

doi:10.15199/48.2018.01.08

## Obliczanie oraz weryfikacja eksperymentalna strat dodatkowych występujących w łączniku belek jarzmowych dużych transformatorów

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano metodę obliczania oraz weryfikację eksperymentalną strat występujących w łączniku belek jarzmowych transformatorów. Przedstawiono sposób budowy modelu polowego łącznika w oparciu o równoważną głębokość wnikania pola elektromagnetycznego do stali. Skutki cieplne powstałe od dużej koncentracji pola rozproszenia działającego na elementy konstrukcyjne przenoszą się na problemy powstawania lokalnych miejsc zagrożonych podwyższoną temperaturą, starzenia izolacji uzwojenia i odprowadzania ciepła.

**Abstract.** The paper presents the method of calculation and experimental verification of losses occurring in the tie plate of yokes a large transformers. It also presents how to build the field model based on the equivalent depth of the electromagnetic field penetration into solid steel. Thermal effects resulting from a high concentration of stray field acting on the structural elements transfer to the formation of local areas with a potential of higher temperature, aging problems of winding insulation and heat dissipation (**Calculation and experimental verification of additional losses occurring in the tie plate of yokes a large transformers**).

**Słowa kluczowe:** transformatory dużych mocy, łącznik belek jarzmowych, straty dodatkowe, modelowanie 3D.

**Keywords:** power transformer, the tie plate of yokes, additional losses, 3D modeling.

### Wprowadzenie

W ostatnich latach dużą uwagę poświęca się efektywnemu i kompleksowemu projektowaniu elementów konstrukcyjnych w celu obniżenia strat dodatkowych. Skapitalizowane na przestrzeni lat pracy transformatora straty całkowite istotnie wpływają na wynik ekonomiczny i świadczą o jakości jego konstrukcji. W dobie porównywalnych cen materiałów, firmy produkujące transformatory zdobywają przewagę konkurencyjną na rynku kosztami pracy oraz innowacjami w konstrukcji, świadczącymi o zaawansowanej technologicznie jakości produktów. Z tego powodu ograniczanie skapitalizowanych na przestrzeni lat strat, w tym strat dodatkowych, ma wymierny wpływ na wynik ekonomiczny przedsiębiorstw produkujących energię elektryczną co pośrednio wymusza uzyskanie przewagi technologicznej w konstrukcji przez firmy transformatorowe.

Nowoczesne metody modelowania stanowią obecnie istotną rolę w projektowaniu poprawnych i niezawodnych konstrukcji transformatorów, w których pod uwagę bierze się różne aspekty występujących zjawisk. Wiele konstrukcji dużych wysokonapięciowych transformatorów, z racji koncentracji pola i ich nierównomiernych rozkładów modeluje się metodami stosunkowo dokładnymi lecz na obecny chwilę dosyć czasochłonnymi. Takie metody analizy wykorzystują numeryczne modele siatkowe, w których liczy się rozkład przestrzenny wektorowego potencjału magnetycznego. Budowa względnie dokładnych modeli wymaga dostępu do szybkiej maszyny obliczeniowej, pozwalającej rozwiązywać miliony równań różniczkowych co wpływa na czasochłonność obliczeń, często niemożliwą do zaakceptowania przez konstruktorów jednostek transformatorów. W artykule podano wytyczne jak definiować podziały dyskretyzacyjne w oparciu o równoważną głębokość wnikania, prawidłowo budować model łącznika transformatora do obliczania akceptowalnych poziomów indukcji, prądów wirowych i strat.

### Budowa modelu numerycznego transformatora do analizy zjawisk występujących w łączniku

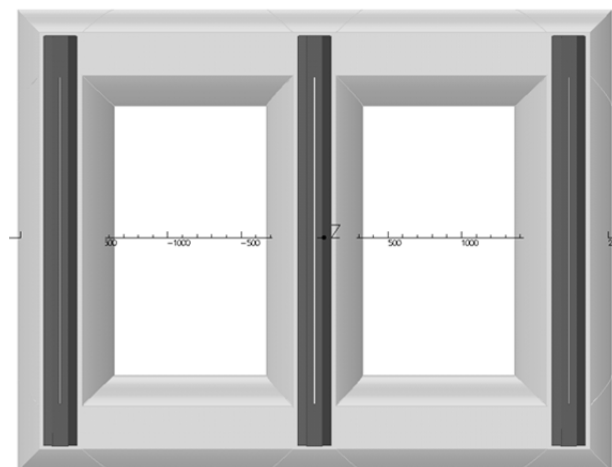
Model numeryczny opracowany został w oparciu o konstrukcję rzeczywistego transformatora o mocy 125 MVA, napięciach HV/LV: 230/120 kV oraz prądach: 313,8/601,4 A (rys.1.). Model łącznika musi uwzględnić

właściwości materiału oraz fizykę występujących w nim zjawisk, która rzutuje na wybór warunków brzegowych, typ wymuszenia (napięciowe, prądowe), rodzaj analizy oraz właściwy podział dyskretyzacyjny.

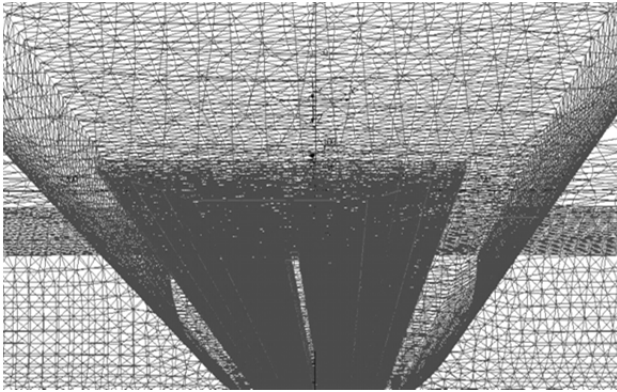
Elementy łączników wymagają dodatkowego warstwowania siatki po głębokości, co znacznie utrudnia wykonanie prawidłowego modelu obliczeniowego. Dodatkowo przekłada się na wzrost liczby elementów nie tylko w samym łączniku, lecz również w przestrzeni między łącznikiem a rdzeniem i samym rdzeniem od strony łącznika rys.1 i rys.2.

W przypadku analizowanego łącznika podział dyskretyzacyjny zależy będzie od wyznaczenia równoważnej głębokości wnikania i określenia możliwości wystąpienia odbić fali od środowisk granicznych. Podział dyskretyzacyjny nie powinien być stały dla łącznika (wzór 1) i zależy od wielu czynników: materiału zastosowanego na łącznik (w tym od względnej przenikalności materiału  $\mu_r$ ), konduktywności materiału, częstotliwości pracy transformatora.

$$(1) \quad \delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}$$



Rys.1. Model transformatora z łącznikami spinającymi belki jarzmowe



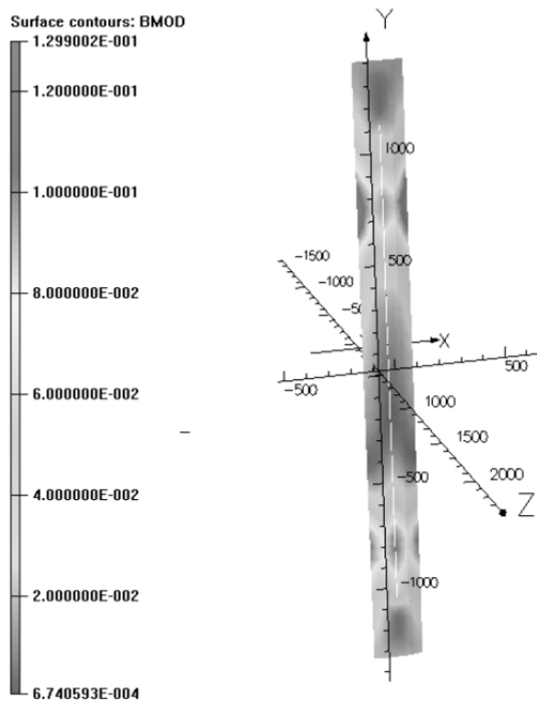
Rys. 2. Model siatki MES elementu łącznika z rzeczywistymi skosami geometrii

Podział dyskretyzacyjny łącznika powinien być dokonany w zależności od kilku czynników np. transformator pracuje w stanie jałowym, znamionowego obciążenia czy też w stanie przeciążenia lub stanie zwarcia (występuje inna wartość przenikalności  $\mu_r$ ). W analizie konieczne jest zatem opracowanie wielu modeli obliczeniowych z bardzo dużą dyskretyzacją analizowanych elementów.

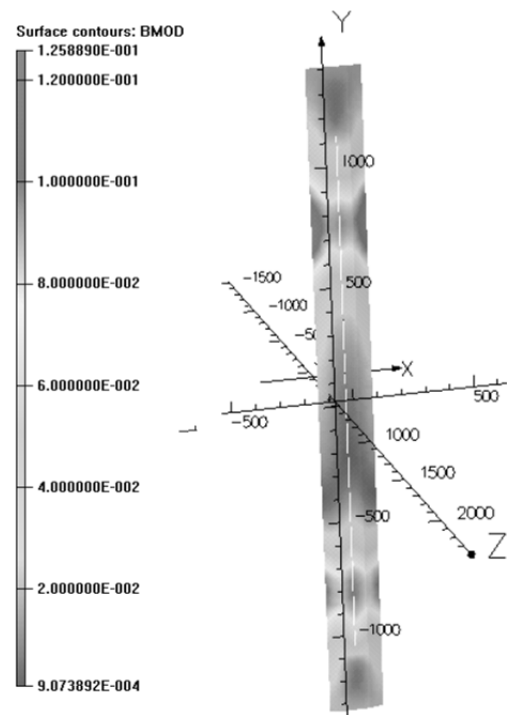
Modele łączników spinających belki górne i dolne wykonano dla dwóch typów materiałów:

- dla łącznika wykonanego z materiału niemagnetycznego i konduktywność na poziomie  $5 \cdot 10^6$  S/m.
- dla łącznika wykonanego z materiału magnetycznego i konduktywność na poziomie  $5 \cdot 10^6$  S/m.

Analizując rozkłady modułów indukcji rys.3, rys.4 można stwierdzić, że rozkłady pola nie są równomierne. Największe wartości indukcji i gęstości prądów występują w obszarach łącznika w których pole zmienia swój zwrot a więc w miejscach przy końcach uzwojeń GN, DN. Rozkłady nie są symetryczne ponieważ uzwojenia rozłożone są asymetrycznie na kolumnie.

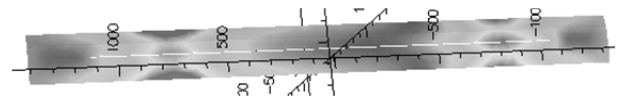


Rys.3. Rozkład modułu indukcji w łączniku dla chwili czasowej 0 stopni



Rys.4. Rozkład modułu indukcji w łączniku dla chwili czasowej 10 stopni

Zaprezentowane na rys.3 i rys.4 obliczenia indukcji przeprowadzone zostały dla łącznika wykonanego ze stali niemagnetycznej. Przyjęto konduktywność materiału z którego wykonany jest łącznik jak dla stali:  $5 \cdot 10^6$  S/m.



Rys. 5. Rozkład strat w łączniku

Rozkład strat w łączniku rys.5 podobnie jak rozkłady indukcji jest nierównomierny i zależy od wartości natężenia pola magnetycznego, częstotliwości oraz stałych materiałowych łącznika – wzór 2 i 3.

Wydzielaną moc jednostkową (na  $1m^2$  powierzchni) wnikająca do łącznika można przedstawić wzorem (3) lub w pakiecie obliczeniowym przez numerycznie przeliczenie z całki iloczynu gęstości prądu i natężenia pola w danej objętości elementu. W przypadku łącznika jego grubość jest większa od równoważnej głębokości wnikania zatem fala jest całkowicie tłumiona wewnątrz elementu.

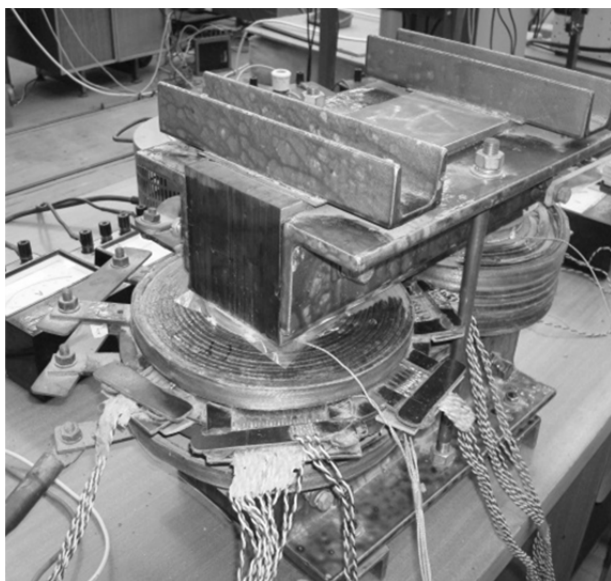
$$(2) \quad \underline{S}_z = P_1 + jQ_1 = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} \frac{|H_{ms}|^2}{2}$$

$$(3) \quad P = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{E} \, dv$$

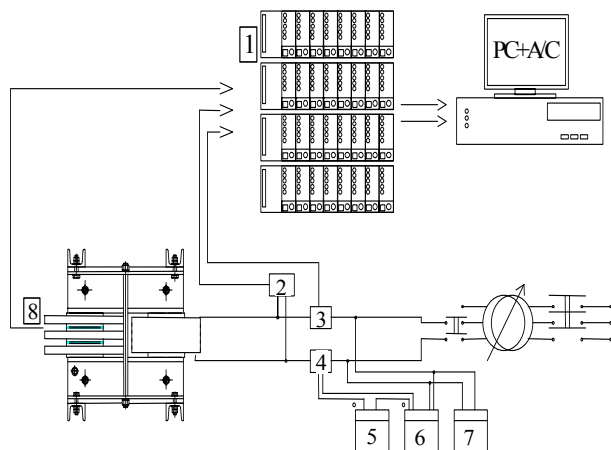
Wartości prądów uzyskane w obliczeniach numerycznych rzutują na powstanie strat wydzielanych w tych elementach. Szacowane straty wiroprądowe dla jednego łącznika przekraczają 4 kW dla materiału niemagnetycznego i 4.5 kW dla magnetycznego (przy braku uwzględnienia dodatkowych strat histerezyowych dla tego typu materiału).

### Układ pomiarowy i weryfikacja obliczeń

Weryfikację eksperymentalną rozkładów indukcji przeprowadzono w modelu doświadczalnym, którego budowę zaprezentowano na rys. 6, rys.7.



Rys.6 Stanowisko weryfikacji eksperymentalnej przeznaczone do badania rozkładu indukcji w modelu łącznika.

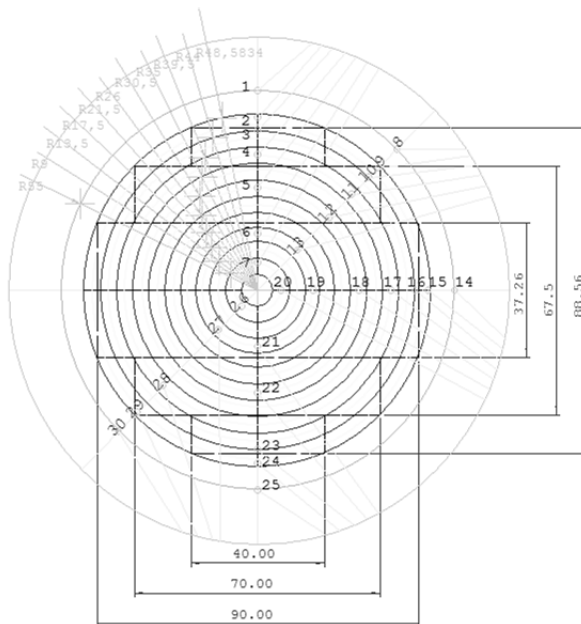


Rys.7 Układ pomiarowy przeznaczony do badania rozkładu indukcji w modelu łącznika. 1 - kasety ze wzmacniaczami o skokowo regulowanym wzmacnieniu; 2 - przetwornik LEM (napięcie/napięcie); 3 - przetwornik LEM (prąd/napięcie); 4 - przekładnik prądowy (250/5 [A]); 5 - amperomierz; 6 - watomierz; 7 - woltomierz; 8 - model łącznika z 30 sondami pomiarowym

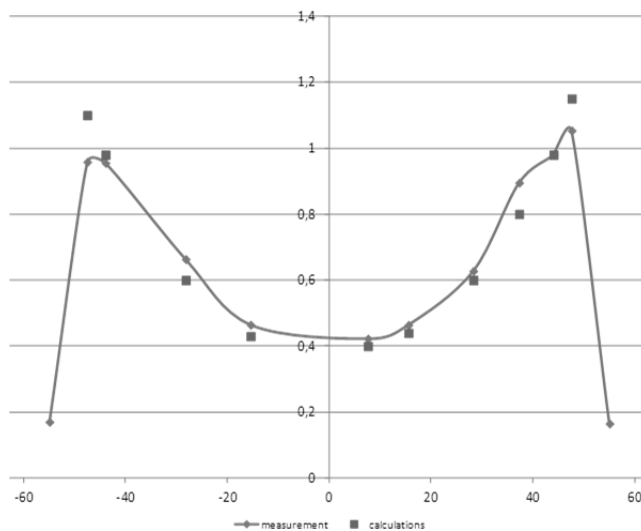
Pomiarów indukcji magnetycznej dokonano z użyciem sond pomiarowych umieszczonych na odpowiednio przygotowanej płycie. Sondy wykonane były z cienkiego drutu nawiniętego 10 zwojami i miały promień 0,95 mm. Układ zasilono przy wymuszeniu prądowym do wartości 30A.

System pomiarowy jednocześnie rejestrował wartości chwilowe prądu, napięcia oraz w trzydziestu punktach wartości chwilowe zaindukowanych SEM.

Indukcję mierzono 32 kanałowym przetwornikiem analogowo cyfrowym, podłączonym do sond pomiarowych umieszczonych w określonych miejscach modelu łącznika. Miejsca te zaznaczone zostały na Rys.8.



Rys.8. Rozkład sond pomiarowych do pomiaru chwilowych wartości indukcji magnetycznej w modelu łącznika.



Rys.9. Rozkład indukcji w badanej próbce w zależności od odległości od jej środka nachylonej względem osi 0 stopni.

Weryfikacja eksperymentalna ze względu na wymiary nie została przeprowadzona na rzeczywistej konstrukcji łącznika lecz na wykonanej z materiału niemagnetycznego próbce o tych samych parametrach materiałowych. Płyta ta miała podobnie jak rzeczywisty łącznik wycięcie w części centralnej, które pozwalało odwzorować szczelinę łącznika.

Analizowana konstrukcja łącznika zazwyczaj posiada jedną szczelinę, która powoduje zmniejszenie strat dodatkowych i tym samym nagrzewanie się łącznika.

### Podsumowanie

W artykule zaprezentowane zostały obliczenia numeryczne oraz weryfikacja eksperymentalna strat dodatkowych występujących w łączniku belek jarzmowych. Metody analizy rozkładów indukcji i strat wykorzystują numeryczne modele siatkowe, w których liczy się dokładny rozkład przestrzenny wektorowego potencjału magnetycznego. Poprawność uzyskanych rezultatów obliczeń wymaga dokonania podziału dyskretacyjnego

łącznika w zależności od równoważnej głębokości wnikania dla danego materiału.

Weryfikacja eksperymentalna potwierdziła zbieżność badań pomiarowych z obliczeniami numerycznymi z zastosowaniem metody elementów skończonych – rys.9.

Budowa stosunkowo dokładnych modeli wymaga dostępu do szybkiej maszyny obliczeniowej, pozwalającej rozwiązywać miliony równań różniczkowych co wpływa na czasochłonność obliczeń.

Producent materiału użytego na łącznik powinien podawać nie tylko mechaniczne parametry tego materiału, determinujące możliwość wykorzystania go na łącznik lecz również parametry elektryczne. Do parametrów tych zaliczyć można konduktywność materiału oraz straty histerezy dla różnych wartości indukcji.

**Autorzy:** dr inż. Paweł Drzymala, 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).

#### LITERATURA

- [1] S. Maximov, R. Escarela-Perez, S. Magdaleno-Adame, J Olivares-Galvan, E. Campero-Littlewood, "Calculation of Nonlinear Electromagnetic Fields in the Steel Wall Vicinity of Transformer Bushings", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 51, no: 6, pp. 1-6, June 2015
- [2] V. Vakhnina, V. Shapovalov, V. Kuznetsov, D. Kretov "The Influence of Geomagnetic Storms on Thermal Processes in the Tank of a Power Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PP, Issue: 99, pp. 1-6, January 2015
- [3] Zhanxin Zhu, Dexin Xie, Gang Wang, Yanli Zhang, and Xiuke Yan "Computation of 3-D Magnetic Leakage Field and Stray Losses in Large Power Transformer", IEEE Trans. on Magn., vol. 48, no. 2, pp. 739-742, February 2012
- [4] Z.Cheng, N.Takahashi, B.Forghani, G.Gilbert, J.Zhang, L.Liu, Y.Fan, X.Zhang, Y.Du, J.Wang, and C.Jiao, "Analysis and measurements of iron loss and flux inside silicon steel laminations," IEEE Trans. on Magn., vol 45, no 3, pp. 1222 - 1225, 2009.
- [5] S. L. Ho, Y. Li R.Y. Tang, K.W.E.Cheng, S.Y.Yang: "Calculation of Eddy Current Field in the Ascending Flange for the Bushings and Tank Wall of a Large Power Transformer" IEEE Trans. on Magn., vol.44, no. 6, pp. 1522 -1525, June 2008.
- [6] Korzeniewska E., Duraj A., Krawczyk A.; Detection of local changes in resistance by means of data mining algorithms, Przegląd Elektrotechniczny, 2014 R.90, nr 12, s. 229-232.
- [7] Drzymala 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
- [8] Drzymala 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.
- [9] Drzymala 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,
- [10] Turowski J.: Technical Electrodynamics, WNT Publishers (in Polish), 1993
- [11] 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
- [12] 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
- [13] L. Susnjic, Z. Haznadar and Z. Valkovic "3D finite-element determination of stray losses in power transformer," Electric Power Systems Research 78, pp. 1814–1818, 2008.
- [14] M.Motalleb , M.Vakilian , A.Abbaspour: "Tank shielding contribution on reduction of eddy current losses in power transformers," Pulsed Power Conference, PPC '09. IEEE , pp. 641–645, 2009
- [15] L. Kralj, D. Miljavec: "Stray losses in power transformer tank walls and construction parts" XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, 6-8 Sept. 2010 Rome
- [16] J.Turowski, A.Pelikant, "Eddy current losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers " IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 144, No. 6, pp. 435-440, 1997.
- [17] Z.Cheng, N.Takahashi, S.Liu, S.Yang, C.Fan, Qi.Hu, L.Liu, M.Guo, and J.Zhang, "Benchmarking-based approach to engineering stray-field loss problems," presented at ACES-2006, Miami, USA.
- [18] M. Arjona, R. Ovando-Martinez, C. Hernandez, "Thermal fluid transient two-dimensional characteristic-based-split finite-element model of a distribution transformer," IET Electr. Power Appl., vol. 6, no. 5, pp. 260–267, May 2012.
- [19] Duraj, A., Korzeniewska, E., Krawczyk, A. Classification algorithms to identify changes in resistance Przegląd Elektrotechniczny, 2015 R.91, nr 12, s. 80-82.
- [20] Rymaszewski J., Lebioda M., Korzeniewska, E.: Simulation of the loss of superconductivity in a three-dimensional model of the metal-superconductor connection. Przegląd Elektrotechniczny, 2012 vol.88 nr 12b, 183-186.