

Określenie relacji pomiędzy anizotropią i parametrami modelu ODF strat mocy w blachach elektrotechnicznych

Streszczenie. Blachy elektrotechniczne charakteryzują się anizotropią własności magnetycznych. Właściwe projektowanie rdzeni z uwzględnieniem tego zjawiska może przyczynić się do poprawy parametrów użytkowych i energochłonności urządzeń. Do modelowania własności anizotropowych można wykorzystać funkcję rozkładu orientacji (ODF). W pracy przedstawiono relację pomiędzy parametrami funkcji ODF a anizotropią stratności. Wykazane zależności wskazują na odmienny mechanizm powstawania strat w obszarze "dolnych" i "górnym" wartości indukcji magnetycznych.

Abstract. Electrical steel is characterized by anisotropy of magnetic properties. Proper core design taking into account the phenomenon of anisotropy can contribute to the improvement of utility parameters and energy consumption of devices. The model of orientation distribution (ODF) can be used to model anisotropic properties. The paper presents the relationship between parameters of the ODF function and loss anisotropy. The relationships show a different mechanism of loss in the area of "lower" and "upper" values of magnetic flux density. **(Determining the relationship between anisotropy and parameters of the ODF model of power losses in electrical sheets).**

Słowa kluczowe: blachy elektrotechniczne, zjawisko anizotropii, straty mocy, funkcję rozkładu orientacji

Keywords: electrical steel, anisotropy phenomenon, power loss, orientation distribution function.

Wstęp

Projektowanie rdzeni magnetycznych takich urządzeń jak transformatory, dławiki czy maszyny wirujące wymaga pełnej wiedzy na temat właściwości elektrycznych i magnetycznych materiałów magnetycznych zastosowanych do ich budowy. Dynamiczne właściwości materiałów magnetycznych określają ich przydatność do określonego zastosowania. Do najważniejszych właściwości wykorzystywanych materiałów magnetycznych należy charakterystyka stratności całkowitej P_s funkcji indukcji magnetycznej (B_m), częstotliwości (f), temperatury (T) oraz rodzaju kształtu fali i wzbudzenia.

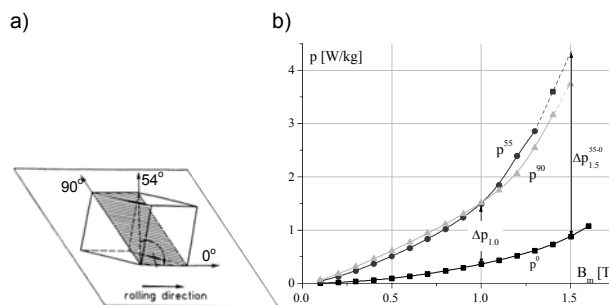
Jednym z najszerszej stosowanych materiałów magnetycznych do budowy rdzeni jest blacha elektrotechniczna. W obecnym czasie przemysł wytwarza rocznie ok. 4 milionów ton blachy elektrotechnicznej [1]. Stanowi to około 50% dotychczasowej rocznej produkcji blachy elektrotechnicznej. Nawet przy zmniejszonej ilości wytwarzanych blach, nieznaczne zmniejszenie strat w materiałach magnetycznych może zapewnić znaczące oszczędności energii [2, 3, 4, 5].

Proces produkcji blach elektrotechnicznych może być przeprowadzony w taki sposób, że kryształy w produkcie końcowym są ułożone w sposób nieuporządkowany lub przeciwnie są uporządkowane zgodnie z kierunkiem walcowania (RD) jak w przypadku blach o ziarnie zorientowanym. W tym kierunku blachy o ziarnie zorientowanym wykazują najkorzystniejsze właściwości magnetyczne, a w kierunkach 55° i 90° najgorsze. Przekroczenie dopuszczalnych granic anizotropii właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych niekorzystnie wpływa na takie parametry techniczne wytwarzanego produktu jak przykładowo zużycie energii, drgania lub hałas.

W tym artykule własności anizotropowe stratności dla pięciu gatunków blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym zmierzono za pomocą aparatu do badania pojedynczego arkusza blachy. Pomiarów wykonano na próbkach wyciętych wzdłuż różnych kierunków mierzonych w odniesieniu do kierunku walcowania. Uzyskane zależności kąto-energetyczne aproksymowano funkcją rozkładu orientacji (ODF). Współczynniki funkcji ODF zostały skorelowane z anizotropią stratności.

Anizotropia magnetyczna

Proces produkcji blach elektrotechnicznych prowadzony jest w sposób opatentowany przez Gossa [6]. W wyniku tego procesu krawędzie sześciennych kryształów są uporządkowane w kierunku walcowania (RD). W rezultacie w kierunku RD występują szczególnie korzystne właściwości magnetyczne blach o ziarnie zorientowanym [7]. Krawędzie kryształów komórek elementarnych [100] są wyrównane wzdłuż RD. Kierunek [110] komórki elementarnej, stanowiący przekątną ściany kryształu sześciennego (rys.1 a), jest kierunkiem prostopadłym (TD), 90° względem RD. W kierunku [111], stanowiącym przekątną przestrzenną kryształu, blacha elektrotechniczna wykazuje najgorsze właściwości magnetyczne. Kierunek ten ułożony jest około 54° w stosunku do RD (rys.1 a).



Rys. 1. Orientacja kryształów w ziarnach blachy krzemowej o niemal idealnej teksturze krawędziowej a) i przykładowe własności anizotropowe stratności b).

Blachy o ziarnie zorientowanym charakteryzują się zależnością np. stratności od kierunku przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego (rys.1 b). Zależność strat jednostkowych między kierunkiem walcowania a kierunkiem prostopadłym nie jest liniowa i zmienia się w zależności od wartości maksymalnej indukcji magnetycznej, powodując dodatkową złożoność wymienionej zależności. Ułożenie kryształu w ziarnie blachy o ziarnie zorientowanym o prawie idealnej teksturze krawędziowej przedstawiono na rysunku 1 a).

Własności anizotropowe określa się jako różnicę energii dla wybranego kierunku (x_2) i kierunku magnetycznie łatwego (x_1) [7].

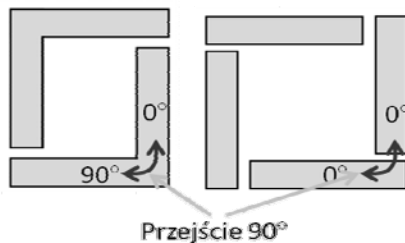
$$(1) \quad E = \left(\int_0^{J_s} [H(x_2) - H(x_1)] dJ \right) \cdot V, \quad J$$

Stosowanie wzoru (1) w praktyce jest bardzo utrudnione ze względu na trudność określenia stanu nasycenia. Dlatego w praktyce inżynierskiej własności anizotropowe mogą być opisane stopniem stekstrowania lub anizotropią stratności. Stopień stekstrowania stanowi stosunek ilości kryształów zorientowanych wzdłuż RD w stosunku do całej ilości kryształów. Anizotropia stratności najczęściej określana jest dla indukcji magnetycznej y (2). Na przykład anizotropia stratności jest najczęściej obliczana dla kierunków magnesowania $x = 90^\circ$ i $x = 0^\circ$ przy indukcji magnetycznej $y = 1,5 \text{ T}$ [8].

$$(2) \quad \Delta P_{S,y}^{x-0} = (P_{S,y}^x - P_{S,y}^0) / (P_{S,y}^x + P_{S,y}^0) 100, \quad \%$$

Wartość anizotropii stratności jest podawana w katalogach producentów blach elektrotechnicznych. W modelach materiałowych wykorzystywanych do modelowania maszyn elektrycznych metodą elementów skończonych anizotropia magnetyczna blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym jest często uwzględniana w sposób nadmierne uproszczony. Ulepszenie modelowania rdzeni magnetycznych, w tym lepsze uwzględnienie anizotropii właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych może się przyczynić do znacznych oszczędności materiałów, energii i własności użytkowych takich jak np. hałas. Anizotropia również wpływa niekorzystnie na niektóre parametry techniczne wytwarzanego produktu [9, 10]. Zjawisko anizotropii wpływa w ten sposób znacząco na konstrukcję rdzeni magnetycznych tych urządzeń.

Strumień magnetyczny w rdzeniach pokonuje różne kierunki krystalograficzne w blasce elektrotechnicznej jak przykładowo przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przejście strumienia przy różnych sposobach pakietowania rdzenia

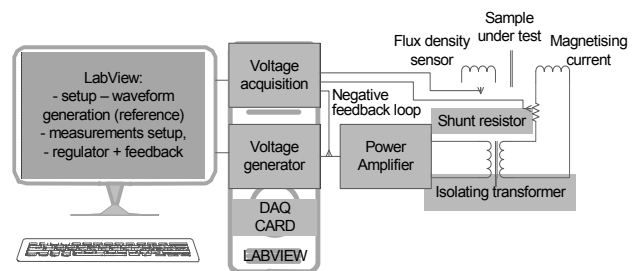
Pakietowane rdzenie transformatorów dużej mocy zawierają obszary styku jarzma z kolumną określanym mianem połączeń L lub T. W miejscach tych powstają dodatkowe straty. Aby je obniżyć do jak najmniejszego poziomu stosuje się różne konstrukcje rdzeni pakietowanych. Połączenia te wykonuje się jako ukośne gdzie taśmy są przycinane pod kątem od 30° , 60° lub najczęściej 45° [11]. Przy przejściu strumienia przez cięcie 45° unika się najtrudniejszych magnetycznie kierunków.

Eksperyment

Badanie własności magnetycznych przeprowadzono na próbkach konwencjonalnych gatunków blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym. Do badań wybrano gatunki M120-27S, M140-30S, M150-27S, M150-35S i M165-035S charakteryzujące się grubościami d z zakresu 0,27 mm i 0,35 mm. Zawartość krzemu Si w wybranych gatunkach blach zawierała się w granicach $(3,1 \pm 0,1)\%$, rezystywność ρ wynosiła $(47 \pm 1) \mu\Omega\text{m}$ i gęstości $\gamma = (7650 \pm 10) \text{ kg/m}^3$.

Stratność całkowitą zmierzono w niestandardowym aparacie do badań pojedynczych arkuszy blach (SST) na próbkach kwadratowych o szerokości 100 mm. Próbkę blach wycięto pod różnymi kątami do kierunku RD. Pomiar przeprowadzono na próbkach blachy M120-27S wyciętych pod kątami 0° , 30° , 45° które po obrocie mogły być zmierzone dodatkowo pod kątami 60° i 90° . Dla pozostałych gatunków blach próbki wycięto pod kątem $x = 0^\circ$, 27° , 36° i 45° a ich obrót o 90° umożliwiał pomiar pod kątem 54° , 63° i 90° do kierunku RD. Przygotowano i zmierzono 3 zestawy próbek w celu uśrednienia wyników.

Straty jednostkowe próbek zmierzono za pomocą systemu komputerowego opartego o platformę LabView®. Program LabView zapewnia kontrolę sinusoidalnego kształtu strumienia magnetycznego. Podczas pomiarów odchylenie od idealnie sinusoidalnego kształtu strumienia magnetycznego nie przekraczało 0,5%, a najczęściej wynosiło poniżej 0,1%. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiarowego do określania własności magnetycznych

Pomiary wykonano w zakresie indukcji magnetycznej od 0,1 T do 1,4 T - 1,8 T w zależności od kierunku magnesowania i częstotliwości 50 Hz. Maksymalny poziom indukcji został ograniczony do 1,4 T, dla kierunków magnesowania w pobliżu 50° , ze względu na niższą indukcję magnetyczną nasycenia w tych kierunkach.

Porównanie modeli strat

Z teoretycznego punktu widzenia straty mogą być podzielone na straty statyczne tzw. histerezyowe i dynamiczne tzw. wiropądowe. Taki rozdział strat określony jest na podstawie wektora Poytinga, otrzymany na drodze wielu przekształceń upraszczających [12, 13].

Model dwuskładnikowy strat całkowitych mógł być stosowany z powodzeniem dla blach o słabo rozwiniętej strukturze domenowej takich jak produkowanych 60-70 lat temu [7]. Blachy te charakteryzowały się indukcją magnetyczną ok. 1,5 T i przenikalnością $\mu_{\text{max}} < 5000$ [14]. W przypadku obecnie produkowanych blach elektrotechnicznych charakteryzujących się rozbudowaną strukturą domenową wystąpiły rozbieżności pomiędzy stratami obliczonymi dla modelu dwuskładnikowego i wartościami zmierzonymi. Rozbieżności te zostały opisane w modelu trójskładnikowym jako składowa nadmiarowa strat [15]. Model trójskładnikowy zawiera, podobnie jak model dwuskładnikowy, składową histerezyową P_h i składową wiropądową klasyczną P_{ce} oraz składnik trzeci tzw. nadmiarowy P_{ex} [16]:

$$(3) \quad P_s = \underbrace{C_h B_m^2 f}_{P_h} + \underbrace{\frac{\pi^2 d^2 B_m^2}{6 \rho \gamma} f^2}_{P_{ce}} + \underbrace{C_{ex} B_m^{3/2} f^{3/2}}_{P_{ex}}$$

gdzie: C_h - współczynnik składowej histerezyowej, C_{ex} - współczynnik składowej nadmiarowej strat całkowitych.

W modelu trójskładnikowym (3) tylko składowa wirowa klasyczna nie zależy od kierunku magnesowania. Pozostałe dwie składowe histerezowa i nadmiarowa silnie zależą od kierunku magnesowania [17, 18].

Modelowaniu wpływu anizotropii na właściwości magnetyczne elektrotechnicznych blach teksturowanych poświęcono wiele badań. Wyróżnić można np.: modele oparte na teorii faz Néela [19], na tensorze reluktywności [20] lub bazujące na koncepcji koenergetycznej [21, 22]. Drugą kategorię modeli stanowią modele opisujące właściwości kątowe strat mocy bazując na różnych funkcjach. Jeden z nich bazuje na wielomianie trzeciego rzędu [23], a drugi na stosowanej w badaniach krystalograficznych funkcji rozkładu orientacji (ODF) [24]. Do obliczeń własności kierunkowych jednostkowych strat mocy (P_S) wykorzystuje się trzy pierwsze wyrazy funkcji ODF i dane zmierzone przy kątach magnesowania $x = 0^\circ, 45^\circ$ i 90° w odniesieniu do kierunku walcowania (RD) blachy [25]. Jednak tego podejścia nie można zastosować dla dużych wartości indukcji magnetycznych, to jest takich, przy których blachy elektrotechniczne o ziarnie zorientowanym często pracują w rdzeniach transformatorów.

Wspólną cechą wymienionych modeli jest modelowanie bazujące na jednostkowych całkowitych stratach mocy. Przedstawiony w pracach [17, 26, 27] model bazuje na modelowaniu własności anizotropowych składowych zależnych od anizotropii, tzn. składowej histerezowej P_h i wirowej nadmiarowej P_{ex} . Główną przesłanką dla nowego modelu była wzajemna współzależność składowej histerezowej i wirowej nadmiarowej, wykazana w pracach [17, 18]. Pozwoliło to zaproponować model własności kierunkowych strat mocy $P_S(x)$ jak poniżej:

$$(4) \quad P_S(x) = (P_h(x) + P_a(x)) + P_{ce} = F(x) + P_{ce}$$

Funkcję $F(x)$ można obliczyć korzystając z rozdziału strat na składowe odpowiednio do równania (3). Można także, dla jednej częstotliwości, obliczenia przeprowadzić jak dla równania (5).

$$(5) \quad F(x) = P_S(x) - P_{ce}$$

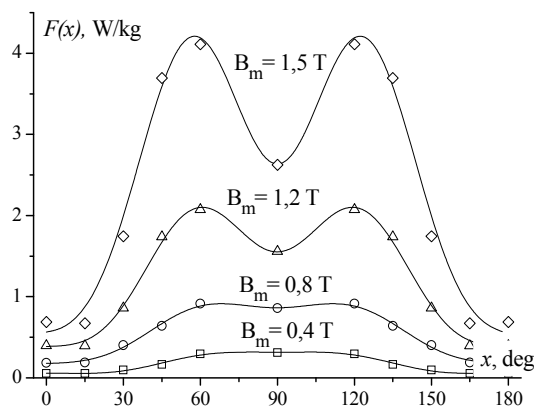
W dalszej części pracy przedstawiono wyniki modelowania anizotropii stratności z wykorzystaniem uproszczonej zależności (5).

Funkcja rozkładu orientacji

Kierunkowe właściwości magnetyczne mogą być reprezentowane przez funkcję okresową. Najczęściej jednak stosowana jest funkcja trygonometryczna pozwalająca modelować właściwości magnetyczne związane z anizotropią magnetokrystaliczną [24, 25, 28]. Właściwości kątowe części anizotropowej (składowa histerezowa i nadmiarowa) strat całkowitych dla blach z ziarnem zorientowanym opisano z wykorzystaniem szeregu cosinusów, składających się minimum z czterech ($n = 3$) lub lepiej pięciu składników ($n = 4$), jak w równaniu poniżej:

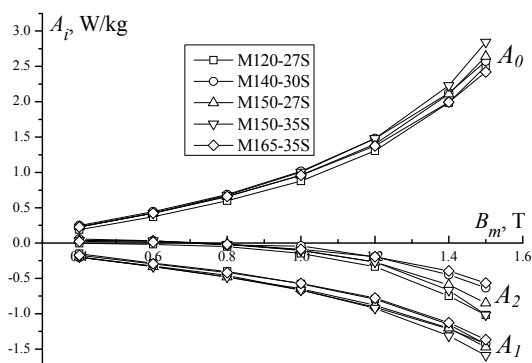
$$(6) \quad F(x) = \sum_{i=0}^{n=4} A_i \cos(2xi)$$

Na rysunku 4 przedstawiono zależność części anizotropowej strat całkowitych dla różnych kierunków magnesowania. Straty wirowe klasyczne wyznaczono na podstawie grubości d i rezystywności ρ blachy i dla sinusoidalnego kształtu strumienia magnetycznego opisane są środkowym składnikiem równania (3). Do aproksymacji punktów eksperymentalnych (rysunek 4) wykorzystano równanie (6) dla $n=3$.



Rys. 4. Przykładowa zależność kąto-energetyczna części anizotropowej strat całkowitych dla indukcji magnetycznej 0,4 T; 0,8 T; 1,2 T i 1,5 T

Z rysunku 4 widać, że zastosowanie funkcji (6) już dla $n=3$ pozwala na poprawne modelowanie kierunkowych własności stratności. Zależności współczynników A_i funkcji $F(x)$ opisanej przez (5) od indukcji magnetycznej przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Zależność współczynników A_i funkcji $F(x)$ (9) dla funkcji ODF, obliczonymi dla anizotropowej części całkowitych strat mocy od indukcji magnetycznej dla pięciu gatunków badanych blach elektrotechnicznych o różnym stopniu stekstrowania

Na rysunku 5 przedstawiono zależności współczynników A_i dla funkcji $F(x)$ (6) dla pięciu gatunków blach o ziarnie zorientowanym, różniących się anizotropią stratności $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$ (2) od 50% do 59%. Relatywnie mały rozrzut wartości współczynników, dla różnych gatunków blach, spowodowany jest współzależnością obu składowych histerezowej i wirowej nadmiarowej, co wykazano w pracach [17, 18].

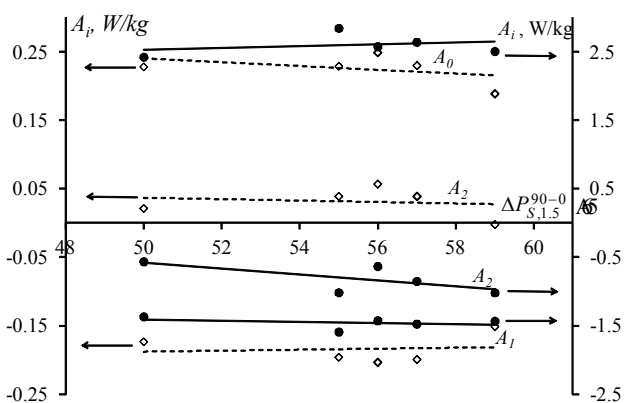
Wpływ anizotropii na parametry modelu ODF

Zależność między pierwszymi trzema współczynnikami A_i funkcji ODF obliczonymi dla funkcji $F(x)$ (6) od anizotropii stratności $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$ dla blach o ziarnie zorientowanym oraz przy indukcji magnetycznej $B_m = 0,4$ T i $B_m = 1,5$ T przedstawiono na rysunku 6.

Na rysunku 6 widoczny jest przeciwny trend zależności trzech pierwszych współczynników A_0, A_1 i A_2 równania (6) dla małej i dużej wartości indukcji magnetycznej. Potwierdza to zasadność rozdzielenia mechanizmów strat na dwa zakresy indukcji magnetycznej tzn. "dolny" i "górny" oraz trudność opisu własności kierunkowych zaprezentowanych w pracy [25].

W "dolnym" zakresie indukcji magnetycznej (rys.6) zależności dla współczynników A_0, A_1 i A_2 równania (6) dla anizotropowej części strat całkowitych od anizotropii $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$ tworzą niemal równoległe linie. W "górnym"

zakresie indukcji magnetycznej zależności pierwszych trzech współczynników równania (6) dla obu składowych strat mocy wykazują przeciwne tendencje wzrostowe. Współczynniki A_i określone dla (6) dla sumy składowej histerezy i nadmiarowej różnią się wartością, dla "dolnego" i "górnego" zakresu indukcji magnetycznej, ich zależności od anizotropii zmienia się nieznacznie. W „górnym” obszarze indukcji magnetycznych pole magnetyczne jest wystarczająco duże, aby wymusić procesy magnetyzacji przez obrót domen. W tym obszarze indukcji magnetycznych zjawisko anizotropii ma odwrotny wpływ na dwa przedmiotowe składniki strat.



Rys. 6. Zależność współczynników funkcji ODF $F(x)$ w zależności od anizotropii stratności $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$ dla pięciu gatunków blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym i indukcji magnetycznej $B_m = 0.4$ T (linia przerywana) i $B_m = 1.5$ T (linia ciągła)

Podsumowanie

Podobieństwo pomiędzy składowymi histerezą i nadmiarową wiroprądową strat całkowitych uzasadnia modelowanie własności kierunkowych strat całkowitych przez sumowanie obu składowych. W tym celu, w przypadku blach o ziarnie zorientowanym, można wykorzystać funkcję rozkładu orientacji ODF.

Współczynniki funkcji ODF wykazują zależność od anizotropii magnetycznej. Modelowanie z wykorzystaniem funkcji ODF może być stosowane w połączeniu z modelem trójskładnikowym dla różnych częstotliwości lub w uproszczeniu dla jednej częstotliwości bez konieczności rozdzielenia strat na składowe.

Autorzy: mgr inż. Michał Mnich EthosEnergy Poland S.A. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, e-mail: michal.mnich@ethosenergygroup.pl, dr inż. Maciej Wilk EthosEnergy Poland S.A. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, maciej.wilk@ethosenergygroup.pl, dr hab. inż. Wojciech A. Pluta Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny Al. Armii Krajowej 17, 42-270 Częstochowa, e-mail: plutaw@el.pcz.czest.pl.

LITERATURA

- [1] World Steel Association, Steel statistical yearbook 2018.
- [2] Cullity B. D., *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley Publishing Company (1972)
- [3] Kubota T. et al., Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel, *JMMM* Vol. 215-216 (2000), pp. 69-73
- [4] Ushigami Y. et al., Recent development of low loss grain-oriented silicon steel, *JMMM* Vol. 254-255 (2003), pp. 307-314
- [5] Moses A. J., Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization, *Scripta Materialia* Vol. 67 (2012) pp. 560–565

- [6] Norman P. Goss, Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test, *US Patent 1,965,559* (1934)
- [7] Bozorth R., *Ferromagnetism*. New York, D. van Nostrand Co, 1956
- [8] IEC 10107:2005; Grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state
- [9] Tumanski S., Investigations of the anisotropic behaviour of SiFe steel, *JMMM* Vol. 254- 255 (2003), pp. 50-53
- [10] Shin S., Schaefer R., DeCooman B. C. (2011), "Anisotropic magnetic properties and domain structure in Fe-3%Si (110) steel sheet," *J of Appl. Physics* Vol. 109, pp. 07A307
- [11] Kulkarni S.V., Khaparde S.A., *Transformer Engineering: Design and Practice*. Volume 25 of Power Engineering (2004)
- [12] Pfützner H., Fundamental aspects of rotational magnetization. First International Workshop on Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel under Two-Dimensional Excitation, Proceedings of the 93. PTB-Seminar, Braunschweig 1992, s. 25-31.
- [13] Pluta W.A., Influence of the magnetic anisotropy on rotational power loss in electrical steel sheets with Goss texture, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2001
- [14] Steinmetz C.P., On the law of hysteresis. Proceedings of the IEEE. Vol 72, No 2 (1984), pp. 197 - 221 ((originally published in *AIEE Transactions*, No 9 (1892), pp. 3-51)
- [15] Bertotti G., "Hysteresis in magnetism", Academic Press (1998)
- [16] Bertotti G., General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1 (1988), 621 – 630
- [17] Pluta W.A.: Angular properties of specific total loss components under axial magnetization in grain-oriented electrical steel, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 52, nr 4 (2016), s. 6300912
- [18] Pluta W.A., Calculating power loss in electrical steel taking into account magnetic anisotropy, *Prz.Elektrotech.* 2 (2018) p.100-103
- [19] Fiorillo F., Dupre L.R., Appino C., Rietto A.M., "Comprehensive model of magnetization curve, hysteresis loops, and losses in any direction in grain-oriented Fe-Si," *IEEE Trans. Magnetics* 38(3) (2002), s.1467-1476
- [20] Sande H. V., Boonen T., Podoleanu I., Henrotte F., and Hameyer K., "Simulation of a Three-Phase Transformer Using an Improved Anisotropy Model," *IEEE Trans. on Magn.* Vol. 40 (2) (2004), pp. 850-855
- [21] Cornut B., Kedous-Lebouc A., Waeckerlé T., "From metallurgy to modeling of electrical steels: A multiple approach to their behavior and use based on physics and experimental investigations," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 160 (1996), s. 102–108
- [22] Chwastek K., Najgebauer M., Szczygłowski J., Wilczyński W., "Modelling the influence of anisotropy on magnetic properties in grain-oriented steels", *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, (2011) s. 126-128
- [23] Soinski M., Moses A.J., *Handbook of Magnetic Materials*, Chapter 4, Vol. 8, Elsevier Science B.V., 1994
- [24] de Campos M. F., "Anisotropy of steel sheets and consequence for Epstein test: I theory", *XVIII IMEKO WORLD CONGRES Metrology for a Sustainable Development* September, 17 – 22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
- [25] Pluta W.A., Moses A.J., Prediction of angular variation of specific total loss of Goss oriented electrical steel, *Physica B: Condensed Matter* 544 (2018) p. 28-33
- [26] Pluta W.A., Prediction of influence of magnetic anisotropy on specific total loss in electrical steel with Goss texture, Konferencja 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Kościelisko, Poland, 2018, s. 1-4, <http://ieeexplore.ieee.org>, doi: 10.1109/PAEE.2018.8441074
- [27] Bunge H.J., "Texture and magnetic properties", *Textures and Microstructures*, vol. 11 (1989), pp. 75-95
- [28] Shiozaki M., Kurosaki Y., "Anisotropy of magnetic properties in non-oriented electrical steel sheets", *Texture and Microstructures*, vol. 11 (1989), pp. 159-170.