

doi:10.15199/48.2015.01.27

## Szacowanie strat dodatkowych w uzwojeniach transformatorów z wykorzystaniem numerycznych metod polowych

**Streszczenie.** W pracy przedstawione zostały nowoczesne metody budowy trójwymiarowych modeli obliczeniowych uzwojeń transformatorów dla potrzeb szacowania strat dodatkowych powstałych od składowej osiowej i promieniowej pola rozproszenia w przestrzeni uzwojenia. Podstawą analizy strat w uzwojeniu GN i DN było zastosowanie wektora Poyntinga, który określa moc i kierunek strumienia mocy elektromagnetycznej przechodzącej przez jednostkę powierzchni prostopadłej uzwojenia do kierunku przepływu energii. W artykule zaprezentowano metody budowy modeli numerycznych uzwojeń prądowych. Opracowany model matematyczny wykorzystuje połączenie różnych typów potencjałów magnetycznych. Zastosowanie opisu pola różnymi typami potencjałów pozwala na ograniczenie liczby elementów siatki oraz równań różniczkowych.

**Abstract.** The paper presents the modern method of construction of three-dimensional computational models of transformers windings for estimating the additional loss of axial and radial component of the leakage field. The analysis of loss in the HV and LV winding was done by use of Poynting vector, which determines the strength and direction of the electromagnetic power flow through the unit area of the winding perpendicular to the direction of energy flow. The paper presents methodology of building numerical models of windings with current excitation. The mathematical model uses various types of magnetic potentials. The use of different types of potential field helps to reduce the number of elements and differential equations. (The estimation of additional losses in the transformer windings using numerical methods of field calculation).

**Słowa kluczowe:** transformatory dużych mocy, uzwojenia transformatorów, siły elektromagnetyczne, modelowanie 3D

**Keywords:** power transformer, transformer winding, electromagnetic forces, 3D modeling.

### Wprowadzenie

Nowoczesne metody modelowania stanowią obecnie istotną rolę w projektowaniu poprawnych i niezawodnych konstrukcji transformatorów. Wiele konstrukcji transformatorów, z racji koncentracji pola rozproszenia i ich nierównomiernych rozkładów modeluje się metodami stosunkowo dokładnymi lecz na obecną chwilę dosyć czasochłonnymi. Takie metody analizy wykorzystują numeryczne modele siatkowe, w których liczy się rozkład wektorowego potencjału magnetycznego. Do metod tych zaliczyć można metodę elementu skończonego (MES).

W artykule zaprezentowana została szacowanie strat dodatkowych w uzwojeniach transformatorów na podstawie trójwymiarowej analizy pola, dla transformatora o mocy znamionowej 1250 kVA o przekładni napięciowej 6/1,05 kV.

Analizowany transformator zaprojektowany został do pracy w trudnych warunkach, w środowisku wybuchowym, w którym temperatura zewnętrzna przekracza 40°C. W takich warunkach nie jest przewidziane stosowanie chłodzenia wymuszonego. Chłodzenie możliwe jest wyłącznie przez stalową i hermetycznie zamkniętą i masywną, kadź.

### Model obliczeniowy

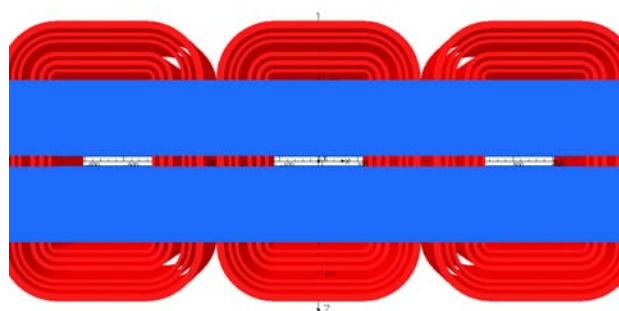
Model obliczeniowy, pozwalający na szacowanie strat dodatkowych wydzielanych w uzwojeniach opracowywano dla warunków znamionowej pracy transformatora. Na obecnym etapie techniki nie jest możliwe przeprowadzenie modelowania dla rzeczywistej geometrii bez przyjęcia założeń upraszczających. Z tego powodu zaniedbano nieistotne z punktu analizy elementy oraz wprowadzono warunki brzegowe pozwalające na zmniejszenie liczby elementów skończonych przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności obliczeń. Uproszczenie modelu wpływa również na skrócenie czasu obliczeń.

W modelu obliczeniowym uwzględniono elementy części aktywnej obwodu elektromagnetycznego takie jak: rdzeń magnetyczny, kadź i uzwojenia GN i DN.

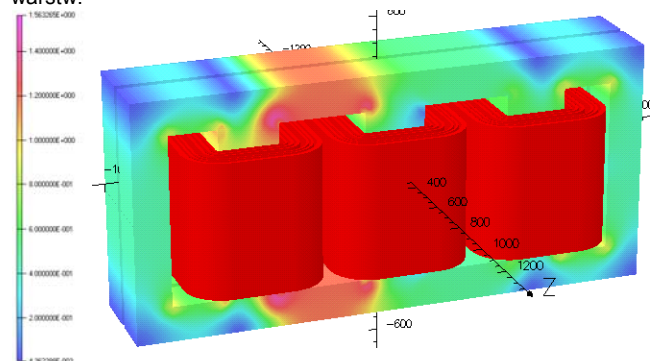
Należy zaznaczyć, że problem jest na tyle złożony, że nie jest możliwe pominięcie oraz zaniedbanie zjawisk zachodzących w kadzi (choćby dodatkowe jej elementy w tym śruby, belki zostały pominięte). Model wymagał uwzględnienia wpływu magnesowania i wpływu prądów

wirowych kadzi na rozkład pola w obszarze uzwojeń. Prawidłowe zaprojektowanie modelu kadzi omówione zostało w literaturze [2], [3].

W analizowanym transformatorze uzwojenia GN złożone były z trzech grup połączonych szeregowo. Zawierały one poszczególne warstwy uzwojenia, które nawinięte zostało pojedynczym przewodem. Uzwojenia DN złożone były z trzech grup, w których każda składała się z warstw nawiniętych taśmą (rysunek 1).



Rys.1. Model uzwojeń transformatora z widocznymi grupami warstw.



Rys.2. Model transformatora - rozkłady modułu indukcji w rdzeniu dla wybranej chwili czasowej.

W obliczeniach zastosowano katalogowe i nieliniowe charakterystyki magnesowania dla rdzenia i kadzi oraz przyjęto wymagane konduktywności w elementach konstrukcyjnych jak dla stali. Zaniedbano natomiast konduktywność blachy rdzenia.

### Szacowanie strat dodatkowych promieniowych i osiowych w uzwojeniu

Straty obciążeniowe wywołane przepływem prądu obciążenia przez uzwojenie transformatora obejmują straty podstawowe oraz straty dodatkowe tego uzwojenia. Straty dodatkowe w uzwojeniach podzielić można na:

- straty wywołane przez składową osiową pola rozproszenia,
- straty od składowej promieniowej pola rozproszenia,
- straty cyrkulacyjne, powodowane przez przepływ prądów wyrównawczych (cyrkulacyjnych) płynących przez równoległe gałęzie w uzwojeniach.

W dostępnej literaturze metodom obliczania strat podstawowych i dodatkowych poświęcono wiele uwagi. Obecnie straty te liczone są z zastosowaniem wzorów analitycznych, w których stosuje się empiryczne współczynniki. Przykładowo wskaźnik strat dodatkowych uzwojeń wywołanych przez składową osiową pola w rozważanym uzwojeniu można wyrazić zależnością (1) natomiast składową promieniową wzorem (2).

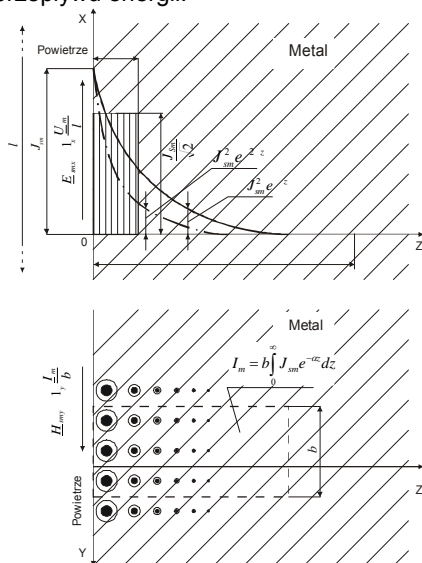
$$(1) \quad \chi_y = \frac{\Delta P_y}{\Delta P_p}$$

$$(2) \quad \chi_x = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_p}$$

W literaturze dostępne są metody obliczania tych wskaźników w zależności od: położenia uzwojeń (skrajne, środkowe), liczby przewodów występujących wzdłuż wymiaru promieniowego (szerokości) i wymiaru osiowego (wysokości) uzwojenia, liczby przewodów występujących wzdłuż wymiaru promieniowego/osiowego, obliczeniowej długości linii sił strumienia rozproszenia, czystości, rezystywności materiału przewodowego oraz od samego wymiaru promieniowego i osiowego gołego przewodu.

W przypadku numerycznych obliczeń połowych w obliczeniach istotny jest dokładny rozkład pola magnetycznego w obszarze poszczególnych przewodów uzwojeń. Szacowanie na podstawie rozkładu pola wnikania energii do przestrzeni przewodu i przetwarzania energii pola na energię ciepłą w środowisku przewodzącym.

Podstawą analizy strat dodatkowych w uzwojeniu GN i DN jest twierdzenie Poyntinga. Wektor Poyntinga określa moc i kierunek strumienia mocy elektromagnetycznej przechodzącej przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku przepływu energii.



Rys.3. Wykres tłumienia gęstości prądu (tłumienie pola) i kwadratu gęstości prądu (tłumienie mocy).

Twierdzenie Poyntinga może być stosowane do obliczania mocy czynnej, biernej i pozornej dopływającej do badanego obszaru. Twierdzenie Poyntinga można wykorzystać dla dowolnego środowiska liniowego i nieliniowego, wykazującego histerezę jak również dla środowisk niejednorodnych i anizotropowych. W dostępnej literaturze [5] zostało wykazane, że ma ono ogromną przydatność praktyczną. Twierdzenie Poyntinga jest szczególnym przypadkiem ogólnego prawa zachowania energii i stanowi punkt wyjścia dla prawa przetwarzania energii elektromagnetycznej pola na energię ciepłą w środowiskach przewodzących. W literaturze [5] zaprezentowano ruch fali płaskiej w metalu i jej rozprzestrzenianie się w prostopadłym kierunku do powierzchni metalu. Dla takiej fali przy założeniu, że płaszczyzna XY pokrywa się z powierzchnią półprzestrzeni metalowej występuje tylko jedna składowa mocy  $S_z$  wektora Poyntinga.

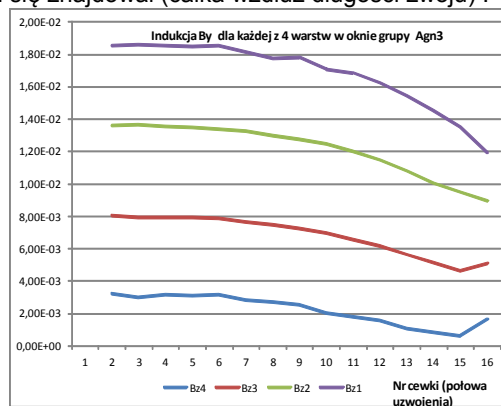
Moduł składowej czynnej wektora Poyntinga, odpowiadający mocy czynnej w  $W/m^2$ , przepływającej przez jednostkę powierzchni dla przewodu miedzianego o wymiarach większych od równoważnej głębokości wnikania (dla półprzestrzeni metalowej) określa wzór (3).

$$(3) \quad S_p(z) = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\gamma}} \frac{|H_{ms}|}{2} e^{-2kz}$$

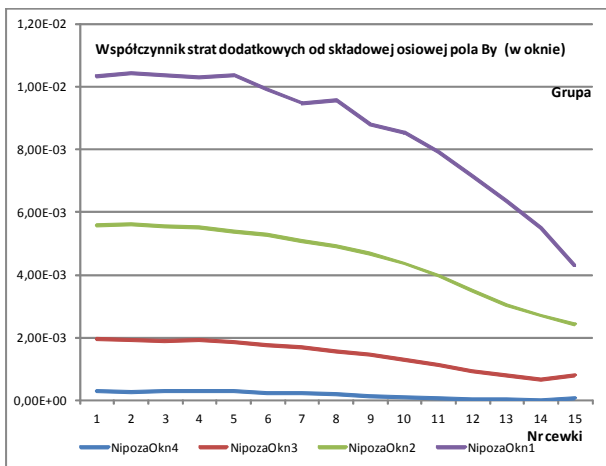
Moc fali elektromagnetycznej jest tłumiona tak jak pole tzn. według funkcji wykładniczej, ale znacznie szybciej. Na rysunku 3 przedstawiono wykres tłumienia gęstości prądu (tłumienie pola) i kwadratu gęstości prądu (tłumienie mocy).

### a. Szacowanie strat dodatkowych od składowej osiowej pola w uzwojeniu GN

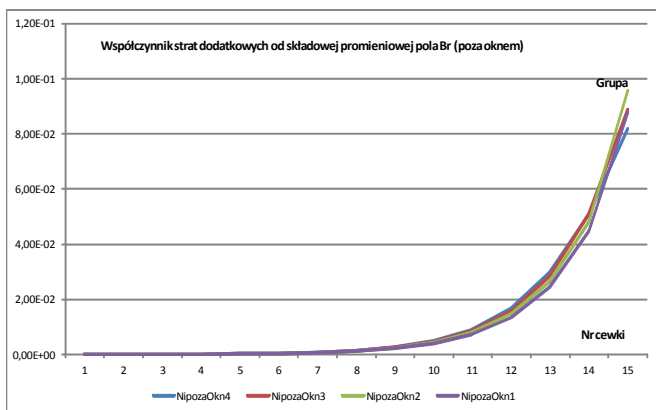
Straty od składowej osiowej pola (wzdłuż kolumny, na której nałożone jest uzwojenie) szacować można numerycznie na podstawie twierdzenia Poyntinga. Straty te podaje się jako współczynnik strat podstawowych dla rozpatrywanego uzwojenia. W obliczeniach tych strat istotny jest zatem rozkład pola a dokładniej natężenia pola magnetycznego (lub indukcji) wzdłuż poszczególnych części uzwojeń. Rozkład składowej osiowej indukcji  $B_y$  zaprezentowany jest na rysunku 4. Rozkład ten jest nieliniowy i zmienia się zarówno w kierunku osiowym jak i promieniowym (tzn. wzdłuż osi uzwojenia po promieniu jak i po jego wysokości). Zatem każda grupa zwojów danego uzwojenia i warstwa będzie pod wpływem oddziaływania innej wartości pola. Szacowanie tych strat (rysunek 5) możliwe jest jedynie na drodze numerycznej dla każdego zwoju w zależności od jego położenia w warstwie danej grupy. Straty te wyliczone zostały z kwadratu składowej przestrzennej indukcji pod wpływem której każdy fragment zwoju się znajdował (całka wzdłuż długości zwoju).



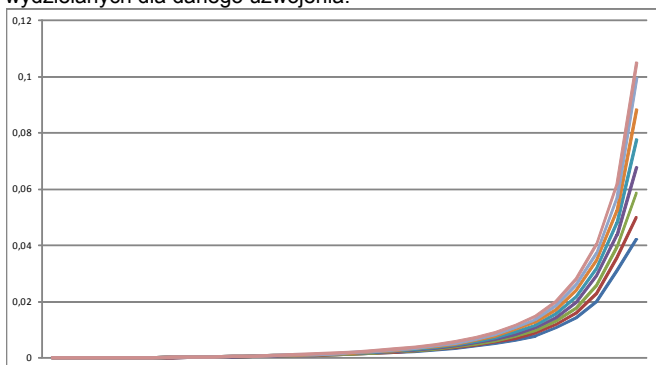
Rys.4. Składowa osiowa indukcji magnetycznej  $B_y$  dla poszczególnych warstw wybranej grupy uzwojenia GN dla każdej z 4 warstw (połowa uzwojenia w oknie).



Rys.5. Rozkłady współczynnika strat dla poszczególnych warstw wybranej grupy uzwojenia GN dla każdej z 4 warstw od składowej osiowej pola  $B_y$  (połowa uzwojenia w oknie). Obliczone straty dodatkowe są stosunkiem strat podstawowych wydzielanych dla danego uzwojenia.



Rys.6. Rozkłady współczynnika strat dla poszczególnych warstw wybranej grupy uzwojenia GN od składowej promieniowej indukcji wybranej grupy Agn3 uzwojenia (połowa uzwojenia w oknie). Obliczone straty dodatkowe są stosunkiem strat podstawowych wydzielanych dla danego uzwojenia.



Rys.7. Rozkłady współczynników strat dla poszczególnych warstw wybranej grupy Adn3 połowy uzwojenia DN.

### b. Szacowanie strat dodatkowych od składowej promieniowej pola w uzwojeniu GN i DN

W obliczeniach tych strat, podobnie jak dla strat osiowych istotny jest rozkład przestrzenny natężenia pola magnetycznego (lub indukcji) wzdłuż poszczególnych części uzwojeń. Rozkład współczynnika procentowego strat

dla poszczególnych warstw wybranej grupy uzwojenia (połowa uzwojenia) GN poza oknem zaprezentowany został na rysunku 6.

Rozkłady współczynnika strat dla warstw wybranej grupy Adn3 uzwojenia DN (połowa uzwojenia w oknie) zaprezentowany został na rysunku 7. Oś Y prezentuje współczynnik strat oś długość uzwojenia. Należy przy tym zauważyć, że rozkład tych strat jest bardzo nierównomierny i o ile w środku uzwojenia straty od składowej promieniowej praktycznie nie występują to na skraju uzwojenia dochodzą one wykładniczo, aż do 10% strat podstawowych tego uzwojenia.

### Podsumowanie

1. W artykule zaprezentowane zostały numeryczne metody modelowania uzwojeń transformatorów dla potrzeb szacowania strat dodatkowych od składowej osiowej i promieniowej pola rozproszenia. Szacowanie strat dodatkowych przeprowadzono z zastosowaniem wektora Poyntinga. Obliczone straty dodatkowe podano jako stosunek wartości procentowej strat podstawowych wydzielanych dla danego uzwojenia..
2. Największe straty w grupie pierwszej uzwojenia GN (w zwojach od strony uzwojenia DN).
3. Straty od składowej osiowej maleją dla cewek skrajnych ale właśnie dla tych cewek rosną straty od składowej promieniowej.
4. Straty dodatkowe osiowe i promieniowe dla grup uzwojenia GN: Agn1, Agn2, Agn3 wynoszą: grupa Agn1 od strony uzwojenia DN -19%; grupa środkowa Agn2 -10%; grupa zewnętrzna skrajna Agn3 -6,4% strat podstawowych.

### LITERATURA

- [1] Schmidt Erich, Hamberger Peter: Steady-State and Transient Operational Behaviour of a Plunger Core Reactor with Parallel Windings, *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007*, Oct. 8-11, Seoul, Korea
- [2] Drzymała P., Welfle H.: Field methods for calculating the magnetic screen of large power transformers., *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. ISSN 0033-2097, R. 88 NR 4a/2012 Pages: 77-81
- [3] Drzymała P., Welfle H.: Analysis of electromagnetic phenomena and losses in the power transformer clamping-rods, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 4a/2012, s.82-85.
- [4] Drzymała P., Welfle H.: Three-dimensional field analysis and forces acting on the High Power Transformer Windings. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2010 R.86 nr 12 s.263-266,
- [5] Turowski J.: Technical Electrodynamics, *WNT Publishers* (in Polish), 1993
- [6] Kumbhar G. B., Kulkarni S. V.: Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach, *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 22, No. 2, April 2007
- [7] Jamali S., Ardebili M., Abbaszadeh K.: Calculation of Short Circuit Reactance and Electromagnetic Forces in Three Phase Transformer by Finite Element Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 2004*.

**Autorzy:** dr inż. Paweł Drzymała, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [pawel.drzymala@p.lodz.pl](mailto:pawel.drzymala@p.lodz.pl); dr inż. Henryk Welfle, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [henryk.welfle@p.lodz.pl](mailto:henryk.welfle@p.lodz.pl).