



Eugeniusz KORNATOWSKI

# WIBROAKUSTYCZNE DIAGNOZOWANIE TRANSFORMATORÓW

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono metodę analizy wibroakustycznej drgań konstrukcji transformatora rejestrowanych akcelerometrem przytwierdzonym do kadzi. Prezentowana metoda opiera się na dwóch założeniach: w stanie ustalonym bez obciążenia źródłem wibracji jest rdzeń, w stanie nieustalonym po włączeniu zasilania drgania spowodowane są przez uzwojenia zasilające i rdzeń. W stanie ustalonym sygnał z akcelerometru analizowany jest w dziedzinie częstotliwości, a w stanie nieustalonym – w dziedzinie częstotliwości i czasu.*

### WSTĘP

Okres 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. 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. W ostatnich latach pojawił się szereg publikacji, np. [1, 2, 3, 4, 7, 9, 14], 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. Większość opisywanych w literaturze metod wibroakustycznej diagnostyki transformatorów średniej i dużej mocy opiera się na analizie Fouriera przyspieszenia rejestrowanego akcelerometrem lub wykorzystuje się SFFT do analizy czasowo - częstotliwościowej.

## 1 PRZYCZYNY DRGAŃ KONSTRUKCJI 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 harmonicznych rejestrowanych na powierzchni kadzi transformatora. Pomiar

wibracji w stanie ustalonym bez obciążenia może dostarczyć istotnych informacji o stanie mocowania blach rdzenia transformatora [5, 12].

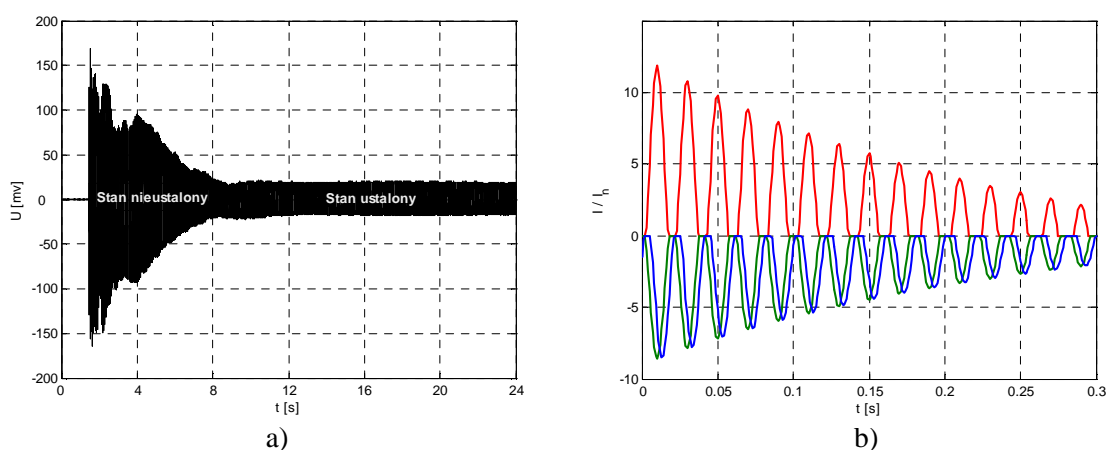
Przyczyną drgań rdzenia jest zjawisko magnetostrykcji, efektem którego jest zmiana rozmiarów geometrycznych materiału magnetycznego umieszczonego w polu magnetycznym. Wielkość pola magnetycznego w rdzeniu umieszczonym wewnątrz uzwojenia zależy od napięcia zasilającego uzwojenie. Opierając się na prawie Faradaya zmiana długości rdzenia umieszczonego wewnątrz cewki może być oszacowana według następującej zależności:

$$\Delta L = \frac{\varepsilon_S U_{\max}^2 L}{(z S \omega B_S)^2} \cos^2 \omega t \quad (1)$$

gdzie:  $L$  – długość blach w rdzeniu [m],  $\varepsilon_S$  – współczynnik nasycenia magnetostrykcyjnego [m/m],  $z$  – ilość zwojów w uzwojeniu,  $S$  – pole przekroju rdzenia [m<sup>2</sup>],  $B_S$  – indukcja magnetyczna nasycenia [T]. Zakłada się przy tym, że przy zasilaniu uzwojenia ze źródła napięciowego  $u(t) = U_{\max} \sin \omega t$ , a amplituda napięcia  $U_{\max}$  jest na tyle mała, że nie spowoduje nasycenia rdzenia. Wyznaczając drugą pochodną po czasie z  $\Delta L$  można określić przyspieszenie drgań rdzenia wywołane zjawiskiem magnetostrykcji:

$$\alpha_r = \frac{d^2 \Delta L}{dt^2} = -\frac{2\varepsilon_S U_0^2 L}{(z S B_S)^2} \cos 2\omega t \quad (2)$$

Bardzo istotny jest fakt, że drgania rdzenia są niezależne od prądu płynącego przez uzwojenia. Stąd, przy stałej amplitudzie napięcia, amplituda przyspieszenia  $\alpha_r$  powinna być stała, a częstotliwość podstawowej harmonicznej wynosi 100Hz.



**Rys. 1.** a) Sygnał drgań kadzi transformatora, b) przykładowy względny prąd chwilowy w uzwojeniach zasilających podczas włączenia nieobciążonego transformatora;  $I_n$  – prąd znamionowy

**Źródło:** opracowanie własne

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 można słusznie wnioskować, że przyspieszenie drgań uzwojeń jest wprost proporcjonalne do kwadratu prądu,

tzn.  $\alpha_z \propto I^2$ . Jeżeli założyć, że  $I=I_{max}\cos\omega t$  oraz wiedząc, iż  $\cos^2\omega t=0.5(\cos 2\omega t+1)$ , to również i w tym przypadku częstotliwość drgań (podstawowa harmoniczna) jest dwukrotnie większa od częstotliwości zasilania, a zatem jest taka sama, jak w przypadku drgań rdzenia. Na rysunku 1a pokazano zarejestrowany przykładowy sygnał drgań kadzi nieobciążonego transformatora w ciągu 24 sekund od załączenia zasilania. Na wykresie można wyróżnić dwa obszary wibracji: pierwszy w czasie od załączenia zasilania do ok.  $6 \div 8$  s — ustalanie się drgań i drugi – drgania o ustalonej amplitudzie. W stanie ustalonym (bez obciążenia) źródłem zarejestrowanych wibracji jest wyłącznie rdzeń jeśli założyć, że prąd płynący w uzwojeniu zasilającym jest pomijalnie mały. Jeżeli amplituda napięcia zasilającego będzie stała, to analiza drgań z tego zakresu pozwoli na ocenę stanu mechanicznego samego rdzenia.

W stanie niestabilnym natomiast, zarejestrowany sygnał odzwierciedla drgania zarówno rdzenia jak i uzwojeń. Występuje wówczas zjawisko magnetostrykcji (uzwojenie pierwotne zasilane jest napięciem o amplitudzie  $U_{max}$ ) i przez uzwojenie pierwotne płynie prąd o bardzo dużej (początkowo) amplitudzie, co powoduje powstanie sił oddziaływania elektromagnetycznego między zwojami. Włączenie transformatora do sieci energetycznej powoduje powstanie tzw. udaru prądu magnesującego. Maksymalna wartość tego prądu zależy m.in. od cech konstrukcyjnych transformatora, układu połączeń uzwojeń, a także od odległości uzwojenia magnesującego od rdzenia [10]. W niektórych przypadkach maksymalna wartość prądu magnesującego może kilku- lub kilkunastokrotnie przekroczyć wartość prądu znamionowego. Przykładowy przebieg wartości chwilowych prądów podczas włączenia nieobciążonego transformatora, pokazano na rysunku 1b.

Drgania w stanie ustalonym i niestabilnym spowodowane są odmiennymi przyczynami, a zatem ich analiza w obu tych stanach powinna być wykonana również w sposób różnicowany.

## 2 BADANIE DRGAŃ W STANIE USTALONYM

W stanie ustalonym bez obciążenia zarejestrowany sygnał drgań odzwierciedla wibracje rdzenia. Opisane w literaturze metody bazują w głównej mierze na analizie widma wibracji realizowanych z wykorzystaniem FFT, STFT lub transformaty falkowej. W większości proponowanych metod szacowanie stanu mechanicznego rdzenia opiera się na analizie porównawczej widma wielu egzemplarzy podobnych transformatorów. Wyjątkiem może tu być publikacja [11], w której opisano metodę opartą na analizie tzw. widma skumulowanego (WS). Poprzez graficzną reprezentację WS możliwe jest w tym przypadku oszacowanie mechanicznego stanu rdzenia pojedynczego transformatora. W pracy tej zaproponowano wykorzystanie do analizy drgań rdzenia nieobciążonego transformatora (stan ustalony na rysunku 1a) zależności opisującej znormalizowane zmiany widmowej gęstości mocy w funkcji częstotliwości:

$$a_r(f) = \int_f^{f_g} G(f) df / \int_{f_{min}}^{f_{max}} G(f) df \quad (3)$$

gdzie:  $G(f)$  - widmowa gęstość mocy drgań,  $f_g=600$  Hz,  $f_{min}=50$  Hz,  $f_{max}=2500$  Hz.

Zależność (3) umożliwi oszacowanie wibracji rdzenia w zakresie do 600 Hz, a więc w przedziale, w którym powinny pojawić się wyższe częstotliwości harmoniczne w przypadku rdzenia z defektami mechanicznymi. Wartości  $f_g$ ,  $f_{min}$  i  $f_{max}$  zostały ustalone na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [5].

### 3 DRGANIA W STANIE NIEUSTALONYM

Czasowo – częstotliwościowe metody analizy sygnałów niestacjonarnych, to najczęściej wykorzystywane narzędzia w diagnostyce wibroakustycznej. Zbiór znanych i stosowanych reprezentacji czasowo – częstotliwościowych jest bardzo duży. Metody te można podzielić na dwie zasadnicze grupy: reprezentacje czas – częstotliwość i czas – skala. Interpretuje się je jako metody krótkoczasowej analizy częstotliwościowej ponieważ umożliwiają estymację widma sygnału w skończonym i krótkim przedziale czasowym na podstawie fragmentów sygnału wycinanego przez okno czasowe przesuwające się wzdłuż analizowanego sygnału.

Szczególną rolę w analizie sygnałów w diagnostyce wibroakustycznej pełni krótkoczasowa transformacja Fouriera STFT (Short Time Fourier Transform) i spektrogram należące do grupy reprezentacji czas – częstotliwość. STFT i analiza spektrogramu umożliwiają obserwację zmian widma sygnału w czasie, dając możliwość formułowania wniosków dużo bardziej precyzyjnych i ogólnych niż np. uśredniona DFT (FFT).

Biorąc pod uwagę wymienione w rozdziale 1 przyczyny powstawania drgań konstrukcji transformatora można zaproponować metodę spektralnej (czasowo - częstotliwościowej) analizy stanu nieustalonego, uwzględniającą ekstrakcję drgań spowodowanych magnetostrykcją. Dokonując pewnych uproszczeń, podstawy metody oparto na następujących założeniach:

- w stanie ustalonym występuje wyłącznie zjawisko magnetostrykcji,
- w stanie nieustalonym: magnetostrykcja, oddziaływanie elektromagnetyczne między zwojami i pozostałe zjawiska fizyczne.

Jeśli dalej założyć, że drgania w stanie nieustalonym to superpozycja drgań wywołanych magnetostrykcją oraz pozostałymi przyczynami, to dalej opisaną metodą „odejmowania widmowego” będzie można dokonać ekstrakcji z sygnału drgań tej jego części, która wywołana jest przez zjawisko magnetostrykcji. Po takim zabiegu analizowany sygnał drgań stanu nieustalonego pozbawiony byłby niejako „zakłócenia magnetostrykcyjnego”, co w znaczący sposób może ułatwić analizę spektrogramu i formułowanie wniosków.

#### 3.1 Metoda odejmowania widmowego

Odejmnowanie widmowe (ang. Spectral Subtraction Method – SSM) jest jedną z metod redukcji zakłóceń w nagraniach dźwiękowych i wykorzystywanych w inżynierii dźwięku. Metoda ta [8] postrzegana jest jako bardzo atrakcyjna ze względu na swoją względną prostotę i idącą z nią w parze małą złożonością obliczeniową i dużą efektywnością. O skuteczności tego rozwiązania świadczyć może fakt praktycznego wykorzystywania odejmowania widmowego przy rekonstrukcji nagrań archiwalnych bądź jako metody pomocniczej w zagadnieniu rozpoznawania sygnału mowy. Z powodzeniem można także, jak się okazuje, wykorzystywać algorytm SSM w zagadnieniach, które nie są bezpośrednio związane z inżynierią dźwięku, czego przykładem jest adaptacja odejmowania widmowego w wibroakustyce.

Zasadnicza koncepcja algorytmu odejmowania widmowego opiera się na sukcesywnym wyznaczeniu widma sygnału zakłóconego oraz uśrednionego widma szumu i dokonywaniu odejmowania obu reprezentacji widmowych. Rezultatem takiego postępowania jest poprawa średniego stosunku sygnału użytecznego do szumu dla całego zarejestrowanego sygnału. Przyjmuje się przy tym, że regenerowany cyfrowy sygnał w pewnym swoim fragmencie musi zawierać zarejestrowaną „ciszę”, tzn. w nagraniu musi wystąpić przedział czasowy, w którym „milkną” wszystkie źródła dźwięku, a pozostaje tylko szum nośnika informacji (np. taśmy magnetofonowej) i szum tła. Jeżeli zatem zarejestrowany dyskretny sygnał  $y(k)$  występuje w obecności addytywnego zakłócenia  $n(k)$ , to:

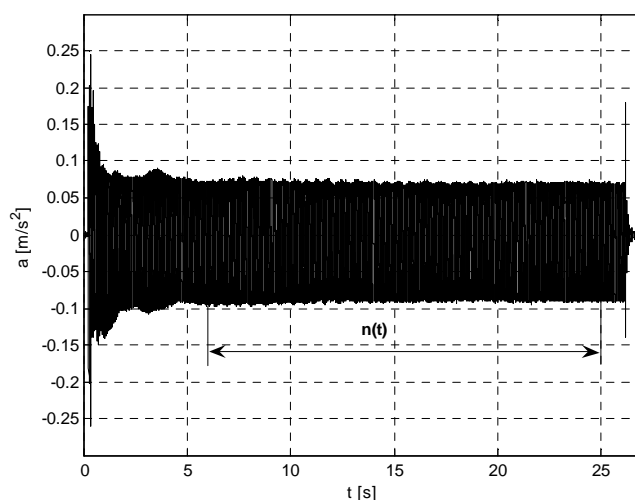
$$x(k) = y(k) - n(k) \quad (4)$$

jest niezakłóconym sygnałem użytecznym. W dziedzinie częstotliwości natomiast:

$$X(e^{j\omega}) = Y(e^{j\omega}) - N(e^{j\omega}) \quad (5)$$

gdzie  $X(e^{j\omega})$ ,  $Y(e^{j\omega})$ ,  $N(e^{j\omega})$  są dyskretnymi transformatami Fouriera sygnałów  $x(k)$ ,  $y(k)$  i  $n(k)$ .

W przypadku analizy sygnału drgań kadzi transformatora (rys. 2) jako zakłócenie  $n(k)$  będzie traktowany fragment sygnału między stanami nieustalonymi spowodowanymi włączeniem i wyłączeniem zasilania, ponieważ to ten właśnie sygnał ma być usunięty z analizowanego sygnału.



**Rys. 2.** Sygnał drgań kadzi transformatora z zaznaczonym „zakłóceniem”  $n(t)$

**Źródło:** opracowanie własne

W metodzie SSM wykorzystuje się estymatę widma zakłócenia  $N'(e^{j\omega})$  i wówczas ogólne równanie opisujące algorytm ma postać następującą:

$$\left| X'(e^{j\omega}) \right|^\beta = \left| Y(e^{j\omega}) \right|^\beta - a \cdot \left| N'(e^{j\omega}) \right|^\beta \quad (6)$$

gdzie:

$X'(e^{j\omega})$  – estymata widma  $X(e^{j\omega})$  sygnału bez zakłóceń,

$Y(e^{j\omega})$  – widmo zarejestrowanego sygnału,

$N'(e^{j\omega})$  – estymata widma zakłócenia,

$\beta$  – wykładnik potęgi równy 1 dla przypadku redukcji zakłóceń w dziedzinie amplitudy widma sygnałów lub równy 2 w przypadku wykorzystywania widma mocy,

$a$  – współczynnik umożliwiający ustalanie stopnia ingerencji w zakłócony sygnał.

Współczynnik  $a$  powinien być dobrany w taki sposób, aby uniknąć ujemnych wartości obliczanych na podstawie (6). W celu uzyskania estymaty widma zakłóceń próbki sygnału pobiera się w miejscach, gdzie występują przerwy w sygnale użytecznym i następnie oblicza się widmo średnie według następującej zależności:

$$\left| N'(e^{j\omega}) \right|^\beta = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left| N_i(e^{j\omega}) \right|^\beta \quad (7)$$

przy czym  $K$  jest ilością pakietów (ramek) pobranych z tego fragmentu sygnału, który nie zawiera sygnału użytecznego; w przypadku sygnału pokazanego na rys. 2 - fragment  $n(t)$ .

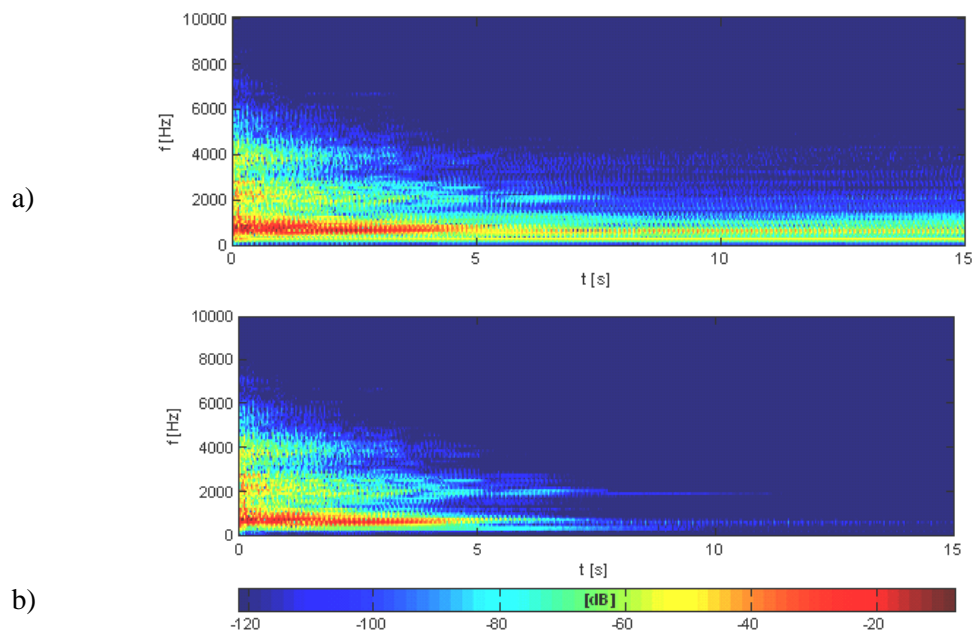
Warto zauważyć, że zależność (7) opisuje tzw. uśrednianie niekoherentne. W procesie uśredniania widma sygnału drgań kadzi transformatora w stanie ustalonym można z powodzeniem zastosować uśrednianie koherentne, o ile odpowiednio zostanie dobrana wielkość ramki w stosunku do częstotliwości próbkowania [13] i wówczas:

$$\left|N'(e^{j\omega})\right|^\beta = \frac{1}{K} \left| \sum_{i=1}^K N_i(e^{j\omega}) \right|^\beta \quad (8)$$

Niestety, zastosowanie wprost zależności (6), niezależnie od sposobu uśredniania widma (koherentnie lub niekoherentnie) jest mało efektywne: sygnał stanu ustalonego („zakłócenie”) jest eliminowany tylko w nieznacznym stopniu (tłumienie o ok. 6 – 7dB). Trzeba bowiem mieć na uwadze fakt, że ekstrakcja zakłóceń z sygnału użytecznego bezpośrednio zależy od współczynnika  $a$ . Zbyt duża wartość tego współczynnika powoduje, że wynik obliczeń (6) jest ujemny. W celu eliminacji tego efektu proponuje się warunkową postać algorytmu odejmowania widmowego:

$$\left|X'(e^{j\omega})\right| = \begin{cases} \left[ \left|Y(e^{j\omega})\right|^\beta - a \cdot \left|N'(e^{j\omega})\right|^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} & \text{dla } \left|Y(e^{j\omega})\right|^\beta > a \cdot \left|N'(e^{j\omega})\right|^\beta \\ b \cdot \left|N'(e^{j\omega})\right| & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (9)$$

Z równania (9) wynika, że w przypadku wystąpienia ujemnego rezultatu odejmowania estymowana wartość modułu harmonicznej o pulsacji  $\omega$  będzie zastąpiony wartością  $b|N'(e^{j\omega})|$ .



**Rys. 3.** Wynika działania zmodyfikowanego algorytmu odejmowania widmowego dla sygnału drgań kadzi transformatora: a) spektrogram sygnału oryginalnego, b) spektrogram sygnału na wyjściu zmodyfikowanego algorytmu odejmowania widmowego

**Źródło:** opracowanie własne

Wartość współczynnika  $b=0$  w (9) oznaczałaby, że harmoniczna, dla której wynik odejmowania jest ujemny byłaby zupełnie eliminowana, co tylko pozornie wydaje się uzasadnione. Niestety, w takim przypadku, powstają duże zniekształcenia regenerowanego sygnału wynikające z efektu Gibbsa. Dzięki modyfikacji algorytmu odejmowania widmowego uzyskano tłumienie sygnału, którego źródłem jest zjawisko magnetostrykcji o ok. 30dB, co można uznać za wartość zadowalającą. Wartości  $a=3$  i  $b=10^{-3}$  dobrano eksperymentalnie, a obliczenia wykonano w dziedzinie amplitudy sygnałów ( $\beta=1$ ). Efekty uzyskane w wyniku zastosowania zmodyfikowanej metody odejmowania widmowego pokazano na rys. 3.

### 3.2 Diagnostyka drgań w stanie nieustalonym

Po włączeniu nieobciążonego transformatora czas stabilizacji prądu magnesującego wynosi  $(5 \div 10)$  s [10], co wyraźnie przekłada się na obraz drgań zarejestrowanych na powierzchni kadzi (rys. 1a). Drgania kadzi transformatora w stanie nieustalonym spowodowane są wibracjami zarówno uzwojeń jak i rdzenia. Jakość mechaniczną tych dwu kluczowych elementów konstrukcji transformatora można ocenić metodą częstotliwościową poprzez analizę spektrogramu wprost [6, 12] lub z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody odejmowania widmowego. Jako uzupełnienie tej metody proponuje się wykorzystanie do analizy stanu nieustalonego transformaty Hilberta i dalej - analizę w dziedzinie czasu.

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

$$x_{im}(t) = H[x_{re}(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_{re}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

Wartości obliczone z wykorzystaniem zależności (10) są rzeczywiste i zależą od czasu  $t$ . Mając dany rzeczywisty sygnał  $x_{re}(t)$  i obliczony  $x_{im}(t)$  można utworzyć sygnał o wartościach zespolonych, tzw. sygnał analityczny:

$$x(t) = x_{re}(t) + j \cdot x_{im}(t) \quad (11)$$

Z punktu widzenia teorii sygnałów, obserwacja zmian w czasie modułu zależności (11) umożliwi śledzenie obwiedni analizowanego sygnału  $x_{re}(t)$ . Jeżeli zatem wziąć pod uwagę sygnał drgań kadzi w stanie nieustalonym ( $x_{re}(t)$ ), to uzyskany przebieg  $a_{rz}(t)$  (moduł zależności (11)) będzie odzwierciedlał proces ustalania się drgań rdzenia i uzwojeń łącznie z pominięciem zjawiska magnetostrykcji.

## 4 WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

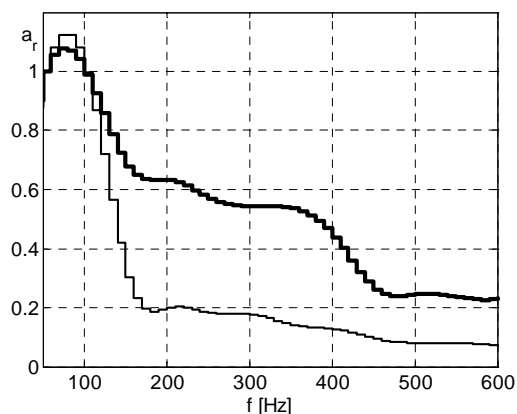
W eksperymencie wykorzystano dwa transformatory TDR 25000/110 wyprodukowane w 1978 roku. Jeden z nich poddany był remontowi w 2009 roku. Stan transformatorów wstępnie oszacowano metodą „TrafoGrade” [15], określając jeden z nich jako „sprawny”, a drugi „wadliwy”.

Wykonując badania eksperymentalne w przypadku obu transformatorów zarejestrowano drgania wibroakustyczne kadzi w czasie od załączenia zasilania przez okres 20 s sekund wykorzystując do tego celu miernik wibracji Svantek SVAN 958. Umożliwia on wyznaczenie m. in. widma wibracji oraz, co wykorzystano w eksperymencie, rejestruje w pamięci zewnętrznej sygnał drgań. Mając na uwadze badania i wnioski opublikowane w pracy [6] przyjęto, że miejsce lokalizacji akcelerometru ma niewielkie znaczenie w badaniach drgań w stanie nieustalonym. W związku z tym, rejestracje drgań wykonano umieszczając

akcelerometr w łatwo dostępnym miejscu w dolnej części kadzi w obu przypadkach transformatorów. Zarejestrowane sygnały analizowano dwiema metodami:

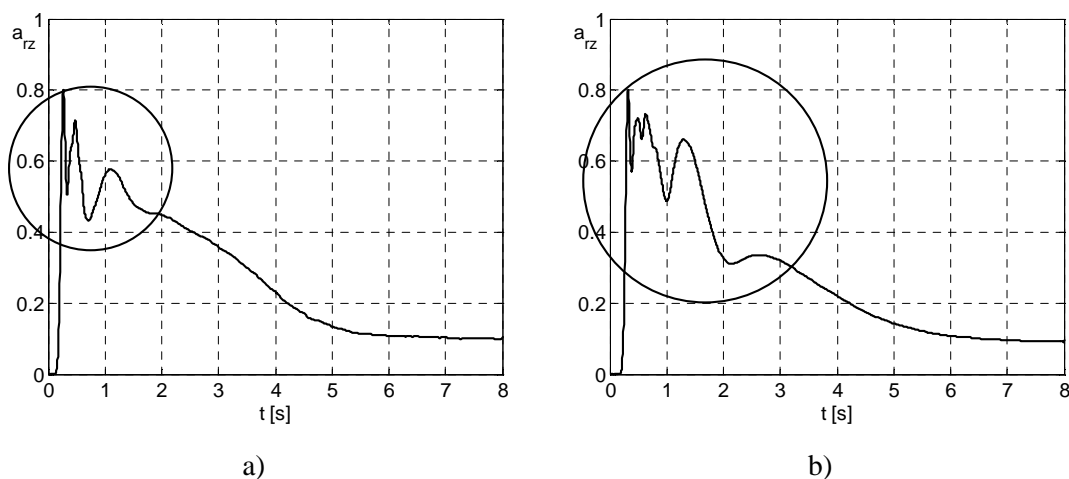
- wykorzystując dyskretną postać (3) zbadano drgania rdzenia: stan ustalony; dane analizowane od 8 do 20 s licząc od momentu włączenia zasilania,
- wykorzystując metodę zmodyfikowanego odejmowania widmowego i dalej, stosując wzór (10) oraz moduł zależności (11), zbadano drgania rdzenia i uzwojeń łącznie: stan nieustalony; dane analizowane w czasie 8 s od załączenia zasilania.

Wyniki tak przeprowadzonych badań pokazano na rysunkach 4 i 5.



**Rys. 4.** Widmo skumulowane transformatora „sprawnego” (linia ciągła) i transformatora „wadliwego” (kropki).

**Źródło:** opracowanie własne



**Rys. 5.** Proces ustalania drgań rdzenia i uzwojeń łącznie w stanie nieustalonym: a) transformatora „sprawnego, b) transformatora „wadliwego”

**Źródło:** opracowanie własne

Porównanie badań wibroakustycznych transformatora „sprawnego” i „wadliwego” prowadzi do następujących konkluzji:

- W stanie ustalonym bez obciążenia znormalizowana moc drgań  $a_r(f)$  rdzenia transformatora „wadliwego” ma amplitudę większą niż w przypadku transformatora „sprawnego”, szczególnie dla częstotliwości powyżej 150 Hz (rys. 4).
- W stanie nieustalonym amplituda drgań rdzenia i uzwojeń  $a_{rz}(t)$  wykazuje oscylacje w przypadku obu transformatorów. Mając na uwadze fakt, że tzw. udar prądowy zanika po



upływie ok. 0,5 s, na rysunku 5a widać, że w przypadku transformatora „sprawnego” czas trwania oscylacji wynosi ok. 1,5 s, a dla transformatora „wadliwego” (rys.5b) wydłużył się do ok. 3 s. Stabilizacja drgań, rejestrowanych akcelerometrem przytwierdzonym do kadzi, następuje po ok. pięciu sekundach w przypadku obu transformatorów.

Wnioski wynikające z przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają wstępną diagnozę postawioną w oparciu o metodę „TrafoGrade”. Jak wynika z protokołów tych badań w przypadku transformatora „wadliwego” stwierdzono m. in. znaczną degradację izolacji stałej - kilkunastoprocentowa degradacja celulozy oszacowana na podstawie badania obecności 2FAL [15]. Defekt tego rodzaju może być przyczyną, w niedalekiej perspektywie czasowej, awarii katastrofalnej.

## PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano wykorzystanie analizy częstotliwościowej do oceny stanu mechanicznego rdzenia transformatora i analizy czasowo - częstotliwościowej do określenia stanu mechanicznego uzwojeń i rdzenia transformatora łącznie z wyeliminowanym wpływem zjawiska magnetostrykcji.

Zaproponowana metoda analizy częstotliwościowej (rozdz. 2) w bardzo czytelny sposób pozwala oszacować stan mechaniczny rdzenia. W przypadku transformatora o idealnym stanie mechanicznym rdzenia zmiany znormalizowanej mocy drgań powinny mieć charakter „dolno-pasmowy”, a wartość  $a_r$  dla częstotliwości powyżej 100 Hz powinna wynosić zero. W przeciwnym przypadku, tzn.  $a_r$  znacznie większe od zera w szerokim zakresie częstotliwości, można wnioskować, że rdzeń badanego transformatora posiada defekty mechaniczne.

W proponowanej metodzie analizy drgań rdzenia i uzwojeń w stanie nieustalonym, poprzez obserwację ustalania amplitudy drgań w czasie, można wnioskować o stanie mechanicznym rdzenia i uzwojeń łącznie z wyeliminowanym wpływem zjawiska magnetostrykcji. Również i w tym przypadku analiza wykresu  $a_{rz}(t)$  umożliwia łatwą interpretację wyników pomiaru.

Prezentowane rozwiązania należy traktować jako propozycje alternatywnych algorytmów przetwarzania i interpretacji danych pozyskanych w wyniku badań wibroakustycznych konstrukcji transformatora. Kwestią, która wymaga dalszych badań, jest powiązanie otrzymywanych wyników z poziomem degradacji konstrukcji mechanicznej transformatorów.

## VIBRO-ACOUSTIC TECHNIQUES TO DIAGNOSE TRANSFORMERS

### *Abstract*

*This paper presents a technique of vibroacoustic analysis of transformer mechanical condition, based on vibration measurement, using an accelerometer attached to the transformers tank. Presented method is based on two assumptions: 1. in no-load steady-state, the source of vibrations is the core, 2. in transient state, after power on, the vibrations are caused by the power winding and core. In the steady-state the signal from the accelerometer is analyzed in the frequency domain and in the transient state - in the frequency and time domain.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Barbare A., Cannata F., Caprio G., Sacchetti S., Zafferrani G.: *Ennel-diagnosis of on- and off-line large transformers*. CIGRE Symposium, Berlin 1993.
2. Bartoletti C., Desiderio M., Do Carlo D., Fazio G.: *Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformer*. IEEE Transactions on Power Delivery 2004, vol. 19, no. 1.
3. Berler Z., Golubev A., Rusov V.: *Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring*. 2000 IEEE International Symposium on Electrical Isulation, 2000, USA.
4. Birlasekaran S., Fetherston F.: *Off/On-Line FRA condition monitoring technique for power transformer*. IEEE Power Engineering Review 1999, vol. 19.
5. Borucki S., Boczar T., Cichoń A., Lorenc M.: *Ocena stanu technicznego rdzenia transformatora na podstawie badań wibroakustycznych*. Przegląd Elektrotechniczny 2007, nr 3, str. 27-30.
6. Borucki S., Cichoń A., Subocz J., Kornatowski E.: *Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energetycznego w stanie pracy nieustalanej*. Przegląd Elektrotechniczny 2010, nr 11b, str. 22-25.
7. 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.
8. Czyżewski A.: *Dźwięk cyfrowy. Wybrane zagadnienia teoretyczne, technologie, zastosowania*. EXIT, Warszawa 1998.
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 2006, vol. 21, no. 1.
10. Halinka A., Szewczyk M., Rzepka P., Szablicki M.: *Działanie zabezpieczeń nadprądowych w stanach nieustalonych towarzyszących włączaniu nieobciążonych transformatorów SN*. Elektroinfo 2010, nr 3, str. 24-27.
11. Kornatowski E.: *Mechanical-condition Assessment of Power Transformer Using Vibroacoustic Analysis*. Key Engineering Materials, Trans Tech Publications 2012, vol. 500, str. 40-44.
12. Kornatowski E., Subocz J., Borucki S., Cichoń A.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w diagnostyce stanu mechanicznego konstrukcji transformatorów*. Przegląd Elektrotechniczny 2010, nr 11b, str. 247-250.
13. Lyons R. G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKiŁ, Warszawa 2008.
14. Shenghang J., Yongfen I., Yanming L.: *Research on extraction technique of transformer core fundamental frequency vibration based on OLCM*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, vol. 21, no. 1.
15. Szrot M., Płucha J., Borucki S., Cichoń A.: *Ocena stanu technicznego transformatorów metodą TrafoGrade*. Przegląd Elektrotechniczny 2008, nr 10, str. 8-11.

### **Autor:**

**dr inż. Eugeniusz Kornatowski** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny.