

Selekcjonowanie mocy strat blach transformatorowych w obwodach magnetycznych zamkniętych i otwartych

Zbigniew H. Żurek, Barbara Solecka, Zbigniew Stokłosa, Piotr Wolnik, Bartosz Chmiela

1. Wstęp

Współczesne blachy stali krzemowej zawierają średnio 2,4% krzemu. Podstawowe gatunki stali są produkowane o ziarnie niezorientowanym i ziarnie zorientowanym (*non-grain orientation* – NGO, *grain orientation* – GO). Stale GO produkowane są dla transformatorów, a stale NGO dla maszyn elektrycznych.

Obecnie blachy transformatorowe produkowane są w zakresie grubości znormalizowanych od 0,23 do 0,33 mm. Natomiast w fazie testów są już blachy o grubości 0,18 mm. Przenikalność magnetyczna, przewodność elektryczna, indukcja nasycenia oraz stratność są istotnymi parametrami ze względu na rodzaj produkcji. Blachy o strukturze krystalicznej niezorientowanej (izotropowej) produkowane są głównie jako prądnicowe w przedziale grubości 0,35 mm do 0,65 mm. Na stratność blach ma wpływ ich grubość, zawartość krzemu, dodatki stopowe oraz specjalistyczna obróbka laserowa, chemiczna czy termiczna modyfikująca nie tylko ziarnistość blach, ale strukturę domenową.

Jakość blach weryfikuje się za pomocą aparatów Epsteina IEC (60404-10) lub SST [2, 3, 4, 5].

Na rysunku 2 pokazano urządzenia Epstein i Brockhaus [2] pracujące w systemie SST. Za pomocą układu pomiarowego można wyznaczyć straty magnetyczne w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 100 Hz dla polaryzacji magnetycznej od 1,3 do 1,8 T w stalach o ziarnach zorientowanych (GO).

W niniejszej pracy zaprezentowano metodę pomiaru impedancji w niskich częstotliwościach do kontrolowania parametrów magnetycznych pojedynczych blach transformatorowych za

Streszczenie: Moc strat jest podstawowym parametrem przy projektowaniu maszyn i urządzeń elektrycznych. W przemyśle spotyka się blachy różnych producentów z różnych serii, dlatego zachodzi konieczność wstępnego szybkiego ich selekcjonowania pod względem mocy strat całkowitych. Oprócz metod Epsteina, międzynarodowe normy dopuszczają pomiary na pojedynczych arkuszach czy pasmach w metodach Single Sheet Testing (SST) dla grain-oriented Fe-Si sheet steel. W artykule porównano realizacje zastosowań koncepcji fizycznych i zastosowań NDT selekcjonowania stratności całkowitej blach transformatorowych z pomiaru składowych impedancji na pojedynczych próbkach paskowych otwar-

tych i pojedynczych arkuszach blach. Do badań użyto arkuszy blach transformatorowych M130 z różnych serii poprodukcyjnych. Pomiary parametrów arkuszy blach transformatorowych wykonano na urządzeniu pomiarowym BROCKHAUS STS zgodnie z normami IEC 6040. Mostkiem pomiarowym AGILENT 4294A wyznaczano składowe impedancje cewki pomiarowej PCB (Texas Instrument) przylegającej do arkusza blachy. Niezależnie badano paski blachy transformatorowej (próbki otwarte) w solenoidzie. Pomiary wykonano w zakresie częstotliwości do 4 MHz. Pomiar w zakresie częstotliwości rezonansowej miał na celu ocenę użyteczności sondy pomiarowej LDC (TI) z cewką spiralną PCB.

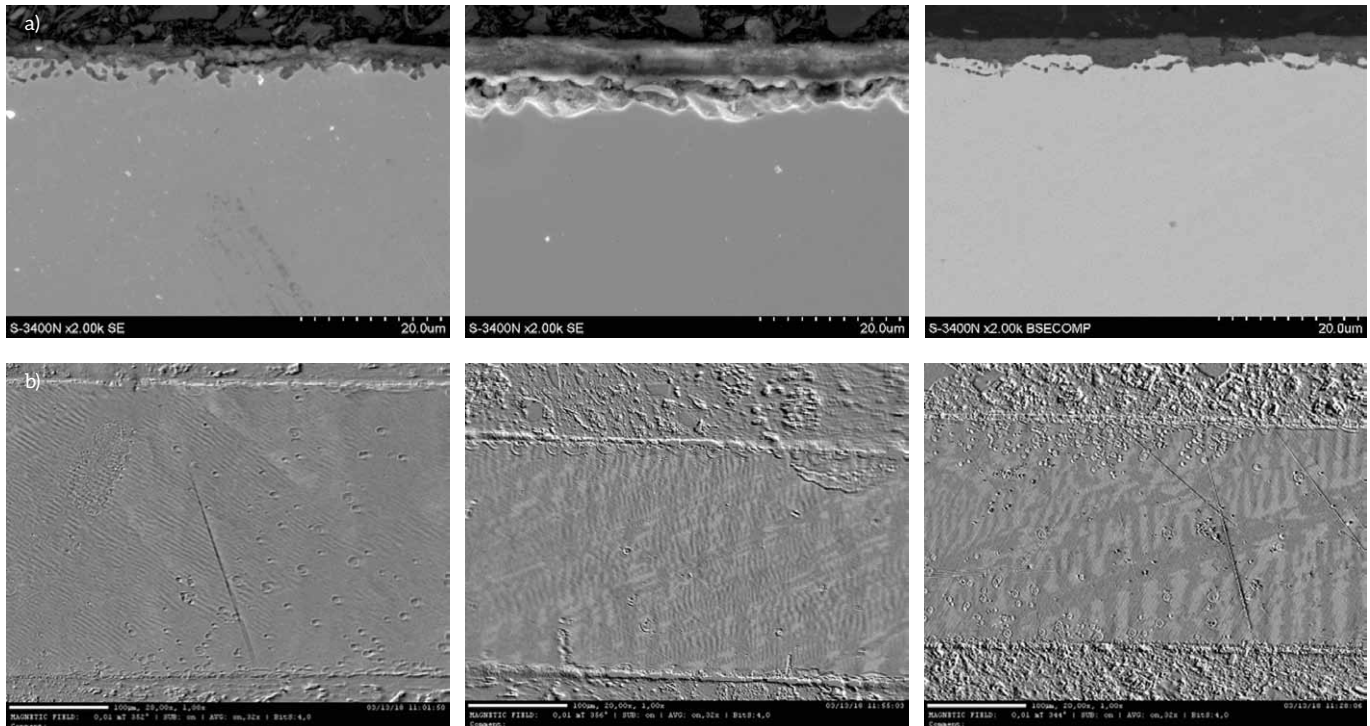
Abstract: Power loss is the basic parameter important for designers, in the construction of electrical machines and equipment. There are different magnetic steel sheets by various designers with various production series produced by industry. Therefore, it is necessary to pre-fast select them according to their total power loss. In this case, several methods are allowed by international standards, besides the Epstein apparatus (i. e. Single Sheet Tester (SST) for grain-oriented Fe-Si sheet steel). In the present paper, the comparison between the implementation of the physical concept and NDT applications and selection of total power loss of transformer sheets was discussed. Investigations were carried out for single open strip samples and single

transformer sheets by measured complex impedance components. M 130 type transformer sheets from different post-production series were used. The measurements of these sheets were carried out by applying BROCKHAUS STS system according to the IEC 6040 standard. The complex components of impedance for a measure coil PCB (Texas Instrument), adhering to the sheet, were also measured by applying the precision RLC meter (AGILENT 4294A). Independently, the open strip samples were measured in a solenoid coil for the frequency up to 4 MHz. The resonant frequency measurements were carried out in order to test the LDC (TI) probe with a spiral measuring coil PCB.

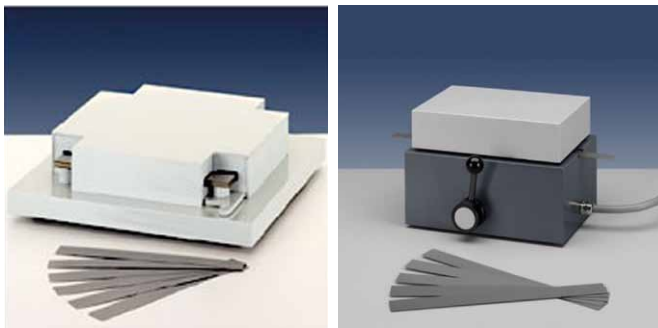
pomocą mostka RLC (AGILENT 4294A) i precyzyjnego konwertera impedancji LDC 1000 (TI) [1].

2. Problem badawczy

Parametry magnetyczne stali NGO i GO są testowane podczas procesu



Rys. 1. Przykładowe przekroje poprzeczne blach transformatorowych z widoczną warstwą izolatora – a, oraz struktury domenowe przekroju poprzecznego stali o ziarnie zorientowanym (Grain Oriented)



Rys. 2. Od lewej urządzenie EPSTEIN i BROCKHAUS pracujące w systemie SST [2]

produkcji. Zgodnie z obowiązującymi normami pomiary prowadzone są w obwodach magnetycznych zamkniętych. Magnetyczna stal krzemowa jest bardzo wrażliwa na resztkowe naprężenia i przegrzanie. Zastosowane dodatkowe metody NDE są wrażliwe na naprężenia resztkowe w blachach. Do badań dodatkowych zastosowano precyzyjny mostek pomiarowy i sondę z przetwornikiem LDC 1000 [1, 3, 6]. Cewka pomiarowa PCB produkcji Teksas Instrument posłużyła do pomiarów na obu stanowiskach. Pomiar w obwodach magnetycznych z próbką otwartą jest obciążony wieloma czynnikami wpływającymi na błąd pomiaru. Należy w pierwszym kroku uwzględnić współczynnik odmagnesowania próbki N ze względu na jej wymiary, a także uwzględnić w koncepcji fizycznej znaczący wpływ współczynnika wypełnienia cewki materiałem próbki, a dla arkusza blach współczynnik odmagnesowania

i sprzężenia. Dla przedstawionych założeń zadanie jest trudne do realizacji. Zostało podjęte ze względu na wcześniejsze zadawalające wyniki badań w transporcie szynowym i przemyśle. Na rysunku 3 przedstawiono urządzenia użyte w dodatkowych badaniach selekcyjonowania blach.

3. Materiał badań

Parametry blach, składu stali oraz powłok badano na urządzeniach BROCKHAUS i mikroskopie OLIMPUS z analizą spektralną. Wyniki uzyskane dla częstotliwości 50 Hz zamieszczono w tabeli 1.

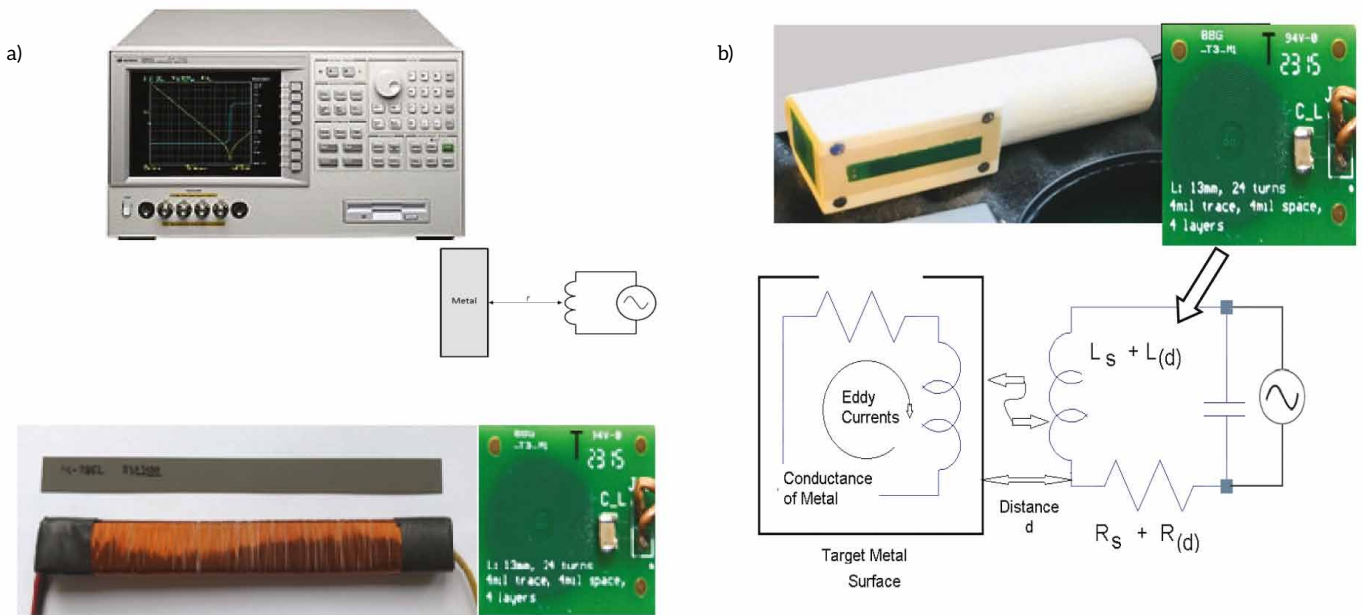
Stosowane są zakresy częstotliwości do 150 Hz w polach od 5 A/m do 30 kA/m. Na linii produkcyjnej stosuje się pomiar na całej szerokości taśmy (EBA) w obwodzie zamkniętym (*double yoke*). Metody pomiarowe SST są nadal badane [4].

4. Metodyka pomiarów

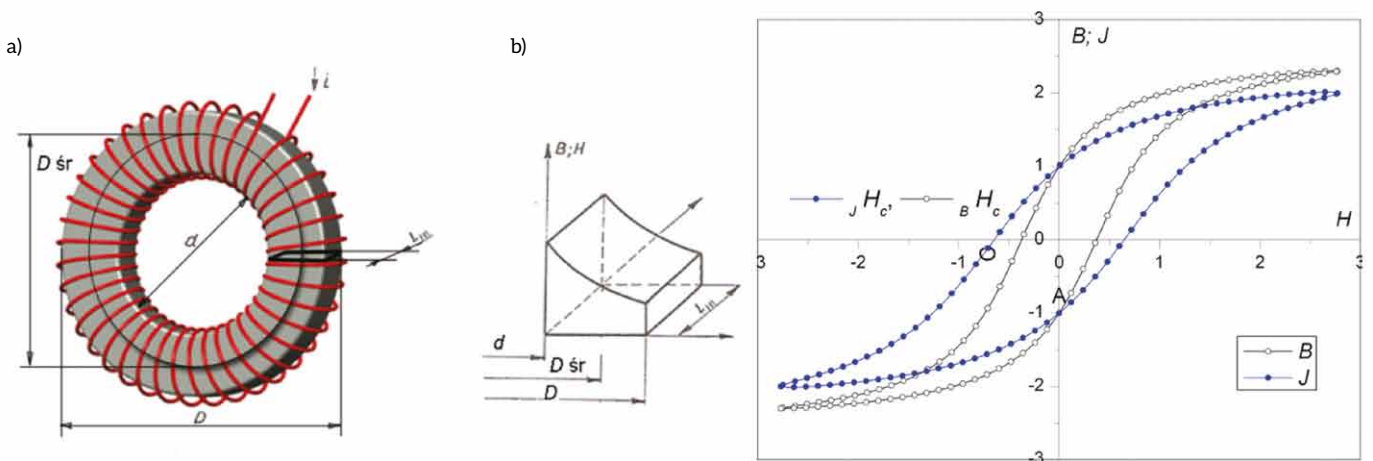
Metodykę pomiaru wsparto rozwiązaniami inżynierskimi. Toroid (rys. 4) jest najlepszą formą badania materiału. Sposób pomiaru obciążony jest wpływem na zmiany parametrów magnetycznych w wyniku obróbki, jak wycinanie z materiału, bez względu na zastosowaną technikę (naprężenia własne technologiczne). Kształtem mniej narażonym, ale nie wolnym od naprężeń resztkowych (cięcie), jest próbka otwarta jak na rysunku 5. Najczęstsze zastosowanie mają prądy wirowe. Są przedmiotem analiz matematycznych i laboratoryjnych [7]. Dla próbek prostokątnych (rys. 5) obliczenie współczynnika odmagnesowania opracowane przez Josepha i Shlömanna jest zależnością bardzo złożoną, co zostało

Tabela 1. Badane blachy transformatorowe

Próbka blachy	Blacha/S30	Grubość [mm]	Masa [g]	P _c (1,5 T) [W/kg]	P _c (1,7 T) [W/kg]	Skład stali	Skład powłoki
b	M130	0,298	93,1	0,780	1,087	2.4 Si, 97,7 Fe	Si (29) P (54) , Al., Mg, Cr,
c	M130	0,302	94,4	0,835	1,185	2.4 Si, 97,7 Fe	Si (29) P (54) , Al., Mg, Cr,



Rys. 3. Zastosowane urządzenia i narzędzia: a – precyzyjny mostek RLC (AGILENT 4294A) i zastosowane cewki pomiarowe; b – sonda z przetwornikiem LDC 1000 i cewką PCB oraz zasada pomiaru



Rys. 4. Zasada pomiaru pętli histerezy magnetycznej próbki toroidalnej



Rys. 5. Próbkę otwartą – schemat i realizacja – oraz próbkę spiralną PCB

omówione w monografii [9]. Próbkę płaskie spiralne są stosowane w badaniach nieniszczących [10], ale charakteryzuje je wysokie odmagnesowanie.

Zespoloną przenikalność magnetyczną w funkcji częstotliwości pola magnesującego wyznaczono dla 1, 5, 10, 50 i 100 A/m. Próbkę umieszczono w cewce o indukcyjności L (L_s) równej $L = \mu_r \mu_0 F$ (gdzie: $F = N^2 S/l$; S – przekrój próbki; l – długość próbki; N – liczba zwojów; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m (przenikalność magnetyczna próżni), dla której impedancja Z wynosi: $Z = R - R_0 + i\omega(L - L_0)$ (gdzie R_0 (R_{S_0}) i R (R_s) są rezystancjami cewki pustej i cewki z próbką; L_0 (L_{S_0}) – indukcyjność cewki pustej; ω – pulsacja pola magnetycznego oraz $i^2 = -1$) [9]. Zespoloną przenikalność magnetyczną $\hat{\mu}$ można zapisać jako:

$$\hat{\mu} = \frac{Z - Z_0}{i\omega F} = \frac{R - R_0 + i\omega(L - L_0)}{i\omega F} = \frac{L}{F} - \frac{iR_{cor}}{\omega F} = \mu_{Re} - i\mu_{Im} \quad (1)$$

gdzie $R_{cor} = R - R_0$ jest rezystancją rdzenia (próbki). Wtedy tangens kąta strat magnetycznych:

$$\text{tg}\delta = \frac{\mu_{Im}}{\mu_{Re}} = \frac{R_{cor}}{\omega L} \quad (2)$$

Część rzeczywista przenikalności magnetycznej μ_{Re} wynosi:

$$\mu_{Re} = \frac{(L - L_0)l}{\mu_0 N^2 S} + \frac{l}{l_a} \quad (3)$$

gdzie l_a jest długością cewki. Dla materiałów magnetycznie miękkich o relatywnie wysokiej przenikalności $l/l_a \cong 1$ można zaniedbać.

Część urojona przenikalności magnetycznej μ_{Im} można wyrazić wzorem:

$$\mu_{Im} = \frac{(R - R_0)l}{\mu_0 N^2 S \omega} \quad (4)$$

Z równań (3) i (4):

$$\mu_{Im} = \frac{(R - R_0)\mu_{Re}}{(L - L_0)\omega} \quad (5)$$

Badanie próbki otwartej wymaga uwzględnienia głównie współczynnika odmagnesowania przy założeniu ścisłego nawinięcia uzwojenia na jej długości bez szczeliny powietrznej.

W realizacji inżynierskiej moc strat magnetycznych w W/kg wyznaczana jest jako funkcja natężenia pola magnetycznego H , przenikalności magnetycznej próbki $\mu_0 \mu_{Re}$ gęstości materiału g i tangensa kąta stratności magnetycznej $\text{tg}\delta$ w zależności od częstotliwości:

$$P_m = \frac{H^2 \mu_{Re} \mu_0 \cdot 2\pi f}{g} \cdot \text{tg}\delta \quad (6)$$

Składowe impedancji dla szeregowego układu pomiarowego (serial) L_s , R_s cewki z materiałem (L , R) i dla cewki powietrznej L_{S_0} , R_{S_0} (L_0 , R_0) zostały zmierzone na stanowisku pomiarowym AGILENT 4294A. Z wyników wyznaczono unormowane składowe impedancji zdefiniowane przez Förstera, a zastosowane dla NDT w wielu zagadnieniach przemysłowych [5, 10]. Napięcie na uzwojeniu cewki (PCB) przed włożeniem próbki wynosi ε_0 , a po włożeniu próbki ε zmienia się proporcjonalnie do zmian impedancji łącznej cewki i materiału.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{Z}{\omega L_0} = j(1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{sk}) \quad (7)$$

Unormowane składowe impedancji są opisane wzorami Förstera, przytoczonymi w pracy [10]

$$\frac{\text{Re } \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{R_s - R_{S_0}}{\omega L_{S_0}} = \eta \mu_r (-\text{Im } \mu_{sk}) \quad (8)$$

reklama

reklama

$$\frac{\text{Im}\underline{\varepsilon}}{\underline{\varepsilon}_0} = \frac{\omega L_s}{\omega L_{s_0}} = 1 - \eta + \eta \mu_r (\text{Re} \underline{\mu}_{sk}) \quad (9)$$

gdzie: μ_r – przenikalność magnetyczna względna; μ_{eff} – przenikalność magnetyczna efektywna; η – współczynnik wypełnienia cewki. Współczynnik wypełnienia cewki η definiowany jest wzorem (10) jako stosunek średnic próbki D_p i cewki D_s .

$$\eta = (D_p / D_s)^2 \quad (10)$$

Współczynnik odmagnesowania i wypełnienia dla cewki płaskiej można wyznaczyć doświadczalnie. Dla prostych przekrojów próbek można stosować wzory wyprowadzone analitycznie [9].

Zasadę pomiaru modulem LDC 1000 przedstawia rysunek 3 b. Generowane prądy w materiale o przenikalności μ i przewodności γ wpływają na impedancję cewki, zmieniając wartości jej składowej czynnej i bierniej. Indukcyjność szeregową cewki L_s pozostaje indukcyjnością L_a , rezystancja cewki R_s jest powiększona o szeregową rezystancję pasożytniczą $R_{(d)}$. Szeregową rezystancję $R_{(d)}$ jest zależna od odległości d , czyli jest funkcją materiału i odległości d od jego powierzchni.

Związek analityczny pomiędzy cewką płaską w układzie szeregowym opisuje zależność podana przez producenta w instrukcji przetwornika LDC. Związek pomiędzy rezystancją szeregową a równoległą podaje wzór (11) [1]:

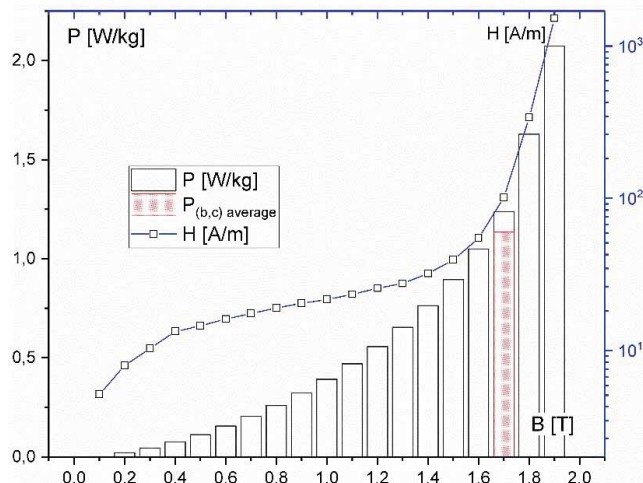
$$R_{p(d)} = \frac{L_s + L_{(d)}}{[R_s + R_{p(d)}] \times C} \quad (11)$$

Precyzyjnym mostkiem pomiarowym wyznaczono zmiany unormowanych składowych impedancji i znormalizowanych składowych impedancji w paśmie pomiarowym przetwornika PCB i w zakresie rezonansu położonego na arkuszu blachy M130. Przetwornikiem LDC pomierzono rezonans pomiędzy cewką płaską PCB położoną na arkuszu blachy M130.

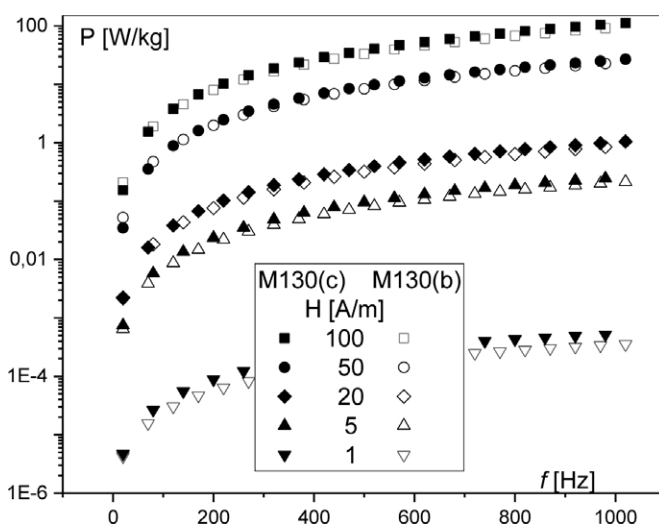
5. Wyniki pomiarów

Wykres gęstości strat P mocy blach M130, dla odpowiednich wartości indukcji B , przy równoważnym natężeniu pola magnetycznego H , z zaznaczonymi punktami pomiarami testowanych blach (tabela 1), pokazano na rysunku 6.

Pomierzono wartość średnią strat mocy dla blach M130 w polu magnetycznym o częstotliwości 50 Hz i natężeniu 100 A/m. Wartość wyliczona ze składowych impedancji pomierzonych precyzyjnym mostkiem AGILENT 4294A [8] jest



Rys. 6. Rozkład normalywnego gęstości strat mocy P i wyznaczonej z pomiaru dla blach M130-30S dla odpowiadających wartości natężenia pola magnetycznego, indukcji przy częstotliwości 50 Hz



Rys. 7. Wyznaczone zakresy strat mocy w zakresie częstotliwości od 20 do 1020 Hz

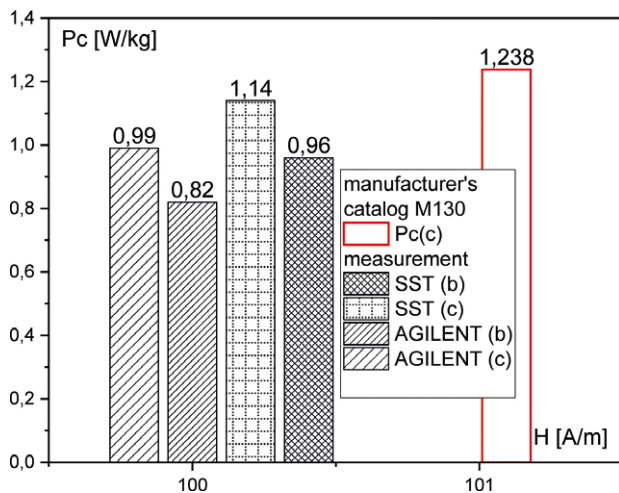
niższa od normalywnego, na co mogą mieć wpływ dodatkowe sprzężenia i rozproszenia strumienia cewki oraz jej budowa.

Straty mocy pomierzone (na stanowisku Agilent) w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 1020 Hz w próbkach paskowych 150×10 mm i solenoidzie (rysunek 5) przedstawiono na rysunku 7. W zakresie ograniczonym częstotliwości 50 Hz wartości strat mocy przedstawia rysunek 8.

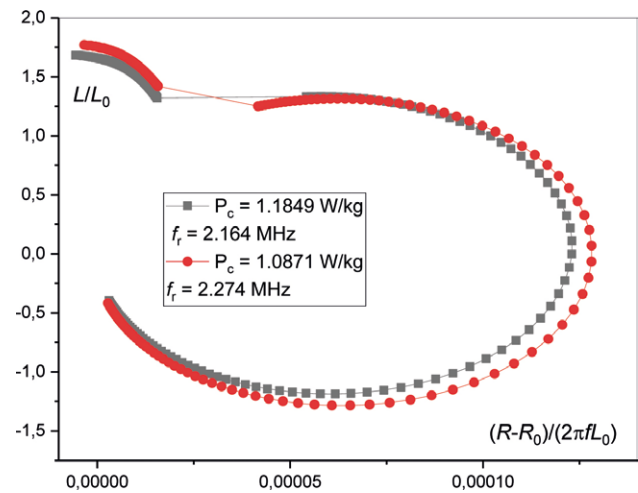
Dokonano również pomiaru wartości rezonansu przetwornika PCB (rys. 5) położonego w środkowej części blach M130-30S, przygotowanych do badań na stanowisku BROCKHAUS

reklama

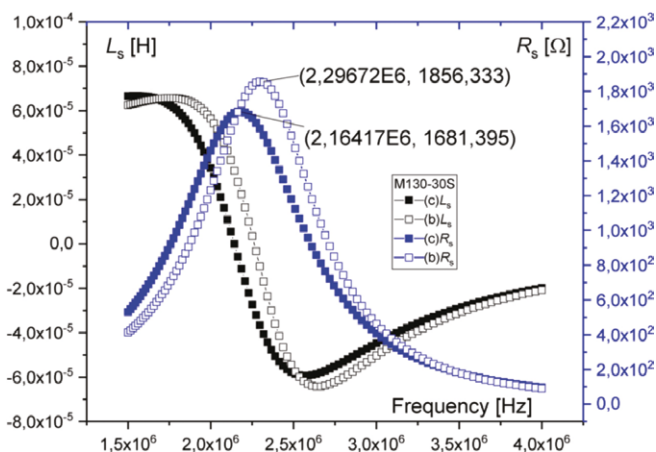
reklama



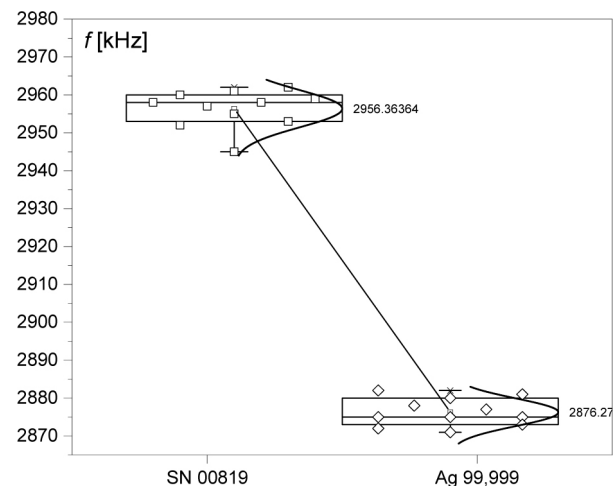
Rys. 8. Porównanie strat mocy z pomiarów na stanowisku SST i stanowisku AGILENT



Rys. 10. Wykres znormalizowanych składowych impedancji dla blach M130-30S



Rys. 9. Przebieg składowych L_s , R_s dla testowanych arkuszy blach M130-30S



Rys. 11. Zarejestrowane rozkłady dla wyników pomiaru rezonansu dla wzorców materiału z miedzi i czystego srebra

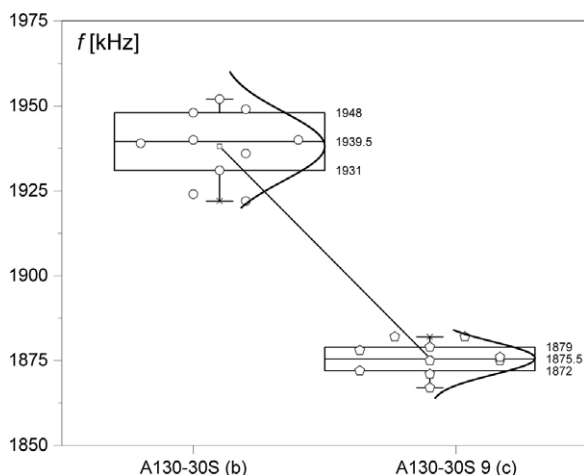
STS 210x210. Zmiany składowych L_s i R_s w przedziale rezonansu, uzyskane z pomiarów na stanowisku AGILENT 4294A, przedstawia rysunek 9. Obserwujemy przesunięcia rezonansów pomiędzy blachami c i b oraz zmiany amplitudy. Dla danej grubości blach określonego typu parametr rezonansu umożliwia także selekcjonowanie blach.

Z danych pomiarowych wyznaczono przebiegi unormowanych składowych impedancji, charakteryzujące zmiany materiału dla badań nieniszczących (NDT, NDE, NDI). Zamieszczony wykres na rysunku 10 przedstawia pomiary w dolnej części pasma do 200 kHz i w przedziale rezonansu.

Pomiary wykonano przetwornikiem LDC 1000 z cewką indukcyjną spiralną (PCB). Sonda LDC oprócz badań

materiałowych znalazła także zastosowanie w detekcji defektów. Walidację stabilności czasowej i powtarzalności pomiarów sondy przeprowadzono na wzorcach materiałów do kalibrowania sondy Förstera do pomiaru przenikalności magnetycznej. Oprócz sondy SN 00818 testowano płytkę próbki z czystego srebra (rys. 11). Badanie możliwości selekcjonowania blach transformatorowych M130-30S testowano serią dziesięciu pomiarów (rys 12).

Wynik uzyskany z pomiaru rezonansu jest istotny statystycznie, jednak wykazana różnica amplitud może świadczyć o mniejszej rozdzielczości pomiarowej w stosunku wartości zmian pomierzonych na urządzeniu BROCKHAUS (tabela 1) i AGILENT 4294A (rys. 3, 9). W celu polepszenia dokładności



Rys. 12. Zarejestrowane rozkłady dla wyników pomiaru rezonansu blach transformatorowych opisanych w tabeli 1

należy unikać przypadkowego namagnesowania lub dokonywać pomiaru po uprzednim rozmagnesowaniu blachy. Pierwszy pomiar dokonany na blasze rozmagnesowanej jest najbardziej zbliżony do wartości statystycznej rezonansu.

6. Wnioski

Przedstawione zadanie jest próbą wskazania na inne możliwości selekcjonowania blach pod względem ich stratności. Precyzyjny pomiar wykonany urządzeniem AGILENT 4294A (Agilent Technologies) wskazuje na różnicę 6% w parametrach częstotliwości wobec 9% zmian stratności blach pomierzonych na urządzeniu BROCKHAUS. Zakresy rezonansu dla sondy LDC są oddalone o 3,5%. Wartość tę po odpowiednim dobraniu parametrów cewki płaskiej PCH można podwyższyć.

Kolejna rozbieżność pomiędzy wartościami rezonansu jest spowodowana kablem pomiarowym pośredniczącym pomiędzy jego dodatkową pojemnością i sprzężeniem indukcyjnym z arkuszem blachy.

Opisany pomiar rezonansu sondą LDC 1000 dla selekcjonowania umożliwia szybkie rozróżnienie stratności mocy blach pomiędzy tymi samymi technologiami i grubościami. Trwają prace nad opracowaniem programu uwzględniającego typ blachy i jej grubość. Dobrą prognozę w selekcjonowaniu blach dają pomiary porównawcze składowych R_s . Składowa ta jest statystycznie znacząca w wyznaczaniu tangensa kąta stratności do obliczania mocy strat w rdzeniach magnetycznych za pomocą pól magnetycznych o niskich natężeniach [5, 9].

Literatura

- [1] http://www.ti.com/tool/ldc1000_evm
- [2] <https://brockhaus.com>
- [3] SIEVERT J.: *The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel – survey on methods and situation of standards.* „Journal of Magnetism and Magnetic Materials”, Volumes 215–216, 2 June 2000, pp. 647–651.
- [4] APPINO I INNI: *International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel.* 13th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing (2014), International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 48, no. 2,3, 2015, pp. 123–133.
- [5] Aplikacje przemysłowe NDTrlc-e
- [6] SCHILDER P.: *Eddy current measurements with the LDC1000EVM digital inductance sensor.* Universities van Amsterdam, Faculty of Science, van der Waals-Zeeman Institute, Report Bachelor Project Physics and Astronomy 2015, <https://esc.fnwi.uva.nl/thesis/centraal/files/f1250956148.pdf>
- [7] MAZLUMI F., SADEGHI S.H.H., MOINI R.: *Using open-ended rectangular waveguide probe for detection and sizing of fatigue cracks in metals.* Electronics Letters, [ieeexplore.ieee.org/iel5/2220/30709/01421182.pdf](https://doi.org/10.1049/iel5/2220/30709/01421182.pdf)
- [8] Agilent Technologies Impedance Measurement Handbook, Agilent Technology Co Ltd. 2006.
- [9] STOKŁOSA Z., KWAPULIŃSKI P., RASEK J., HANECZOK G., KUBISZTAŁ M.: *Magnetic properties and loss separation in Fe76-xAgxNb-2Si13B9 amorphous alloys.* Materials Science and Engineering B 196 (2015) 1–6.
- [10] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *RLC circuits for material testing and NDT.* Institute of Electrical Drivers & Machines KOMEL, 01–2015, ISBN 978-83-931090-8-0, RLCwyd.

✉ Zbigniew H. Żurek – Faculty of transport, Silesian University of Technology, Katowice;
 Barbara Solecka – Institute of Physics CSE, Silesian University of Technology, Katowice;
 Zbigniew Stokłosa – Institute of Materials Science, University of Silesia, Katowice, Chorzów;
 Piotr Wolnik – Schneider Electric Transformers Poland Sp. z o.o., e-mail: piotr.wolnik@schneider-electric.com;
 Bartosz Chmiela – Faculty Of Materials Engineering And Metallurgy, Silesian University Of Technology, Katowice, e-mail: bartosz.chmiela@polsl.pl

artykuł recenzowany

reklama

Napędzaj z nami przemysł

www.nis.com.pl