

Sebastian BORUCKI

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
 INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, KATEDRA WYSOKICH NAPIĘĆ
 Prószkowska 76, Budynek 2, 45-578 Opole

Diagnostyka rdzenia transformatora elektroenergetycznego z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody wibroakustycznej

Dr inż. Sebastian BORUCKI

Adiunkt Instytutu Elektroenergetyki, Politechniki Opolskiej. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania nowoczesnych metod pomiarowych w diagnostyce urządzeń elektrycznych i wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Zainteresowania: technika wysokich napięć, diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych przy wykorzystaniu metod nieniszczących (m.in. metody emisji akustycznej, metody wibroakustycznej, pomiarów skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego).



e-mail: s.borucki@po.opole.pl

Streszczenie

Genezę podjętych w artykule prac stanowi problem skutecznej oceny stanu technicznego konstrukcji mechanicznej rdzeni transformatorów elektroenergetycznych. W publikacji zaprezentowano wyniki wskazujące na możliwość opracowania nowej i bezinwazyjnej metody diagnostycznej rdzeni z wykorzystaniem zaproponowanej przez autora tzw. zmodyfikowanej metody wibroakustycznej (MVM). Zamieszczone w artykule oryginalne rezultaty badań uzyskano podczas prób laboratoryjnych z wykorzystaniem transformatora olejowego o mocy 200 kVA.

Słowa kluczowe: transformator elektroenergetyczny, rdzeń, diagnostyka, analiza czasowo-częstotliwościowa, drgania, metoda wibroakustyczna.

Diagnosis of power transformer core using the modified vibroacoustic method

Abstract

The problem of effective assessment of the technical condition of power transformer core mechanical structure originated the research work discussed in this paper. The investigation results show the possibility of developing a new and non-invasive diagnostic method for the transformer magnetic circuit. The method developed is based on time-frequency analysis of measured mechanical vibrations of the device monitored. The recording of vibrations is performed during the monitored transformer no-load operation. The paper characterises the power object under study (Fig. 1), the measuring system applied and discusses the new methodology for assessing the core technical condition using the modified vibroacoustic method (MVM). The original measurement results presented in the paper were obtained during switching on a 200 kVA transformer under laboratory conditions. The analysis of the signals measured was carried out for three operating conditions of the transformer under study: with the core pressed by a manufacturer; with the core with loose screws fixing the upper yoke (Fig. 2a) and with the core with loose screws fixing the upper and lower yokes (Fig. 2b). The research results (Figs. 3-5) obtained from this experiment show a potential possibility of developing a non-destructive and effective method for assessing the technical condition of the core mechanical structure of transformer units operating in the electric power system, especially the ones of a strategic character.

Keywords: power transformer, core, diagnosis, time and frequency domain analysis, vibration, vibroacoustic method.

1. Wstęp

Wprowadzone regulacje prawne i zasady rynkowe wymuszają na przedsiębiorstwach energetycznych stałe zwiększanie swojej konkurencyjności, a co się z tym wiąże dynamiczne ograniczanie kosztów eksploatacji poszczególnych urządzeń energetycznych. Aktualnie wymiernym efektem innowacyjnego podejścia do zarządzania zasobami sieciowymi, a przez to obniżania kosztów, jest efektywnie prowadzona eksploatacja i skuteczna diagnostyka urządzeń strategicznych dla systemu elektroenergetycznego. Do grupy takich obiektów należą niewątpliwie transformatory mocy,

które pod względem statystycznym są urządzeniami o dość dużym stopniu niezawodności, jednakże ich awarie niosą ze sobą bardzo poważne konsekwencje, zarówno w wymiarze technicznym, jak i ekonomicznym [1-2]. Zwążywszy na fakt, iż wiele działających w systemie elektroenergetycznym jednostek transformatorowych przekroczyło już 30-letni okres eksploatacji, a zatem czas projektowanej pracy [2-4], w niedalekiej przyszłości można spodziewać się powolnego, lecz stopniowego zwiększania się ich awaryjności. Naturalną konsekwencją takiego stanu rzeczy może być zatem coraz częstsze występowanie tzw. awarii katastrofalnych transformatorów elektroenergetycznych. Może to spowodować powstawanie znacznych strat ekonomicznych, które w ekstremalnych warunkach przekroczą kilkukrotnie wartość zakupu i zainstalowania nowego urządzenia [2, 5]. Dodatkowo, awaryjne wyłączenie strategicznego dla systemu elektroenergetycznego transformatora sieciowego dużej mocy może spowodować zachwianie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej w danym regionie, a w ostateczności zaistnienie lokalnego blackout'u. Aktualnie jedynym i skutecznym sposobem zapobiegania przedstawionym powyżej sytuacjom jest opracowywanie, wdrażanie, a następnie skuteczne stosowanie nowoczesnych metod diagnostycznych, które pozwolą we wczesnym stopniu rozwoju defektu monitorowanego urządzenia na jego wyłączenie, a następnie modernizację lub wymianę.

Głównym celem prowadzonych przez autora prac, których wyniki zaprezentowano w niniejszym artykule, jest opracowanie nowoczesnej i bezinwazyjnej metody oceny stanu technicznego konstrukcji mechanicznej rdzenia jednostek transformatorowych.

2. Idea opracowywanej metody

Od wielu lat prowadzone są badania dotyczące opracowywania innowacyjnych metod pozwalających na poprawną i skuteczną ocenę stanu technicznego pracujących w systemie elektroenergetycznym transformatorów [2, 6-8]. Jednym z elementów ich kompleksowej diagnostyki jest ocena stopnia sprasowania rdzenia, która realizowana jest głównie na podstawie wyników analizy chromatograficznej oleju [9], pomiarów prądów magnesujących [2] oraz wyników skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego generowanego przez pracujące urządzenie przy zmiennym obciążeniu [10]. Niestety wszystkie te metody w zasadzie identyfikują tylko przypadki o skrajnym połuzowaniu elementów obwołu magnetycznego, a do tej pory skuteczna detekcja osłabienia mechanicznego konstrukcji rdzenia dokonywana jest podczas bezpośredniej inspekcji wewnętrznej obiektu, co jest procedurą skomplikowaną i czasochłonną.

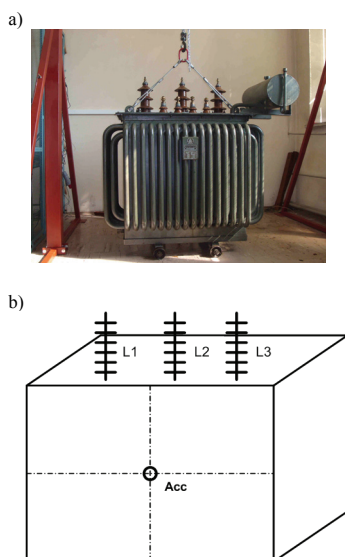
Oprócz przedstawionych powyżej metod, do identyfikacji uszkodzeń mechanicznych rdzenia coraz powszechniej wykorzystuje się metodę wibroakustyczną (VM, ang. *Vibroacoustic Method*). Polega ona na pomiarze drgań mechanicznych badanego transformatora podczas jego normalnej eksploatacji (pracy w stanie ustalonym), a następnie na analizie wartości skutecznych przyśpieszeń i amplitud składowych częstotliwościowych widma [11-12]. Niestety bezkrytyczne stosowanie przyjmowanych w literaturze kryteriów diagnostyczny bardzo często okazuje się mało skuteczne i trudne do zastosowania. Problem ten wynika przede wszystkim z dużej różnorodności eksploatowanych jednostek, które różnią się zarówno pod względem mocy, a co za tym idzie wymiarów zewnętrznych kadzi, jak i technologii konstrukcji rdzenia. Innym problem stosowania VM w ocenie stanu technicznego rdzenia transformatorów jest stopień ich obciążenia podczas przeprowadzania pomiarów [13]. Kolejnym ograniczeniem dia-

gnostycznym omawianej metody jest praca urządzeń wymuszonego obiegu oleju elektroizolacyjnego i powietrza, które generują drgania nakładające się na użyteczny sygnał pomiarowy. Bardzo ważną rolę w poprawnej diagnostyce obwodów magnetycznych transformatorów z wykorzystaniem VM odgrywa również miejsce zamocowania przetworników pomiarowych na kadzi. Niewłaściwe ich rozmieszczenie może powodować rażące błędy procedury pomiarowej, a w konsekwencji błędną interpretację uzyskanych wyników.

Na podstawie przeprowadzonych w Politechnice Opolskiej eksperymentów badawczych, wielu niedogodności i wad omówionych powyżej metod oceny stanu technicznego rdzenia może być pozbawiona zaproponowana przez autora, tzw. zmodyfikowana metoda wibroakustyczna (MVM, *ang. Modified Vibroacoustic Method*), która bazuje na pomiarach drgań mechanicznych transformatora w stanie jego nieustalanej pracy – podczas załączania urządzenia. Do głównych zalet tej metodyki należy zaliczyć: niewrażliwość na stopień obciążenia prądowego badanego obiektu energetycznego; brak znaczącej zależności pomiędzy rejestrowanymi sygnałami wibroakustycznymi a typem, mocą i technologią wykonania diagnozowanych transformatorów; jak również eliminację zakłóceń wynikających m.in. z pracy urządzeń wymuszonego obiegu oleju i powietrza. Dodatkowo, miejsce mocowania przetwornika pomiarowego na powierzchni kadzi badanej jednostki nie wpływa w sposób znaczący na wyznaczane parametry rejestrowanych drgań, a następnie na analizę uzyskanych w ten sposób wyników. Na korzyść w stosowaniu opracowywanej metody pomiarowej przemawia również fakt braku konieczności uziemiania torów prądowych diagnozowanego transformatora, czego bezpośrednią konsekwencją jest jedynie chwilowy przestój badanej jednostki, zwykle ok. 5-10 minut.

3. Badany obiekt i zastosowana aparatura pomiarowa

Przedstawione w artykule wyniki badań otrzymano na podstawie analizy zarejestrowanych w Laboratorium Diagnostyki Układów Izolacyjnych Politechniki Opolskiej sygnałów wibroakustycznych, które mierzono podczas załączania w stan pracy jałowej transformatora olejowego o mocy 200 kVA. Badany transformator, którego widok ogólny przedstawiono na rys. 1a, charakteryzował się następującymi parametrami znamionowymi: typ - TZ-200/20; moc - 200 kVA; napięcie pierwotne - 15750 V; napięcie wtórne - 400 V; grupa połączeń - Yz5; rok produkcji 1959.



Rys. 1. Widok ogólny badanego transformatora (a) oraz schemat umieszczenia akcelerometru na jego kadzi (b)

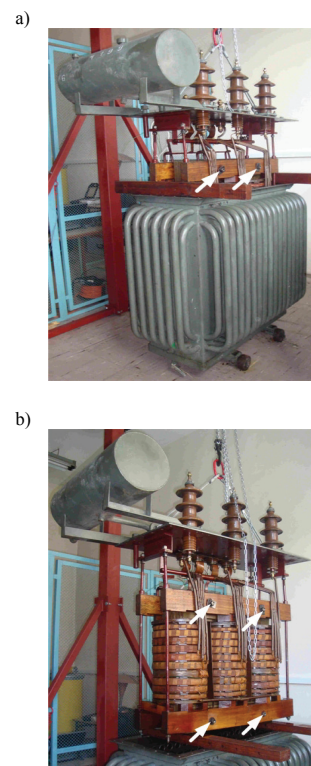
Fig. 1. Overall view of the power transformer under study (a) and diagram of the accelerometer placement on its tank (b)

Drgania mechaniczne diagnozowanej jednostki, zarówno bez, jak również z zamodelowanymi uszkodzeniami mechanicznymi rdzenia, mierzono jednoosiowym akcelerometrem typu DeltaTron. Zastosowany przetwornik, za pomocą uchwytu magnetycznego, umieszczono w osi symetrii jego ściany bocznej od strony wyprowadzenia przepustów izolatorowych średniego napięcia (rys. 1b).

Odbierany przez przetwornik sygnał podawano następnie na wejście specjalistycznej kasety pomiarowej systemu Pulse Dyn-XI, która stanowi profesjonalne urządzenie do pomiarów i analizy drgań mechanicznych. Do rejestracji przebiegów czasowych sygnałów wibroakustycznych wykorzystano komputer pomiarowy wraz z pakietem Pulse Time Data Recorder, natomiast analizę czasowo-częstotliwościową zmierzonych drgań wykonano w oparciu o aplikacje stworzone w oprogramowaniu Pulse LabShop.

4. Metodyka prowadzonych badań oraz analiza uzyskanych wyników

Zakres przeprowadzonego na stacji prób eksperymentu obejmował rejestrację drgań mechanicznych badanej jednostki dla trzech przypadków jej pracy. Przypadek pierwszy dotyczył pomiarów sygnałów wibroakustycznych podczas załączania transformatora w stan pracy jałowej z rdzeniem fabrycznie skreconym (urządzenie bez zamodelowanych defektów mechanicznych rdzenia). Przypadek drugi związany był z rejestracją drgań mechanicznych monitorowanego obiektu w trakcie jego załączania z poluzowanymi śrubami prasującymi jarzma górnego (I stopień uszkodzenia mechanicznego obwodu magnetycznego). Natomiast ostatni przypadek procedury pomiarowej zrealizowano w czasie załączania urządzenia z poluzowanymi śrubami prasującymi belek jarzma górnego oraz dolnego (II stopień uszkodzenia mechanicznego rdzenia). Widok ogólny wyciągniętej z kadzi na stanowisku pomiarowym części aktywnej wraz z zaznaczoną lokalizacją poluzowywanych śrub prasujących zilustrowano na rys. 2.

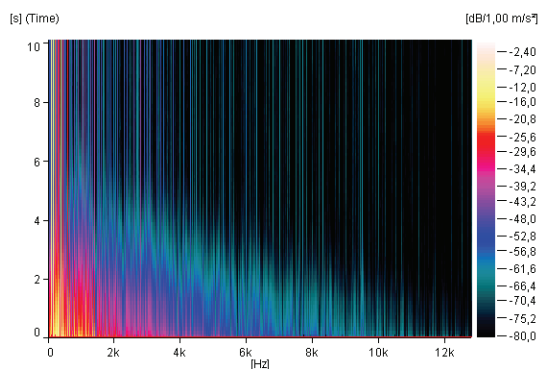


Rys. 2. Widok ogólny transformatora z poluzowanymi śrubami: a) jarzma górnego (I stopień uszkodzenia mechanicznego rdzenia), b) jarzma górnego i dolnego (II stopień uszkodzenia mechanicznego rdzenia)

Fig. 2. Overall view of the transformer with loose screws: a) upper yoke (1st degree mechanical defect of the core), b) upper and lower yokes (2nd degree mechanical defect of the core)

Analizę zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych transformatora przeprowadzono w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej z wykorzystaniem krótkoczasowego przekształcenia Fouriera (STFT), którego zastosowanie pozwoliło na wyznaczenie dwuwymiarowych spektrogramów wartości skutecznej RMS przyspieszenia drgań wyrażonej w odniesieniu do ($\text{dB}/1.0 \text{ m/s}^2$). Całkowity czas rejestracji drgań mechanicznych od momentu załączenia transformatora do czasu osiągnięcia przez niego stanu pracy ustalonej na tzw. biegu jałowym określono na $t = 10 \text{ s}$. Zmierzone sygnały poddano następnie analizie w paśmie częstotliwości $0 \div 12800 \text{ Hz}$.

Na rys. 3 zilustrowano dwuwymiarowy obraz czasowo-częstotliwościowy wartości skutecznej przyspieszenia drgań, który wyznaczono podczas cyfrowego przetwarzania sygnału wibroakustycznego zmierzonego w chwili załączenia badanej jednostki transformatorowej z poprawnie sprasowanym rdzeniem. Z analizy przedstawionego na rys. 3 spektrogramu wynika, że w momencie załączenia jednostki pod napięcie, aż do osiągnięcia przez nią stanu ustalonego pracy ($t \geq 6 \text{ s}$), pasmo częstotliwościowe zmierzonych sygnałów wibroakustycznych zawiera się praktycznie w całym wyznaczonym przedziale, tj. od 0 do 12800 Hz. Na przedstawionym spektrogramie widoczna jest także stopniowa stabilizacja wartości amplitudy poszczególnych składowych częstotliwościowych przyspieszenia drgań wraz z upływem czasu od chwili włączenia transformatora w stan pracy jałowej. Dodatkowo, wykreślony na rys. 3 dwuwymiarowy obraz czasowo-częstotliwościowy charakteryzujący poprawny stan konstrukcji mechanicznej rdzenia wyróżnia się szerokim, relatywnie stałym pod względem wartości amplitudy i praktycznie niezmiennym w czasie udziałem poszczególnych składowych harmonicznych zarejestrowanych drgań przy przejściu badanego urządzenia od nieustalonego do ustalonego stanu pracy ($t > 5 \text{ s}$).

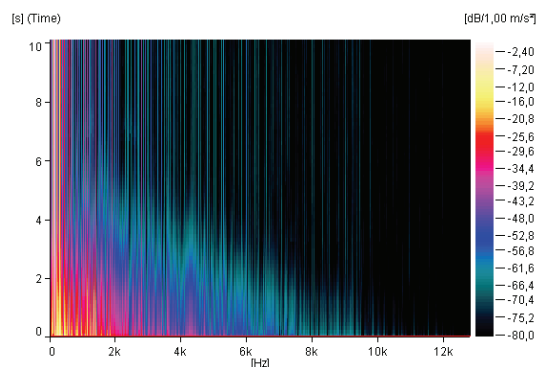


Rys. 3. Przykładowy spektrogram wartości skutecznej przyspieszenia drgań badanego transformatora bez zamodelowanego defektu rdzenia
Fig. 3. Exemplary spectrogram of the vibration acceleration rms value of the transformer under study without modelled defect of the core

W dalszej części niniejszego artykułu zilustrowany na rys. 3 spektrogram należy uznać za punkt odniesienia do kolejnych analiz porównawczych związanych z oceną wpływu stopnia uszkodzenia mechanicznego rdzenia badanego obiektu energetycznego na wyznaczone wskaźniki wibroakustyczne, na podstawie których dokonywana jest diagnostyka jego aktualnego stanu technicznego.

Pierwszą fazę zamodelowania uszkodzenia obwodu magnetycznego transformatora zrealizowano poprzez poluzowanie każdej z dwóch śrub skręcających belki jarzma górnego. Na rys. 4 przedstawiono wykreślony przy użyciu przekształcenia STFT spektrogram wartości skutecznej przyspieszenia drgań, który wyznaczono dla sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego w chwili załączenia jednostki z zamodelowanym defektem I-go stopnia. Na podstawie analizy wykreślonego na rys. 4 spektrogramu i porównaniu go z wynikami przeprowadzonej analizy czasowo-częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego zarejestrowanego podczas załączania badanej jednostki bez uszkodzeń jej rdzenia (rys. 3), można zaobserwować występowanie wyraźnych

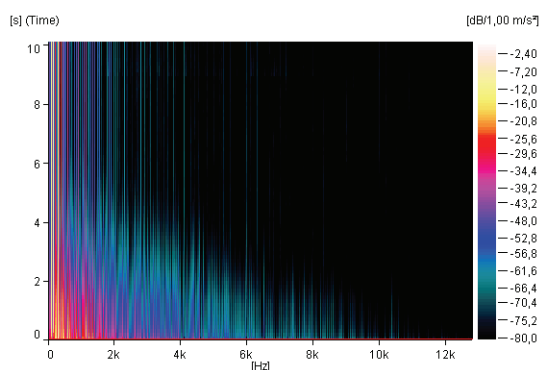
różnic w przedziałach i amplitudach dominujących składowych częstotliwościowych. Dla przypadku załączania transformatora z uszkodzeniem I-go stopnia udział częstotliwościowy zarejestrowanych drgań mechanicznych zawiera się głównie w paśmie od 0 do ok. 10000 Hz, a zatem w zakresie o ok. 2800 Hz wyższym niż dla pracy urządzenia charakteryzującego się dobrym stanem technicznym obwodu magnetycznego. Dodatkowo, od momentu kwazi-ustalonego stanu pracy diagnozowanej jednostki z defektem I-go stopnia ($t \geq 2 \text{ s}$) następuje znaczne ograniczenie, praktycznie zanik amplitudy wyższych składowych harmonicznych drgań z zakresu 10000 \div 12800 Hz.



Rys. 4. Przykładowy spektrogram wartości skutecznej przyspieszenia drgań badanego transformatora z I stopniem uszkodzenia części aktywnej
Fig. 4. Exemplary spectrogram of the vibration acceleration rms value of the transformer under study with modelled 1st degree defect of the core

Na podstawie zilustrowanego na rys. 4 dwuwymiarowego obrazu czasowo-częstotliwościowego charakteryzującego stan techniczny badanego transformatora z zamodelowanym defektem mechanicznym I-go stopnia można stwierdzić, iż cechuje się on nie tylko węższym zakresem częstotliwościowym, ale również względnie szybkim zanikiem i/lub wyraźnym stanem nieciągłości w czasie poszczególnych składowych harmonicznych drgań dla przejścia badanego obiektu od nieustalonego do ustalonego stanu pracy ($t > 5 \text{ s}$), głównie dla częstotliwości powyżej 9000 Hz.

Fazę drugą zamodelowania defektu rdzenia badanego urządzenia wykonano poprzez jednoczesne poluzowanie wszystkich czterech śrub skręcających belki jarznowe. Wyznaczony w tym etapie prac dwuwymiarowy obraz czasowo-częstotliwościowy drgań mechanicznych transformatora załączanego w stan pracy jałowej z zamodelowanym uszkodzeniem II-go stopnia przedstawiono rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy spektrogram wartości skutecznej przyspieszenia drgań transformatora z II stopniem uszkodzenia mechanicznego rdzenia
Fig. 5. Exemplary spectrogram of the vibration acceleration rms values of the transformer under study with modelled 2nd degree defect of the core

Na podstawie przedstawionych na rys. 5 wyników oraz odniesieniu ich do spektrogramów, które wykreślono na rys. 3 i rys. 4 należy bezwzględnie stwierdzić, że zamodelowanie uszkodzenia II-go stopnia (całkowite rozprasowanie rdzenia) spowodowało

wyraźne ograniczenie i/lub zanik udziału amplitudowego składowych częstotliwościowych drgań mechanicznych, w szczególności w zakresie 7000 ÷ 12800 Hz. Dla przypadku załączania transformatora z uszkodzeniem II-go stopnia udział częstotliwościowy zarejestrowanych drgań mechanicznych zawiera się głównie w paśmie od 0 do ok. 7000 Hz, przy czym dla czasów $t > 5$ s w zakresie częstotliwości 4000 ÷ 7000 Hz występuje znaczące osłabienie, a często zanik wielu z wyznaczonych składowych harmonicznych. W porównaniu do spektrogramów wykreślonych dla pracy transformatora bez defektów (rys. 3) oraz z zamodelowanym uszkodzeniem I-go stopnia (rys. 4), wyznaczony na rys. 5 obraz czasowo-częstotliwościowy charakteryzuje się znacznie węższym pasmem częstotliwościowym, tj. zakresem o ok. 5800 Hz mniejszym niż dla wyników otrzymanych dla dobrego stanu technicznego obwodu magnetycznego oraz o ok. 3000 Hz dla rezultatów otrzymanych podczas rejestracji drgań obiektu z defektem I stopnia. Na podstawie zilustrowanego na rys. 5 spektrogramu można również stwierdzić, że wykreślona w dziedzinie czasu i częstotliwości dwuwymiarowa przestrzeń cechuje się względnie szybkim zanikaniem i/lub wyraźnym stanem nieciągłości w czasie poszczególnych składowych harmonicznych drgań dla przejścia badanego obiektu od niestabilnego do ustalonego stanu pracy ($t > 5$ s), głównie dla częstotliwości powyżej 4000 Hz.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych na Politechnice Opolskiej prac, dotyczących analizy drgań mechanicznych diagnozowanego w stanie pracy niestabilnej transformatora, wykazano wyraźne różnice w wyznaczonych spektrogramach wartości skutecznej przyspieszenia drgań. Wyznaczone obrazy czasowo-częstotliwościowe w zakresie pasma 0 ÷ 12800 Hz, dla pracy normalnej (bez defektów) i dla zamodelowanych dwóch stopni uszkodzeń mechanicznych rdzenia badanego transformatora, różnią się między sobą zarówno amplitudą, jak również dominującymi udziałami składowych harmonicznych zarejestrowanych drgań. Wobec powyższego, jako wskaźniki diagnostyczne opracowywanej metody oceny stanu technicznego rdzeni transformatorów elektroenergetycznych możliwe jest wykorzystanie wyników analizy w tendencji i dynamice zmian w czasie oraz w częstotliwości poszczególnych składowych częstotliwościowych zarejestrowanych na badanym obiekcie drgań mechanicznych.

W odniesieniu do przedstawionych w niniejszym artykule wyników, autor pracy przedstawił potencjalną możliwość wykorzystania zaproponowanej metody MVM do oceny stanu technicznego rdzeni jednostek transformatorowych pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym. Otrzymane w ramach eksperymentu rezultaty przeprowadzonych prac wskazują zatem na możliwość opracowania nieniszczącej i skutecznej metody oceny stanu technicznego konstrukcji mechanicznej obwodu magnetycznego eksploatowanych transformatorów, w szczególności tych o strategicznym znaczeniu.

Dodatkowo, opracowanie i wdrożenie kolejnej nowoczesnej metody diagnostycznej może wiązać się z wymiernymi efektami finansowymi, które w przyszłości mogą wynikać nie tylko z ograniczenia wydatków na niezaplanowane remonty, ale przede wszystkim z ograniczenia i/lub wyeliminowania lokalnych blackoutów, które mogą być wywołane awariami katastrofalnymi transformatorów dużej mocy.

6. Literatura

- [1] Singh J., Sood Y. R., Jarial R. K.: Condition monitoring of power transformers - Bibliography survey, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 24, pp. 11 – 25, 2008.
- [2] Praca zbiorowa pod red. J. Subocza: Transformatory w eksploatacji, wyd. 2, Energo-Complex, Piekary Śląskie, 2007.
- [3] CIGRE Study Committee A2 Transformers WG 20: Economics of transformer management, CIGRE SC A2 Transformers WG 20 Electra, no 214, pp. 51–59, 2004.
- [4] Mijailović V.: Optima spares availability strategy for power transformer components, Electrical Power System Research, vol. 80, pp. 987 – 992, 2010.
- [5] Boss P.: Economical aspects and practical experiences of power transformers on-line monitoring, International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ), France, 2000.
- [6] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Zmarzły D.: Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 16, issue 1, pp. 214-223, 2009.
- [7] Van Bolhuis J. P., Galski E., Smit J. J.: Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 528-536, 2002.
- [8] Gockenbach E., Feser K.: Sensitive online PD-measurements of onsite oil/paper-insulated devices by means of optimized acoustic emission techniques (AET), IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 158 – 162, 2005.
- [9] Duval M.: Calculation of DGA limit values and sampling intervals in transformers in service, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 24, pp. 7 – 13, 2008.
- [10] Snell D.: Measurement of noise associated with model transformer cores, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, pp. e535 – 538, 2008.
- [11] Garcia B., Burgos J. C., Alonso A.: Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformation, part I: Theoretical foundation, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 157-163, 2006.
- [12] Skubis J., Jezierski G., Dwojak J., Rzepiela M.: Pomiary drgań transformatora dużej mocy, Wiadomości Elektrotechniczne, no. 4, pp. 193 – 196, 2000.
- [13] Borucki S., Cichoń A.: Wpływ zmiany obciążenia transformatora energetycznego na wyniki sygnałów wibroakustycznych, Przegląd Elektrotechniczny, no7, pp. 45 – 47, 2010.

otrzymano / received: 23.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.