

Eugeniusz KORNATOWSKI*

WIBROAKUSTYCZNA DIAGNOSTYKA TRANSFORMATORÓW W STANIE NIEUSTALONYM

W artykule przedstawiono wibroakustyczną metodę diagnozowania stanu mechanicznego części aktywnej transformatora. Proponowana metoda opiera się na analizie zmian w dziedzinie czasu znormalizowanej wartości przyspieszenia drgań zarejestrowanych na powierzchni kadzi. Analizie podlega przy tym stan nieustalanej pracy nieobciążonego transformatora w czasie kilku pierwszych sekund od załączenia zasilania. Metodę oparto na algorytmie obliczania modułu sygnału analitycznego dla rzeczywistego sygnału reprezentującego zarejestrowane przyspieszenie drgań. Prezentowaną metodę przetestowano w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Badania wykazały szczególną przydatność prezentowanej metody w połączeniu z metodą FRA (Frequency Response Analysis) do diagnozowania defektów uzwojeń.

1. WSTĘP

Rzetelna i szczegółowa diagnostyka transformatorów dużej mocy jest jednym z podstawowych elementów sprawnego funkcjonowania systemu energetycznego kraju. Tylko pełna informacja o stanie technicznym populacji transformatorów, wraz z wiedzą dotyczącą poszczególnych urządzeń, gwarantuje ekonomiczne i technicznie uzasadnione zarządzanie systemem. Problem w Polsce jest tym bardziej istotny, ponieważ czas eksploatacji większości transformatorów osiągnął graniczną wartość 30. lat [2] i przy jednoczesnym braku inwestycji w nową infrastrukturę skutkuje coraz większym ryzykiem awarii.

Jednym z bardzo ważnych pól implementacji metod diagnostycznych jest ocena stanu części aktywnej transformatora, tzn.: uzwojeń, rdzenia i przepustów. Stosuje się w tym przypadku całe spektrum metod pomiarowych: od elektrycznych (pomiar rezystancji uzwojeń, przekładni, impedancji zwarcia itd.), przez termowizyjne badanie stanu przepustów do chemicznych (analiza gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym).

Niektóre ze stosowanych współcześnie metod diagnostycznych są jeszcze w fazie rozwoju. Do tej grupy można zaliczyć detekcję deformacji uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA (Frequency Response Analysis) i metodę wibroakustycznej oceny stanu technicznego rdzenia i uzwojeń. Metody te

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

stosowane autonomicznie nie gwarantują postawienia diagnozy ze stuprocentową pewnością, ale konfrontacja wyników pomiarów uzyskanych tymi dwiema metodami znacząco zwiększa pewność wniosków. Szczególnie dynamicznie w ostatnich latach rozwijana jest diagnostyka wibroakustyczna przy czym, jak do tej pory, brak jest ustalonego poglądu na temat standardu technologii wykonywania pomiarów oraz norm świadczących o stanie technicznym części aktywnej transformatora. Co prawda, przed trzydziestu laty [9], podjęto próbę ujęcia normami wibroakustyczną diagnostykę transformatorów, ale jak wykazują współczesne badania, zalecenia zawarte w cytowanej literaturze są zbyt „liberalne” i ich praktyczne stosowanie nie gwarantuje zapobiegania awariom katastrofalnym.

Większość proponowanych współcześnie metod wibroakustycznego diagnozowania transformatorów opiera się na analizie widma drgań rdzenia lub kadzi w stanie pracy ustalonej z obciążeniem lub w stanie jałowym. Natomiast przedmiotem niniejszej pracy jest metoda analizy drgań kadzi transformatora w stanie nieustalonym, w ciągu kilku pierwszych sekund od załączenia nieobciążonego transformatora. Dzięki takiemu badaniu możliwe jest oszacowanie stanu technicznego rdzenia i uzwojeń łącznie. Skuteczność proponowanej metody została zweryfikowana eksperymentalnie, co opisano w końcowej części artykułu.

2. METODA WIBROAKUSTYCZNEGO DIAGNOZOWANIA STANU KONSTRUKCJI MECHANICZNEJ TRANSFORMATORÓW

Wibroakustyczne badanie stanu mechanicznego transformatora, w tym rejestrowanie drgań na powierzchni kadzi, jest źródłem podstawowych informacji o mechanicznym stanie uzwojeń i rdzenia [5]. Analiza wibroakustyczna może być komplementarną techniką w stosunku do FRA, stosowaną on-line w okresach między kolejnymi przeglądami konserwacyjnymi lub w ich trakcie, umożliwiając skuteczne zapobieganie awariom katastrofalnym. W publikacjach z ostatnich kilku lat szeroko dyskutuje się metody analizy drgań wibroakustycznych transformatorów dużej mocy. W pracach [3] i [1] poddano analizie różne modele drgań (sygnałów) wibroakustycznych kadzi transformatora z uwzględnieniem zmiennych warunków pracy, takich jak np. prąd obciążenia i temperatura. W publikacji [5], w oparciu o badania laboratoryjne transformatora wyłączanego z eksploatacji, dyskutuje się właściwości częstotliwościowego widma drgań konstrukcji transformatora w stanie nieustalonym.

2.1. Przyczyny drgań kadzi transformatora

Wewnątrz transformatora siły elektrodynamiczne i spowodowane zjawiskiem magnetostrykcji działają na uzwojenia i rdzeń powodując ich drgania mechaniczne. Drgania te, przenoszone przez olej transformatorowy, powodują

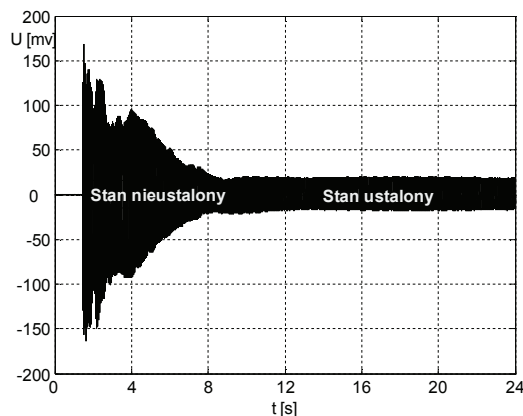
wibracje ścian kadzi. Poluzowanie uzwojeń i blach rdzenia stanowi bezpośrednią przyczynę powstawania wyższych częstotliwości harmoniczných rejestrowanych na powierzchni kadzi transformatora [4, 8].

Bezpośrednią przyczyną drgań rdzenia jest zjawisko magnetostrykcji, efektem którego jest zmiana rozmiarów geometrycznych materiału magnetycznego umieszczonego w polu magnetycznym. Wielkość pola magnetycznego w rdzeniu umieszczonym wewnątrz uzwojenia zależy od napięcia zasilającego uzwojenie. Opierając się na prawie Faradaya można wykazać, że zmiana długości rdzenia (blach transformatorowych) umieszczonego wewnątrz cewki jest wprost proporcjonalna do kwadratu napięcia zasilającego. Można zatem słusznie wnioskować, że podstawowa częstotliwość harmoniczna drgań rdzenia wynosi 100 Hz.

Drgania konstrukcji transformatora rejestrowane akcelerometrem przytwierdzonym do kadzi są superpozycją wyżej opisanych drgań rdzenia oraz drgań uzwojeń. Te ostatnie podlegają działaniu sił elektrodynamicznych proporcjonalnych do kwadratu płynącego przez nie prądu. Ponieważ siła jest wprost proporcjonalna do przyspieszenia, to również w przypadku drgań uzwojeń podstawowa częstotliwość harmoniczna wibracji wynosi 100 Hz.

2.2. Założenia metody diagnostycznej

Proponowana metoda polega na rejestracji, a następnie analizie sygnału drgań zarejestrowanego na powierzchni kadzi transformatora w czasie pierwszych kilku sekund od załączenia nieobciążonego transformatora.



Rys. 1. Przykładowy sygnał drgań zarejestrowany akcelerometrem na powierzchni kadzi transformatora

Po załączeniu zasilania początkowa amplituda prądu płynącego przez uzwojenia zasilające może osiągać wartości kilkakrotnie większe od prądu znamionowego [6]. Czas trwania tego udaru prądowego zawiera się w przedziale

ok. 300 ms, poczym amplituda prądu w uzwojeniach zasilających ulega stabilizacji, osiągając wartość pomijalną w stosunku do prądu znamionowego. Przykładowy sygnał drgań kadzi pokazano na rysunku 1.

Stan drgań nieustalonych dla przykładowego transformatora występuje w czasie ok. 7 s. Jeżeli udar prądowy, który można traktować jako testowy sygnał wymuszenia zanika po czasie ok. dwudziestokrotnie krótszym, można zatem słuszenie zakładać, że analiza stanu nieustalonego doprowadzi do wniosków o stanie technicznym układu mechanicznego, jaki tworzą uzwojenia i rdzeń. Warto przy tym zauważyć, że w stanie nieustalonym największy wpływ na drgania kadzi będą miały wibracje uzwojeń, ponieważ w czasie ok. 1/3 s od załączenia występuje udar prądowy. Wpływ drgań rdzenia, wywołany zjawiskiem magnetostrykcji, będzie zdecydowanie mniejszy, bowiem amplituda napięcia zasilającego praktycznie jest stała. Drgania rdzenia spowodowane magnetostrycją będą w stanie nieustalonym podobne do tych, które występują w stanie ustalonym. Oczywiście udar prądowy spowoduje dodatkowe wibracje rdzenia, lecz drgania te będą wynikiem oddziaływania sił elektrodynamicznych występujących między poluzowanymi elementami rdzenia.

W niniejszej pracy proponuje się wykorzystanie do analizy stanu nieustalonego transformacji Hilberta i dalej - analizę w dziedzinie czasu.

Z definicji, ciągła transformacja Hilberta ciągłego w czasie i rzeczywistego sygnału $x_{re}(t)$ dana jest w następującej postaci [10]:

$$x_{im}(t) = H[x_{re}(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_{re}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

Wartości obliczone na mocy (1) są wartościami rzeczywistymi. Mając dany rzeczywisty sygnał $x_{re}(t)$ i obliczony $x_{im}(t)$ można utworzyć sygnał o wartościach zespolonych, tzw. sygnał analityczny:

$$x(t) = x_{re}(t) + j \cdot x_{im}(t) \quad (2)$$

Z punktu widzenia teorii sygnałów, obserwacja zmian w czasie modułu zależności (2) umożliwia śledzenie obwiedni analizowanego sygnału $x_{re}(t)$. Jeżeli zatem wziąć pod uwagę sygnał drgań kadzi w stanie nieustalonym ($x_{re}(t)$), to uzyskany przebieg $a_{rz}(t) = |x(t)|$, po odfiltrowaniu wyższych częstotliwości harmonicznym, będzie odzwierciedlać proces ustalania się drgań rdzenia i uzwojeń łącznie.

W prezentowanej metodzie diagnostycznej analizowany sygnał reprezentujący drgania x_{re} jest dyskretny. Wykorzystując właściwości transformacji Hilberta dla sygnałów dyskretnych i wynikający z nich filtr cyfrowy o transmitancji częstotliwościowej:

$$H_d(e^{j\omega_k}) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 2, & k = 1 \dots (N/2 - 1) \\ 1, & k = N/2 \\ 0, & k = (N/2 + 1) \dots (N - 1) \end{cases} \quad (3)$$

oraz odwrotną szybką transformatę Fouriera FFT – wyznaczono wprost moduł sygnału analitycznego:

$$a_{rz}(n) = \left| \Psi \left\{ \text{FFT}_N^{-1} \left(H_d(e^{j\omega_k}) \cdot X_{re}(e^{j\omega_k}) \right) \right\} \right| \quad (4)$$

gdzie: N – ilość elementów okna czasowego; $n, k=0, 1, 2, \dots, N-1, \omega_k = 2\pi k/N$ oraz $X_{re}[\exp(j\omega_k)] = \text{FFT}_N[x_{re}(n)]$. Symbol $\Psi\{\cdot\}$ oznacza operację filtracji dolnoprzepustowym filtrem cyfrowym o częstotliwości granicznej 10 Hz.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Skuteczność proponowanej metody badania drgań kadzi transformatora w stanie nieustalonym sprawdzono eksperymentalnie na „testowym” transformatorze olejowym TONa 800/15 (moc: 0.8 MVA, napięcie: 1.5kV/400V). Do cyfrowej rejestracji drgań wykorzystano miernik wibracji SVAN958 z podłączoną pamięcią zewnętrzną (nośnik rejestrowanych sygnałów).

Badania eksperymentalne polegały na wykonywaniu pomiarów wibroakustycznych po uprzednio zamodelowanych uszkodzeniach rdzenia i uzwojeń. Wprowadzane defekty, to sukcesywne luzowanie śrub pakietujących jarzma (górne i dolne) rdzenia i deformowanie górnych cewek jednego z uzwojeń wysokiego napięcia po uprzednim usunięciu docisku pakietującego cewki (rys. 2). Modelowanie uszkodzeń każdorazowo wiązało się z wyjęciem, przy pomocy dźwigu, części aktywnej transformatora z kadzi, poczym transformator był powtórnie montowany. Podczas pomiarów wibroakustycznych akcelerometr był przytwierdzony do przedniej ściany kadzi transformatora, w połowie jej wysokości, naprzeciw kolumny, której uzwojenia były deformowane (rys. 2b).

Pomiary drgań wykonano drgań według następującej specyfikacji:

R0Z0 – stan „sprawny”,

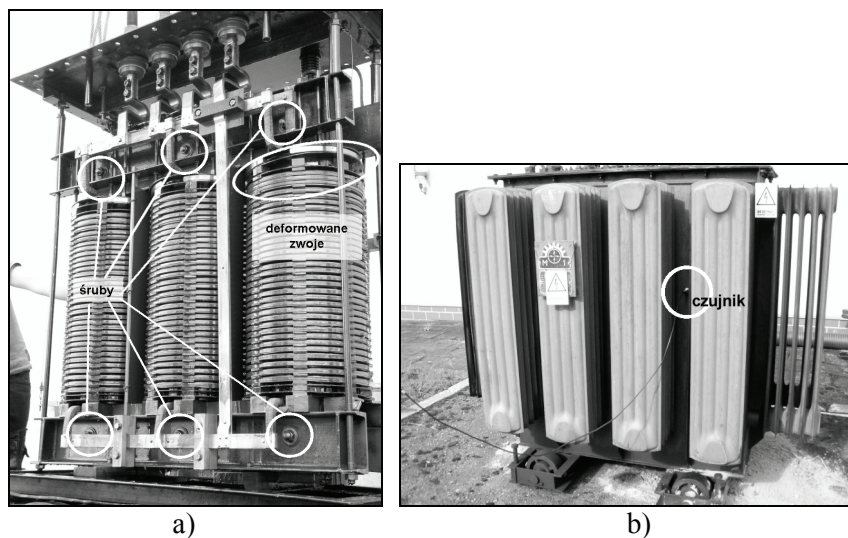
R1Z0 – śruby pakietujące jarzma rdzenia poluzowane, uzwojenia „sprawne”,

R2Z0 – śruby pakietujące jarzma rdzenia całkowicie odkręcone, uzwojenia „sprawne”,

R0Z1 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia, rdzeń „sprawny”,

R0Z2 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia, uzwojenie zdeformowane przez przesunięcie górnej cewki, rdzeń „sprawny”,

R0Z3 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia, uzwojenie zdeformowane przez przesunięcie dwóch górnych cewek, rdzeń „sprawny”.

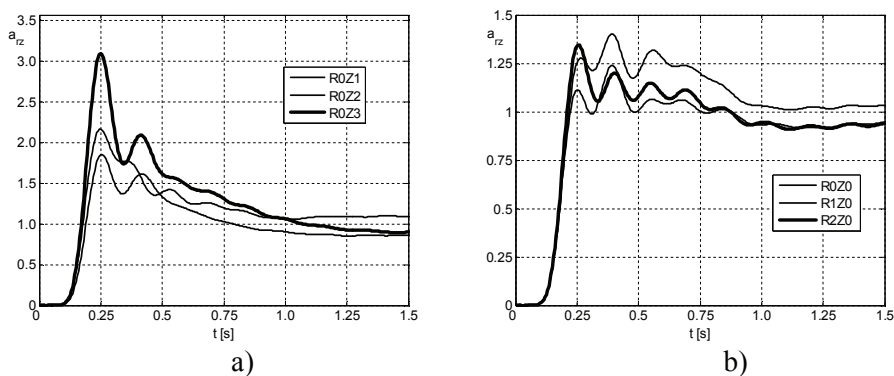


Rys. 2. Badania eksperymentalne: a) część aktywna transformatora po wyjęciu z kadzi – miejsca modelowanych defektów, b) lokalizacja czujnika akcelerometrycznego

Wyniki badań wibroakustycznych, dla tak zamodelowanych uszkodzeń, zilustrowano wykresami na rysunku 3.

Na rysunku 3a) pokazano proces stabilizacji znormalizowanego przyspieszenia drgań kadzi dla trzech stopni uszkodzenia uzwojenia. Największa z degradacji uzwojeń (R0Z3) spowodowała wzrost maksymalnej względnej wartości przyspieszenia i amplitudy oscylacji.

Wykonanie podobnego badania dla stanu nieustalonego, ale z uwzględnieniem wyłącznie defektów rdzenia, prowadzi do mniej „czytelnych” wniosków (rys. 3b).



Rys. 3. Wyniki badań wibroakustycznych; proces stabilizacji drgań kadzi: a) przy rozpakietowanym uzwojeniu, b) dla defektów rdzenia

W tym przypadku różnice w przebiegu krzywych opisujących proces stabilizacji przyspieszenie są niewielkie. Wprowadzenie największej degradacji rdzenia – defektu R2Z0 – spowodowało przede wszystkim wyraźnie zauważalny wzrost gasnących oscylacji zawartych w interwale czasowym od ok. 0.2 s do 1.0 s.

Na podstawie pokazanych wykresów można wnioskować, że proponowana metoda charakteryzuje się szczególną skutecznością w przypadku detekcji wad uzwojeń. Efektywna diagnostyka uszkodzeń rdzenia natomiast możliwa jest w stanie ustalonej pracy transformatora bez obciążenia wykorzystując np. metodę opisaną w [7].

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że proponowana metoda nadaje się w szczególności do diagnozowania uszkodzeń uzwojeń, natomiast jej skuteczność w przypadku detekcji defektów rdzenia jest mniejsza. Na obecnym etapie badań metodę tę można z powodzeniem wykorzystywać do diagnozowania „porównawczego”, konfrontując wyniki pomiarów wykonywanych podczas okresowych przeglądów konserwacyjnych.

Warto dodać, że opisana metoda, została pozytywnie oceniona po testach przeprowadzonych w warunkach przemysłowych przez firmę „Energio – Complex” (Piekary Śląskie). Metodę tę testowano w połączeniu z analizą odpowiedzi częstotliwościowej transformatora (FRA). Uznano, że każda z tych metod (wibroakustyczna i FRA) stosowana autonomicznie nie gwarantuje stuprocentowo pewnej diagnozy, natomiast fuzja tych metod znacząco poprawia wiarygodność wniosków.

LITERATURA

- [1] 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, Paryż, Francja, 2000.
- [2] Bagiński A., Domażański T., Kaźmierski M., Łukaszewski J., Olech W., Olejniczak H., Owczarek J., Sieradzki S., Szymański Z., Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów, ZPBE Energopomiar – Elektryka Sp. z O. O., Gliwice, 2001.
- [3] Booth C., McDonald J. R., Aresi R., The Use of Neural Networks for the Estimation and Classification of Vibration Behavior in Power Transformers, Proceedings American Power Conference, pp. 1132–1135, 1995.
- [4] Borucki S., Boczar T., Cichoń A., Lorenc M., Ocena stanu technicznego rdzenia transformatora na podstawie badań wibroakustycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, str. 27-30, 2007.

- [5] Borucki S., Cichoń A., Subocz J., Kornatowski E., Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energetycznego w stanie pracy nieustalonej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11b, str. 22-25, 2010.
- [6] Halinka A., Szewczyk M., Rzepka P., Szablicki M., Działanie zabezpieczeń nadprądowych w stanach nieustalonych towarzyszących włączaniu nieobciążonych transformatorów SN, *Elektroinfo*, nr 3, str. 24-27, 2010.
- [7] Kornatowski E., Mechanical-condition Assessment of Power Transformer Using Vibroacoustic Analysis, *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, Vol. 500, ISSN: 1013-9826, str. 40-44, 2012.
- [8] Kornatowski E., Subocz J., Borucki S., Cichoń A., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w diagnostyce stanu mechanicznego konstrukcji transformatorów, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11b, str. 247-250, 2010.
- [9] Praca zbiorowa, Diagnostyka stanu technicznego transformatorów. Zasady badań i kryteria oceny, ZPBE Energopomiar – Elektryka Sp. z O. O., Gliwice 1983.
- [10] Zieliński T., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.

VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF TRANSFORMERS IN TRANSIENT STATE

This article presents a vibroacoustic method of diagnosing mechanical condition of the active part of the transformer. The proposed method is based on the analysis of changes in the time-domain normalized values of vibration acceleration which are recorded on the surface of the tank. The subject of this analysis is the unknown mechanical status of unloaded transformer during the first few seconds after power-up (transient state). The method is based on an algorithm for calculating the analytical signal module for the real-value signal, representing recorded vibration acceleration.

Presented method has been tested in laboratory and industrial applications. Studies have shown particular suitability of the method, in conjunction with the FRA (Frequency Response Analysis) method, for diagnosing failures of transformer windings.