

Autoreferat

Jednotematyczny cykl publikacji

*Charakterystyka blach elektrotechnicznych
w warunkach przemagnesowania
jedno- i dwuwymiarowego*

dr inż. Stanisław Żurek

Stanisław Żurek

2019

1. Imię i nazwisko: Stanisław Żurek**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:**

- 2005, Doctor of Philosophy, tytuł rozprawy doktorskiej: "Two-dimensional magnetisation problems in electrical steels", Wolfson Centre for Magnetism, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, Wielka Brytania,
- 2000, magister inżynier, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, tytuł pracy dyplomowej: "Przemagnesowanie obrotowe w materiałach magnetycznie miękkich",

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Megger Instruments Ltd, wydział R&D, Dover, Wielka Brytania:
 - 2018–obecnie, jako *Head of Research and Innovation*,
 - 2011–2018, jako *Manager of Magnetic Development*,
 - 2008–2011, jako *Magnetism Technical Specialist*,
- Wolfson Centre for Magnetism, Cardiff University, Wielka Brytania:
 - 2004–2008, jako *Research Associate*,
 - 2001–2004, doktorat (Ph.D.),
 - 01.10.2000–31.12.2000, staż naukowy,

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):**a) Tytuł osiągnięcia naukowego**

Osiągnięcie stanowi monograficzny cykl publikacji zawarty w książce [A1] pod tytułem: "Charakterystyka blach elektrotechnicznych w warunkach przemagnesowania jednowymiarowego".

b) Jednotematyczny cykl publikacji (wartości *Impact Factor* oraz punkty MNiSW)

Monografie i publikacje zgodnie z Rozporządzeniem MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego § 4. pkt. 1.

Monografia	Udział własny
[A1] Żurek S., <i>Characterisation of soft magnetic materials under rotational magnetisation</i> , CRC Press / Taylor & Francis, 2017, ISBN 978-1-138-30436-9	100%

Publikacje w czasopiśmie 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 stopnia doktora habilitowanego § 3. pkt. 4a.

Publikacje	Udział własny	Impact Factor	Punkty MNiSW
[B1] Żurek S., <i>Effect of off-axis H-coil sensitivity on clockwise-anticlockwise differences of rotational power loss in isotropic samples</i> , IET Science, Measurement & Technology, Vol. 12 (4), 2018, pp. 507-513, DOI:10.1049/iet-smt.2017.0385	100%	1,336	20
[B2] Żurek S., <i>Theoretical concept and FEM simulations of improved shielding for round horizontal yokes for rotational power loss measurement</i> , Journal of Electrical Engineering - Elektrotechnický Casopis, Vol. 68 (4), 2017, pp. 267-273, DOI:10.1515/jee-2017-0038	100%	0,508	15
[B3] Żurek S., <i>Sensitivity to off-axis vector components of typical wire wound flat H-coil configurations</i> , IEEE Sensors Journal, Vol. 17 (13), 2017, pp. 4021-4028, DOI:10.1109/JSEN.2017.2704599	100%	2,617	30
[B4] Żurek S., <i>Qualitative analysis of Px and Py components of rotational power loss</i> , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, (4-2), 2014, p. 6300914, DOI:10.1109/TMAG.2013.2291225	100%	1,386	25
[B5] Ragusa C., Żurek S., Appino C., Moses A.J., <i>An intercomparison of rotational loss measurements in non-oriented Fe-Si alloys</i> , Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320 (20), 2008, p. e623-e626, DOI:10.1016/j.jmmm.2008.04.051	25%	1,283	20

Mój wkład polegał na wykonaniu pomiarów przy przemagnesowaniu obrotowym w Wolfson Centre.

<i>for Magnetics przetworzeniu danych do porównania oraz napisaniu sekcji artykułu o tych pomiarach.</i>			
[B6] Żurek S., Al-Nacmi F., Moses A. J., <i>Finite element modelling and measurements of flux and eddy current distribution in toroidal cores wound from electrical steel</i> , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44 (6), 2008, pp. 902-905, DOI: 10.1109/TMAG.2007.916232	33%	1,061	20
<i>Mój wkład polegał na zaprojektowaniu i wykonaniu eksperymentów, obróbce danych, wykonaniu ilustracji i napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			
[B7] Żurek S., Meydan T., <i>Rotational power losses and vector loci under controlled high flux density and magnetic field in electrical steel sheets</i> , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42 (10), 2006, pp. 2815-2817, DOI:10.1109/TMAG.2006.879907	50%	0,938	20
<i>Mój wkład polegał na zaprojektowaniu i wykonaniu systemu pomiarowego, wykonaniu pomiarów, wygenerowaniu wykresów i rysunków oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			
[B8] Żurek S., Meydan T., <i>Errors in the power loss measured in clockwise and anticlockwise rotational magnetisation, Part 1: Mathematical study</i> , IEE Proceedings, Science, Measurement & Technology, Vol. 153 (4), 2006, pp. 147-151, DOI:10.1049/ip-smt:20050072	50%	0,461	10
<i>Mój wkład polegał na stworzeniu modelu matematycznego, weryfikacji eksperymentalnej wyników, oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			
[B9] Żurek S., Meydan T., <i>Errors in the power loss measured in clockwise and anticlockwise rotational magnetisation, Part 2: Physical phenomena</i> , IEE Proceedings, Science, Measurement & Technology, Vol. 153 (4), 2006, pp. 152-157, DOI:10.1049/ip-smt:20050073	50%	0,461	10
<i>Mój wkład polegał na analizie czynników fizycznych, wygenerowaniu rysunków i wykresów oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			
[B10] Żurek S., Meydan T., <i>A novel capacitive flux density sensor</i> , Sensors and Actuators A-Physical, Vol. 129 (1-2), 2006, p. 121-125, DOI:10.1016/j.sna.2005.11.027	50%	1,434	24
<i>Mój wkład polegał na zaproponowaniu nowego rodzaju czujnika, wykonaniu prototypu i pomiarów, analizie danych, stworzeniu rysunków i wykresów oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			
[B11] Żurek S., Markatos P., Meydan T., Moses A. J., <i>Use of novel adaptive digital feedback for magnetic measurements under controlled magnetizing conditions</i> , IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41 (11), 2005, pp. 4242-4249, DOI:10.1109/TMAG.2005.854438	25%	1,014	20
<i>Mój wkład polegał na zaproponowaniu algorytmu adaptacyjnego sprzężenia zwrotnego, jego implementacji w systemie pomiarowym w środowisku LabVIEW, wykonaniu pomiarów w warunkach dwuwymiarowych oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>			

Inne publikacje zgodnie z Rozporządzeniem MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego § 3. pkt. 4a

Publikacje	Udział własny	Punkty MNiSW
[C1] Żurek S., <i>Systematic measurement errors of local B-coils due to holes</i> , Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, NR 3/2018, 2018, pp. 6-12, DOI:10.15199/48.2018.03.02	100%	14
[C2] Żurek S., <i>Practical implementation of universal digital feedback for characterisation of soft magnetic materials under controlled AC waveforms</i> , Przegląd Elektrotechniczny, R. 93 NR 7/2017, 2017, pp. 16-21, DOI:10.15199/48.2017.07.05	100%	14
[C3] Żurek S., <i>Example of vanishing anisotropy at high rotational magnetisation of grain-oriented electrical steel</i> , Przegląd Elektrotechniczny, R. 93 NR 7/2017, 2017, pp. 13-15, DOI:10.15199/48.2017.07.04	100%	14
[C4] Żurek S., <i>Qualitative 3D FEM study of B and H distribution in circular isotropic samples for two-dimensional loss measurements</i> , Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, NR 12/2015, 2015, pp. 43-48, DOI:10.15199/48.2015.12.09	100%	14
[C5] Somkun S., Moses A.J., Żurek S., Anderson P.I., <i>Development of an induction motor core model for measuring rotational magnetostriiction under PWM magnetisation</i> , Przegląd Elektrotechniczny, 1/2009, 2009, p. 103-107	25%	6
<i>Mój wkład polegał na zaprojektowaniu i wykonaniu systemu pomiarowego oraz jakościowej weryfikacji danych i wniosków przedstawionych w artykule.</i>		
[C6] Żurek S., <i>Static and dynamic rotational losses in non-oriented electrical steel</i> , Przegląd	100%	6

Elektrotechniczny, 1/2009, 2009, pp. 89-92		
[C7] Żurek S., Rygal R., Soński M., <i>Asymmetry of magnetic properties of conventional grain-oriented electrical steel with relation to 2D measurements</i> , Przegląd Elektrotechniczny, 1/2009, 2009, pp. 16-19	33%	6
<i>Mój wkład polegał na zaprojektowaniu eksperymentu, wykonaniu pomiarów, obróbce danych, wygenerowaniu rysunków i wykresów oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>		
[C8] Żurek S., Moses A.J., <i>Adaptive iterative digital feedback algorithm for measurements of magnetic properties under controlled magnetising conditions over a wide frequency range</i> , Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12/2005, 2005, pp. 5-8	50%	6
<i>Mój wkład polegał na stworzeniu adaptacyjnego algorytmu sprzężenia zwrotnego, wykonaniu pomiarów, wyciągnięciu wniosków oraz napisaniu pierwszej wersji artykułu.</i>		

Zgodnie Rozporządzeniem MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego:

- suma punktów MNiSW – 294,
- sumaryczny *Impact Factor* (§ 4. pkt. 3.) – 12,50,
- liczba cytowań według bazy Web of Science bez cytowań własnych (§ 4. pkt. 4.) – 189,
- indeks Hirscha według bazy Web of Science (§ 4. pkt. 5.) – 9,
- liczba publikacji według Web of Science – 15 z cyklu publikacji (sumarycznie 39).

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

c1) Wprowadzenie

Energia elektryczna przetwarzana jest przez maszyny elektryczne, takie jak generatory, transformatory i silniki elektryczne [1], a straty w ich obwodach magnetycznych odpowiadają za ok. 10% zużycia energii [2]. Wprowadzane są normy określające coraz to większą sprawność, przekraczającą nawet poziom 95% dla największych maszyn elektrycznych [3, 4].

Rdzenie magnetyczne maszyn pracujących przy częstotliwościach sieciowych wykonywane są zazwyczaj jako pakiety, w których przemagnesowanie zachodzi głównie w płaszczyźnie blach elektrotechnicznych. Dla maszyn wirujących, których obwody magnetyczne są wykonane z blach nieorientowanych występuje przemagnesowanie dwuwymiarowe (2D) z uwagi na występujące pola obrotowe, co powoduje zwiększone straty mocy w porównaniu do przemagnesowania jednowymiarowego (1D) [2].

W transformatorach, których rdzenie są pakietowane z blach orientowanych, występuje nie tylko przemagnesowanie 1D, ale również 2D [5, 6, 7]. Z uwagi na proces pakietowania z mniejszych fragmentów, strumień magnetyczny przenika również w kierunku prostopadłym do powierzchni blachy, powodując przemagnesowanie trójwymiarowe (3D) [5, 8]. W praktyce nie stosuje się jednak szczegółowych obliczeń zjawisk 3D, gdyż są one uważane za stosunkowo niewielkie i trudne do uwzględnienia. Ogół parametrów przemagnesowania uwzględnia się pośrednio np. poprzez współczynnik konstrukcyjny (iloraz stratności w rdzeniu, do stratności katalogowej blachy) [9]. Z tego też względu, w transformatorach zjawiska przemagnesowania 1D i 2D dominują z uwagi na aspekty praktyczne.

Projektowanie wysokosprawnych obwodów magnetycznych, zarówno wykonanych z blach nieorientowanych jak i orientowanych, wymaga odpowiednich matematycznych narzędzi inżynierskich. Są one tworzone w oparciu zarówno o fenomenologiczne modele analityczne (np. aproksymujące zachowanie materiału funkcjami) jak i numeryczne (np. metoda elementów skończonych). Modele oparte bezpośrednio o podstawowe prawa fizyki wykorzystywane są w ograniczonym stopniu, ponieważ z uwagi na złożoność zjawisk ferromagnetycznych niewiele z nich jest wystarczająco dokładnych w sensie absolutnym [10, 11].

Modelowanie charakterystyk materiałów magnetycznie miękkich jest przedmiotem szerokich badań w świecie. Stworzono wiele modeli z możliwościami aproksymacyjnymi i predykcijnymi, zarówno wartości strat mocy P i jak i trajektorii pętli $B-H$ [12-16], jednak większość z nich działa z satysfakcjonującą dokładnością tylko dla przemagnesowania osiowego (czyli 1D). Rozszerzenie działania tych modeli na charakterystyki 2D okazuje się wciąż zadaniem bardzo trudnym [17, 18], co

ogranicza ich zastosowanie tylko do wąsko wyspecjalizowanych zastosowań [19]. Niektóre modele wykazują dobrą zgodność ze zmierzonymi charakterystykami [14, 20, 21], niemniej jednak mogą one aproksymować tylko wartości konkretnych parametrów, ale nie trajektorie $B-H$, które dla przemagnesowania 2D mogą przyjmować bardzo skomplikowane kształty [6, 18].

Z kolei numeryczne modele takie jak metoda elementów skończonych (*finite element method, FEM*), wywodzą się ze zdyskretyzowanych równań Maxwella, ale opierając się o dane materiałowe uzyskane z pomiarów. Stosuje się przy tym cały szereg uproszczeń umożliwiających wykonanie obliczeń [22-24], używając m.in.: nieliniowej, ale bezhisterezowej zależności $B=f(H)$ w postaci tabeli odniesienia; klasycznych równań Maxwella linearyzowanych wokół punktu pracy; dodatkowych predykcyjnych modeli analitycznych takich jak model Bertottiego [23], lub model Jilesa-Athertona [24]; aproksymacji anizotropii przez użycie dwóch ortogonalnych krzywych $B-H$ (co nie uwzględnia najtrudniejszego kierunku magnesowania $\langle 111 \rangle$); homogenizacji własności rdzenia pakietowanego z uwagi na bardzo małą grubość powłoki izolacyjnej pomiędzy poszczególnymi blachami, itd. Żadne z tych uproszczeń nie odwzorowuje zachowania materiału w warunkach przemagnesowania obrotowego, lub szerzej 2D. Wszystkie modele (fizyczne, fenomenologiczne, analityczne, numeryczne) są weryfikowane poprzez porównanie wyników obliczeń z rzeczywistym zachowaniem materiału dla danych warunków przemagnesowania. Dlatego też, dostępność zmierzonych danych, ale i w równej mierze także dokładność pomiaru własności magnetycznych mają kluczowy wpływ na poprawność modeli obliczeniowych.

Z podstawowych względów pomiarów – ze zdefiniowaną absolutną dokładnością i powtarzalnością – w warunkach złożonego przemagnesowania 2D pozostają znacznie trudniejsze do wykonania, niż ma to miejsce dla pomiarów 1D. Stąd też obecnie proponowane nieliczne modele obliczeniowe (matematyczne) 2D są obciążone znacznie większymi wartościami błędów, gdyż bazują na niedokładnych danych pomiarowych. Wynika to z faktu, że bardzo wiele czynników, których obecność jest w praktyce nieistotna dla pomiarów 1D okazuje się wpływać w sposób krytyczny na wyniki pomiarów 2D, co zostało udowodnione w wielu szczegółowych pracach autora i podsumowane w obszernej monografii [A1].

c2) Własności materiałów w warunkach przemagnesowania 2D

Pomiary własności magnetycznych blach elektrotechnicznych (jak również innych materiałów magnetycznie miękkich) w warunkach przemagnesowania 1D (osiowego) są zdefiniowane przez normy międzynarodowe [25-27]. Wymaga się wówczas sinusoidalnego przebiegu polaryzacji magnetycznej J (lub indukcji B), niezależnie od amplitudy wymuszenia.

Początkowo aparat Epsteina wymagał próbek o wadze sięgającej 20 kg i ramy pomiarowej o boku 50 cm. Okazywało się to kłopotliwe oraz kosztowne w praktyce, więc na przestrzeni lat poprzez ciągle udoskonalenia metody pomiarowej doprowadzono do zmniejszenia rozmiarów ramy do 25 cm oraz masy próbki do ok. 0,24 kg [25]. Zachowano przy tym dokładność pomiaru stratności rzędu 1,5%, ale tylko do amplitudy 1,7 T dla blach orientowanych lub do 1,5 T dla blach nieorientowanych. Ustalono też, że szereg czynników wpływa na dokładność tego pomiaru co przedstawiono np. w pracach [28-32].

Z kolei metoda pojedynczego arkusza blachy [26] jest również ciągle doskonalona, ale pozostaje w dalszym ciągu mniej popularna, a do badań anizotropii wymaga wycinania kosztownych próbek pod różnymi kątami, podobnie jak dla aparatu Epsteina. Natomiast próbka toroidalna w praktyce nie pozwala na pomiary pod kątami różnymi od kierunku walcowania. Brak jest zatem łatwych w użyciu znormalizowanych metod badania anizotropii blach elektrotechnicznych, szczególnie z uwzględnieniem wymagań praktycznych i przemysłowych.

W ramach analogii do znormalizowanych pomiarów 1D, dla pól wirujących przyjmuje się nominalny kształt hodografu B jako kołowy (czyli składający się z sinusoidy i cosinusoidy, podczas gdy kształt dla wymuszenia 1D jest sinusoidą). Pod pojęciem przemagnesowania 2D rozumie się dowolne przemagnesowanie, które jest wymuszane w płaszczyźnie blachy. Z ważniejszych wyróżnia się przemagnesowanie obrotowe, którego szczególnym przypadkiem jest przemagnesowanie eliptyczne o różnych stopniach eliptyczności (w tym kołowe). Można zatem uzyskać w jarzmie do pomiarów dwuwymiarowych 2D (Rys. 1b,c) przemagnesowanie osiowe 1D pod określonym dowolnym kątem – co stwarza nowe możliwości pomiarów własności magnetycznych blach elektrotechnicznych.

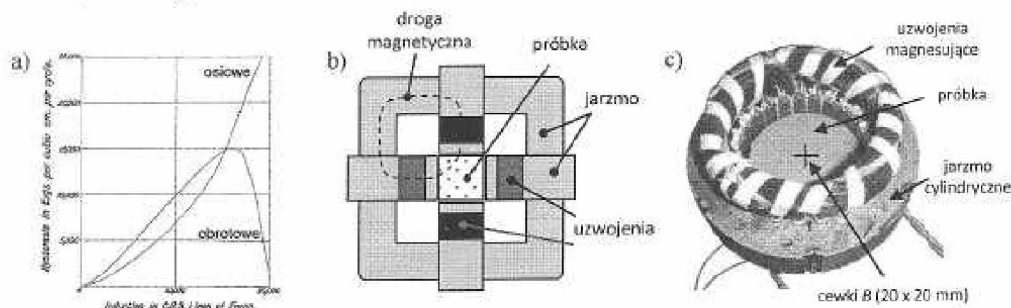
Podczas wymuszenia obrotowego (Rys. 2a, s. 9) występują straty energii, których wartość początkowo rośnie, ale następnie maleje wraz ze wzrostem amplitudy wymuszenia, co zostało udowodnione eksperymentalnie w 1897 r. przez Bailly'ego [33]. Zjawisko to związane jest z zanikiem ścianek domenowych i tym samym zmniejszaniem się strat histerezy w warunkach nasycenia magnetycznego materiału (Rys. 1a). Zmiana stratności zachodząca w sposób przedstawiony na tym rysunku jest zasadniczym powodem, dla których większość modeli analitycznych i numerycznych stworzonych w oparciu o zasady fizyki powstawania strat w warunkach 1D nie może poprawnie odwzorować tego procesu podczas przemagnesowania obrotowego.

Znane są trzy główne metody pomiarowe strat w warunkach przemagnesowania obrotowego: anizometryczna, termometryczna i pomiaru pól. W metodzie anizometrycznej występują trudności kalibracyjne (np. eliminacja wpływu tarcia mechanicznego) oraz problemy z kontrolą kształtu przebiegu wymuszenia [A1, s. 49-64]. Natomiast metoda termometryczna jest bardzo czasochłonna, wymaga badań próbki umieszczonej np. w próżni celem obniżenia wymiany ciepła z otoczeniem [28], a przede wszystkim nie posiada wystarczającej dokładności przy pomiarach małych strat, czyli w warunkach mniejszych częstotliwości i/lub małych amplitud przemagnesowania.

Najczęściej stosowana jest zatem metoda bezpośredniego pomiaru pól magnetycznych i polega ona na pomiarze kierunkowych składowych indukcji B oraz natężenia pola H i obliczeniu z nich stratności mocy P przy przemagnesowaniu 2D (obrotowym lub innym) na podstawie równania (1). Jeśli przy przemagnesowaniu występuje tylko jeden kierunek (np. x), to wzór upraszcza się do równania stratności mocy przy przemagnesowaniu 1D.

$$(1) \quad P = \frac{f}{D} \cdot \int_0^T \left(H_x(t) \cdot \frac{dB_y(t)}{dt} + H_y(t) \cdot \frac{dB_x(t)}{dt} \right) dt, \quad (\text{W/kg})$$

gdzie: f – częstotliwość (Hz), D – gęstość próbki (kg/m^3), $T = 1/f$ (s), H – natężenie pola magnetycznego (A/m), B – indukcja magnetyczna (T), x, y – indeksy oznaczające dwa ortogonalne kierunki, t – czas (s).



Rys. 1. Pomiary stratności przy przemagnesowaniu obrotowym: a) wyniki opublikowane po raz pierwszy przez Bailly'ego w 1897 r. [33], b) jarzmo do pomiarów przy przemagnesowaniu 2D na próbce kwadratowej 100×100 mm z obszarem pomiarowym 20×20 mm [A1, s. 252], c) jarzmo cylindryczne do pomiarów przy przemagnesowaniu 2D na próbce w kształcie dysku o średnicy 80 mm z obszarem pomiarowym 20×20 mm stosowane przez autora [A1, s. 456]

Metoda pomiaru pól jest najbardziej uniwersalna, co skutkuje największymi możliwościami zastosowań praktycznych. Przygotowanie próbki jest stosunkowo proste (Rys. 1b,c), a pomiar polega na mierzeniu sygnałów z czujników B i H , oraz ich dalszym przetworzeniu cyfrowym [A1] (zagadnienia związane z czujnikami opisano szerzej w pkt. c5.2). W latach 90-tych ubiegłego wieku kilka wiodących międzynarodowych laboratoriów badawczych z Francji, Niemiec, Włoch i Wielkiej Brytanii, podjęło próbę normalizacji pomiaru stratności mocy w warunkach kontrolowanego przemagnesowania obrotowego (kołowy hodograf B) poprzez porównanie dokładności pomiarów wykonanych metodą pomiaru pól [34]. Niestety porównanie wyników wykazało rozbieżności zmierzonych stratności rzędu kilkudziesięciu procent. Należy podkreślić również, że dane eksperymentalne, które uzyskano z tych badań obarczone były nie tylko dużymi błędami pomiarowymi, ale również i budżety niepewności pomiarowej oszacowane przez różne laboratoria

57

różniły się znacznie, z nieznanymi wówczas przyczyn. Nawet największe laboratoria zajmujące się pomiarami 1D wskazywały na niezwykle duży poziom trudności podczas realizacji pomiarów 2D [34]. Zarzucono wówczas w latach 90-tych próbę opracowania normy pomiarów własności magnetycznych przy przemagnesowaniu obrotowym (2D), ale prace nad udoskonaleniem tej metody prowadzone są nadal.

Jednym z ograniczeń okazała się maksymalna amplituda kontrolowanego kołowego kształtu hodografu B jaką można było uzyskać w pomiarach – ok. 1,2 T dla orientowanej i 1,5 T dla nieorientowanej blachy elektrotechnicznej. Ograniczenie to wynikało z użytego typu jarzma o wyraźnych biegunach magnetycznych, długiej drodze magnetycznej i dużym strumieniu rozproszenia, oraz próbek kwadratowych o boku od 60 do 100 mm, dla których obszar jednorodnego rozkładu pola magnetycznego ograniczony był do wymiarów geometrycznych tylko ok. 20 x 20 mm (Rys. 1b). Amplitudy do 1,5 T były nie tylko niewystarczające do zademonstrowania charakterystycznego zjawiska zmniejszania się strat mocy z amplitudą (Rys. 1a), ale przede wszystkim dużo mniejsze niż amplitudy wymuszenia na jakie są zaprojektowane obwody magnetyczne współczesnych maszyn elektrycznych. W dalszym ciągu zachodziła więc niedostępność danych eksperymentalnych, które mogłyby być użyte w projektowaniu rdzeni magnetycznych i do weryfikacji modeli matematycznych. Dopiero późniejsze prace w literaturze tematu [35-37, B7, C6] wykazały niezbicie, że jarzma cylindryczne, zbliżone kształtem do stojana silnika indukcyjnego, o krótkiej drodze magnetycznej pozwalają na uzyskanie większych amplitud wymuszenia, jak i większej jednorodności przemagnesowania w próbce o podobnych rozmiarach, ale o kształcie dysku o średnicy do 100 mm (Rys. 1c) [35, B7]. Dlatego też, uzasadnionym było prowadzenie dalszych badań przy użyciu jarzm cylindrycznych (Rys. 1c) w kierunku zwiększenia wymiarów geometrycznych obszaru jednorodności rozkładu pola magnetycznego w próbce z ok. 20 x 20 mm na 120 x 120 mm (pkt. c5.3).

W szczególności, cykl publikacji Wnioskodawcy podsumowany w monografii [A1] wykazuje, że wiele niepewności pomiarowych można albo skutecznie ograniczać poprzez bardziej precyzyjne wykonanie aparatu pomiarowego, albo wykonać oszacowanie ilościowe, umożliwiające znacznie pełniejsze zdefiniowanie budżetu niepewności pomiarowej [B1-B3, B8, B9, B11, C1, C2, C4, C7]. W konsekwencji opracowano metodologię pomiarów 2D prezentowaną w [A1, s. 377-384].

c3) Cel i zakres przedstawianych prac

Celem przedstawionego do oceny powiązanego tematycznie cyklu publikacji jest charakterystyka blach elektrotechnicznych poprzez wykorzystanie udoskalonej metody pomiarów własności magnetycznych w warunkach przemagnesowania jedno- i dwuwymiarowego (do poziomu dokładności zbliżonego do stosowanych obecnie metod dotyczących znormalizowanych pomiarów własności magnetycznych blach elektrotechnicznych).

Zakresem prac objęto przedstawienie własności blach elektrotechnicznych w warunkach przemagnesowania 1D i 2D oraz rozwiązania pomiarowe związane z niepewnością pomiarową poszczególnych komponentów metody bezpośredniego pomiaru pól magnetycznych. Prace [A1, B1-B11, C1-C8] prezentowane w niniejszym wniosku obejmują następujące cele poznawcze:

Charakterystyki materiałowe – wygenerowanie danych materiałowych i udostępnienie ich w literaturze tematu:

- charakterystyki blach elektrotechnicznych w warunkach przemagnesowania obrotowego 2D, z kształtowaniem kołowego hodografu B lub H , ze szczególnym uwzględnieniem kontrolowanych dużych amplitud wymuszenia,
- charakterystyki blach elektrotechnicznych w innych wybranych warunkach przemagnesowania 2D (np. 1D wykonanych pod dowolnym kątem w jarzmie 2D),
- analiza globalnych i lokalnych charakterystyk blach elektrotechnicznych różnych gatunków ze szczególnym uwzględnieniem własności 1D i 2D oraz anizotropii magnetycznej badanych materiałów.

Określenie charakterystyk materiałowych pozwoli na odwołanie się w dalszych pracach do zaprezentowanych wyników pomiarowych oraz ich jakościową i ilościową analizę pod względem posiadanych własności materiałowych, jak również przedstawienie dokładności rozwiniętych technik pomiarowych.

57

Techniki pomiarowe – udoskonalenie i ograniczenie błędów pomiarowych:

- udoskonalenie technik pomiarowych przy przemagnesowaniu 2D z kontrolą kształtu przebiegów,
- analizę niepewności pomiarowych czujników B i H ,
- propozycja aparatu do pomiarów własności magnetycznych w kontrolowanych warunkach przemagnesowania 1D i 2D.

Udoskonalenie technik pomiarowych pozwoli na wskazanie najbardziej istotnych komponentów aparatu pomiarowego, co dotyczy w głównej mierze: jarzma magnesującego, jednorodności wymuszenia, czujników B i H oraz cyfrowego sprzężenia zwrotnego. Uwzględnienie przedstawionych udoskonaleń metody pozwoli na pomiary własności magnetycznych w warunkach przemagnesowania jedno- i dwuwymiarowego na pojedynczej próbce dyskowej blachy elektrotechnicznej i uzyskanie istotnie większej dokładności pomiaru, w odniesieniu do dotychczas stosowanych technik pomiarowych przy przemagnesowaniu dwuwymiarowym.

c4) Charakterystyki materiałowe

c4.1) Charakterystyki blach elektrotechnicznych w warunkach przemagnesowania obrotowego, z kształtowaniem kołowego hodografu B lub H , ze szczególnym uwzględnieniem kontrolowanych dużych amplitud wymuszenia

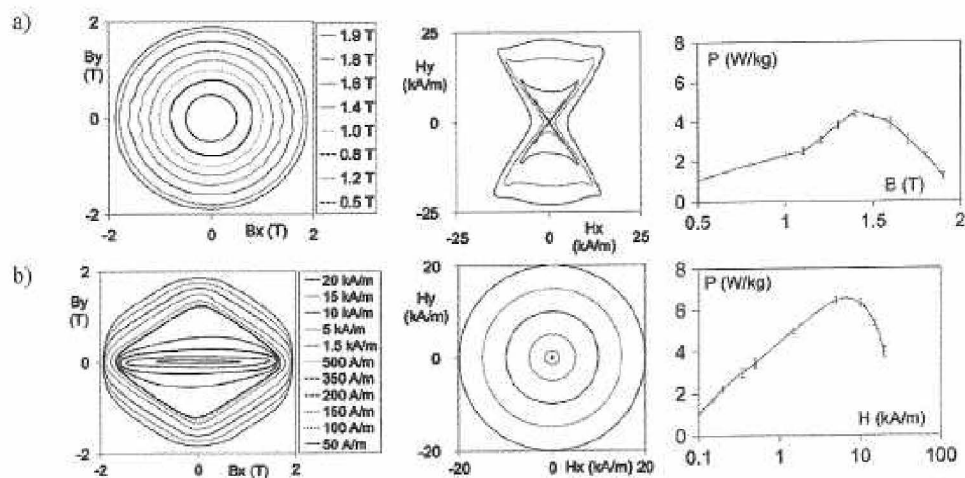
W pracach [A1, B4, B7, C3] opublikowano wyniki uzyskane za pomocą systemów pomiarowych zaprojektowanych, skonstruowanych i zaprogramowanych przez Wnioskodawcę w środowisku LabVIEW podczas pobytu w Wolfson Centre for Magnetism (School of Engineering, Cardiff University, Cardiff, Wielka Brytania). Przykłady kształtowanych hodografów kołowych dla B i H oraz odpowiadających im krzywych stratności mocy dla konwencjonalnej orientowanej blachy elektrotechnicznej M140-27 z zawartością 3% Si przedstawiono na Rys. 2. W pracy [B4] opublikowano także wyniki dla innych blach: nieorientowanej M400-50A, orientowanej o dużej przenikalności M103-27P oraz testowej podwójnie orientowanej.

Dane prezentowane po raz pierwszy w literaturze tematu w pracy [B7] obejmują bezpośrednie porównanie pomiędzy hodografami uzyskanymi dla kształtowanego kołowego B i kołowego H dla tego samego materiału oraz dużych amplitud wymuszenia (powyżej 1,5 T). Hodografy (zarówno B jak i H) wykazują wpływ dużej anizotropii blachy orientowanej, z wyraźnie zaakcentowanymi kierunkami: $\langle 100 \rangle$ (tj. 0° – zgodny z kierunkiem walcowania, pozioma oś hodografów), $\langle 111 \rangle$ pod kątem 55° oraz $\langle 110 \rangle$ pod kątem 90° . Zaprezentowane charakterystyki stratności mocy przy przemagnesowaniu obrotowym zostały obliczone za pomocą równania (1) na podstawie składowych B i H . Stratności (Rys. 2, z prawej) po osiągnięciu maksimum zmniejszają się znacząco przy zbliżaniu się do nasycenia próbki, co potwierdza ogólne zachowanie materiału przy przemagnesowaniu obrotowym (Rys. 1a).

Na uwagę zasługuje fakt, że stratności zmierzone przy kołowym hodografie H (Rys. 2b) osiągają wartości maksymalne znacznie większe niż dla kołowego hodografu B (Rys. 2a). Blacha M140-27 w warunkach przemagnesowania osiowego (1D) posiada stratność katalogową $0,83 \text{ W/kg}$ przy $1,5 \text{ T}$ [38], ale jej maksimum stratności przy przemagnesowaniu obrotowym przekracza 4 W/kg (Rys. 2a), co stanowi ok. 5-krotność stratności osiowych. W trójkolumnowych rdzeniach transformatorów warunki przemagnesowania obrotowego na styku środkowej kolumny i jarzma są bardziej zbliżone do wymuszenia kołowego H , niż kołowego B [5]. Przy takich warunkach wartości maksymalne stratności osiągają $6,5 \text{ W/kg}$ – są więc ok. 8-krotnie większe niż przy przemagnesowaniu osiowym (Rys. 2b).

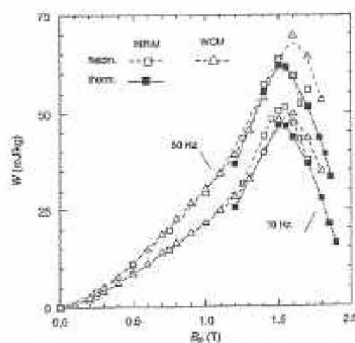
Omawiane zjawisko należy uwzględnić przy projektowaniu obwodów magnetycznych z pakietowanych blach orientowanych. Lokalne straty większe o prawie rząd wielkości mogą prowadzić do lokalnego przyspieszonego procesu starzenia blach elektrotechnicznych lub nawet do ich przegrzania. Przy projektowaniu obwodów magnetycznych transformatorów takie charakterystyki nie były dotychczas brane pod uwagę ponieważ brak było odpowiednich danych, które mogłyby zostać odwzorowane w narzędziach inżynierskich. Niemniej jednak, adekwatne rzeczywiste dane materiałowe powinny zostać uwzględnione w nowoczesnych narzędziach obliczeniowych, a zostały one upowszechnione w pracach [A1, B4, B7, C3]. Rozrzut uzyskanej powtarzalności pomiaru jest zilustrowany słupkami błędów na wykresach stratności na Rys. 2 (wykresy po prawej), a zagadnienie dokładności pomiaru omówiono w pkt. c5.2.

57



Rys. 2. Hodografy B i H wykreślone w układzie współrzędnych x - y oraz charakterystyki $P = f(B)$ i $P = f(H)$ dla konwencjonalnej orientowanej blachy elektrotechnicznej M140-27 przy przemagnesowaniu obrotowym w warunkach kształtowanych przebiegów przy 50 Hz: a) przy kołowym B z amplitudą do 1,9 T, b) przy kołowym H z amplitudą do 20 kA/m; na lewo – hodografy B , w środku – hodografy H , z prawej – stratności mocy [B7]

Dane eksperymentalne uzyskane z systemu pomiarowego w Wolfson Centre for Magnetism (WCM) wykorzystującego metodę pomiaru pól zostały porównane z wynikami uzyskanymi w laboratorium INRiM (*Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica*) w Turynie i zaprezentowane w pracy [B5] (Rys. 3). Rezultaty uzyskane dla testowej blachy nieorientowanej o grubości 0,345 mm i 3,2% zawartości krzemu wykazują zgodność danych pomiędzy dwoma laboratoriami, nie tylko dla metody pomiaru pól, ale również metody termometrycznej. Porównanie to daje pewność, że inne wyniki pomiarów (np. z Rys. 2) uzyskane w Wolfson Centre for Magnetism są poprawne – co najmniej, co do rzędu wielkości oraz, że wnioski wyciągnięte w przytoczonych powyżej pracach [B7, C3] (jak również i w tych zaprezentowanych poniżej) są w pełni zasadne.

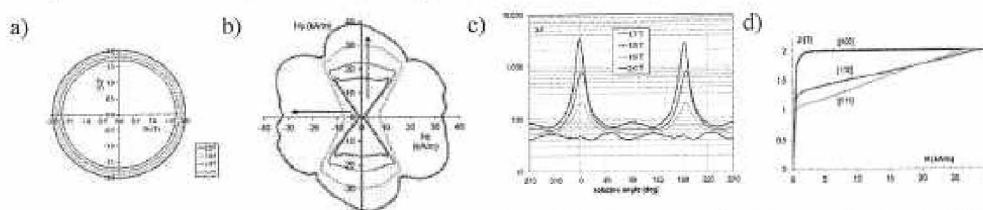


Rys. 3. Porównanie wyników stratności energii przy przemagnesowaniu obrotowym z WCM (Wolfson Centre for Magnetism) i INRiM (*Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica*) wykonanych metodą pomiaru pól i termometryczną dla testowej blachy nieorientowanej [B5]

W pracy [C3] Wnioskodawca zaprezentował wyniki pomiarów dla kształtowanego kołowego hodografu B dla konwencjonalnej orientowanej blachy elektrotechnicznej M140-27 dla amplitudy dochodzącej do 2,0 T. Dane eksperymentalne wykazują zjawisko "puchnięcia" hodografu H (strzałki na Rys. 4b) dla coraz większych amplitud kołowego wymuszenia B (Rys. 4a).

Z analizy zewnętrznej pętli hodografu na Rys. 4b wynika, że H w kierunku uprzywilejowanym $\langle 100 \rangle$ (zgodnym z osią poziomą, 0°) dla blachy M140-27 osiąga wartości porównywalne nie tylko z trudnym kierunkiem magnesowania $\langle 110 \rangle$ (90°), ale nawet z kierunkiem

najtrudniejszym $\langle 111 \rangle$ (55°) – co w ujęciu jakościowym jest zgodne z wynikami pomiarów przy wymuszeniu osiowym (dla H rzędu 25 kA/m, Rys. 4d [10]). Z danych tych wynika, że dla bardzo dużych amplitud wymuszenia ($H > 30$ kA/m), wartości B są podobne we wszystkich kierunkach, czyli następuje zanik zjawiska anizotropii przenikalności (Rys. 4c). Dla stosunkowo wąskiego zakresu wartości H (ok. 20–30 kA/m) przenikalność w kierunku $\langle 111 \rangle$ jest większa niż dla kierunku $\langle 110 \rangle$ (Rys. 4d, [10]). Potwierdzają to wyniki pomiarów prezentowane na Rys. 4b, w których wartości hodografu H blachy M140-27 dla kierunku $\langle 111 \rangle$ (55°) są mniejsze (ok. 30 kA/m), niż dla kierunku $\langle 110 \rangle$ (90°), gdzie osiągają 40 kA/m. Wartości względnej przenikalności amplitudowej przy przemagnesowaniu obrotowym pokazane na Rys. 4c są obliczone, podobnie jak przy przemagnesowaniu osiowym, czyli jako stosunek amplitudy B do amplitudy H , w odniesieniu do danej wartości chwilowej wektora B , którego wirowanie jest wymuszone ze stałą prędkością.

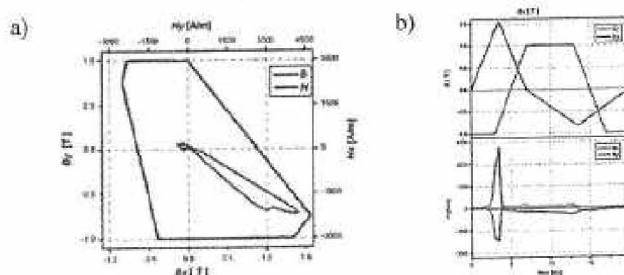


Rys. 4. Zmiany anizotropii magnetycznej przy dużych amplitudach wymuszenia kołowego blachy M140-27 [C3]: a) kołowy hodograf B dla indukcji do 2,0 T, b) hodograf H spowodowany kołowym wymuszeniem B , c) zanikająca anizotropia przenikalności amplitudowej, d) dane literaturowe charakterystyk monokryształu Fe-Si opracowane na podstawie [10] przy przemagnesowaniu osiowym (1D)

Dane zaprezentowane w [C3] pozwalają na sformułowanie wniosku, że pomiary na próbce w kształcie dysku w aparacie do pomiarów 2D (Rys. 1c) pozwalają na uzyskanie ekwiwalentnych wyników pomiarów jak dla próbek wycinanych pod odpowiednimi kątami. Stwarza to możliwość eliminacji kosztownego wycinania próbek i wykonanie pomiarów magnetycznych własności kierunkowych w sposób znacznie mniej pracochłonny i kosztowny – co jest szczególnie istotne w zastosowaniach przemysłowych [39]. Pomiary takie wymagają jednak odpowiedniej aparatury pomiarowej [A1].

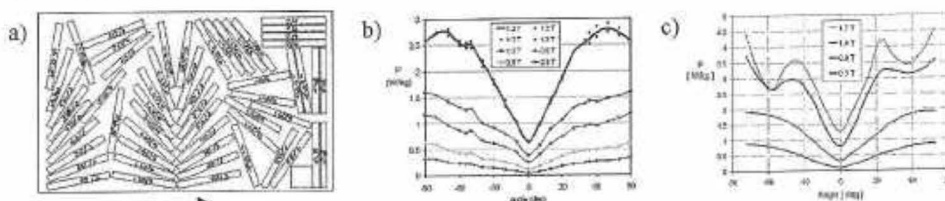
c4.2) Charakterystyki blach elektrotechnicznych w innych wybranych warunkach przemagnesowania 2D

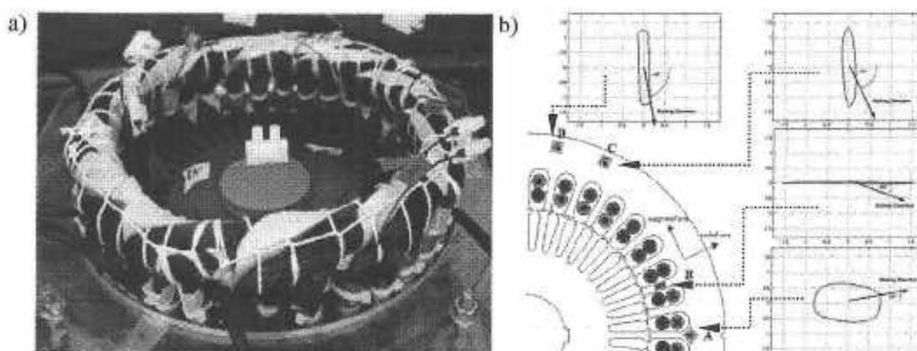
We wspomnianych powyżej pracach [B7, C3] skupiono się na hodografach kołowych. Możliwe jest również wykonanie przemagnesowania nawet w dowolnie zadanych, złożonych warunkach dwuwymiarowych (Rys. 5), tak jak to zaprezentowano w pracy [B11]. Tego typu pomiary nie są możliwe do uzyskania znormalizowanymi metodami [25–27], natomiast umożliwia je aparat do pomiarów w warunkach przemagnesowania dwuwymiarowego (Rys. 1c), a tym samym można w tym aparacie uzyskać odwzorowanie rzeczywistych warunków przemagnesowania w obwodach magnetycznych maszyn elektrycznych. Zagadnienie jest szczególnie istotne w przypadku obwodów magnetycznych maszyn wirujących, gdzie występuje przemagnesowania obrotowe o stopniu eliptyczności zależnym od lokalizacji w obwodzie.



Rys. 5. Pomiary przy 50 Hz dla nieorientowanej blachy M400-50A [B11]: a) złożony kształt hodografu B , b) symetryczny trapezoidalny przebieg B_x oraz niesymetryczny trójkątny B_y i odpowiadające im przebiegi H_x i H_y

W literaturze przedmiotu dostępne są wynikające z anizotropii charakterystyki kierunkowe blach elektrotechnicznych przy przemagnesowaniu osiowym, najczęściej dla wybranych kierunków 0° , 55° , 90° lub dla arbitralnego kąta z przedziału $0-90^\circ$ [40, 41]. W pracy [35] stwierdzono występowanie dużej asymetrii anizotropii stratności mocy materiałów badanych z wykorzystaniem jarzma do pomiarów dwuwymiarowych na próbce w kształcie dysku, co poddano krytycznej analizie w pracy [C7]. Tak więc, w pracy [C7] zaprezentowano weryfikację zjawiska pozornej asymetrii anizotropii stratności wskazanej w pracy [35] wykonując pomiary w nieznormalizowanym aparacie do pomiarów na pojedynczym pasku blachy, dla próbek o wymiarach 30×300 mm wyciętych pod różnymi kątami od -90° do $+90^\circ$ (co 10°). Pomiary przy przemagnesowaniu osiowym wykazały bardzo niewielką asymetrię przy 50 Hz (Rys. 6b) i praktycznie brak asymetrii przy 400 Hz [C7]. Natomiast wykonanie własnych pomiarów odwzorowujących przemagnesowanie osiowe przy pomocy jarzma dwuwymiarowego z Rys. 1c, potwierdziło występowanie pozornej asymetrii stratności (Rys. 6c, inny gatunek blachy), podobnie jak w [35].





Rys. 7. Ilustracja eksperymentu [C5]: a) analizowany obwód magnetyczny silnika, b) lokalizacje rozmieszczenia czujników oraz odpowiadające im hodografy B o różnych kształtach i stopniu eliptyczności zmierzone w czterech miejscach blachy stojana

Zakładając dalszy rozwój metody pomiarowej z jarzmem jak na Rys. 1c z możliwościami pomiarowymi jak na Rys. 5, wykonać można odwzorowanie rzeczywistych kształtów przemagnesowań blach elektrotechnicznych stosowanych w maszynach wirujących i transformatorach. Realnym staje się zatem możliwość zarówno podjęcia prac znormalizowania metody badawczej jak i zastąpienia badań 1D na próbkach paskowych wycinanych pod różnymi kątami. Niezależnie od aspektów metrologicznych, uzyskanie bardziej kompletnych danych pomiarowych w warunkach przemagnesowania 2D pozwala na dalsze doskonalenie modeli i algorytmów obliczeniowych.

Komponenty P_x i P_y strątności obrotowej

W pracy [B4] zaprezentowano wyniki pomiarów w warunkach przemagnesowania obrotowego (kołowe B i kołowe H) dla czterech rodzajów blach elektrotechnicznych: nieorientowanej M400-50A, orientowanej konwencjonalnej M140-27, orientowanej o podwyższonej przenikalności M103-27P, oraz testowej podwójnie orientowanej (o dwóch "łatwych" kierunkach magnesowania $\langle 100 \rangle$ i $\langle 010 \rangle$ w płaszczyźnie blachy).

Warunki przemagnesowania obrotowego mogą być wymuszone jako obracające się zgodnie (clockwise, CW) albo też przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (anticlockwise, ACW). Przyjęto, że wartości strątności mocy P_{rot} przy przemagnesowaniu obrotowym należy uśrednić z obu kierunków obrotu [6, 34, 35]:

$$(2) \quad P_{rot} = \frac{P_{rot,CW} + P_{rot,ACW}}{2}, \quad (\text{W/kg})$$

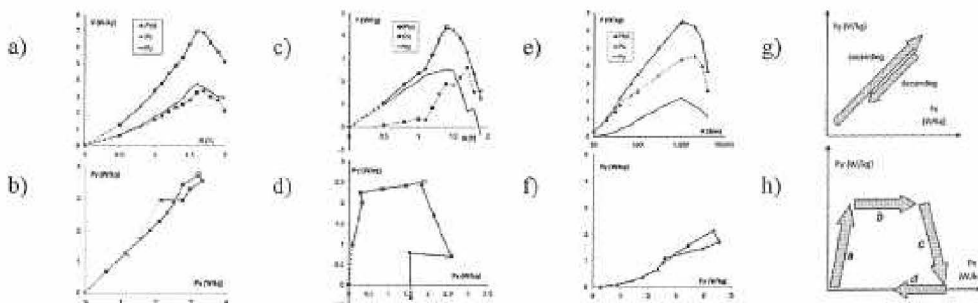
W równaniu (1) strątność P jest obliczana ze składowych ortogonalnych: B_x , B_y , H_x , H_y . Można zatem dokonać matematycznego rozdziału tej strątności na odpowiadające jej wartości ortogonalne P_x i P_y . Jednak z uwagi na problemy wynikające z asymetrii działania czujników H [C8] można posłużyć się uśrednionymi wartościami ortogonalnymi, wykorzystując do tego oba kierunki wirowania pola [B4]:

$$(3) \quad P_{rot} = P_x + P_y, \text{ gdzie } P_x = \frac{P_{x,CW} + P_{x,ACW}}{2} \text{ oraz } P_y = \frac{P_{y,CW} + P_{y,ACW}}{2}, \quad (\text{W/kg})$$

Na Rys. 8 [B4] zaprezentowano kilka typowych charakterystyk ilustrujących własności blach elektrotechnicznych o małym (Rys. 8a) oraz dużym stopniu anizotropii (Rys. 8b,c). Z analizy tych danych wynika, że dla blach o małym stopniu anizotropii (Rys. 8a) obie składowe P_x i P_y mają podobne wartości w całym zakresie amplitud zarówno dla kołowego hodografu B , jak i kołowego H . Tak więc obraz geometryczny punktów o współrzędnych (P_x, P_y) rośnie do pewnej wartości, a następnie maleje tak jak to przedstawiono na Rys. 8b. Charakter tych zmian zilustrowano poglądowo na Rys. 8g i zachodzi on także dla blach o dużym stopniu anizotropii przy przemagnesowaniu w warunkach kołowego hodografu H (Rys. 8f wynikający z Rys. 8e).

52

Stwierdzono także odmienny charakter geometrycznego obrazu punktów o współrzędnych (P_x, P_y) w kształcie pętli, jak na Rys. 8h. Takie zmiany stwierdzono dla blach anizotropowych przy przemagnesowaniu w warunkach kołowego hodografu B (Rys. 8d wynikający z Rys. 8c).



Rys. 8. Komponenty P_x i P_y stratności mocy blach elektrotechnicznych oraz odpowiadające im charakterystyki $P = f(B)$, $P = f(H)$ przy 50 Hz [B4] (obliczone na podstawie danych m.in. z Rys. 9 dla blachy orientowanej): a) nieorientowana blacha M400-50A przy kołowym B jako $P = f(B)$, b) obraz geometryczny punktów o współrzędnych (P_x, P_y) wynikający z Rys. 8a, c) orientowana blacha M140-27 przy kołowym B jako $P = f(B)$, d) obraz geometryczny punktów o współrzędnych (P_x, P_y) wynikający z Rys. 8c, e) orientowana blacha M140-27 przy kołowym H jako $P = f(H)$, f) obraz geometryczny punktów o współrzędnych (P_x, P_y) wynikający z Rys. 8e, g) charakter zmian w kształcie nachylonego „J”, h) charakter zmian w kształcie pętli „O”

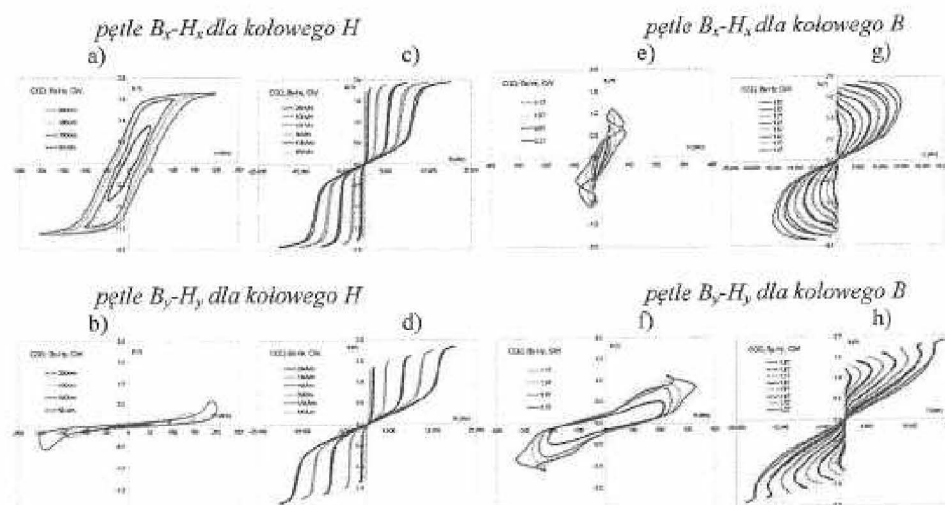
Uogólniając, zauważyć należy, że przemagnesowanie obrotowe blach nieorientowanych według kołowego B lub H zachodzi z charakterystyką stratności w kształcie nachylonego „J” (Rys. 8g). Konieczność wyróżnienia pętli „O” (Rys. 8h) wynika z różnych zachowań przemagnesowania obrotowego blach o dużych własnościach anizotropowych. Dla przypadku próbki blachy orientowanej zilustrowano to na Rys. 8c,d dla kołowego B oraz Rys. 8e,f dla kołowego H .

Na Rys. 8h (porównaj z Rys. 8d) w obszarze „a” obserwuje się wzrost spowodowany proporcjonalnymi zmianami zarówno składowej P_x jak i P_y . W obszarze „b” wzrost P_y spowalnia, natomiast P_x wzrasta dużo szybciej z amplitudą wymuszenia, co w rezultacie powoduje, że całkowita stratność mocy P dalej ulega wzrostowi. Punktem rozgraniczającym obszary „b” i „c” jest maksymalna wartość charakterystyki $P = f(B)$, a po jego przekroczeniu w obszarze „c” wartości P_y zaczynają gwałtownie maleć, podczas gdy P_x dalej rośnie. W ostatniej części „d” obie składowe P_x i P_y maleją. Zjawisko to ma doniosłe znaczenie, gdyż w przypadku blach elektrotechnicznych wykorzystywanych w transformatorach w warunkach kołowego H [5] (Rys. 8e,f), przy amplitudach powyżej 1,5 T, za generowanie *większości* strat odpowiada komponent stratności P_x i to w skali wielokrotnie przekraczającej wartości katalogowe producenta. Dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania straty są ok. dwukrotnie *mniej* od kierunku walcowania. Potwierdza to konieczność uwzględnienia tego faktu w modelach obliczeniowych maszyn elektrycznych.

Pętla B-H przy przemagnesowaniu obrotowym

W pracy [B4] przedstawiono również komplet charakterystyk ortogonalnych pętli B - H dla wszystkich zmierzonych typów blach. Na Rys. 9 zaprezentowano tylko przykład dla konwencjonalnej blachy orientowanej typu M140-27. Pętla B - H dla przemagnesowania obrotowego mają odmienny kształt od tych uzyskanych dla przemagnesowania osiowego. Potwierdza to, iż modele matematyczne skonstruowane w oparciu o fenomenologię zjawisk przy wymuszeniu osiowym nie mogą odzwierciedlać złożonego zachowania materiałów w warunkach przemagnesowania obrotowego.

Dla małych pól magnetycznych pętla B_x - H_x materiału przemagnesowywanego z kołowym H charakteryzują się zbliżonym kształtem do pętli B - H występujących przy przemagnesowaniu osiowym (Rys. 9a). Komponent stratności P_x wyliczony dla kierunku walcowania przy małych amplitudach jest *większy* od komponentu P_y wyliczonego dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania (Rys. 8b). Stratności mocy obrazowane przez powierzchnie pętli B - H potwierdzają, poprzednią uwagę dotyczącą faktu, że przemagnesowanie obrotowe przy kołowym H w kierunku walcowania jest *trudniejsze* niż w kierunku prostopadłym do niego.

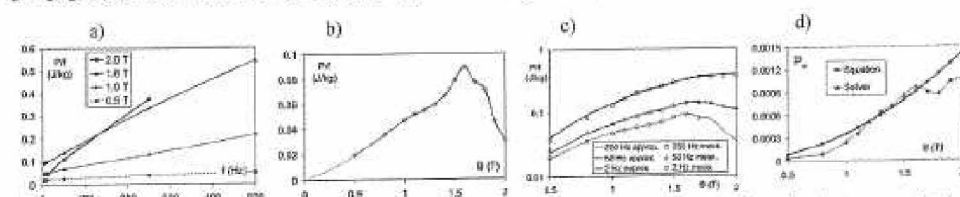


Rys. 9. Pętle $B-H$ dla przemagnesowania kołowego H (a-d) i kołowego B (e-h) konwencjonalnej blachy orientowanej M140-27 [B9]: a) i b) 50 A/m < H < 200 A/m, c) i d) 500 A/m < H < 20 kA/m, e) i f) 0,5 T < B < 1,1 T, g) i h) 1,3 T < B < 1,9 T

W podsumowaniu do danych przedstawionych w pracy [B4] należy stwierdzić, że uzyskane wyniki (Rys. 8, Rys. 9) potwierdzają konieczność uwzględniania danych eksperymentalnych uzyskanych w warunkach przemagnesowania 2D w dalszych pracach analitycznych.

Predykcja stratności mocy 2D w oparciu o model statystyczny

W pracy [C6] zaprezentowano wyniki rozdziału strat mocy z wykorzystaniem modelu statystycznego [14], ale rozszerzonego na przemagnesowanie obrotowe dla blachy nieorientowanej M400-50A. Wartość stratności histerezy oszacowano poprzez ekstrapolację do hipotetycznej zerowej częstotliwości, co wynika z istnienia granicznej minimalnej częstotliwości, poniżej której można uznać że zjawiska dynamiczne zanikają (warunki quasi-statyczne) [42]. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że dla przemagnesowania kołowego B przy mniejszych częstotliwościach i większych amplitudach rzędu 2 T następuje spadek całkowitej stratności obrotowej, wyraźnie poniżej wartości uzyskanych dla mniejszych amplitud rzędu 1,6 T (Rys. 10a, poniżej 150 Hz). Dane te w pełni potwierdzają poprzednie wyniki [B4, B7, C3], w których wykazano zmniejszanie się stratności przy zbliżaniu się do nasycenia (Rys. 10b w warunkach przemagnesowania quasi-statycznego). Dla wyższych częstotliwości straty wirowoprądowe i dodatkowe dominują, co również potwierdza dane z [B7], gdzie maksimum nie występuje przy 250 Hz (Rys. 10c).



Rys. 10. Rozdział stratności mocy przy przemagnesowaniu obrotowym dla nieorientowanej blachy elektrotechnicznej M400-50A [C6]: a) charakterystyka $P/f = f(H)$ dla kilku wartości amplitud, b) wydzielone straty histerezy, c) weryfikacja dokładności rozszerzonego modelu Bertottiego, d) porównanie podwojonych strat wirowoprądowych obliczonych z klasycznego równania i aproksymowanych z rozdziału strat mocy

Na Rys. 10c przedstawiono wyniki weryfikacji modelu rozdziału strat w szerokim zakresie indukcji i częstotliwości. W całym zakresie wartości obliczonych (linie ciągłe) różnice nie przekraczają $\pm 12\%$, a dla większości punktów zmierzonych zgodność jest lepsza niż $\pm 4\%$. Potwierdza to jakościową poprawność modelu statystycznego [14] rozszerzonego w pracy [C6] na obliczanie strat w warunkach przemagnesowania kołowego. Na Rys. 10d zilustrowano ponadto wyniki obliczeń

52

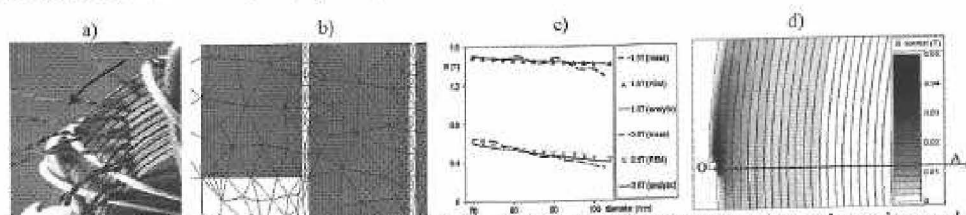
na podstawie klasycznego równania prądów wirowych [10], ale podwojone zgodnie z wymogami przemagnesowania obrotowego [6] i porównane względem wartości uzyskanych z modelu jako aproksymacja metodą najmniejszych kwadratów. Obie krzywe wykazują jakościową zgodność, co oznacza poprawność przyjęcia do obliczeń podwojonej wartości obliczonej z klasycznego równania [6], potwierdzoną eksperymentalnie [C6].

Z zaprezentowanych danych wynika, że model statystyczny może zostać użyty do predykcji wartości (podobnie jak ma to miejsce w narzędziach komercyjnych [23]), ale funkcje analityczne muszą zawierać współczynniki określone z danych zmierzonych przy przemagnesowaniu obrotowym.

Rdzeń zwijany przy przemagnesowaniu z komponentem 3D

W pracy [B6] przedstawiono wyniki pomiarów oraz obliczeń metodą elementów skończonych FEM przeprowadzone dla toroidalnego rdzenia zwijanego o średnicy d (Rys. 11a). Należy podkreślić, że obliczenia FEM przeprowadzono dla całej geometrii rdzenia, co jest numerycznie zagadnieniem bardzo trudnym. Rdzeń taki jest wykonany jako spirala, a więc nie można wykorzystać uproszczeń modelu wynikających z symetrii. Odwzorowanie szczelin niemagnetycznych dla całego rdzenia wymaga dużej ilości pamięci komputerowej z uwagi na wymaganą liczbę elementów siatki FEM (Rys. 11b). W rezultacie, obliczenia mogły zostać przeprowadzone tylko jako 2D FEM i to też przy wykorzystaniu całej dostępnej wówczas pamięci komputera. Wskazuje to na problemy z odwzorowaniem rdzeni rzeczywistych. Mimo ogromnego postępu w technologii komputerowej tego typu ograniczenia nadal występują.

Wyniki zmierzone i obliczone wykazały dobrą zgodność rozkładu indukcji w poszczególnych warstwach rdzenia (Rys. 11c). Model FEM wykorzystano także do obliczenia składowej B prostopadłej do powierzchni blachy (Rys. 11d). Największa koncentracja tej składowej występuje w pobliżu końca taśmy, czyli tam gdzie zachodzi przemagnesowanie ze zwiększonym komponentem 3D i to podczas wymuszenia osiowego (1D). Generuje to dodatkowe straty mocy i jest jednym z powodów dlaczego pomiary na rdzeniach zwijanych z taśmą, wykonane według procedury opisanej w normie [27] nie są bezpośrednio porównywalne z innymi znormalizowanymi metodami [25, 26]. Wskazuje to na konieczność dalszego udoskonalania także i metod pomiarowych przy przemagnesowaniu osiowym (czyli 1D).



Rys. 11. Badanie toroidalnych rdzeni zwijanych [B6]: a) fotografia rdzenia i lokalnych cewek pomiarowych B (strzałka pokazuje kierunek zwijania rdzenia z taśmą, b) siatka 2D FEM (kolor ciemnoszary – taśma o grubości 0,3 mm), c) porównanie wyników pomiarów $B = f(d)$ i symulacji FEM, d) rozkład składowej prostopadłej B

Zaprezentowane w pkt. c4) wyniki badań własnych w zakresie charakterystyk materiałowych uznać należy za przydatne dla dalszych prac analitycznych i opracowywanych modeli dotyczących przemagnesowania obrotowego (2D) z kształtowaniem hodografów B lub H i kontrolowanych amplitudach wymuszenia. Analiza globalnych i lokalnych charakterystyk (1D, 2D i 3D) blach elektrotechnicznych różnych gatunków umożliwia ponadto pełniejszą analizę zjawiska anizotropii magnetycznej współcześnie produkowanych blach elektrotechnicznych.

c5) Techniki pomiarowe

Jak wspomniano, dokładne pomiary własności magnetycznych w warunkach przemagnesowania dwuwymiarowego są trudne z uwagi na bardzo wiele źródeł niepewności pomiarowych, oraz ich niepełnego zrozumienia [34]. W literaturze pomiarów stratności obrotowych występowały przypadki "zmierzonych" ujemnych wartości strat mocy [34, 35], jednak nie były one dostatecznie wyjaśnione. W pomiarach Wnioskodawcy również rutynowo występowały ujemne wartości (np. Rys. 8c,d [B4], gdzie składowa stratności P_1 jest ujemna dla ostatniego punktu na charakterystyce), lub dane wskazujące na dodatkowe problemy, jak asymetria na Rys. 6c [C7]. W

SZ

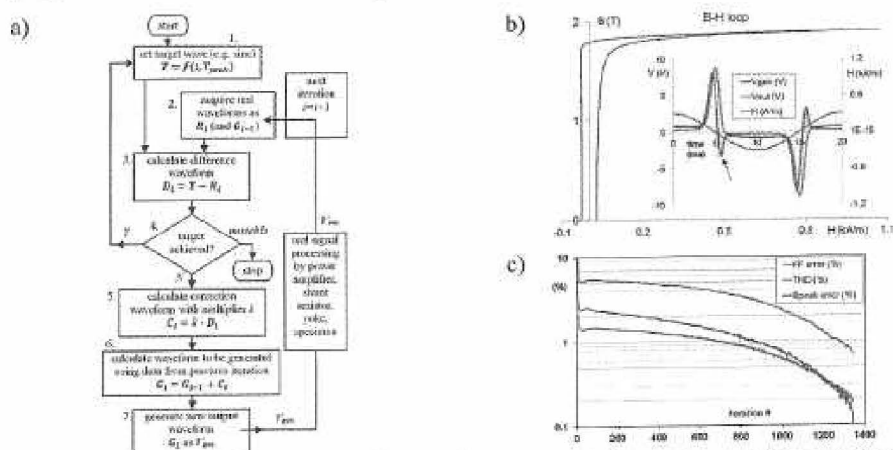
literaturze brak było pełnego wyjaśnienia powodów tych zjawisk jak i tak dużych niedokładności pomiarowych, dlatego też wraz z opisaną powyżej charakterystyką materiałów, Wnioskodawca zajął się również dogłębnym zbadaniem źródeł wielu błędów, niedokładności i niepewności pomiarowych [A1, B1-B3, B8, B9, B11, C1, C4, C7, C8].

c5.1) Udoskonalenie technik pomiarowych przy przemagnesowaniu 2D

Algorytm iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego

Jedną z podstawowych trudności w pomiarach magnetycznych jest utrzymanie zadanego kształtu odniesienia przebiegów zgodnie z wymaganiami norm [25-27]. Wpływ rozbieżności współczynnika kształtu (*form factor*, *FF*) na dokładność pomiaru jest znaczny i bardzo pożądanym jest jego minimalizacja [28, 29, 31]. Do pomiarów osiowych zazwyczaj wystarczającym jest użycie analogowego sprzężenia zwrotnego [28, 39]. Pomiary 2D są jednak dużo trudniejsze i analogowe sprzężenie zwrotne okazuje się niewystarczające. Wykorzystuje się zatem różne metody cyfrowe, wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe, algorytmy genetyczne, dodatkowe sprzężenie pomiędzy magnesowanymi kanałami, itd.

Wnioskodawca stworzył autorską odmianę algorytmu iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego (Rys. 12), która została opisana w szeregu artykułów wykazujących jego przydatność i wszechstronność [A1], nie tylko do pomiarów 2D czy wielokanałowych [B11], ale i do złożonych 1D [C2], również w szerokim zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 100 kHz [C8].



Rys. 12. Uniwersalny algorytm iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego [C2]: a) schemat blokowy algorytmu, b) pętla B - H dla blachy orientowanej M140-27 przy 50 Hz z amplitudą 1,9 T i dokładnością kształtowania do $FF \pm 0,2\%$, c) zapis błędów kształtowania podczas startu od zera do ukształtowania 1,9 T (w jednym kroku)

Możliwości kształtowania dowolnego przebiegu sygnałów przy przemagnesowaniu 2D zostały zaprezentowane już na Rys. 2 (kolowe hodografy B i H), Rys. 4 (przemagnesowanie w dużych amplitudach do 2,0 T), Rys. 5 (dowolne przebiegi, np. trapez i niesymetryczny trójkąt), oraz Rys. 6c (odzworowanie przemagnesowania osiowego 1D pod różnymi kątami przy użyciu jarzma 2D). Koncept algorytmu cyfrowego sprzężenia zwrotnego był rozwijany przez Wnioskodawcę na przestrzeni kilkunastu lat [A1, B11, C2, C8], co zaowocowało określeniem generalnych warunków stabilności i szczegółów implementacji do pomiarów magnetycznych. Na Rys. 12 przedstawiono schemat algorytmu oraz jego możliwości w kształtowaniu przebiegów do osiągnięcia realizowanego pomiaru 1D, przy starcie od zera do amplitudy 1,9 T $\pm 0,1\%$ (wymagane $\pm 0,2\%$), $FF \pm 0,2\%$ (wymagane $\pm 1\%$) oraz $THD < 1\%$ (brak wymagań w normach).

Całość została uogólniona w pracy [C2], która obecnie wydaje się być najbardziej szczegółowym opisem praktycznej implementacji, gotowym do użycia przez innych badaczy, w dowolnym środowisku lub języku programowania (Rys. 12), dla warunków 1D, 2D lub 3D. Metoda ta nie wymaga bowiem uwzględnienia sprzęgania pomiędzy różnymi kanałami magnesowania, co

52

znacznie upraszcza jej zastosowanie w uniwersalnym przypadku jarzma i próbki o nieznanymi parametrach. Algorytm z [C2] został wykorzystany i przetestowany w aplikacjach praktycznych, do kształtowania dowolnych przebiegów w aparacie magnesującym jedno- lub wielokanałowym (sinus, trójkąt, trapez, modulacja szerokości impulsów, itd. [A1]).

c5.2) Analiza niepewności pomiarowych czujników B i H

Kątowe błędy położenia czujników B i H

Jak wykazano, wartości zmierzonych obrotowych stratności mocy należy uśredniać z obu kierunków wirowania, gdyż mogą się one znacznie różnić, a nawet przyjmować nie mające uzasadnienia fizycznego wartości ujemne. Zagadnienie to przeanalizowano bliżej w pracach [B8, B9]. Na Rys. 13a zilustrowano położenie wektorów H i B oraz kątów położenia czujników H . Dla przypadku jak z Rys. 13a, osie czułości czujników powinny pozostawać ortogonalne i pokrywać się dokładnie z osiami X i Y , ale z uwagi na tolerancje mechaniczne czujniki zawsze będą położone pod nieznanymi kątami, oznaczonymi jako X' i Y' . Zatem składowe sygnałów $H_{X'}$ oraz $H_{Y'}$ zmierzone przez czujniki różnią się od wartości H_X i H_Y , z uwagi na kątowe błędy położenia czujników α i β , według zależności matematycznych:

$$(4) \quad H_{X'} = H_X \cos(\alpha) + H_Y \sin(\alpha) \quad \text{oraz} \quad H_{Y'} = H_Y \cos(\beta) - H_X \sin(\beta), \quad (A/m)$$

Rozwiązanie równań (4) prowadzi do uzyskania faktycznych wartości sygnałów mierzonych przez czujniki, w funkcji ich kątowego błędu położenia:

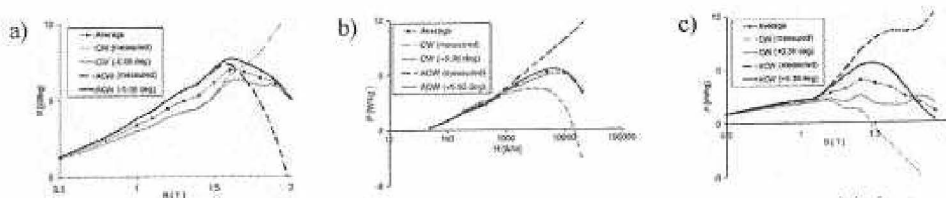
$$(5) \quad H_X = \frac{H_{X'} \cos(\beta) - H_{Y'} \sin(\alpha)}{\cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta)} \quad \text{oraz} \quad H_Y = \frac{H_{Y'} \cos(\alpha) + H_{X'} \sin(\beta)}{\cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta)}, \quad (A/m)$$

Równania (5) mogą być zastosowane do równania (1) i tym samym umożliwiają określenie funkcji zależności błędów pomiarowych od kątów α i β (mają one również zastosowanie dla czujników B).



Rys. 13. Ilustracja [B8]: a) położenia wektorów B i H oraz położenia czujników H , b) wartości błędu stratności mocy wynikającego z uśredniania z dwóch kierunków wirowania dla wymuszenia 1,0 T

Z danych na Rys. 13b wynika, że dla wymuszenia o amplitudzie 1,0 T, jeżeli błędy kątowe położenia czujników są mniejsze niż 5° (co jest łatwe do uzyskania z ogólnie dostępnymi tolerancjami mechanicznymi), to błąd stratności mocy z uśredniania nie przekracza 0,2%. Dane te potwierdzają pełną zasadność uśredniania stratności obrotowych z dwóch kierunków wirowania pola [6, 34]. Tak więc, korzystając z powyższego modelu matematycznego (wzory (5) dla H i B oraz wzoru (1)) skorygować można numerycznie obliczone wartości stratności mocy (Rys. 14 przedstawia takie dane skorygowane po wykonaniu pomiarów).



Rys. 14. Przykłady korekcji błędów kątowych czujników dla dwóch typowych pomiarów stratności obrotowej przy 50 Hz [B8]: a) nieorientowana blacha przy kołowym B , b) orientowana blacha przy kołowym H , c) orientowana blacha przy kołowym B

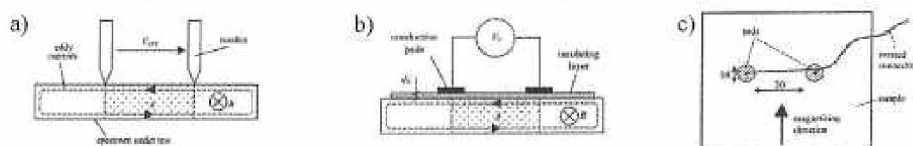
52

Jak wynika z Rys. 14a nawet bardzo niewielki błąd położenia czujników $\alpha = \beta = -0,09^\circ$ może spowodować pozorną ujemną stratność dla kierunku wirowania CW (dla dużych amplitud wymuszenia). Większy kąt $\alpha = \beta = +0,36^\circ$ powoduje natomiast bardzo duże ujemne wartości, nawet rzędu -6 W/kg (Rys. 14b,c). Stanowi to oczywiste potwierdzenie, że wyniki pomiarów i obliczeń dokonane w oparciu o równanie (1) są silnie zależne od kątowych błędów położenia czujników B i H , nawet dla tego samego systemu pomiarowego.

Omawiane zjawisko pozwala na wyjaśnienie efektu asymetrii widocznej w wynikach stratności mocy na Rys. 6c otrzymanych dla przemagnesowania 1D pod różnymi kątami na próbce o kształcie dysku, ale bez wykorzystania korekty zgodnie z równaniem (5). Brak uwzględnienia tychże błędów kątowych powoduje asymetrię zmierzonych wartości. W pracy [B8] przedstawiono model korekty błędów położenia czujników podczas pomiarów stratności obrotowych blach elektrotechnicznych, co nie wyczerpuje jednak złożoności problemu pomiarowego. Dla przykładu (Rys. 14a) nawet po skorygowaniu charakterystyk pomiarowych w dalszym ciągu występują różnice stratności mocy w zależności od kierunku wirowania pola magnetycznego, dla pełnego zakresu amplitud B . Dla blach orientowanych (Rys. 14c) charakterystyki $P = f(B)$ mają bardziej skomplikowane kształty, i mogą zawierać więcej niż jedno maksimum [B8, 35]. Kilka hipotez wyjaśnienia przyczyn takiego zachowania przedstawiono w pracy [B9], w tym przykładowo takich jak: niesynchroniczne próbkowanie sygnałów, kątowe błędy położenia czujników B oraz ich wpływ na asymetrię przemagnesowania, sprzężanie się niepożądanych sygnałów do przewodów doprowadzających oraz faktyczna asymetria anizotropii materiału.

Czujniki B

W pracy [B10] zaproponowano nową bezinwazyjną metodę pomiarów lokalnej indukcji magnetycznej (Rys. 15). Metoda igłowa (Rys. 15a) polega na zmierzeniu spadku napięcia spowodowanego prądami wirowymi. Jest ona często określana błędnie jako "bezinwazyjna", mimo że igły pomiarowe wymagają galwanicznego kontaktu z metaliczną powierzchnią próbki, tj. przebicia powłoki izolacyjnej, co wiąże się z wprowadzeniem lokalnych naprężeń mechanicznych w próbce.



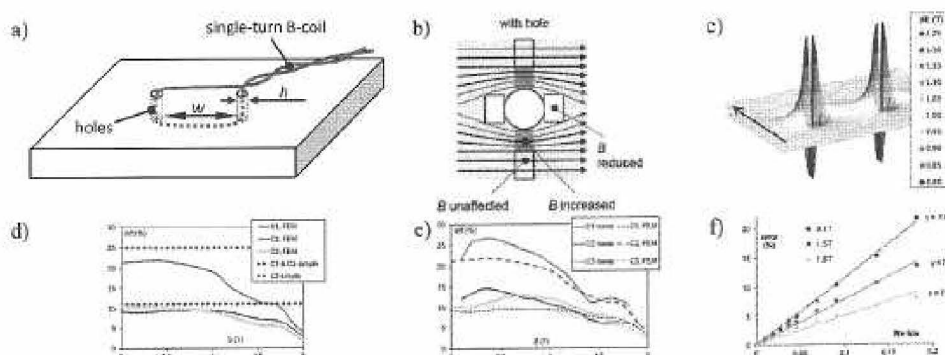
Rys. 15. Metody pomiaru B [B10]: a) metoda igłowa, b) metoda pojemnościowa, c) prototyp czujnika

Zaproponowana nowa metoda (Rys. 15b) jest również oparta na pomiarze spadku napięcia spowodowanego prądami wirowymi, ale poprzez pojemnościowe sprzęgnięcie z powierzchnią próbki. Nie ma zatem konieczności naruszania powłoki izolacyjnej, która może być w istocie integralnym komponentem takiego czujnika. Metoda ta jest całkowicie bezinwazyjna i może być stosowana do pomiarów lokalnych wartości B np. w blachach elektrotechnicznych (zarówno w pomiarach 1D jak i 2D), ale wymaga woltomierza o impedancji wejściowej znacznie większej niż dla metody igłowej, np. elektrometru.

Bardziej powszechne od metody igłowej jest stosowanie lokalnych cewek B , jednakże są one dużo bardziej inwazyjne, gdyż wymagają wiercenia otworów w próbce (Rys. 16a). Pomimo ogólnie znanego jakościowego wpływu takich otworów, w literaturze brak było jednak ilościowego opisu odpowiadających im niedokładności pomiarowych. Prowadziło to nawet do niedopuszczalnego traktowania tych zjawisk jako "pomijalnie małych" nawet w międzynarodowych badaniach [34]. Z tego względu Wnioskodawca podjął się ilościowego zbadania tego problemu co przedstawiono w pracy [C1].

Otwór mechaniczny tworzy nieciągłość magnetyczną i strumień magnetyczny jest odpowiednio koncentrowany na brzegach (Rys. 16b,c). Można zatem zastosować uproszczony model matematyczny, w którym średnia indukcja B_{coil} wykryta przez cewkę daje się oszacować jako (w – szerokość cewki, h – średnica otworu, B_u – wartość B dla próbki bez otworu):

$$(6) \quad B_{coil} = B_u \cdot (1 + h/w), \quad (T)$$

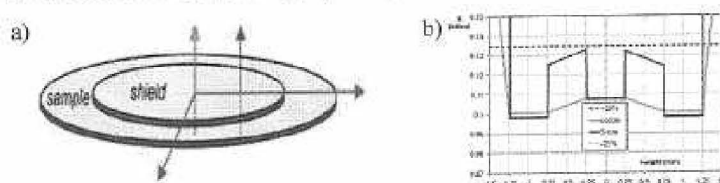


Rys. 16. Błędy pomiarowe cewek B [C1]: a) lokalna cewka B , b) ilustracja uproszczonego modelu, c) wyniki FEM, d) porównanie modelu analitycznego i symulacji, e) porównanie pomiarów i symulacji, f) błędy ilościowe

Zgodność modelu analitycznego, symulacji i pomiarów (Rys. 16d,e) wskazuje na poprawność wzoru (6) [C1]. Pozwala to zdefiniować górną granicę błędów pomiarowych powodowanych przez obecność otworów dla takich czujników (Rys. 16f). Z danych tych wynika, że błąd powodowany przez niewłaściwy dobór ilorazu h/w dla cewki B może wielokrotnie przekroczyć niepewność pomiarową aparatu Epsteina (1,5%). W międzynarodowym porównaniu [34] wykorzystywano np. otwory o średnicy 0,5 mm oraz szerokości cewki 20 mm, czyli o ilorazie $h/w=0,025$. Oznacza to, że należy liczyć się wówczas z błędem pomiaru rzędu 2,9% i to tylko dla jednej cewki B . Równie ważnym wnioskiem wynikającym z pracy [C1] jest to, że zmierzone wartości B są zawsze podwyższone w stosunku do próbki bez otworów.

Trójwymiarowy ekran magnetyczny

W pracy [C4] przeprowadzono badania rozkładu pola magnetycznego dookoła płaskiego izotropowego dysku ferromagnetycznego magnesowanego w otwartym obwodzie magnetycznym, z dyskowym ekranem nad i pod próbką (Rys. 17a).

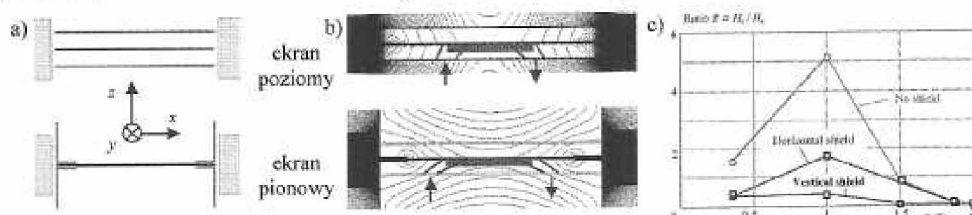


Rys. 17. Symulacje FEM [C5]: a) ilustracja próbki i górnego ekranu magnetycznego, b) obliczone wartości H

To jakościowe badanie przy użyciu symulacji metodą 3D FEM miało na celu sprawdzenie jednorodności magnesowania w próbkach oraz ewentualną poprawę tej jednorodności poprzez użycie symetrycznych ekranów o różnych średnicach. Ekran taki stosuje się w celu ograniczenia gradientu H nad powierzchnią próbki. Z wyników obliczeń FEM prezentowanych na Rys. 17b wynika, że w środku symetrii układu próbki i ekranów występują zbliżone wartości H (linia żółta „centre”). Jednakże, w miarę oddalania od tego punktu rozkład pola staje się silnie niejednorodny (linia czerwona „5 mm”), co potwierdza nieskuteczność tego typu ekranów.

W pracy [B2] Wnioskodawca zaprezentował nowy typu ekranu magnetycznego do pomiarów w warunkach przemagnesowania 2D (ekran „pionowy” na Rys. 18a, zaprezentowany również na Rys. 23). Ekran ma kształt cylindra składającego się z kątowników wykonanych z materiału magnetycznie miękkiego, równomiernie rozłożonych na obwodzie dysku (symetrycznie nad i pod próbką) i oddzielonych od siebie niewielkimi szczelinami. Symulacje 3D FEM wykazują, że taki ekran „pionowy” znacznie bardziej redukuje gradient składowej stycznej H przy powierzchni próbki (dla wartości mierzonych H_x i H_y , Rys. 18b). Zmniejszeniu ulega także składowa normalna H_z (Rys. 18b,c), która stanowi wysoce niepożądany komponent (z uwagi na powstawanie dodatkowych błędów pomiarowych opisanych poniżej). Wielkość amplitudy H_z można ograniczyć przez

zastosowanie zaproponowanego ekranu „pionowego” (Rys. 18b), lub ograniczyć jej wpływ na wyniki pomiarów przez zastosowanie cewek H wykonanych w technologii obwodów drukowanych (Rys. 21).



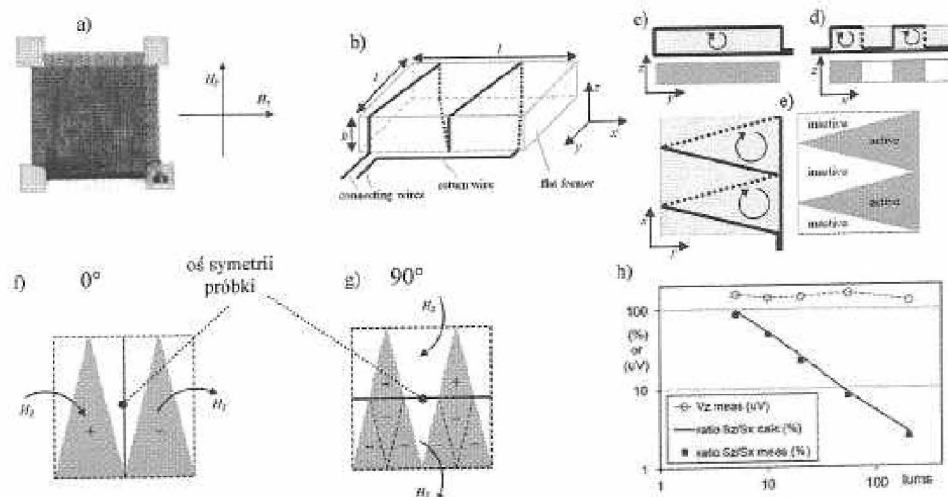
Rys. 18. Ekranowanie przy przemagnesowaniu obrotowym [B2]: a) przekrój przez konfigurację próbki i ekranów, b) wyniki symulacji z zaznaczonymi liniami sił pola i komponentem H_z (czerwony kolor, strzałki) przenikającymi cewkę H (zielony) umieszczoną pod próbką, c) porównanie efektywności działania ekranów

Ograniczanie gradientu składowej stycznej H_x (Rys. 18c) okazuje się być niezwykle istotnym dla zapewnienia dokładności pomiaru wartości H , gdyż w obecności gradientu H_x niezbędna jest kłopotliwa metoda ekstrapolacji [43].

Cewka H w formie obwodu drukowanego

W pracach [A1, B1, B3] przedstawiono wyniki badań nad parametrami płaskich cewek H , które są szeroko stosowane w pomiarach właściwości magnetycznych przy przemagnesowaniu 1D, 2D jak i 3D [6, 28, 30, 34, 39, 43, 44]. Dla celów pomiarów 2D niezbędne są dwie cewki H do pomiaru składowych ortogonalnych H_x i H_y (Rys. 19a), zgodnie z równaniem (1) oraz dwie cewki B (uwidocznione np. na Rys. 1c, Rys. 16a oraz Rys. 23a).

Cewki H są zazwyczaj wykonane poprzez nawinięcie cienkiego przewodu (np. 0,05 mm średnicy) na płaskie prostopadłościany (np. 0,5 mm grubości) tak, aby główna oś czułości cewki znajdowała się jak najbliżej powierzchni próbki (Rys. 19a). Wówczas przyjmuje się, że zmierzona wartość składowej stycznej H_x nad powierzchnią próbki ma tę samą wartość co wewnątrz próbki. W rzeczywistości, oś cewki nie leży na samej powierzchni próbki, ale co najmniej na wysokości równej połowie grubości prostopadłościanu, co powoduje że wymagana jest ekstrapolacja wartości do powierzchni próbki [43], co potwierdzone jest między innymi wynikami z prac [B2, C4].



Rys. 19. Schematyczne przedstawienie składowej normalnej H dla próbki magnesowanej w układzie ze szczeliną [B3]: a) fotografia cewki H z dwoma uzwojeniami ortogonalnymi dla pomiaru H_x i H_y , b) spiralna cewka dwuzwojowa, c), d), e) ilustracja aktywnych pól powierzchni dwuzwojowej cewki H dla składowych w kierunkach odpowiednio X , Y i Z (kolor ciemnoszary), f), g) autokompensacja sygnału H_z dla dwóch wybranych chwilowych kierunków przemagnesowania obrotowego (0° i 90°), h) czułość cewki H w zależności o liczby zwojów dla kierunków pomiarowego X (w μV) oraz odpowiadający jej iloraz czułości S_z/S_x (w procentach)

57

W pracy [B3] udowodniono matematycznie i eksperymentalnie, że cewki H wykonane poprzez spiralne nawinięcie drutu na płaski prostopadłościan (czyli w standardowym wykonaniu) wykazują niepożądaną czułość dla składowej normalnej H_z (prostopadłej do powierzchni próbki). W dotychczasowych badaniach opisanych w literaturze [34] czułość ta nie była brana pod uwagę z uwagi na brak opracowań co do parametrów jakościowych i ilościowych tego problemu.

W osi cewki X , tj. w pożądanym kierunku, czułość S jest proporcjonalna do iloczynu pola przekroju cewki ($l \cdot h$) oraz liczby zwojów (N) (Rys. 19c):

$$(7) \quad S_X = l \cdot h \cdot N, \quad (m^2)$$

Natomiast dla kierunku leżącego w tej samej płaszczyźnie płaskiego prostopadłościanu, ale w kierunku Y (czyli prostopadłym do X) niepożądana czułość może być obliczona z równania (8) i jest ona *niezależna* od liczby zwojów (Rys. 19d):

$$(8) \quad S_Y = l \cdot h \cdot N / (2 \cdot N) = l \cdot h / 2, \quad (m^2)$$

Podobnie ma się zależność dla trzeciego ortogonalnego kierunku, czyli Z , dla którego również niepożądana czułość nie zależy od liczby zwojów (Rys. 19e):

$$(9) \quad S_Z = l \cdot l \cdot N / (2 \cdot N) = l \cdot l / 2, \quad (m^2)$$

Skoro czułość w kierunku X zależy od liczby zwojów (równanie (7)), a w kierunku Y i Z nie zależy, to prezentowane dane na Rys. 19h potwierdzają, że iloraz czułości S_Y/S_X [B3] maleje wraz ze wzrostem liczby zwojów. Ponadto, potwierdzono eksperymentalnie, że czułość cewki w kierunku Z (wyrażana w mikrowoltach) przyjmuje wartość niemal stałą dla szerokiego zakresu liczby zwojów (Rys. 19h). Na Rys. 19e,f,g przedstawiono rozważania dla spiralnie nawiniętej cewki H o dwóch zwojach (Rys. 19b). Schemat na Rys. 19e ilustruje obszary, w których komponent H_z wpływa na wartość pomiaru H_x . Wykazano natomiast, że dla rozważanej cewki H autokompensacja występuje tylko wtedy, kiedy pole obrotowe znajduje się w pozycji 0° (Rys. 19f), a po obrocie pola o 90° (Rys. 19g) występuje przypadek największego nieskompensowania komponentu H_z , który oddziałuje na pole aktywne cewki pomiarowej.

Opublikowana analiza wykazuje, że błąd kątowy wynikający z niepożądaną czułości w kierunku Y może być rzędu $0,14^\circ$ [B3]. Jak łatwo zauważyć z danych zaprezentowanych na Rys. 14a, nawet błąd kątowy rzędu $0,09^\circ$ jest w stanie spowodować pomiar pozornej ujemnej stratności. Przy podobnej analizie dla kierunku Z można oszacować, że niepożądany komponent wektorowy H_z może wygenerować błąd fazowy nawet 17° [B3]. Wobec powyżej przedstawionych wyników prac staje się oczywistym, że tak duże błędy kątowe są w stanie poważnie pogorszyć dokładność mierzonych sygnałów, doprowadzając nawet do pozornych ujemnych obliczonych wartości stratności [B3].

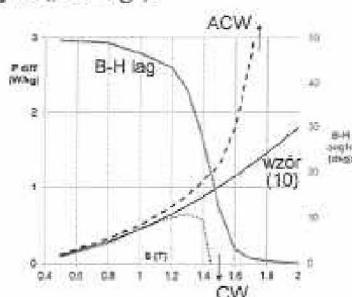
Wzór (9) obowiązuje gdy, cewka H jest nawinięta spiralnie oraz przewód powrotny jest poprowadzony tak jak na Rys. 19b, co prowadzi zatem do wniosku, że możliwym jest wykonanie cewki o niemal zerowej czułości S_z , tj. we wspomnianej już technologii obwodów drukowanych (Rys. 21). W pracy [B1] Wnioskodawca rozszerzył analizę przedstawioną w pracy [B3] dotyczącą wpływu komponentu H_z na funkcjonowanie cewek H w odniesieniu do pomiarów wartości stratności mocy dla dwóch kierunków wirowania, zgodnego (CW) i przeciwnego do ruchu wskazówek zegara (ACW). Wykorzystując równanie (9), i wykonując odpowiednie podstawienia do równania (1), wykazano, że zakłócenia wywołane komponentem H_z (Rys. 19f,g) generują błędy stratności mocy powodowane niepożądaną czułością cewek H zgodnie z następującym wzorem (znaki $\pm$ oznaczają wartości dla przeciwnych kierunków wirowania, B_p – amplituda B , $H_{z,p}$ – amplituda H_z , D – gęstość, f – częstotliwość):

$$(10) \quad \Delta P = \pm \frac{B_p \cdot H_{z,p} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{D}, \quad (W/kg)$$

Z równania (10) wynika, że wartość różnicy stratności dla obu kierunków wirowania jest taka sama, ale o przeciwnym znaku. Oznacza to, że uśrednianie wartości zmierzonych dla obu kierunków wirowania jest zasadne, gdyż wyeliminuje te różnice (Rys. 14). Wykorzystując dane szacunkowe dotyczące wartości H_z z obliczeń zaprezentowanych w [C4] oraz pomiarów z [B7] wynika że, wartość

różnicy stratności obliczona z równania (10) dla blachy nieorientowanej M400-50A przy 1,0 T i kołowym hodografie B wynosi $\pm 0,5$ W/kg. Jak można zaobserwować na Rys. 14a, pomiędzy krzywymi CW i ACW przy 1,0 T występują różnice właśnie rzędu $\pm 0,5$ W/kg, co potwierdza słuszność użytego modelu matematycznego i wyjaśnia sposób w jaki te różnice powstają.

Z uwagi na zjawisko pola odmagnesowującego próbkę w otwartym obwodzie magnetycznym [28], zauważyć należy, że amplituda wektora H_z jest proporcjonalna do polaryzacji magnetycznej J próbki, a ta z kolei jest również proporcjonalna do amplitudy B . Zatem wynik obliczeń z równania (10) jest proporcjonalny do kwadratu amplitudy B , co potwierdzają wyniki na Rys. 20, gdyż różnice w wartościach zmierzonych podążają trajektorią paraboli (linia ciągła), i to co najmniej do amplitudy B wynoszącej ok. 1,3 T. Uwaga dotycząca wartości 1,3 T wynika z modelu matematycznego zaprezentowanego w pracy [B8], gdyż dla amplitudy powyżej 1,5 T błędy położenia katowego czujników odgrywają dominującą rolę i tym samym maskują inne błędy, np. wynikające z niepożądanego czułości cewek H w kierunku Z . Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem amplitudy wymuszenia, a w szczególności dla wartości powyżej 1,5 T kąt pomiędzy wektorami B i H gwałtownie maleje (Rys. 20, krzywa „ $B-H$ lag”).



Rys. 20. Wartości stratności obliczonych z modelu teoretycznego, z równania (10), z pomiarów blachy nieorientowanej M400-50A dla kierunków wirowania CW i ACW oraz zmiana kąta pomiędzy wektorami B i H wraz ze wzrostem amplitudy wymuszenia [B1]

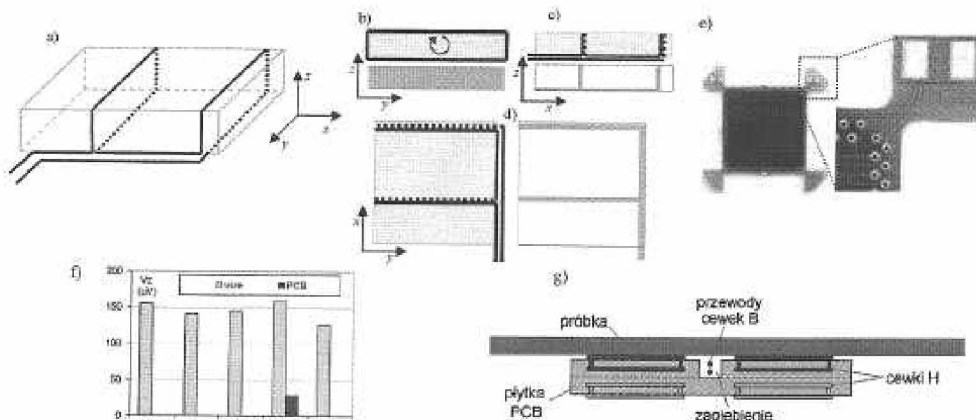
Paraboliczny charakter błędów oraz fakt, że dla powyżej 1,3 T błędy wynikające z katowego położenia czujników gwałtownie rosną (Rys. 14), a ponadto z uwagi na anizotropię próbki (np. blachy orientowanej) wnioskować można, że nieregularności krzywych np. na Rys. 14c powodowane są zmianą stosunku amplitud aż czterech czynników: położenia katowego cewek H , ich niepożądanego czułości odpowiednio w kierunkach Y i Z , oraz sposobu doprowadzenia przewodów pomiarowych [A1]. Co więcej, tego typu zachowanie cewek H może przyczyniać się również do asymetrii hodografów H obecnej w praktycznie każdej pracy poświęconej przemagnesowaniu obrotowemu [6, 30, 34, 35]. Niemniej jednak, modele matematyczne, wyniki eksperymentalne i wnioski zawarte w pracach [B8, B1, A1] wykazują niezbicie, że określone błędy pomiarowe występują w całym zakresie amplitud wymuszenia, i że mogą one być wyeliminowane przez użycie systemu o lepszych parametrach, albo przynajmniej wzięte pod uwagę w budżecie niepewności pomiarowych. Przedstawione modele matematyczne pozwalają przy tym na ilościowe oszacowanie wielkości tego typu błędów dla dowolnego systemu pomiarowego.

Badania właściwości pomiarowych stosowanych cewek H pozwoliły na opracowanie nowego typu cewki H przedstawionego w pracy [A1]. Na Rys. 21a zilustrowano schemat dwuzwojowej cewki H , w której przewód umieszczono nie po trajektorii zwykłej spirali, ale w odpowiedni sposób równolegle i prostopadle do krawędzi prostopadłościanu. Dla takiej konfiguracji czułość w osi cewki pozostaje bez zmian zgodnie ze wzorem (7), natomiast aktywne pola przekroju w pozostałych kierunkach ortogonalnych ulegają znacznej redukcji (porównaj Rys. 21b,c,d oraz Rys. 19c,d,e). Zrealizowano zatem prototypy w technologii obwodów drukowanych (PCB, Rys. 21e), a ponadto celem porównania wykonano cewki H nawinięte cienkim przewodem (*wire*, Rys. 21f), o różnej liczbie zwojów (porównanie wyników dla obu typów cewek pokazano na Rys. 21f).

Pomiary wykazały, zgodnie z zaproponowaną tezą, że dla nowego typu cewki H niepożądana czułość w kierunku Z jest zredukowana do znacznie mniejszego poziomu, w porównaniu do konwencjonalnej cewki H o takich samych wymiarach i liczbie zwojów, ale nawiniętej przewodem w

5 z

sposób spiralny (Rys. 21f). Dlatego też, błędy pomiarowe stratności obrotowej (Rys. 20) wynikające z nieidealnego zachowania cewek H mogą zostać również zredukowane do dużo mniejszych wartości, co znacznie zwiększa ogólną dokładność pomiaru.



Rys. 21. Nowy typ cewki H wykonanej jako obwód drukowany [A1, s. 180, 382, 471-472]: a) nawinięcie "przewodu" pod kątem prostym, b), c), d) ilustracja aktywnych pól powierzchni dwuwzwojowej cewki H dla składowych w kierunkach odpowiednio X , Y i Z (kolor ciemnoszary), e) fotografia prototypu i widok w zbliżeniu, f) wyniki pomiarów wykazujące znaczną redukcję niepożądaną czułości w kierunku Z , g) wielowarstwowa cewka H z miejscem na przewody cewek B

Dodatkowo, technologia obwodów drukowanych umożliwia wykonanie cewek, które mogą zostać umieszczone bardzo precyzyjnie jedna nad drugą, w obrębie tej samej grubości obwodu drukowanego (Rys. 21g). Tego typu rozmieszczenie pozwala na bardzo precyzyjną ekstrapolację wartości H do powierzchni próbki [43], ale wymaga dalszego kontynuowania prac w tym zakresie. Należy również zwrócić uwagę, że lokalne cewki B wymagają przewodów doprowadzających, których grubość nie jest zaniedbywalna (Rys. 16a), i których obecność prowadzi do zwiększenia stopnia trudności precyzyjnego umieszczenia cewek H w bezpośredniej bliskości powierzchni próbki. Z tego powodu, w płytce obwodu drukowanego cewek H przewidziano przestrzeń, w obrębie której usytuowano przewody cewek B (Rys. 21g).

Wszystkie te nowe cechy użytkowe prowadzą do udoskonalenia cewek H , które mogą zostać wykonane w bardzo precyzyjny i powtarzalny sposób, aniżeli ma to miejsce w przypadku cewek H nawijanych spiralnie cienkim drutem nawojowym.

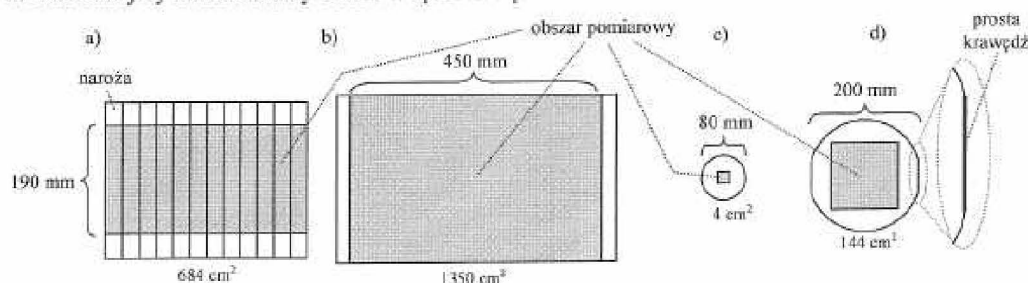
c5.3) Propozycja aparatu do pomiarów własności magnetycznych w kontrolowanych warunkach przemagnesowania 1D i 2D

Jak wspomniano, badania blach elektrotechnicznych z wykorzystaniem aparatu Epsteina wykonywano na próbkach o dużej masie, co przysparzało kłopotów i kosztów. Dlatego też, na przestrzeni lat, Komitet Techniczny IEC TC68 wielokrotnie udoskonalał tę metodę w kierunku zmniejszenia rozmiarów i masy badanej próbki, do obecnie minimum 0,24 kg i wymiarów pasków 30 mm x min. 280 mm, umieszczonych w cewkach pomiarowych o długości 190 mm [25]. Przekłada się to na minimalny sumaryczny obszar pomiarowy 684 cm² (co najmniej 12 pasków, ułożonych w 3 warstwach w kwadrat, bez udziału naroży, Rys. 22a). Znormalizowano także metodę pomiarów na pojedynczym arkuszu blachy (*single sheet tester, SST*), dla której wymiary próbki to min. 300 mm x 500 mm i z obszarem pomiarowym rzędu 1350 cm² (ze względu na umieszczenie próbki w jarzmie magnesującym) [26] (Rys. 22b). Metody te umożliwiają uśrednianie wyników pomiarów z dużych powierzchni próbki i ich dokładność pomiaru stratności mocy to 1,5% dla kontrolowanej amplitudy wymuszenia do 1,7 T.

W przytoczonych badaniach międzynarodowych wykorzystujących metodę bezpośredniego pomiaru pól [34] pomiary przy przemagnesowaniu obrotowym (2D) wykonywano na próbkach kwadratowych o boku do 100 mm (Rys. 1b), ale obszar pomiarowy był ograniczony do wymiarów tylko ok. 20 x 20 mm, czyli 4 cm², co jest wartością ok. 200 razy mniejszą niż dla metod

znormalizowanych [25, 26]. Rozmiar ziaren krystalicznych we współczesnych anizotropowych blachach elektrotechnicznych może osiągać wielkość rzędu 20 mm. Niewielki zatem obszar pomiarowy skutkował rozrzutami wyników pomiarów z różnych laboratoriów rzędu kilkudziesięciu procent, także ze względu na rozrzut lokalnych własności mierzonego materiału. Z tego też względu, wynik pomiaru na obszarze 4 cm^2 nie jest reprezentatywny i wobec tego, wyniki takich pomiarów nie są uśredniane w wystarczającym stopniu. Nawet przy zmianie kształtu próbki na dyskową o średnicy 60-100 mm (dla jarzma cylindrycznego z Rys. 1c), dla której uzyskuje się większe amplitudy przemagnesowania 2D, wymiary obszaru pomiarowego pozostały tego samego rzędu, tj. 4 cm^2 (Rys. 22c). Tym samym, warunki uśredniania dalej są niewystarczające.

Wnioskodawca dokonał analizy problematyki dokładności pomiarów własności magnetycznych na próbkach kwadratowych i dyskowych w jarzmach do pomiaru 2D na podstawie danych literaturowych i badań własnych. Efektem tej analizy było sformułowanie koniecznych do spełnienia wymagań (podpunkty i)-xi) poniżej) dla nowego aparatu pomiarowego w kontrolowanych warunkach przemagnesowania 2D (jak również 1D), i ich realizacji [A1, s. 377-384]. Jednym z postawionych wymagań jest zapewnienie warunków znacznie lepszego uśredniania, gwarantujących uzyskanie polepszenia powtarzalności jak również i dokładności pomiaru stratności mocy. Wymaga to obszaru pomiarowego na próbce, o wielkości co najmniej 144 cm^2 (Rys. 22d), czyli o ok. półtora rzędu wielkości większej (36 razy) niż w poprzednio stosowanych badaniach [34], a tylko ok. 5-krotnie mniejszy niż minimalny obszar w aparacie Epsteina.



Rys. 22. Ilustracja (w skali) minimalnych powierzchni próbek, z których uśredniany jest pomiar stratności mocy: a) aparat Epsteina 1D [25], b) próbka 300 x 500 mm dla jarzma SST 1D [26], c) próbka dyskowa o średnicy ok. 80 mm do pomiarów 2D [34], d) próbka dyskowa z wymiarami obszaru pomiarowego dla udoskonalonego jarzma do pomiarów 2D [A1, s. 245]

W celu spełnienia sformułowanych wymagań mających na celu charakterystykę blach w warunkach przemagnesowania 2D należy wziąć pod uwagę następujące komponenty aparatu pomiarowego [A1, s. 383]:

- i) **obszar pomiarowy** (Rys. 22d) – minimalne wymiary obszaru pomiarowego to 120 x 120 mm, czyli 144 cm^2 ,
- ii) **próbka** (Rys. 22d, Rys. 23) – w kształcie dysku o rozmiarach odpowiednio większych od obszaru pomiarowego czyli o **średnicy ok. 200 mm**,
- iii) **jarzmo magnesujące** – o rozmiarach odpowiednich dla rozmiaru próbki, z uwzględnieniem równomiernej szczeliny (ok. 1 mm) pomiędzy jarzmem a próbką. Jarzmo powinno umożliwiać uzyskanie dużych kontrolowanych amplitud przemagnesowania, **do 1,9 T**, dlatego też powinno być wykonane jako **jarzmo cylindryczne** (Rys. 23), z uwagi na jego krótką drogę magnetyczną i stosunkowo mały strumień rozproszenia w stosunku do jarzma z próbką kwadratową (Rys. 1b). Parametry takie zmniejszają wymagania co do mocy źródeł zasilania,
- iv) **uzwojenia magnesujące** – **dwufazowe** uzwojenia wykonane z zachowaniem tzw. „sinusoidalnego” rozkładu liczby zwojów, których zastosowanie zwiększa jednorodność rozkładu pola magnesującego, a które zmniejszają wymagania co do liczby źródeł zasilania i kanałów sprzężenia zwrotnego,
- v) **ekran magnetyczny** – „pionowy” (Rys. 18 i Rys. 23a), którego zastosowanie zwiększa jednorodność pola magnetycznego w obszarze pomiarowym, zmniejsza gradient mierzonego komponentu stycznego natężenia pola magnetycznego H przy powierzchni próbki, zmniejsza amplitudę niepożądanego komponentu H_z , oraz obniża reluktancję wymuszanego obwodu

Sz

- magnetycznego (jarzmo/ekran/próbka) – co również zmniejsza wymagania co do mocy źródeł zasilania,
- vi) **pozyjonowanie próbki** – aparat pomiarowy zapewnia bardzo dobre **pozyjonowanie osiowe i kątowe próbki** (Rys. 23b). W tym celu próbka dyskowa powinna być wycięta tak, aby posiadała niewielkie ścięcia ($>0,5$ mm) w postaci prostych krawędzi leżących na przeciwległych brzegach (Rys. 22d w powiększeniu). Pozycjonowanie osiowe jest wymagane w celu zachowania symetrii rozkładu pola magnesującego próbkę, a pozycjonowanie kątowe w celu redukcji różnicy położenia kąтового pomiędzy czujnikami B i H ,
 - vii) **cewki B** – jednozwojowe cewki B (Rys. 23a) o odpowiednim stosunku średnicy otworów do szerokości cewki (iloraz h/w , wzór (6)) gwarantującym zachowanie systematycznego błędu pomiarowego cewki poniżej 0,25%,
 - viii) **cewki H** – wykonane w technologii obwodów drukowanych PCB, o rozmiarach porównywalnych z wymiarami próbki (Rys. 23b). Odpowiednie wykonanie takich cewek H gwarantuje precyzyjne położenie osiowe i kątowe względem próbki i jarzma, redukuje wpływ niepożądaną składową H_z , umożliwia ekstrapolację mierzonych wartości stycznego komponentu H do powierzchni próbki (Rys. 21g) oraz zapewnienie odpowiedniej przestrzeni (zagłębienia) w którym usytuowane są przewody cewek B ,
 - ix) **kontrola kształtu przebiegów** – zrealizowana za pomocą cyfrowego sprzężenia zwrotnego (Rys. 12), umożliwia kształtowanie przebiegów przy przemagnesowaniu obrotowym (2D) w sposób porównywalny dla metod znormalizowanych przy przemagnesowaniu sinusoidalnym osiowym (1D), o kryteriach: amplitudy wymuszenia $< 0,2\%$ i współczynnika kształtu (*form factor*, FF) $< 1\%$. Dodatkowo, niezbędnym jest, aby uwzględnić również współczynnik całkowitego odkształcenia harmonicznego (*total harmonic distortion*, THD), którego wartość powinna pozostawać poniżej 2,5%. Wynika to z faktu, że wartości współczynnika odkształcenia THD są znacznie bardziej skorelowane ze zniekształceniami przebiegów, niż ma to miejsce dla współczynnika kształtu FF [A1, s. 346],
 - x) **sposób wykonania pomiaru przy przemagnesowaniu 2D** – z zachowaniem uśrednienia wyników pomiarów dla kierunku wirowania wymuszenia zgodnego (CW) i przeciwnego (ACW) do ruchu wskazówek zegara,
 - xi) **sposób wykonania pomiaru przy przemagnesowaniu 1D pod dowolnym kątem** – z zachowaniem uśrednienia wyników pomiarów dla obu kierunków, o dodatnim i ujemnym odchyleniu względem kierunku walcowania (np. $+30^\circ$ i -30°).

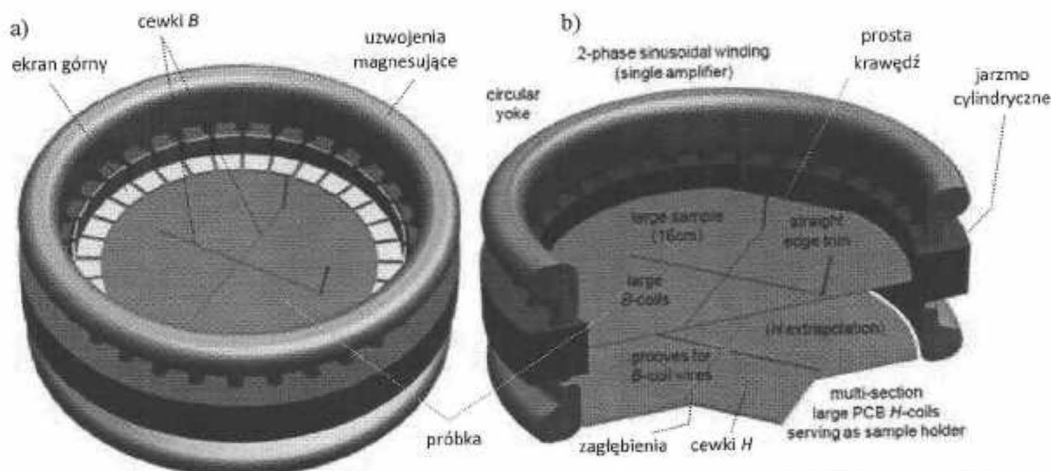
Aparat pomiarowy spełniający wyżej wymienione wymagania zaprezentowano na Rys 23. Na Rys. 23a przedstawiono ogólny wygląd jarzma z próbką blachy elektrotechnicznej z dwoma ortogonalnymi cewkami B , umieszczoną pomiędzy ekranem górnym i dolnym. Na Rys. 23b przedstawiono ilustrację umieszczenia próbki z widoczną jedną z dwóch prostych krawędzi oraz cewki H wykonane w technologii PCB umieszczone pod próbką. Z wykorzystaniem przedstawionego aparatu pomiarowego ze zbliżoną do metod znormalizowanych dokładnością zmierzyć można charakterystyki magnesowania $B = f(H)$ różnych materiałów magnetycznie miękkich, w tym w szczególności blach elektrotechnicznych różnych rodzajów i gatunków.

Obecnie obowiązujące normy metod znormalizowanych dotyczących przemagnesowania 1D wskazują na konieczność zachowania błędu pomiaru stratności badanych materiałów w granicach 1,5% i przy wymuszeniu do 1,7 T. Prawidłowa realizacja pomiarów w warunkach przemagnesowania obrotowego (2D) wymaga pokonania wielu skomplikowanych zagadnień pomiarowych aniżeli ma to miejsce w przypadku metod stosowanych obecnie. Obejmuje to kształtowanie przebiegów B lub H w sposób powtarzalny, przetworzenia tych sygnałów w celu określenia prawidłowych wartości stratności mocy i zapewnienia zadowalającej dokładności pomiaru.

W odniesieniu do prowadzonych od lat 90-tych prac związanych z przemagnesowaniem obrotowym zauważyć należy, że proponowane wówczas rozwiązania techniczne zapewniały pomiary stratności z rozrzutem rzędu kilkudziesięciu procent [34]. Modyfikacja jarzma pomiarowego i wprowadzenie zmian jak w punktach i)-xi) pozwalają na pomiar strat w warunkach przemagnesowania 2D z błędem pomiarowym o rząd wielkości mniejszym [A1]. Ze względu na fakt, że pomiary 2D mogą być wykonywane w warunkach kształtowanego wymuszenia do 1,9 T

SŻ

dostarczane dane pomiarowe mogą być wykorzystywane w jakościowo lepszy sposób, przyczyniając się do postępów w modelowaniu własności materiałów, a w konsekwencji maszyn elektrycznych.



Rys. 23. Aparat do pomiaru własności magnetycznych w warunkach przemagnesowania 1D i 2D [A1, s. 382, 471-472]: a) widok ogólny z próbką i ekranem "pionowym", b) ilustracja elementów składowych aparatu (bez ekranu)

Niezależnie od przedstawionego osiągnięcia, z wykorzystaniem aparatu jak na Rys. 23, wykonywać można pomiary stratości mocy w warunkach przemagnesowania 1D pod różnymi kątami na jednej próbce, z dokładnością zbliżoną do metod znormalizowanych. Stwarza to możliwości upowszechnienia nowej metodologii określania własności kierunkowych blach elektrotechnicznych na jednej próbce.

c5.4) Uogólnienie wyników naukowych

Blachy elektrotechniczne są podstawowym materiałem wykorzystywanym w transformacji i przetwarzaniu energii elektrycznej. Projektowanie obwodów magnetycznych wymaga nie tylko dokładnych danych liczbowych dotyczących własności magnetycznych, ale również odpowiednich narzędzi obliczeniowych i modeli matematycznych. Przydatność tych modeli jest uwarunkowana ich dokładnością obliczeniową i predykcyjną, i są one weryfikowane poprzez porównanie z wynikami pomiarów magnetycznych na istniejących materiałach lub magnetowodach. Nie jest to możliwe bez odpowiednich danych, zmierzonych z zadowalającą dokładnością.

W sensie pomiarowym przemagnesowanie dwuwymiarowe jest niewątpliwie znacznie bardziej złożone od przemagnesowania osiowego. Stąd też wynika mnogość zagadnień, które należy poddać dogłębnej analizie, zarówno z punktu widzenia każdego zjawiska osobno, jak i skomplikowanych zależności pomiędzy nimi. Podsumowanie wszystkich tych istotnych zjawisk zostało zaprezentowane w pracy [A1], gdzie Wnioskodawca przeprowadził analizę literatury przedmiotu pomiarów własności 1D i 2D z uwzględnieniem szczególnego przypadku przemagnesowania obrotowego. W tej obszernej pracy (568 stron, ponad 550 zacytowanych pozycji literaturowych) uwzględniono najważniejsze badania większych laboratoriów międzynarodowych. W omawianym cyklu publikacji wykazano następujące oryginalne osiągnięcia:

a) w aspekcie poznawczym – zmierzono i zaprezentowano magnetyczne charakterystyki blach elektrotechnicznych przy:

- przemagnesowaniu 2D – w kontrolowanych warunkach przemagnesowania obrotowego kołowego B do amplitudy 2,0 T i kołowego H do 40 kA/m [A1, B4, B5, B7, C3, C6]. Były to pierwsze charakterystyki dostępne w literaturze przeprowadzone dla tak dużych amplitud (jednocześnie B i H) dla blach elektrotechnicznych,
- przemagnesowaniu 1D – poprzez przyłożenie wymuszenia 2D [A1, C7]. Wykazano możliwość eliminacji kosztownego cięcia próbek pod wieloma kątami poprzez uzyskanie

57

własności magnetycznych 1D przez przyłożenie kontrolowanego wymuszenia 2D. Otrzymane wyniki pozwoliły na skatalogowanie problemów związanych z błędami pomiarowymi tego typu metod i zapoczątkowały dalsze prace w zakresie ich eliminacji.

- przemagnesowaniu w warunkach rzeczywistych występujących w obwodach magnetycznych [A1, C5]. Wykazano, że w większości objętości obwodu magnetycznego stojana silnika indukcyjnego występuje przemagnesowania obrotowe o różnym stopniu eliptyczności, a także wskazano na związek przemagnesowania obrotowego z magnetostrycją materiału.

b) w zakresie interpretacji – dokonano analizy uzyskanych magnetycznych charakterystyk blach elektrotechnicznych w warunkach przemagnesowania 1D i 2D, z uwzględnieniem:

- własności magnetycznych podlegających zastosowaniu w modelach matematycznych [A1, B4, B6, C6]. Zastosowano wybrane modele fenomenologiczne wykazujące własności predykcyjne różnych własności magnetycznych. W większości przypadków modele te dobrze aproksymują jakościowe zachowanie materiału. Zaobserwowano jednak niedoskonałości modeli skutkujące rozbieżnościami pomiędzy danymi zmierzonymi oraz aproksymowanymi,
- wpływu własności magnetycznych materiału na zachowanie aparatu pomiarowego [A1, B1, B6, B9, C1]. Z analizy tej wynika, że nawet w warunkach przemagnesowania uważanych za stosunkowo proste zachodzą bardzo skomplikowane procesy, które wpływają na dokładność wykonanego pomiaru, zarówno z uwagi na własności osiowe (1D) jak i anizotropię (2D),

c) w zakresie wykonywania pomiarów – przeprowadzono analizę:

- wyników eksperymentalnych uzyskanych przy przemagnesowaniu 1D i 2D – z uwagi na niepewności i błędy pomiarowe [A1, B1, B3, B8, B9, C1, C7]. Wykazano, że praktycznie w każdych warunkach pomiarów przy przemagnesowaniu 2D występują rozbieżności, których wartości są zbyt duże aby mogły zostać wyjaśnione rzeczywistym zachowaniem materiału. Wskazano na przyczyny niedokładności i zaproponowano kierunki dalszych badań nad dokładnością użytych metod pomiarowych,
- skuteczności cyfrowego sprzężenia zwrotnego [A1, B11, C2, C8]. Zaproponowano autorski algorytm iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego i wykazano, że pozwala on na uzyskanie kontrolowanych przebiegów w bardzo szerokim zakresie wymuszeń: kontroli przebiegów B i H , dowolnego kształtu, szerokiego spektrum częstotliwości oraz dla jednoczesnych wielokanałowych wymuszeń (dwu- i trójfazowych, 2D, 3D). W pracach [A1, C2] zaprezentowano uogólnienie implementacji iteracyjnego sprzężenia zwrotnego dla dowolnego systemu magnesującego i języka programowania. Wskazano również na warunki stabilności oraz metodologię uzyskania optymalnej wartości wzmocnienia pętli sprzężenia,
- jakościową i ilościową błędów pomiarowych czujników [A1, B1, B3, B8, B9, C1, C7]. Wskazano na czynniki, które wpływają na niedokładności pomiarowe przy stosowaniu poszczególnych czujników. Przy użyciu autorskich modeli matematycznych i badań eksperymentalnych dokonano ilościowego określenia niepewności i błędów pomiarowych dla poszczególnych czujników B i H oraz do ich współpracy podczas przemagnesowania obrotowego (jak również 1D i uogólnionego 2D),
- efektywności ekranów magnetycznych stosowanych w pomiarach własności przy przemagnesowaniu obrotowym [A1, B2, C4]. Wykazano, że ekrany magnetyczne równoległe do powierzchni próbki działają zbyt selektywnie aby mogły być zastosowane do szerokiego zakresu warunków przemagnesowania. Zaproponowano oryginalny typ ekranu „pionowego”, wykazujący lepsze parametry pracy od wcześniejszych prezentowanych w literaturze.

d) w aspekcie użytkowym:

- zaprojektowano, zbudowano i wdrożono systemy do pomiarów własności magnetycznych w warunkach przemagnesowania 1D i 2D [A1, B5, B6, B7, B11, C2, C5, C7, C8],
- udostępniono dane dotyczące własności magnetycznych uzyskanych w warunkach przemagnesowania 1D, 2D i obrotowego dla typowych blach elektrotechnicznych [A1, B4, B5, B6, B7, C3, C5, C6],
- wykazano, że model statystyczny Bertottiego może zostać rozszerzony na przemagnesowanie obrotowe [C6]. Dlatego też, może on być stosowany w obliczeniowych narzędziach

57

- numerycznych, które wykorzystują ten sam model do predykcji wartości przy przemagnesowaniu osiowym, ale przy wykorzystaniu danych wejściowych określonych podczas przemagnesowania obrotowego,
- uogólniono i udostępniono kompleksowy opis implementacji algorytmu iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego w pomiarach własności magnetycznych w kontrolowanych warunkach wymuszenia [A1, B11, C2],
 - zdefiniowano nowy typ „pionowego” ekranu magnetycznego [A1, B2] umożliwiający redukcję niepożądanych gradientów stycznego i normalnego H przy powierzchni próbki. Jego użycie pozwala na eliminację ekstrapolacji wartości H przy użyciu dwóch czujników,
 - wykazano i udostępniono ilościowe oszacowania błędów pomiarowych czujników B i H [A1, B1, B3, B8, C1]. Dostępność zaprezentowanych wartości pozwala na realistyczne określenie budżetów niepewności pomiarowych aparatów i systemów pomiarowych, zarówno przy przemagnesowaniu 1D, 2D jak i 3D,
 - zdefiniowano i wdrożono nowy typ czujnika H wykonanego w technologii obwodów drukowanych [A1]. Zaproponowany nowy typ cewki H umożliwia eliminację błędów wynikających z niepożądanych komponentów gradientów stycznego i normalnego H przy powierzchni próbki. Możliwe jest też wykonanie precyzyjnych czujników nie tylko o dużych gabarytach umożliwiających uśrednienie wartości z dużej powierzchni próbki, ale również zawierających dwa czujniki do ekstrapolacji. Czujniki tego typu mogą być wykorzystane w systemach pomiarowych zarówno przy przemagnesowaniu 1D, 2D jak i 3D,
 - zaproponowano nowy typ czujnika do pomiaru B [A1, B10]. Czujniki tego typu mogą zostać wykorzystane w systemach pomiarowych zarówno przy przemagnesowaniu 1D jak i 2D,
 - określono parametry niepewności pomiaru własności w warunkach przemagnesowania obrotowego i 2D [A1]. Wnioski wynikające z własnego cyklu publikacji, ale również z innych prac zaprezentowanych w literaturze stanowią, że możliwym jest wykonanie aparatu pomiarowego o dokładności lepszej o rząd wielkości, w porównaniu do poprzednich badań międzynarodowych [A1],
 - dokonano syntezy aparatu pomiarowego [A1] pozwalającego na pomiary własności magnetycznych w dowolnych warunkach przemagnesowania 1D (np. osiowego) lub 2D (np. obrotowego kołowego lub eliptycznego) na próbce dyskowej. System pomiarowy wykorzystujący jarzmo pomiarowe tego typu pozwala na kompleksowe badanie anizotropii blach elektrotechnicznych dla bardzo dużych amplitud wymuszenia (rzędu 2,0 T), bez konieczności wycinania pasków próbek pod wieloma kątami.

W ramach dalszych prac Wnioskodawca zamierza prowadzić badania mające na celu zbudowanie bardziej udoskonalonego aparatu pomiarowego 2D oraz planuje wykonanie badań nie tylko dla blach elektrotechnicznych ale również i innych materiałów magnetycznie miękkich, zgodnie z wnioskami wynikającymi z zaprezentowanego cyklu publikacji [A1, B1-B11, C1-C8].

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze, w obszarze nauk technicznych wynikające Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, z dnia 1 września 2011 r.:

a) *Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)*

- tabela artykułów z punktami MNiSW w sekcji 4b) oraz dodatkowe informacje podane poniżej.

b) *Autorstwo zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego, konstrukcyjnego lub technologicznego*

- obwód magnetyczny dużego elektromagnesu (waga ok. 1 tony) do termomagnetycznego wyżarzania taśm nanokrystalicznych. Wdrożenie tego urządzenia było przedmiotem publikacji: Kozłowski A., Rygał R., Żurek S., *Large DC electromagnet for semi-industrial thermomagnetic processing of nanocrystalline ribbon*, IEEE Trans. Magnetics, Vol. 50 (4-1), 2014, p. 800040,
- zintegrowana głowica cęg pomiarowych (zawierająca przekładnik napięciowy i prądowy oraz ekran magnetyczny pomiędzy nimi) produkowanych przez firmę Megger Instruments, do pomiaru rezystancji elektrod uziemiających, oraz autorski algorytm matematyczny do korekty błędów pomiarowych, wdrożone w urządzeniu DET14C,

57

- seria transformatorów wysokonapięciowych (5–15 kV) wdrożonych w probierczych przetwornicach impulsowych o dużej stabilności napięcia wyjścia (10 ppm), używanych w przenośnych miernikach rezystancji izolacji produkowanych przez firmę Megger Instruments,
- miniaturowe transformatory probiercze (600–1000 V) wykonane w technologii obwodów drukowanych wdrożone w mniejszych instrumentach pomiarowych produkowanych przez firmę Megger Instruments, których konstrukcja jest przedmiotem przyznanego patentu GB2517015,
- obwód magnetyczny nagrzewnicy indukcyjnej do nagrzewania zbiornika probierczego, wdrożony w firmie Megger Instruments w instrumencie OTD do pomiarów jakości oleju transformatorowego metodą kąta stratności tangens delta. Rozwiązanie łączy zwiększoną jednorodność rozkładu temperatury podczas nagrzewania i możliwość chłodzenia po zakończonym pomiarze; konstrukcja jest przedmiotem uzyskanego patentu GB2539674,
- autorska metoda obliczania rozkładu temperatury podczas nagrzewania i chłodzenia zbiornika probierczego (patrz wyżej), wykorzystująca niekomercyjne narzędzie metody elementów skończonych, poprzez wykonanie skryptu łączącego iteracyjnie symulacje cieplne i magnetyczne,
- system wykorzystujący autorski algorytm iteracyjnego cyfrowego sprzężenia zwrotnego [C3] do pomiarów własności magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich w oparciu o normę międzynarodową [27]. System ten jest używany do wewnętrznych badań materiałowych w miejscu pracy Wnioskodawcy.

c) udzielone patenty międzynarodowe lub krajowe

- Żurek S., Clark S., Francis I., Chin F., *Transformer (Planar flyback transformer system with low turns ratio and high voltage output)*, GB2517015, 2015,
- Żurek S., Francis I., Clark S., et al., *Differential current transformer*, GB2525692, 2015,
- Courtney A., Żurek S., Haynes S., *Test apparatus and method for testing an electrical property of a fluid*, GB2539674, 2016,
- Pluta W., Rygal R., Żurek S., *Układ do pomiaru napięcia przemiennego z separacją galwaniczną*, PL229896, 2018,
- Żurek S., *Test apparatus (Flexible current sensor with effective magnetic permeability maintained during flexing)*, GB2562278, (intention to grant 2019-05-01),

Pozostałe aktywne zgłoszenia patentowe:

- Żurek S., *Test apparatus (Current sensor with core of overlapping elements)*, GB2562279, 2017,
- Żurek S., Jones J., *Test apparatus (Measuring an electrical parameter and its confidence level)*, GB2562720, 2017,
- Żurek S., Jones J., Hadley M., *Test apparatus*, GB1809969.7, 2018,
- Żurek S., *Test apparatus*, GB1818500.9, 2018,
- Aaronovitch S., Żurek S., *Test apparatus*, GB1818581.9, 2018,
- Wardak R., Żurek S., *Test apparatus*, GB1900835.8, 2019,
- Jones J., Żurek S., *Test apparatus*, GB1901164.2, 2019,

d) wynalazki, wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach

- Wzór przemysłowy Hadley M., Żurek S., Newman S., *Graphical user interfaces*, 004735983-0001, 2018 interfejsu użytkownika wskazujący postęp pomiaru impedancji pętli zwarcia, wykonywany algorytmem, który jest przedmiotem osobnego zgłoszenia patentowego (GB2562720). Połączenie tych innowacji jest oznaczone znakiem towarowym *Confidence Meter™*, którego zastosowanie w wielofunkcyjnym instrumencie pomiarowym MFT1741 produkowanym przez firmę Megger Instruments było powodem przyznania nagrody *Trade tool of the year 2018* w Wielkiej Brytanii. Urządzenie MFT1741 było wystawiane m.in. na targach ELEX Show, w Coventry w 2018 r. i Manchester 2019 r (Wielka Brytania).

— oraz kryteria określone w § 4.

§ 4. Kryteria oceny w zakresie osiągnięć naukowo-badawczych habilitanta we wszystkich obszarach wiedzy obejmują:

1) autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopiśmie międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazach lub na liście, o których mowa w § 3, dla danego obszaru wiedzy

57

Dotychczasowy całkowity dorobek obejmuje ponad 50 recenzowanych prac na temat różnych zagadnień magnetyzmu, opublikowanych w następujących czasopismach:

- IEEE Transactions on Magnetics (9, w tym samodzielnych 3),
- Journal of Magnetism and Magnetic Materials (6),
- IET Science, Measurement and Technology (3, w tym samodzielnych 1),
- IEEE Sensors Journal (1, w tym samodzielnych 1),
- International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (3, w tym samodzielnych 2),
- Sensors and Actuators A: Physical (3),
- Przegląd Elektrotechniczny (16, w tym samodzielnych 6),
- Journal of Electrical Engineering - Elektrotechnický časopis (3, w tym samodzielnych 1),
- Journal of Optoelectronics and Advanced Materials (1),
- Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science (1),
- Transformers Magazine (5, w tym samodzielnych 5),

oraz

- współpraca z Prof. S. Tumańskim z Politechniki Warszawskiej nad jego książkami:
 - *Principles of electrical measurement* (w zakresie korekty oraz współtworzenia podrozdziału 6.7.2 *The arbitrary wave excitation systems*, 2006),
 - *Handbook of magnetic measurements* (w zakresie korekty oraz współtworząc podrozdziały 5.1.7 *Rotational power loss* oraz 5.1.8 *Two-dimensional properties*, 2011).
- współpraca (w zakresie udostępnienia danych własnych pomiarów 2D dla różnych gatunków blach elektrotechnicznych) przy dwutomowej książce: A. Moses, K. Jenkins, P. Anderson, H. Stanbury, *Electrical steels, Volume 1: Fundamentals and basic concepts, Volume 2: Performance and applications*, IET, Power and Energy Series, London, ISBN 978-1-78561-974-8.

2) autorstwo lub współautorstwo odpowiednio dla danego obszaru: opracowań zbiorowych, katalogów zbiorów, dokumentacji prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych

- ekspertyza naukowa w zakresie implikacji użycia cyfrowego sprzężenia zwrotnego do pomiarów magnetycznych, zlecona przez komitet techniczny IEC TC68 (2006),

3) sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy *Journal Citation Reports (JCR)*, zgodnie z rokiem opublikowania;

4) liczbę cytowań publikacji według bazy *Web of Science (WoS)*;

5) indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy *Web of Science (WoS)*;

- sumaryczny impact factor wszystkich publikacji, zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 33,45, a sumaryczna liczba punktów MNiSW wynosi 719,
- baza *Web of Science Core Collection* indeksuje 39 prac, cytowanych 229 razy, w tym 189 bez cytowań własnych, z indeksem Hirscha wynoszącym 9 (stan na dzień 2019-03-29),
- baza Google Scholar indeksuje 79 prac, cytowanych 506 razy, z indeksem Hirscha równym 12,

6) kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

- udział w dwóch projektach badawczych współsponsorowanych przez *Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC)*, Wielka Brytania) i podmioty przemysłowe:
 - *GR/R2869/01, Measurement and prediction of magnetic properties of wound cores under distorted flux at medium frequency* (2004-2005) – projekt poświęcony badaniom i predykcji własności magnetycznych rdzeni toroidalnych został sklasyfikowany z ponadprzeciętną oceną uzyskanych wyników badawczych (*tending to outstanding*). W ramach projektu Wnioskodawca zaprojektował i wykonał program komputerowy sztucznej sieci neuronowej w środowisku LabVIEW. Program ten został udostępniony innym użytkownikom środowiska LabVIEW i na przestrzeni lat został użyty przez ok. 500 osób z różnych ośrodków w świecie,
 - *EP/C518616/1, A unified approach to characterisation of energy efficient soft magnetic materials* (2004-2008) – projekt poświęcony badaniom nad udoskonaleniem własności magnetycznych blach elektrotechnicznych w kierunku zwiększenia sprawności energetycznej,

7) międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność odpowiednio naukową albo artystyczną

- stworzenie i zaimplementowanie autorskiego narzędzia do predykcji własności magnetycznych rdzeni magnetycznych wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe pozwoliło na uzyskanie drugiej nagrody w konkursie zastosowania LabVIEW w Dublinie (2006).

SE

- udział w prestiżowej konferencji dla młodych naukowców *SET for Britain* organizowaną w budynku brytyjskiego parlamentu *House of Commons* (2006),

8) wygłoszenie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

- *Soft Magnetic Materials* (2003, 2007, 2011),
- *European Conference on Magnetic Sensors and Actuators* (2004),
- *International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing* (2006, 2008 invited, 2014, 2018 invited),
- *LabVIEW in the Curriculum* (2006)
- *Symposium Pomiarów Magnetycznych* (2006),
- *UK Magnetism Society Seminar* (2007, 2015),
- *Compumag* (2007),
- *Electromagnetic Nondestructive Evaluation Workshop* (2007),
- *Intermag* (2008),
- *Symposium of Magnetic Measurements* (2016).

§ 5. Kryteria oceny w zakresie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej habilitanta we wszystkich obszarach wiedzy obejmują:

1) uczestnictwo w programach europejskich i innych programach międzynarodowych lub krajowych;

- opiekun polskich studentów na stażach w Wolfson Centre for Magnetism (Wielka Brytania) w ramach europejskiego programu Erasmus (lata 2002-2008, 10 studentów, z których 5 kontynuowało edukację w Wolfson Centre for Magnetism i uzyskało stopień doktora),

2) udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych lub udział w komitetach organizacyjnych tych konferencji;

- członek lokalnego komitetu organizacyjnego konferencji *Soft Magnetic Materials* w 2007 r. w Cardiff, odpowiedzialny za proces recenzji artykułów konferencyjnych w czasopiśmie *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, współedytor (z Prof. A. Mosesem) wydania *Volume 320, Issue 20*,
- członek lokalnego komitetu organizacyjnego konferencji *Electromagnetic Nondestructive Evaluation Workshop* w 2007 r. w Cardiff (przewodniczący komitetu był Prof. D. Jiles, ówczesny dyrektor Wolfson Centre for Magnetism),
- członek lokalnego komitetu organizacyjnego konferencji *International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing* w 2008 r. w Cardiff,
- edytor wydania NR 1/2009 Przeglądu Elektrotechnicznego,

3) otrzymane nagrody i wyróżnienia;

- 2019 – nagroda *Trade tool of the year* za produkt z technologią *Confidence Meter™*,
- 2010 – przyznanie stopnia *Senior Member IEEE*,
- 2006 – druga nagroda w konkursie artykułów na konferencji *LabVIEW in the Curriculum*,
- 2001 – prestiżowe stypendium *Overseas Research Students Awards Scheme* dla wyróżniających się studentów międzynarodowych,

4) udział w konsorcjach i sieciach badawczych

- 2011–2012, reprezentant firmy Megger Instruments dla *External Advisory Board* dla *Wolfson Centre for Magnetism*, która obejmowała m.in. dużych producentów blach elektrotechnicznych jak również i inne jednostki wykorzystujące materiały magnetyczne w przemyśle,

5) kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych, a w przypadku badań stosowanych we współpracy z przedsiębiorcami;

- kierowanie wspólnymi badaniami porównawczymi w zakresie pomiarów stratości obrotowej, wykonanymi w *Wolfson Centre for Magnetism* (Wielka Brytania) oraz *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (Włochy). Wyniki tych badań zostały opublikowane jako [B5],
- prowadzenie badań w Cardiff University dla firmy Megger Instruments w zakresie dokładności pomiaru przy użyciu cęg pomiarowych,
- kierowanie pracami rozwojowymi i projektami badawczymi na stanowisku *Head of Research and Innovation* w firmie *Megger Instruments* w ramach wykorzystania technologii elektromagnetycznych do pomiarów elektrycznych,

52

6) udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

- członek Komitetu Redakcyjnego czasopisma *Electrical Engineering and Power Engineering*,

7) członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych

- SEP (Stowarzyszenia Elektryków Polskich) w latach 2000-2005,
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) od 2000 r., od 2010 r. – *Senior Member*,
- IET (Institution of Engineering and Technology) od marca 2019 r.,

8) osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki

- autor książki do samokształcenia w zakresie języka angielskiego, pt. *Błyskawiczny angielski w praktyce*, ISBN 978-83-63435-45-5,
- prowadzenie zajęć w laboratoriach z zakresu elektroniki i teorii sterowania, w trakcie realizacji doktoratu w Cardiff University (2001-2004),
- prowadzenie szkoleń dla nowych pracowników działu projektowego firmy Megger Instruments z zakresu produkowanych instrumentów pomiarowych i używanych technologii (od 2013),

9) opiekę naukową nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji

- promotor pomocniczy na stopień *Bachelor of Science, BSc* (Cardiff University 2004-2005),
- mentor dla 4 pracowników działu projektowego firmy Megger Instruments, studiujących w *Greenwich University* i *Open University*, (od 2008),

10) opiekę naukową nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego, z podaniem tytułów rozpraw doktorskich

- współudział w charakterze promotora pomocniczego (2007–2008) dla Sakda Somkun, tytuł rozprawy doktorskiej: *Magnetostriction and magnetic anisotropy in non-oriented electrical steels and stator core laminations* (data egzaminu 2010 r., po zmianie miejsca pracy z Cardiff University na Megger Instruments),

11) staże w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

- staż naukowy w Wolfson Centre for Magnetism (w okresie od 01.10.2000 do 31.12.2000), School of Engineering, Cardiff University, Wielka Brytania,

12) wykonanie ekspertyz lub innych opracowań na zamówienie organów władzy publicznej, samorządu terytorialnego, podmiotów realizujących zadania publiczne lub przedsiębiorców;

- tłumaczenie na język angielski polskiej normy PN-T-06580-1 *Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz* dla Centrum Szkolenia Studyjnego, Departamentu Administracji Publicznej we Włoszech (2007),

13) udział w zespołach eksperckich i konkursowych

- pomysłodawca i naczelny edytor portalu *Encyclopedia-Magnetica.com* zajmującego się teorią i praktyką zastosowań elektromagnetyzmu (od 2012),

14) recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych oraz publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Recenzent ponad 60 artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie JCR:

- *IEEE Transactions on Magnetism* (27),
- *IEEE Magnetism Letters* (3),
- *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* (3),
- *IET Science, Measurement and Technology* (3),
- *Przegląd Elektrotechniczny* (15),
- *IET Electric Power Applications* (7),
- *IET Circuits, Devices and Systems* (2),
- *IET Generation, Transmission & Distribution* (2),
- *International Conference on Magnetism* (2),
- *Electronics Letters* (1),
- *Facta Universitatis-Series Electronics and Energetics* (2).

SŁ

Literatura

- [1] Waide P., et al., *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems*, International Energy Agency, 2011
- [2] Moses A.J., *Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization*, Scripta Materialia, 67, 2012, p. 560
- [3] IEC 60034-30-1, *Rotating electrical machines, Efficiency classes of line operated AC motors*
- [4] IEC-60076-20, *Power transformers, Energy efficiency*
- [5] Shilyashki G., et al., *Numerical prediction of rhombic rotational magnetization patterns in a transformer core package*, IEEE T. Magnetics, 52 (1), 2015, p. 7200110
- [6] Anuszczyk J.W., et al., *Ferromagnetyki miękkie w polach obrotowych, Badania i właściwości*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009
- [7] Moses A.J., et al., *Problems in the design of power transformers*, IEEE T. Magnetics, 10 (2), 1974, p. 148
- [8] Moses A.J., *The spatial variation of localized power loss in two practical transformer T-joints*, IEEE T. Magnetics, 9 (4), 1974, p. 655
- [9] Jezierski E., *Transformatory*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1975
- [10] Bozorth R., *Ferromagnetism*, IEEE Press, Nowy Jork, 2003, ISBN 0-7803-1031-2
- [11] Chikazumi S., *Physics of ferromagnetism*, Oxford University Press, Oxford, 2002
- [12] Preisach F., *O efekcie magnetycznym (po niemiecku: Über die magnetische Nachwirkung)*, Zeitschrift für Physik, 94 (5-6), 1935, p. 277
- [13] Jiles D., et al., *Ferromagnetic hysteresis*, IEEE T. Magnetics, 19 (5), 1983, p. 2183
- [14] Bertotti G., *General properties of power losses in soft ferromagnetic materials*, IEEE T. Magnetics, 24 (1), 1988, p. 621
- [15] Chan J., et al., *Nonlinear transformer model for circuit simulation*, IEEE T. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 10 (4), 1991, p. 476
- [16] Zirka S., et al., *Viscosity-based magnetodynamic model of soft magnetic materials*, IEEE T. Magnetics, 42 (9), 2006, p. 2121
- [17] Mayergoyz I., *Mathematical models of hysteresis*, IEEE T. Magnetics, 22 (5), 1986, p. 603
- [18] Dlala E., *Efficient magnetodynamic lamination model for two-dimensional field simulation of rotating electrical machines*, J. Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320 (20), 2008, p. e1006
- [19] Shimoji H., et al., *A new modeling of the vector magnetic property*, IEEE T. Magnetics, 38 (2), 2002, p. 861
- [20] Chwastek K., et al., *Anisotropic properties of electrical steels*, 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, 2015
- [21] Pluta W., et al., *Prediction of angular variation of specific total loss of Goss oriented electrical steel*, Physica B: Condensed Matter, Vol. 544, 2018, p. 28
- [22] Meeker D., *Finite Element Method Magnetics*, FEMM, dostep 2019-03-01: <http://femm.info>
- [23] ANSYS, *Maxwell V16 Training Manual*, 2013
- [24] COMSOL, *Vector hysteresis modelling*, App. ID 20671
- [25] IEC 60404-2, *Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame*
- [26] IEC 60404-3, *Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*
- [27] IEC 60404-6, *Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens*
- [28] Fiorillo F., *Measurement and characterisation of magnetic materials*, Elsevier Academic Press, 2004
- [29] Ahlers H., et al., *The uncertainties of magnetic properties measurements of electrical sheet steel*, J. Magnetism and Magnetic Materials, 215-216, 2000, p. 711
- [30] Tumański S., *Handbook of magnetic materials*, CRC Press, 2011
- [31] Gozdur R., et al., *Comparison of power loss measurements in grain-oriented steels*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, NR 7/2017, 2017, p. 48
- [32] Majocha A., et al., *Mostkowa metoda pomiaru stratności materiałów magnetycznie miękkich*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, NR 4/2010, p. 79
- [33] Bailly F., *The hysteresis of iron and steel in a rotating magnetic field*, R. Society of London, 187, 1897, p. 715
- [34] Sievert J., et al., *European intercomparison of measurements of rotational power loss in electrical steel*, J. Magnetism and Magnetic Materials, 160, 1996, p. 115
- [35] Goričan V., et al., *Performance of round rotational single sheet tester (RSSST) at higher flux densities in the case of GO materials*, Proceedings of 7th I&2DM, 2002
- [36] Bottauscio O., et al., *Space and time distribution of magnetic field in 2D magnetizers*, Przegląd Elektrotechniczny, R.81 Nr 5/2005, 2005, p. 8,
- [37] Wanjiku J.G., *Design considerations of 2-D magnetizers for high flux density measurements*, 2014 IEEE ECCE, 2014, p. 4204,
- [38] Cogent, *Electrical Steel Grain Oriented*, Unisil, Unisil-H, 2002,
- [39] Beckley P., *Electrical steels*, European Electrical Steels, Newport, UK, 2000
- [40] Sołtński M., *Application of the anisometric method for determining polar curves of induction, apparent core loss and core loss in cold-rolled electrical sheets of Goss texture*, IEEE T. Magnetics, 20 (1), 1984, p. 172
- [41] Zbrozczyk J., et al., *Angular distribution of rotational hysteresis losses in Fe-3.25%Si single crystals with orientations (001) and (011)*, IEEE T. Magnetics, Vol. 17 (3), 1981, p. 1275
- [42] Gozdur R., *Wyznaczanie quasi-statycznej pętli histerezy blach elektrotechnicznych*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 80, NR 2/2004, 2004, p. 147
- [43] Nakata T., et al., *Improvement of measuring accuracy of magnetic field strength in single sheet testers by using two H coils*, IEEE T. Magnetics, 23 (5), 1987, p. 2596
- [44] Zhu J.G. et al., *Measurement of magnetic properties under 3-D magnetic excitations*, IEEE T. Magnetics, 39 (5), 2003, p. 3429

S Z