

Analiza drgań i naprężeń w transformatorze rozdzielczym w warunkach zwarcia udarowego

Streszczenie. Artykuł omawia metodykę obliczeń pola elektromagnetycznego w transformatorze rozdzielczym, na podstawie którego są obliczane siły działające zarówno na część aktywną jak i na kadzi transformatora. W obliczeniach magnetycznych i mechanicznych jest stosowana metoda elementów skończonych 3D z uwzględnieniem uwarstwionej struktury uzwojeń i rdzenia oraz ściśliwego oleju. Końcowym efektem obliczeń jest pole przemieszczeń i naprężeń mechanicznych.

Abstract. The article discusses the method of calculating the electromagnetic field in the distribution transformer, on the basis of which the forces acting on both the active part and on the transformer tank are calculated. In the magnetic and mechanical calculations, the 3D finite element method is applied, taking into account the laminar structure of the windings and the core as well as the compressible oil. The final effect of the calculations is the field of mechanical displacements and stresses. (**Analysis of vibration and stress in distribution transformer at operational short circuit**).

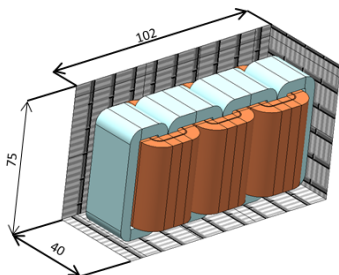
Słowa kluczowe: transformator rozdzielczy, siły elektromagnetyczne, drgania i naprężenia mechaniczne, zwarcie udarowe.

Keywords: distribution transformer, electromagnetic forces, vibration and stress, short circuit conditions.

Wstęp

Transformatory rozdzielcze stosunkowo często znajdują się w sytuacji zwarcia ruchowego, jedno- lub trójfazowego. Ze względu na strukturę uzwojeń – po stronie dolnego napięcia najczęściej mamy uzwojenia foliowe a po stronie górnego napięcia uzwojenie warstwowe, nie ulegają one uszkodzeniom o ile stan zwarcia trwa dostatecznie krótko. Krótkotrwały impuls siły w uzwojeniach generuje ich odkształcenie, które za pośrednictwem oleju przenosi się kadzi. Ponadto, naprężenia magnetyczne wytworzone przez strumień rozproszenia są obecne bezpośrednio na ścianach kadzi.

Obliczenia sił zwarciovych i wynikających z nich deformacji uzwojeń jest zagadnieniem klasycznym i było rozpatrywane przez wielu autorów. Na gruncie polskim są to m.in. książki Jezierskiego [1][2] czy publikacja Pewcy [3]. Rozwój numerycznych metod obliczeń, w szczególności technik obwodowo-polowych wykorzystujących elementy krawędziowe [4][5] umożliwił budowę trójwymiarowych modeli transformatorów dla potrzeb obliczeń zwarciovych o znacznej szczegółowości odwzorowania ich struktury [6]. Tym niemniej, poziom skomplikowania konstrukcji transformatora jest tak duży, że zachodzi potrzeba uśredniania własności magnetycznych lub mechanicznych pewnych obszarów zarówno uzwojeń jak i rdzenia [7] [8]. Przenoszenie drgań uzwojeń i rdzenia na powierzchnię kadzi jest istotnym elementem obliczeń wibroakustycznych [9] [10], w których wykorzystuje się mieszane techniki modelowania zjawisk fizycznych.



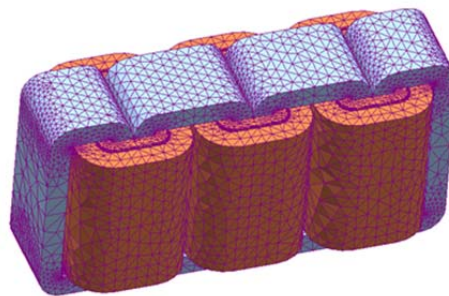
Rys.1. Model numeryczny transformatora do obliczeń magnetycznych, wymiary w [cm]

Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie metodyki obliczeń deformacji ścian kadzi transformatora w typowej sytuacji awaryjnej. Do rozważań wybrano niewielki obiekt o rdzeniu zwijanym, którego wymiary gabarytowe pokazano na rys.1.

Transformator ten nie jest odwzorowaniem żadnej jednostki produkcyjnej, służy jedynie jako narzędzie poglądowe dla celów ilustracji metod obliczeniowych. Szacowana moc znamionowa równa jest 260 kVA.

Obliczenia pola sił magnetycznych

Struktura geometryczna i materiałowa narzuca zastosowanie trójwymiarowych metod numerycznych. Przyjęto, że uzwojenia są połączone w układ Dy o przekładni napięciowej 15/0.4 kV. Liczby zwojów dobrano w taki sposób, aby amplituda indukcji w rdzeniu w stanie jałowym była równa 1.78 T. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych krawędziowych z paraboliczną aproksymacją potencjału magnetycznego w elemencie. Model numeryczny składa się z następujących części: uzwojenia GN i DN, rdzeń ferromagnetyczny i niemagnetyczne, prostopadłościenne otoczenie. Obecność ścian i dna kadzi symulowano poprzez odpowiednie warunki brzegowe. Całość modelu zawiera 559 009 czworokątów a liczba stopni swobody wynosi 753 526. Widok siatki elementów części aktywnej pokazano na rys.2.



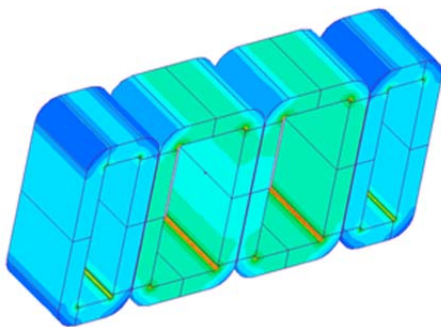
Rys.2. Widok siatki elementów skończonych obszarów uzwojeń i rdzenia transformatora

Rozwiązywano zagadnienie harmoniczne polowo-obwodowe opisane w dziedzinie liczb zespolonych parą zmiennych (\mathbf{T}, Ω) , gdzie \mathbf{T} jest wektorowym potencjałem elektrycznym a Ω skalarnym potencjałem magnetycznym. Wielkości te są powiązane zależnościami [5]

$$\begin{aligned} (1) \quad & \mathbf{H} = \mathbf{T} - \text{grad}(\Omega) \\ (2) \quad & \text{rot} \left(\frac{1}{\nu} \text{rot}(\mathbf{T}) \right) + \omega \mu(\mathbf{H}) \mathbf{T} = \mu(\mathbf{H}) \text{grad}(\Omega) \\ (3) \quad & \text{div}(\mu(\mathbf{H}) \text{grad}(\Omega)) = \text{div}(\mu(\mathbf{H}) \mathbf{T}) \end{aligned}$$

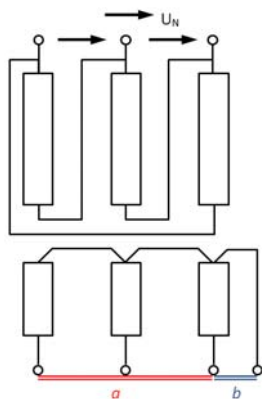
gdzie \mathbf{H} jest natężeniem pola magnetycznego, μ oznacza przenikalność magnetyczną a ω pulsację sieci

zasilającej. Obliczenia wykonano w środowisku Magnet v.7.9. Ze względu na niewielką szczelinę pomiędzy kolejnymi zwiżanymi rdzeniami rozkład indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach składowych różni się nieco, jak widać na rys.3, tym niemniej, strumienie skojarzone z poszczególnymi uzwojeniami fazowymi są już praktycznie identyczne.



Rys.3. Rozkład pola wartości skutecznych indukcji magnetycznej w rdzeniu w warunkach stanu jałowego

Analizowano dwa stany awaryjne (po stronie DN, rys.4) symetryczne zwarcie trójfazowe (a) oraz zwarcie jednofazowe na skrajnej kolumnie (b). W obydwu przypadkach napięcie zasilające było niezmiennie i równe znamionowemu. Należy zwrócić uwagę, że napięcie zwarcia w niewielkich transformatorach rozdzielczych jest rzędu 4-5%. Tym samym składowa aperiodyczna w udarowym prądzie zwarcia jest również nieduża [1] i ustalony prąd zwarcia może być dobrą miarą zagrożenia dla danego stanu awaryjnego.



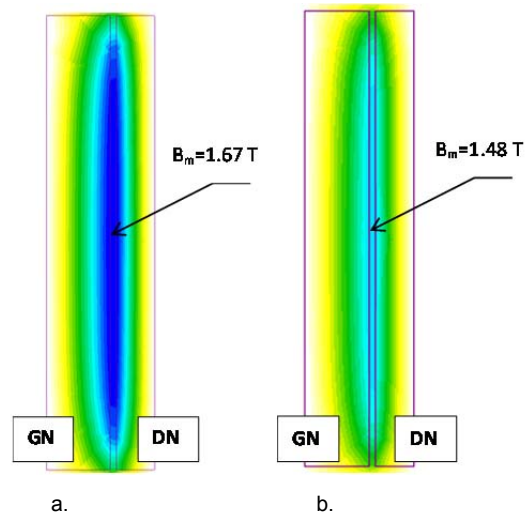
Rys.4. Schemat połączeń transformatora dla badanych stanów awaryjnych

Rozkłady składowej osiowej pola indukcji w strefie uzwojeń w obydwu przypadkach mają podobny kształt przedstawiony na rys.5, przy czym amplituda pola indukcji przy zwarcu jednofazowym jest większa o kilkanaście procent od odpowiednika przy zwarcu trójfazowym. Pola te po wymnożeniu przez amplitudę gęstości prądu J_m dają wartość składowej radialnej gęstości objętościowej siły Lorentza (określenie „radialna” jest tu w pewnym sensie umowne, gdyż uzwojenia nie mają czysto cylindrycznego kształtu). W dalszych rozważaniach uwzględniać się będzie jedynie uzwojenie GN, które styka się bezpośrednio z warstwą oleju pomiędzy tym uzwojeniem i ścianą kadzi.

$$(4) \quad p_{rGN} = 0.5 B_m J_m g$$

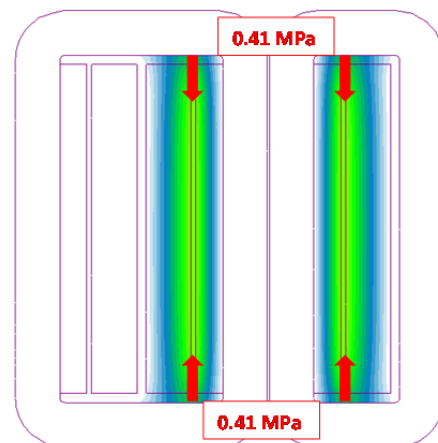
gdzie g jest grubością tego uzwojenia. Podstawiając wartości liczbowe uzyskane w obliczeniach otrzymuje się

przy zwarcu jednofazowym $p_{rGN}=1.077$ MPa oraz przy zwarcu trójfazowym $p_{rGN}= 0.747$ MPa. W powyższych zależnościach zaniedbano występowanie niewielkiego spadku sił „radialnych” na krańcach uzwojenia.



Rys.5. Pole składowej osiowej indukcji magnetycznej w przekroju zwartych uzwojeń, a. zwarcie jednofazowe, b. zwarcie trójfazowe

Oprócz sił Lorentza pole magnetyczne wytwarza siły powierzchniowe wszędzie tam, gdzie strumień magnetyczny przechodzi przez granicę obszaru ferromagnetycznego. W analizowanym transformatorze mamy do czynienia z dwoma takimi miejscami gdzie wnika strumień rozproszenia – na powierzchni jarzma rdzenia oraz na powierzchni ścian kadzi. Przykładowe wartości tych sił zamieszczono na rys.6 i rys.7. Należy tu pamiętać, że grubość (a więc i sztywność) jarzma jest wielokrotnie większa od grubości ścian kadzi transformatora. Dodatkowo, siły działające na ściany kadzi są parami przesunięte w fazie o kąt 120 deg.



Rys.6. Obszary występowania powierzchniowych sił magnetycznych na powierzchniach jarzma (wartości przy zwarcu uzwojenia na skrajnej kolumnie, mapa barwna gęstości energii magnetycznej)

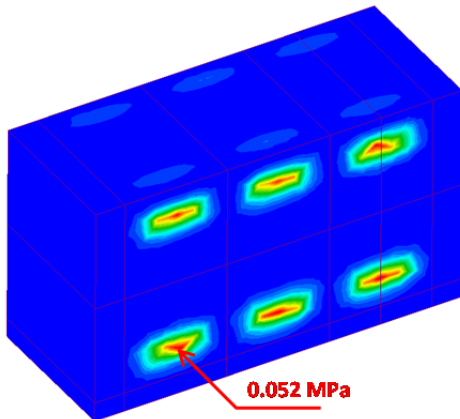
Obliczenia przemieszczeń i naprężeń mechanicznych

Rozwiązywane jest zadanie drgań harmonicznych tłumionych u ze stałym współczynnikiem tłumienia ζ . Równanie różniczkowe cząstkowe opisujące ten proces dla ośrodków izotropowych może być zapisane w postaci [11]

$$(5) \quad G \nabla^2 \mathbf{u} + \left(K_V + \frac{G}{3} \right) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - j \omega \zeta \mathbf{u} + \omega^2 \rho \mathbf{u} = -\mathbf{f}_V$$

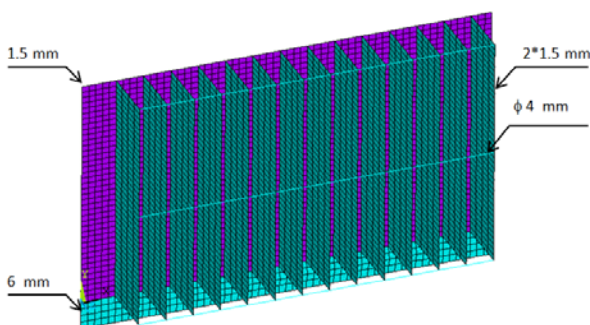
gdzie K_V i G oznaczają moduły ścisłości objętościowej i ścinania, ω jest pulsacją drgań, ρ jest gęstością masy a przez f_v oznaczono objętościową gęstość sił wymuszających drgania. Zadanie to sprowadza się [12] stosując metodę prac wirtualnych i aproksymację według metody elementów skończonych do macierzowego układu równań w dziedzinie liczb zespolonych

$$(6) \quad ([K] + j\omega[C(\zeta)] - \omega^2[M])\{u\} = \{F\}$$



Rys.7. Obszary występowania powierzchniowych sił magnetycznych na powierzchniach kadzi (wartości przy symetrycznym trójfazowym zwarciu uzwojeń, składowa przemienna)

Powyższy układ równań o składowych macierzach sztywności $[K]$, tłumienia $[C]$ i mas $[M]$ rozwiązuje się zwykle w siatce elementów skończonych brylowych, to jest mających kształt czworo- lub sześciokątny o proporcjach boków nie przekraczających liczby 10. Dla obiektów cienkościennych, dla których jeden z zewnętrznych wymiarów geometrycznych jest co najmniej kilkadziesiąt razy mniejszy od pozostałych, takie podejście jest nieopłacalne, gdyż prowadzi do układu równań o bardzo wielkich rozmiarach. Opracowano więc [12] dodatkowe klasy elementów skończonych tzw. powłokowe i prętowe, które mają kształt, odpowiednio, płaskich czworokątów lub odcinków. W ich węzłach wprowadzono dodatkowe wektory niewiadomych obrotów $\{\alpha\}$. Układ równań stanu (6) ma taką samą postać, przy czym wektor niewiadomych jest teraz w postaci $\{u, \alpha\}$. Wartości składników macierzy układu oblicza się całkując niezależne równania ruchu liniowego i obrotowego.



Rys.8. Geometria modelu mechanicznego ściany kadzi falistej

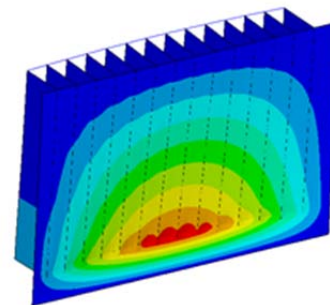
O ile przy tworzeniu modelu elektromagnetycznego transformatora można było pominąć szereg elementów konstrukcyjnych, takich jak belki jarzmowe, przekładki czy elementy nośne konstrukcji, to przy tworzeniu modelu do obliczeń mechanicznych części te mogą odgrywać istotną rolę. Nie dysponując dokumentacją technologiczną

zdecydowano się na wykonanie szeregu modeli częściowych, których wyniki stanowią ilustrację ważności poszczególnych fragmentów konstrukcji.

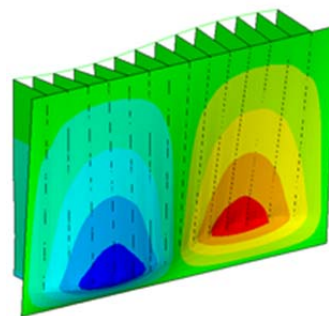
Pierwszym takim modelem, wykonanym w programie ANSYS v.14, jest ściana kadzi z radiatorami falistymi pokazana na rys. 8. Model wykonano stosując elementy powłokowe, które utwierdzono na zewnętrznych krawędziach ściany oraz elementy prętowe. W obliczeniach zaniedbano inercyjny wpływ warstwy oleju znajdującej się w pobliżu jej wewnętrznej powierzchni. Obliczenia dotyczą analizy postaci i częstotliwości drgań własnych oraz wymuszonych polem magnetycznym deformacji tej ściany. Przyjęto izotropowy charakter materiałów o stałej wartości współczynników.

Obliczenia drgań swobodnych pokazały, że istnieją takie postacie drgań własnych niskich rzędów, pokazane na rys.9, których częstotliwości są bliskie częstotliwości sił wymuszających. Widzimy tam, że żebra radiatorów znacząco usztywniają powierzchnię ściany, stąd ekstrema pola drgań własnych znajdują się w pobliżu styku fragmentu ściany z radiatorami z blachą formującą dno kadzi.

a)



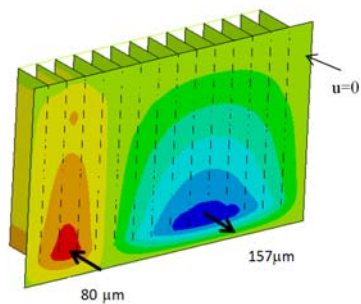
b)



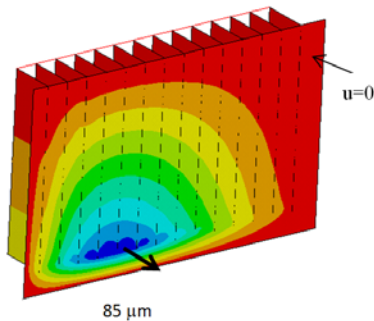
Rys.9. Postacie drgań własnych (przemieszczenia normalne do powierzchni kadzi) a. $f=93$ Hz, kolor , zerowy maksimum, niebieski zero, b. $f=113$ Hz, kolory czerwony i niebieski \pm ekstremum, zielony zero,

Obliczenia drgań wymuszonych wykonano w warunkach zwarcia jednofazowego na skrajnej kolumnie i amplitudzie 30 kPa naprężeń magnetycznych o częstotliwości 100 Hz. Amplitudę tę uzyskano po odjęciu składowej stałej. Wynikowe rozkłady przemieszczeń przedstawiono na rys.10 a pole naprężeń zredukowanych na rys.11.

Na rysunkach tych widać wyraźnie wpływ wzmocnienia rezonansowego zaznaczający się dużą wartością amplitud pola składowej urojonej drgań. W polu naprężeń zredukowanych występują wyraźne ich koncentracje w punktach będących jednocześnie punktami styku blach o dwu różnych grubościach z krawędzią radiatorów. Należy pamiętać, że amplituda wymuszeń zawiera jedynie składową okresową, po wprowadzeniu składowej stałej w czasie i ewentualnie składowej aperiodycznej wynikającej z chwili zwarcia udarowego wypadkowe naprężenia mogą przekroczyć granicę plastyczności szacowaną na 160 MPa.

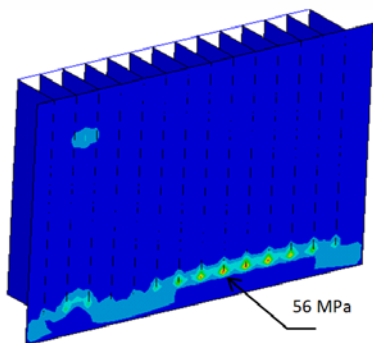


Realis

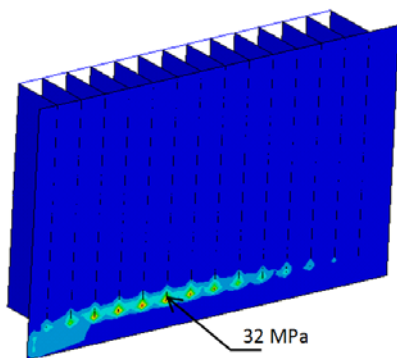


Imaginalis

Rys.10. Przeszczenia normalne ściany kadzi przy zwarciu jednofazowym



Realis



Imaginalis

Rys.11. Pole naprężeń zredukowanych Hubera – von Misesa ściany kadzi przy zwarciu jednofazowym

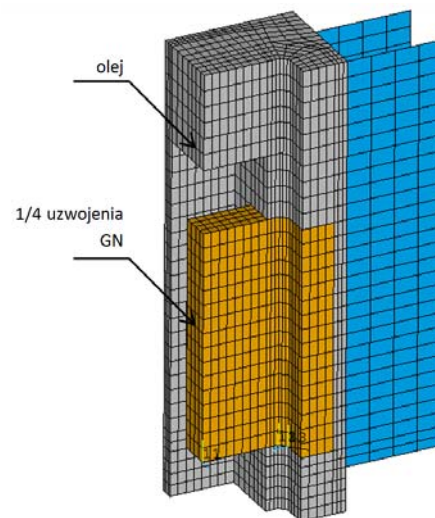
Drugim modelem obliczeniowym jest fragment narożnika kadzi. Celem tych obliczeń jest sprawdzenie możliwości pobudzenia drgań kadzi przez siły Lorentza działające na uzwojenie za pośrednictwem warstwy oleju. Wprowadzenie stacjonarnego płynu do modelu numerycznego transformatora pociąga za sobą konieczność zastosowania nowej klasy elementów skończonych, tzw. elementów akustycznych. Równanie

opisujące zachowanie takiego ośrodka otrzymuje się podstawiając zerowe wartości modułu G i współczynnika ζ w równaniu (5) – zakładamy, że płyn jest ściśliwy i nielepki. Przyjmując ponadto brak wymuszeń objętościowych, co oznacza pobudzenie ośrodka wyłącznie poprzez warunki brzegowe, otrzymuje się po prostych przekształceniach

$$(7) \quad -K_V \nabla^2 \mathbf{u} = \omega^2 \rho \mathbf{u}$$

Równanie to jest również spełnione przez skalarną wielkość jaką jest składowa przemienna ciśnienia p_a w płynie. Wykonując obustronną operację dywergencji otrzymujemy równanie dla względnej zmiany objętości ośrodka δ_V w danym punkcie. Z kolei wielkość δ_V jest proporcjonalna do wartości ciśnienia, które ją wywołało. Pole w elementach akustycznych jest zwykle opisane poprzez węzłowe wartości ciśnienia, jedynie na granicy z klasycznym ośrodkiem sprężystym występują elementy o mieszanej strukturze zawierające również węzłowe wartości przemieszczeń.

Geometria modelu została pokazana na rys.12. W definicji modelu zachowano warstwową strukturę uzwojenia GN dzięki określeniu [11] ortotropowych własności materiałowych oraz wprowadzono warunki symetrii, które sprzyjają koncentracji ciśnienia w płynie. Założono przy tym, że rdzeń obwodu magnetycznego jest nieskończenie sztywny, czemu odpowiada puste miejsce wewnątrz siatki elementów skończonych reprezentujących olej transformatora.

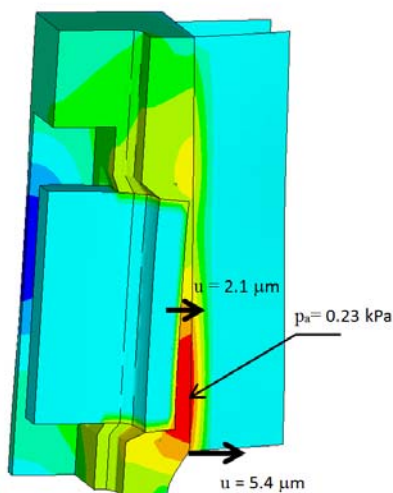


Rys.12. Struktura modelu numerycznego narożnika kadzi transformatora

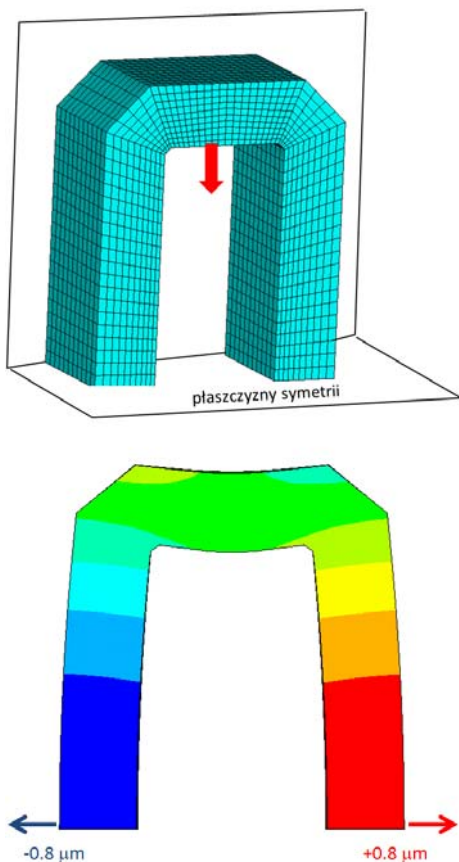
Na rys.13 pokazano rozkład pola ciśnienia w oleju wraz ze związanym z nim zdeformowanym kształtem konstrukcji kadzi w warunkach zwarcia jednofazowego. Wielkości przemieszczeń ściany kadzi oraz ciśnienia na jej powierzchni są wielokrotnie mniejsze od analogicznych wielkości uzyskanych w poprzednim modelu. Wynika to z wielokrotnie większej sztywności uzwojenia GN poddanego praktycznie równomiernemu rozciąganiu w stosunku do sztywności dolnego fragmentu kadzi, który jest zginany. Przeszczenie „radialne” Δr uzwojenia możemy oszacować z góry zależnością wynikającą z teorii tzw. cienkiego pierścienia [13]

$$(8) \quad \Delta r \leq \frac{p_{rGN}}{d_{GN} E_{Cu}} r^2$$

gdzie d_{GN} jest grubością uzwojenia, r średnim promieniem, E_{Cu} modułem Younga dla miedzi. Podstawiając $p_{rGN}=1$ MPa i wymiary geometryczne otrzymuje się $\Delta r=5.1$ μm, co jest w dobrej zgodności z wynikami obliczeń numerycznych pokazanych na rys.13.



Rys.13. Postać deformacji narożnika kadzi przy zwarciu jednofazowym wraz z mapą pola ciśnienia w oleju



Rys.14. Struktura geometryczna numerycznego modelu końcowego rdzenia transformatora oraz pole przemieszczeń wymuszonych magnetycznymi siłami powierzchniowymi

Uzyskane wyniki wskazują na mniejsze znaczenie tego mechanizmu przenoszenia drgań. Tym niemniej, należy pamiętać, że wprowadzone warunki brzegowe znacznie usztywniają ścianę kadzi i zniekształcają przez to wynikowe wartości amplitud drgań.

Ostatnim sub-modelem rozważanego transformatora jest swobodny końcowy rdzeń transformatora zamieszczony na rys.14. Przy jego budowie wykorzystano warunki symetrii modelując tylko 1/4 objętości oraz zachowano zwaną strukturę materiału stosując tzw. elementy warstwowe, w których odwzorowano rzeczywistą grubość blachy elektrotechnicznej. Wyniki pokazano na rys.13 dla pobudzenia jak na rys.6 symetrycznymi siłami powierzchniowymi

o amplitudzie 0.2 MPa i częstotliwości 100 Hz w warunkach zwarcia jednofazowego. Uzyskane deformacje rdzenia są niewielkie, maksymalne przemieszczenie wynosi $\pm 0.8 \mu\text{m}$. Częstotliwość własna o postaci odpowiadającej kształtowi wymuszonych deformacji jest wysoka i równa 1008 Hz. Tym samym można uznać otrzymaną postać drgań za identyczną z odkształceniami statycznymi i wypadkowe przemieszczenie po uwzględnieniu składowej stałej w przestrzeni będzie w przybliżeniu dwukrotnie większe. Porównując wielkości możliwych naprężeń pochodzących od sił Lorentza z wymuszeniami magnetycznymi widzimy, że założenie nieskończonej sztywności rdzenia transformatora jest bliskie rzeczywistości. Należy przy tym podkreślić, że w rozpatrywanym modelu nie uwzględniono występowania strefy zapleceń, której obecność może znacząco obniżyć sztywność pakietu. Jej wprowadzenie jest możliwe, wymaga jednak znajomości naprężeń powstałych w wyniku krępowania pakietów blach.

Podsumowanie.

Przeprowadzone obliczenia pokazują, że w warunkach zwarcia udarowego transformatora rozdzielczego z rdzeniem płaszczywowym mogą pojawić się znaczne odkształcenia na powierzchni kadzi transformatora, które w niesprzyjających warunkach wynikających ze znacznej składowej aperiodycznej w prądzie zwarcia oraz naprężeń po procesie spawania mogą w granicznym przypadku być źródłem rozszczelnienia kadzi transformatora. Pokazana metodyka obliczeń wykorzystująca analizę harmoniczną jest przybliżona, dokładne rachunki powinny stosować techniki niestacjonarne. Ich zastosowanie w połączeniu z uzupełnieniem struktury modeli numerycznych o szczegóły konstrukcyjne prowadzić może nawet do kilkudziesięciokrotnie większych nakładów obliczeniowych.

LITERATURA

- [1] E. Jezierski: Transformatory. Podstawy teoretyczne, WNT, Warszawa, 1961
- [2] E. Jezierski: Transformatory. Budowa i projektowanie, WNT, Warszawa, 1963
- [3] W. Pewca, Wybrane zagadnienia wytrzymałości zwarciowej transformatorów, Forum Transformatorowe ABB, Łódź 2006, 155-189
- [4] H. Ahn, Y. Oh, and J. Kim, Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer, IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 2, pp. 819–822, February 2012
- [5] J. P. Webb, Edge Elements and What They can do for You, IEEE Trans. Magn., vol. 29, no.2, March 1993, 1460-1465
- [6] M. S. A. Minhas, Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits, PhD thesis, Johannesburg Univ., 2007
- [7] P. Witczak, Powstawanie rezonansowych drgań uzwojeń w transformatorach energetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, r. 93 nr 7/2017, 1-4
- [8] H. Pfützner, G. Shilyashki, E. Mulasalihovic, Modern transformer cores - 3-dimensional magnetic systems of underestimated complexity, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 48, no. 2,3, 2015, 143-151,
- [9] G.Reyne, H. Magnin, G.Berliat, C.Clerc, A Supervisor for the Successive 3D Computations of Magnetic, Mechanical and Acoustic Quantities in Power Oil Inductors and Transformers, IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 5, September 1994, 3292-3295
- [10] M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, R. Lerch, Combination of Finite and Boundary Element Methods in Investigation and Prediction of Load-Controlled Noise of Power Transformers, Journal of Sound and Vibration (2000), Vol. 250, Issue 2, February 2002, 323–338
- [11] P.Witczak, Wibroakustyka maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, Monografie Politechniki Łódzkiej, 2012
- [12] Zienkiewicz O.C.: Metoda elementów skończonych, Arkady, Warszawa 1972
- [13] S. Timoshenko, Theory of elasticity, McGraw-Hill College; 3 edition, 1970)