

Układ i program do badania charakterystyki magnetycznej i stratności blach (SST-H)

Tomasz Lerch, Michał Rad, Witold Rams

1. Wstęp

Rosnące wymagania dotyczące sprawności energetycznej maszyn elektrycznych wymagają zwrócenia tym 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 przybliżyć 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. Normatywny układ SST przeznaczony jest dla arkusza blachy 500 × 500 mm, a więc też dość dużej próbki. Tutaj opisywany układ nadaje się do badania pojedynczych pasków blachy o wymiarach dużo mniejszych, ok. 30 × 300 mm.

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 od opisanego w normie tym, że do pomiaru pola magnetycznego użyto czujników Halla, 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.

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.

Słowa kluczowe: SST, Epstein, histereza, stratność

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

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.

Keywords: SST, Epstein, hysteresis, core losses

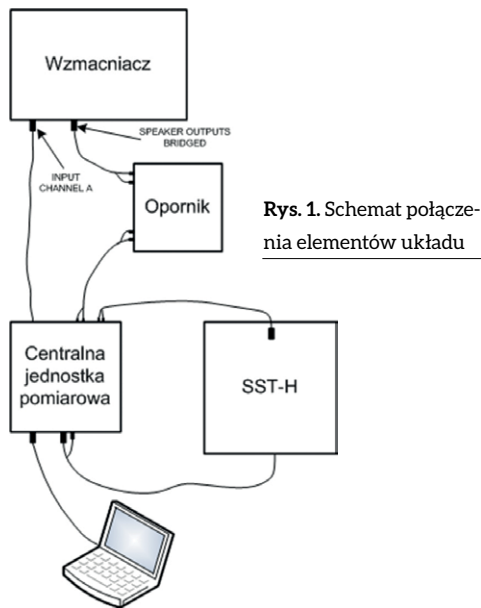
3. Opis aparatu SST-H

Cały system pomiarowy składa się z kilku następujących elementów:

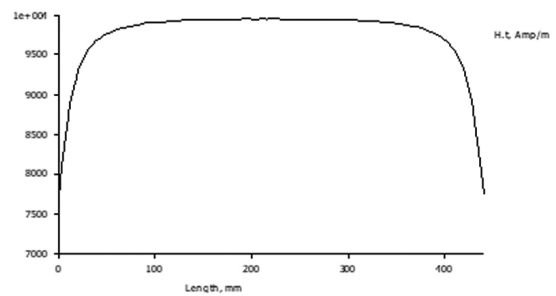
- aparat SST-H;
- centralna jednostka pomiarowa;
- wzmacniacz;
- opornik;
- komputer pomiarowo-sterujący.

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 normatywnego układu SST znany jest fakt znacznych błędów przy większych wartościach polaryzacji magnetycznej.



Rys. 1. Schemat połączenia elementów układu



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

Aneksy 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.

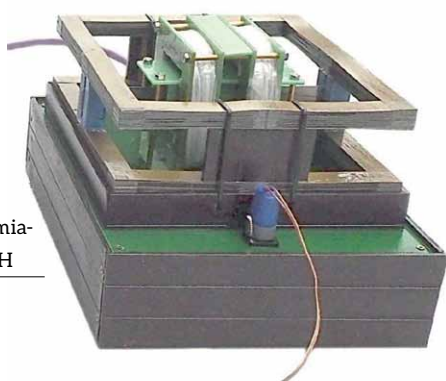
Przyczyną tych błędów jest wyznaczanie natężenia pola H jako uśrednionego z wartości prądu wzbudzenia i drogi magnetycznej.

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 stałe praktycznie tylko w środkowej części próbki. Zmiany natężenia pola magnetycznego na długości próbki przedstawia rysunek 2.

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

Rys. 3.

Aparat pomiarowy SST-H



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 dwóch czujników 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.

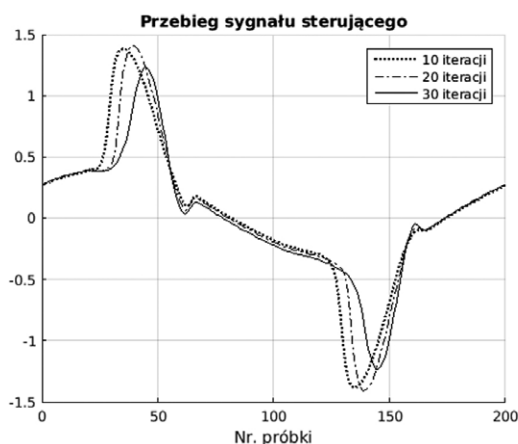
Pomiarowa cewka napięciowa, o liczbie zwojów 100, jest nawinięta cienkim drutem na długości 50 mm dookoła otworu, do którego wsuwa się badane próbki. Jest ona połączona przeciwsobnie z drugą o tym samym przekroju poprzecznym, umieszczoną równolegle obok, tak aby kompensować pole w przestrzeni powietrznej wewnątrz cewki pomiarowej. Wynik otrzymany 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.

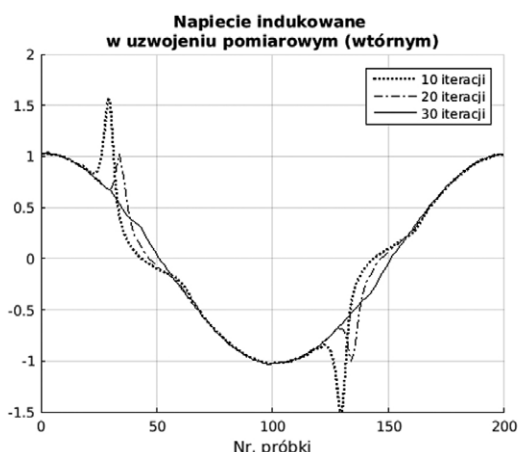
4. Algorytm doboru kształtu napięcia sterującego

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).



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

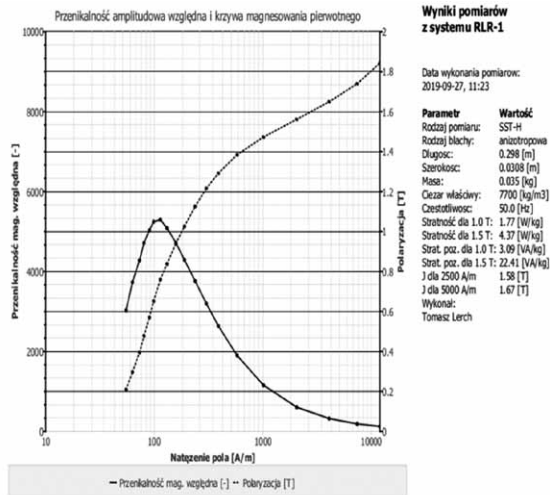


Rys. 5. Przebieg napięcia indukowanego podczas dopasowywania (po różnych ilościach iteracji)

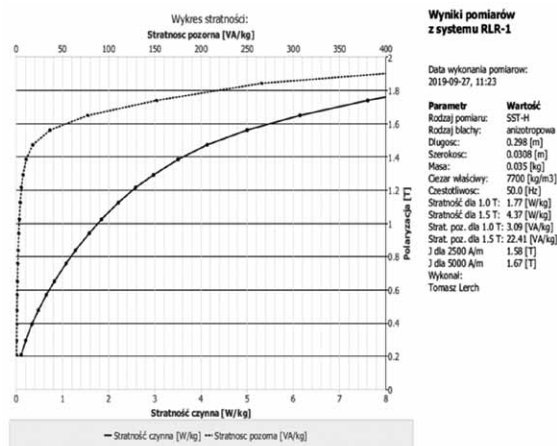
Krok 5: Tak zmodyfikowany przebieg podać na wyjście sterujące.

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



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



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

do uzyskania gotowego raportu, szczególnie przy wymaganiu wielu punktów pomiarowych w zadanym zakresie.

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 histerezowych 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.

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 umożliwi 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.

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] AZAREWICZ S., GAWORSKA D., WĘGLIŃSKI B.: *Badania blach prądnicowych przeznaczonych do silników pracujących w ciekłych gazach*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 72/2005.
- [3] AZAREWICZ S., WĘGLIŃSKI B.: *Parametry wybranych blach prądnicowych przy podwyższonej częstotliwości przemagnesowania*, „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 80/2008.
- [4] DEMS M., KOMĘZA K., SZUŁAKOWSKI J.: *Wpływ materiału rdzenia na charakterystyki wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 91/2011.
- [5] IDZIAK P., KOWALSKI K.: *Modelowanie wpływu naprężeń mechanicznych powstających w obwodzie magnetycznym na charakterystykę magnesowania*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 3(103)/2014.
- [6] KRÓL E., ROSSA R.: *Zastosowanie blach ze stopów kobaltowo-żelazowych w maszynach z magnesami trwałymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 86/2010.
- [7] PLUTA W.: *Measurement of Some Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets Under Axial Magnetization*. „Materials in Electrical Engineering” 2009.
- [8] ANTCAK M., IDZIAK P.: *Wpływ wykrawiania blach na rozkład pola magnetycznego w maszynie prądu stałego*. „Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)” 4a/2012.

dr inż. Tomasz Lerch, e-mail: lerch@agh.edu.pl

dr inż. Michał Rad, e-mail: rad@agh.edu.pl

dr hab. inż. Witold Rams, e-mail: rams@agh.edu.pl

AGH w Krakowie