

Załącznik nr 2A

# Autoreferat

## Jednotematyczny cykl publikacji

dr inż. Wojciech A. Pluta  
Politechnika Częstochowska  
Wydział Elektryczny  
Al. Armii Krajowej 17

CZĘSTOCHOWA 2018



**I. DANE OSOBOWE:****1. Imię i nazwisko**

Wojciech Pluta

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej****2001 DOKTOR INŻYNIER**

Tytuł rozprawy: "Wpływ anizotropii magnetycznej na straty mocy z przemagnesowania obrotowego blach elektrotechnicznych z teksturą Gossa"

Wydział Elektroniki i Elektrotechniki, Politechnika Łódzka,

promotor: prof. dr hab. inż. Marian Soiński z Politechniki Częstochowskiej

recenzenci: prof. dr hab. inż. Jan Anuszczyk, Politechnika Łódzka,

prof. dr hab. inż. Sławomir Tumański Politechnika Warszawska.

**1993 MASTER ENGINEERING OF SCIENCE**

Tytuł pracy: „Environmental impact of HVDC transmission”

University of Ireland

**1989 MAGISTER INŻYNIER**

Tytuł pracy: „Wykorzystanie taśm amorficznych do ekranowania urządzeń elektrycznych”

Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.**

01.02.2002 – obecnie	adiunkt, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Częstochowska
7.06.2012 - 31.12.2014	adiunkt/konsultant ds. badań przemysłowych, Magneto Sp. z o.o.
01.10.1994 - 31.07.1995	stypendium Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, Niemcy
14.01.1992 - 18.12.1992	staż naukowy University College Dublin, Irland
01.10.1991 – 31.10.2001	Asystent, Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Częstochowska
01.12.1989 – 30.09.1991	monter inżynier, Polskie Koleje Państwowe, Oddział Automatyki i Telekomunikacji

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):****a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,**

Osiągnięcie stanowi jednotematyczny cykl publikacji pt.:

***Wpływ zjawiska anizotropii magnetycznej na składowe jednostkowych strat mocy blach elektrotechnicznych z przemagnesowania osiowego.***

**b) Jednotematyczny cykl 15 publikacji na łączną sumę 227 punktów MNiSW (Impact Factor oraz Punkty MNiSW podano z roku publikacji lub z roku bieżącego)**

*Publikacje w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports – zgodnie z Rozporządzeniem MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie doktora habilitowanego § 3. pkt. 4a*

Lp.	Tytuł	Udział własny	Impact Factor	Punkty MNiSW
A1	Pluta W.A., Moses A.J.: Prediction of angular variation of specific total loss of Goss oriented electrical steel, Physica B: Condensed Matter, Vol. 544 (2018), s.28-33 <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w analizie stanu wiedzy, sformułowaniu problemu, opracowaniu koncepcji badań zaplanowaniu i wykonaniu eksperymentu, wyników pomiarów, udziale w redagowaniu i edycji artykułu oraz udziale w sformułowaniu ostatecznych wniosków.</i>	80%	1.453	20
A2	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	100%	1.386	25
A3	Pluta W.A.: Directional properties of loss components in electrical steel sheets, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 44, nr 3-4 (2014), s. 379-385	100%	0.737	15
A4	Pluta W.A.: Core loss models in electrical steel sheets with different orientation, Przegląd Elektrotechniczny, nr 09b (2011), s. 37-42	100%	0.244	15
A5	Pluta W.A.: Measurements of magnetic properties of electrical steel sheets for the aim of loss separation, Journal of Electrical Engineering, Vol. 61, nr 7/s (2010), s. 58-61	100%	0.37	15
A6	Pluta W.A.: Some Properties of Factors of Specific Total Loss Components in Electrical Steel, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 46, nr 2 (2010), s. 322-325	100%	1.052	27
A7	Pluta W.: Properties of loss components in electrical steel with Goss texture, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1 (2009), s. 25 – 27	100%	0.196	6
A8	Pluta W.: Specific total loss components under axial magnetization in electrical steel sheets with different degree of Goss texture, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 44, nr 11 (2008), s. 3832-3835	100%	1.061	20
A9	Moses A.J., Pluta W.: Anisotropy influence on hysteresis and additional loss in silicon steel sheets,	80%	0.465	10

Steel Research International, nr 06 (2005), s. 450-454 <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na udziale w analizie stanu wiedzy, sformułowaniu problemu, opracowaniu koncepcji badań zaplanowaniu i wykonaniu eksperymentu, wyników pomiarów, udziale w redagowaniu i edycji artykułu oraz udziale w sformułowaniu ostatecznych wniosków.</i>			
---	--	--	--

*Inne publikacje – zgodnie z Rozporządzeniem MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia dr habilitowanego § 4. pkt. 1-2*

Lp.	Tytuł	Udział własny	Punkty MNiSW
A10	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, <a href="http://ieeexplore.ieee.org">http://ieeexplore.ieee.org</a> , doi: 10.1109/PAEE.2018.8441074	100%	10
A11	Pluta W.A.: Calculating power loss in electrical steel taking into account magnetic anisotropy, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2 (2018), s. 100-103	100%	15
A12	Pluta W.A.: Angular and Frequency Behavior of Some Properties of Electrical Steel Sheets, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7 (2017), s. 22-26	100%	14
A13	Pluta W.A.: Influence of anisotropy on specific loss components in grain oriented electrical steel. Solid State Phenomena Vol. 214 (2014), s. 138-142	100%	10
A14	Pluta W., Rygał R., Soiński M.: Przydatność modeli eksperymentalnych obliczania strat w blachach elektrotechnicznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 02 (2012), s. 37-42 <i>Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przeglądzie literatury, sformułowaniu problemu, zaplanowaniu i wykonaniu eksperymentu, udziale w analizie wyników pomiarów strat w funkcji częstotliwości, redagowaniu i udziale w edycji artykułu oraz udziale w sformułowaniu ostatecznych wniosków.</i>	80%	15
A15	Pluta W.: Anisotropy influence on loss components in electrical steel sheets, Przegląd Elektrotechniczny nr 4 (2007), s. 38-41	100%	10

Razem dla przedstawianej do oceny grupy 15 publikacji sumaryczny Impact Factor IF = 6.964 oraz liczba punktów dla czasopism wynosi 227 pkt. IF i punkty przypisano zgodnie z rokiem opublikowania danej pracy.

**c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

**c1) Wprowadzenie**

Blachy elektrotechniczne od wielu lat znajdują zastosowanie w przemyśle do budowy rdzeni magnetycznych urządzeń elektrotechnicznych. Stanowią one najbardziej rozpowszechniony materiał ferromagnetyczny charakteryzujący się optymalnym stosunkiem własności magnetycznych do ceny. Szacuje się, że w blachach elektrotechnicznych tracone jest ponad 5% całej wytwarzanej energii elektrycznej [1]. Biorąc pod uwagę, że każdego roku wytwarza się ponad 11 milionów ton blach elektrotechnicznych [2] do użytku w przemyśle elektrycznym, to nawet niewielkie zmniejszenie jednostkowych strat energii, może zapewnić duże oszczędności energii elektrycznej [1]. Tym samym zmniejsza się: zapotrzebowanie na energię elektryczną, intensywność eksploatacji naturalnych źródeł energii oraz emisja CO<sub>2</sub>. Wskazuje to wyraźnie na potrzebę zwiększenia efektywności transformacji energii elektrycznej i zmniejszenia całkowitych kosztów eksploatacji tzn. od zakupu do utylizacji. Wyrażają to opracowane normy: IEC 60034-30-1 i IEC 60076-20. Pierwsza odnosi się do maszyn wirujących gdzie stosowane są najczęściej blachy o ziarnie nieorientowanym, a druga w odniesieniu do transformatorów gdzie stosuje się najczęściej blachy o ziarnie zorientowanym.

Poprawę efektywności przetwarzania energii można osiągnąć przez zastosowanie blach elektrotechnicznych o ulepszonych własnościach, optymalizację procesu przetwarzania blach (cięcie, spawanie, ściskanie itd.) oraz doskonalenie konstrukcji obwodów magnetycznych. Dobrze prowadzony proces projektowy nowego obwodu magnetycznego powinien uwzględniać w równym stopniu zarówno uwarunkowania ekonomiczne, jak i technologiczne. W efekcie zaprojektowana maszyna powinna zapewnić optymalne własności magnetyczne przy jak najmniejszej ilości możliwie najtańszego materiału i technologii. Rdzenie z blach o ziarnie zorientowanym, na obwody magnetyczne transformatorów, generatorów i dużych maszyn wirujących wykorzystuje się z uwzględnieniem kierunku wytworzenia blach. Iloraz strat, wykonanego obwodu magnetycznego i strat materiału magnetycznego, zmierzonego metodami znormalizowanymi określa jakość obwodu magnetycznego, tzw. *building factor*. W przypadku prostego jednofazowego obwodu magnetycznego pakietowanego z pasków ciętych pod kątem 90° *building factor* wynosi 1,45, a dla ciętych pod kątem 45° *building factor* wynosi 1,1. Dlatego, biorąc pod uwagę anizotropowe właściwości magnetyczne blach elektrotechnicznych na etapie projektowania, można uzyskać znaczną oszczędność energii i materiałów oraz poprawić parametry techniczne urządzenia, jak np.: zmniejszenie hałasu, drgań [3].

Przedstawiany do oceny cykl prac obejmuje własności anizotropowe wynikające z budowy krystalicznej blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym [4] i nieorientowanym [5] charakteryzujących się teksturą Gossa. Do badań wybrano najczęściej stosowane blachy

<sup>1</sup> Moses A. J. (2012), "Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization," *Scripta Materialia* Vol. 67 pp. 560–565

<sup>2</sup> Steel statistical yearbook, World Steel Association (2017)

<sup>3</sup> Tumanski S. (2003), "Investigations of the anisotropic behaviour of SiFe steel," *JMMM* Vol. 254- 255, pp. 50-53

<sup>4</sup> PN-EN 10107:2007, Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie zorientowanym dostarczane w stanie w pełni przetworzonym

<sup>5</sup> PN-EN 10106:2009, Blachy i taśmy stalowe elektrotechniczne o ziarnie nieorientowanym walcowane na zimno w stanie w pełni przetworzonym



elektrotechniczne o ziarnie zorientowanym i niezorientowanym. Spośród gatunków blach o ziarnie zorientowanym wybrano gatunki: M120-27S, M140-30S, M150-27S, M150-35S i M165-35S. Natomiast spośród blach o ziarnie niezorientowanym wybrano gatunki: M530-50A, M470-50A, M330-35A, M300-35A.

### c2) *Straty mocy i zjawisko anizotropii*

Wyznaczanie strat mocy w blachach elektrotechnicznych stanowi problem zgłębiany od wielu lat. Dotychczas zaproponowano wiele metod mających umożliwić modelowanie przebiegu zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w ferromagnetyku. Jednym z pierwszych opisów zależności strat od indukcji magnetycznej i częstotliwości należy uznać empiryczny model C. P. Steinmetz'a. Model ten został przedstawiony w 1892 roku do obliczania jednostkowych strat na histerezę  $P_h$ . Obecnie stosowana jest jego zmodyfikowana wersja w postaci (1) służąca do obliczania jednostkowych całkowitych strat mocy  $P_S$ :

$$P_S = C_m \cdot B_m^{\alpha_1} \cdot f^\beta, \quad W/kg \quad (1)$$

gdzie:  $C_m$  – stała strat całkowitych,  $B_m$  – indukcja maksymalna,  $f$  – częstotliwość przemagnesowania.  $\alpha_1 = 1,6 \dots, 2,5$ ,  $\beta = 1, \dots, 2$  (w zależności od rodzaju taśmy) – wykładniki potęgowe.

W procesie projektowania obwodów magnetycznych równie często wykorzystywany jest model dwuskładnikowy. Model ten uwzględnia straty histerezowe  $P_h$  jak i straty wiropądowe  $P_e$ . Model ten uznany za klasyczny, stosowany jest w bardziej rozwiniętej analitycznej postaci równania:

$$P_S = C_h \cdot B_m^\alpha \cdot f + C_e \cdot B_m^2 \cdot f^2, \quad W/kg \quad (2)$$

gdzie:  $C_h$  – współczynnik strat na histerezę,  $\alpha$  – wykładnik potęgowy indukcji magnetycznej z zakresu od 1,6 do 2,5,  $C_e$  – stała strat wiropądowych.

Cechą charakterystyczną modelu zaproponowanego we wzorze (2) jest obliczanie strat  $P_S$  jako sumy strat wywołanych różnymi zjawiskami podczas przemagnesowania ferromagnetyku (zgodnie z twierdzeniem Poyntinga). Przy czym stosowane są dwa warianty modelu (2). Jeden, w którym współczynnik  $C_e$  określony jest na drodze dopasowania równania (2) do danych eksperymentalnych  $P_S = f(f)$ . Oraz drugi wariant, w którym współczynnik  $C_e$  obliczany jest z równań Maxwella [6]. Szczególnie w przypadku drugiego wariantu wyznaczone na podstawie (2) wartości strat mocy znacznie odbiegają od wartości zmierzonych. Z tego względu analizę strat z przemagnesowania osiowego wykonano w oparciu o model podstawowy trójskładnikowy zaproponowany przez Bertottiego [6]. Model ten zawiera składowe histerezową  $P_h$  proporcjonalną do częstotliwości oraz dwie składowe wiropądowe: klasyczną  $P_w$ , zależną od kwadratu częstotliwości i dodatkową  $P_a$ , zależną od częstotliwości w potęgze 1,5. Współczynnik  $C_w$  wyznaczony jest z równań Maxwella. Natomiast trzeci składnik w równaniu (3) wynika z osiągniętego poziomu uporządkowania struktury domenowej. Ten dodatkowy składnik służy zatem poprawie dokładności modelu obliczeniowego strat  $P_S$ .

<sup>6</sup> G. Bertotti, General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 621 – 630, Jan. 1988.



$$P_S = C_h \cdot B_m^\alpha \cdot f + C_w \cdot B_m^2 \cdot f^2 + C_a \cdot B_m^{3/2} \cdot f^{3/2}, \quad W/kg \quad (3)$$

gdzie:  $C_w$  – współczynnik strat wiropądowych klasycznych,  $C_a$  – współczynnik strat wiropądowych dodatkowych

Równanie (3) jest opisem zjawiska przemagnesowania uwzględniającego przypadkowość ruchu ścian domenowych oraz zmian strat w zależności od częstotliwości przemagnesowania materiału. Wykorzystanie zależności (3) do obliczeń strat mocy wymaga zastosowania odpowiedniej aparatury pomiarowej i jest pracochłonne. Wyznaczenie żadanego parametru  $C_a$  wymaga dokonania pomiarów dla kilku wartości częstotliwości [A5].

Modelowaniu wpływu anizotropii na właściwości magnetyczne elektrotechnicznych blach teksturowanych poświęcono wiele badań. Wyróżnić można np.: modele oparte na teorii faz Néela [7], na tensorze reluktywności [8] lub bazujące na koncepcji koenergetycznej [9]. Inną kategorię modeli stanowią modele opisujące własności kątowe strat mocy bazując na różnych funkcjach. Jeden z nich bazuje na wielomianie trzeciego rzędu [10], a drugi na stosowanej w badaniach krystalograficznych funkcji rozkładu orientacji (ODF) [11]. W pierwszym przypadku współczynniki wielomianu nie posiadają fizycznego znaczenia. Do obliczeń własności kierunkowych jednostkowych strat mocy ( $P_S$ ) wykorzystuje się trzy pierwsze wyrazy funkcji ODF i dane zmierzone przy kątach magnesowania  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$  i  $90^\circ$  w odniesieniu do kierunku walcowania (RD) blachy [12]. Jednak tego podejścia nie można zastosować dla dużych wartości indukcji magnetycznych, takich przy których blachy elektrotechniczne o ziarnie zorientowanym często pracują w rdzeniach transformatorów [A2].

Wspólną cechą wymienionych modeli jest modelowanie bazujące na jednostkowych całkowitych stratach mocy. Przedstawiony w cyklu prac model stanowi całkowicie nowatorskie podejście do modelowania anizotropowych własności jednostkowych strat mocy bazujące na rozdziale strat na składowe i modelowaniu składowych wykazujących anizotropowe właściwości.

Przedstawiony do oceny dorobek stanowi podsumowanie prowadzonych przez autora wniosku badań naukowych z zakresu wpływu zjawiska anizotropii magnetycznej na składowe straty mocy blach elektrotechnicznych. W odróżnieniu od badań przeprowadzonych w rozprawie doktorskiej gdzie autor zajmował się przemagnesowaniem obrotowym, prezentowany cykl publikacji dotyczy przemagnesowania osiowego. Przedstawione w punkcie 4 b prace stanowią cykl 15 artykułów naukowych [A1- A15] powiązanych tematycznie, obejmujących wyniki badań eksperymentalnych jednostkowych strat mocy blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa. W tematyce przedstawionych publikacji można wyróżnić dwa obszary badań. Pierwszy obszar obejmuje badania wpływu anizotropii magnetycznej przy przemagnesowaniu wzdłuż kierunku walcowania blach

<sup>7</sup> F. Fiorillo, L.R. Dupre, C. Appino, A.M. Rietto, "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

<sup>8</sup> H. V. Sande, T. Boonen, I. Podoleanu, F. Henrotte, and K. Hameyer, "Simulation of a Three-Phase Transformer Using an Improved Anisotropy Model," *IEEE Trans. on Magn.* Vol. 40 (2) (2004), pp. 850-855

<sup>9</sup> B. Cornut, A. Kedous-Lebouc, and T. Waeckerlé, "From metallurgy to modeling of electrical steels: A multiple approach to their behavior and use based on physics and experimental investigations," *J. Magn. Mater.*, Vol. 160 (1996), s. 102-108

<sup>10</sup> M. Soinski, A.J. Moses, *Handbook of Magnetic Materials*, Chapter 4, Vol. 8, Elsevier Science B.V., 1994

<sup>11</sup> H.J. Bunge, *Texture and magnetic properties, Textures and Microstructures*, Vol. 11 (1989), pp. 75-95

<sup>12</sup> M. F. de Campos, *Anisotropy of steel sheets and consequence for Epstein test: I theory*. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development September, 17 – 22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil



elektrotechnicznych o różnym stopniu stekstrowania [A4-A9, A14]. Drugi obszar uwzględnia właściwości kątowe [A1- A3, A10-A13, A15] wybranych blach. Oba te aspekty związane są ze sobą i odgrywają bardzo istotną rolę w zastosowaniu praktycznym budowy obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych i transformatorów. Jednostkowe straty mocy wzdłuż kierunku walcowania decydują o docelowym zastosowaniu blachy elektrotechnicznej, natomiast jej właściwości kątowe decydują o konstrukcji obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych i transformatorów. Budowa obwodów magnetycznych bez uwzględnienia wpływu anizotropii magnetycznej na właściwości blachy prowadzi, jak wspomniano, do pogorszenia właściwości eksploatacyjnych całego urządzenia.

### **c3) Cel i zakres przedstawionych prac**

Celem naukowym przedstawionego do oceny powiązanego tematycznie cyklu publikacji [A1 - A15] jest modelowanie wpływu zjawiska anizotropii magnetycznej na składowe całkowitych strat mocy blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa przy przemagnesowaniu osiowym.

Anizotropia magnetyczna własności magnetycznych w istotny sposób decyduje o zastosowaniu i sposobie konstrukcji obwodów magnetycznych. Zjawisko anizotropii odgrywa zatem istotną rolę zarówno w aspekcie poznawczym jak i utylitarnym, wpływając znacząco na straty generowane w obwodzie magnetycznym.

Zakres prac [A1 - A15] przedstawionych w niniejszym wniosku obejmuje anizotropię magnetyczną pochodzącą od tekstury Gossa blach elektrotechnicznych. Cele robocze pracy to:

- określenie przydatności modeli obliczeniowych strat mocy do określenia wpływu zjawiska anizotropii na składowe straty mocy,
- określenie zależności parametrów modelu Bertottiego strat mocy od stopnia stekstrowania,
- opracowanie metodyki wykonywania pomiarów strat mocy dla celu ich rozdziału na składowe,
- opracowanie zależności składowej histerezy i dodatkowej straty mocy od stopnia stekstrowania oraz od kąta przemagnesowania w stosunku do kierunku walcowania,
- sformułowanie metody modelowania właściwości kierunkowych jednostkowych strat całkowitych blach elektrotechnicznych przy przemagnesowaniu osiowym.

### **c4) Składowe straty mocy z uwzględnieniem stopnia stekstrowania**

Pierwszy obszar badań dotyczył przemagnesowania osiowego wzdłuż kierunku walcowania. Badania wykonano aparatem Epsteina na paskach wyciętych wzdłuż kierunku walcowania. Pomiarów takie stanowią podstawę podziału blach elektrotechnicznych na gatunki. Poszczególne gatunki różnią się dodatkowo między sobą anizotropią ich właściwości magnetycznych.

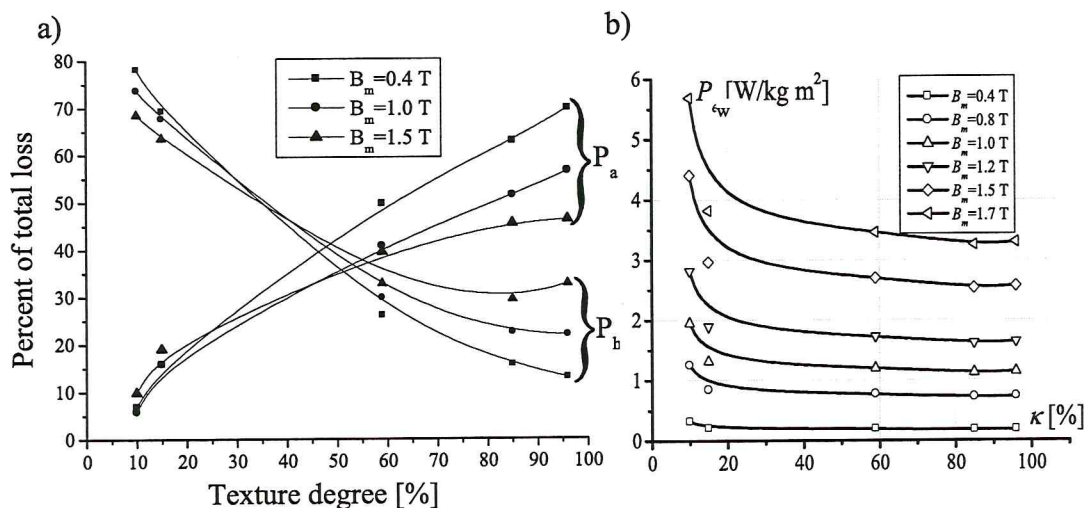
Jako miarę anizotropii magnetycznej przyjęto stopień stekstrowania ze względu na fakt, że pomiary wykonywano wzdłuż kierunku walcowania. Stopień stekstrowania określono,



jako procentową zawartość kryształów zorientowanych zgodnie z kierunkiem walcowania do całkowitej ilości kryształów. Przyjęta miara anizotropii umożliwiła porównanie różnych gatunków blach, takich jak uznawane za izotropowe blachy o ziarnie nieorientowanym jak i gatunków o znacznym stopniu orientacji ziaren.

[A9] - Moses A.J., Pluta W.: "Anisotropy influence on hysteresis and additional loss in silicon steel sheets", *Steel Research International*, nr 06 (2005), s. 450-454 ( $IF = 0.465$ , 10 pkt.)

W pracy rozdział strat jednostkowych na składowe przeprowadzono na podstawie pomiarów pasków aparatu Epsteina magnesowanych wzdłuż kierunku walcowania przy częstotliwości 20 Hz, 50 Hz i 150 Hz. Celem pracy [A9] było wyznaczenie zależności składowych jednostkowych strat mocy od stopnia stekstrowania  $\kappa$  dla blach elektrotechnicznych przemagnesowywanych wzdłuż kierunku walcowania (RD). Jednostkowe straty mocy rozdzielono na składową histerezową, wiropądową klasyczną i wiropądową dodatkową, jak we wzorze (3). Na rys. 1 przedstawiono procentowy udział składowej histerezowej i wiropądowej dodatkowej strat całkowitych w zależności od stopnia stekstrowania  $\kappa$  blach o teksturze Gossa o ziarnie zorientowanym i nieorientowanym.



Rys. 1. Procentowy udział składowych jednostkowych strat mocy w zależności od stopnia stekstrowania blach o teksturze Gossa magnesowanych wzdłuż RD: a) składowe histerezowa  $P_h$  i wiropądowa dodatkowa  $P_a$ , b) składowa wiropądowa klasyczna  $P_{ew}$

Analiza wyników przedstawionych na rys. 1 a) pokazuje, że w blachach o ziarnie nieorientowanym straty histerezowe odgrywają dominującą rolę. Natomiast w blachach o ziarnie zorientowanym dominującą rolę odgrywają straty wiropądowe dodatkowe. Dodatkowo na rys. 1 a) widoczna jest współzależność zmian udziału procentowego strat  $P_h$  i  $P_a$ . Wraz ze zmniejszaniem udziału procentowego jednej składowej, wzrasta udział procentowy drugiej. Ze względu na różnice grubości pomiędzy różnymi gatunkami blach, również składowa wiropądowa klasyczna wykazuje zależność od stopnia stekstrowania, co przedstawiono na rys. 1 b). Należy podkreślić, że obie wymienione powyżej zależności stanowią przesłankę do opracowania modelu własności kierunkowych blach elektrotechnicznych.

Na rys.1 a) wyróżnić można dwa zakresy wartości indukcji magnetycznej. Zakres "dolny" obejmuje zakres indukcji magnetycznych do osiągnięcia wartości maksymalnej przenikalności. Natomiast zakres "górny" obejmuje zakres indukcji magnetycznych po osiągnięciu wartości maksymalnej przenikalności. W zakresach tych składowa histereza i wiropądowa dodatkowa wykazują przeciwstawne tendencje zmian ze wzrostem indukcji magnetycznej w zależności od stopnia stekstrowania. W "dolnym" zakresie indukcji magnetycznej w blachach o małym stopniu stekstrowania ( $\kappa = 10\% - 15\%$ ) przeważają procesy magnesowania związane ze zjawiskiem histerezy magnetycznej, a w zakresie "górnym" rola składowej histerezy maleje. W blachach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym dla  $\kappa > 50\%$  udział składowej histerezy zwiększa się ze wzrostem wartości indukcji magnetycznej.

Reasumując, rezultatem badań omawianej publikacji było wyznaczenie zależności składowych strat mocy od stopnia stekstrowania włączając składową wiropądową klasyczną. Ta ostatnia właściwość jest szczególnie istotna dla opracowania uniwersalnego modelu wpływu anizotropii na straty mocy blach elektrotechnicznych. Natomiast, zaobserwowane zakresy indukcji magnetycznej stanowią przesłankę do sformułowania metody rozdziału mechanizmów strat w blachach elektrotechnicznych.

[A8] - *Pluta W.: "Specific total loss components under axial magnetization in electrical steel sheets with different degree of Goss texture", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.44, nr 11 (2008), s.3832-3835 (IF = 1,061, 20 pkt.)*

W pracy [A8] przedstawiono zależności składowych jednostkowych strat mocy od indukcji magnetycznej blach elektrotechnicznych o stopniu stekstrowania  $\kappa$  równym 10, 15, 59, 85 i 96 procent. Wykazano, że składowa histereza i wiropądowa dodatkowa zależą od anizotropii magnetycznej. Jednak, dla wybranej blachy o ziarnie niezorientowanym i blachy o ziarnie zorientowanym o tej samej grubości składowa wiropądowa dodatkowa przyjmuje zbliżone wartości pomimo znacznej różnicy stopnia orientacji ziaren. Wskazuje to, że zależność bezwzględnych wartości strat składowej wiropądowej dodatkowej od stopnia stekstrowania jest znacznie słabsza niż jej zależność procentowa wyznaczona w pracy [A9], a posługiwanie się w praktyce tylko wartościami bezwzględnymi może prowadzić do błędnych wniosków.

Wykorzystywany w praktyce przy projektowaniu magnetowodów maszyn i transformatorów współczynnik podziału strat mocy  $\Gamma$  określany, jako iloraz składowej histerezy do sumy składowych wiropądowych, zmienia się znacząco dla różnych gatunków blach elektrotechnicznych. Dodatkowo, współczynnik  $\Gamma$  zależny jest indukcji magnetycznej. Fakt ten wskazuje konieczność uwzględnienia obu wymienionych zależności współczynnika  $\Gamma$  w projektowaniu obwodów magnetycznych.

[A7] - *Pluta W.: "Properties of loss components in electrical steel with Goss texture", Przegląd Elektrotechniczny, nr 1 (2009), s 25 – 27 (IF = 0,196, 6 pkt.)*

W pracy wykazano przydatność modelu trójskładnikowego (3) do analizy mechanizmów strat mocy w blachach elektrotechnicznych o tekturze Gossa. Podział mechanizmów powstawania strat ze względu na stan namagnesowania przejawia się we wszystkich parametrach modelu trójskładnikowego zależnych od indukcji magnetycznej, ale również w przenikalności magnetycznej i współczynniku strat dodatkowych. W pracy wykazano ograniczenie w stosowalności modelu do wartości indukcji magnetycznej około 1,5 T. Ograniczenie to wynika ze wzoru Steinmetza, który stanowi prostą funkcję wykładniczą  $P_h = C_h B_m^\alpha$  i nie odzwierciedla zjawisk zachodzących w zakresie indukcji powyżej 1,5 T. Składowa histerezowa strat mocy, wyznaczona z rozdziału strat, dla wyższych wartości indukcji magnetycznej znacznie odbiega od wyznaczanego przez prostą funkcję wykładniczą. Dla analizy składowych strat niezwykle ważny jest także dobór wykładnika potęgi  $\alpha$ . W przypadku nowoczesnych blach elektrotechnicznych wyznaczanie parametrów wymienionej funkcji wykładniczej np.: metodą najmniejszych kwadratów może prowadzić do wartości, które nie odzwierciedlają rzeczywistego przebiegu funkcji. Wartości takie nie są przydatne do modelowania wpływu anizotropii na straty mocy, co wykazano w pracy [A1, A10].

Reasumując, w omawianej publikacji wykazano zasadność podziału mechanizmów powstawania strat i konieczność uwzględnienia tego faktu w modelowaniu strat. Wykazano również źródło błędów predykcji strat modelu trójskładnikowego dla wyższych wartości indukcji magnetycznej np. indukcji pracy rdzeni transformatorów.

### **Osiągnięcie własne autora w zakresie pomiarów magnetycznych**

[A5] - *Pluta W.A.: "Measurements of magnetic properties of electrical steel sheets for the aim of loss separation", Journal of Electrical Engineering, Vol. 61, nr 7/s (2010), s. 122-127 (IF = 0,37, 15 pkt.)*

Studia literaturowe na temat rozdziału strat na składowe pokazały brak opracowań dotyczących sposobu wykonania takich pomiarów. Celem pracy [A5] było opracowanie zarówno metodyki wykonywania pomiarów jak i rozdziału strat na składowe. Realizacja celu pracy wymagała budowy nowego systemu pomiarowego. Komercyjne układy pomiarowe właściwości magnetycznych posiadają wiele ograniczeń ułatwiających ich bezpieczną eksploatację. Ograniczenia te powodują brak pełnej kontroli nad procesem pomiarowym, np.: brak możliwości wprowadzania dodatkowych parametrów monitorujących dokładność kształtowania przebiegu indukcji magnetycznej. Opracowany i uruchomiony własny układ pomiarowy pozwolił na eliminację tych ograniczeń. Nowy system pomiarowy uruchomiono w oparciu o platformę LabView®. System umożliwia wykonywanie pomiarów od bardzo niskich częstotliwości już od 2 Hz oraz kontrolę współczynników: kształtu (FF - Form Factor) oraz zawartości harmoniczných (THD - Total Harmonic Distortion). Dla celów pomiarów własności kierunkowych zmodernizowano także aparat do pomiarów na pojedynczym arkuszu blachy. Wykorzystanie do pomiarów próbki kwadratowej o boku

100 mm umożliwiło wykonanie pomiarów dla dwóch kątów przemagnesowania na jednej próbce tj. dla kąta wycięcia próbki i kąta dopełniającego do 90°. Układ pomiarowy został wywzorcowany próbkami referencyjnymi. Średnie odchylenie standardowe w przypadku pomiarów natężenia pola magnetycznego dla największych wartości nie przekracza 3,5%. Natomiast, w przypadku pomiarów strat mocy średnie odchylenie standardowe  $\leq 1,5\%$  ( $f > 20$  Hz),  $\leq 2,5\%$  ( $f \leq 20$ Hz). Ze względu na różne odchylenia standardowe dla niskiej i wysokiej częstotliwości punkty eksperymentalne zostały dopasowane z wykorzystaniem nieliniowej metody najmniejszych kwadratów, algorytmem Levenberga-Marquardta z różnymi wagami zależnymi od średniego odchylenia kwadratowego pomiarów. Własne oprogramowanie ułatwiło także przygotowanie dużej ilości danych pomiarowych do analizy.

W pracy [A5] opracowano metodykę wykonywania pomiarów dla celów podziału strat określając dopuszczalne zawartości współczynników THD i FF na poziomie mniejszym niż przewidują normy pomiarów własności magnetycznych aparatem SST lub aparatem Epsteina. Określono, że współczynnik THD przebiegu indukcji magnetycznej nie powinien być większy niż 2%, a współczynnik kształtu FF powinien być utrzymywany na poziomie poniżej 0,5%. Odmiennie, niż przewidują normy pomiarów magnetycznych. Normy te określają, że współczynnik FF powinien być mniejszy niż 1%, a kontroli współczynnika THD nie przewidują. Stwierdzono także, że rozdział strat jedynie dla dwóch częstotliwości może być przyczyną znaczących niedokładności. Z tego względu w następnych pracach wykonywano pomiary przy przynajmniej 10-ciu częstotliwościach przemagnesowania uwzględniając nieliniowość charakterystyki  $P_s/f = f(f)$ . Kontrolowano również współczynniki kształtu strumienia magnetycznego FF i zawartości harmonicznym THD.

W późniejszych pracach wykorzystano opracowaną w pracy [A5] metodykę pomiaru strat i rozdziału na składowe. Metodyka ta została wykorzystana także do badań właściwości kierunkowych strat.

- [A4] - *Pluta W.A., Core loss models in electrical steel sheets with different orientation. INVITED, Przegląd Elektrotechniczny, nr 09b (2011), s. 37-42 (IF = 0,244, 15 pkt.)*
- [A14] - *Pluta W., Rygał R., Soiński M., Przydatność modeli eksperymentalnych obliczania strat w blachach elektrotechnicznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 02 (2012), s.52-55 (baza WoS, 15 pkt.)*

W pracach [A4] i [A14] analizowano kilka modeli obliczeniowych strat całkowitych w blachach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym oraz niezorientowanym. Analiza stosowanych modeli, takich jak: zmodyfikowany model Steinmetza, model dwuskładnikowy i trójskładnikowy pokazała, że mogą one prowadzić do znacznej rozbieżności pomiędzy obliczonymi i zmierzonymi wartościami strat. Rozbieżności te wzrastają ze wzrostem stopnia stekstrowania. Stwierdzono, że model trójskładnikowy strat wykazuje większą przydatność do obliczeń, niż pozostałe dwa [A14]. Potwierdza to poprawność wyboru modelu trójskładnikowego do analizy wpływu anizotropii na straty mocy blach elektrotechnicznych.

- [A6] - *Pluta W.A.: Some Properties of Factors of Specific Total Loss Components in Electrical Steel. IEEE Trans. on Magnetics, Vol.46, nr 2 (2010), s.322-325 (IF = 1,052, 27 pkt.)*



W pracy [A6] wykorzystano doświadczenia uzyskane w poprzednich pracach nad rozdziałem strat. Celem pracy było określenie przydatności wytypowanego w poprzednich pracach [A4, A14] modelu trójskładnikowego do modelowania wpływu anizotropii opisanego jak poniżej [13]:

$$P_S = C_h \cdot B_m^\alpha \cdot f + \frac{1}{6} \pi^2 \cdot \sigma \cdot d^2 \cdot B_m^2 \cdot f^2 + 8B_m f (\sqrt{\sigma G S V_0 B_m f} - n_0 V_0 / 4) \quad (4)$$

gdzie:  $\alpha = 1.6, \dots, 2.5$  – wykładnik potęgowy indukcji magnetycznej składowej histerezy  $P_h$ , przewodność elektryczna  $\sigma$ , stała materiałowa  $G$ , przekrój poprzeczny  $S$  oraz specyficzne natężenie koercji  $V_0$  uzależnione z kolei od struktury domenowej badanego materiału,  $n_0$  stanowi liczbę obiektów magnetycznych dla  $f \rightarrow 0$

Prezentowane w pracy [A6] obliczone zależności parametrów tzn.  $n$  (liczba obiektów magnetycznych) i  $V_0$  (lokalnego natężenia koercji) modelu strat (4) wskazują na ich silną zależność od stopnia stekstrowania. Parametry te są również bardzo wrażliwe na dokładność rozdziału strat, która jest głównie determinowana wykonaniem pomiarów w dolnym, nieliniowym zakresie częstotliwości. Potwierdza to zastosowanie opisanej metodologii wykonywania pomiarów i rozdziału strat opisanej w pracy [A5]. Analiza danych dotyczących własności kierunkowych [A15] wykazała, że wyznaczone eksperymentalnie parametry  $n$  i  $V_0$  nie mogą być wykorzystane do obliczeń przy przemagnesowaniu dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania. Przyczyną jest odmiennosc przemagnesowania związana z całkowitą przebudową struktury domenowej dla tego kierunku przemagnesowania [14]. W pracy [A6] stwierdzono także, że składowa histereza może zawierać część składowej wiropądowej dodatkowej związanej z ruchem domen (ich reorganizacją), która występuje nawet przy bardzo wolnozmiennym magnesowaniu. Analiza danych wskazuje, że niezbędne są dalsze badania dla ilościowego i jakościowego opisu dodatkowego składnika strat histerezy.

Reasumując, rezultatem badań omawianej publikacji jest wykazanie przydatności modelu (4) do opisu strat mocy w blachach elektrotechnicznych o różnym stopniu stekstrowania, jednak tylko dla przemagnesowania wzdłuż kierunku walcowania.

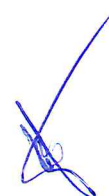
#### c5) Własności kierunkowe składowych strat mocy blach o teksturze Gossa

Kolejnym obszarem badań jest wpływ anizotropii magnetycznej na właściwości kierunkowe jednostkowych strat mocy blach elektrotechnicznych. Analizując właściwości kierunkowe strat, należy podkreślić, że składowa wiropądowa klasyczna strat stanowi składnik izotropowy, niezależny od kierunku magnesowania. Natomiast silne właściwości kierunkowe wykazuje składowa histereza i wiropądowa dodatkowa (3).

W pracach przedstawianych poniżej, oprócz pracy [A15], autor zastosował opracowaną w pracy [A5] metodologię rozdziału strat na składowe.

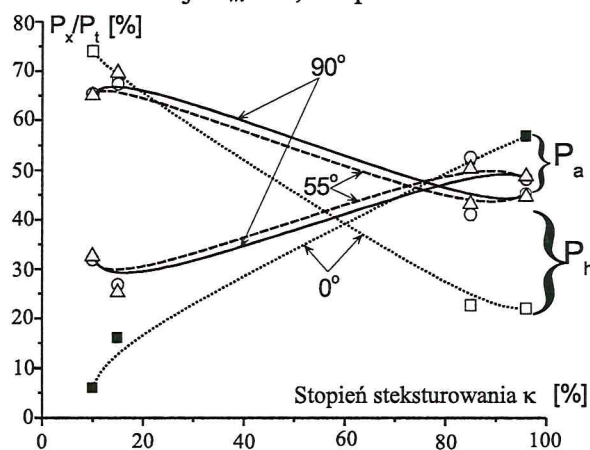
<sup>13</sup> Bertotti G., General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, IEEE Trans. Magn., 24 (1988), No. 1, 621 – 630

<sup>14</sup> Hubert A., Schäfer R., *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*, Springer, 2009, 3rd edition, pp. 494-511



[A15] - Pluta W.: "Anisotropy influence on loss components in electrical steel sheets", *Przegląd Elektrotechniczny* nr 4, 2007, p. 38-41 (baza WoS, 10 pkt.)

Celem pracy [A15] było wykazanie przydatności modelu trójskładnikowego do celów oceny wpływu anizotropii na własności kierunkowe składowe strat mocy. W pracy [A15], podobnie jak w pracy [A9], pomiary wykonano przy trzech częstotliwościach przemagnesowania 20 Hz, 50 Hz i 150 Hz systemem komercyjnym [15]. Pomiary wykonano na paskach aparatu Epsteina wyciętych wzdłuż różnych kierunków  $0^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $72^\circ$ ,  $90^\circ$  w stosunku do kierunku walcowania. Dla określonej wartości indukcji magnetycznej oraz różnych kątów wycięcia określono udział procentowy składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej. W sposób jakościowy określono podział na "dolny" i "górny" zakres indukcji magnetycznych podobnie jak w pracy [A9]. Wyznaczono zależność udziałów procentowych składowych strat od stopnia stekstrowania dla różnych wartości indukcji magnetycznych i kątów magnesowania. Dane dla indukcji  $B_m = 1,0$  T przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Udział procentowy składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej w stratach całkowitych w funkcji stopnia stekstrowania przy przemagnesowaniu w kierunku  $0^\circ$ ,  $55^\circ$  i  $90^\circ$  przy  $B_m = 1,0$  T

Uzyskane zależności przedstawione na rys. 2 wskazują, że trend zmian udziałów procentowych składowych strat w funkcji stopnia stekstrowania dla różnych kierunków magnesowania jest analogiczny jak zaobserwowano dla kierunku walcowania jak zaprezentowano w pracy [A9]. Wyniki pracy [A15] potwierdzają przydatność modelu trójskładnikowego do modelowania własności kierunkowych strat mocy blach elektrotechnicznych.

[A12] - Pluta W.A.: *Angular and Frequency Behavior of Some Properties of Electrical Steel Sheets*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7 (2017), s. 22-26 (baza Scopus, 14 pkt.)

W pracy [A12] analizowano zależności częstotliwościowe indukcji remanencji  $B_R$  i natężenia koercji  $H_C$  od indukcji magnetycznej  $B_m$  dla różnych kierunków magnesowania. W

<sup>15</sup> Projekt badawczy nr 8T10A 01211: Straty rotacyjne w blachach elektrotechnicznych, główny wykonawca, 1998

wyniku analizy danych zaproponowano oryginalną zależność częstotliwościową indukcji remanentu w postaci (5):

$$B_R^x = a_{B_R}^x + b_{B_R}^x f^{0.5} \quad (5)$$

gdzie: współczynniki  $a_{H_C}^x$  i  $b_{B_R}^x$  indukcji remanencji dla dynamicznych warunków przemagnesowania,  
 $x$  oznacza kąt przemagnesowania względem kierunku walcowania.

Zależność (5) dopasowano do charakterystyk eksperymentalnych indukcji remanencji w funkcji częstotliwości dla różnych kątów magnesowania  $x$ . Charakterystyki dopasowano ze współczynnikiem korelacji  $R^2$  równym lub lepszym niż 0,99. Podobna zależność obowiązuje także w przypadku natężenia koercji ( $H_C^x = a_{H_C}^x + b_{H_C}^x f^{0.5}$ ) [16]. Stwierdzono, że obie zależności są spełnione dla różnych kątów magnesowania i dla blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym i niezorientowanym.

Poprawność zaproponowanego modelu opisującego zależność częstotliwościową indukcji remanencji można wykazać na podstawie zależności na jednostkowe straty energii określone z pętli histerezy. Dla materiałów o prostokątnej pętli histerezy całkowite straty mocy stanowią iloczyn indukcji remanencji i natężenia koercji [17]:

$$P_S = 4B_R H_C f \quad (6)$$

Należy podkreślić, że powyższa zależność może być stosowana dla szczególnego przypadku materiałów o prostokątnej pętli histerezy np.: ferryty magnezo- managanowe lub stopy nanokrystaliczne (VITROPERM 500 Z). Podstawiając do (6) zaproponowaną zależność dla indukcji remanencji oraz znaną z literatury zależność dla natężenia koercji dla prostokątnej pętli histerezy obowiązuje wtedy zależność:

$$\begin{aligned} P_S^x &= 4B_R^x H_C^x f = (a_{B_R}^x + b_{B_R}^x f^{1/2})(a_{H_C}^x + b_{H_C}^x f^{1/2})f = \dots \\ &\dots = 4 \underbrace{(a_{B_R}^x a_{H_C}^x)}_{P_h^x} + \underbrace{(a_{B_R}^x b_{H_C}^x + a_{H_C}^x b_{B_R}^x)}_{P_a^x} f^{1/2} + \underbrace{b_{B_R}^x b_{H_C}^x f}_{P_w^x} \end{aligned} \quad (7)$$

Zależność (7) przyjmuje postać odpowiednią do modelu trójskładnikowego. Uzasadnia to rozdzielenie całkowitych strat mocy na trzy składniki. Dodatkowo, model częstotliwościowej zależności indukcji remanencji dla różnych kątów, potwierdza poprawność wyboru modelu trójskładnikowego do analizy własności kierunkowych strat mocy.

W pracy [A12] wykazano także, że indukcja remanencji nie może być uznana za niezmienną z częstotliwością, (co uprzednio zakładał Jiles) [18]. Zmienność indukcji remanencji z częstotliwością powinna być uwzględniana w procesie modelowania pętli histerezy dla celów analizy stanów przejściowych w obwodach elektrycznych.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że w omawianej pracy w odmienny i oryginalny sposób wykazano przydatność i poprawność modelu trójskładnikowego do analizy i

<sup>16</sup> R. Grössinger, N. Mehboob, D. Suess, R. Turtelli Sato, and M. Kriegisch, "An Eddy-Current Model Describing the Frequency Dependence of the Coercivity of Polycrystalline Galfenol," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 48, No. 11 (2012), pp. 3076-3079

<sup>17</sup> R., Boll *Weichmagnetische Werkstoffe Einführung in Den Magnetismus*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1990

<sup>18</sup> Jiles D.C., Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials, *IEEE Trans. Magnetics* 30(6) (1994), s.4326-4328



modelowania wpływu anizotropii magnetycznej na składowe straty mocy w blachach elektrotechnicznych.

[A2] - 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 (IF = 1.386, 25 pkt.)*

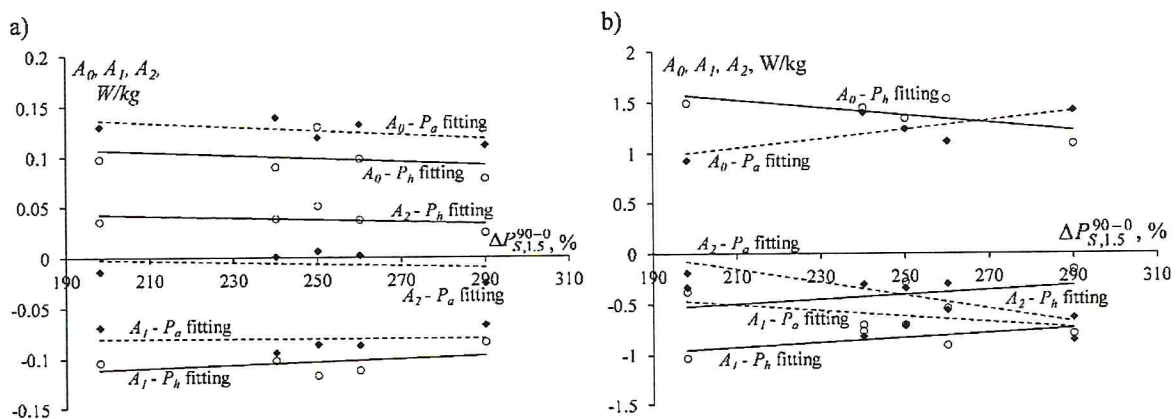
W kolejnej pracy przedstawiono, w sposób ilościowy, zależność składowej histerezy  $P_h$  i wiropądowej dodatkowej  $P_a$  dla blach elektrotechnicznych o ziarnie zorientowanym o teksturze Gossa. Pomiar jednostkowych strat mocy przeprowadzono dla różnych kątów magnesowania w stosunku do kierunku walcowania. Uzyskane wyniki uzasadniają podział jednostkowych strat mocy i jej składowych na dwa zakresy indukcji magnetycznej: poniżej  $B_m \leq 1,0$  T (zakres „dolny”) i powyżej  $B_m > 1,0$  T (zakres „górny”).

Właściwości kątowe składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej całkowitych strat mocy dla blach z ziarnie zorientowanym mogą być opisane z wykorzystaniem szeregu cosinusów, składających się minimum z czterech lub lepiej pięciu składników ( $n = 4$ ), jak w równaniu poniżej:

$$F(x) = \sum_{i=0}^n A_i \cos(2xi) \quad (8)$$

gdzie:  $A_i$  współczynniki szeregu,  
 $x$  oznacza kąt przemagnesowania względem kierunku walcowania,  
 $n$  liczba składników funkcji.

Na rys. 3 przedstawiono zależności pierwszych trzech współczynników powyższego równania (8) dla składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej od anizotropii strat jednostkowych  $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$ .



Rys. 3. Zależność pomiędzy trzema pierwszymi współczynnikami  $A_i$  szeregu (4) obliczonymi dla składowej histerezy  $P_h$  i wiropądowej dodatkowej  $P_a$  strat mocy od anizotropii całkowitych strat mocy  $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$  dla badanych blach elektrotechnicznych i indukcji magnetycznej  $B_m = 0.4$  T a) i  $B_m = 1.5$  T b)

W "dolnym" zakresie indukcji magnetycznej (rys. 3 a) zależności dla współczynników  $A_0$ ,  $A_1$  i  $A_2$  równania (8) dla składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej od anizotropii  $\Delta P_{S,1.5}^{90-0}$  tworzą niemal równoległe linie. W "górnym" zakresie indukcji magnetycznej



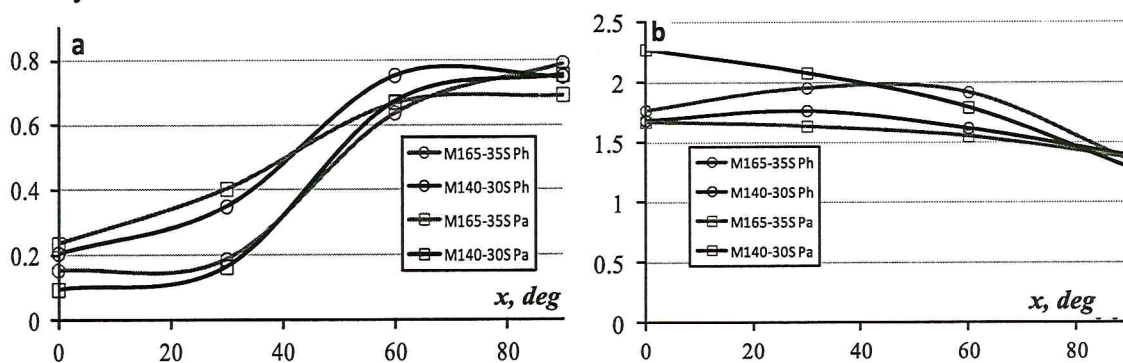
zależności pierwszych trzech współczynników równania (8) dla obu składowych strat mocy wykazują przeciwne tendencje wzrostowe i przecinają się wzajemnie (rys. 3 b). Potwierdza to zasadność rozdzielenia mechanizmów strat na dwa zakresy indukcji magnetycznej tzn. "dolny" i "górny" oraz trudność opisu własności kierunkowych zaprezentowanych w pracy [19].

Dodatkowo, należy podkreślić podobieństwa zależności składowych histerezowej i wiropądowej dodatkowej od kąta przemagnesowania, od indukcji magnetycznej oraz od stopnia stekstrowania. Podobieństwa te uzasadniają wykorzystanie ich do modelowania wpływu anizotropii na całkowite straty mocy.

[A3] - *Pluta W.A.: Directional properties of loss components in electrical steel sheets. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 44, No 3-4 (2014), s. 379-385 (IF = 0,737, 15 pkt.)*

[A13] - *Pluta W.A.: Influence of anisotropy on specific loss components in grain oriented electrical steel. Solid State Phenomena Vol. 214 (2014), s. 138-142 (baza Scopus, 10 pkt.)*

Zależności składowych histerezowej  $P_h$  i wiropądowej dodatkowej  $P_a$  całkowitych strat mocy od indukcji magnetycznej  $B_m$  mogą być aproksymowane funkcją wykładniczą w postaci  $P = aB^b$ . W pracach [A3, A13] przedstawiono współczynniki  $a$ ,  $b$  funkcji wykładniczych aproksymujących zależności  $P_h = f(B_m)$  i  $P_a = f(B_m)$  dla różnych kierunków magnesowania jak na rys. 4.



Rys. 4. Zależności współczynników funkcji wykładniczej  $P = aB^b$  wykorzystanej do aproksymacji składowej histerezowej i wiropądowej dodatkowej jednostkowych strat mocy od kąta przemagnesowania  $x$  w stosunku do kierunku walcowania dla blach o ziarnie zorientowanym gatunku M140-30S i M165-35S

Na rys. 4 można zaobserwować, że zależności kątowe współczynników funkcji wykładniczej  $P = aB^b$  dla obu składowych całkowitych strat mocy i różnych gatunków są bardzo podobne. Fakt ten może być wyjaśniony przez związek obu składowych strat mocy ze strukturą domenową oraz określonymi doświadczalnie współzależnościami obu składowych przedstawionymi na rys. 1 i rys. 2. W pracach [A3, A13] zademonstrowano możliwość wykorzystania tej własności w modelowaniu jednostkowych strat mocy blach

<sup>19</sup> Campos, M.F.. (2006). Anisotropy of steel sheets and consequence for Epstein test: I theory. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development September, 17 – 22, 2006, Rio de Janeiro



elektrotechnicznych z uwzględnieniem zjawiska anizotropii magnetycznej. Możliwość tą wykorzystano w późniejszych pracach proponując nowatorski model własności kierunkowych strat blach elektrotechnicznych.

## c6) Zaproponowana metoda modelowania z wykorzystaniem rozdziału strat na składowe

### c6.1) Wykorzystanie w modelowaniu funkcji ODF

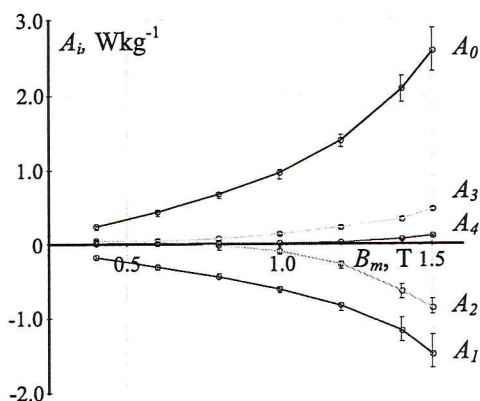
Celem kolejnych prac [A1, A10, A11] była analiza przydatności metod rozdziału strat do modelowania własności kierunkowych strat mocy.

[A11] *Pluta W.A.: Calculating power loss in electrical steel taking into account magnetic anisotropy, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2 (2018), s. 100-103 (baza WoS, 15 pkt.)*

Główną przesłanką dla nowego modelu była wzajemna współzależność składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej, wykazana we wcześniejszych pracach, w szczególności [A2, A9, A15]. Pozwala to zaproponować model własności kierunkowych strat mocy  $P_S(x)$  jak poniżej:

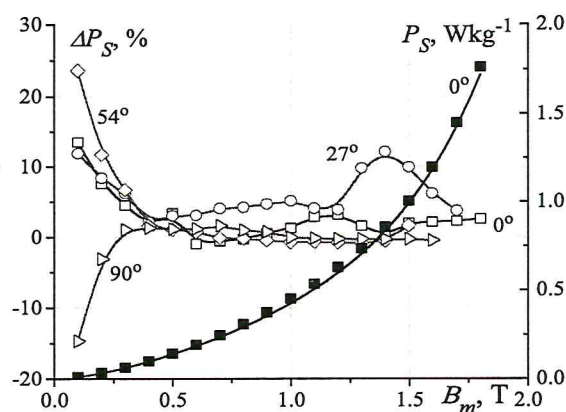
$$P_S(x) = (P_h(x) + P_a(x)) + P_w = P_{h+a}(x) + P_w = F(x) + P_w \quad (9)$$

Straty wiropądowe klasyczne mogą być wyznaczone na podstawie grubości i rezystywności blachy, opisany środkowym składnikiem równania (4). Funkcja  $F(x)$  (9) może być dowolną funkcją opisującą zależność kątową sumy składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej. W pracy [A11] do obliczeń wykorzystano funkcję ODF (8). Zależności współczynników  $A_i$  funkcji  $F(x)$  (9) od indukcji magnetycznej przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność współczynników  $A_i$  funkcji  $F(x)$  (9) dla funkcji ODF, obliczonymi dla sumy składowych  $P_{h+a} = P_h + P_a$  całkowitych strat mocy od indukcji magnetycznej dla pięciu gatunków badanych blach elektrotechnicznych o różnym stopniu stekstrowania

Na rys. 5 przedstawiono zależności współczynników  $A_i$  dla sumy składowych  $P_{h+a}$  dla pięciu gatunków blach o ziarnie zorientowanym, różniących się stopniem steksturowania  $\kappa$  od 56% do 96%, jak w pracy [A2]. Relatywnie mały rozrzut wartości współczynników, dla różnych gatunków blach, spowodowany jest współzależnością obu składowych histerezy i wiropądowej dodatkowej, co wykazano w pracach [A2, A9]. Korzystając z danych z rys. 5, w pracy [A11] przeprowadzono weryfikację zaproponowanego modelu właściwości kierunkowych w oparciu o szereg cosinusów (8). Wyniki obliczeń dla wartości średnich współczynników  $A_i$  dla pięciu gatunków blach przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Błędy obliczeniowe dla kątów przemagnesowania  $x = 0^\circ, 27^\circ, 54^\circ$  i  $90^\circ$  obliczone na podstawie średnich danych (linia ciągła) z rys. 5 oraz zmierzone (punkty) i obliczone (linie przerywane) jednostkowe straty mocy dla blachy elektrotechnicznej o ziarnie zorientowanym gatunku M140-30S i kierunku przemagnesowania  $x = 0^\circ$

Uzyskane wyniki obliczeń dla średnich wartości współczynników  $A_i$  wskazują na dobrą zgodność uzyskanych wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi. Zaprezentowana w pracy [A11] metoda obliczeń wymaga znajomości 5 charakterystyk kierunkowych np.: dla kierunków  $0^\circ, 27^\circ, 45^\circ, 54^\circ, 90^\circ$  dla blach o ziarnie zorientowanym. W przypadku blach o ziarnie niezorientowanym i dla blach o ziarnie zorientowanym w zakresie "dolnych" wartości indukcji magnetycznych wystarczające są trzy charakterystyki np.  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ .

Reasumując, rezultatem badań omawianej publikacji było opracowanie nowego modelu predykcji własności kierunkowych blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa. Nowość zaproponowanego modelu polega na wykorzystaniu wskazanych wcześniej współzależności pomiędzy składową histerezą i wiropądową całkowitych strat mocy. Wykazano także przydatność modelu w zakresie dużych indukcji magnetycznych zbliżonych do nasycenia, a więc zbliżonych do wartości indukcji pracy rdzeni transformatorów. Pomimo, że model wymaga znajomości pięciu charakterystyk eksperymentalnych jego weryfikacja wskazuje na duże praktyczne znaczenie i przydatność w procesie projektowania rdzeni magnetycznych.



## c6.2) Wykorzystanie w modelowaniu funkcji wykładniczej

[A10] - *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, pp. 1-4, <http://ieeexplore.ieee.org>, doi: 10.1109/PAEE.2018.8441074 (baza Scopus, 10 pkt.)*

Doświadczenia w pracach [A3, A13] oraz opracowany model predykcji własności kierunkowych strat bazujący na rozdziale strat [A11] wykorzystano do modelowania własności kierunkowych jednostkowych strat mocy. Zademonstrowano możliwość wykorzystania charakterystyk kierunkowych, składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej dla trzech kątów do predykcji charakterystyk jednostkowych całkowitych strat mocy. Do modelowania wykorzystano charakterystyki zaprezentowane w pracach [A2, A11, A13] przy czym charakterystyki kierunkowe  $P_a = f(B_m)$  i  $P_h = f(B_m)$  aproksymowano w zakresie od 0,1 T do 1,0 T. W zakresie tym możliwe było zastosowanie stałego wykładnika równania wykładniczego w postaci  $P_S = aB_m^b$ . W zakresie od 0,5 T do 1,0 T błędy obliczeniowe dla różnych kątów zawierały się w granicach 10%. Stwierdzono, że w zakresie od 0,1 T do 1,0 T aproksymacji charakterystyk  $P_a = f(B_m)$  i  $P_h = f(B_m)$  zaproponowany model spełnia założone cele.

Główną przyczyną błędów obliczeniowych dla wyższych wartości indukcji magnetycznych jest niedokładne odwzorowanie charakterystyk kierunkowych  $P_a = f(B_m)$  i  $P_h = f(B_m)$  dla wyższych wartości indukcji magnetycznej. Błędy obliczeniowe szybko wzrastają ze wzrostem indukcji magnetycznej. Jednak, sposób postępowania uzasadnia wykorzystanie równania wykładniczego do predykcji własności kierunkowych strat mocy. W pracach [A11] i [A1] do modelowania wykorzystano funkcję wykładniczą z wykładnikiem potęgi w postaci wielomianu jak w (10).

[A1] - *Pluta W.A., Moses A.J., Prediction of angular variation of specific total loss of Goss oriented electrical steel, Physica B: Condensed Matter, Vol. 544 (2018), s.28-33 (IF = 1,453, 20 pkt.)*

Alternatywną i nowatorską metodę obliczeń zaproponowano w pracy [A1]. Wymaga ona tylko trzech eksperymentalnych charakterystyk kierunkowych stratności w całym zakresie indukcji magnetycznej. Doświadczenia z poprzednich prac, a także wyniki obliczeniowe zawarte w pracy [A1, A11] wskazują, że możliwe jest wykorzystanie wielomianu jako wykładnika funkcji wykładniczej jak we wzorze (10):

$$P_{h+a}(x) = P_S - P_w = a(x)B_m^{b_2(x)B_m^2 + b_1(x)B_m + b_0(x)} \quad (10)$$

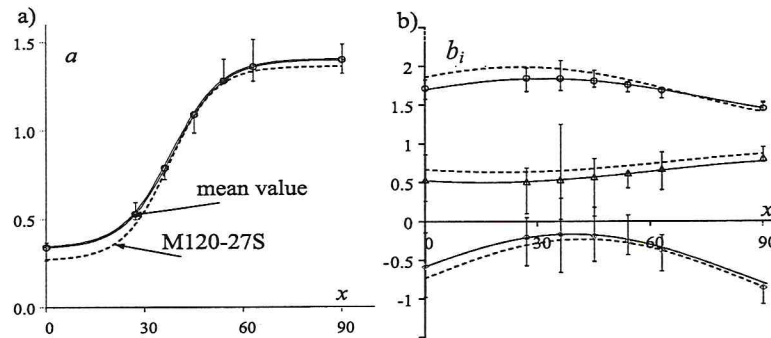
gdzie:  $a(x)$  - parametr zależny od kąta magnesowania  $x$ ,

$b_i(x)$  - współczynniki funkcji wykładniczej drugiego rzędu wykładnika potęgi indukcji magnetycznej zależne od kąta magnesowania  $x$

Takie podejście pozwala na predykcję własności kierunkowych strat do stanu nasycenia. Podobnie jak w pracy [A11] do obliczeń wykorzystano charakterystyki sumy składowych



$P_{h+a} = f(B_m)$ . Zależności kątowe współczynników funkcji wykładniczej przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zależności kątowe parametru  $a$  a) i parametrów  $b_i$  b) równania (10). Linią ciągłą zaznaczono wartości średnie dla pięciu gatunków blach o ziarnie zorientowanym. Linią przerywaną oznaczono wartości dla blachy gatunku M120-27S. Słupki błędów oznaczają rozrzut wartości od średniej dla pięciu gatunków blach elektrotechnicznych

Zbieżność danych dla pięciu różnych gatunków blach elektrotechnicznych na rys. 7 uzasadnia zależność prezentowana na rys. 1 b) oraz fakt że wartości dla składowych  $P_h$  i  $P_a$  zmieniają się przeciwnie zarówno dla różnych kątów przemagnesowania (rys. 2) jak i różnych stopni stekstrowania (rys. 1 a). Parametry  $a$ ,  $b_i$  dla różnych kątów magnesowania  $x$  na rys. 7 uzyskano poprzez dopasowanie funkcji wykładniczej (10) do punktów eksperymentalnych  $P_{h+a}$ . Przebieg zależności kątowych współczynnika  $a$  opisano za pomocą funkcji sigmoidalnej (11).

$$a(x) = a(0) + [a(90) - a(0)] \cdot \left[ 1 + \exp\left(\frac{x50 - x}{m}\right) \right]^{-1} \quad (11)$$

gdzie:  $a(0)$  i  $a(90)$  - współczynniki dla kątów przemagnesowania  $x = 0^\circ$  i  $x = 90^\circ$ ,  
 $x50$  - kąt odpowiadający wartości średniej  $(a(0) + a(90)) / 2$ ,  
 $m$  - nachylenie funkcji sigmoidalnej.

W równaniu (11) trzy współczynniki  $a(0)$ ,  $a(90)$  i  $x50$  mogą być określone bezpośrednio z pomiarów. Współczynnik  $m$  określa nachylenie funkcji sigmoidalnej. W grupie badanych blach elektrotechnicznych współczynnik  $m$  zmniejsza się liniowo z 8.1 do 7.9 przy wzrastającym stopniu stekstrowania z 56% do 96%. Dlatego dla takiej grupy materiałów wartość  $m$  może być względnie łatwa do określenia. Współczynnik  $m$  można także precyzyjnie wyznaczyć dopasowując (11) do trzech punktów eksperymentalnych dla kątów  $x = 0^\circ$ ,  $90^\circ$  i jeden z zakresu  $36^\circ \leq x \leq 45^\circ$ .

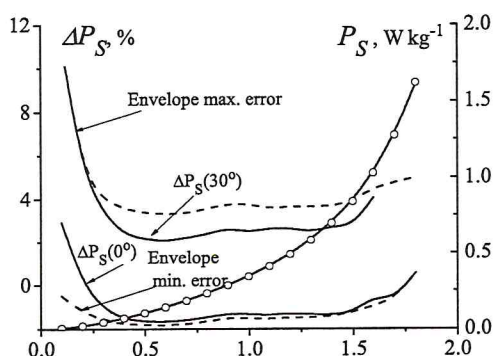
Trzeci punkt eksperymentalny z zakresu  $36^\circ \leq x \leq 45^\circ$  jest również potrzebny do określenia funkcji  $b_i(x)$ . Przebieg funkcji  $b_i(x)$  można określić na podstawie prostego równania parboli:

$$b_i(x) = z_{2,i}x^2 + z_{1,i}x + z_{0,i} \quad (12)$$

gdzie:  $z_{2,i}$ ,  $z_{1,i}$ ,  $z_{0,i}$ , współczynniki funkcji parabolicznej

Współczynniki  $z_{2,i}$ ,  $z_{1,i}$ ,  $z_{0,i}$  równania parboli (12) można łatwo obliczyć np. z układu trzech równań dla przejścia parboli przez trzy punkty eksperymentalne dla kątów  $x = 0^\circ$ ,  $90^\circ$  i jeden z zakresu  $36^\circ \leq x \leq 45^\circ$ .

W oparciu o wyznaczone współczynniki równań (11) i (12), w pracy [A1], przeprowadzono weryfikację zaproponowanego modelu właściwości kierunkowych. Wyniki obliczeń jednostkowych strat mocy dla kierunku walcowania oraz błędy graniczne dla różnych kierunków magnesowania dla blachy M120-27S, przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Jednostkowe straty mocy blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa dla kąta  $\alpha = 0^\circ$  (punkty - wartości zmierzone i linie wartości obliczone) oraz obwiednie błędów obliczeniowych dla różnych kątów magnesowania  $\alpha$  i dla  $f = 50$  Hz i dla blachy gatunku M120-27S

W pracy [A1] przedstawiono wyniki obliczeń dla wartości średnich dla pięciu blach (linia ciągła na rys. 7). Dla wybranej blachy gatunku M165-35N, błędy obliczeniowe zawierają się w przedziale od 20% do -2% dla indukcji magnetycznej 0,5 T. Ze wzrostem indukcji błędy maleją do wartości z zakresu od 10% do 0%. Na rys. 8 przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranego gatunku blachy o stopniu steksturowania  $\kappa = 96\%$  (linia przerywana na rys. 7). Obwiednie błędów dla wybranego gatunku blachy i dla wartości średnich, zawierające się w przedziale 4%, pozwalają na stwierdzenie poprawności opracowanego modelu.

Stosowalność zaproponowanego modelu może być rozszerzona na inne niż 50 Hz częstotliwości. W tym celu wymagana jest znajomość dodatkowych punktów eksperymentalnych dla częstotliwości  $f \rightarrow 0$ . Umożliwia to obliczenie z poniższego wzoru współczynnika  $C_a$ :

$$C_a = (P_s - P_w - C_h B_m f) / f^{3/2} \quad (13)$$

Znajomość współczynników  $C_h$  i  $C_a$  pozwala na obliczenie jednostkowych strat mocy dla różnych częstotliwości korzystając z modelu trójskładnikowego (3). Tym samym pozwala na obliczenie sumy  $P_{h+a}$  dla dowolnej częstotliwości z zakresu  $0 \text{ Hz} < f \leq 400 \text{ Hz}$ . Opracowany model własności kierunkowych jest modelem uniwersalnym. Wykorzystanie w modelowaniu rozdziału strat pozwala na predykcję własności kierunkowych dla różnych częstotliwości. Model pozwala na predykcję własności kierunkowych blach o ziarnie zorientowanym o różnych grubościach w zakresie częstotliwości  $f$  od 0 Hz do 400 Hz, indukcji magnetycznej  $B_m$  od 0 T do 1.9 T i kierunków magnesowania  $\alpha$  od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ .

Proponowany opis jest łatwiejszy do wdrożenia niż istniejące modele własności kierunkowych. Wymaga wykonania pomiarów tylko dla trzech kierunków dla blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa w celu predykcji właściwości kierunkowych strat przez stosunkowo proste obliczenia algebraiczne. Takie podejście umożliwia łatwą implementację

w programach inżynierskich do projektowania obwodów magnetycznych takich jak np. programy FEM. Umożliwia to także uniknięcie kłopotliwych pomiarów zależności częstotliwościowych strat mocy na próbkach wyciętych dla więcej niż trzech kierunków. Zaproponowany w pracy [A1] model własności kierunkowych strat  $P_S = f(x)$  bazuje na rozdziale strat na składowe. Dzięki temu stanowi uniwersalne narzędzie do wykorzystania przy projektowaniu obwodów magnetycznych. Wykazano, że model może być stosowany do przewidywania zależności kątowych i częstotliwościowych strat blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa dla przemagnesowania osiowego.

W podsumowaniu należy podkreślić, że w przedstawianym do oceny cyklu prac po raz pierwszy w metodyczny sposób analizowano wpływ anizotropii magnetycznej na składowe całkowite straty mocy i wykazano eksperymentalne podobieństwa pomiędzy  $P_h$  i  $P_a$  a także ich współzależność. Takie systematyczne podejście pozwoliło na opracowanie nowatorskiej metody bazującej na rozdziale strat i dwóch modeli (z wykorzystaniem funkcji ODF i funkcji wykładniczej) predykcji własności kierunkowych całkowitych strat mocy.

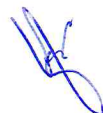
#### 4. Uogólnienie wyników naukowych

Zjawisko anizotropii blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa odgrywa istotną rolę, zarówno w aspekcie aplikacyjnym, jak i poznawczym. Parametry eksploatacyjne maszyn i urządzeń ulegają pogorszeniu, gdy obwód magnetyczny zostanie wykonany bez uwzględnienia kierunkowych własności blach elektrotechnicznych. Powoduje to wzrost generowanego np. hałasu, ale także wzrost strat, co jest szczególnie ważne z uwagi na wprowadzone normy IEC 60076-20. Brak uwzględnienia własności kierunkowych można wykryć tylko w końcowym etapie produkcji na specjalistycznym stanowisku badawczym lub w produkcji końcowym.

Prowadzone prace były ukierunkowane zarówno na aspekt poznawczy jak i użytkowy mając na celu opracowanie praktycznej metody modelowania właściwości kierunkowych całkowitych strat mocy blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa. W omawianym cyklu prac wykazać można następujące oryginalne osiągnięcia:

##### a) w aspekcie poznawczym:

- wykazanie w sposób jakościowy zależności składowych jednostkowych strat mocy histerezy i dodatkowej wiroprowadowej od stopnia stekstrowania (stopnia zorientowania ziaren dla różnych gatunków blach elektrotechnicznych) [A2, A3, A6 - A9, A15],
- opracowanie metodyki wykonywania pomiarów jednostkowych strat mocy dla celów ich rozdziału na składowe. Określono dopuszczalną wartość współczynnika kształtu strumienia magnetycznego na poziomie poniżej 0.5%, tzn. poniżej wartości przewidywanej przez normy pomiarów własności magnetycznych aparatem SST lub Epsteina. Wskazanie na konieczność kontroli także współczynnika zawartości harmonicznych indukcji magnetycznej THD i utrzymywania go na poziomie mniejszym niż 2%. Wskazanie, że wartość indukcji magnetycznej dla różnych częstotliwości nie powinna różnić się więcej niż o 0.2%, a rozdziału strat należy wykonać przy przynajmniej 10-ciu częstotliwościach przemagnesowania [A5, A6],



- wykazanie, że parametry  $n$  i  $V_0$  modelu Bertottiego silnie zależą od stopnia stekstrowania, a model w rozszerzonej formie (4) nie może być stosowany do opisanego strat dla kierunku innego niż kierunek walcowania [A6],
- wykazanie wspólnych cech zmienności składowej histerezy i wiropądowej dodatkowej od stopnia stekstrowania i kąta przemagnesowania, a tym samym w wykazano fenomenologiczne współzależność obu składowych [A3],
- wykazanie zasadności podziału analizowanych strat na dwa podobszary oddziaływania "dolny" i "górnny" indukcji magnetycznej [A7, A9],
- opracowanie i zweryfikowanie oryginalnej metody modelowania własności kierunkowych w oparciu o rozdział strat na składowe: histerezy oraz wiropądową klasyczną i dodatkową,
- zaproponowanie uniwersalnego modelu własności kierunkowych blach elektrotechnicznych o teksturze Gossa, którego podstawę stanowią charakterystyki kierunkowe i który jest zgodny z modelem trójskładnikowym [A1, A10, A11, A12].

**b) w aspekcie užitarnym:**

- opracowanie i wykonanie stanowiska (w oparciu o system LabView) do określania własności magnetycznych przy przemagnesowaniu osiowym w różnych układach probierczych [A8, A14, A15],
- określenie przydatności modeli predykcji strat mocy w blachach elektrotechnicznych bazujących na funkcji ODF i rozdziale strat [A4, A14],
- opracowanie oryginalnego modelu zależności indukcji remanencji od częstotliwości do zastosowania w programach uwzględniających pętlę histerezy do analizy stanów przejściowych w obwodach elektrycznych [A12],
- opracowanie modelu obliczania strat z uwzględnieniem zjawiska anizotropii magnetycznej możliwości rozszerzenia modelu trójskładnikowego całkowitych strat [A3, A13],
- wykazanie, niezbędności uwzględnienia zmienności współczynnika  $\Gamma$  (udział procentowy na składowej histerezy i składowych wiropądowych) w blachach o ziarnie nieorientowanym i zorientowanym od stopnia stekstrowania i od indukcji magnetycznej. Współczynnik  $\Gamma$  zależy od stopnia tekstury Gossa  $\kappa$  i indukcji magnetycznej [A8],
- opracowanie modelu własności kierunkowych jednostkowych strat mocy do projektowania obwodów magnetycznych z uwzględnieniem częstotliwości przemagnesowania [A1, A10, A11, A12].

W ramach dalszych prac Wnioskodawca zamierza rozszerzyć zaprezentowane badania na inne materiały, jak również na różne przemagnesowanie obrotowe.





## 5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

### 5.1. *Przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych*

Autor wniosku rozpoczął pracę na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej od prac związanych z oddziaływaniem linii wysokiego napięcia prądu stałego na środowisko. Prace te doprowadziły do uzyskania dyplomu magistra inżyniera nauki University of Ireland. Okres ten zakończono opublikowaniem monografii pt. "Oddziaływanie linii wysokiego napięcia na środowisko", dwóch rozdziałów w monografiach oraz trzech prac publikowanych w materiałach konferencyjnych. Doświadczenie oraz wiedzę uzyskaną na tym etapie rozwoju naukowego wnioskodawca wykorzystał w swojej działalności dydaktycznej na zajęciach z "Przebieg i ochrony odgromowej" oraz "Techniki wysokich napięć", a także w pracach na styku z przemysłem

Późniejsze zainteresowania autora wniosku były związane z wyjazdem do Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) na stypendium DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst). W tym czasie jego praca była związana z quasi statycznym przemagnesowaniem obrotowym. Dalsze prace po zakończeniu stypendium związane były z rozprawą doktorską na temat „Wpływu anizotropii magnetycznej na straty mocy z przemagnesowania obrotowego blach elektrotechnicznych z teksturą Gossa”. Prace te dotyczyły przemagnesowania przy częstotliwości sieciowej. Rozprawa, zakończona nadaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

### 5.2. *Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych*

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych wnioskodawca opublikował cykl publikacji stanowiący podsumowanie wyników badań przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej. Najważniejszą publikację stanowi monografia współautorska pt. "Ferromagnetyki miękkie w polach obrotowych. Badania i właściwości" wydana nakładem PWN. Autor wniosku opublikował także prace w czasopismach oraz na konferencjach:

- cztery prace w Przeglądzie Elektrotechnicznym,
- jedną w zeszytach naukowych PTB-Berichte Elektrizität (PTB-E) oraz
- w tematycznych konferencjach dotyczących pomiarów magnetycznych takich, jak:
  - Sympozjum Pomiarów Magnetycznych (2003, 2009),
  - Soft Magnetic Materials (2003),
  - International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing (2002),
  - Conference on Electrical Machines (2004),

W latach 2005-2008 wnioskodawca prowadził prace związane z oddziaływaniem pól magnetycznych stałych na urządzenia pomiarowe zużycia energii elektrycznej. Prace te były prowadzone we współpracy ze spółkami dystrybucyjnymi energii elektrycznej jak Tauron, Energa, PTPiRE Poznań oraz z przemysłem z takimi firmami jak Pozyton lub Zakład Usługowo-Produkcyjny Energia Pro-Pomiary Sp. z o.o.. W efekcie opublikowano prace na



temat wpływu magnesów neodymowych na liczniki energii elektrycznej i przekładniki prądowe (14 prac). W zakresie tych prac wykonano również ekspertyzy dotyczące obwodów wejściowych elektronicznych liczników energii elektrycznej, uwarunkowań trwałego uszkodzenia magnesów hamujących liczników indukcyjnych oraz wskaźników oddziaływania pola magnetycznego. Wyniki badań publikowano także w takich czasopismach jak:

- International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics - jeden artykuł,
- Journal of Electrical Engineering - jeden artykuł,
- Przegląd Elektrotechniczny - cztery artykuły,
- Śląskie Wiadomości Elektrotechniczne - jeden artykuł,

and presented at thematic conferences on magnetic measurements such as:

- IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (2007),
- IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (2007).

W pracy badawczej autor wniosku zajmował się także inną tematyką wynikającą głównie ze współpracy z przemysłem. Tematyka ta obejmowała prace z zakresu:

- określania właściwości magnetycznych blach elektrotechnicznych na potrzeby Energoserwisu S.A (TurboCare czy obecnie EthosEnergy Poland S.A.) w Lublińcu (kilkanaście raportów),
- badań związanych z przydatnością stosowania rdzeni nanokrystalicznych na dławiki lub badań rdzeni przekładników prądowych lub innych wykonywanych dla ABB w Krakowie i Łodzi (2 prace) ,
- badania z zakresu określania właściwości magnetycznych dużych rdzeni mających na celu określenie ich jakości ,
- badania własności magnetycznych materiałów i rdzeni magnetycznych w podwyższonych częstotliwościach do 100 kHz,
- konstrukcji systemów pomiarowych dla celów przemysłowych testowania własności magnetycznych dużych magnetowodów.

Dotychczasowy dorobek naukowy wnioskodawcy obejmuje 96 publikacji w tym: jedną współautorską książkę oraz 8 publikacji i jedną samodzielną monografię przed doktoratem.

W czasopismach z listy Journal Citation Report zostało opublikowanych 14 artykułów w tym 8 samodzielnych. 20 prac zostało opublikowanych w renomowanych czasopismach takich jak: Przegląd Elektrotechniczny, Journal of Electrical Engineering - Elektrotechnický Casopis, Śląskie Wiadomości Elektryczne i w czasopismach elektronicznych jak [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org) i [www.e3s-conferences.org](http://www.e3s-conferences.org).

Na dzień 27.09.2018 w bazie Web of Science Core Collection znajdują się 23 publikacje, które są cytowane 67 razy (w tym 43 bez autocytowań). Indeks Hirscha wg bazy WoS jest równy 5. Baza Scopus indeksuje 31 publikacji które są cytowane 114 razy (w tym 65 bez autocytowań). Indeks Hirscha wg bazy Scopus jest równy 6. Baza Google Scholar indeksuje 43 publikacje, które są cytowane 168 razy. Indeks Hirscha wg tej bazy jest równy 7.

Sumaryczna liczba przyznawanych punktów określonych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w odniesieniu do roku publikacji wynosi 493.



Sumaryczny Impact Factor dla publikacji w czasopismach z listy JCR zgodnie z rokiem publikacji wynosi 11.65.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że autor wniosku uczestniczył jako asystent ds. badań przemysłowych w realizacji dwóch wieloletnich bardzo dużych projektów celowych "Badania przemysłowe nowego typu rdzeni magnetycznych wykonanych z taśm amorficznych, nanokrystalicznych, cienkich blach elektrotechnicznych i materiałów kompozytowych pracujących w podwyższonych częstotliwościach" oraz "Badania przemysłowe modułów pomiarowych rzeczywistego zużycia energii elektrycznej". Oba projekty były współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Aktywność autora wniosku w środowisku naukowym związana jest m.in. z aktywnym uczestnictwem w konferencjach naukowych. Wygłosił 16 referatów na konferencjach międzynarodowych oraz 8 referatów na konferencjach krajowych oraz dodatkowo prezentował swoje prace na 13 konferencjach międzynarodowych i 2 krajowych w formie plakatu. Wygłosił także udział referaty w ośrodkach zagranicznych takich jak Wolfson Center for Magnetism, Cardiff University, Wales, UK., Istituto Galileo Ferrari, Torino, Italy, Technische Universitaet Wien, Austria, a także w kraju w *ENERGOSERWIS S.A. w Lublińcu*, *ABB - Centrum Badawcze, Kraków*, *Politechnika Opolska i Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie*. Aktywność Wnioskodawcy jest także związana członkostwem w organizacji IEEE Magnetism od 1996 roku. W latach 2008 - 2012 autor przewodniczącym IEEE Chapter Magnetism a od 2013 jest vice-przewodniczącym. Należy także do IEE UK Magnetic Club, Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej czy Polskiego Towarzystwa Zastosowań elektromagnetyzmu.

Autor wniosku jest zapraszany do recenzowania artykułów do czasopism indeksowanych w bazie JCR. Recenzował ponad 30 prac (nie uwzględniając powtórnych wersji prac) w takich czasopismach jak: IEEE Trans. on Magnetism, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Sensors and Actuators : A. Physical, IEEE Magnetic Letters, Compel, IEEE Power Engineering Letters, IEEE Transactions on Applied Superconductivity oraz do renomowanych czasopism spoza tej bazy np.: Journal of Electrical Engineering, Przegląd Elektrotechniczny, Solid State Phenomena, Web of Science - [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), Indian Journal of Science and Technology.

Wnioskodawca czynnie współpracuje z przemysłem wykonując badania i ekspertyzy dla takich firm jak: Ethos Energy (dawniej Energoserwis/Lubliniec, później TurboCare), ABB Kraków, ABB Sp. z o.o., ABB Warszawa, Pozyton, JMtronic, Magneto, ROLLICO Rolling Components Sp. z o.o. Sp. Kom., PTPiRE Poznań, ENERGA – OPERATOR SA, Zakład Usługowo-Produkcyjny Energia Pro-Pomiary Sp. z o.o.

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. 4b autor wniosku zalicza publikacje związane z realizacją prac badawczych dotyczących:

1) badań przemysłowych właściwości dużych rdzeni magnetycznych,

- [1] Rygał R., Zurek S., Pluta W., Układ do pomiaru własności dużych rdzeni w warunkach przemagnesowania przy częstotliwości do 100 kHz, opracowanie, prezentowane także na 15th International Workshop on 1 & 2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, Grenoble 24-26.09.2018,



- [2] Rygał R., Pluta W., Układ do pomiaru własności dużych rdzeni w warunkach przemagnesowania przy częstotliwości sieciowej, opracowanie, prezentowane także na 15th International Workshop on 1 & 2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, Grenoble 24-26.09.2018,
- [3] Pluta W., Rygał R., Zurek S., Układ do pomiaru napięcia przemiennego z separacją galwaniczną patent nr P.420750.10 od dnia 06.03.2017 z dnia 26.04.2018.
- [6] Pluta W., Rygał R., Soiński M., Leszczyński J., Labview Based Testing System for the Aim of Construction of Energy Efficient Magnetic Cores. E3S Web of Conferences - Czasopismo elektroniczne; ISSN 2267-1242, — 2017 vol. 14 art. no. 01039, s. 1–10, [http://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/02/e3sconf\\_ef2017\\_01039.pdf](http://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/02/e3sconf_ef2017_01039.pdf)
- [7] Pluta W.A., Soiński M.: Warunki pomiaru własności magnetycznych rdzeni ferromagnetycznych metoda watomierzową. Przegląd Elektrotechniczny R.90 nr 1 (2014), s.217-220
- 2) badań wpływu zewnętrznych pól elektromagnetycznych na obwody wejściowe liczników energii elektrycznej.
- [1] Pluta W., Świeboda C., Leszczyński J., Soiński M.: Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of nanocrystalline cores, Measurement, Vol. 97, 2017, Pages 38-44, DOI: 10.1016/j.measurement.2016.11.024
- [2] Soiński M., Pluta W., Zurek S., Kozłowski A.: Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Volume 44, Nr 3-4 / 2014 s. 279-284
- [3] Soiński M., Leszczyński J., Rygał R., Kozłowski A., Pluta W., Nowoczesne moduły pomiarowe rzeczywistego zużycia energii elektrycznej, Opracowanie (2015)
- [4] Soinski M., Rygal R., Pluta W. and Kepski P., "Addressing an EMC Weakness Due to Strong Static Magnetic Fields," 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, HI, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEMC.2007.51 (Referat w Web of Science)
- [5] Soiński M., Rygał R., Pluta W., Kępski P. and Żurek S.: External stationary magnetic field influence on measuring devices, Przegląd Elektrotechniczny nr 4, 2007, p. 88-92
- [5] Soinski, M.; Rygal, R.; Pluta, W., Kępski P.: Addressing an EMC weakness due to strong static magnetic fields. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: Workshop and Tutorial Notes, Vol. 1-3 2007, s. 237-242, ISBN: 1-4244-1350-8
- [6] Soinski M., Rygal R., Pluta W., Kepski P. and Zurek S.: Magnetic toroidal cores exposed to a strong stationary magnetic field, Journal of Electrical Engineering, Vol. 57, No. 8/S, 2006, p. 92-95
- Swoje doświadczenia autor wniosku wykorzystuje w swojej codziennej pracy dydaktycznej. Jest promotorem ponad 30 prac magisterskich i ponad 50 prac inżynierskich. Jako główny prowadzący przedmioty Ochrona przesyłu sygnałów, Eksploatacja systemów



elektronicznych i telekomunikacyjnych, Nowoczesne materiały magnetyczne w technice opracował i zbudował stanowiska laboratoryjne to wymienionych przedmiotów.

W swojej dalszej pracy naukowej autor zamierza rozszerzyć zaprezentowaną metodę modelowania własności kierunkowych na inne materiały oraz na różne rodzaje przemagnesowania włączając przemagnesowanie obrotowe.

