

Zbigniew GMYREK<sup>1</sup>, Robert OLBRYCHT<sup>2</sup>, Bogusław WIĘCEK<sup>2</sup>, Maria STRĄKOWSKA<sup>2</sup>,  
Krzysztof TOMALCZYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUTU MECHATRONIKI I SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

<sup>2</sup> POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź

## Termowizyjna metoda szacowania składników strat w miękkich materiałach ferromagnetycznych

Dr hab. inż. Zbigniew GMYREK

Zbigniew Gmyrek jest zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Dotychczas opublikował ponad 100 artykułów naukowych. Jest recenzentem takich czasopism jak IEEE Transaction on Industrial Electronics, IEEE Transaction on Industry Applications oraz międzynarodowych konferencji naukowych takich jak ICEM, ECCE, ISIE, INTERMAG. Zajmuje się problemami pomiarów i modelowania materiałów magnetycznych stosowanych w budowie maszyn i urządzeń elektrycznych.

e-mail: zbigniew.gmyrek@p.lodz.pl



Dr inż. Robert OLBRYCHT

Robert Olbrycht jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Dotychczas opublikował 33 prace naukowe, jest współautorem trzech zgłoszeń patentowych. Uczestniczył w realizacji 3. projektów badawczych finansowanych ze środków NCN oraz MNiSW. Zajmuje się problematyką korekcyjną parametrów metrologicznych kamer termowizyjnych i przetwarzania obrazów. Opracował nową metodą korekcyjną niejednorodności matryc mikrobolometrycznych w kamerach termowizyjnych.

e-mail: robert.olbrycht@p.lodz.pl



Prof. dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Specjalizuje się w termografii w podczerwieni i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermography oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP. Jest członkiem Sekcji Optoelektroniki Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN.

e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl



Mgr inż. Maria STRĄKOWSKA

Maria Strąkowska ukończyła studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja, specjalności Przetwarzanie Sygnałów i Obrazów. W roku 2010 rozpoczęła studia doktoranckie. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół metod przetwarzania obrazów termograficznych, problematyki pomiarów termowizyjnych oraz modelowania zjawisk termicznych.

e-mail: strakowska.m@gmail.com



Dr inż. Krzysztof TOMALCZYK

Krzysztof Tomalczyk ukończył studia w Politechnice Łódzkiej na wydziale Elektrotechniki i Elektroniki. W latach 2003 – 2011 pracował na stanowisku asystenta a obecnie na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektroniki PL. Dotychczas opublikował 17 prac naukowych o tematyce związanej z elektronicznymi układami zasilającymi oraz zastosowaniami termowizji. Jednym z głównych obszarów jego prac badawczych jest problematyka strat mocy w układach elektronicznych.

e-mail: krzysztof.tomalczyk@p.lodz.pl



(4) one can calculate the content of hysteresis and eddy-current losses. The concept of a test rig is shown in Fig. 2, while the obtained results are presented in Fig. 3. In that figure there are plots of power divided by frequency as a function of frequency obtained from thermal measurements and the plots are coherent with those prepared basing on the catalogue data. The results allow us to conclude that the presented method is a promising tool. Currently it is in a preliminary stage and the authors plan to develop it in the future.

**Keywords:** losses, ferromagnetic, thermovision.

### 1. Wprowadzenie

Problem wyznaczania strat mocy w ferromagnetyku miękkim, wiodącym zmienny w czasie strumień magnetyczny, jest analizowany od wielu lat. Istnieje wiele teorii opisujących zjawiska fizyczne związane z magnesowaniem materiału ferromagnetycznego. Już dla najprostszych modeli zakłada się jego domenową budowę. Wiadomo, że na skutek występowania zewnętrznego pola magnetycznego w domenach magnetycznych następuje przesuwanie ścian Blocha, zaś w warunkach nasycenia magnetycznego występuje zanik tych ścian. W każdej ścianie zawarta jest energia potrzebna aby taką ścianę stworzyć, która jest rozpraszana gdy ściana zanika. Energia ta jest przekształcana w ciepło w postaci tzw. strat histerezy, których wielkość jest uzależniona od wewnętrznej struktury ferromagnetyka[1]. Ponadto, zmienny w czasie strumień magnetyczny, występujący w środowisku przewodzącym prąd elektryczny, wytwarza tzw. straty wiroprowadowe.

Oprócz wspomnianych dwóch składników należy pamiętać o jeszcze jednym zjawisku mogącym powodować straty mocy w ferromagnetyku. Wiadomo, że dla niskich wartości częstotliwości przemagnesowania i indukcji magnetycznej, nie wszystkie domeny magnetyczne są jednakowo aktywne. Część z nich jest mniej podatna na działanie zewnętrznego pola magnetycznego, część zaś bardziej, co skutkuje szybszym przemieszczaniem ścian Blocha. W tym przypadku mamy do czynienia z tzw. stratami excess.

Chcąc więc opisać straty mocy w ferromagnetyku w oparciu o odpowiadające im zjawiska fizyczne, przyjmujemy się ich podział na trzy składniki: straty histerezy (związane np. z zanikaniem

### Streszczenie

Artykuł dotyczy wyznaczania składników strat mocy w ferromagnetyku miękkim, wiodącym zmienny w czasie strumień magnetyczny. Autorzy zaproponowali nowe rozwiązanie wykorzystujące kamerę termowizyjną do pomiaru temperatury na powierzchni blachy. Rozwiązanie to bazuje na fakcie, iż rozpraszana energia wynikająca ze strat jest przekształcana w ciepło. Dzięki temu można wyznaczyć składniki strat histerezy i wiroprowadowych wykonując pomiar przy różnych częstotliwościach strumienia magnetycznego.

**Słowa kluczowe:** straty, ferromagnetyk, termowizja.

### A thermovision method for estimating components of losses in soft ferromagnetic materials

#### Abstract

The paper presents a novel approach to estimating components of losses in soft ferromagnetic materials. The idea of the described solution is to use a thermovision camera to measure the increase of temperature of the metal plate surface. The temperature rises because of power losses caused by an alternating magnetic flux. This enables measurements at different frequencies to determine the components of the losses. It is required to apply a model of a metal plate [4] to estimate the amount of power, basing on a thermal response recorded by a thermal camera in time domain. Using equations

i powstawaniem ścian Blocha), klasyczne straty wiroprądowe (związane z płynnym ruchem ścian) oraz straty excess (związane np. z niejednakową aktywnością domen lub skokowym ruchem ścian) [2, 3].

Aby wyznaczyć składniki strat można zastosować np. pomiar strat wykonany przy różnych częstotliwościach strumienia magnetycznego. Prezentowany artykuł proponuje, według wiedzy autorów, nową metodę rozdziału strat, wykorzystującą pomiary wykonane za pomocą kamery termowizyjnej, których wyniki użyto w modelu cieplnym paska blachy elektrotechnicznej. Wykorzystując ten model określono gęstość strat w funkcji częstotliwości, jakie występują w badanej próbce, co umożliwiło rozdział składników strat mocy.

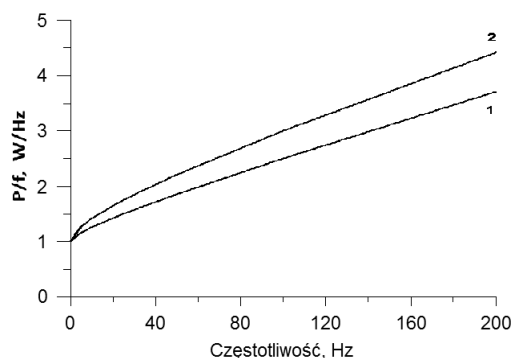
## 2. Procedura pomiarowa

Rozdział strat mocy w ferromagnetyku wykonuje się poprzez wykorzystanie zależności definiującej zależność strat od częstotliwości. Można zapisać następującą zależność

$$P_{FeSi} = k_h B^\alpha f + k_w B^2 f^2 + k_e B^{1.5} f^{1.5} \quad (1)$$

gdzie:  $P_{FeSi}$  – całkowite straty mocy w ferromagnetyku,  $k_h$ ,  $k_w$ ,  $k_e$  – współczynniki strat histerezowych, klasycznych wiroprądowych oraz excess,  $\alpha$  – wykładnik przyjmujący wartość od 1,8 - 2,2, w zależności od rodzaju materiału magnetycznego,  $B$  – wartość maksymalna indukcji,  $f$  – częstotliwość.

Dzieląc wyrażenie (1) przez częstotliwość otrzymamy znaną zależność pozwalającą na określenie poszczególnych składników strat. Na podstawie tej zależności, straty histerezowe określa się dla częstotliwości 0 Hz. Przykładowe przebiegi obrazujące różny udział strat excess w stratach całkowitych, przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe przebiegi umożliwiające wyznaczenie strat histerezowych, klasycznych wiroprądowych oraz excess. 1 – materiał o nieznacznym udziale strat excess, 2 – materiał o znacznym udziale strat excess.

Fig. 1. Exemplary plots for determination of losses: hysteresis, classic eddy-current and excess. Material with (1) low, (2) high content of excess losses

W dostępnej literaturze spotyka się także nieco inne podejście, polegające na wykorzystaniu uproszczonej zależności (2)

$$P_{FeSi} = k_h B^\alpha f + k_w B^2 f^2 \quad (2)$$

Uproszczona zależność może być stosowana dla materiałów wykazujących niewielki udział strat excess w stosunku do pozostałych składników. W tym przypadku pomiary wykonuje się dwukrotnie (przy dwóch częstotliwościach) a następnie aproksymuje krzywą stratności/częstotliwość, za pomocą linii prostej. Wówczas wartość pominiętych strat excess zostanie włączona do wartości strat histerezowych. Łatwo jest wtedy wyznaczyć współczynniki  $k_h$ ,  $k_w$ . Należy pamiętać aby podczas wyboru częstotliwości dla których wykonywany jest pomiar, nie doprowadzić do sytuacji np. istotnego zwiększenia naskórkowości. Akceptując pewne uproszczenie polegające na przyjęciu  $\alpha = 2$ , można posłużyć się następującymi wzorami

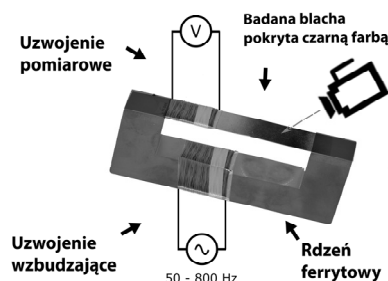
$$\frac{P_{FeSi1}}{f_1 B^2} = A = k_h + k_w f_1; \quad \frac{P_{FeSi2}}{f_2 B^2} = D = k_h + k_w f_2 \quad (3)$$

Po niezbędnych przekształceniach otrzymamy

$$k_h = \frac{A f_2 - D f_1}{f_2 - f_1}; \quad k_w = \frac{D}{f_2} - \frac{A f_2 - D f_1}{f_2 (f_2 - f_1)} \quad (4)$$

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla dwóch materiałów o różnych właściwościach magnetycznych. Badane próbki wykonano w postaci pasków o długości 250 mm i szerokości 30 mm. Pierwszy badany materiał charakteryzował się wysokim stopniem anizotropii, miał grubość 0,35 mm, i stratność 1,6 W/kg (dla 1,7 T). Drugi materiał, grubości 0,5 mm charakteryzował się znacznie mniejszą anizotropią w porównaniu z pierwszym. Stratność drugiego materiału wynosiła 2 W/kg (dla 1 T). Wykonano trzy próby badawcze: w pierwszej próbie zastosowano materiał nr 1 i wymuszono w nim indukcję 1,7 T, w drugiej próbie zastosowano materiał nr 1 i wymuszono indukcję 1,5 T, zaś w trzeciej próbie wykorzystano materiał nr 2 i wymuszono indukcję 1 T.

Badania przeprowadzono w zmodyfikowanym układzie SST (ang. *Single Sheet Tester*). Modyfikacja układu związana była z koniecznością posiadania dostępu do powierzchni blachy na której rejestrowano proces nagrzewania. Tak więc uzwojenie wzbudzające nawinięto na rdzeniu ferrytowym, stanowiącym jarmzo w którym zamykał się strumień magnetyczny, zaś uzwojenie pomiarowe (określające poziom indukcji) nawinięto na badanym pasku blachy (rys. 2). Takie umieszczenie uzwojeń zapewniło możliwość separacji źródeł ciepła (dominującym źródłem ciepła jest cewka uzwojenia wzbudzającego, która wytwarza wielokrotnie więcej ciepła w porównaniu z paskiem blachy i może skutecznie utrudnić rejestrację temperatury powierzchni próbki).



Rys. 2. Koncepcja stanowiska pomiarowego do badania przyrostu temperatury blachy

Fig. 2. The concept of a test rig for measurement of metal plate temperature increase

Do przeprowadzenia pomiarów wartości temperatury na pasku blachy wykorzystano nowoczesną chłodzoną kamerę termowizyjną Cedip Titanium z detektorem fotonowym typu InSb (ang. *Indium Antimonide*) o rozdzielczości 640x480 i wartości NETD (ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*) 20 mK. Zastosowanie kamery o bardzo dużej rozdzielczości termicznej (a co za tym idzie niskiej wartości NETD) było niezbędne ze względu na konieczność rejestracji zmian wartości temperatury na poziomie dziesiątych części Kelvina. Dla każdego przypadku (obejmującego dany rodzaj blachy i częstotliwość sygnału pobudzającego) rejestrowano sekwencję termogramów ilustrującą odpowiedź termiczną blachy na pobudzenie. W celu maksymalizacji skuteczności pomiaru kamerą termowizyjną blachę pokryto cienką warstwą czarnej matowej farby, dzięki czemu została zwiększona wartość współczynnika emisyjności jej powierzchni.

Na podstawie każdej z zarejestrowanych sekwencji termogramów osobno wyznaczono przebiegi temperatury w dziedzinie czasu, w których następnie wyeliminowano składową stałą. Korzystając z modelu blachy utworzonego w środowisku Matlab dopasowano jego parametry w sposób zapewniający pokrywanie

się wyznaczonych analitycznie oraz zarejestrowanych kamerą termowizyjną przebiegów odpowiedzi termicznej badanej blachy na pobudzenie o znanej częstotliwości. Dzięki temu wyznaczono wartości termicznej stałej czasowej każdej blachy oraz mocy wymaganej do uzyskania w stanie ustalonym (dla każdej częstotliwości) przyrostu temperatury zgodnego z wynikami pomiarów.

Wyznaczone w ten sposób wartości mocy (przypadające na objętość równą objętości badanego paska blachy) dla każdego przypadku skonfrontowano z wartościami spodziewanymi na podstawie wcześniejszych obliczeń wykorzystujących krzywe stratności – rys. 3. Różnice pomiędzy wartościami spodziewanymi oraz zmierzonymi są na relatywnie niskim poziomie, co świadczy o poprawności przyjętej metodologii badawczej.

### 3. Model cieplny blachy i jego parametry

W badaniach zastosowano termiczny model badanej próbki blachy dla stanów dynamicznych z uwzględnieniem konwekcji naturalnej [4] opisany równaniem (5).

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + q_v = \rho c_w \frac{dT}{dt} + \frac{\alpha \cdot T}{t_s} \quad (5)$$

gdzie:  $\lambda$  – przewodność cieplna,  $c_w$  – ciepło właściwe,  $\rho$  – gęstość,  $\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła na drodze konwekcji,  $t_s$  – grubość próbki,  $q_v$  – objętościowa gęstość mocy.

Przyjęto następujące wartości parametrów modelu:

$$\lambda = 44,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$c_w = 475 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} - \text{próbka 1 i 2 lub } 23 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} - \text{próbka 3}$$

$$t_s = 0,00035 \text{ m} - \text{próbka 1 i 2 lub } 0,0005 \text{ m} - \text{próbka 3}$$

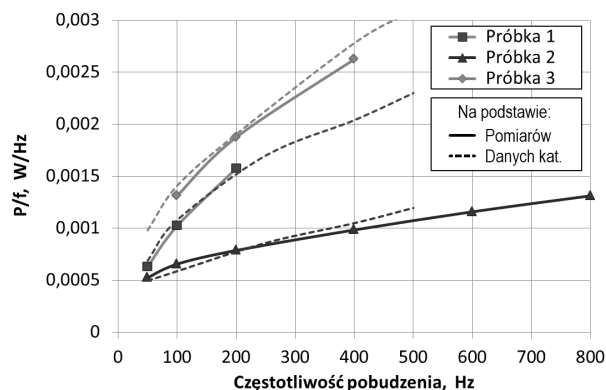
Na podstawie modelu termicznego struktury opisanego równaniem (5) wyznaczana jest objętościowa gęstość mocy strat  $q_v$ . Wyznaczenie tej mocy przeprowadza się metodą optymalizacyjną, tak aby temperatura obliczona z modelu na powierzchni struktury była zgodna z temperaturą pomierzoną kamerą termowizyjną. Proces dopasowania obu temperatur można przeprowadzić zarówno w stanie statycznym jak i dynamicznym. W przedstawionej pracy zastosowano dopasowanie temperatury dla stanu dynamicznego. Znając gęstość mocy strat oraz wymiary badanej struktury można wyznaczyć moc wydzielaną w badanej próbce w zależności od częstotliwości strumienia magnetycznego.

### 4. Dyskusja wyników

W celu umożliwienia interpretacji otrzymanych wyników na rys. 3 zaprezentowano wykresy  $P/f(f)$  dla trzech przebadanych próbek. Linią ciągłą oznaczono wyniki obliczeń uzyskane na podstawie pomiarów termowizyjnych, linią przerywaną – na podstawie danych katalogowych. Zaprezentowane charakterystyki są liniowe dla częstotliwości powyżej około 200 Hz, co jest zgodne z teorią. Blacha z której wykonano próbkę nr 3 miała zdecydowanie większą stratność w porównaniu z blacha z której wykonano próbki nr 1 i 2. Pomimo tego, że wartość indukcji dla której wykonano pomiar wynosiła tylko 1 T (dla próbek 1 i 2 było to odpowiednio 1,7 oraz 1,5 T) to krzywa  $P/f$  (rys. 3) leży powyżej odpowiednich krzywych, wyznaczonych dla próbek nr 1 i 2. Jak wspomniano powyżej, kształt wykresów jest zgodny z oczekiwanym jednak należy wskazać, że dla stosunkowo niskich częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie wzbudzające próbki, zastosowana kamera rejestrowała przebiegi na granicy swoich możliwości (na akceptowalnym poziomie dokładności). Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie składników strat, korzystając z pomiaru dwuczęstotliwościowego np. 100 i 200 Hz. W ten sposób wyznaczymy dwa główne składniki strat: straty histerezo-

we (które przy zastosowaniu uproszczonej dwuczęstotliwościowej metody pomiaru, będą zawierały w sobie także straty excess) oraz straty wiropądowe. Pozwoli to w bardzo prosty sposób wyznaczać stratność materiału dla innych częstotliwości niż wykorzystane podczas pomiarów.

Przykładowo wykorzystując dane z katalogów dla 100 Hz i 400 Hz dla próbek 1 i 2 można obliczyć wartości średnie współczynnika strat histerezo- $k_h = 2,3 \cdot 10^{-4}$  oraz wiropądowych  $k_w = 1,1 \cdot 10^{-6}$ . Dla próbki 3 wykorzystując dane z katalogów dla 200 Hz i 500 Hz można obliczyć wartości  $k_h = 11 \cdot 10^{-4}$  oraz  $k_w = 6,2 \cdot 10^{-6}$ . Na podstawie pomiarów znaleziono dla próbek 1 i 2 (dla 100 Hz i 200 Hz – próbka 1, dla 200 Hz i 400 Hz – próbka 2) średnie współczynniki  $k_h = 2,15 \cdot 10^{-4}$  oraz  $k_w = 1,16 \cdot 10^{-6}$ , zaś dla próbki 3 (dla 200 Hz i 400 Hz) współczynniki  $k_h = 11,3 \cdot 10^{-4}$  oraz  $k_w = 3,8 \cdot 10^{-6}$ . Wyniki otrzymane na podstawie pomiarów są zatem zbliżone z wynikami otrzymanymi na podstawie katalogów.



Rys. 3. Przebiegi ilorazu strat mocy i częstotliwości w funkcji częstotliwości  
Fig. 3. Plots of power loss divided by frequency vs. frequency

### 5. Wnioski

Nasuwa się kilka praktycznych wniosków, które powinny być uwzględnione podczas kolejnych pomiarów: stabilność indukcji w rdzeniu podczas wykonywania pomiarów, dobór czasu pomiaru tak aby osiągnąć stan quasi-ustalony (niezbędny do wyznaczenia zarówno parametrów modelu jak i quasi-ustalonych przyrostów temperatury), kalibracja kamery oraz dokładne określenie współczynnika emisyjności. Należy także podkreślić fakt, że pomimo początkowego stadium prac związanych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej do szacowania składników strat materiału ferromagnetycznego, uzyskane wyniki wydają się być obiecujące i pozwalają na kontynuację prac w tym zakresie.

### 6. Literatura

- [1] Bertotti G., Ban G., Abbruzzese G.: Texture dependence of power losses in nonoriented SiFe electrical steels, *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, 1993, pp. 6612 – 6614.
- [2] Bertotti G.: General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, 1998, pp. 621–630.
- [3] Basso V., Bertotti G., Bottauscio O., Fiorillo F., Pasquale M., Chiampi M., Repetto M.: Power losses in magnetic laminations with hysteresis. Finite element modeling and experimental validation, *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, 1997, pp. 5606 – 5608.
- [4] Gmyrek Z., Strąkowska M., Więcek B.: Thermal Modelling and Measurements of Magnetic Losses for Punched Ferromagnetic Strips, referat przyjęty na XIV International Conference SMC, 2013.