

Eugeniusz KORNAŃSKI*

POMIAR I REJESTRACJA DRGAŃ POWIERZCHNI KADZI TRANSFORMATORA ENERGETYCZNEGO

W artykule opisano metodę rejestracji i analizy drgań kadzi transformatora w stanie ustalonym bez obciążenia. W zaproponowanej metodzie diagnostycznej wykorzystano pomiar wektora natężenia dźwięku w pobliżu powierzchni kadzi. Badania wibroakustyczne stanu mechanicznego części aktywnej (uzwojeń i rdzenia) wykonuje się najczęściej z wykorzystaniem czujnika akcelerometrycznego przymocowanego do powierzchni kadzi. Takie badania diagnostyczne umożliwiają lokalne (punktowe) oszacowanie przyspieszenia drgań i mogą prowadzić do błędnych wniosków diagnostycznych. Proponowana metoda umożliwia natomiast uzyskanie obrazu – mapy wibracji całej powierzchni kadzi badanej jednostki transformatorowej.

SŁOWA KLUCZOWE: transformator, kadź, część aktywna, metoda wibroakustyczna.

1. WSTĘP

Bezawaryjna eksploatacja transformatorów bezpośrednio przekłada się na stabilność działania elektroenergetycznego systemu przesyłowo-rozdzielczego, a jego niezawodne funkcjonowanie gwarantuje jakość i ciągłość dostaw energii elektrycznej do odbiorców. Pomimo relatywnie wysokiej niezawodności jednostek transformatorowych, szczególnie awarie katastrofalne, wiążą się z poważnymi konsekwencjami natury technicznej i ekonomicznej. Nie ulega zatem wątpliwości, że skuteczna diagnostyka i monitoring tych ważnych elementów systemu elektroenergetycznego ma niewątpliwie kluczowe znaczenie. W procesie diagnozowania jednostek transformatorowych powszechnie wykorzystuje się bezinwazyjne badanie oleju transformatorowego: chromatografię gazową, pomiary zawartości związków furanu, pomiary zawartości wody. Wyniki tych badań oraz podstawowych właściwości elektrycznych jednostki pozwalają oszacować stopień degradacji transformatora.

Jedną z metod diagnozowania stanu mechanicznego (np. „rozpakietowanie” rdzenia i poluzowanie uzwojeń) transformatorów energetycznych jest metoda badań wibroakustycznych. Diagnostyka wibroakustyczna nie wymaga wykona-

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

nia inspekcji wewnętrznej jednostki i w związku z tym jest niezwykle atrakcyjna z ekonomicznego punktu widzenia.

1.1. Wibroakustyczna diagnostyka stanu mechanicznego rdzenia transformatora

Badania wibroakustyczne transformatora wykonuje się dla dwóch stanów pracy:

- W stanie drgań nieustalonych, w czasie kilkunastu sekund o załączenia zasilania nieobciążonego transformatora [1, 2],
- W stanie drgań ustalonych bez obciążenia (prąd wyjściowy równy zero) [3, 4].

Pierwsze z badań pozwala wnioskować o stanie mechanicznym całej części aktywnej. Źródłem drgań są wówczas uzwojenia i rdzeń. Uzwojenia drgają z powodu „udarów prądowych” i działania sił elektrodynamicznych między zwojami oraz drga rdzeń. Drgania rdzenia wywołane są zjawiskiem magnetostrykcji.

W stanie drgań ustalonych, bez obciążenia, główne źródło drgań konstrukcji transformatora to rdzeń. Dominuje wówczas zjawisko magnetostrykcji i analiza sygnału zarejestrowanego w tym stanie pracy daje możliwość oszacowania jakości mechanicznej samego rdzenia. Do celów diagnostyki stanu rdzenia wykorzystuje się analizę widma częstotliwościowego sygnału przyspieszenia drgań kadzi transformatora. Sygnał ten rejestrowany jest z wykorzystaniem czujnika akcelerometrycznego, przymocowanego do powierzchni kadzi diagnozowanej jednostki. Na rys. 1 pokazano czujnik akcelerometryczny przymocowany do kadzi diagnozowanego transformatora.



Rys. 1. Rejestrator sygnału drgań i czujnik akcelerometryczny przymocowany do kadzi diagnozowanego transformatora

Jeden z podstawowych problemów, to wybór miejsca ulokowania czujnika. Lokalizacja czujnika powinna być tak dobrana, aby zarejestrowane drgania od-

zwierciadlały wibracje części aktywnej, zanurzonej w oleju transformatorowym. Z drugiej strony, miejsce lokalizacji musi być takie, aby zminimalizować wpływ drgań zewnętrznych elementów konstrukcji [5]. Dodatkowo należy mieć na uwadze fakt, że nie jest możliwa lokalizacja czujnika w dowolnym miejscu kadzi z powodu utrudnionego dostępu (zewnętrzne elementy konstrukcyjne, np. radiatory).

W przypadku analizy porównawczej, gdzie w określonych odstępach czasowych (np. jeden rok) diagnozowany jest konkretny egzemplarz – czujnik mocowany jest zawsze w tym samym miejscu. Inne rozwiązanie, to stosowanie wielu czujników i uśrednianie wyników pomiarów.

Dużo bardziej atrakcyjne wydaje się zatem zastosowanie metody pozwalającej na uzyskanie mapy drgań (obrazu akustycznego) powierzchni kadzi. Opisana dalej metoda umożliwia obrazowanie wibracji kadzi w stanie ustalonym.

2. POMIARY WEKTOROWE FALI AKUSTYCZNEJ METODĄ NATEŻENIOWA

Energetyczne obrazy rozkładu pól akustycznych, połączone z graficznym przedstawieniem rozptyłu strumienia energii akustycznej, pochodzące z bezpośrednich pomiarów natężenia dźwięku, są nowym elementem metrologii akustycznej. Ta współczesna technika badań wibroakustycznych ma szczególne znaczenie w ocenie promieniowania mocy akustycznej badanego źródła dźwięku [6]:

$$N_a(t) = i(t) \cdot S \quad (1)$$

gdzie: $N_a(t)$ – chwilowa moc akustyczna, $i(t)$ – natężenie akustyczne, S – powierzchnia promieniująca.

Natężenie akustyczne (natężenie pola akustycznego) definiuje się jako:

$$i(t) = p(t) \cdot v(t) \quad (2)$$

gdzie: $p(t)$ – chwilowa wartość ciśnienia akustycznego, $v(t)$ – prędkość cząstki akustycznej.

Warto zauważyć, że natężenie akustyczne jest wielkością wektorową ponieważ w (2) definiuje się jako iloczyn wartości skalarnej (ciśnienie akustyczne) i wektorowej (prędkość cząstki akustycznej).

Pojawienie się tych nowych możliwości zmieniło podejście do badań wielu zjawisk akustycznych. Metoda natężeniowa znalazła zastosowanie w różnych pracach badawczych z zakresu akustyki teoretycznej i stosowanej, skutecznie zastępując metody klasyczne i upraszczając technikę badań. Nie wymaga ona spełnienia tak ostrych kryteriów, jakie narzucone są w pomiarach klasycznych, a pomiary prowadzone w warunkach polowych nie odbiegają, w sensie dokładności, od badań laboratoryjnych [6]. Badania można prowadzić w warunkach przemysłowych, w obecności zakłóceń zewnętrznych. W przypadku stosowania

tej techniki do diagnozowania stanu maszyn metodami akustycznymi efekty diagnozowania ulegną zdecydowanej poprawie, jeżeli zamiast dotychczas stosowanych badań rozkładu ciśnienia akustycznego (wielkość skalarna) wprowadzimy analizę rozkładu natężenia dźwięku wraz z wizualizacją zjawisk wibroakustycznych przedstawionych w formie wektorowej. Zastosowanie graficznej formy opisu pola akustycznego wytworzonego przez drgające struktury mechaniczne pozwala znajdować i precyzyjnie wskazywać lokalne źródła drgań o określonych amplitudach. Bezpośrednia analiza energetyczna pola akustycznego nie była dotąd możliwa, ponieważ w klasycznych badaniach akustycznych posługiwano się mikrofonem tj. przetwornikiem mierzącym zmiany ciśnienia – skalarnego składnika fali akustycznej. Dopiero możliwość bezpośredniego pomiaru natężenia fali akustycznej, czyli strumienia energii akustycznej, wyznaczonego z iloczynu ciśnienia akustycznego i prędkości cząstki akustycznej (2), pozwala ocenić rozptył fali jako formę transportu energii akustycznej.

Obrazowanie zjawisk wibroakustycznych w formie wektorowej, w odróżnieniu do stosowanych dotąd metod ciśnieniowych lub z wykorzystaniem pojedynczego (albo, co najwyżej kilku) czujników akcelerometrycznych zdecydowanie poprawia efekty diagnozowania akustycznego maszyn i urządzeń. Wektorowy obraz pola akustycznego, kontrolowany w rzeczywistych warunkach eksploatacji, pozwala ocenić energię promieniowania całego obiektu i jego poszczególnych elementów konstrukcyjnych. W przypadku diagnozowania jednostki transformatorowej bardzo istotne jest wskazanie źródła drgań o maksymalnej amplitudzie. Diagnostyka wibroakustyczna transformatorów dużej mocy, w swoim założeniu, ma umożliwić określenie stanu mechanicznego części aktywnej. Zatem, bardzo istotne jest wskazanie takich lokalnych źródeł drgań (miejsc na kadzi transformatora), które najdokładniej „odzworowują” wibracje części aktywnej.

2.1. Sondy do pomiaru natężenia dźwięku

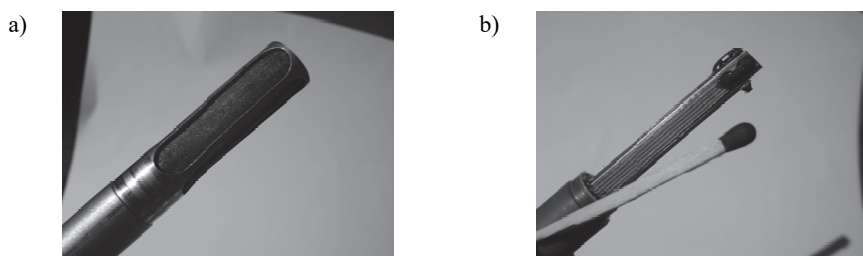
Współczesne urządzenia do pomiaru natężenia dźwięku pojawiły się na rynku w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku i dzisiaj technika ta jest już szeroko stosowana w metrologii akustycznej jako istotne rozszerzenie metod konwencjonalnych.

Wyznaczenie amplitudy natężenia dźwięku można przeprowadzić przez pomiar [7, 8, 9]:

- sumy i różnicy ciśnień akustycznych,
- widma wzajemnego sygnałów odbieranych z dwóch mikrofonów,
- bezpośredniego pomiaru amplitudy ciśnienia i prędkości cząstki akustycznej (sonda p-v).

Najnowszą sondą p-v jest sonda z przetwornikiem cieplnym, mierzącym bezpośrednio prędkość cząstki akustycznej. Chodzi tu o sondę do bezpośredniego

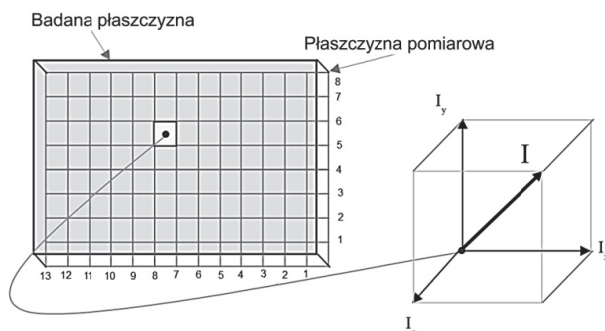
pomiaru prędkości cząstki akustycznej, która w połączeniu z pomiarem ciśnienia akustycznego staje się miniaturowym przetwornikiem do pomiaru amplitudy i fazy przestrzennego wektora natężenia dźwięku. Sonda nazwana przez wytwórcę „mikroprzepływomierzem falowym” (ang. Microflown) realizuje pomiar prędkości akustycznej v poprzez kontrolę bilansu mocy cieplnej dwu gorących drutów wprowadzonych w akustyczne pole przepływowe (rys. 2).



Rys. 2. Sonda 3D – Microflown: a – sonda kompletna z osłoną , b – sonda bez osłony, głowica 3D (5 mm x 5 mm x 5 mm) z mikrofonem pojemnościowym 0,1 cala

Największą zaletą sondy Microflown, to jej miniaturowe rozmiary. Poza tym, jest to jedyny przetwornik pozwalający mierzyć bezpośrednio prędkość cząstki akustycznej i prowadzić eksperymentalne badania wektorowych efektów fali akustycznej w hydrodynamicznym polu bliskim, tzn. w strefie geometrycznej leżącej bardzo blisko powierzchni źródła (na granicy ośrodków). Dzięki małym wymiarom przetwornika jego obecność w polu akustycznym nie wprowadza istotnych zakłóceń badanego pola, aż do częstotliwości ponad 10000 Hz.

Stosując technikę pomiaru natężenia dźwięku, mamy do wyboru dwie metody pomiaru: z zastosowaniem techniki omiatania lub z użyciem siatki stałych punktów pomiarowych, rozłożonych na płaszczyźnie pomiarowej równoległej do płaszczyzny przegrody (rys. 3).



Rys. 3. Metoda stałych punktów pomiarowych i wyznaczanie wektora natężenia dźwięku

Wybór metody pomiaru zależy od celów, jakie są stawiane przed badaniami. Zastosowanie siatki stałych punktów pomiarowych umożliwia uzyskanie zbioru

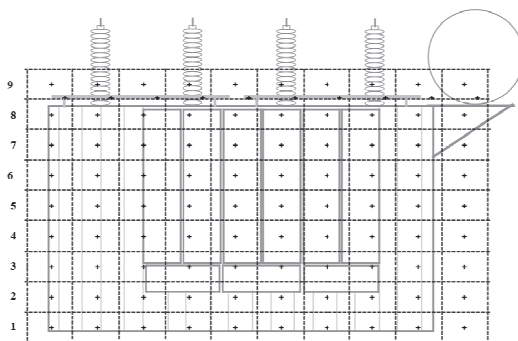
danych do wyznaczania wartości mocy akustycznej wypromieniowanej przez każdą z jednostkowych powierzchni, na które podzielono całą badaną powierzchnię. Metoda siatki pomiarowej jest szczególnie przydatna, gdy zamierza się wykonać analizę rozkładów pól metodami graficznymi i takie rozwiązanie przyjęto w opisywanych badaniach.

Z analizy graficznego rozkładu wektorów natężenia w polu akustycznym można wnioskować o zjawiskach wibroakustycznych zachodzących na promieniujących strukturach i znajdować źródła lokalne oraz niejednorodności akustyczne w postaci obszarów zróżnicowanych poziomach promieniowania. Przez pomiar składowych wektora w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach można wyznaczyć położenie wektora w przestrzeni w dowolnym punkcie pola.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE TRANSFORMATORA MOCY 75 MVA

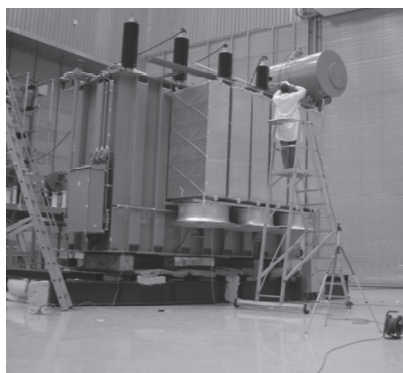
Pomiary przeprowadzono w hali-laboratorium do testowania transformatorów mocy. Obiekt diagnozowany to transformator energetyczny o mocy 75 MVA wyprodukowany przez krajowy oddział firmy ABB - Falkon Łódź. Badania prowadzono w stanie jałowej pracy jednostki transformatorowej. Do badań wykorzystano analizator sygnałów akustycznych typu RTA-840 norweskiej firmy NORSONIC S.A. z sondą do pomiaru natężenia dźwięku typu NE-216 (p-v) Microflown.

Badania natężenia dźwięku wykonano metodą stałych punktów pomiarowych, oceniając składowe przestrzenne wektora natężenia x , y i z . Pomiary prowadzono w płaszczyźnie o wymiarach 6 m x 4,5 m równoległej do czołowej strony transformatora, ustawionej w odległości 0,2 m od czoła radiatorów. Płaszczyznę pomiarową podzielono na 90 jednostkowych powierzchni o polach 0,6 m x 0,5 m każda. Pozwala to graficznie przedstawić przestrzenny (2D, a także 3D) kształt promieniującej fali generowanej w rejonie płaszczyzny pomiarowej. Rozmieszczenie siatki punktów pomiarowych natężenia dźwięku pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Płaszczyzna pomiarowa i rozmieszczenie punktów pomiarowych

Na rys. 5 pokazano natomiast proces skanowania czołowej strefy transformatora.



Rys. 5. Skanowanie czołowej strefy transformatora

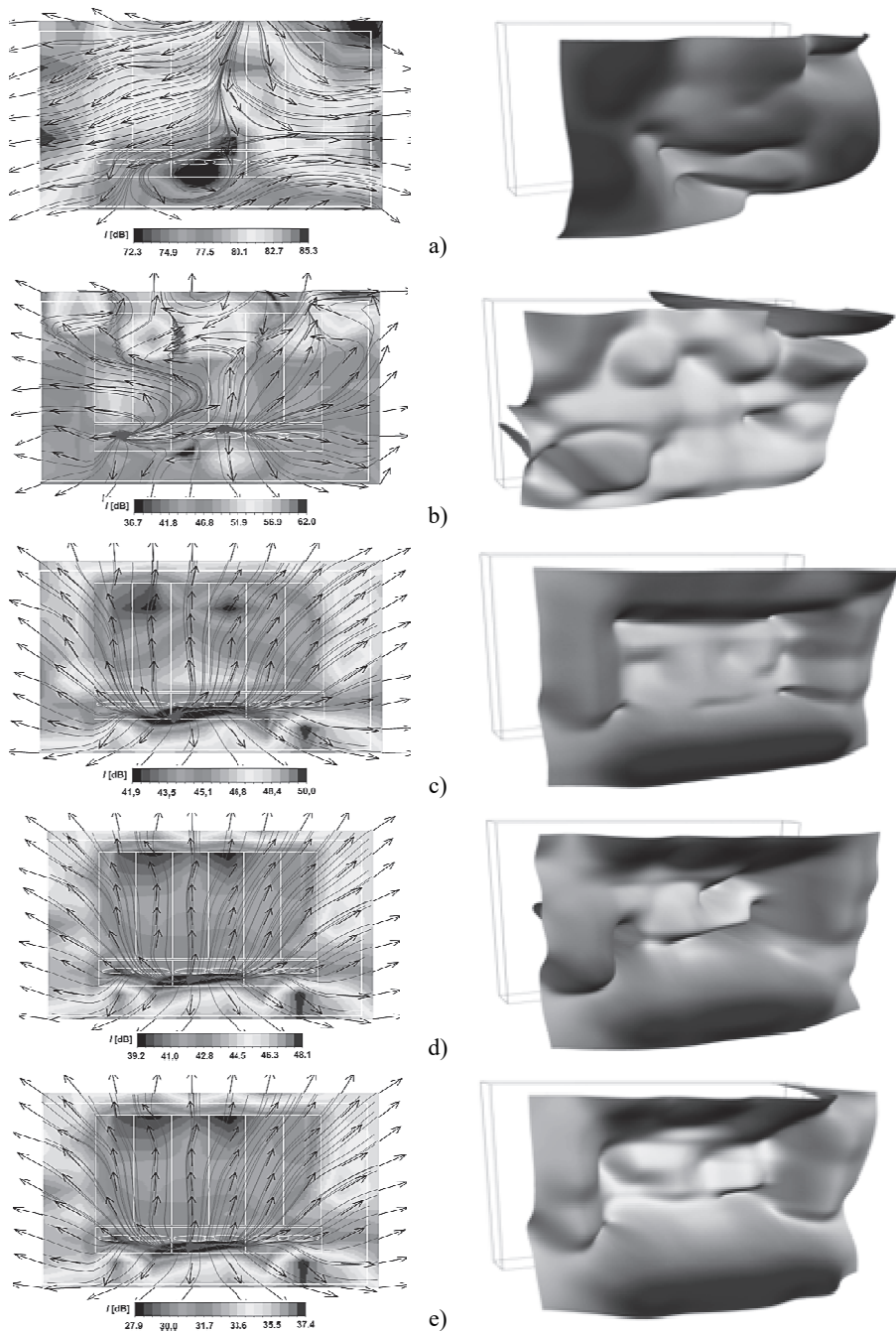
3.1. Wyniki pomiarów

Pomiary natężenia dźwięku wykonane były w pasmach tercjowych w zakresie od 16 Hz do 6300 Hz. Na rys. 6 przedstawiono, dla wybranych częstotliwości, wektorowe rozkłady natężenia akustycznego jako rzuty na płaszczyznę pomiarową modułów wektorów wypadkowych wraz z liniami strumienia i rozkładem pola w formie map 2D rozkładu natężenia.

Kolorowe mapy rozkładu wektorów natężenia dźwięku przedstawiono na płaszczyźnie pomiarowej jako energetyczny składnik fali akustycznej i pokazano na tle zarysu badanego transformatora. Pozwalają one zlokalizować te fragmenty powierzchni, z których do otoczenia promieniowana jest największa energia akustyczna (hot points).

Wektorowy charakter pola akustycznego pozwala również wskazać drogi (linie na wykresach), po których energia akustyczna jest transportowana. Zaznaczone strzałki (wektory) wskazują kierunki tego ruchu.

Rozkłady natężenia dźwięku pokazują również przestrzenne kształty fali natężeniowej (3D) obrazujące energetyczną formę hałasu promieniowanego przez frontową część korpusu transformatora. Forma przestrzennej wizualizacji wektorowych efektów promieniowania akustycznego została pokazana dla wybranych częstotliwości, w którym dominował poziomy hałas. Tego rodzaju wizualizacja efektów wektorowych, niemożliwa do oceny tradycyjnym pomiarem ciśnienia akustycznego, stanowi podstawowy materiał do znajdowania lokalnych źródeł promieniowania hałasu i prowadzenia konstrukcyjno-technologicznych zabiegów zmierzających do obniżenia zagrożenia hałasowego. Jest to w metrologii akustycznej współcześnie najbardziej racjonalna metoda wprowadzania rozwiązań optymalnych pod względem ekonomicznym i technicznym.



Rys. 6. Wektorowy rozkład natężenia akustycznego dla: a) 100Hz, b)200Hz, c) 630 Hz, d) 1000 Hz, e) 2500 Hz

Amplitudy natężenia akustycznego, zaznaczone na rysunkach kolorami, zostały określone zgodnie z zależnością:

$$L_I = 10 \cdot \lg(I / I_0) \quad (3)$$

gdzie:

I – zmierzony moduł wektora natężenia akustycznego,

I_0 – poziom odniesienia równy 10^{-12} W/m².

Dla poprawienia czytelności wykresów każdy z nich wykonano w innej skali. Na rys. 6a kolor niebieski oznacza 72,3 dB, czerwony 85,3 dB oraz kolejno: rys. 6b – niebieski 36,7 dB, czerwony 62,0 dB; rys. 6c – niebieski 41,9 dB, czerwony 50,0 dB; rys. 6d – niebieski 39,2 dB, czerwony 48,1 dB; rys. 6e – niebieski 27,9 dB, czerwony 37,4 dB.

Dzięki zróżnicowanemu skalowaniu na rysunkach widać zjawisko przemieszczania się lokalnych maksimów drgań, np.: lewa i prawa strona czołowej płaszczyzny kadzi drga z maksymalną amplitudą przy częstotliwości 100 Hz (rys. 6a), ale już przy 1000 Hz (rys. 6d) maksymalne drgania występują w części dolnej. Powyżej częstotliwości 200 Hz na centralnej części kadzi zarejestrowano drgania o najmniejszej amplitudzie. Te obserwacje mogą stanowić cenną wskazówkę dotyczącą lokalizacji przetworników akcelerometrycznych przy wykonywaniu badań diagnostycznych metodą „klasyczną” (rys. 1).

4. WNIOSKI

Badania skutków energetycznych, wywołanych przemieszczaniem się fali akustycznej w ośrodku rzeczywistym (efekt wektorowy), dają pełniejsze i bardziej obiektywne informacje o sposobie promieniowania źródła. Mimo tego, że pomiar wykonywany jest bezdotykowo, metoda ta pozwala jednoznacznie wskazać źródła lokalne występujące na powierzchni badanego urządzenia. Ten sposób diagnozowania akustycznego umożliwia wskazanie konkretnych fragmentów konstrukcji, których efektywność promieniowania fali akustycznej jest największa. Nie daje się tego zrobić metodami tradycyjnymi, poprzez pomiar lokalnego przyspieszenia powierzchni kadzi (pomiar akcelerometrem) lub pomiar rozkładu ciśnienia akustycznego (wykorzystanie mikrofonu). Mikrofonem mierzymy jedynie uśredniony w okolicy tego przetwornika poziom ciśnienia akustycznego – wielkości skalarnej – uzyskując bardzo ograniczone możliwości oceny kierunku, z którego energia napływa. Utrudnia to wskazanie lokalnych źródeł promieniowania rozłożonych na powierzchni badanego urządzenia. Przestrzenna analiza rozkładu natężenia dźwięku pozwala wskazać miejsca na kadzi transformatora, z których lokalnie promieniuje największa energia akustyczna. Dodatkowo można określić kierunek i zwrot działających sił, a w konsekwencji kierunek i zwrot przyspieszenia drgań.

Opisana metoda badań diagnostycznych jest niestety pracochłonna i trudno zalecać jej stosowanie do bieżącej kontroli stanu konstrukcji mechanicznej transformatorów energetycznych. Jednak wykonana tylko jednokrotnie dla konkretnej jednostki transformatorowej pozwala określić optymalne miejsca mocowania czujników akcelerometrycznych w czasie okresowych przeglądów technicznych.

LITERATURA

- [1] Jin M., Pan J., Vibration characteristics of a disk-type winding simulated by coupled concentric rings, *Applied Acoustics*, vol. 101 pp. 104–114, 2016.
- [2] 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, pp. 1398–1406, 2014.
- [3] Wang Y., Pan J., Comparison of mechanically and electrically excited vibration frequency responses of a small distribution transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, Issue 3, pp. 1173–1180, 2017.
- [4] Kornatowski E., Mechanical-condition assessment of power transformer using vibroacoustic analysis, *Key Engineering Materials*, vol. 500, pp. 40–44, 2012.
- [5] Banaszak S., Kornatowski E., Evaluation of FRA and VM measurements complementarity in the field conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, Issue 5, pp. 2123–2130, 2016.
- [6] Fahy F. J., *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science, London – New York, 1989.
- [7] Fahy F. J., A technique for measuring sound intensity with a sound level meter, *Noise Control Engineering*, no. 9, pp. 55–62, 1977.
- [8] Chung J. Y., Blaser D. A., Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 3, pp. 907–913, 1980.
- [9] Chung J. Y., Blaser D. A., Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 3, pp 914–921, 1980.

MEASURING AND REGISTRATION OF VIBRATIONS ON SURFACE OF THE POWER TRANSFORMER TANK

The paper describes a vector analysis method of transformer tank vibration. The suggested diagnostic method is based on the sound intensity measurement near the tank volume. The vibroacoustic examination of mechanical condition of active part (winding and core) is performed mainly with an accelerometric sensor fastened to the tank surface. Such diagnostic examination allows a local (spot-wise) evaluation of vibration acceleration and can lead to erroneous conclusions. The suggested method, on the other hand, allows an image to be obtained – a vibration map of the entire tank surface of the examined transformer.

(Received: 26.01.2019, revised: 04.03.2019)

