

Zastosowanie metody SSM w wibroakustycznej diagnostyce transformatorów energetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wibroakustyczną metodę diagnozowania stanu mechanicznego części aktywnej transformatora. Analizie podlega sygnał drgań kadzi w stanie nieustalanej pracy nieobciążonego transformatora, w czasie kilku pierwszych sekund od załączenia zasilania. Metodę oparto na algorytmie SSM (Spectral Subtraction Method) redukując „zakłócający” wpływ na pomiar zjawiska magnetostrykcji. Stwierdzono, że wykorzystanie metody SSM do analizy sygnału drgań kadzi transformatora umożliwiła detekcję defektów uzwojeń.

Abstract. The paper presents vibroacoustic method of mechanical condition diagnosis of transformer's active part. There is analyzed a signal of tank's vibrations in a several seconds after powering unloaded transformer. The method is based on SSM (Spectral Subtraction Method) algorithm, which reduces interfering influence of magnetostriction on a measurement. It was found that application of SSM for the analysis of transformer's tank vibrations signal allows for detection of windings defects. (**Application of SSM method in vibroacoustic diagnostics of power transformers**)

Słowa kluczowe: transformator, uzwojenia, rdzeń, metoda wibroakustyczna.

Keywords: transformer, windings, core, vibroacoustic method.

doi:10.12915/pe.2014.10.31

Wstęp

Bardzo istotnym elementem diagnostyki części aktywnej transformatora są badania drgań konstrukcji jednostki. Metoda wibroakustyczna w ogólności polega na rejestracji sygnału przyspieszenia drgań kadzi transformatora, a następnie numerycznej analizie tak pozyskanych danych. Aparat matematyczny, który głównie wykorzystywany jest w badaniach wibroakustycznych, to przede wszystkim transformata Fouriera (rzadziej transformata falkowa) [1, 2, 3]. Diagnostyka wibroakustyczna opiera się zatem na analizie widmowej sygnału przyspieszenia drgań, a widmo amplitudowe jest podstawą wnioskowania.

Dewaluacja technologiczna stosowanych od kilkudziesięciu lat kryteriów jakości wibroakustycznego diagnozowania konstrukcji transformatorów, a także postęp w rozwoju metod cyfrowego przetwarzania sygnałów sprawiły, iż równolegle z weryfikacją wibroakustycznych wskaźników jakości [4], zachodzi potrzeba unowocześnienia metod analizy cyfrowego sygnału odzwierciedlającego przyspieszenie drgań. Bardzo istotne jest przy tym, aby sposób prezentacji wyników analizy wibroakustycznej był jednoznaczny i czytelny oraz pozbawiany nadmiarowych informacji.

Przyczyny drgań konstrukcji transformatora

Wewnątrz transformatora siły elektrodynamiczne i spowodowane zjawiskiem magnetostrykcji działają na uzwojenia i rdzeń powodując ich drgania mechaniczne. Drgania te, przenoszone są na powierzchnię ścian kadzi dwiema drogami:

- przez olej transformatorowy,
- przez wieko oraz podstawę, z którymi część aktywna ma bezpośredni kontakt mechaniczny.

Poluzowanie uzwojeń i blach rdzenia to przyczyna powstawania 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].

Bezpośrednią przyczyną drgań rdzenia jest zjawisko magnetostrykcji, efektem którego w ogólności 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 m.in. w pracy [6] pokazano, że zmiana długości rdzenia umieszczonego

wewnątrz cewki może być oszacowana według następującej zależności:

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

gdzie: L – długość blach w rdzeniu, ε_S – współczynnik nasycenia magnetostrykcyjnego, z – liczba zwojów w uzwojeniu, S – pole przekroju rdzenia, B_S – indukcja magnetyczna nasycenia, Ω – pulsacja ($2\pi f$), U_{max} – amplituda napięcia zasilającego.

Wyznaczając drugą pochodną po czasie z $\Delta L(t)$ można określić wartość chwilową przyspieszenia drgań rdzenia wywołaną zjawiskiem magnetostrykcji:

$$(2) \quad a_r = \frac{d^2 \Delta L}{dt^2} = -\frac{2\varepsilon_S U_{max}^2 L}{(z S B_S)^2} \cos 2\Omega t$$

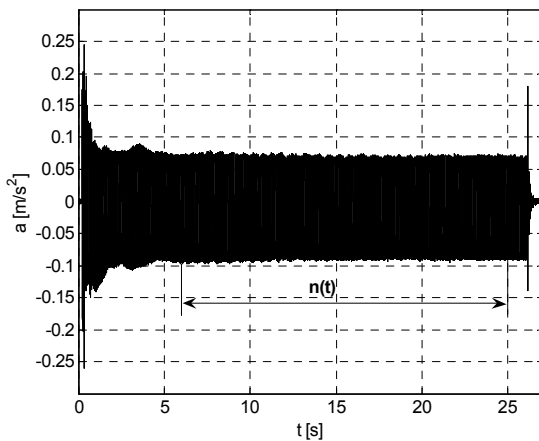
Analizując zależność (2) widać, że podstawowa częstotliwość harmoniczna drgań rdzenia jest dwukrotnie większa od częstotliwości napięcia zasilającego, a amplituda wibracji wprost proporcjonalna do kwadratu jego amplitudy. Bardzo ważną obserwacją jest fakt, że drgania rdzenia nie są zależne od prądu płynącego przez uzwojenia, a więc nie zależą od wielkości obciążenia transformatora. Zatem, przy stałej amplitudzie napięcia, amplituda przyspieszenia a_r powinna być stała.

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 wnioskować, że przyspieszenie wibracji uzwojeń jest wprost proporcjonalne do kwadratu prądu o amplitudzie I_{max} :

$$(3) \quad a_z(t) \propto i^2(t) = I_{max}^2 \cos^2 \Omega t = 0,5 \cdot I_{max}^2 (\cos 2\Omega t + 1)$$

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 1 przedstawiono sygnał drgań (przyspieszenie) zarejestrowany na powierzchni kadzi transformatora T0Na800/15 o mocy 800 kVA pracującego bez obciążenia.



Rys.1. Sygnał drgań kadzi transformatora; a – chwilowa wartość przyspieszenia, $n(t)$ – drgania ustalone, spowodowane zjawiskiem magnetostrykcji

Można tu wyróżnić trzy obszary wibracji: w czasie od załączenia zasilania do ok. 5. s — ustalanie się drgań, a dalej – drgania o ustalonej amplitudzie i na końcu przebiegu stan nieustalony spowodowany wyłączeniem zasilania. W stanie ustalonym bez obciążenia źródłem zarejestrowanych wibracji jest wyłącznie rdzeń, jeśli założyc, że prąd płynący w uzwojeniu zasilającym jest pomijalnie mały (w stosunku do prądu znamionowego). Jeżeli amplituda napięcia zasilającego będzie stała, to analiza drgań z tego zakresu pozwoli na ocenę stanu mechanicznego samego rdzenia. Na takim założeniu opiera się także m.in. metoda monitorowania wibracji transformatorów OLCM (OnLoad Current Method) [6].

W stanie nieustalonym (po załączeniu zasilania), zarejestrowany sygnał odzwierciedla drgania zarówno rdzenia jak i uzwojeń. Występuje bowiem 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. W niektórych przypadkach maksymalna wartość prądu magnesującego może kilku- lub kilkunastokrotnie przekroczyć wartość prądu znamionowego.

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

- transformator nie jest obciążony,
- w stanie ustalonym bez obciążenia występuje wyłącznie zjawisko magnetostrykcji,
- w stanie nieustalonym występują: magnetostrykcja, oddziaływanie elektromagnetyczne między zwojami uzwojenia zasilającego i pozostałe zjawiska fizyczne.

Jeśli także założyc, że drgania w stanie nieustalonym są wynikiem superpozycji drgań wywołanych magnetostrycją 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 pozbawiony byłby niejako „zakłócenia magnetostrykcyjnego”, co w znaczący sposób może ułatwić analizę spektrum i formułowanie wniosków.

Metoda odejmowania widmowego

Odejmowanie widmowe (ang. Spectral Subtraction Method – SSM) jest jedną z podstawowych metod redukcji zakłóceń (szumu) w nagraniach dźwiękowych. Metoda ta, opisywana np. w [7], postrzegana jest jako bardzo atrakcyjna ze względu na swoją względną prostotę i idącą z nią w parze małą złożonością obliczeniową oraz dużą efektywnością. O skuteczności tego rozwiązania świadczyć może fakt praktycznego wykorzystywania odejmowania widmowego przy rekonstrukcji archiwalnych nagrań dźwiękowych bądź, jako metody pomocniczej, w zagadnieniu rozpoznawania sygnału mowy. Jak się okazuje, z powodzeniem można także wykorzystywać algorytm SSM w zagadnieniach, które nie są bezpośrednio związane z inżynierią dźwięku, czego przykładem jest adaptacja odejmowania widmowego w diagnostyce wibroakustycznej. W stosunku do znanego z literatury algorytmu działania SSM proponowane rozwiązanie zawiera autorskie modyfikacje.

Zasadnicza koncepcja algorytmu odejmowania widmowego opiera się na sukcesywnym wyznaczaniu 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 fragment, 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:

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

jest niezakłóconym sygnałem użytecznym. W dziedzinie częstotliwości natomiast:

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

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

W przypadku analizy sygnału drgań kadzi transformatora (rys. 1) jako zakłócenie n będzie traktowany fragment między stanami nieustalonymi spowodowanymi włączeniem i wyłączeniem zasilania, ponieważ to ten właśnie sygnał ma być usunięty z analizowanego przebiegu.

W metodzie SSM wykorzystuje się estymatę widma zakłócenia $N'(e^{j\omega})$ i wówczas ogólne równanie opisujące algorytm ma postać następującą [7]:

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

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, β – wykładnik potęgi równy 1 dla przypadku redukcji zakłóceń w dziedzinie amplitudy widma sygnałów lub równy 2 w przypadku wykorzystywania widma mocy, a – współczynnik umożliwiający ustalenie stopnia ingerencji w zakłócony sygnał.

Realizacja algorytmu SSM zgodnie z równaniem (6) polega na modyfikacji amplitud poszczególnych

częstotliwości harmonicznych, natomiast przesunięcie fazowe pozostaje bez zmian – jego wartość jest taka sama, jak sygnału oryginalnego (Y).

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 ($n(t)$ na rysunku 1) i następnie oblicza się widmo średnie według następującej zależności:

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

przy czym K jest liczbą pakietów (ramek) pobranych z fragmentu sygnału $n(t)$.

Ponieważ skuteczność algorytmu wprost zależy od współczynnika a , to dobór jego wartości ma kluczowe znaczenie. Wartość a nie może być zbyt duża, bowiem w takim przypadku wynik otrzymany na podstawie równania (6) będzie ujemny. To ograniczenie powoduje, że wykorzystanie algorytmu SSM w formie opisanej wyżej pozwala uzyskać poprawę odstępu sygnału od zakłóceń o około -7dB.

Skuteczność opisanego algorytmu SSM przetestowano w Laboratorium Inżynierii Dźwięku i Ambiofonii (LIDiA) Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, stwierdzając jego umiarkowaną efektywność. W związku z ograniczeniami dotyczącymi współczynnika a proponuje się modyfikację algorytmu opisanego równaniem (6), który obecnie zdefiniowany jest następującymi równaniami:

$$(8) \quad |X'(e^{j\omega})| = \left[|Y(e^{j\omega})|^\beta - a \cdot |N'(e^{j\omega})|^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

dla $|Y(e^{j\omega})|^\beta > a \cdot |N'(e^{j\omega})|^\beta$ oraz:

$$(9) \quad |X'(e^{j\omega})| = b \cdot |N'(e^{j\omega})|$$

dla $|Y(e^{j\omega})|^\beta \leq a \cdot |N'(e^{j\omega})|^\beta$, gdzie stała b jest nieujemna i dużo mniejsza od 1.

W przypadku realizacji algorytmu SSM zgodnie z równaniami (8) i (9), metoda polega na modyfikacji amplitud poszczególnych częstotliwości harmonicznych, natomiast przesunięcie fazowe pozostaje bez zmian, a jego wartość jest taka sama, jak sygnału Y . Skuteczność zmodyfikowanego algorytmu SSM zweryfikowano także w laboratorium LIDiA ZUT w Szczecinie, potwierdzając jego bardzo dużą skuteczność. Poprawa odstępu sygnału od zakłóceń w przypadku wykorzystania algorytmu odejmowania widmowego realizowanego zgodnie z równaniami (8) i (9) sięgała teraz -30dB.

Eksperymentalna weryfikacja skuteczności metody SSM

Jak wykazano w pracy [8], analiza sygnału drgań kadzi w czasie kilku pierwszych sekund od załączenia nieobciążonego transformatora jest podstawą oceny głównie stanu mechanicznego uzwojeń. Możliwość wykorzystania metody SSM do diagnostyki stanu uzwojeń zweryfikowano na przykładzie badań transformatora olejowego TONa 800/15 (moc: 0,8MVA, napięcie: 15kV/400V). Badany transformator wyprodukowany został w 1963 roku, lecz nigdy nie był używany. Można zatem uznać, że stan techniczny jego części aktywnej był doskonały. Badania polegały na sukcesywnym wprowadzaniu defektów uzwojeń z jednoczesną rejestracją sygnału drgań kadzi. Do cyfrowej rejestracji drgań

wykorzystano miernik wibracji SVAN958 z podłączoną pamięcią zewnętrzną. Zastosowany przyrząd pomiarowy ma oczywiście możliwości analizy rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych lecz z tych opcji zrezygnowano wykorzystując miernik tylko jako rejestrator sygnału drgań. Modelowane defekty, to sukcesywne deformowanie górnych cewek jednego z uzwojeń wysokiego napięcia po uprzednim usunięciu docisku pakietującego cewki. Symulacja uszkodzeń każdorazowo wiązała się z wyjęciem, przy pomocy podnośnika, części aktywnej transformatora z kadzi, po czym 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.

Modelowanie defektów uzwojeń przeprowadzono według następującego schematu:

- Z1 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia,
- Z2 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia, uzwojenie zdeformowane przez wzajemne przysunięcie dwóch górnych cewek po usunięciu klinów blokujących,
- Z3 – usunięty docisk uzwojeń jednej fazy wysokiego napięcia, przysunięcie trzech górnych cewek po usunięciu klinów blokujących (rys. 2).

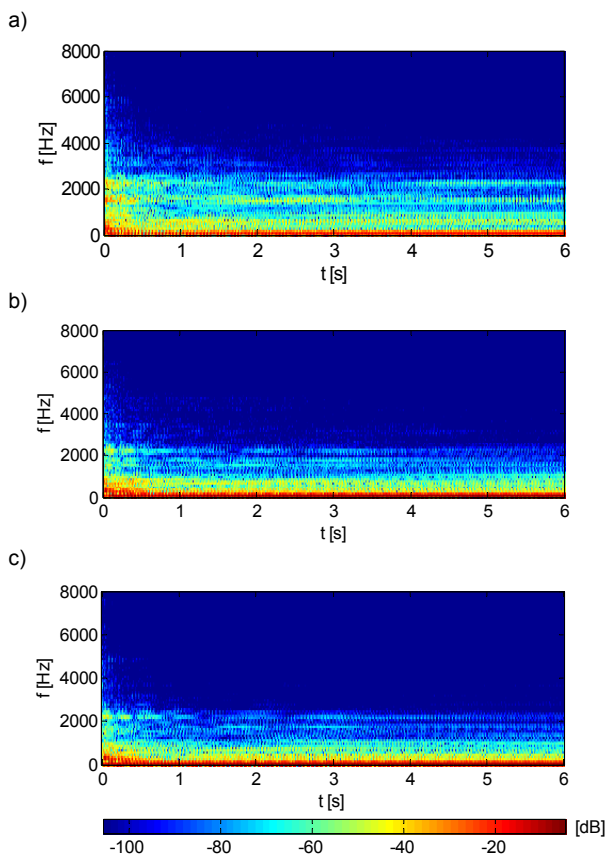


Rys.2. Zamodelowany defekt uzwojeń Z3

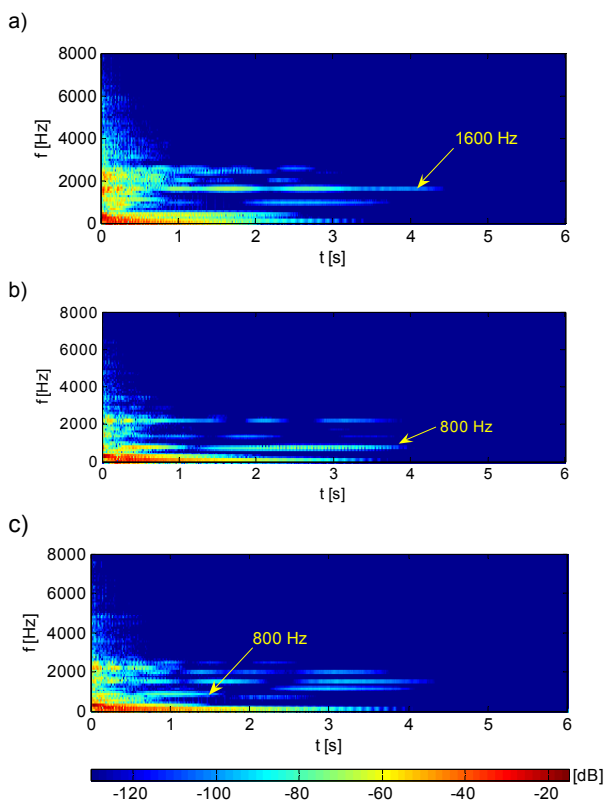
Wykorzystując czasowo-częstotliwościową analizę sygnału drgań kadzi dla stanu bez defektów oraz zamodelowanych uszkodzeń Z1 i Z3 sporządzono spektrogramy drgań pokazane na rysunku 3.

Analiza wykresów z rysunku 3 nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie ewidentnych zmian. Szczególnie różnice między spektrogramami z rysunków 3b i 3c (defekt Z1 i Z3) są prawie niezauważalne. Przyczyną tego jest zakłócający wpływ magnetostrykcji. Po zredukowaniu tego zjawiska opisaną metodą odejmowania widmowego SSM, uzyskane efekty pokazano na rysunku 4, przyjmując przy tym $\beta=1$ (odejmowanie widmowe w dziedzinie amplitudy) oraz $a=3$ i $b=0,001$ zapewniające redukcję „zakłócenia magnetostrykcyjnego” o -60 dB. Wyniki badania spektrogramu prowadzą teraz (rys. 4) do następujących wniosków:

Dla transformatora bez defektów (rys. 4a) można zaobserwować m.in. dominację harmoniczną o częstotliwości 1600 Hz w czasie ok. 4,5 s od załączenia zasilania.



Rys.3. Spektrogramy drgań: a) bez defektów, b) dla defektu Z1, c) dla defektu Z3



Rys.4. Spektrogramy drgań ze zredukowanym wpływem zjawiska magnetostrykcji: a) bez defektów, b) dla defektu Z1, c) dla defektu Z3

Po wprowadzeniu defektu uzwojenia Z1 amplituda drgań na tej częstotliwości znacząco zmalała, natomiast wzrosła amplituda wibracji o częstotliwości 800 Hz. Dalsza degradacja uzwojeń (Z3) spowodowała zredukowanie w widmie tej składowej. Drgania z częstotliwością 800 Hz trwały początkowo ok. 4 s (Z1), natomiast przy defekcie Z3 czas ten uległ skróceniu do ok. 1.5 s. W zakresie wyższych częstotliwości natomiast (od 1,2 kHz do 2,6 kHz) widmo amplitudowe stało się bogatsze, pojawiły się wibracje zanikające po czasie sięgającym 4,5 s. Jeżeli przyjąć za poziom progowy względną amplitudę sygnału drgań -100 dB, to czas ten jednocześnie wyznacza okres trwania stanu nieustalonego, który przy defekcie Z1 nie przekraczał 4 s. Warto przy tym podkreślić, że kontrolowana degradacja uzwojeń była niewielka. Polegała tylko, w skrajnym przypadku (defekt Z3), na poluzowaniu trzech górnych cewek jednego z uzwojeń bez ich deformacji, a mimo to analiza wibroakustyczna pozwoliła na detekcję defektów.

Podsumowanie

Zastosowanie metody odejmowania widmowego SSM umożliwia poprawę czytelności wyników analizy czasowo-częstotliwościowej sygnału drgań konstrukcji transformatora. Jak wykazały badania eksperymentalne, dzięki zredukowaniu zakłócającego wpływu zjawiska magnetostrykcji, możliwa jest detekcja uszkodzeń uzwojeń jednostki transformatorowej. Na obecnym etapie badań metodę tę można z powodzeniem wykorzystywać autonomicznie do diagnozowania porównawczego, konfrontując wyniki pomiarów wykonywanych podczas okresowych przeglądów konserwacyjnych lub jako uzupełnienie diagnozowania stanu uzwojeń innymi metodami np. FRA (Frequency Response Analysis).

LITERATURA

- [1] Bartoletti C. et al.: Vibro-Acoustic Technique to Diagnose Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, No 1 (2004), 221-229
- [2] Garcia B., Burgos J.C., Alonso A.M.: Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations – Part I: Theoretical Foundation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, No 1 (2006), 157-163
- [3] Borucki S., Cichoń A., Subocz J., Kornatowski E.: Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energetycznego w stanie pracy nieustalonej, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, nr 11b (2010), 22-25
- [4] Borucki S.: Diagnostyka rdzenia transformatora elektroenergetycznego z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody wibroakustycznej, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 57, nr 4 (2011), 331-334
- [5] Kornatowski E.: Mechanical-condition Assessment of Power Transformer Using Vibroacoustic Analysis, Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, vol. 500, 2012, 40-44.
- [6] Shenghang J., Yongfen I., 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), 1981-1988
- [7] Czyżewski A.: *Dźwięk cyfrowy. Wybrane zagadnienia teoretyczne, technologia, zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001, ISBN 83-87674-08-7
- [8] Kornatowski E., Banaszak S.: Diagnostics of a Transformer's Active Part with Complementary FRA and VM Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.29, Issue 3 (2014), 1398-1406

Autor: dr inż. Eugeniusz Kornatowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin, E-mail: korn@zut.edu.pl