

DEFORMACJE RDZENIA TRANSFORMATORA ZACHODZĄCE POD WPLYWEM SIŁ MAGNETOSTRYKCYJNYCH**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę diagnozowania konstrukcji maszyn i urządzeń zwaną w technice metodą ODS (Operating Deflection Shapes). Metoda ta stanowi podstawę do pełnej analizy modalnej konstrukcji. W pracy, dla zilustrowania przydatności metody, jako obiektem posłużono się transformatorem energetycznym. W rozważaniach skoncentrowano się przede wszystkim na deformacjach wywołanych siłami magnetostrykcyjnymi. Zbudowano model siatkowy badanego transformatora tak, aby, zachowując jego proporcje, węzły modelu odpowiadały punktom pomiaru drgań na obiekcie rzeczywistym. Przyjęta metoda wymaga, aby w każdym węźle pomiary wykonane były w trzech wzajemnie prostopadłych osiach. Zastosowana metoda pozwala „wyselekcjonować” najbardziej reprezentatywne częstotliwości widma drgań danego punktu pomiarowego i określić dla tak wybranych częstotliwości te, które są wspólne dla wszystkich węzłów. Przy analizie uzyskanych wyników posłużono się specjalnie w tym celu opracowanym programem komputerowym. Rozpatrzono wpływ układu i grupy połączeń oraz asymetrię obciążenia na charakter deformacji. Opracowano animacje komputerowe pozwalające analizować badane deformacje. Wszystkie badania przeprowadzono w stanach ustalonych, zgodnie z możliwościami metody.

Słowa kluczowe: transformator, drgania, deformacje

THE DEFLECTION OF THE TRANSFORMER CORE AS THE RESULTS OF MAGNETOSTRICTION FORCES

The paper presented the method of the troubleshooting of the machines and devices called in the technics ODS method (Operating Deflection Shapes). This method determines the base to the full modal analysis of the construction. On the paper, for illustrating of the usefulness of the ODS method, a small 3-phase power transformer was used as the object of visualization. The author concentrated first of all on deformations called out with magnetostriction forces. The reticular model of the examined transformer was specially built. The model keeps proportions of dimensions of the transformer. Nodes of the model represents points of the measurement of twitches on the entity object (Figs 1–2). The accepted method demands that in every node measurement should be executed in three mutually perpendicular axes. Used method permits "to sort" most representative oscillation frequencies of the given measuring point and to qualify these frequencies which are common for all nodes. At the analysis of obtained results the specially prepared computer programme was used. The author examined the influence of the group connections and the vector group of the transformer on the character of deformations. The influence of the load asymmetry was tested, too. The final results of the experiment are presented as animated images (Figs 3–7). The pictures show the points where the strains are extremely high. All researches were made in the steady states.

Keywords: transformer, vibration, core deformation

1. WSTĘP

Transformatory są najbardziej rozpowszechnionym typem maszyny elektrycznej występującej w naszym otoczeniu. Ich parametry eksploatacyjne oraz odporność na różnego typu zaburzenia decydują niejednokrotnie o możliwości korzystania z dobrodziejstwa energii elektrycznej. Ze względu na charakter pracy (praca ciągła) istotna jest sprawność tych obiektów. Decyduje ona o kosztach eksploatacji. Ze względu na konieczność zapewnienia ciągłości dostawy energii, niezbędna jest bardzo duża niezawodność działania transformatorów. Rozpowszechnienie tych urządzeń zadecydowało o zmianach w konstrukcji i technologii wykonania. W ostatnich latach coraz częściej spotykamy transformatory energetyczne bezolejowe zwane suchymi. Są to transformatory pozbawione kadzi. Materiałem izolacyjnym chroniącym uzwojenia przed oddziaływaniem środowiska są w nich wszelkiego typu żywi-

ce i twarde tworzywa sztuczne. Okazuje się, że wykonanie transformatora jako konstrukcji „litej” (uzwojenia i częściowo rdzeń są osłonięte zalewą z tworzywa izolacyjnego) nie zapewnia długotrwałej bezawaryjnej pracy. Najczęstszą przyczyną awarii tych konstrukcji są uszkodzenia izolacji w wyniku przedostawania się wody opadowej lub skroplin pary wodnej zawartej w powietrzu w głąb konstrukcji (np. transformatory dla górnictwa głębinowego). Powszechnie przyjmuje się, że uszkodzenia te powstają w stanach przejściowych w wyniku silnych oddziaływań międzyzwojowych wywołanych przez siły elektrodynamiczne [5, 7].

Transformator podczas swej normalnej eksploatacji podlega oddziaływaniu rozlicznych sił elektrodynamicznych i mechanicznych. Występowanie zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego w rdzeniu jest już wystarczającym powodem do powstawania naprężeń i sił typu magnetostrykcyjnego. Ze względu na relatywnie niewielkie wy-

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

dłużenia względne wywołane zjawiskiem magnetostrykcji, w procesie projektowania, a później produkcji transformatorów, nie uwzględnia się zmian wymiarów liniowych rdzenia. Wydaje się to słuszne zwłaszcza w odniesieniu do transformatorów olejowych [6]. W konstrukcjach tych zarówno rdzeń, jak i poszczególne fragmenty uzwojeń i osprzętu są „otoczone” izolacją olejową. Wszelkie zmiany wymiarów rdzenia czy też uzwojeń są do pewnego stopnia kompensowane przez izolacyjną warstwę oleju. W przypadku transformatorów suchych izolacja jest elementem o małej podatności na deformacje. Jakikolwiek ruchy uzwojeń czy też rdzenia muszą prowadzić do mikropęknięć w okolicach ich wzajemnego styku [2, 3].

Badania nad właściwościami vibracyjno-akustycznymi transformatorów, prowadzone w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych, wykazały, że dla znacznej grupy transformatorów energetycznych, dla których częstotliwość sił elektrodynamicznych wynosi 100 Hz, częstotliwość rezonansowa układu uzwojenie–rdzeń ma zbliżoną wartość [1, 2, 3, 5]. Stwarza to oczywiście dodatkowe zagrożenie uszkodzeniem. „Odstrojenie” układu rdzeń–uzwojenie jest możliwe praktycznie jedynie na drodze zmian własności materiałowych układu izolacji oraz układu mechanicznego podparcia uzwojenia na rdzeniu. Ze względu na własności ferromagnetyczne rdzenia zmiany własności vibracyjnych tej części maszyny są bardzo ograniczone.

Badania wykazały, że oprócz częstotliwości 100 Hz układ uzwojeń drga z częstotliwościami znacznie wyższymi. Jest to szczególnie widoczne w przypadku tzw. transformatorów przekształtnikowych współpracujących z układami zasilanymi ze źródeł o dużej zawartości wyższych harmonicznych [2, 4].

O podatności uzwojenia na drgania oraz o wartości ich częstotliwości rezonansowych decyduje sposób wykonania uzwojenia, rodzaj izolacji, sposób jej wykonania, sposób osadzenia uzwojenia na rdzeniu itp. Istnieje zatem, przynajmniej hipotetyczna, możliwość „sterowania” tą cechą konstrukcji.

Inaczej przedstawia się sprawa magnetostrykcyjnych zmian wymiarów liniowych rdzenia. Nawet przy bardzo wysublimowanej technologii wytwarzania materiałów ferromagnetycznych miękkich, nadających się na rdzenie transformatorów, konstruktor ma bardzo ograniczony wpływ na własności magnetostrykcyjne tych materiałów. Każdy rdzeń ferromagnetyczny będzie zmieniał swe wymiary (głównie wymiar równoległy do kierunku walcowania blachy) pod wpływem pulsującego pola elektromagnetycznego. Równocześnie w uzwojeniach zjawisko to praktycznie nie występuje, zatem podczas normalnej eksploatacji musi występować ciągłe wzajemne przemieszczanie się uzwojeń i rdzenia. Jeśli uzwojenie będzie „sztywno” związane z rdzeniem (transformatory suche), powinno to wywoływać mikropęknięcia izolacji.

Spotykane w literaturze opisy zachowania się rdzenia transformatora energetycznego podczas pracy są najczęściej oparte na obserwacjach wykonywanych na specjalnie skonstruowanych modelach lub jako symulacja komputerowa [2, 3, 4, 5]. W pracy przedstawiono próbę zarejestrowania deformacji kształtu rdzenia rzeczywistego 3-fazowego

transformatora separacyjnego małej mocy pracującego na biegu jałowym oraz w stanie znacznego nierównomiernego obciążenia.

2. OPIS METODY BADAWCZEJ

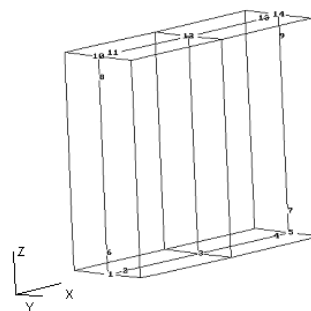
Wydłużenia magnetostrykcyjne rdzenia transformatora wywołane przemiennym strumieniem magnetycznym zależą od zastosowanego materiału oraz w przybliżeniu od kwadratu wartości napięcia zasilającego i zmieniają się z częstotliwością równą podwojonej wartości częstotliwości tegoż napięcia [2, 5, 7]. Ponieważ rdzeń, tradycyjnie wykonanego transformatora, składa się z pionowych kolumn powiązanych mechanicznie z jarzmem górnym i dolnym, zmiany wymiarów jednego z elementów tej konstrukcji muszą oddziaływać na elementy pozostałe. Zasilenie uzwojeń tylko jednej kolumny musi powodować zaburzenia w pozostałych fragmentach. Wszystkie zmiany zachodzący będą periodycznie. Znajomość zmian kształtu powinna umożliwić zastosowanie odpowiednich środków zaradczych (zmiana kształtu, zmiana sposobu osadzenia uzwojenia itp.).

Do „wizualizacji” zachowania się rdzenia zastosowano jedną ze znanych bezinwazyjnych metod pomiaru polegającą na odpowiednim pomiarze drgań badanej konstrukcji (ODS). W tym celu „zbudowano” model siatkowy badanego transformatora w taki sposób, aby – zachowując jego proporcje – węzły modelu odpowiadały punktom pomiaru drgań na obiekcie rzeczywistym. Przyjęta metoda wymaga, aby w każdym węźle pomiary wykonane były w trzech wzajemnie prostopadłych osiach. Zastosowana metoda pozwala „wyselekcjonować” najbardziej reprezentatywne częstotliwości widma drgań danego punktu pomiarowego i określić dla tak wybranych częstotliwości częstotliwości wspólne dla wszystkich węzłów.

Prezentacja wzajemnych przemieszczeń poszczególnych węzłów dla wybranych częstotliwości odbywa się jako komputerowo animowany obraz modelu.

Model badanego transformatora przedstawiono na rysunku 1. Badaniom poddano transformator separacyjny o mocy 5 kVA, 3×380 V, trójkolumnowy, bez obudowy.

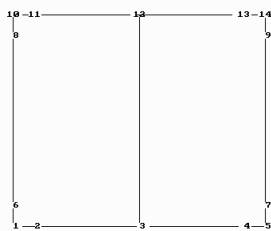
Prezentowany na rysunku model jest modelem trójwymiarowym z zachowaniem proporcjonalności wymiarów.



Rys. 1. Węzłowy przestrzenny model badanego transformatora; liczby (1–14) opisujące wybrane węzły przedstawiają rzeczywiste położenie punktów pomiarowych

Fig. 1. The 3D model of core transformer; the numbers of points (1–14) presented real position of measurement node

Widoczne na rysunku 1 punkty 1–14 oznaczają numery węzłów, w których wykonywano pomiary. Przyjęto, że magnetostrykcyjne zmiany wymiarów blachy elektrotechnicznej są zmianami typowo liniowymi. Pozwala to zastąpić model trójwymiarowy modelem dwuwymiarowym. Upraszcza to znacznie sam model i skraca czas wykonania eksperymentu (redukuje liczę punktów pomiarowych). Zredukowanie modelu do jednej płaszczyzny (2D) nie zwalnia jednak od obowiązku wykonania pomiarów drgań w trzech wzajemnie prostopadłych osiach dla każdego z węzłów. Nie zostaje zatem utracona informacja o przemieszczeniach węzłów modelu w trzech wzajemnie prostopadłych osiach. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony (zredukowany) model transformatora.



Rys. 2. Model transformatora zredukowany do jednej płaszczyzny; zachowano przyjętą wcześniej numerację punktów pomiarowych

Fig. 2. The 3D model of the core reduced to 2D dimensional; the numbers of DOF are the same as in Figure 1

Badania transformatora przeprowadzono dla przypadków, gdy jego uzwojenia były połączone w Yyo oraz Yd.

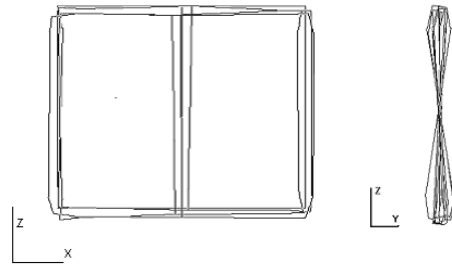
Dla układu Yy wykonano badania zarówno dla stanu biegu jałowego, jak i dla obciążenia jednofazowego o charakterze rezystancyjnym i rezystancyjno-indukcyjnym ($\cos \varphi = 0,4$). Prąd obciążenia stanowił 70% prądu znamionowego. W obu przypadkach (oba układy połączeń) obciążano kolumnę środkową. Badany transformator zaprojektowano jako obiekt przystosowany do pracy przy zasilaniu symetrycznym napięciem 3×380 V. Ponieważ aktualnie napięcie międzyfazowe wynosi 400 V z dopuszczalną tolerancją $\pm 10\%$, oznacza to, że możliwy jest przypadek pracy badanego obiektu przy zasilaniu napięciem 440 V.

Siły magnetyczne, a przede wszystkim siły magnetostrykcyjne działające na rdzeń transformatora są zależne w przybliżeniu od kwadratu napięcia zasilającego, dlatego też wykonano również badania dla przypadku, gdy napięcie wynosi 440 V i obciążona jest tylko jedna kolumna, a uzwojenia stanowią układ Yyo [2, 5, 6].

3. WYNIKI EKSPERYMENTU

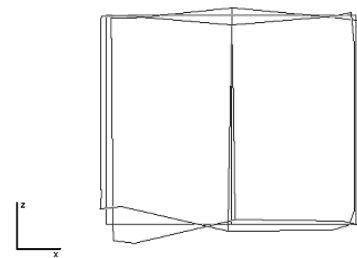
Na rysunkach 3–7 przedstawiono deformacje rdzenia transformatora dla wybranych częstotliwości oraz wybranych stanów pracy. Uznano, że najbardziej reprezentatywne będą rysunki przedstawiające zmiany kształtu dla częstotliwości 100 Hz oraz 150 i 450 Hz.

Te dwie ostatnie częstotliwości wydają się być szczególnie interesujące.



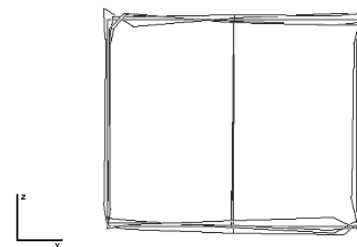
Rys. 3. Wizualizacja ekstremalnych deformacji rdzenia w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach; częstotliwość 100 Hz; bieg jałowy

Fig. 3. Visualization of extremely high deformations in both perpendicular axes; no-load condition



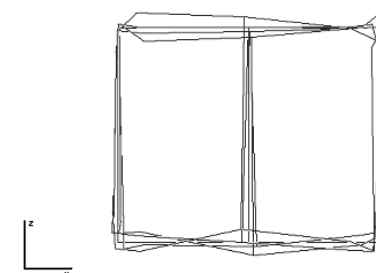
Rys. 4. Deformacje rdzenia dla częstotliwości 150 Hz; układ połączeń Yyo, obciążony jednofazowo

Fig. 4. The core deformations for the frequency 150 Hz; group connection Yyo, 1-phase rated load



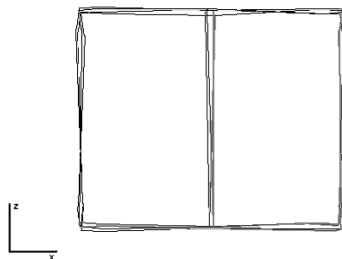
Rys. 5. Deformacje rdzenia dla częstotliwości 450 Hz; układ połączeń Yyo, obciążony jednofazowo

Fig. 5. The core deformations for the frequency 450 Hz; group connection Yyo, 1-phase rated load



Rys. 6. Deformacje rdzenia dla częstotliwości 150 Hz; układ połączeń Yd, obciążony jednofazowo

Fig. 6. The core deformations for the frequency 150 Hz; group connection Yd, 1-phase rated load



Rys. 7. Deformacje rdzenia dla częstotliwości 150 Hz; układ połączeń Yy, obciążony jednofazowo, obwód magnetyczny silnie nasycony

Fig. 7. The core deformations for 150 Hz; group connection Yy, 1-phase rated load, the high saturation of the magnet circuit

4. WNIOSKI

Przeprowadzony eksperyment wykazał, że przyjęta metoda badawcza jest poprawna. W pracy nie zaprezentowano wyników badań ilościowych, nie określono wartości przemieszczeń czy też prędkości drgań, lecz jest zrozumiałe, że takie wielkości zostały określone na potrzeby sporządzenia prezentowanych rysunków.

Obserwowane deformacje dla wybranych przypadków pozwalają przypuszczać, że możliwe staje się wskazanie, takiego układu połączeń, dla którego deformacje będą najmniejsze, a dokładniej, dla którego wzajemne przemieszczenia uzwojeń i rdzenia w strefie styku (szczególnie naroża) będą najmniejsze.

Proponowana metoda jest rzeczywiście metodą bezinwazyjną.

Badania wykazały, że w zależności od rzędu drgań deformacje rdzenia danego transformatora będą, zgodnie z przyjętym w literaturze nazewnictwem ([4, 5]) przyjmowały postaci UU, US, SS lub mieszane [2]. Zależać to będzie zarówno od układu połączeń, asymetrii obciążenia oraz rzędu drgań. Oczywiście dla układu izolacyjnego transformatora szczególnie groźne będą te deformacje, które powodują odkształcenia kolumn rdzenia. Wzajemne przemieszczanie się kolumn względem jarzma powinno w mniejszym stopniu wpływać na trwałość obiektu.

Silne nasycenie obwodu magnetycznego powoduje istotne zmiany w rozkładzie naprężeń elementów rdzenia (rys. 4 i 7). Badania wpływu nasycenia obwodu magnetycznego będą przedmiotem dalszych eksperymentów.

Literatura

- [1] Byczkowska-Lipinska L.: *Analiza wpływu zjawisk elektrodynamicznych na postacie drgań i zagrożenia mechaniczne uzwojeń transformatorów*. Zeszyty Naukowe, nr 673, Politechnika Łódzka, Łódź 1992
- [2] Garcia B., Burgos J.C., Alonso A.: *Transformer tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding. Part I: Theoretical Foundation*. Power Delivery IEEE Transaction Jan. 2006, 157–163
- [3] Garcia B., Burgos J.C., Alonso A.: *Transformer tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding. Part II: Experimental Verification*. Power Delivery IEEE Transaction Jan. 2006, 164–169
- [4] Lazariju D.F., Bichir N.: *Šum električeskich mašin i transformatorow*. Energia 1984
- [5] Narolski B.: *Obliczenia magnetostrykcyjnych drgań i szumu transformatora przy uwzględnieniu mechanicznych naprężeń w rdzeniu*. Elektryka, nr 6, 1967
- [6] Ripka P.: *Magnetic sensors and magnetometers*. Artech House Boston, London 2001
- [7] Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*. Warszawa, WNT 1988

Wpłynęło: 26.09.2006

Paweł IDZIAK



Doktor inż. specjalność maszyny elektryczne, ur. 1954 roku w Poznaniu. Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej. Od ukończenia studiów (1977) pracuje nieprzerwanie w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki

Poznańskiej; obecnie na stanowisku adiunkta. Prowadzone przez niego prace badawcze dotyczą zjawisk sprzężonych zachodzących w elektromechanicznych i magnetycznych przetwornikach energii, a zwłaszcza zjawisk wibracyjno-akustycznych, termicznych i komutacyjnych. Równocześnie przez blisko dziesięć lat pracował jako konstruktor systemów sterowania siłownikami okrętowych w Zakładach H. Cegielski w Poznaniu. Odbił liczne staże przemysłowe w ośrodkach krajowych i zagranicznych. Najważniejsze to: BBC (obecnie AAB) w Szwajcarii (Zakład generatorów w Birr), PPC Ateny (uruchomienie elektrowni Soronni na Rodosie, prace w elektrowniach Iraklion – Kreta oraz Paros i Lesbos), staże w firmach Komel, Dolmel, Wiefamel. Jest autorem i współautorem szeregu publikacji oraz prac tzw. niepublikowanych (opracowania dla przemysłu); łącznie ponad 100. Za swą działalność zawodową wyróżniony w 2004 roku Złotym Krzyżem Zasługi.

e-mail: pawel.idziak@put.poznan.pl