

Modułowy histerezograf do pomiaru charakterystyk materiałów magnetycznie miękkich

Tomasz Charubin

Politechnika Warszawska, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono sterowany komputerowo, modułowy i w pełni zautomatyzowany histerezograf do pomiaru charakterystyk materiałów magnetycznie miękkich w szerokim zakresie amplitudy pola magnesującego. Histerezograf umożliwia pomiary pętli histerezy magnetycznej przy użyciu różnych kształtów przebiegów pola magnesującego i indukcji magnetycznej w rdzeniu (sinusoida, trójkąt lub dowolne zadane pole magnesujące, sinusoidalny lub trójkątny przebieg indukcji magnetycznej) oraz krzywych przenikalności magnetycznej względnej. Modułowa budowa układu umożliwia pomiary parametrów magnetycznych przy dodatkowych wpływach warunków zewnętrznych, takich jak temperatura, naprężenie mechaniczne lub kąt obrotu próbki (układ pracy anizometru). Otwarte oprogramowanie pozwala również na dodawanie nowych metod pomiarowych, co nie jest dostępne w systemach komercyjnych.

Słowa kluczowe: pomiary magnetyczne, histerezograf, szkło metaliczne, ferryt, materiały magnetycznie miękkie, krzywa bezhisterezowa magnetyzacji, FORC

1. Wprowadzenie

Wiele nowoczesnych urządzeń elektronicznych ma wbudowane elementy indukcyjne. Rdzenie magnetyczne w tych elementach często są wykonane z tlenków żelaza (ferryty) lub taśm amorficznych. Wybór właściwego rdzenia jest niezbędny do prawidłowej pracy urządzenia, np. zasilaczy impulsowych, filtrów, dławików i transformatorów. Rodzaj materiału rdzenia jest dobierany do konkretnych zastosowań, a jego parametry w funkcji częstotliwości oraz amplitudy strumienia magnetycznego muszą być znane. W tym celu niezbędny jest pomiar parametrów materiałów magnetycznych.

Komercyjnie stosowane urządzenia pomiarowe parametrów magnetycznych mają zamknięte oprogramowanie, przez co zachodzi konieczność dokupowania modułów pomiarowych lub całych urządzeń w celu pomiaru nowych, nieznanymi jeszcze parametrów. W związku z tym opracowano zautomatyzowane modułowe stanowisko pomiarowe przeznaczone do badania rdzeni wykonanych z tzw. miękkich materiałów magnetycznych. Opracowane stanowisko pozwala na rozszerzenie o nowe programowe moduły (metody) pomiarowe wykorzystując posiadane już moduły sprzętowe, jak i w wymianę modułów sprzętowych w zależności od potrzeb.

Autor korespondujący:

Tomasz Charubin, Tomasz.Charubin@pw.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 07.03.2025 r., przyjęty do druku 14.04.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

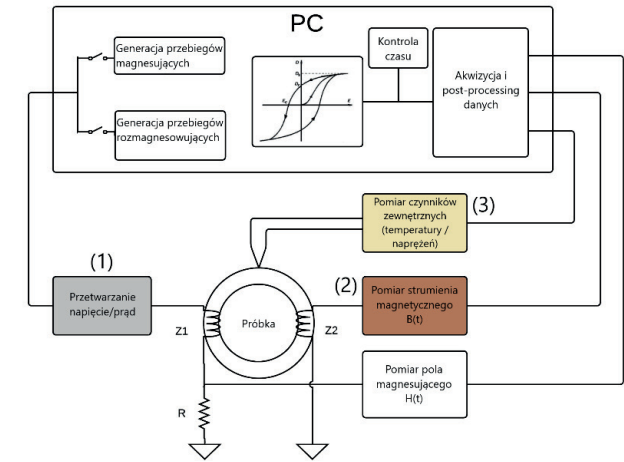
2. Budowa układu pomiarowego

Podstawowy układ systemu pomiarowego to klasyczny histerezograf, który generuje zmienne pole magnetyczne w próbce i mierzy zmianę strumienia magnetycznego w materiale przy użyciu dwóch uzwojeń na próbce toroidalnej, lub za pomocą cewki długiej i uzwojenia pomiarowego na próbce płaskiej. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie serii pomiarów przy zmiennych parametrach, takich jak amplituda, częstotliwość i kształt pola magnesującego. Stosując metodę iteracyjną, stanowisko umożliwia również generowanie trójkątnego lub sinusoidalnego strumienia magnetycznego w próbkach, co zapewnia mniejsze straty w porównaniu z wykorzystaniem trójkątnego lub sinusoidalnego pola magnesującego [1]. To z kolei pozwala na rzeczywiste pomiary parametrów magnetycznych, bez zakłóceń w postaci prądów wirowych. Kluczowymi parametrami, które wynikają z takiego pomiaru, są krzywa przenikalności względnej μ , straty mocy P_h , koercja H_c , gęstość strumienia nasycenia B_s i zmiany remanencji magnetycznej B_r w funkcji różnych parametrów.

System bazuje na serwerowym komputerze PC z oprogramowaniem National Instruments LabVIEW do zarządzania urządzeniami pomiarowymi. Główny element systemu składa się z przetwornika U/I oraz strumieniomierza, sterowanych przez komputer z kartą akwizycji danych National Instruments NI USB 6363.

Schemat blokowy systemu przedstawiono na rys. 1. Na schemacie zaznaczono:

- kolorem szarym (1) – moduł przetwornika napięcia z karty DAQ na prąd/napięcie zadawane na uzwojenie magnesujące próbki,
- kolorem brązowym (2) – moduł strumieniomierza, przetwarzający napięcie wyindukowane w cewce pomiarowej,



Rys. 1. Schemat blokowy histerezografu
Fig. 1. Block diagram of hysteresisgraph

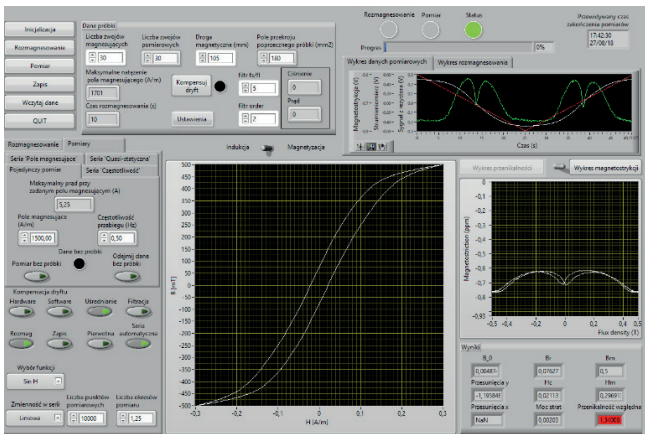
- kolorem jasnożółtym (3) – moduł pomiarowy dodatkowych wielkości oddziałujących na próbkę (np. temperatury bądź naprężeń).

Pole magnesujące określane jest za pomocą pomiaru napięcia kartą DAQ na rezystorze wzorcowym 1 Ohm wykonanym w klasie 0,01. Odczyt z karty skalibrowany został metodą techniczną przy użyciu multimetrów FLUKE 8846A (woltomierz) oraz FLUKE 8808A (amperomierz).

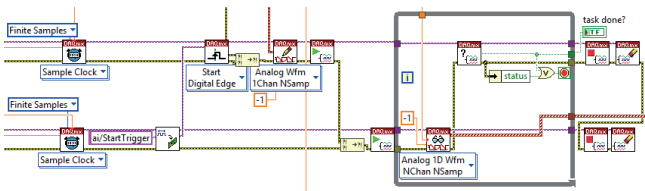
Kalibracja strumieniomierza Lakeshore 480 dokonana została za pomocą multimetru FLUKE 8846A. Wskazania strumieniomierza traktowane są jako wynik pomiaru.

Pomiary wykonano na próbkach wzorcowych otrzymanych z firmy Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, a różnice w wynikach mieściły się w zdefiniowanej niepewności pomiaru urządzeń.

Na rys. 2 przedstawiono panel użytkownika programu sterującego, natomiast na rys. 3 niewielki wycinek ze schematu blokowego modułu pomiarowego oprogramowania. Na ekranie można



Rys. 2. Panel użytkownika histerezografu
Fig. 2. Front panel of hysteresisgraph



Rys. 3. Wycinek ze schematu blokowego modułu pomiarowego oprogramowania
Fig. 3. Fragment of block diagram of measurement software

wyświetlić pętlę histerezy lub wykresy krzywych przenikalności normalnej, w serii danego parametru lub magnetostrykcji.

System umożliwia pomiary przy obecności czynników zewnętrznych, takich jak:

- pomiar przy zmiennej sile ściskającej z wykorzystaniem zewnętrznej prasy i zintegrowanego czujnika siły,
- pomiar przy zmiennej sile rozciągającej z wykorzystaniem rewersora siły, zewnętrznej prasy i zintegrowanego czujnika siły,
- pomiar przy zmiennej temperaturze w zakresie $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ z wykorzystaniem dodatkowego kriostatu PolyScience.

System realizuje również inne funkcje, jak:

- automatyczne pozyskiwanie pętli histerezy ze zmiennymi parametrami (np. częstotliwość, kształt i amplituda pola magnesującego),
- obliczania parametrów pętli histerezy (np. indukcyjność przy danym prądzie i częstotliwości),
- rozmagnesowanie próbki między pomiarami,
- uśrednianie zdefiniowanej przez użytkownika liczby pętli histerezy w jedną pętlę,
- kompensacja dryftu przepływomierza sprzętowo oraz programowo,
- centrowanie pętli przez maks. B lub H, lub przez H_c i B_r ,
- filtracja pomiarów przy użyciu filtrów cyfrowych,
- pomiar temperatury próbki,
- zapisywanie danych pomiarowych do plików tekstowych i graficznych.

3. Warianty modułu zadawania pola magnesującego

Z punktu widzenia skutecznych pomiarów zróżnicowanych materiałów magnetycznie miękkich kluczowe jest zadawanie pola magnesującego w szerokim zakresie częstotliwości. Należy zwrócić uwagę, że przy sterowaniu z wykorzystaniem znacznych wartości prądu magnesującego, ze względu na indukcyjny charakter obciążenia, warunki pracy układu wyjściowego wzmacniacza mocy są szczególnie trudne. Z tego względu w modułowej konstrukcji systemu uwzględniono możliwość zarówno uzyskiwania szczególnie wysokich prądów wyjściowych (w zakresie ograniczonych częstotliwości), jak i możliwość uzyskania znaczącej mocy przebiegu sterującego przy częstotliwości do 70 kHz.

Tab. 1. Parametry przetworników KEPCO BOP 36/6M
Tab. 1. KEPCO BOP 36/6M transducer parameters

Maksymalne napięcie	$\pm 36\text{ V}$
Maksymalne natężenie prądu	$\pm 12\text{ A}$
Pasmo dla obciążenia rezystancyjnego	13/16 kHz
Prędkość narastania (min)	0,5 A/ μs / 3 V/ μs

Tab. 2. Parametry przetwornika RMD-2b
Tab. 2. RMD-2b transducer parameters

Maksymalne natężenie prądu	$\pm 1\text{ A}$ / $\pm 3\text{ A}$
Maksymalne napięcie	$\pm 27\text{ V}$
Pasmo dla obciążenia rezystancyjnego	4 kHz

Tab. 3. Parametry przetwornika wysokoczęstotliwościowego
Tab. 3. Parameters of high frequency transducer

Maksymalne natężenie prądu	±3 A
Maksymalne napięcie	±30 V
Pasmo dla obciążenia rezystancyjnego	70kHz
Prędkość narastania (min)	8 V/μs

System składa się z modułów umożliwiających zadawanie pola magnesującego:

- dwa przetworniki KEPCO BOP 36/6M jako źródła prądowe/napięciowe (połączone równolegle) – tab. 1,
- przetwornik RMD-2b produkcji Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (źródło prądowe) – tab. 2,
- autorski, wysokoczęstotliwościowy wzmacniacz mocy z układem LM675 (źródło napięciowe) – tab. 3.

4. Warianty modułu pomiaru indukcji magnetycznej w rdzeniu

Dzięki zastosowaniu modułowego układu pomiaru indukcji magnetycznej, opracowany system gwarantuje pomiar w szerokim zakresie częstotliwości przebiegu magnesującego. W szczególności umożliwia pomiar quasistatyczny, czyli pomiar w zakresie niskich częstotliwości pola magnesującego.

System zawiera moduły przeznaczone do pomiaru indukcji magnetycznej:

- strumieniomierz Lakeshore 480 – tab. 4,
- strumieniomierz bezdryftowy LR [2, 3] – tab. 5.

Tab. 4. Parametry strumieniomierza Lakeshore 480
Tab. 4. Lakeshore 480 Flux Meter Parameters

Dokładność w trybie DC	±10 μVs ± dryft integratora
Zakres częstotliwościowy AC	2 Hz – 50 kHz
Dokładność w trybie AC	1 % dla f > 20 Hz
Zmierzony dryft	około 10 mV/h

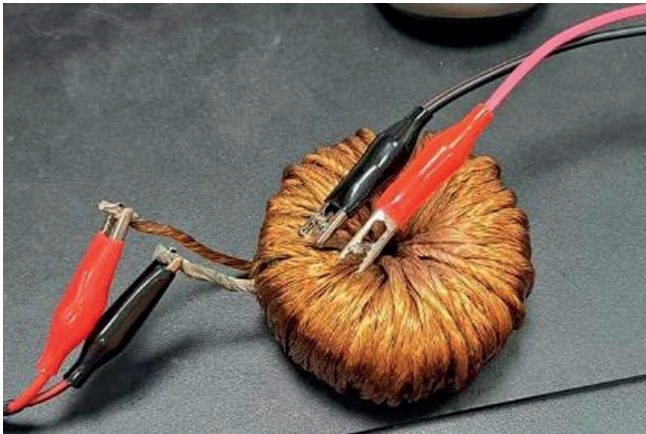
Tab. 5. Parametry strumieniomierza LR
Tab. 5. LR fluxmeter parameters

Zakres częstotliwościowy AC	0,7 Hz – 1 kHz
Dokładność w trybie AC	1 % dla f > 30 Hz
Zmierzony dryft	brak

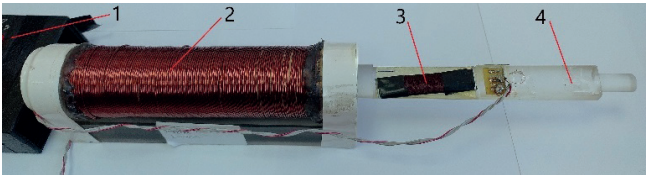
5. Warianty pomiaru indukcji magnetycznej w rdzeniu

Pomiar strumienia magnetycznego jest realizowany z użyciem próbek o różnych konstrukcjach. Podczas badań stosowano następujące rozwiązania:

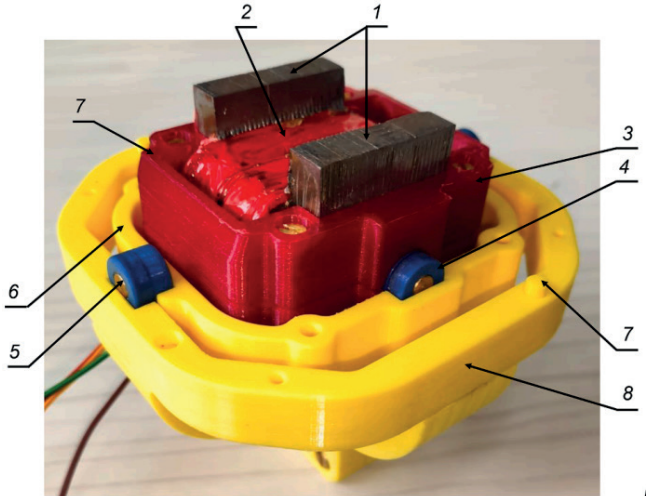
- dla próbek toroidalnych – uzwojenie magnesujące oraz uzwojenie pomiarowe nawinięte na rdzeniu – rys. 4,
- dla małych próbek płaskich – układ cewki długiej jako cewki magnesującej i uzwojenia pomiarowego, w które wkłada się próbkę – rys. 5,
- dla większych próbek płaskich – układ jarzmowy dociskany do materiału – rys. 6.



Rys. 4. Podłączenie cewki toroidalnej z dwoma uzwojeniami
Fig. 4. Connection of toroidal-shaped coil with two windings



Rys. 5. Cewka długa z uzwojeniem pomiarowym w sztyfcie wkładanym do jej środka; 1 – złącza, 2 – magnesująca cewka długa, 3 – uzwojenie pomiarowe z próbką w środku, 4 – sztyft
Fig. 5. Long coil with measurement winding inside of rod inserted into its center; 1 – connectors, 2 – magnetizing long coil, 3 – measurement winding with sample inside, 4 – rod



Rys. 6. Jarzmo pomiarowe do pomiaru próbek płaskich [4]; 1 – jarzmo magnetyczne, 2 – uzwojenia, 3–6 – ramki i łożyska umożliwiające obrót, 7 – sworzeń prowadzący, 8 – ramka montażowa
Fig. 6. Measurement yoke for measuring flat samples [4]; 1 – magnetic yoke, 2 – windings, 3–6 – frames and bearings enabling rotation, 7 – guiding pin, 8 – mounting frame

Na rys. 6. przedstawiono jarzmo pomiarowe do pomiaru anizotropii próbek. Układ jarzmowy zamontowany jest na obrotowym ramieniu, a jego końce magnesujące dociskane są do próbki ze stałą siłą. Mierząc uzyskane z pomiaru pętli histerezy parametry w funkcji kąta obrotu jarzma otrzymać można m.in. wykres anizotropii przenikalności magnetycznej próbki płaskiej [4].

6. Realizowane procesy pomiarowe

Opracowany system pomiarowy umożliwia uzyskanie kilku wariantów kształtu przebiegu magnesowania (tab. 6). W efek-

Tab. 6. Kształty przebiegu magnesującego
Tab. 6. Magnetization waveform shapes

Sterowanie	Pole magnesujące	Strumień magnetyczny
Kształt przebiegu	sinusoidalny	sinusoidalny
	trójkątny	
	tgH	
	rozmagnesowanie	trójkątny
	niestandardowy (użytkownika)	

Tab. 7. Parametry przebiegu magnesującego w seriach
Tab. 7. Parameters of series types of magnetizing waveform

Seria	Parametry
Pomiar pojedynczy	Stała częstotliwość pomiaru Stały offset pola magnesującego Stała amplituda pola magnesującego
Amplituda pola magnesującego	Stała częstotliwość pomiaru Stały offset pola magnesującego Wybór liczby zmierzonych pętli Wybór maksymalnej i minimalnej wartości amplitudy H
Amplituda strumienia magnetycznego	Stała częstotliwość pomiaru Stały offset pola magnesującego Wybór liczby zmierzonych pętli Wybór maksymalnej i minimalnej wartości amplitudy H
Częstotliwość	Stała amplituda pola magnesującego Wybór liczby zmierzonych pętli Wybór maksymalnej i minimalnej wartości częstotliwości
Quasi-statyczna	Stała wartość narastania pola dH/dt Wybór liczby zmierzonych pętli Wybór maksymalnej i minimalnej wartości amplitudy H
Offset pola magnesującego	Stała amplituda pola magnesującego Stała częstotliwość pomiaru Wybór liczby zmierzonych pętli Wybór maksymalnej i minimalnej wartości offsetu H

cie możliwe jest wykonywanie serii pomiarowych w funkcji różnych parametrów przebiegu magnesującego (tab. 7).

W przypadku serii pomiarów dla amplitudy strumienia magnetycznego, pierwszy pomiar wykonywany jest dla maksymalnej wartości amplitudy pola magnesującego w celu wyznaczenia krzywej pierwotnej próbki. Następnie zadawane są kolejne wartości pola magnesującego, odpowiadające wybranym wartościom indukcji magnetycznej, obliczone z przebiegu przenikalności magnetycznej wyznaczonej z krzywej pierwotnej.

Poza zmiennością parametrów przebiegu magnesującego system umożliwia równoległy pomiar w funkcji jednego z dodatkowych parametrów czynników zewnętrznych:

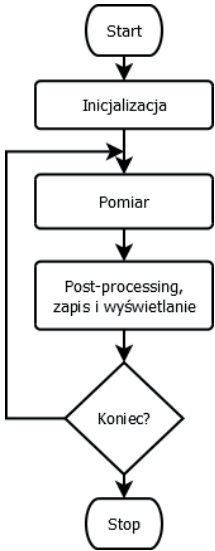
- temperatury,
- naprężeń,
- kąta obrotu próbki (w celu pomiaru anizotropii).

Dodatkowo w systemie zrealizowano specjalistyczne funkcje pomiarowe:

- pomiar krzywej bezhisterezowej,
- seria FORC (ang. *First Order Reversal Curve*),
- pomiar magnetostrykcji próbki przy użyciu naklejonych na niej tensometrów

Po wyborze kształtu oraz typu serii pomiarowej program rozpoczyna pomiar według przygotowanego algorytmu (rys. 7). Rozpoczynając pomiar, karta DAQ generuje napięcie sterujące przetwornik napięcie-prąd, jednocześnie rozpoczynając akwizycję sygnału napięcia ze strumieniomierza w następujący sposób:

- rozmagnesowanie próbki (opcjonalnie),
- zerowanie strumieniomierza,
- obliczenie kształtu całości wykresu magnesowania,
- generowanie napięcia z karty DAQ i konwersja U/I ,
- odczyt napięcia z rezystora pomiarowego (podczas pomiaru),
- odczyt napięcia ze strumieniomierza (podczas pomiaru),
- odczyt parametrów dodatkowych (opcjonalnie, podczas pomiaru),
- odczyt wartości szczytowych strumienia magnetycznego (po skończeniu pomiaru),
- kompensacja dryftu strumieniomierza (opcjonalnie).



Rys. 7. Schemat blokowy algorytmu pomiarowego
Fig. 7. Block diagram of measurement algorithm

Następnie wartości strumienia zmierzone przez kartę DAQ są przeliczane wg wskazań maksymalnych strumieniomierza, a wartości napięcia na rezystorze przeliczone na pole magnesujące.

Sygnał generowany w celu rozmagnesowania próbki opisuje się wzorem (1):

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(2\pi ft) \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (1)$$

gdzie: $I(t)$ – chwilowe natężenie prądu, I_0 – maksymalna wartość prądu, f – częstotliwość, t – czas, τ – stała czasowa.

Dokładna wartość stałej czasowej i częstotliwości zależy od wartości pola remanencji magnetycznej i koercji próbki, i różni się znacznie w przypadku różnych materiałów magnetycznie miękkich, w szczególności stopów amorficznych. Przed rozpoczęciem pomiarów należy dobrać te wartości tak, by osiągnąć pełne rozmagnesowanie próbki.

7. Sterowanie strumieniem magnetycznym w próbce

Jednym ze sposobów na uzyskanie kontrolowanego przebiegu indukcji B jest użycie źródła napięciowego, jednak trzeba

wtedy spełnić szereg wymagań dotyczących impedancji źródła w stosunku do impedancji cewki – „krotność impedancji obciążenia w stosunku do impedancji widzianej z zacisków wyjściowych (źródła zasilania) powinna być nie mniejsza niż 25” [5] – a uzyskane pole magnesujące jest wynikowe. Ta metoda zakłada wysoką impedancję uzwojenia magnesującego, co nie zawsze jest możliwe do uzyskania.

Sinusoidalny/trójkątny przebieg strumienia magnetycznego jest uzyskiwany przy pomocy metody iteracyjnej oraz źródła prądowego. Użycie tej metody pozwala na uzyskanie sinusoidalnego lub trójkątnego przebiegu strumienia magnetycznego przy niewielkiej impedancji cewki magnesującej, w zależności od rdzenia może to być już kilka zwojów.

W pierwszej iteracji próbka jest namagnesowana za pomocą specjalnie opracowanej funkcji tgH złożonej z posklejanych przebiegów wykresu tangensa, ponieważ pierwsze magnesowanie przebiegiem sinusoidalnym pola magnesującego H mogłoby wydzielić nadmierną moc w próbce i ją nagrzać, zmieniając jej parametry. Funkcja ma następujące równanie (2) w pierwszej ćwiartce okresu:

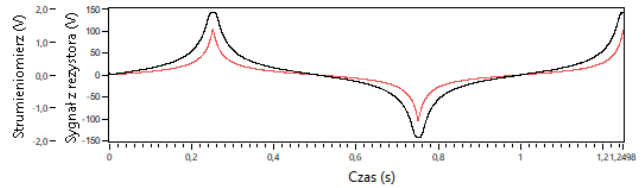
$$H(t) = \frac{A \operatorname{tg}(b\omega t)}{\operatorname{tg}\left(b\frac{\pi}{2}\right)} \tag{2}$$

gdzie: $H(t)$ – chwilowa wartość pola magnesującego, A – amplituda pola magnesującego, b – parametr nachylenia, ω – częstota kołowa, t – czas.

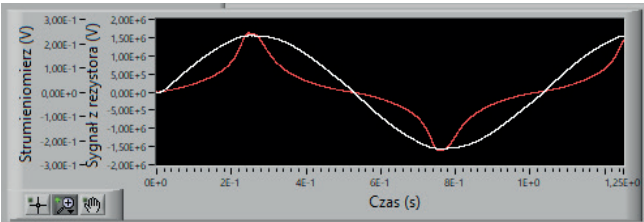
Parametr nachylenia b mieści się w zakresie od 0 do 1 i określa, w jakim stopniu wygenerowany przebieg jest podobny do przebiegu funkcji tangensa. Użycie wartości 0,1 generuje niemal idealny przebieg trójkątny, natomiast optymalne wartości do rozpoczęcia pomiaru mieszczą się w zakresie od 0,9 do 0,97.

Druga ćwiartka jest następnie odbijana względem osi Y, aby uzyskać funkcję ciągłą, a trzecia i czwarta ćwiartka są odbiciem pierwszej i drugiej względem osi X. Rysunek 8 przedstawia przykładowy wynik pomiaru pierwszej iteracji przy użyciu funkcji tgH.

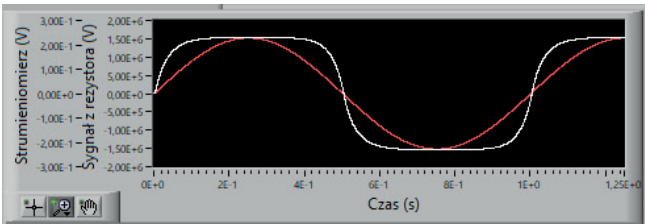
Następnie w sposób iteracyjny tworzone jest dopasowanie funkcji $B(H)$ wielomianem 25. stopnia (na taki maksymalny stopień pozwala LabVIEW), odwrotne jego przekształcenie tak, by $B(t)$ było sinusoidalne/trójkątne i magnesowanie nową uzy-



Rys. 8. Wynik pomiaru pierwszej iteracji przy użyciu funkcji tgH (wykres w kolorze czarnym – $B(t)$, czerwonym – $H(t)$)
Fig. 8. The result of the first iteration measurement using the tgH function (graph in black – $B(t)$, red – $H(t)$)



Rys. 9. Uzyskany sinusoidalny przebieg $B(t)$ metodą iteracyjną (wykres w kolorze białym – $B(t)$, czerwonym – $H(t)$)
Fig. 9. Obtained sinusoidal waveform $B(t)$ using the iterative method (graph in white – $B(t)$, red – $H(t)$)



Rys. 10. Pomiar z sinusoidalnym przebiegiem $H(t)$ (wykres w kolorze białym – $B(t)$, czerwonym – $H(t)$)
Fig. 10. Measurement with sinusoidal waveform $H(t)$ (graph in white – $B(t)$, red – $H(t)$)

skaną funkcją $H(t)$. Zazwyczaj po 2–4 iteracjach (w zależności od rodzaju próbki) błąd przebiegu funkcji $B(t)$ w stosunku do idealnego kształtu przebiegu trójkątnego lub sinusoidalnego określony przez współczynnik kształtu (ang. *form factor*) jest mniejszy niż 0,1 %, a błąd średniokwadratowy (RMS) jest mniejszy niż 5 % [6].

Straty magnetyczne zależą w dużym stopniu od szybkości zmiany gęstości strumienia magnetycznego dB/dt . [7] Użycie trójkątnego przebiegu strumienia magnetycznego umożliwia pomiar ze znacznie zmniejszonymi stratami, co zapewnia rzetelny pomiar parametrów magnetycznych i niskie rozpraszanie ciepła w próbce, podczas gdy pomiar z sinusoidalnym przebiegiem strumienia magnetycznego umożliwia pomiar według obowiązujących norm [5, 11]. Rysunki 9 i 10 przedstawiają uzyskane przebiegi $H(t)$ i $B(t)$ dla przebiegu sinusoidalnego $B(t)$ i sinusoidalnego $H(t)$.

Wynikowa strata mocy ($\int HdB$) jest znacznie niższa (o ok. 16 %) przy pomiarach sinusoidalnych $B(t)$ w porównaniu do sinusoidalnych $H(t)$, co przedstawia tabela 8.

Tab. 8. Parametry pętli histerezy dla różnych przebiegów magnesujących dla próbki amorficznej
Tab. 8. Hysteresis loop parameters for varying

Rodzaj magnesowania	Sinus H	Sinus B
Pole koercji H_c (A/m)	15,5	10,6
Współczynnik strat (J/m^3)	0,139	0,117

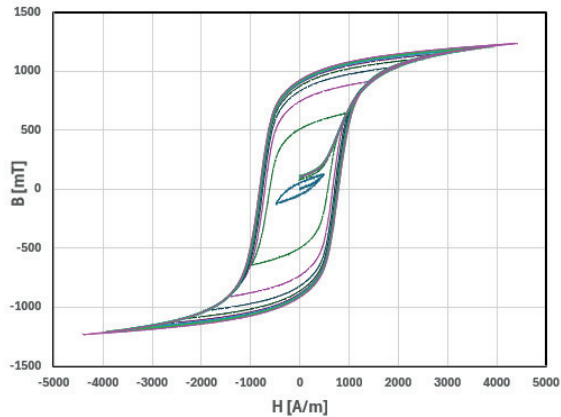
8. Przykładowe wyniki

Otrzymane przykładowe wyniki pomiarów demonstrujące możliwości systemu pomiarowego przedstawiono na kolejnych wykresach. Na rys. 11 oraz 12 zaprezentowano rodziny pętli histerezy zmierzonych na próbce wykonanej ze stali konstrukcyjnej, na rys. 11 zmieniając pole magnesujące przy stałej częstotliwości, natomiast na rys. 12 zmieniając częstotliwość pola magnesującego przy stałej jego amplitudzie.

Na rys. 12 przedstawione są pętle histerezy dla trzech częstotliwości pola magnesującego: 5, 20 oraz 80 Hz. Jako, że straty na histerezę opisane są jako powierzchnia pętli histerezy ($\int HdB$), zauważyć można zwiększone straty energii na przemagnesowanie wraz ze wzrostem częstotliwości magnesowania, co również przedstawia tabela 9 ze zmierzonymi parametrami pola koercji oraz współczynnika strat.

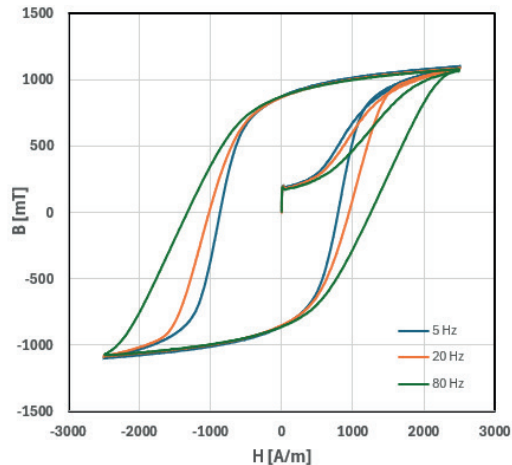
Naklejając na badaną próbkę tensometry można uzyskać wykres magnetostrykcji, tzn. zmiany wymiarów próbki pod wpływem działającego na nią pola magnesującego. Taki wykres przedstawiony jest na rys. 13.

Na rysunku 14 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej w funkcji pola magnesującego przy zmiennym obciążeniu próbki okiennej wykonanej ze stali [8].



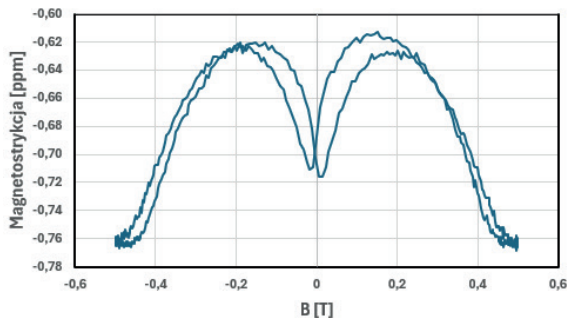
Rys. 11. Rodzina pętli histerezy dla próbki ze stali konstrukcyjnej dla różnych amplitud pola magnesującego

Fig. 11. Family of hysteresis loops for a structural steel sample for different magnetizing field amplitudes



Rys. 12. Rodzina pętli histerezy dla próbki ze stali konstrukcyjnej dla różnych częstotliwości pola magnesującego (5 Hz, 20 Hz, 80 Hz)

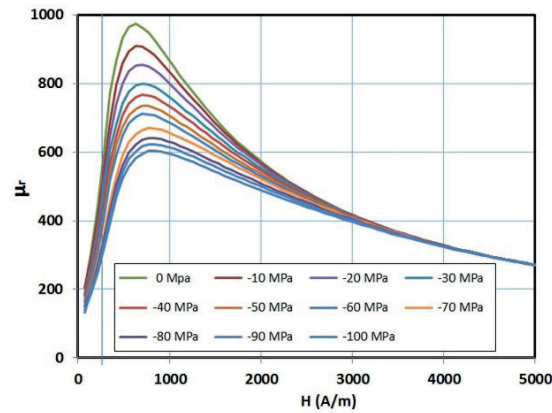
Fig. 12. Family of hysteresis loops for a structural steel sample for different magnetizing field frequencies (5 Hz, 20 Hz, 80 Hz)



Rys. 13. Przykładowy wykres magnetostrykcji dla próbki stalowej

Fig. 13. Example of magnetostriction graph for a steel sample

System pozwala także na wykreślenie krzywej pierwotnej magnesowania (komutacyjnej) oraz krzywej bezhisterezowej rdzeni magnetycznych. Krzywa ta przedstawia ścieżkę idealnego magnesowania materiału w przypadku braku strat spowodowanych histerezą. Otrzymywana jest przez rozmagnesowanie próbki w każdym punkcie pomiarowym z rosnącym offsetem pola magnesującego podczas rozmagnesowania. Krzywa bezhisterezowa magnetyzacji jest obecnie przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków w celach symulacyjnych i modelowania zjawisk fizycznych [9, 10].

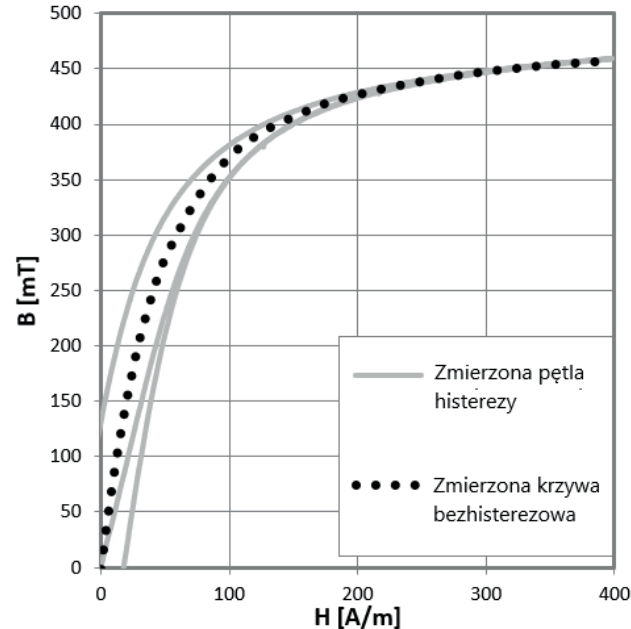


Rys. 14. Rodzina krzywych przenikalności magnetycznej przy rosnącym obciążeniu mechanicznym próbki [8]

Fig. 14. Family of magnetic permeability curves with increasing mechanical load of the sample [8]

Tab. 9. Parametry pętli histerezy dla różnych częstotliwości dla próbki stalowej

Częstotliwość	5 Hz	20 Hz	80 Hz
Pole koercji H_c (A/m)	830	980	1290
Współczynnik strat (J/m ³)	3,21	3,67	4,90



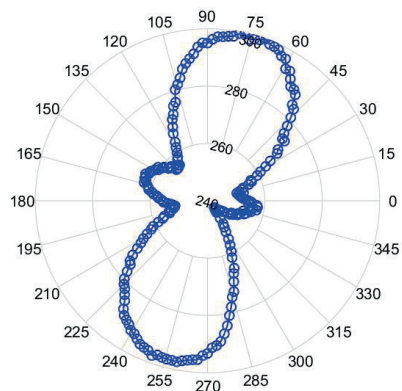
Rys. 15. Przykładowy wykres krzywej bezhisterezowej dla próbki z ferrytu F3001 [10]

Fig. 15. Example of an anhysteretic curve for a F3001 ferrite sample [10]

Przy pomocy modułu do obrotu jarzma magnesującego w próbkach płaskich, system pozwala również na pomiar rodziny pętli histerezy w zależności od anizotropii próbki, czego wynikiem może być rozkład widoczny na rys. 16 [4].

9. Podsumowanie

Głównym celem badań było opracowanie stanowiska badawczego pozwalającego na uzyskanie pełnych charakterystyk



Rys. 16. Przykładowy wykres anizotropii przenikalności wektorowej w funkcji kąta dla próbki ze stali transformatorowej

Fig. 16. Example of vector anisotropy graph of permeability in function of angle for a transformer steel sample

magnetycznych miękkich materiałów magnetycznie, takich jak ferryty lub materiały amorficzne, które pozwoliłyby na pomiar różnych parametrów magnetycznych przy wielu czynnikach zewnętrznych, zgodnie z normami pomiarów magnetycznych [11].

Stanowisko umożliwia generowanie prądu magnesującego o wartości międzyszczytowej 12 A z rozdzielczością 0,1 mA i częstotliwości do 16 kHz (zależnej od impedancji cewki magnesującej). Temperatura pomiaru może być zmienna w zakresie od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast zakres siły (ściskającej lub rozciągającej próbkę) sięga do 20 kN.

System łatwo rozbudować według potrzeb o dodatkowe moduły pomiarowe ze względu na otwarte oprogramowanie, tak jak np. moduły pomiaru krzywej bezhisterezy lub FORC. Żaden z komercyjnie dostępnych histerezografów nie gwarantuje takich możliwości.

Modułowa konstrukcja pozwala na szybką modyfikację wykorzystywanych urządzeń pomiarowych, np. za pomocą wymienionych przetworników U/I i strumieniomierzy, a także dodawanie pomiarów w funkcji parametrów zewnętrznych, jak np. tensometry do pomiaru magnetostrykcji lub obrotowe jarzmo pomiarowe do pomiaru anizotropii próbki.

Bibliografia

- de Wulf M., Dupré L., Melkebeek J., *Quasistatic measurements for hysteresis modeling*, "Jornal of Applied Physics", Vol. 87, No. 9, 2000, 5239–5241, DOI: 10.1063/1.373307.
- Gazda P., Nowicki M., Kachniarz M., *Active LR integrator circuit for drift-free magnetoelastic transducer*, "Acta Physica Polonica A", Vol. 133, No. 3, 2018, 745–747, DOI: 10.12693/APhysPolA.133.745.
- Gazda P., Nowicki M., Kachniarz M., *Active LR integrator circuit with ferrite core*, "Acta Physica Polonica A", Vol. 133, No. 4, 2018, 1041–1044, DOI: 10.12693/APhysPolA.133.1041.
- Rękas P., Nowicki M., Gazda P., Charubin T., Szumiata, Szewczyk R., *A measuring setup for testing the mechanical stress dependence of magnetic properties of electrical steels*, "Journal of Magnetism and Magnetic Materials", Vol. 577, 2023, DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170791.
- Kwiczala J., *Badania materiałów magnetycznych w ujęciu Normy*, "Przegląd Elektrotechniczny", Vol. 86, No. 4, 2010.
- Anderson P., *Constant dB/dt DC characterisation through digital control of magnetic field*, "Przegląd Elektrotechniczny", Vol. 87, No. 9, 2011.
- Szewczyk R., Frydrych P., *Extension of the Jiles-Atherton Model for Modelling the Frequency Dependence of Magnetic Characteristics of Amorphous Alloy Cores for Inductive Components of Electronic Devices*, "Acta Physica Polonica A", Vol. 118, No. 5, 2010, 782–784, DOI: 10.12693/APhysPolA.118.782.
- Szewczyk R., Nowicki M., Ostaszewska-Liżewska A., Bieńkowski A., Nowak P., Malinen M., *Accuracy of frame-shaped samples based measurements of magnetoelastic characteristics of soft magnetic materials*, "Measurement", Vol. 162, 2020, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107899.
- Silveyra J.M., Conde Garrido J.M., *A Physically Based Model for Soft Magnets' Anhyseretic Curve*, "Advanced Magnetic Materials for Energy and Other Functional Applications and Devices", Vol. 75, 2023, 1810–1823, DOI: 10.1007/s11837-023-05704-x.
- Nowicki M., *Anhyseretic Magnetization Measurement Methods for Soft Magnetic Materials*, "Materials", Vol. 11, No. 10, 2018, DOI: 10.3390/ma11102021.
- PN-EN 60404-6:2006, Magnetic Materials – Part 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.

Inne źródła

Modular Hysteresisgraph for Measuring the Characteristics of Magnetically Soft Materials

Abstract: The article presents a computer-controlled, modular and fully automated hysteresisgraph for measuring the characteristics of soft magnetic materials in a wide range of magnetizing field amplitudes. The hysteresisgraph enables measurements of magnetic hysteresis loops using different shapes of the magnetizing field and magnetic induction in the core (sinusoidal, triangular or custom magnetizing field, sinusoidal or triangular magnetic induction) and relative magnetic permeability curves. The modular design of the system enables measurements of magnetic parameters with additional influences of external conditions, such as temperature, mechanical stress or sample rotation angle (anisometer operating system). Open software allows for addition of new measurement methods, which is not possible in commercially available systems.

Keywords: magnetic measurements, hysteresisgraph, metallic glass, ferrite, soft magnetic materials, anhysteretic magnetization curve, FORC

dr inż. Tomasz Charubin

Tomasz.Charubin@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-5076-5288

Adiunkt badawczo-dydaktyczny na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Projektant elektronicznych systemów pomiarowych wielkości elektrycznych i mechanicznych. Specjalizuje się w przetwornikach magnetomechanicznych. Współpracował przy projektach badawczych z zakresu inżynierii materiałowej i elektroniki. Autor wielu publikacji naukowych z zakresu sensorów oraz systemów pomiarowych.

