

Eugeniusz KORNATOWSKI*

ZMODYFIKOWANA METODA ANALIZY WIDMA DRGAŃ KONSTRUKCJI TRANSFORMATORÓW DUŻEJ MOCY

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 $h_{\text{norm}}(f)$. Jak stwierdzono, na bazie przeprowadzonych eksperymentów, duże wartości h_{norm} w szerokim zakresie częstotliwości mogą świadczyć o odkształceniu uzwojeń i degradacji izolacji stałej.

1. WSTĘP

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów (CPS) jest dziedziną, która dynamicznie rozwija się od przeszło trzydziestu lat, a początki rozwoju jej podstaw matematycznych datuje się na przełom siedemnastego i osiemnastego wieku. W okresie od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku zachodzi ścisły związek między nowo opracowywanymi algorytmami i wynikami badań teoretycznych, ich zastosowaniem w nowych technologiach oraz wprowadzaniem tych technik do nowych dziedzin. Najbardziej popularne rozumienie cyfrowego przetwarzania sygnałów dotyczy liniowych i nieliniowych operacji dokonywanych na sygnale reprezentującym obraz i dźwięk. W miarę rozwoju technologii układów scalonych i mocy obliczeniowej komputerów zakres zastosowań uległ znacznemu rozszerzeniu. Współcześnie nie budzi zdziwienia wykorzystanie złożonych algorytmów przetwarzających sygnał dyskretnych w takich dziedzinach jak biomedycyna, akustyka, hydrolokacja, radiolokacja, sejsmologia czy nukleonika.

Punktem zwrotnym w zakresie rozwoju metod CPS było opracowanie w 1965r. efektywnego sposobu obliczania transformat Fouriera. Klasa tych algorytmów stała się znana pod nazwą szybkiego przekształcenia Fouriera (Fast Fourier Transform: FFT). Implikacje powstania algorytmów FFT były wielorakie. Czas wykonywania wielu algorytmów przetwarzania sygnałów opracowanych przedtem dla komputera znacznie przekraczał czas trwania przetwarzanego sygnału. Algorytmy FFT zmniejszyły czas obliczania transformat Fouriera o kilka rzędów wielkości.

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin.

Umożliwiało to realizację coraz bardziej zaawansowanych algorytmów współbieżnie z działaniem badanego systemu.

Rozwój technologiczny był bezpośrednią przyczyną tego, iż współczesne zastosowanie algorytmów CPS nie ogranicza się głównie do poprawiania jakości sygnałów jedno- i dwuwymiarowych. Zasada działania współcześnie wykorzystywanych przyrządów pomiarowych czy rejestratorów danych pomiarowych opiera się, w zdecydowanej większości przypadków, na analizie lub rejestracji sygnału dyskretnego. Konsekwencją tego jest konieczność bezpośredniego wykorzystywania wyłącznie algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów bez wykorzystywania narzędzi matematycznych dobrze znanych z techniki analogowej. Pojawiło się wiele narzędzi właściwych wyłącznie sygnałom dyskretnym, np.: transformata Z, filtracja cyfrowa, analiza falkowa, dyskretne przekształcenie Hilberta itd. Wielość dostępnych obecnie narzędzi analizy i przetwarzania sygnałów dyskretnych powoduje, iż interpretacja otrzymywanych numerycznie wyników staje się wieloznaczna. W zależności od wykorzystywanych algorytmów, ich definicji i przede wszystkim sposobu implementacji, otrzymywane rezultaty mogą prowadzić do sprzecznych wniosków.

Przykładem problemu, do rozwiązywania którego stosowane są narzędzia związane z CPS jest analiza wibroakustyczna stanu mechanicznej konstrukcji transformatorów dużej mocy. Waga tego zagadnienia jest niezwykle poważna wzięwszy pod uwagę fakt wysokiej ceny tych urządzeń, a możliwość skutecznego i trafnego szacowania jakości mechanicznej transformatora pracującego od kilkudziesięciu lat jest nie do przecenienia.

2. MONITOROWANIE DRGAŃ TRANSFORMATORÓW

Bezpośrednią przyczyną 12 do 15% awarii transformatorów jest deformacja uzwojeń spowodowana działaniem sił elektrodynamicznych podczas zwarcia [1]. Te zmiany w geometrii konstrukcji mogą doprowadzić do wzrostu drgań uzwojeń i w konsekwencji do mechanicznego zmęczenia izolacji stałej. Finalnie izolacja ulega degradacji i pojawiają się zwarcia międzyzwojowe, wyładowania niepełne i emisja gazów [2]. 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 [3]. W ostatnich latach pojawił się szereg publikacji, 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 nieustalonym, jest źródłem podstawowych informacji o mechanicznym stanie uzwojeń i rdzenia [4]. Analiza

wibroakustyczna w stanie ustalonym jest komplementarną techniką w stosunku do FRA i LRM i może być stosowana on-line 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 publikacji [5], 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 [7], 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 np. od lokalizacji akcelerometru na powierzchni kadzi.

Booth we współpracy z MIT [8] proponuje monitorowanie wibracji z wykorzystaniem sieci neuronowej z propagacją wsteczną kontrolując amplitudy trzech harmonicznych (100, 200 i 300Hz). Zaproponowane przez Booth’a rozwiązanie bazuje na wykorzystaniu jako danych wejściowych algorytmu wielkość prądu obciążenia i temperaturę pomierzoną w kilku miejscach konstrukcji transformatora.

Aschwanden [9] monitoruje wibracje analizując dziewiętnaście pierwszych harmonicznych z wykorzystaniem samoorganizującej sieci Kohonen’a.

Mechefske [10] opisuje doświadczenia z analizy porównawczej dwóch bliźniaczych transformatorów, z których jeden ma poluzowane uzwojenia, analizując różnice między amplitudami poszczególnych harmonicznych widma wibracji i czas do osiągnięcia stanu ustalonego po zmianie obciążenia.

Wreszcie firma Cutler-Hammer [11] oferuje system detekcji deformacji uzwojeń i poluzowania mocowań w rdzeniu bazujący na pomiarze wibracji w dwunastu punktach w górnej części kadzi. Pomiary dokonywane są w stanie jałowym i przy dużym obciążeniu.

W przeważającej części cytowanych wyżej prac diagnozowanie wibracji opiera się na analizie Fouriera przyspieszenia rejestrowanego akcelerometrem przytwierdzonym do kadzi pracującego transformatora lub wykorzystuje się SFT do analizy czasowo-częstotliwościowej. Wykorzystanie dyskretnej transformaty Fouriera do analizy widmowej jest oczywiste, choć jej stosowanie musi być poparte spełnieniem wielu założeń natury metrologicznej i matematycznej.

3. WIDMO DRGAŃ KONSTRUKCJI TRANSFORMATORA

Wibroakustyczna diagnostyka transformatorów opiera się na obserwacji i analizie widma 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 [12] rozpatruje się, co prawda, pewne aspekty tego problemu, ale autorzy tej 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 pionowej wykresów zaznaczać amplitudy częstotliwości harmoniczných w skali liniowej. Pogląd ten wydaje się być słusznym, bowiem zastosowanie skali logarytmicznej znacznie zmniejsza obserwowaną (subiektywną) dynamikę wizualizowanych krzywych. Trudno jednak zgodzić się z poglądem, iż amplitudy poszczególnych harmoniczných powinno się podawać jako wartości napięć na wyjściu przedwzmacniacza sygnału czujników. Szczególnie w analizie porównawczej, a o takiej w [12] 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.

Zgodnie z [12] w tej pracy proponuje się, aby analizować widmo sygnału wibracji przyjmując dla amplitud skalę liniową, ale poszczególne amplitudy normalizować względem podstawowej harmoniczných drgań. Zabieg ten, zdaniem autora, urealnia wnioski płynące z analizy porównawczej dotyczącej kilku egzemplarzy transformatorów jednego typu.

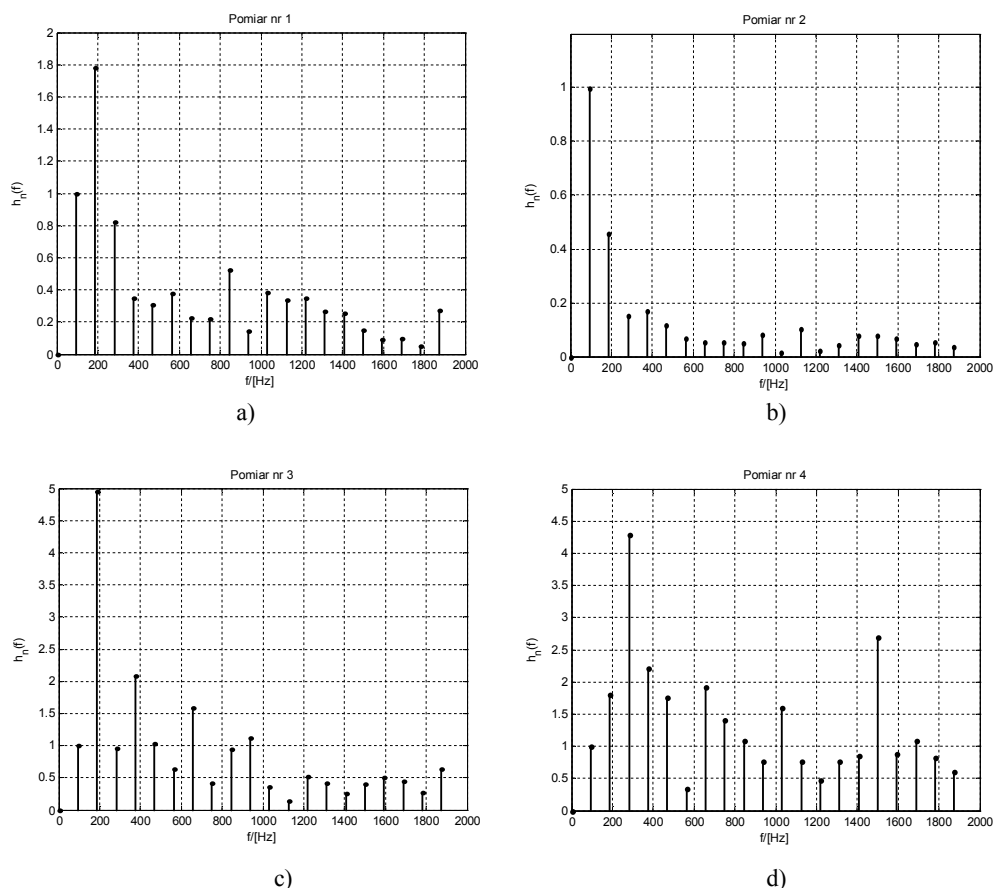
3.1. Badania eksperymentalne

Możliwość wykorzystania analizy uśrednionego widma wibracji do szacowania stanu mechanicznego konstrukcji transformatora sprawdzono wykonując następujący eksperyment:

Transformator typu RTDX 160000/110 pracował z około 75. procentowym obciążeniem. Do konstrukcji przełącznika zaczepów przytwierdzono akcelerometr cyfrowego rejestratora SVAN 965 firmy Svantek. Symulację zwiększonych drgań przeprowadzono włączając i wyłączając wentylatory chłodzące. Jak bowiem stwierdzono wcześniej, z powodu znacznego stopnia zużycia systemu chłodzącego praca wentylatorów powodowała wzrost wibracji konstrukcji transformatora. Dysponując wynikami czterech pomiarów (rejestracji sygnału wykonanych w kilkunastominutowych odstępach czasowych) należało na podstawie analizy

uśrednionego widma drgań stwierdzić, w przypadku którego z pomiarów były włączone wentylatory.

Wyniki pomiarów: uśrednione i znormalizowane widmo drgań, pokazano na rysunku 1.

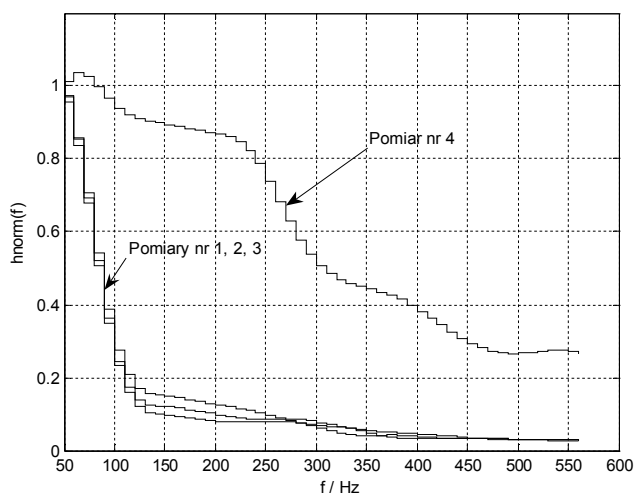


Rys. 1. Cztery wyniki pomiaru uśrednionego widma drgań konstrukcji transformatora

Jednoznaczność interpretacji wyników pokazanych na rysunku 1 jest dyskusyjna, a skuteczność analizy wyników pomiaru widma wibracji ma kluczowe znaczenie jeśli chodzi o zasadność stosowania tej metody w szacowaniu stanu mechanicznego konstrukcji transformatora. Mając ten fakt na uwadze proponuje się analizowanie widma nie w sposób bezpośredni (rys. 1), lecz wykorzystując prezentowanie wibracji w postaci zmian współczynnika względnej zawartości częstotliwości harmonicznych w funkcji częstotliwości:

$$h_{\text{norm}}(f) = \frac{\sum_{F=f}^{F_{\text{max}}} h^2(F)}{\sum_{F=F_{\text{min}}}^{F_{\text{max}}} h^2(F)} \quad (1)$$

Podobna metoda stosowana jest od dawna do szacowania jakości przetworników elektroakustycznych. Biorąc zatem za podstawę pomiar widma wibracji oszacowano numerycznie zmiany względnego współczynnika zawartości harmoniczných h_{norm} w funkcji częstotliwości dla poprzednio wykonanych czterech pomiarów. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg zmian współczynnika h_{norm} dla czterech pomiarów drgań transformatora

W przedstawionym eksperymencie przyjęto w (1) $F_{\text{max}} = 550$ Hz, $F_{\text{min}} = 50$ Hz, natomiast zakres częstotliwości f , dla których określano h_{norm} to przedział od 50 Hz do 550 Hz z krokiem wynoszącym 10 Hz.

Analizując wykres pokazany na rysunku 2 można jednoznacznie stwierdzić, że przebieg „Pomiar 4” reprezentuje przypadek zwiększonych drgań konstrukcji transformatora. Wniosek ten potwierdza się w metodologii wykonanego eksperymentu: w przypadku „Pomiaru 4” zostały włączone wentylatory chłodzące. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że w czasie pomiarów 1, 2 i 3 obciążenie wahało się i tylko w przybliżeniu wynosiło 75% obciążenia nominalnego, a mimo to przebiegi reprezentujące zmiany $h_{\text{norm}}(f)$ dla tych pomiarów w znacznym stopniu pokrywają się.

4. WNIOSKI

W artykule zaproponowano metodę wibroakustycznego badania jakości konstrukcji mechanicznej transformatorów dużej mocy opartą na analizie zmian współczynnika względnej zawartości częstotliwości harmonicznych w funkcji częstotliwości $h_{\text{norm}}(f)$. Opisano eksperyment polegający na symulacji nadmiernych drgań wymuszanych przez włączenie wentylatorów chłodzących wiedząc, iż ich zły stan techniczny musi spowodować zwiększenie wibracji. Szacowanie widma wibracji opisaną metodą porównano z klasyczną analizą dyskretną transformaty Fouriera zarejestrowanych sygnałów. Badanie $h_{\text{norm}}(f)$, w porównaniu z analizą widma wibracji wprost na podstawie DFT, gwarantuje znacznie lepszą czytelność uzyskiwanych wyników. Znaczenie tego faktu trudno przecenić, bowiem postawienie jednoznacznej diagnozy co do stanu mechanicznego badanych w rzeczywistości transformatorów może umożliwić zapobieganie niezwykle kosztownym i niebezpiecznym awariom katastrofalnym. Wzrost drgań konstrukcji transformatora bowiem może być spowodowany trwałym odkształceniem uzwojeń i degradacją izolacji stałej.

LITERATURA

- [1] Sokolov V., Vanin B., Experience with detection and identification of winding buckling in power transformers, Proc. 68th Annu. Int. Conf. Doble Clients, 2001.
- [2] Antipov G. V., Gorshunov V. Y., Malinovskii V. N., Sklyarov A. P., Khublarov N. N., System for diagnosing the mechanical condition of the windings of high-power double-wound transformers, Meas. Techn., vol. 39, no. 9, pp. 93–97, 1996.
- [3] Banaszak Sz., Szrot M.: Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń w warunkach kontrolowanej deformacji. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10. 2008
- [4] Borucki S., Cichoń A., Subocz J., Kornatowski E.: Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energetycznego w stanie pracy nieustalanej. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11b, 2010.
- [5] 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.
- [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] Berler Z., Golubev A., Rusov V.: Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring. 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, USA, 2000.
- [8] Booth C., McDonald J. R., Aresi R., The use of neural networks for the estimation and classification of vibration behavior in power transformers, Proc. Amer. Power Conf., pp. 1132–1135, 1995.
- [9] Aschwanden T. H., Häsig M., Fuhr J., Lorin P., Houhanessian V.D., Zaengl W., Schenk A., Zweiacker P., Piras A., Dutoit J., Development and application of new

- condition assessment methods for power transformers, Proc. Cigré 1998 Session Papers. Group Transformers, Paris, France, 2000. vibration characteristics to winding looseness, Non Destruct. Test. Cond. Monitor., vol. 37, no. 8, pp. 599–604, Aug. 1995.
- [10] Mechefske C. K., Correlating power transformer tank
- [11] Golubev A., Romashkov A., Tsvetkov V., Sokolov V., Majakov V., Capezio O. H., Rojas C., Rusov V., On-line vibro-acoustic alternative to the, Proc. TechCon Annu. Conf. TJ/H2b, New Orleans, LA, pp. 110–04, Feb. 18–19, 1999 frequency response analysis and on-line partial discharge measurements on large power transformers.
- [12] 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.

MODIFIED METHOD FOR VIBRATION SPECTRUM ANALYSIS OF HIGH-POWER TRANSFORMERS STRUCTURE

The paper presents a method of vibroacoustic analysis of transformer in a steady-state. The standard approach to this issue is based on vibration frequency spectrum analysis recorded with accelerometer attached to transformer's tank. Four cases were tested with this method and recorded vibration spectra. The analysis of presented data may be ambiguous, as there are not many differences for vibration spectra of tested transformer.

To improve legibility of measurement results the paper suggests analysis method of relative coefficient of harmonic frequency contents $h_{\text{norm}}(f)$. It was found on the base of experiment that high values of h_{norm} in wide frequency range mean that windings are deformed and solid insulations degraded.