

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **236720**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **422786**

(51) Int.Cl.
G01R 33/14 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **08.09.2017**

(54) **Układ i sposób do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych, zwłaszcza elastomerów i kompozytów magnetoreologicznych**

(30) Pierwszeństwo:
09.09.2016, PL, P.418631

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
12.03.2018 BUP 06/18

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
08.02.2021 WUP 03/21

(73) Uprawniony z patentu:
**SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ-INSTYTUT
LOTNICTWA, Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:
**MACIEJ PARAFINIAK, Warszawa, PL
SZYMON KOZIEŁ, Okrężnica, PL
THIBAUT MONTIGAUD, Bourges, FR
JULIA MIROWSKA, Warszawa, PL
KACPER WYSOKIŃSKI, Raszyn, PL
PAWEŁ SKALSKI, Warszawa, PL
MAŁGORZATA WOJTAS, Warszawa, PL
MICHAŁ TIMM, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Jakub Siewewiesiuk

PL 236720 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ i sposób do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych zwłaszcza elastomerów i kompozytów magnetoreologicznych. W szczególności wynalazek obejmuje układ do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H, umożliwiający określenie parametrów magnetycznych elastomerów magnetoreologicznych. Zgodnie z obecnym wynalazkiem, układ/urządzenie składa się z kilku elementów, które pozwalają wyświetlić na ekranie komputera magnetyczną pętlę histerezy, tj. określić stopień namagnesowania materiału (za pomocą indukcji magnetycznej – oznaczanej za pomocą litery „B”) pod wpływem zadanego pola magnetycznego („H”). Zaprojektowane stanowisko pomiarowe do badań materiałów magnetycznych w swojej istocie można zaliczyć do dwóch kategorii urządzeń – histerezografów oraz permeametrów, ze względu na możliwe dwa sposoby obliczenia pożądanych właściwości. Zaproponowana metodologia w zgłoszeniu zupełnie różni się od obecnie obowiązujących norm.

Spośród licznych typów materiałów stosowanych w przemyśle największą uwagę obecnie skupia się na poznaniu właściwości magnetycznych materiałów, które poprzez dogłębną znajomość ich parametrów umożliwiają synergiczne sterowanie układami wykonawczymi. Sposobów badania właściwości magnetycznych dostępnych na rynku jest bardzo wiele i określone są one przez zespół norm wydawanych przez organizacje standaryzujące oraz normalizacyjne jak np. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC), Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów (ASTM) oraz Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki (CENELEC). Wspomniane organizacje przygotowały szereg publikacji, według których tworzone są komercyjne stanowiska na całym świecie. Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna zapisała swoje zalecenia dotyczące stanowisk pomiarowych pod numerem 60404 (IEC TC 85), natomiast druga przywołana organizacja ujęła swoje standaryzacje pod kilkoma numerami np. ASTM A342, ASTM STP371S1, ASTM A596-95e1. Komitet normalizacyjny CENELEC podaje swoje normalizacje w rozporządzeniu CLC/SR 85 (Measuring Equipment for Electrical and Electromagnetic Quantities), gdzie najbardziej interesującymi normami z punktu widzenia poruszanego tematu są dokumenty opatrzone sygnaturami EN 60359:202, EN 61028:1993, EN 61143-2:1994, EN 61187:1994 oraz EN 61554.

Spośród wymienionych dokumentów normalizacyjnych najbardziej interesującym jest ten, który prezentuje permeametry do badań materiałów o niskiej przenikalności magnetycznej – ASTM A342. Norma ta wymienia 5 różnych metod pomiarowych, z czego jedna została wycofana z użytku. Pozostałe cztery opierają się na zupełnie innej metodologii niż ta, która została zaproponowana w niniejszej pracy.

W stanie techniki (Fig. 1, <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Permeameter>) są znane permeametry, tj. urządzenia do pomiarów charakterystyk magnetycznych, np. histerezy, do badania próbek ferromagnetycznych o prostych formach. Składają się one z ramy lub jarzma wykonanych z magnetycznie miękkiego materiału, i zwykle są wyposażone w ruchome części lub nabiegunniki, które zaciskają badaną próbkę w taki sposób, że próbka tworzy zamknięty obwód magnetyczny z jarzmem. Na jarzmo są nałożone cewki, i podłączone urządzenia do pomiarów indukcji magnetycznej B i magnetycznego natężenia pola H w badanej próbce. W tym miejscu warto napisać, że w stanie techniki (Fig. 1) na próbkę nawinięte jest uzwojenie (6), które służy do pomiaru indukcji. W proponowanym zgłoszeniu na badaną próbkę nie nawija się uzwojenia, a pomiar jest realizowany w inny sposób, przedstawiony poniżej w zgłoszeniu.

W zgłoszeniu patentowym US nr 3879658 (A) ujawniono urządzenie do pomiaru podatności magnetycznej, które zawiera 2 jarzma ferromagnetyczne, na które są nałożone cewki, co najmniej trzy na każde jarzmo. Cewki na jednym jarzmie są połączone z odpowiednimi cewkami na drugim jarzmie oraz ze źródłem prądu stałego. W każdym przypadku końce jarzma tworzą szczelinę, w którą wkłada się badane próbki. Szczeliny są wypełniane odpowiednimi gazami, w zależności od właściwości badanej próbki. Jest również zaznaczone że jeżeli materiał wykazuje znaczną podatność, to szczelina może być wypełniona powietrzem. Jako próbka może być ciecz lub ciało stałe.

Przykładem rozwiązania ze stanu techniki może być magnemometr z wibrującą próbką, zasilany prądem zmiennym, gdzie cewki chłodzone są cieczą. Gabaryty urządzenia są na tyle duże, że nie można jest w sposób prosty transportować.

Celem obecnego wynalazku jest zaproponowanie rozwiązania kompaktowego obejmującego układ przeznaczony do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych. Ponadto, urządzenie to ze względów na zdecydowanie dużo mniejszy rozmiar można w wygodny

i łatwy sposób transportować i przenosić za pomocą „uszu” zamocowanych na górze urządzenia, oraz urządzenie to nie wymaga chłodzenia cieczą, a układ zasilany jest prądem stałym. Układ według wynalazku znamienne jest tym, że w obecnie stosowanych podobnych metodach wyznaczania parametrów materiału, zasilacz prądu zmiennego zastąpiono zasilaczem prądu stałego, a na badaną próbkę nie nawija się uzwojenia.

Zgodnie z wynalazkiem układ do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych zwłaszcza elastomerów i kompozytów magnetoreologicznych, zawierający obwód magnetyczny, co najmniej dwie cewki będące źródłem pola magnetycznego, umieszczone szeregowo w obwodzie magnetycznym, szczelinę powietrzną w obwodzie magnetycznym, utworzoną pomiędzy cewkami, miernik indukcji magnetycznej wyposażony w sondę pomiarową z czujnikiem, przekaźnik elektromagnetyczny umożliwiający zmianę kierunku prądu w obwodzie magnetycznym, charakteryzuje się tym że posiada ponadto programowalny zasilacz prądu stałego do zasilania układu prądem stałym połączony z przekaźnikiem elektromagnetycznym. Przekaźnik elektromagnetyczny znajduje się pomiędzy zasilaczem a co najmniej dwiema cewkami, w jednym obwodzie zbudowanym z jarzma. Cewki stanowiące uzwojenia nawinięte na karkas, zbudowany z tekstolitu, są nałożone na część jarzma. W szczelinie powietrznej obwodu magnetycznego znajduje się miejsce na umieszczenie tam równolegle do siebie po przeciwnych stronach głowicy miernika indukcji magnetycznej co najmniej dwóch próbek z materiału substancji magnetoreologicznej w kształcie okrągłych pastylek, na zewnątrz uzwojeń, to jest poza uzwojeniem.

Korzystnie w układzie według wynalazku jarzmo jest jarzmem ferrytowym.

Korzystnie w układzie według wynalazku co najmniej dwie cewki będące źródłem pola magnetycznego są umieszczone równolegle do siebie.

Korzystnie układ według wynalazku dodatkowo zawiera urządzenie rejestrująco-sterujące połączone z programowalnym zasilaczem prądu stałego. Szczególnie korzystnie urządzenie rejestrująco-sterujące komputer z oprogramowaniem pomiarowo-sterującym.

Korzystnie w układzie według wynalazku jarzmo wykonane jest z żelaza, kobaltu, niklu lub ich stopów, korzystnie ze stali zawierającej 99,99% Fe.

Korzystnie w układzie według wynalazku próbki są w postaci okrągłych pastylek, korzystnie o średnicy 40 mm.

Korzystnie w układzie według wynalazku szczelina powietrzna ma regulowaną szerokość.

Korzystnie w układzie według wynalazku programowalny zasilacz prądu stałego podłączony jest do komputera sterująco-rejestrującego.

Korzystnie w układzie według wynalazku przekaźnik elektromagnetyczny z jednej strony połączony jest z programowalnym zasilaczem prądu stałego, a z drugiej z cewkami.

Korzystnie układ według wynalazku zawiera drukarkę.

Korzystnie w układzie według wynalazku każda z cewek zawiera 1450 zwojów.

Korzystnie w układzie według wynalazku zasilacz programowalny prądu stałego pracuje w zakresie 0–5 Amperów (A).

Korzystnie w układzie według wynalazku próbki z materiału substancji magnetoreologicznych znajdują się poza uzwojeniem.

Ponadto, przedmiotowy wynalazek dotyczy sposobu wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych, zwłaszcza elastomerów i kompozytów magnetoreologicznych. Sposób według wynalazku charakteryzuje się tym, że jest realizowany z użyciem układu według wynalazku określonego powyżej i obejmuje następujące etapy:

- uruchamia się układ według wynalazku;
- mierzy się szerokość szczeliny;
- dokonuje się pierwszego pomiaru indukcji magnetycznej w celu obliczenia współczynnika korekcji;
- dokonuje się drugiego pomiaru wartości indukcji magnetycznej po umieszczeniu w szczelinie próbek z materiału substancji magnetoreologicznej;
- dokonuje się obliczeń na podstawie następujących równań:
 - a. określenie reluktancji poszczególnych elementów obwodu poprzez zastosowanie wzoru $R = l / \mu * S$, gdzie:
 - R – reluktancja [1/H],
 - l – długość odcinka o tym samym przekroju [m],

μ – całkowita wartość przenikalności magnetycznej (wartość przenikalności magnetycznej dla próżni pomnożona przez względną dla danego ośrodka) [H/m],

S – pole przekroju przez który przenika strumień magnetyczny [m²],

- b. określenie rzeczywistej wartości indukcji magnetycznej poprzez zastosowanie współczynnika korekcji, gdzie rzeczywista indukcja magnetyczna określona jest wzorem $B = B_{\text{badane}} + (1-k) \cdot B_{\text{badane}}$, gdzie k jest obliczane jest wzorem $k = \mu_{\text{powietrza książkowe}} - \mu_{\text{badane}}$, gdzie μ_{badane} – wartość przenikalności magnetycznej dla powietrza w warunkach przeprowadzanego badania,

- c. określenie wartości strumienia magnetycznego poprzez zastosowanie wzoru $\Phi = \int B dS$, gdzie:

Φ – wartość strumienia magnetycznego [Wb],

B – wartość indukcji magnetycznej [T],

S – powierzchnia, przez którą przepływa strumień magnetyczny [m²],

- d. podstawienie znanych wartości do równania $N \cdot I = (R + R_m) \cdot O$, gdzie reluktancja badanego elementu, ze względu na nieznaną przenikalność magnetyczną zostanie oznaczona jako R_m , a reluktancja pozostałej części układu obliczona przy pomocy wzoru a) oznaczona jest jako R, N to liczba zwojów uzwojenia a I to płynący przez uzwojenie prąd, gdzie po wyznaczeniu R_m oblicza się μ_m , przenikalność magnetyczną próbki, na podstawie równania a),

- e. obliczenie natężenie pola magnetycznego poprzez zastosowanie równania $H = B/\mu_m$,

co prowadzi do otrzymania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych, przy czym korzystnie po obliczeniach następuje weryfikacja poprawności wykonania pomiaru poprzez obliczenie zmierzonej szerokość szczeliny L na podstawie wzoru $L = N \cdot I / H$, gdzie pomiar jest uznany za poprawny, jeśli obliczona szerokość szczeliny L odpowiada wartości zmierzonej.

W jednym z korzystnych wariantów realizacji sposób według wynalazku obejmuje następujące etapy wykonywania pomiaru:

- 1) uruchamia się urządzenie według wynalazku określone powyżej;
- 2) mierzy się szerokość szczeliny;
- 3) umieszcza się sondę w szczelinie;
- 4) dokonuje się pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji, poprzez:
 - 4.1 zwiększenie wartości prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A.
 - 4.2 pomiar wartość indukcji magnetycznej.
 - 4.3 jeżeli prąd zasilający cewki jest mniejszy od prądu maksymalnego – I_{max} wraca się do etapu 4.1, natomiast jeżeli prąd jest równy bądź wyższy I_{max} , przechodzi się do etapu 5
- 5) zmniejsza się wartość prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A
 - 5.1 mierzy się wartość indukcji magnetycznej.
 - 5.2 jeżeli prąd zasilający cewki jest większy od zera, wraca się do etapu 5), natomiast jeżeli prąd jest równy zero, przechodzi się do etapu 6;
- 6) załącza się drugi kanał zasilacza i tym samym odwraca się polaryzację prądu i ponownie wykonuje etapy od 4.1 do 5 dla polaryzacji odwróconej;
- 7) następnie za pomocą pęset umieszcza się w szczelinie powietrznej 2 próbki badanego materiału z sondą pomiędzy nimi i powtarza się pomiary – etapy od 4.1 do 6;
- 8) na podstawie otrzymanych wyników pomiarów oraz równań a)-e) otrzymuje się pętlę histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych.

W korzystnym przypadku realizacji tego wariantu sposób według wynalazku obejmuje następujące etapy:

- 1) uruchamia się komputer wraz z aplikacją, zasilacz oraz miernik indukcji magnetycznej;
- 2) dokonuje się pomiaru szerokości szczeliny;
- 3) umieszcza się w szczelinie sondę pomiarową;
- 4) dokonuje się pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji;
- 5) następnie umieszcza się za pomocą pęset 2 elementy próbki materiału badanego wraz z sondą pomiędzy nimi i powtarza się pomiary;
- 6) otrzymuje się wykres magnetycznej pętli histerezy badanego materiału z zastosowaniem aplikacji komputerowej.

W szczególnie korzystnym przypadku realizacji tego wariantu sposobu według wynalazku bada się substancje magnetoreologiczne stanowiące materiały próbki w zakresie pola magnetycznego od 0T do 2T w warunkach chłodzenia pasywnego.

Poniżej zamieszczono przykłady wykonania przedmiotowego wynalazku przedstawione na rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia stan techniki;

Fig. 2 przedstawia schemat stanowiska pomiarowego, gdzie odnośniki cyfrowe mają następujące znaczenie: 1 – komputer z aplikacją sterująco-pomiarową, 2 – zasilacz, 3 – przełącznik elektromagnetyczny, 4 – jarzmo, 5 – cewki, 6 – miernik teslomierz, 7 – sonda pomiarowa, 8 – szczelina pomiarowa.

Fig. 3 przedstawia obwód zastępczy magnetowodu składający się z samych reluktancji.

Fig. 4 przedstawia obwód zastępczy magnetowodu po uproszczeniu ilustrujący układ według wynalazku, na podstawie którego został przygotowany algorytm obliczeń.

Przykład 1 – OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Jak wspomniano wcześniej, stanowisko badawcze opiera się na zasadzie budowy elektromagnesu, w którym źródłem pola magnetycznego są cewki połączone szeregowo w celu zapewnienia możliwie największego pola magnetycznego, aby określić stopień nasycenia się badanego materiału. Ze względu na jego zachowanie w obecności magnesów neodymowych, wykazujących bardzo duży stopień indukcji magnetycznej, można przypuszczać, że materiał, na potrzeby którego powstało stanowisko, wykazuje cechy paramagnetyczne. Jest to jednak informacja niewystarczająca, aby móc wykorzystać materiał w praktyce.

Budowa stanowiska – analiza konstrukcji oraz elementy bazowe

Stanowisko badawcze składa się z kilku elementów, dzięki którym jest możliwy pomiar własności magnetycznych. Podstawowe elementy układu to komputer 1 z aplikacją sterującą pomiarami, zasilacz prądu stałego 2, przełącznik elektromagnetyczny 3, jarzmo 4, dwie cewki 5, miernik indukcji magnetycznej (tzw. teslomierz) 6 wraz z sondą pomiarową. Schemat teoretyczny stanowiska przedstawiono na fig. 2.

Ze względu na przewidziane własności paramagnetyczne materiału, konieczne okazało się wykonanie stanowiska, które pozwoli na wytworzenie dużego pola magnetycznego w celu określenia stopnia nasycenia się materiału, tak, aby jego zastosowanie w praktyce miało swoje odzwierciedlenie. Niewystarczająca okazała się metoda balistyczna i jej rozwinięcie – metoda oscyloskopowa. Postanowiono więc stworzyć układ generujący możliwie najwyższe pola.

Powyższy warunek spełniają wspomniane wcześniej permeametry. Przygotowanie takiego układu wymaga precyzyjnych obliczeń zarówno mechanicznych jak i elektromagnetycznych.

Układ umożliwiający badania jest to permeametr – obwód magnetyczny. Obwód magnetyczny powinien być zbudowany z materiału, który dobrze przewodzi strumień magnetyczny. Materiałami odznaczającymi się dobrym przewodnictwem strumienia magnetycznego są żelazo, kobalt, nikiel, ich stopy oraz kilka innych. Są to inaczej ferromagnetyki, których podatność magnetyczna jest znacznie większa od zera. Zdecydowano więc, że materiałem odpowiednim do zbudowania jarzma będzie armco – jest to tzw. żelazo czyste technicznie – 99,99% Fe, zawierające 0,01% zanieczyszczeń. Materiał ten odznacza się bardzo wysokim poziomem indukcji magnetycznej – dochodzącym nawet do 2,2 T, co gwarantuje dobre przewodnictwo strumienia magnetycznego bez wchodzenia w stan nasycenia rdzenia – pozwala to na określenie nasycenia się paramagnetyka, który – jak zaobserwowano – nie posiada własności ferromagnetycznych, zatem stopień jego indukcji nasycenia powinien być niższy. Rdzeń wykonany w całości z armco zapewnia dobre doprowadzenie do próbki strumienia magnetycznego. Nie tylko rdzeń, ale też i nabiegunniki, na których osadzono źródła pola magnetycznego (cewki elektromagnetyczne), zostały wykonane z armco. Nabiegunniki, inaczej też rdzenie cewek zostały wyprofilowane w kształcie śruby dzięki czemu można regulować szerokość szczeliny pomiędzy nimi. W celu ujednoczenia rozkładu pola pomiędzy nabiegunnikami zastosowano ścięcie ostrych krawędzi uzyskując tym samym lepszy rozkład w szczelinie.

Źródłem pola magnetycznego w obwodzie są cewki połączone ze sobą szeregowo w celu uzyskania możliwie najwyższego poziomu pól elektromagnetycznych. Cewki zostały precyzyjnie obliczone w celu uniknięcia wzrostu temperatury. Pole magnetyczne zgodnie z prawem Faradaya jest proporcjonalne do wartości prądu płynącego przez cewkę oraz liczby jej zwojów. W celu ograniczenia wpływu ciepła (inny rodzaj pola, który znosi własności magnetyczne, a także fakt, że izolacja cewki ma też swoją wytrzymałość cieplną), stąd zdecydowano się na dużą liczbę zwojów stosując możliwie małe, ale jednocześnie możliwe doysterowania prąd. Obliczono, że 1450 zwojów na każdej z cewek, łącznie dając

2900 zwojów pozwolą na uzyskanie już stosunkowo dużej siły magnetomotorycznej przy jednym amperze, bo aż 2900 amperozwojów.

Cewki, podobnie jak cały rdzeń, zostały wykonane na specjalne zamówienie.

W celu zasilenia stanowiska wykorzystano stałoprądowy zasilacz programowalny pozwalający na precyzyjną regulację prądu w zakresie od 0–5 A, dwukanałowy. Dzięki temu, że istnieje możliwość podłączenia urządzenia do komputera stworzono aplikację, która zautomatyzowała proces badania. Wykorzystane źródło prądowe to HAMEG HMP2020. Dzięki temu, że zasilacz jest dwukanałowy, pozwala on na przepływ prądu w 2 kierunkach – odwrotna polaryzacja w celu uzyskania obu części pętli histerezy $B(H)$ uzyskiwana poprzez zastosowanie przekaźnika elektromagnetycznego – przekaźnik dwukanałowy FINDER 4.52.9.005.000.

Pomiar indukcji magnetycznej jest możliwy dzięki zastosowaniu miernika zwanego teslomierzem wyposażonego w sondę przepływową, która dokonuje pomiaru dzięki efektowi Halla. Zastosowane urządzenie to miernik Hirst Magnetic Instruments Ltd. GM08 z komunikacją poprzez RS232 oraz USB i wyjściem analogowym proporcjonalnym do wskazania przyrządu. Pozwala on przesłać sygnał analogowy do komputera dzięki czemu możliwe jest zebranie danych z tego miernika i przetworzenie ich do postaci wykresu $B(H)$ automatycznie. Ułatwia to w znacznym stopniu pomiar i przeprowadzenie badań. W tym celu przygotowano aplikację w oprogramowaniu LabVIEW oraz wyposażono stanowisko w komputer.

Przykład 2

Przykład układu według wynalazku przedstawiono na Fig. 2. W układzie tym do komputera sterująco-rejestrującego 1 z oprogramowaniem pomiarowo-sterującym podłączony jest zasilacz programowalny prądu stałego 2. Przekaźnik elektromagnetyczny 3 znajduje się pomiędzy zasilaczem 2, a dwiema cewkami 5 o dużej geometrii w jednym obwodzie zbudowanym z jarzma ferrytowego 4. Układ wyposażony jest w miernik indukcji magnetycznej 6 z sondą wyposażoną w czujnik 7. Badane próbki mają kształt okrągłej pastylki o średnicy rdzenia obwodu magnetycznego i są umieszczone w szczelinie powietrznej 8 obwodu magnetycznego.

Układ według wynalazku posiada w szczególności programowalny zasilacz prądu stałego 2 do zasilania układu prądem stałym, który jest połączony z przekaźnikiem elektromagnetycznym 3 i opcjonalnie z urządzeniem rejestrująco-sterującym 1. Przekaźnik elektromagnetyczny 3 znajduje się pomiędzy zasilaczem 2, a dwiema cewkami 5 o określonej geometrii, w jednym obwodzie zbudowanym z jarzma 4, gdzie cewki 5 stanowiące uzwojenia nawinięte na karkas, zbudowany z tekstolitu, są nałożone na część jarzma 4, zaś w szczelinie powietrznej 8 obwodu magnetycznego znajduje się miejsce na umieszczenie tam równolegle do siebie po przeciwnych stronach głowicy miernika indukcji magnetycznej 6 co najmniej dwóch próbek z materiału substancji magnetoreologicznych, na zewnątrz uzwojeń, to jest poza uzwojeniem.

Komputer sterujący został wyposażony w aplikację pomiarowo-sterującą, dzięki której możliwy jest odczyt i zapis kolejnych pomiarów, określenie wartości fizycznych i prezentacja wyniku w formie wykresu $B=f(H)$ na ekranie monitora.

Sumaryczne wyniki uzyskanej krzywej $B(H)$, uzyskane po obliczeniu w aplikacji pomiarowo-sterującej, są prezentowane na monitorze i archiwizowane w komputerze 1 oraz mogą być drukowane na dołączonej drukarce.

Stanowisko/układ w swojej istocie jest magnetowodem tj. obwodem, który przewodzi strumień magnetyczny. Magnetowód składa się z rdzenia ferromagnetycznego wykonanego ze stali czystej technicznie – armco (99,99% Fe), które jest świetnym środowiskiem dla przewodzenia strumienia magnetycznego. Pole magnetyczne wytwarzane jest przez dwie cewki połączone ze sobą szeregowo, w sposób umożliwiający dopasowanie do parametrów zasilacza, co pozwala uzyskać duże i stałe wartości natężenia pola magnetycznego w trakcie pomiarów. Cewki są zasilane przy pomocy programowalnego zasilacza regulowanego stałoprądowego. pomiędzy cewkami nałożonymi na rdzeń znajduje się szczelina powietrzna, w której umieszcza się badane próbki. Wymogiem stanowiska jest, aby do badania wykorzystać dwie próbki tego samego materiału o określonej geometrii – np. okrągłe pastylki o średnicy 40 mm. pomiędzy badane próbki wkłada się miernik indukcji magnetycznej. Sygnał zebrany z miernika trafia do aplikacji, która wykreśla pożądaną krzywą względem uzyskanych wartości.

Układ umożliwiający badania jest to permeometr – obwód magnetyczny. Obwód magnetyczny powinien być zbudowany z materiału, który dobrze przewodzi strumień magnetyczny. Materiałami odznaczającymi się dobrym przewodnictwem strumienia magnetycznego są żelazo, kobalt, nikiel, ich stopy oraz kilka innych. Są to inaczej ferromagnetyki, których podatność magnetyczna jest znacznie

większa od zera. Zdecydowano więc, że materiałem odpowiednim do zbudowania jarzma będzie armco – jest to tzw. żelazo czyste technicznie – 99,99% Fe, zawierające 0,01% zanieczyszczeń. Materiał ten odznacza się fantastycznie wysokim poziomem indukcji magnetycznej – dochodzącym nawet do 2,2 T, co gwarantuje dobre przewodnictwo strumienia magnetycznego bez wchodzenia w stan nasycenia rdzenia – pozwoli to na określenie nasycenia się paramagnetyka, który jak zaobserwowano nie posiada własności ferromagnetycznych, zatem stopień jego indukcji nasycenia powinien być niższy. Rdzeń wykonany w całości z armco zapewnia dobre doprowadzenie do próbki strumienia magnetycznego. Nie tylko rdzeń, ale też i nabiegunniki, na których osadzono źródła pola magnetycznego (cewki) zostały wykonane z armco. Nabiegunniki, inaczej też rdzenie cewek zostały wyprofilowane w kształcie śruby dzięki czemu można regulować szerokość szczeliny pomiędzy nimi. W celu ujednoczenia rozkładu pola pomiędzy nabiegunnikami zastosowano ścięcie ostrych krawędzi uzyskując tym samym lepszy rozkład w szczelinie.

Źródłem pola magnetycznego w obwodzie są cewki połączone ze sobą szeregowo w celu uzyskania możliwie najwyższego poziomu pól elektromagnetycznych. Cewki zostały precyzyjnie obliczone w celu uniknięcia wzrostu temperatury, oraz osiągnięcia możliwie największej wartości natężenia pola magnetycznego w miejscu, w którym umieszcza się badaną próbkę, przy jak najmniejszych gabarytach cewek, celem kompaktowej budowy i łatwiejszego transportu. Pole magnetyczne zgodnie z prawem Faradaya jest proporcjonalne do wartości prądu płynącego przez cewkę oraz liczby jej zwojów. W celu ograniczenia wpływu ciepła (inny rodzaj pola, który znosi własności magnetyczne, a także fakt, że izolacja cewki ma też swoją wytrzymałość cieplną), stąd zdecydowano się na dużą liczbę zwojów stosując możliwie mały, ale jednocześnie możliwy do wysterowania prąd. Obliczono, że 1450 zwojów na każdej z cewek, łącznie dając 2900 zwojów pozwolą na uzyskanie już stosunkowo dużej siły magnetomotorycznej przy jednym amperze, bo aż 2900 amperozwojów.

W celu zasilenia stanowiska wykorzystano stałoprądowy zasilacz programowalny pozwalający na precyzyjną regulację prądu w zakresie od 0–5 A, dwukanałowy. Dzięki temu, że istnieje możliwość podłączenia urządzenia do komputera stworzono aplikację, która zautomatyzowała proces badania. Wykorzystane źródło prądowe to HAMEG HMP2020. Dzięki temu, że zasilacz jest dwukanałowy, pozwala on na przepływ prądu w 2 kierunkach – odwrotna polaryzacja w celu uzyskania obu części pętli histerezy B(H) uzyskiwana poprzez zastosowanie przekaźnika elektromagnetycznego – przekaźnik dwukanałowy FINDER 4.52.9.005.000.

Pomiar indukcji magnetycznej jest możliwy dzięki zastosowaniu miernika zwanego teslomierzem wyposażonego w sondę przepływową, która dokonuje pomiaru dzięki efektowi Halla. Zastosowane urządzenie to miernik Hirst Magnetic Instruments Ltd. GM08 z komunikacją poprzez RS232 oraz USB i wyjściem analogowym proporcjonalnym do wskazania przyrządu. Pozwala on przestać sygnał analogowy do komputera dzięki czemu możliwe jest zebranie danych z tego miernika i przetworzenie ich do postaci wykresu B(H) automatycznie. Ułatwia to w znacznym stopniu pomiar i przeprowadzenie badań. W tym celu przygotowano aplikację w oprogramowaniu LabVIEW oraz wyposażono stanowisko w komputer.

W celu wyznaczenia modelu matematycznego, dzięki któremu możliwe jest wyznaczenie pętli histerezy można zapisać obwód magnetyczny w dwójnasób:

- odniesienie się do wspomnianego już prawa Faradaya (siła magnetomotoryczna) oraz pomiar indukcji B
- poprzez określenie przenikalności magnetycznej, a następnie określenie krzywej za pomocą relacji $B = \mu H$

Aby stanowisko było jak najlepiej opisane, postanowiono, że dokładniejszą metodą będzie opisanie układu poprzez reluktancję oraz wyznaczenie współczynnika korekcji. Współczynnik ten jest konieczny do określenia, ponieważ w związku z tym, że rdzeń urządzenia jest magnetykiem miękkim wciąż istnieją straty związane z przemagnesowaniem całego układu, stąd otrzymuje się w układzie niedokładność. Postanowiono, że układ przed każdorazowym badaniem będzie wymagał ustalenia współczynnika – własności magnetyczne są bardzo wrażliwe na wpływ środowiska oraz wszelkie zmiany dokonywane w obwodzie, stąd najlepszym sposobem określenia jest ustalenie współczynnika korekcji poprzez zbadanie przenikalności względnej dla pustej szczeliny – powietrze wykazuje bardzo znikomy paramagnetyzm – wartość przenikalności powietrza jest bardzo bliska przenikalności magnetycznej próżni i wynosi 1,000000034. W związku z tym, aby uzyskać właściwy pomiar indukcji w szczelinie należy do odczytu z miernika dodać wartość przemnożoną przez współczynnik aby uzyskać poprawną wartość indukcji magnetycznej, co wyraża się za pomocą wzoru:

$$B = B_{\text{badane}} + (1-k) \cdot B_{\text{badane}}$$

Określenie przenikalności magnetycznej za pomocą reluktancji, czyli oporu magnetycznego, wymaga określenia geometrii stanowiska oraz opisanie magnetycznego oporu dla każdej z części obwodu, następnie konieczne jest rozpatrzenie prawa Faradaya dotyczące siły magnetomotorycznej, którą można obliczyć w trójnasób.

Przytoczone już prawo Faradaya w uproszczonej wersji opisuje relacje związane z siłą magnetomotoryczną, którą można wyrazić za pomocą poniższych związków:

$$F = H \cdot l = N \cdot I = \Phi \cdot R, \text{ gdzie:}$$

F – wartość siły magnetomotorycznej [Az]

H – natężenie pola magnetycznego [A/m]

l – długość odcinka, w którym płynie strumień magnetyczny [m]

R – reluktancja obwodu [1/H]

Φ – wartość strumienia magnetycznego [Wb]

N – liczba przewodników wytwarzająca pole magnetyczne [-]

I – wartość prądu płynąca przez przewodniki wytwarzające pole magnetycznej [A]

Z powyższej relacji łatwo jest obliczyć siłę magnetomotoryczną odnosząc się do amperozwojów, czyli iloczynu wartości prądu przepływającego przez cewkę oraz liczby zwojów cewek. Równanie dość łatwo można ułożyć i otrzymać wartość natężenia pola magnetycznego, jeśli skorzysta się z pierwszego przytoczonego sposobu, czyli iloczynu natężenia pola oraz długości jego działania, jednak będzie to nie do końca kompletny wynik ze względu na brak możliwości określenia rozbieżności – strat związanych z przemagnesowaniem jarzma. Ten sposób jednak został wykorzystany do sprawdzenia poprawności wyniku.

Aby wykorzystać relację pozwalającą na dokładne opisanie obwodu należy określić opór magnetyczny każdego z elementów obwodu. Opór magnetyczny ściśle zależy od geometrii oraz przenikalności magnetycznej ośrodka:

$$R = l / \mu \cdot s, \text{ gdzie:}$$

R – reluktancja (opór magnetyczny) [1/H]

l – długość odcinka o takiej samej geometrii [m]

μ – przenikalność magnetyczna [H/m]

s – przekrój poprzeczny odcinka o takiej samej geometrii [m²]

W związku z tym obwód podzielono na odcinki o takiej samej geometrii. Jego reprezentacja składa się z kilku elementów i wymagała określenia wielu parametrów. Poniżej został przedstawiony obwód zastępczy magnetowodu (Fig. 3 oraz Fig. 4).

Poniżej przedstawiono wartości poszczególnych elementów magnetowodu:

$$- R_1: l_1 = 0,065 \text{ [m]} \quad s_1 = 0,05 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_2: l_2 = 0,038 \text{ [m]} \quad s_2 = 0,0039 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_3: l_3 = 0,075 \text{ [m]} \quad s_3 = 0,0048 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_4: l_4 = 0,01 - 17 \text{ [m]} \text{ (dla badanego dalej przypadku: } 0,072) \quad s_4 = 0,072 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_5: l_5 = 0,005 \text{ [m]} \quad s_5 = 0,0016 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_6: l_6 = 0,005 \text{ [m]} \quad s_6 = 0,0015 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$- R_7: l_7 = \text{szerokość szczeliny (dla badanego przypadku: } 0,0028), \quad s_7 = 0,0013 \text{ [m}^2\text{]}$$

Zaobserwowano także, że wartość przenikalności magnetycznej w przypadku obliczania oporu magnetycznego ma stosunkowo niewielki wpływ (dopiero na 6. miejscu po przecinku), w związku z czym przyjęto, że dla stali armco, której przenikalność magnetyczna względna maksymalna (armco jest ferromagnetykiem i posiada nieliniową charakterystykę) waha się między 7 000 a 10 000, stąd przyjęto w obliczeniach wartość 10 000.

W celu określenia drugiej części siły magnetomotorycznej posługujemy się wartością strumienia magnetycznego płynącego w danej części obwodu, które definiuje się w następujący sposób:

$$\Phi = \int B dS, \text{ gdzie:}$$

Φ – wartość strumienia magnetycznego [Wb]

B – wartość indukcji magnetycznej [T]

S – powierzchnia, przez którą przepływa strumień magnetyczny [m²]

Indukcja magnetyczna oraz powierzchnia przenikania strumienia magnetycznego są wielkościami wektorowymi, stąd przy obliczeniach wielkości skalarnej wartości strumienia magnetycznego należy wynik całkowania pomnożyć przez cosinus kąta zawartego pomiędzy tymi wektorami. Z geometrii stanowiska wynika, że ten współczynnik dąży do jedności, stąd operacja ta jest pomijalna.

Po określeniu wartości strumienia magnetycznego należy pomnożyć ten wynik z uzyskaną do tej pory wartością reluktancji. W ten sposób otrzymuje się pierwszą część równania niezbędnego do określenia przenikalności magnetycznej szukanego materiału. Określona w ten sposób siła magnetomotoryczną jest równa dokładnie tej, którą można wyliczyć z przemnożenia liczby przewodników przez wartość płynącego prądu.

W obwodzie magnetycznym istnieje jedna niewiadoma – przenikalność magnetyczna zawartości szczeliny – czy to powietrza, czy to badanej próbki. Stąd równanie:

$$N \cdot I = R \cdot \Phi$$

należy przekształcić tak, ażeby otrzymać wartość przenikalności magnetycznej badanej szczeliny. Następnie po określeniu przenikalności oraz po korekcie indukcji magnetycznej można określić natężenie pola magnetycznego za pomocą zależności:

$$B = \mu \cdot H$$

co po przekształceniu daje nam:

$$H = B / \mu.$$

Ostatnim etapem jest już tylko wykreślenie charakterystyki krzywej.

W celu sprawdzenia metodyki pomiaru zaproponowano sprawdzenie za pomocą prostszej relacji obliczenie natężenia pola magnetycznego:

$$H \cdot l = N \cdot I$$

co po przekształceniu na długość badanego odcinka daje nam:

$$l = N \cdot I / H$$

Jeśli szerokość szczeliny pokrywa się z obliczoną długością oznacza to, że pomiar został wykonany właściwie.

Określenie magnetycznej pętli histerezy za pomocą stanowiska może być wykonane za pomocą dwóch metod, opartych na tej samej zależności. Do opisu matematycznego wykorzystywana jest siła magnetomotoryczna, którą można policzyć za pomocą 3 zależności:

$$F = H \cdot l = R \cdot \Phi = N \cdot I, \text{ gdzie:}$$

F – wartość siły magnetomotorycznej [Az]

H – natężenie pola magnetycznego [A/m]

l – długość odcinka, w którym płynie strumień magnetyczny [m]

R – reluktancja obwodu [1/H]

Φ – wartość strumienia magnetycznego [Wb]

N – liczba przewodników wytwarzająca pole magnetyczne

I – wartość prądu płynąca przez przewodniki wytwarzającej pole magnetyczne [A]

Opisu stanowiska podczas pomiaru dokonuje się poprzez zestawienie ze sobą dwóch sposobów określenia siły magnetomotorycznej. Jako ścieżkę główną zdecydowano (pierwsza metoda), że opis będzie bazował na określeniu przenikalności magnetycznej, z której to wyliczane jest później natężenie pola magnetycznego niezbędnego do uzyskania wymaganego wykresu. Drugą metodę – zdecydowanie łatwiejszą, pozostawiono w celu określenia weryfikacji wyniku z metody pierwszej.

[Pierwsza metoda – główna]

Obliczenia matematyczne pierwszej metody są długie i wymagają dokładnego określenia poszczególnych elementów obwodu dla posiadanego stanowiska. W celu poprawnego określenia reluktancji obwodu należy określić geometrię stanowiska – zarówno długość elementów o jednakowym przekroju jak i samą wielkość przekroju. Znając przenikalność magnetyczną ośrodka rozchodzenia się strumienia magnetycznego oszacowano, że ma ona znikomy wpływ na dalsze obliczenia matematyczne (wpływ na wynik ostateczny pojawia się na 6 miejscu po przecinku). Stąd uznano, że parametrem przyjętym do obliczeń jest maksymalna wartość przenikalności stali armco, która jest równa zależności: $10\,000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], co daje w przybliżeniu 0,01256 [H/m].

Reluktancja poszczególnych elementów obwodu została określona poprzez zastosowanie wzoru:

$$R = l / \mu \cdot S, \text{ gdzie:}$$

R – reluktancja [1/H]

l – długość odcinka o tym samym przekroju [m]

μ – całkowita wartość przenikalności magnetycznej (wartość przenikalności magnetycznej dla próżni pomnożona przez względną dla danego ośrodka) [H/m]

S – pole przekroju przez który przenika strumień magnetyczny [m²]

Wymieniona wyżej relacja pozwala po zastosowaniu pewnych uproszczeń geometrii stanowiska pozwala określić opór magnetyczny (obwód zastępczy) magnetowodu. W celu określenia przenikalności magnetycznej szukanego materiału należy dodać reluktancję szczeliny (wraz z nieznaną przenikalnością) i skorzystać z praw rządzących siłą magnetomotoryczną. Wartość strumienia magnetycznego określa się za pomocą relacji

$$\Phi = \int B dS$$

gdzie:

Φ – wartość strumienia magnetycznego [Wb]

B – wartość indukcji magnetycznej [T]

S – powierzchnia przez którą przechodzi strumień magnetyczny [m²]

Indukcja magnetyczna oraz powierzchnia przenikania strumienia magnetycznego są wielkościami wektorowymi, stąd przy obliczeniach wielkości skalarnej wartości strumienia magnetycznego należy wynik całkowania pomnożyć przez cosinus kąta zawartego pomiędzy tymi wektorami. Z geometrii stanowiska wynika, że ten współczynnik dąży do jedności, stąd operacja ta jest pomijalna.

Po określeniu wartości strumienia magnetycznego należy pomnożyć ten wynik z uzyskaną do tej pory wartością reluktancji. W ten sposób otrzymuje się pierwszą część równania niezbędnego do określenia przenikalności magnetycznej szukanego materiału.

Do określenia drugiego sposobu siły magnetomotorycznej posłużono się obliczeniami uzyskanymi w oparciu o wartość prądu magnesującego obie cewki oraz liczbę przewodników (innymi słowy zwojów cewki). Stąd uzyskuje się drugą część równości.

Po przyrównaniu do siebie wcześniej wymienionych stron i wykonaniu niezbędnych operacji matematycznych otrzymuje się wartość przenikalności magnetycznej badanego materiału.

Wartość indukcji magnetycznej odczytywana jest z miernika wykorzystanego do badań. W celu obliczenia natężenia pola magnetycznego należy zastosować się po raz kolejny do praw fizyki, które opisują związek między indukcją magnetyczną a natężeniem pola magnetycznego:

$B = \mu \cdot H$, gdzie:

B – wartość indukcji magnetycznej [T]

H – wartość natężenia pola magnetycznego [A/m]

μ – wartość przenikalności magnetycznej materiału [H/m]

W celu uzyskania wielkości określającej pole magnetyczne należy podzielić odczytaną wartość indukcji magnetycznej przez obliczoną wartość przenikalności magnetycznej materiału. Po określeniu pary punktów $B=f(H)$ następnie wykreślany jest wykres.

Zachowania magnetyczne ściśle zależą od warunków, w których są one przeprowadzane. Wszystkie parametry stałe są podawane dla warunków uznawanych w literaturze za „normalne” tj. dla temperatury 0°C, ciśnienie 1013,25 hPa. Ponieważ temperatura otoczenia, w którym prowadzi się badania jest większa, koniecznym jest uwzględnienie tego przez współczynnik korekcji.

Współczynnik korekcji ustalono, że będzie obliczany na podstawie stosunku przenikalności powietrza – z tej, która jest znana z dla warunków normalnych oraz z tej, którą można zmierzyć w warunkach badania:

$K = \mu_{\text{powietrza_książkowe}} - \mu_{\text{badane}}$, gdzie:

K – współczynnik korekcji

μ_{badane} – wartość przenikalności magnetycznej dla powietrza w warunkach przeprowadzanego badania

Aby uzyskać zatem faktyczną wartość indukcji magnetycznej materiału, należy pomnożyć ją przez współczynnik korekcji aby uzyskać wynik odpowiadający tym, które pochodzą z warunków normalnych.

Stalą i niezależną, od warunków otoczenia i zmian parametrów cewek, wartość prądu magnesującego podczas pomiarów, zapewnia sterowany przez komputer i aplikację pomiarowo-sterującą zasilacz prądowy.

Podsumowując algorytm przeprowadzania pomiarów sprowadza się do wykonania dwóch pomiarów – pierwszym dla szczeliny bez wypełnienia (z powietrzem) w celu ustalenia współczynnika korekcji, a następnie można wykonać badanie materiału.

[Druga metoda – weryfikująca]

W celu sprawdzenia czy badana wielkość z metody pierwszej jest wartością prawidłową, należy skorzystać z drugiej możliwości opisu obwodu czyli sprawdzić, czy szerokość szczeliny wypełnionej próbką jest taka, dla jakiej przeprowadzono pomiary. Aby obliczyć pożądaną długość należy skorzystać z obliczonego wcześniej natężenia pola magnetycznego oraz obliczonej siły magnetomotorycznej (za pomocą $F = N \cdot I$), otrzymując tym samym zależność:

$$L = N \cdot I / H$$

gdzie L – szerokość szczeliny [m]

Procedura przeprowadzania pomiaru

W celu przeprowadzenia pomiaru na stanowisku należy uruchomić komputer z aplikacją, uruchomić samą aplikację oraz stosować się do poleceń przez program. Należy także uruchomić pozostałe sprzęty elektroniczne – miernik indukcji magnetycznej oraz zasilacz.

Procedura wykonywania pomiarów za pomocą aplikacji jest następująca:

- 1) Włączyć: komputer, zasilacz oraz miernik indukcji magnetycznej;
- 2) Uruchomić aplikację;
- 3) Zmierzyć szerokość szczeliny;
- 4) Umieścić w szczelinie sondę;
- 5) Dokonać pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji (polecenie programu)
- 6) Następnie za pomocą pęset należy umieścić w szczelinie powietrznej 2 próbki badanego materiału z sondą pomiędzy nimi i powtórzyć pomiary.
- 7) Na ekranie powstanie wykres magnetycznej pętli histerezy badanego materiału.

Po zakończeniu pracy należy wyłączyć wszystkie urządzenia.

Jeśli aplikacja przestała działać bądź istnieją problemy związane z jej uruchomieniem, pomiar można wykonać manualnie. Wówczas należy przeprowadzić badania w takiej kolejności jak powyżej, z tą różnicą, że nastaw prądowy zmienia się za pomocą pokręteł zasilacza, a wyniki odczytanej indukcji z miernika należy zapisać np. w tabeli. Kolejność wykonywania pomiaru jest następująca:

- 1) Należy uruchomić urządzenia.
- 2) Zmierzyć szerokość szczeliny.
- 3) Umieścić sondę w szczelinie.
- 4) Dokonać pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji, a w tym celu należy:
 - 4.1 zwiększyć wartość prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A.
 - 4.2 zmierzyć wartość indukcji magnetycznej.
 - 4.3 Jeżeli prąd zasilający cewki jest mniejszy od prądu maksymalnego – I_{max} należy wrócić do punktu 4.1, jeżeli prąd jest równy bądź wyższy I_{max} , należy przejść do punktu 5)
- 5) Należy zmniejszyć wartość prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A.
 - 5.1 Zmierzyć wartość indukcji magnetycznej.
 - 5.2 Jeżeli prąd zasilający cewki jest większy od zera, należy wrócić do punktu 5). Jeżeli prąd jest równy zero, należy przejść do punktu 6).
- 6) Należy załączyć drugi kanał zasilacza i tym samym odwrócić polaryzację prądu i ponownie wykonać etapy od 4.1) do 5) dla polaryzacji odwróconej.
- 7) Następnie za pomocą pęset należy umieścić w szczelinie powietrznej 2 próbki badanego materiału z sondą pomiędzy nimi i powtórzyć pomiary – etapy od 4.1 do 6).
- 8) Korzystając z otrzymanych wyników pomiarów oraz równań i przekształceń matematycznych przedstawionych w zgłoszeniu patentowym otrzymuje się pętlę histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych.

Pierwszy pomiar, który należy zapisać, przeprowadzany jest jeszcze bez włączenia miernika. Następnie należy stopniowo zwiększać o równy krok wartość prądu np. o 0,1 A i zapisywać wartości indukcji w dołączonej tabeli. Badanie należy przeprowadzać aż do prądu uznawanego za maksimum. Następnie należy maksymalną wartość przepisać do najniższego wiersza w kolejnej kolumnie i tym razem zmniejszając wartości, uzyskuje się wyniki dla kolejnej części charakterystyki. Następnie należy załączyć drugi kanał zasilacza i tym samym odwrócić polaryzację prądu i ponownie wykonać serię badań. Zebrane wyniki należy umieścić w arkuszu kalkulacyjnym, który przeliczy wymagane wartości i na jego podstawie można stworzyć wykres.

Powyższą procedurę według wynalazku można wykonać przy pomocy komputera.

Zastosowania układu według wynalazku w nauce i przemyśle:

- szybkie pomiary krzywej histerezy magnetycznej B-H dla badanego elastomeru magneto-reologicznego;
- wyznaczenie przenikalności magnetycznej dla badanego elastomeru magneto-reologicznego.

Wyznaczone parametry w postaci krzywej B-H, przenikalności magnetycznej przyspieszają wykonanie eksperymentów numerycznych, dotyczących wykorzystania i zastosowania elastomerów (kompozytów) magneto-reologicznych w rozwiązaniach technicznych. Dotyczy to zarówno prac naukowych, badawczo-rozwojowych, czy wdrożeniowych realizowanych w jednostkach naukowych, badawczych czy przemysłowych.

Układ może być stosowanych w

- przedsiębiorstwach, fabrykach produkujących elastomery magneto-reologiczne;
- sektorach naukowo-badawczych pracujących nad rozwojem elastomerów magneto-reologicznych;
- w jednostkach badawczo-rozwojowych zajmujących się zastosowaniem elastomerów magneto-reologicznych, które pracują nad wdrożeniami nowych rozwiązań w przemyśle motoryzacyjnych i lotniczym.

Wykorzystanie elastomerów magneto-reologicznych ma na celu zwiększenie komfortu i bezpieczeństwa podróży, w postaci nowych rozwiązań aktywnych stref zgniotu, nowoczesnych amortyzatorów zawieszonych pojazdów, czy dynamicznie rozwijających się struktur morficznych stosowanych w lotnictwie.

Zastrzeżenia patentowe

1. Układ do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magneto-reologicznych zwłaszcza elastomerów i kompozytów magneto-reologicznych, zawierający obwód magnetyczny, co najmniej dwie cewki będące źródłem pola magnetycznego, umieszczone szeregowo w obwodzie magnetycznym, szczelinę powietrzną w obwodzie magnetycznym, utworzoną pomiędzy cewkami, miernik indukcji magnetycznej wyposażony w sondę pomiarową z czujnikiem, przełącznik elektromagnetyczny umożliwiający zmianę kierunku prądu w obwodzie magnetycznym, **znamienny tym**, że posiada ponadto programowalny zasilacz prądu stałego (2) do zasilania układu prądem stałym połączony z przełącznikiem elektromagnetycznym (3), który znajduje się pomiędzy zasilaczem (2) a co najmniej dwiema cewkami (5), w jednym obwodzie zbudowanym z jarzma (4), gdzie cewki (5) stanowiące uzwojenia nawinięte na karkas, zbudowany z tekstolitu, są nałożone na część jarzma (4), zaś w szczelinie powietrznej (8) obwodu magnetycznego znajduje się miejsce na umieszczenie tam równolegle do siebie po przeciwnych stronach główicy miernika indukcji magnetycznej (6) co najmniej dwóch próbek z materiału substancji magneto-reologicznej w kształcie okrągłych pastylek, na zewnątrz uzwojeń, to jest poza uzwojeniem.
2. Układ według zastrzeżenia 1, **znamienny tym**, że jarzmo (4) jest jarzmem ferrytowym.
3. Układ według zastrzeżenia 1 albo 2, **znamienny tym**, że co najmniej dwie cewki będące źródłem pola magnetycznego są umieszczone równolegle do siebie.
4. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–3, **znamienny tym**, że dodatkowo zawiera urządzenie rejestrująco-sterujące (1) połączone z programowalnym zasilaczem prądu stałego (2).
5. Układ według zastrzeżenia 4, **znamienny tym**, że urządzenie rejestrująco-sterujące (1) stanowi komputer z oprogramowaniem pomiarowo-sterującym.

6. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–5, **znamienny tym**, że jarzmo (4) wykonane jest z żelaza, kobaltu, niklu lub ich stopów, korzystnie ze stali zawierającej 99,99% Fe.
7. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–6, **znamienny tym**, że próbki są w postaci okrągłych pastylek, korzystnie o średnicy 40 mm.
8. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–7, **znamienny tym**, że szczelina powietrzna ma regulowaną szerokość.
9. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–8, **znamienny tym**, że programowalny zasilacz prądu stałego (2) podłączony jest do komputera sterująco-rejestrującego (1).
10. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–9, **znamienny tym**, że przekaźnik elektromagnetyczny (3) z jednej strony połączony jest z programowalnym zasilaczem prądu stałego (2), a z drugiej z cewkami (5).
11. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–10, **znamienny tym**, że zawiera drukarkę.
12. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–11, **znamienny tym**, że każda z cewek (5) zawiera 1450 zwojów.
13. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–12, **znamienny tym**, że zasilacz programowalny prądu stałego (2) pracuje w zakresie 0–5 Amperów (A).
14. Układ według jednego z zastrzeżeń 1–13, **znamienny tym**, że próbki z materiału substancji magnetoreologicznych znajdują się poza uzwojeniem.
15. Sposób wyznaczania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych, zwłaszcza elastomerów i kompozytów magnetoreologicznych, **znamienny tym**, że jest realizowany z użyciem układu określonego w jednym z zastrzeżeń 1–14 i obejmuje następujące etapy:
 - uruchamia się układ według wynalazku;
 - mierzy się szerokość szczeliny;
 - dokonuje się pierwszego pomiaru indukcji magnetycznej w celu obliczenia współczynnika korekcji;
 - dokonuje się drugiego pomiaru wartości indukcji magnetycznej po umieszczeniu w szczelinie próbek z materiału substancji magnetoreologicznej;
 - dokonuje się obliczeń na podstawie następujących równań:
 - a. określenie reluktancji poszczególnych elementów obwodu poprzez zastosowanie wzoru $R = l / \mu * S$, gdzie:
 - R – reluktancja [1/H],
 - l – długość odcinka o tym samym przekroju [m],
 - μ – całkowita wartość przenikalności magnetycznej (wartość przenikalności magnetycznej dla próżni pomnożona przez względną dla danego ośrodka) [H/m],
 - S – pole przekroju przez który przenika strumień magnetyczny [m²],
 - b. określenie rzeczywistej wartości indukcji magnetycznej poprzez zastosowanie współczynnika korekcji, gdzie rzeczywista indukcja magnetyczna określona jest wzorem $B = B_{\text{badane}} + (1-k) * B_{\text{badane}}$, gdzie k jest obliczane jest wzorem $k = \mu_{\text{powietrza książkowe}} - \mu_{\text{badane}}$, gdzie μ_{badane} – wartość przenikalności magnetycznej dla powietrza w warunkach przeprowadzanego badania,
 - c. określenie wartości strumienia magnetycznego poprzez zastosowanie wzoru $\Phi = \int B dS$, gdzie:
 - O – wartość strumienia magnetycznego [Wb],
 - B – wartość indukcji magnetycznej [T],
 - S – powierzchnia, przez którą przepływa strumień magnetyczny [m²],
 - d. podstawienie znanych wartości do równania $N \cdot I = (R + R_m) \cdot \Phi$, gdzie reluktancja badanego elementu, ze względu na nieznaną przenikalność magnetyczną zostanie oznaczona jako R_m , a reluktancja pozostałej części układu obliczona przy pomocy wzoru a) oznaczona jest jako R, N to liczba zwojów uzwojenia a I to płynący przez uzwojenie prąd, gdzie po wyznaczeniu R_m oblicza się μ_m , przenikalność magnetyczną próbki, na podstawie równania a),
 - e. obliczenie natężenie pola magnetycznego poprzez zastosowanie równania $H = B/\mu_m$, co prowadzi do otrzymania pętli histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych, przy czym korzystnie po obliczeniach następuje weryfikacja poprawności wykonania pomiaru poprzez obliczenie zmierzonej szerokość szczeliny L na podstawie wzoru $L = N * I / H$, gdzie

- pomiar jest uznany za poprawny, jeśli obliczona szerokość szczeliny L odpowiada wartości zmierzonej.
16. Sposób według zastrzeżenia 15, **znamienny tym**, że obejmuje następujące etapy wykonywania pomiaru:
- 1) uruchamia się urządzenie zdefiniowane w jednym z zastrzeżeń 1–14;
 - 2) mierzy się szerokość szczeliny;
 - 3) umieszcza się sondę w szczelinie;
 - 4) dokonuje się pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji, poprzez:
 - 4.1 zwiększenie wartości prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A.
 - 4.2 pomiar wartość indukcji magnetycznej.
 - 4.3 jeżeli prąd zasilający cewki jest mniejszy od prądu maksymalnego – I_{max} wraca się do etapu 4.1, natomiast jeżeli prąd jest równy bądź wyższy I_{max} , przechodzi się do etapu 5
 - 5) zmniejsza się wartość prądu zasilającego cewki o wartość skoku np. 0,1 A
 - 5.1 mierzy się wartość indukcji magnetycznej.
 - 5.2 jeżeli prąd zasilający cewki jest większy od zera, wraca się do etapu 5), natomiast jeżeli prąd jest równy zero, przechodzi się do etapu 6;
 - 6) łączy się drugi kanał zasilacza i tym samym odwraca się polaryzację prądu i ponownie wykonuje etapy od 4.1 do 5 dla polaryzacji odwróconej;
 - 7) następnie za pomocą pęset umieszcza się w szczelinie powietrznej 2 próbki badanego materiału z sondą pomiędzy nimi i powtarza się pomiary – etapy od 4.1 do 6;
 - 8) na podstawie otrzymanych wyników pomiarów oraz równań a)-e) otrzymuje się pętlę histerezy magnetycznej B-H dla substancji magnetoreologicznych.
17. Sposób według zastrzeżenia 16, **znamienny tym**, że obejmuje następujące etapy:
- 1) uruchamia się komputer wraz z aplikacją, zasilacz oraz miernik indukcji magnetycznej;
 - 2) dokonuje się pomiaru szerokości szczeliny;
 - 3) umieszcza się w szczelinie sondę pomiarową;
 - 4) dokonuje się pierwszego pomiaru w celu obliczenia współczynnika korekcji;
 - 5) następnie umieszcza się za pomocą pęset 2 elementy próbki materiału badanego wraz z sondą pomiędzy nimi i powtarza się pomiary;
 - 6) otrzymuje się wykres magnetycznej pętli histerezy badanego materiału z zastosowaniem aplikacji komputerowej.
18. Sposób według zastrzeżenia 16 albo 17, **znamienny tym**, że bada się substancje magneto-reologiczne stanowiące materiały próbki w zakresie pola magnetycznego od 0T do 2T w warunkach chłodzenia pasywnego.

Rysunki

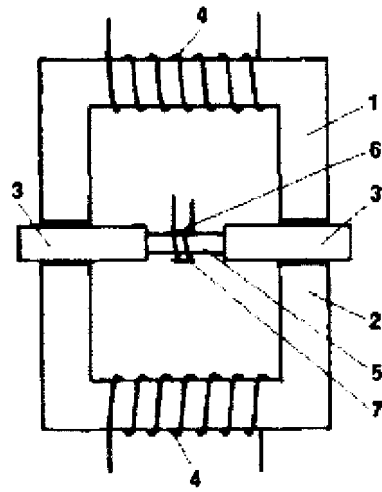


Fig. 1 (stan techniki)

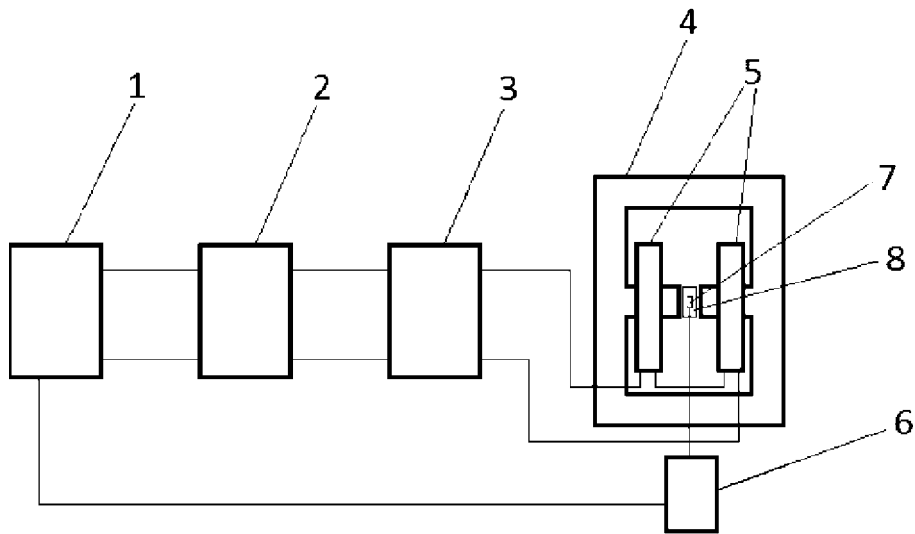


Fig.2

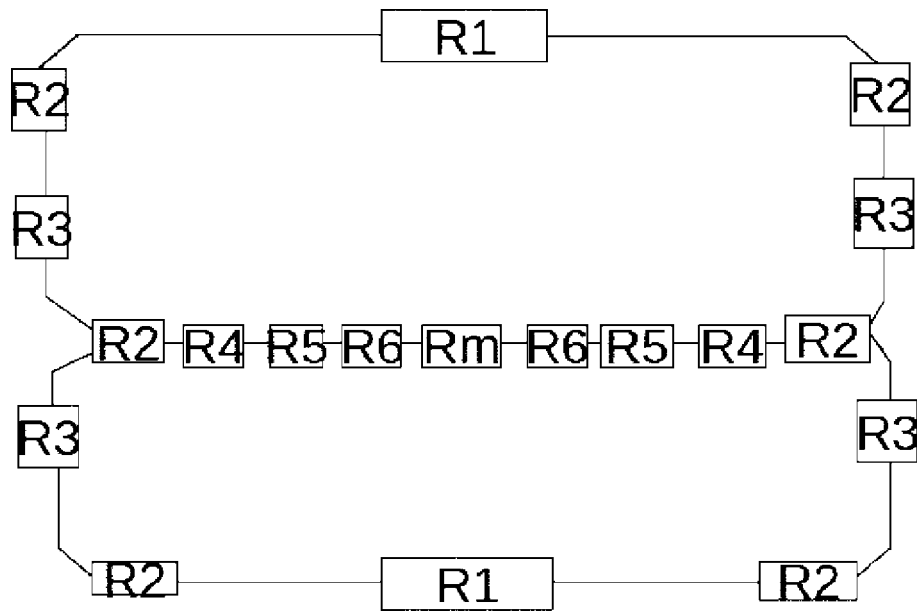


Fig. 3

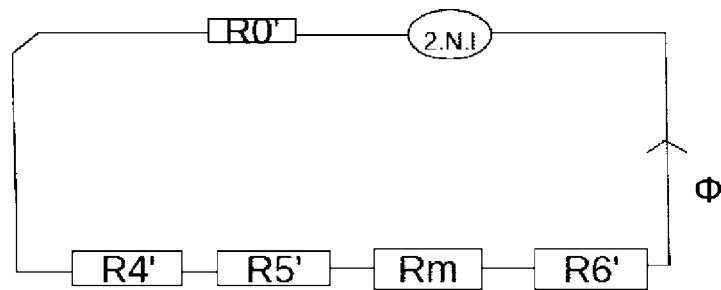


Fig. 4.