

Tomasz Lerch, Michał Rad, Witold Rams
AGH w Krakowie

UKŁAD I PROGRAM DO BADANIA CHARAKTERYSTYKI MAGNETYCZNEJ I STRATNOŚCI BLACH (SST-H)

SYSTEM FOR MEASURING THE MAGNETIC CHARACTERISTICS AND POWER LOSS OF THE STEEL SHEET (SST-H)

Streszczenie: Artykuł opisuje zbudowany i przetestowany układ do pomiarów charakterystyki magnetycznej i stratności blach elektrotechnicznych. Przedstawione zostały aspekty stosowania i cechy prezentowanego układu. Opisano również nowatorski algorytm ustalania kształtu napięcia zasilania tak, aby napięcie indukowane w cewce pomiarowej miało kształt sinusoidalny, czego wymagają normy. Przedstawione zostały również przykładowe wyniki pomiarów.

Abstract: The article describes a system for measuring magnetic characteristics and losses of core sheets used in electrical machines. Aspects of application and features of the presented system were presented. Standards requires that voltage waveform on the measuring coil during the test must be sinusoidal. An innovative algorithm for determining the shape of the supply voltage to fulfill this requirements is presented. Sample measurement results were also presented.

Słowa kluczowe: SST, Epstein, histereza, stratność
Keywords: SST, Epstein, hysteresis, core losses

1. Wstęp

Rosnące wymagania, dotyczące sprawności energetycznej maszyn elektrycznych, wymagają zwrócenia coraz większej uwagi na redukcję strat mocy w żelazie. W tym celu wykonuje się obwody magnetyczne z blach o coraz mniejszej stratności nominalnej. Ważna jednak staje się możliwość sprawdzenia, czy materiał dostarczony przez wytwórcę ma deklarowane własności oraz czy sposób obróbki już w zakładzie produkcyjnym nie zmienia znacząco podanych parametrów. Należy również dodać, że dane producenta zwykle ograniczają się do wartości indukcji 1.5 T, podobnie jak duża część dostępnych wyników badań [2,3,4,7]. Natomiast we współczesnych maszynach występują istotnie większe wartości indukcji, a charakterystyki powyżej wartości 1.5 T nie dają się skutecznie przybliżać metodami, które dobre są dla indukcji o niższych wartościach. Do wyznaczania parametrów magnetycznych blach zwykle stosuje się aparat Epsteina. Ma on jednak tę wadę, że podaje wyniki uśrednione dla co najmniej 12 próbek. Tej wady pozbawiony jest przyrząd SST (Single Sheet Tester), gdyż umożliwia on badanie pojedynczych arkuszy blachy. Normalny układ SST przeznaczony jest dla arkusza blachy 500 x 500 mm, a więc też dość dużej próbki. Tutaj opisywany układ nadaje się do

badania pojedynczych pasków blachy o wymiarach dużo mniejszych, ok 30x300mm. Potrzeba badań wpływu naprężeń, odkształceń i procesu technologicznego jest opisywana w literaturze [5].

2. Opis problemu

Zasada działania aparatu Epsteina jest powszechnie znana, a międzynarodowa norma IEC 60404-2:1996 opisująca warunki pomiaru zakłada, że napięcie wtórne (napięcie na cewce pomiarowej) musi mieć kształt sinusoidalny o współczynniku kształtu $1.111 \pm 1\%$. Podobne założenia pomiarowe musi spełniać także tester pojedynczych blach (SST) [1]. Opisywany tutaj tester różni się tym od opisanego w normie, że do pomiaru pola magnetycznego użyto czujniki Hall'a, stąd nazwa SST-H. Inny jest również sposób wzbudzania pola, gdyż zastosowano w nim dwie cewki powietrzne w układzie Helmholtza. Program sterujący w obu układach musi zapewnić w każdym punkcie pomiarowym odpowiednią wielkość i kształt napięcia sterującego, przy czym kształt tego napięcia silnie zależy od wartości polaryzacji maksymalnej, którą chcemy osiągnąć. W literaturze opisywane są różne sposoby osiągnięcia tego stanu. W niniejszej pracy opisano opracowany

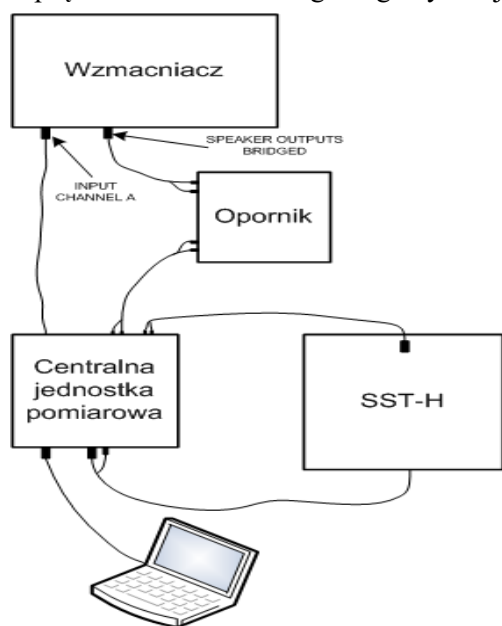
i przetestowany specyficzny sposób iteracyjnego doboru kształtu napięcia sterującego.

3. Opis aparatu SST-H

Cały system pomiarowy składa się z kilku następujących elementów:

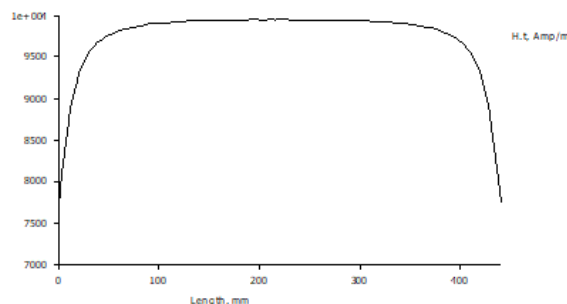
- aparat SST-H,
- centralna jednostka pomiarowa,
- wzmacniacz,
- opornik,
- komputer pomiarowo-sterujący.

Schemat połączenia poszczególnych elementów przedstawia rysunek 1. Aparat, oznaczony jako SST-H, jest przeznaczony do badania własności blach w postaci pojedynczych pasków. Zasadniczo przewidziany jest dla pasków blachy takich samych, jak dla aparatu Epsteina. Dodatkowo założono również umożliwienie badania pojedynczych, stosunkowo małych próbek, wyciętych z blach już poddanych operacjom technologicznym przy wykrawaniu blach maszyn. Rzeczywisty obszar pomiaru obejmuje długość ok. 50 mm w okolicy środka paska blachy. Dla normalywnego układu SST znanym jest fakt znacznych błędów, przy większych wartościach polaryzacji magnetycznej. Annex B i C do Normy EN 10280:2001+A1:2007(E) podają informacyjnie tabele i wykresy korekcyjne dla natężenia pola H i stratności p , w funkcji wartości polaryzacji J , dla dostosowania wyników pomiarów aparatem SST do wyników z ramy Epsteina. Przyczyną tych błędów jest, wyznaczenie natężenia pola H jako uśrednionego z wartości prądu wzbudzenia i drogi magnetycznej.



Rys. 1. Schemat połączenia elementów układu

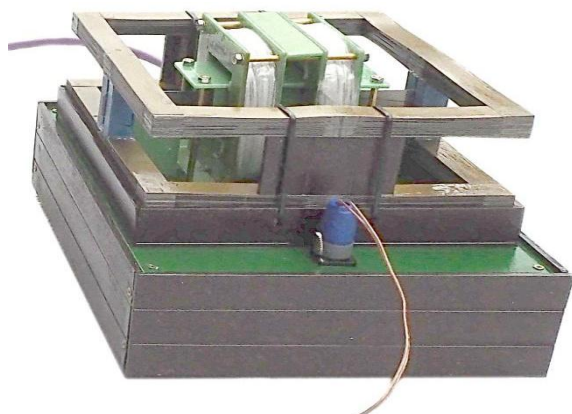
Taki sposób formalnie wymaga, aby na tej drodze wartość natężenia pola była stała. Obliczenia symulacyjne pola dla układu, takiego jak wymagany w normie, wskazują, że natężenie pola jest praktycznie stałe tylko w środkowej części próbki. Zmiany natężenia pola magnetycznego na długości próbki przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Obliczony rozkład natężenia pola H w SST wzdłuż próbki o długości 500 mm

Pomiar bezpośredni natężenia pola przy ciągłej cewce wzbudzenia też nie jest możliwy. Z tego względu zdecydowano się na zmianę systemu wzbudzenia pola, względem zalecanego dla SST normą, na wzorowany na stosowanym od dawna w laboratoriach fizycznych układzie dwóch cewek Helmholtza. Zapewnia on praktycznie stałą wartość natężenia pola H w określonej przestrzeni i poprzeczny dostęp do przestrzeni pomiaru pola H . Do bezpośredniego pomiaru tego natężenia zastosowano czujniki hallotronowe. Użyto dwa czujniki w odstępnie 50 mm, których napięcia wyjściowe się dodają, aby uśrednić lokalne odchyłki natężenia pola magnetycznego, spowodowane lokalnymi niejednorodnościami badanego materiału.

Cewki wzbudzenia w zbudowanym zestawie SST-H, są nawinięte na karkasach o szerokości 25 mm, a domknięcie strumienia magnetycznego ułatwiają dwa zewnętrzne zamknięte rdzenie, z dodatkowymi pionowymi, łączącymi je, fragmentami. Cewki wzbudzenia są zasilane prądem z liniowego wzmacniacza mocy, o mocy maksymalnej 4 kW. Sterowanie tym wzmacniaczem jest realizowane z komputera, poprzez odpowiedni przetwornik C/A. Szeregowy rezystor ogranicza udary prądu, możliwe ze względu na małą rezystancję samych uzwojeń. Możliwe jest uzyskanie natężenia pola magnetycznego H w obszarze pomiarowym aż do 20 kA/m.



Rys. 3. Aparat pomiarowy SST-H

Pomiarowa cewka napięciowa, o liczbie zwojów 100, jest nawinięta cienkim drutem na długości 50 mm dookoła otworu, do którego wsuwa się badane próbki. Jest ona połączona przeciwnie z drugą o tym samym przekroju poprzecznym, umieszczoną równolegle obok, tak aby kompensować pole w przestrzeni powietrznej wewnątrz cewki pomiarowej. Wynik otrzymywany z pomiaru odpowiada więc wprost polaryzacji magnetycznej badanego ferromagnetyka J . Szpara przeznaczona do wsunięcia badanych blach pozwala na umieszczenie w niej materiału o łącznej grubości 2 mm. Może to być jeden pasek blachy lub kilka równoległych. Widok wykonanego aparatu SST-H przedstawia rysunek 3.

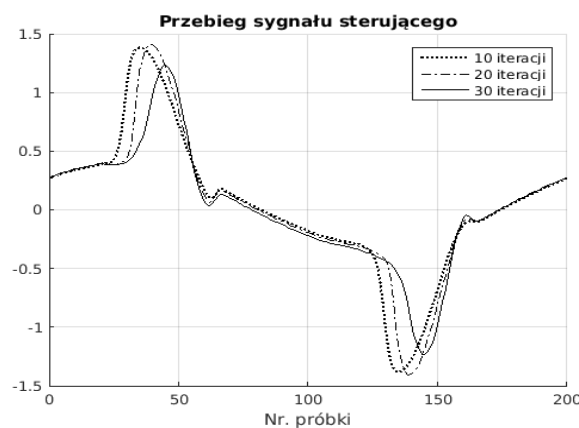
4. Algorytm doboru kształtu napięcia sterującego

Skrócony algorytm działania programu sterującego jest następujący:

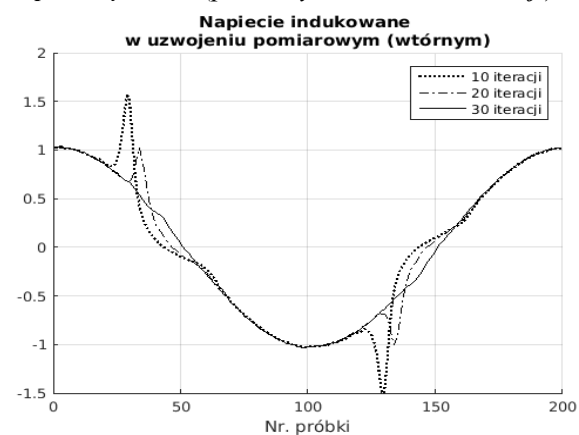
- krok 1: Na wyjście sterujące podać napięcie sinusoidalne;
- krok 2: Zmierzyć kształt i wielkość napięcia wyjściowego z cewki pomiarowej;
- krok 3: Porównać odpowiadające sobie czasowo próbki napięcia sterującego i wyjściowego i wyliczyć przebieg błędu;
- krok 4: Zmodyfikować każdą próbkę napięcia sterującego uwzględniając odpowiedni błąd i stosując proporcjonalny współczynnik (k);
- krok 5: Tak zmodyfikowany przebieg podać na wyjście sterujące;
- krok 6: Powtórzyć kroki 2 - 5 chyba że osiągnięto założony kształt i wielkość napięcia wyjściowego;

W toku prób okazało się że, tak ułożony algorytm działał do wartości ok 1.5 T. Powyżej tej wartości mimo wielu iteracji nie udawało się

osiągnąć współczynnika kształtu z założoną dokładnością. Wprowadzono więc pewną modyfikację: współczynnik k nie jest stały, ale może zostać powiększony, jeżeli po osiągnięciu pewnej liczby iteracji nie nastąpiła zakładana poprawa. Tak zmodyfikowany algorytm działa z oczekiwaną dokładnością do wartości 2.0 T. W celu usprawnienia działania (zmniejszenia ilości iteracji potrzebnych w każdym punkcie pomiarowym), w kolejnych punktach pomiarowych jako sygnał początkowy podawany jest sygnał wypracowany w poprzednim kroku. Takie usprawnienie znacznie ograniczyło czas potrzebny do uzyskania gotowego raportu, szczególnie przy wymaganiu wielu punktów pomiarowych w zadanym zakresie.



Rys. 4. Przebieg sygnału sterującego podczas dopasowywania (po różnych ilościach iteracji)



Rys. 5. Przebieg napięcia indukowanego podczas dopasowania (po różnych ilościach iteracji)

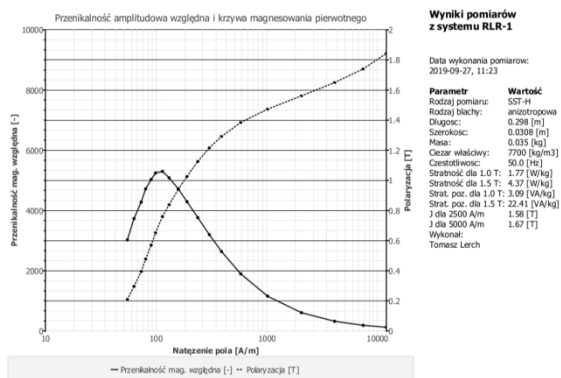
Na rysunkach 4 i 5 pokazano przebiegi sygnałów podczas działania algorytmu sterującego dla zadanej polaryzacji maksymalnej 1.5 T. Widać, że kształt napięcia sterującego daleki jest od sinusoidalnego.

5. Funkcje programu

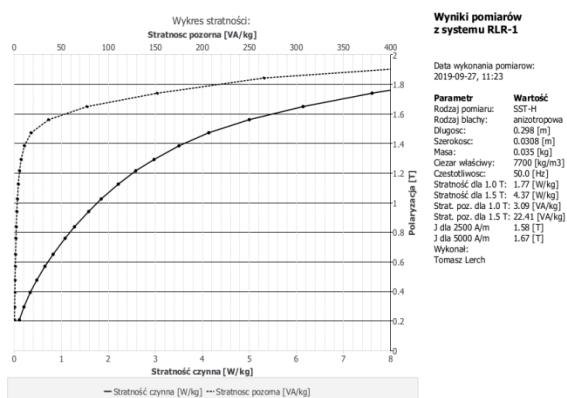
Napisany program, będący integralną częścią systemu, zapewnia odpowiednie sterowanie omówione w poprzednim rozdziale, a także automatycznie przeprowadza niezbędne obliczenia. W postaci wykresów otrzymuje się zależności:

- przenikalności i krzywej magnesowania pierwotnego w funkcji natężenia pola (dla wygody w skali logarytmicznej i liniowej)
- stratności pozornej i stratności czynnej w funkcji polaryzacji
- krzywych histerezy dla każdego punktu pomiarowego

Poza tym program podaje stratność dla wartości 1.0 T i 1.5 T (lub 1.0 T i 1.8 T dla blach izotropowych) oraz wartość polaryzacji dla 2500 A/m oraz 5000 A/m, gdyż takie wielkości podawane są w katalogach blach.



Rys. 6. Okno z wynikami pomiarów przenikalności względnej i krzywej magnesowania



Rys. 7. Okno z wynikami pomiarów mocy czynnej i pozornej na jednostkę masy

6. Podsumowanie

Przedstawiony układ daje możliwość badania blach w zakresie 0.2 T - 2.0 T zgodnie z wymogami norm. Próbkę do badania mają wymiar

podobny jak dla zwykłej ramy Epsteina, choć mogą być też węższe. Długość powinna być większa od 25 cm. Pomiary można przeprowadzić nawet dla pojedynczego paska, co umożliwia badanie wpływu procesów technologicznych, odkształceń, wpływu kierunku walcowania itp. Uzasadnione jest badanie charakterystyk powyżej wartości polaryzacji maksymalnej 1.5 T, gdyż wiele informacji literaturowych wskazuje, że nie daje się ich dobrze przybliżyć na podstawie pomiarów tylko dla niższych wartości polaryzacji.

7. Literatura

- [1]. Liu Shuo, Liu Zhiqiang, Wang Yong, Liu Fugui, and Yan Weili, "Study of single sheet tester for AC magnetization characteristics measurement", *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*.
- [2]. Stanisław Azarewicz, Dominika Gaworska, Bogumił Węgliński, "Badania blach prądnicowych przeznaczonych do silników pracujących w ciekłych gazach", *Zeszyty problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 72/2005 129-134*
- [3]. Stanisław Azarewicz, Bogumił Węgliński, "Parametry wybranych blach prądnicowych przy podwyższonej częstotliwości przemagnesowania", *Zeszyty problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 80/2008 19-22*
- [4]. Maria Dems, Krzysztof Komeza, Jacek Szulowski Politechnika Łódzka, Łódź "Wpływ materiału rdzenia na charakterystyki wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 91/2011 177*.
- [5]. Paweł Idziak, Krzysztof Kowalski "Modelowanie wpływu naprężeń mechanicznych powstających w obwodzie magnetycznym na charakterystykę magnesowania", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 3(103)/2014 189-192*.
- [6]. Emil Król, Robert Rossa "Zastosowanie blach ze stopów kobaltowo-żelazowych w maszynach z magnesami trwałymi", *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 86/2010 135-138*.
- [7]. Wojciech Pluta "Measurement of Some Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets Under Axial Magnetization", *Materials in Electrical Engineering 2009 7-8*.
- [8]. Marcin Antczak, Paweł Idziak, "Wpływ wykrawiania blach na rozkład pola magnetycznego w maszynie prądu stałego", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Issn 0033-2097, R. 88 Nr 4a/2012*.

Autorzy

dr inż. Tomasz Lerch lerch@agh.edu.pl

dr inż. Michał Rad rad@agh.edu.pl

dr hab. inż. Witold Rams rams@agh.edu.pl

