

## Wpływ zmian wtrąceniowych w ferromagnetyku na pętlę histerezy różnicowej dla różnych częstotliwości strumienia magnetycznego

**Streszczenie.** Dzięki zastosowaniu współczesnych technik pomiarowych pojawiają się nowe możliwości znalezienia dodatkowych funkcjonalności dla klasycznych obwodów elektrotechniki. W artykule przedstawiono próbę wykorzystania zmiennoprądowego mostka pomiarowego Maxwell'a w układzie porównawczym ze wzorcem. Układ ten wykazuje zdolności do identyfikacji, a w następnych krokach klasyfikacji zmian wtrąceniowych w ferromagnetykach.

**Abstract.** Using modern measurement techniques, there are new opportunities to find additional functionalities for the classical electrical engineering systems. The article presents an attempt to use the AC Maxwell bridge circuit in the comparative system with the pattern. This system demonstrates the ability to identify, and in the next steps, the classification of insertion changes in ferromagnet. (Effect of insertion changes in a ferromagnet at the differential hysteresis loop for various frequencies of magnetic flux).

**Słowa kluczowe:** histereza różnicowa, mostek pomiarowy Maxwell'a, identyfikacja.

**Keywords:** differential hysteresis, Maxwell's bridge, identification.

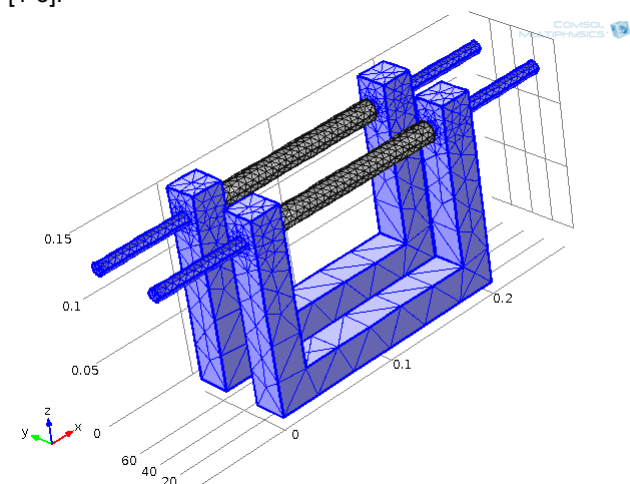
### Wstęp

Zmiany pętli histerezy ferromagnetyka mogą wskazywać na fluktuację parametrów fizycznych materiału oraz miejsca o zaburzonej strukturze wewnętrznej badanego rdzenia.

Przy założeniu, że gabaryty ferromagnetyka są stałe można założyć, że zmiany pętli histerezy są spowodowane zmianami w budowie wewnętrznej materiału.

Dlatego ważne jest by móc zmierzyć zmiany pętli histerezy w celu zbadania nieciągłości ferromagnetyka. Bardziej zaawansowane badania powinny umożliwić sklasyfikowanie zmian w budowie badanego obiektu. Zmiany pętli histerezy są powiązane ze zmianami strumienia magnetycznego i obejmują obszar przez który przepływa strumień. Obszar ten będzie można badać pod kątem zaburzeń nieciągłości materiału. Warto zauważyć że pole pętli histerezy obrazuje straty związane, między innymi, z przemagnesowywaniem ferromagnetyka, co może być także wykorzystane we wspomnianych badaniach.

Do pomiarów zastosowano model defektoskopu indukcyjnego, wykonanego w IEiE Politechniki Lubelskiej [1-3].



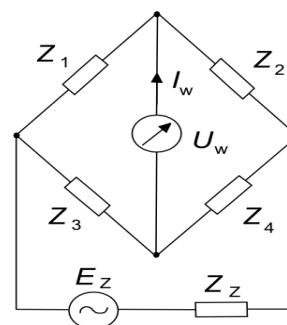
Rys.1. Uproszczony schemat magnetowodów stanowiska pomiarowego

Urządzenie to pracuje w układzie mostka pomiarowego zmiennoprądowego, w którym istnieją dwa magnetowody z cewkami (rys.1.) oraz zestaw cewek będących opcjonalnymi elementami urządzenia badawczego,

nieuwzględnionymi na powyższym rysunku. Celem podjętego tematu jest wyznaczenie optymalnej częstotliwości do dalszych badań nad diagnozowaniem rdzenia oraz opcjonalnie klasyfikacja miejsc o zaburzonej strukturze wewnętrznej w ferromagnetyku.

### Układ pomiarowy

W przeprowadzonych badaniach zastosowano układ mostka pomiarowego z indukcyjnościami nieliniowymi w ramionach pierwszym oraz trzecim (rys.2). Zastosowane elementy indukcyjne stanowią jednakowe cewki z rdzeniami ferromagnetycznymi, wzorcowym oraz badanym. Miejsce o zaburzonej strukturze wewnętrznej badanego rdzenia powoduje zmiany jego strumienia magnetycznego [4], co prowadzi do pojawienia się zmiany napięcia nierównowagi  $u_w$ .



Rys.2. Schemat obwodu mostka pomiarowego zmiennoprądowego [5]

Mostek jest zbudowany z elementów RL oraz zasilany ze źródła napięcia sinusoidalnego z możliwością zmiany częstotliwości, amplitudy i fazy początkowej. Ramiona mostka stanowią gałęzie pasywne obwodu typu rezystancyjnego w ramionach 2 i 4 oraz gałęzie indukcyjne w ramionach 1 i 3 (rys.2.). Ponieważ w cewkach znajdują się rdzenie ferromagnetyczne, indukcyjność obu ramion jest nieliniowa. Układ ten jest klasycznym mostkiem Maxwell'a z gałęziami nieliniowymi. Zastosowane elementy indukcyjne stanowią jednakowe cewki powietrzne z wymiennymi rdzeniami ferromagnetycznymi. Miejsce o zaburzonej strukturze wewnętrznej badanego rdzenia powoduje zmiany jego strumienia magnetycznego, co prowadzi do pojawienia się zmian napięcia nierównowagi  $u_w$  [2].

Poniżej podany został analityczny sposób wyznaczenia tego napięcia. Dla powyższego obwodu posługując się równaniami obwodowymi można zapisać bilans napięć (1).

$$(1) \quad \begin{cases} u_w = u_3 - u_1 \\ u_w = u_4 - u_2 \end{cases}$$

Napięcia na ramionach z liniowymi elementami przedstawiają zależności (3) oraz (5), zaś napięcia na ramionach z elementami nieliniowymi równania (2) i (4).

$$(2) \quad u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dL_1}{dt}$$

$$(3) \quad u_2 = i_2 R_2$$

$$(4) \quad u_3 = i_3 R_3 + \frac{d\Psi_3}{dt} = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 \frac{dL_3}{dt}$$

$$(5) \quad u_4 = i_4 R_4$$

Na podstawie układu równań (1) oraz znajomości napięć na ramionach (2), (3), (4) i (5) można wyznaczyć napięcie nierównoważenia  $u_w$  (6).

$$(6) \quad 2u_w = i_4(R_3 - R_4) - i_2(R_1 - R_2) - \frac{d(\Psi_1 - \Psi_3)}{dt}$$

W układzie pomiarowym wartości rezystancji zostały dobrane tak by były jednakowe. Jednakowe są także indukcyjności cewek bez rdzeni, dlatego wzór (6) można uprościć do postaci (7).

$$(7) \quad u_w = -\frac{1}{2} \frac{d(\Psi_1 - \Psi_3)}{dt}$$

Przy dodatkowym uproszczeniu można stwierdzić, że napięcie nierównowagi mostka jest proporcjonalne do wartości zmian różnicy strumieni skojarzonych w cewkach  $L_1$  oraz  $L_3$ .

Uogólniając, oznacza to, że wartość napięcia nierównowagi mostka jest funkcją różnicy strumieni skojarzonych w cewkach ramion  $Z_1$  oraz  $Z_3$ .

$$(8) \quad u_w = f(\Psi_1 - \Psi_3)$$

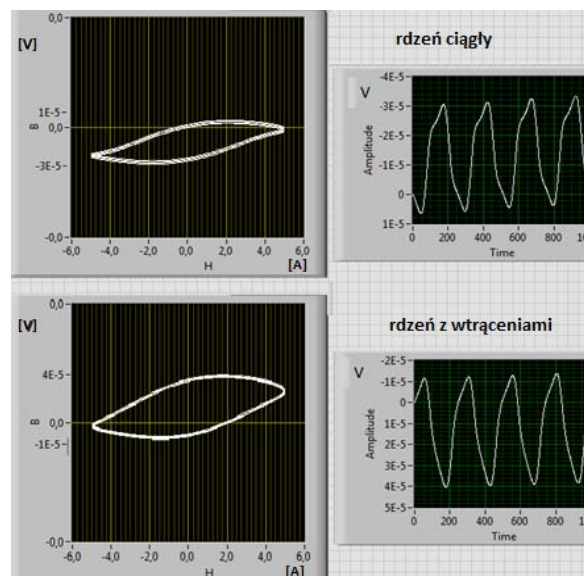
Znając przebieg różnicy strumieni oraz towarzyszący jej przebieg prądu magnesującego badany ferromagnetyk można uzyskać pętlę histerezy różnicowej.

### Pomiary

Metoda badawcza polega na zobrazowaniu przebiegu napięcia nierównoważenia  $u_w$  pod wpływem zmian prądu magnesującego przepływającego przez cewkę z badanym rdzeniem. Wartość tego prądu jest wyznaczana z pomiarów napięcia na ramieniu 2 lub 4 i znanej rezystancji w tych ramionach. Rezystancyjny charakter gałęzi oznacza, że przebiegi prądu oraz napięcia są zgodne w fazie. Analizie poddano wyniki pomiarów w określonych przedziałach czasu równych czterem okresom dla danej częstotliwości.

Pętlę histerezy różnicowej można uzyskać podając napięcie powstałe w wyniku przepływu prądu magnesującego przez rezystor  $R_2$  na zaciski odchylenia poziomego oraz scałkowane napięcie nierównowagi mostka na zaciski odchylenia pionowego oscyloskopu. Jak widać na rysunku 3, pod wpływem zmian ciągłości rdzenia, na

przykład w postaci nacięcia na jego obwodzie, obserwuje się zmiany kształtu oraz rozmiaru pętli histerezy. W tym przypadku rozmiary pętli wyraża amplituda międzyszczytowa scałkowanego napięcia nierównowagi mostka.



Rys.3. Przebiegi i pętla scałkowanego napięcia nierównoważenia mostka dla rdzenia ciągłego i z nacięciem

Dokładność badania pętli histerezy zależy od jakości elementów dobranych w gałęziach mostka i można ją adaptacyjnie poprawiać dobierając elementy gałęzi z coraz większą dokładnością.

Przykład pętli histerezy różnicowej dla częstotliwości 80 Hz pokazany jest na rysunku 3. Dobierając odpowiednią wartość prądu przepływającego przez cewki oraz częstotliwości poniżej 200 Hz można uzyskać pętlę w kształcie liter S [4].

Na zmiany pętli histerezy mają wpływ także prądy wirowe, które ograniczają penetrację strumienia magnetycznego do wnętrza rdzenia. Używa się pojęcia standardowej głębokości wnikania prądów wirowych

$$(9) \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \gamma \mu}}$$

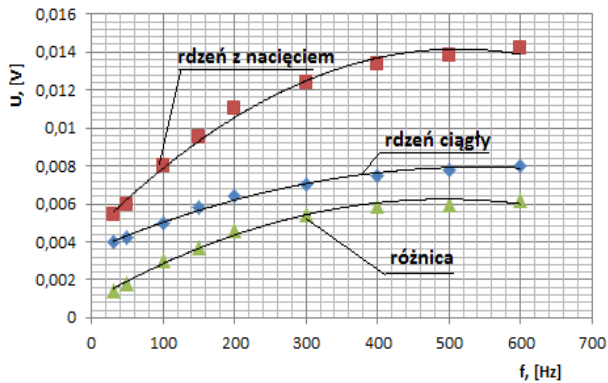
gdzie:  $\gamma$  – przewodność elektryczna obiektu w S/m,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna obiektu w H/m,  $f$  – częstotliwość w Hz.

Z tego powodu stosowanie zbyt dużych częstotliwości prowadzi do zakłócenia badania. Przyjmuje się, że pole magnetyczne jest quasi stacjonarne poniżej 500 Hz dlatego też w badaniu brano pod uwagę częstotliwości z zakresu od 20 Hz do 600 Hz.

Z uwagi na wysoką czułość pomiarów duży wpływ mają szczeliny powietrzne, a ściślej ich zmiany w trakcie badania. Dlatego badanie należy wykonywać przy dokładnie unieruchomionym jarmie. Ta przyczyna bywa powodem problemów związanych z powtarzalnością pomiarów.

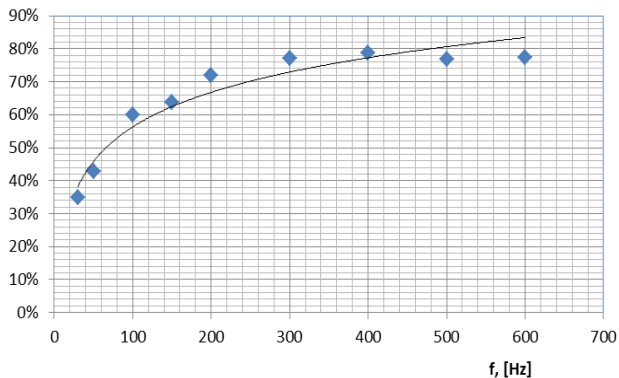
### Napięcie skutecznego nierównoważenia mostka

Na rysunku 4 przedstawione zostały pomiary zmiany napięcia skutecznego  $u_w$  na głównej przekątnej mostka dla różnych częstotliwości. Kwadraty oznaczają punkty pomiarowe dla rdzenia z nacięciem, romby oznaczają pomiary rdzenia ciągłego. Różnicę bezwzględną napięcia ilustrują trójkątne punkty pomiarowe.



Rys.4. Napięcie skuteczne niezrównoważenia mostka dla różnych częstotliwości

Pomiary wykonano przy jednakowym prądzie magnesującym. Jak widać z powyższego rysunku, napięcie nierównowagi mostka zdecydowanie rośnie przy wzroście częstotliwości do 400 Hz, a następnie dynamika wzrostów maleje. Na tej podstawie można wnosić, że zasilanie mostka częstotliwością większą od 400 Hz, nie będzie wpływało na czułość wskaźników określających defekty materiałowe rdzenia.



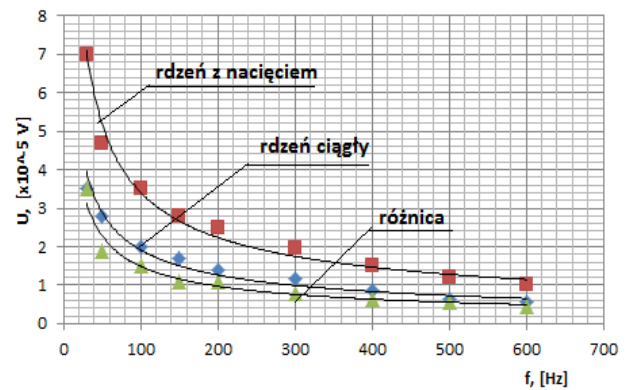
Rys.5. Różnica względna napięcia skutecznego niezrównoważenia mostka dla różnych częstotliwości

Wartość różnicy względnej napięcia skutecznego niezrównoważenia dla rdzenia z oraz bez nacięcia pokazana jest na rysunku 5. Różnica ta jest obliczona względem wskaźników z rdzeniem ciągłym.

Z charakteru krzywej wynika, że dynamika zmiany napięcia nierównowagi zwiększa się z częstotliwością do 200 Hz i stabilizuje się na poziomie 75%. Przy badaniu ferromagnetyka sama wartość napięcia nierównowagi mostka nie jest jeszcze wystarczająca do stwierdzenia nieciągłości rdzenia. Stanowi ona podstawę do dalszej analizy obiektu.

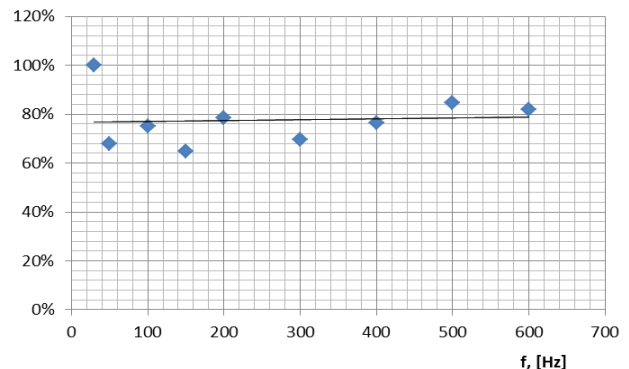
#### Amplituda międzyszczytowa skalkowanego napięcia niezrównoważenia

Wartość amplitudy międzyszczytowej skalkowanego napięcia niezrównoważenia ilustruje rysunek 3. Jest ona mierzona jako wysokość pętli histerezy różnicowej lub odległość w pionie między szczytami w przebiegu skalkowanego napięcia nierównowagi mostka. Dla wybranych częstotliwości wykonano pomiary oraz wyznaczono wartości tej amplitudy. Uzyskane wyniki posłużyły do sporządzenia wykresu przedstawionego na rysunku 6 oraz 7.



Rys.6. Amplituda międzyszczytowa skalkowanego napięcia niezrównoważenia mostka dla różnych częstotliwości

Z ilustracji uzyskanych wyników (rys.6.) widać, że amplituda międzyszczytowa skalkowanego napięcia nierównowagi mostka maleje wraz z rosnącą częstotliwością.



Rys.7. Różnica względna amplitudy międzyszczytowej skalkowanego napięcia niezrównoważenia mostka dla różnych częstotliwości

Na rysunku 7 przedstawiono wykres różnicy względnej względem pomiaru z rdzeniem ciągłym. Widać z niego że wartości te po dużym rozrzucie przy częstotliwościach poniżej 200 Hz stabilizują się na poziomie 80% wzrostu amplitudy. Rozrzut jest spowodowany tym, że przy małych częstotliwościach przebiegi nie były stabilne.

#### Wnioski

- ▶ Zmiany napięcia skutecznego niezrównoważenia pod wpływem zmian ciągłości rdzenia są znacząco wyższe powyżej 100 Hz.
- ▶ Nacięcie na rdzeniu ma wpływ na wielkość pętli histerezy różnicowej. Przy wzroście częstotliwości ten wpływ stabilizuje się na około 80% powiększeniu pętli. Powyżej 200 Hz zmiany pętli się stabilizują, przy jednoczesnym wzroście wpływu prądów wirowych.
- ▶ Ze wzrostem częstotliwości pętla histerezy różnicowej zmienia kształt z litery S na zbliżony do elipsy.
- ▶ Zaburzenia w wewnętrznej strukturze ferromagnetyka powodują mierzalne zmiany pętli histerezy różnicowej. Zmiany te są subtelne i wymagają dużej staranności przy wykonywaniu pomiarów.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Andrzej Wac-Włodarczyk, Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, e-mail: [a.wac-wlodarczyk@pollub.pl](mailto:a.wac-wlodarczyk@pollub.pl); mgr inż. Piotr Ziń, Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, e-mail: [p.zin@pollub.pl](mailto:p.zin@pollub.pl); dr inż. Tomasz Giżewski, Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, e-mail: [t.gizewski@pollub.pl](mailto:t.gizewski@pollub.pl);

#### LITERATURA

- [1] Wac-Włodarczyk A., Goleman R., Czerwiński D., Giżewski T.: Symulacja pracy mostkowego układu porównawczego materiałów ferromagnetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 12/2000, s.141-144.
- [2] Wac-Włodarczyk A., Goleman R., Giżewski T., Eksperymentalna identyfikacja różnicowej powierzchni Preisacha w układzie mostka zmiennoprądowego, *Przegląd Elektrotechniczny* 12/2010, s.160-163.
- [3] Wac-Włodarczyk A., Goleman R., Giżewski T., Zastosowanie algorytmu sztucznych sieci neuronowych w identyfikacji uszkodzeń materiałów ferromagnetycznych, *Dozór Techniczny*, nr 2/2008, s.41-45.
- [4] Wac-Włodarczyk A., Ziń P., Giżewski T., Pętla histerezy różnicowej w mostku Maxwell'a dla różnych częstotliwości strumienia magnetycznego, XXIV Sympozjum Środowiskowe PTZE, Hucisko 2014, s.217-218.
- [5] Ziń P., Zastosowanie mostka sprzężonego indukcyjnie w badaniach nieniszczących ferromagnetyków, *Warsztaty doktoranckie OWD Wisła 2013*, s.258-261.