieniem zmiennych warunków pracy, takich jak np. prąd obciążenia i temperatura. W publikacjach [10, 11], w oparciu o badania laboratoryjne transformatorów wyłączonych z eksploatacji, szeroko dyskutuje się zależność amplitudy drgań od prądu obciążenia. Autorzy pracy [6], z kolei, prezentują wibroakustyczną technikę diagnozowania opartą o analizę porównawczą z transformatorem „referencyjnym” (nowym), z transformatorem tego samego typu lub z uśrednionymi wynikami pomiarów wielu transformatorów tego samego typu i o podobnym czasie użytkowania. Szczególnie interesująca, z punktu widzenia diagnozowania on-line jest praca [12], w której zaprezentowano analizę wibracji transformatorów w czasie normalnej eksploatacji. Niestety, ta i inne prace, nie zawierają wniosków o ogólnym charakterze: badania prowadzono tylko dla jednego typu transformatorów, nie pokazano, jak zależą rejestrowane drgania od lokalizacji akcelerometru na powierzchni kadzi.

W przeważającej części cytowanych wyżej prac diagnozowanie wibracji opiera się na analizie Fouriera przyspieszenia rejestrowanego akcelerometrem lub wykorzystuje się SFFT do analizy częstotliwościowo - czasowej.

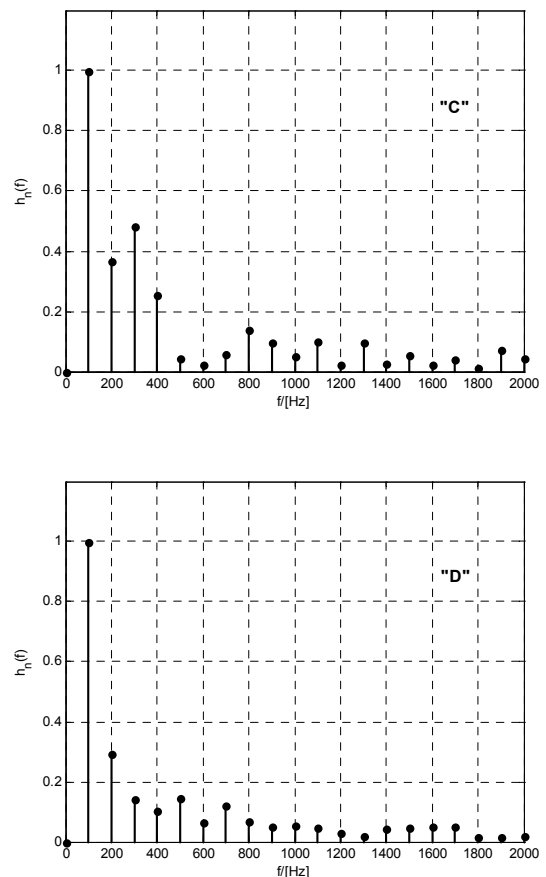
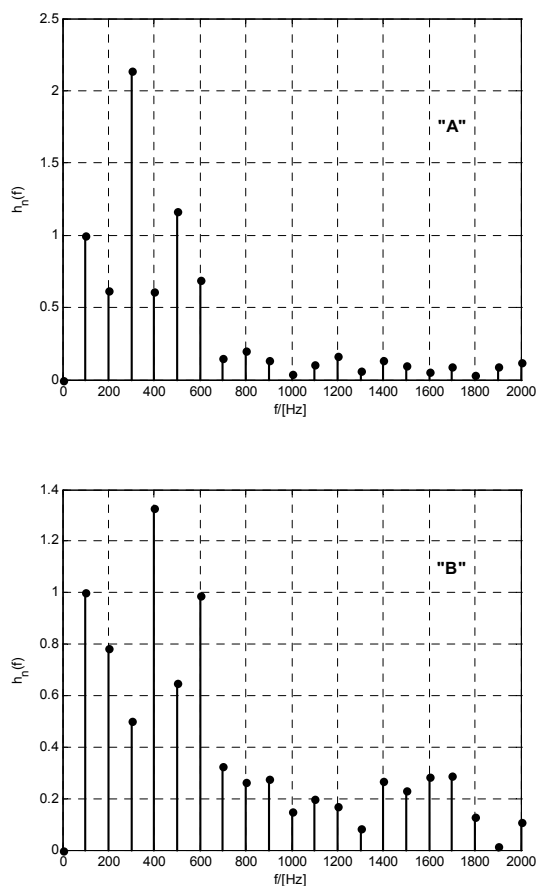
**2. Analiza widma wibracji konstrukcji mechanicznej transformatora**

Wibroakustyczna diagnostyka transformatorów opiera się na obserwacji i analizie widma częstotliwości drgań (przyspieszenia)

całej konstrukcji. W przypadku diagnostyki urządzeń będących w eksploatacji drgania rejestruje się przy pomocy akcelerometru przytwierdzonego do kadzi transformatora. Nie ma przy tym ustalonego poglądu na temat konkretnych miejsc lokalizacji akcelerometru. W pracy [13] rozpatruje się, co prawda, pewne aspekty tego problemu: autorzy publikacji konkludują swoje rozważania wnioskiem, iż chcąc zachować powtarzalność pomiarów dla transformatorów jednego typu dokładność lokalizacji czujnika wibracji musi być zachowana z tolerancją 5 cm. Podobnie, jak w wielu innych pracach, wyniki badań prezentuje się w postaci wykresu widma częstotliwości rejestrowanego sygnału. Proponuje się przy tym, aby na osi Y wykresów zaznaczać amplitudy częstotliwości harmonicznych w skali liniowej. Pogląd ten wydaje się być słusznym, bowiem zastosowanie skali logarytmicznej znacznie zmniejsza obserwowaną (subiektywną) dynamikę wizualizowanych przebiegów. Trudno jednak zgodzić się z poglądem, iż amplitudy poszczególnych harmonicznych powinno się podawać jako wartości napięć na wyjściu przedwzmacniacza sygnału czujników. Szczególnie w analizie porównawczej, a o takiej w [13] mowa, nie można przecież wykluczyć chociażby różnic w sposobie umocowania czujnika, co w efekcie może prowadzić do znaczących różnic w wartościach rejestrowanego napięcia wyjściowego czujnika.

Autorzy tej pracy proponują, zgodnie z [13], analizować widmo sygnału wibracji przyjmując dla amplitud skalę liniową, ale poszczególne amplitudy normalizować względem podstawowej harmonicznej drgań. Zabieg ten, zdaniem autorów, urealnia wniosek płynący z analizy porównawczej dotyczącej kilku egzemplarzy transformatorów jednego typu.

Przykłady zarejestrowanych widm częstotliwościowych wibracji dla stanu ustalonego bez obciążenia czterech transformatorów tego samego typu (TOR 16000/110, producent Elta), o tym samym czasie eksploatacji (rok prod. 1984) pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Porównanie widma wibracji czterech transformatorów typu TOR 16000/110  
Fig. 1. Comparison of vibration signals for four transformer of type TOR 16000/110

Drgania mechaniczne mierzono akcelerometrem Brüel&Kjær 4513-B002 przymocowanym w środkowej części powierzchni bocznej kadzi. Sygnał pomiarowy wzmocniono wzmacniaczem pomiarowym Brüel&Kjær Nexus 2693, a następnie zarejestrowano z wykorzystaniem komputerowej karty CH 3160 firmy Acquittek. W każdym przypadku czas pomiaru wynosił 20 sekund.

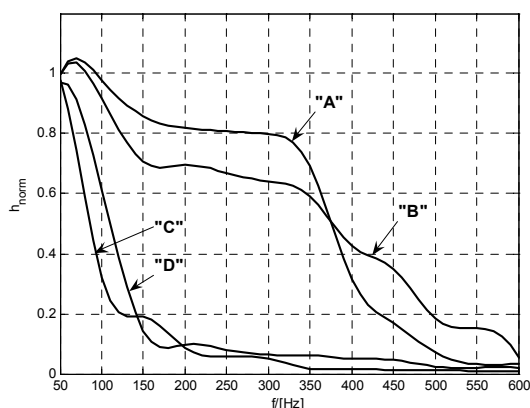
Jeżeli analiza widma wibracji miałaby służyć określeniu stanu mechanicznego konstrukcji transformatorów, to na podstawie pokazanych wykresów można wnioskować, że prawdopodobnie transformatory „C” i „D” są w lepszym stanie, o czym może świadczyć wyższe pasmo częstotliwości drgań. Względne amplitudy drgań powyżej ok. 400 Hz są znacznie mniejsze niż w zakresie do 400 Hz. W przypadku transformatorów „A” i „B” pasmo częstotliwości drgań o znaczących amplitudach poszerza się do ok. 600 Hz.

Zachodzi jednak pytanie: Który (które) transformator charakteryzuje się złym stanem konstrukcji mechanicznej i, co najistotniejsze, czy któryś z badanych transformatorów jest w stanie groźnym awarią katastrofalną? Jednoznacznej odpowiedzi, na tak postawione pytanie, niestety trudno jest udzielić wyłącznie na podstawie analizy wykresów pokazanych na rysunku 1. Brak jest istotnych przesłanek, aby autorytatywnie twierdzić, że szacunkowa różnica w szerokości pasm częstotliwości drgań o znaczącej amplitudzie, wynosząca ok. 200Hz, może mieć decydujące znaczenie.

### 3. Zmodyfikowana analiza widma wibracji

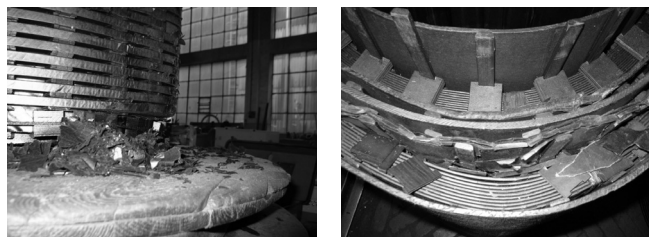
Analiza wibroakustyczna, jako jedna z alternatywnych metod szacowania stanu mechanicznego transformatora, opiera się na analizie widma wibracji w zakresie częstotliwości akustycznych. Jednoznaczność interpretacji wyników analizy widma wibracji ma zatem kluczowe znaczenie jeśli chodzi o zasadność stosowania tej metody. Czyniąc takie założenie, autorzy niniejszej pracy proponują

analizowanie widma nie w sposób bezpośredni (rys. 1), lecz wykorzystując prezentowanie wibracji w postaci zmian współczynnika względnej zawartości częstotliwości harmonicznych w funkcji częstotliwości. Podobną metodę stosuje się od dawna do szacowania jakości przetworników elektroakustycznych [14, 15]. Biorąc zatem za podstawę pomiar wibracji oszacowano numerycznie zmiany względnego współczynnika zawartości harmonicznych  $h_{norm}$  w funkcji częstotliwości dla poprzednio rozpatrywanych transformatorów. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg zmian współczynnika  $h_{norm}$  dla transformatorów A, B, C i D  
Fig. 2. Changes of the coefficient  $h_{norm}$  for transformers A, B, C and D

Krzywe dla transformatorów A i B znacząco różnią się od przebiegów uzyskanych dla widma wibracji transformatorów C i D. Analizując pokazane przebiegi można stwierdzić, że w przypadkach A i B zawartość częstotliwości harmonicznych drgań utrzymuje się na wysokim poziomie w znacznie szerszym zakresie częstotliwości niż dla transformatorów C i D. W przedziale częstotliwości od 200 Hz do 400 Hz różnice w wielkości  $h_{norm}$  są ok. ośmiokrotne. Można zatem sądzić, zdaniem autorów, że transformatory A i B charakteryzują się złym stanem technicznym konstrukcji mechanicznej, natomiast stan C i D jest znacznie lepszy. Tę obserwację potwierdzają wyniki badań analizowanych transformatorów przeprowadzone metodą „TrafoGrade” wykonane w lipcu 2008 roku na zlecenie firmy „Vattenfall Network Services”. Jak wynika z protokołów tych badań w przypadku transformatorów A i B stwierdzono m. in. znaczną degradację izolacji stałej - kilkunastoprocentowa degradacja celulozy oszacowana na podstawie badania obecności 2FAL. Defekt tego rodzaju może być przyczyną, w niedalekiej perspektywie czasowej, awarii katastrofalnej. Oprócz tego transformator B rozmontowano; stan konstrukcji po demontażu pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Transformator „B” po demontażu  
Fig. 3. Transformer „B” after disassembly

Wizualna ocena stanu rozmontowanego transformatora B potwierdza wnioski wynikające z analizy wibroakustycznej z zastosowaniem współczynnika  $h_{norm}$ . Stwierdzono bowiem znaczne odkształcenia uzwojeń i zły stan izolacji stałej. A zatem, wyniki badań wibroakustycznych bezpośrednio, w tym przypadku, przekładają się na wnioski wynikające z badania metodą „TrafoGrade” i wizualną ocenę stanu transformatora B po demontażu.

## 4. Podsumowanie

Nadmierne wibracje konstrukcji transformatora mogą być wynikiem degradacji izolacji stałej i odkształcenia uzwojeń. Te z kolei mogą doprowadzić, w skrajnym przypadku, do awarii katastrofalnej. Dzięki odpowiednio dobranym metodom diagnostycznym możliwa jest racjonalna eksploatacja transformatora i zapobieganie kosztownemu usuwaniu awarii. Jedną z takich metod jest diagnostyka wibroakustyczna, w większości przypadków oparta na analizie widma częstotliwości drgań konstrukcji transformatora. Niezwykle istotna jest przy tym metoda wykorzystywana do interpretacji charakterystyki spektralnej pomierzonych drgań (przyspieszenia).

Zaproponowana w artykule metoda analizy zmian współczynnika względnej zawartości częstotliwości harmonicznych w funkcji częstotliwości  $h_{norm}(f)$  może stanowić, zdaniem autorów, efektywne narzędzie diagnostyki wibroakustycznej. Niewielka złożoność algorytmu wyznaczania  $h_{norm}$  powoduje, że proponowana metoda z powodzeniem może być wykorzystywana do badań on-line.

Praca naukowa finansowana przez MNiSW ze środków na naukę w latach 2009 – 2010, jako projekt badawczy własny nr N N505 364 336.

## 5. Literatura

- [1] Antipov G. V., Gorshunov V. Y., Malinowski V. N., Sklyarov A. P., Khublarov N. N.: System for diagnosing the mechanical condition of the windings of high-power double-wound transformers. *Measurements Technology*, vol. 39, no. 9, 1996.
- [2] Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis. Report of CIGRE Working Group A2.26, 2008.
- [3] Banaszak Sz., Szrot M.: Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń w warunkach kontrolowanej deformacji. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, 2008.
- [4] Barbare A., Cannata F., Caprio G., Sacchetti S., Zafferrani G.: Ennel-diagnosis of on- and off-line large transformers. *CIGRE Symposium*, Berlin, 1993.
- [5] Birlasekaran S., Fetherston F.: Off/On-Line FRA condition monitoring technique for power transformer. *IEEE Power Engineering Review*, vol. 19, 1999.
- [6] Bartoletti C., Desiderio M., Do Carlo D., Fazio G.: Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, 2004.
- [7] Borucki S., Cichoń A., Subocz J., Kornatowski E.: Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energtrycznego w stanie pracy nieustalanej. *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 11b, 2010.
- [8] Both C., McDonald J. R., Aresi R.: The use of neural networks for the estimation and classification of vibration behavior in power transformers. *American Power Conference*, 1995.
- [9] Garcia B., Burgos C. J., Alonso A. M.: Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformation. Part I: Theoretical foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [10] Garcia B., Burgos C. J., Alonso A. M.: Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformation. Part II: Experimental verification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [11] Shenghang J., Yongfen L., Yanming L.: Research on extraction technique of transformer core fundamental frequency vibration based on OLCM. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [12] Berler Z., Golubev A., Rusov V.: Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring. *2000 IEEE International Symposium on Electrical Isulation, USA*, 2000.
- [13] Shengchang J., Lingyu Z., Yanming L.: Study on transformer tank vibration characteristics in the field and its applications. *Przegląd Elektrotechniczny*, r. 87, nr 2, 2011.
- [14] Polskie Normy: PN-EN 60268-5:1998 i PN-EN 60268-5:2005.
- [15] Dobrucki A.: Przetworniki elektroakustyczne, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2007.