

# Stanowisko do badania przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej

Paweł Kowol

Politechnika Śląska; Wydział Elektryczny; Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice

Adam Piłśniak

Politechnika Śląska; Wydział Elektryczny; Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Grzegorz Zioło

Etisoft Smart Solutions Sp. z o.o., ul. Szara 21, 44-100 Gliwice

Grazia Lo Sciuto

University of Catania, Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Viale Andrea Doria, 6 | I-95125 Catania, Italy

**Streszczenie:** Ciecz magnetoreologiczna jest często stosowanym czynnikiem w układach mechatronicznych. Powodem są jej specyficzne właściwości mechaniczne, które zależą od przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Głównie stosowane są tam, gdzie wymagana jest zmienna lepkość wspomnianego medium. Pomiar parametrów magnetycznych cieczy jest zadaniem specyficznym i trudnym. Wynika to zarówno ze stanu skupienia (koloid), jak i nietypowych parametrów magnetycznych. Aby pomiar przenikalności magnetycznej był możliwy, należy zastosować konstrukcję, w której rdzeń będzie w postaci walca wykonanego z cieczy. Wokół walca umieszczone są dwie cewki pomiarowe: jedna bezpośrednio okalająca ciecz oraz druga o odpowiednio większej średnicy. Całość znajduje się w solenoidzie, wymuszającym strumień magnetyczny. Dokładność pomiaru uzależniona jest od konfiguracji układu pomiarowego oraz mechanicznej precyzji wykonania każdego z jego elementów. W pracy przedstawiono model matematyczny, sposób działania oraz realizacja techniczna urządzenia do badania przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej. Dla wykonanego urządzenia dokonano pomiarów, gdy współczynnik przenikalności magnetycznej próbki jest znany i równy jedności. Przeprowadzona analiza pomiarów daje podstawy do oceny wykonanego stanowiska pomiarowego.

**Słowa kluczowe:** ciecz magnetoreologiczna, przenikalność magnetyczna, pomiary właściwości magnetycznych

## 1. Wprowadzenie

Ciecz magnetoreologiczna jest często stosowanym czynnikiem w układach mechatronicznych. Powodem są jej specyficzne właściwości mechaniczne, które zależą od przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Głównie stosowane są tam, gdzie wymagana jest zmienna lepkość wspomnianego medium.

Pomiar parametrów magnetycznych cieczy jest zadaniem specyficznym i trudnym. Wynika to zarówno ze stanu skupienia (koloid), jak i nietypowych parametrów magnetycznych.

Aby pomiar przenikalności magnetycznej był możliwy, należy zastosować konstrukcję, w której rdzeń będzie w postaci walca wykonanego z cieczy. Wokół walca umieszczone są dwie cewki pomiarowe: jedna bezpośrednio okalająca ciecz oraz druga o odpowiednio większej średnicy. Całość znajduje się w solenoidzie, wymuszającym strumień pola magnetycznego.

Dokładność pomiaru uzależniona jest od mechanicznej precyzji wykonania każdego z elementów urządzenia. Układ charakteryzuje się również wrażliwością na zmiany temperatury podczas badania cieczy magnetoreologicznej.

W pracy został przedstawiony model matematyczny, sposób działania oraz realizacja techniczna urządzenia do badania przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej.

## 2. Ciecz magnetoreologiczna

Ciecze magnetyczne mają właściwości cieczy o cechach substancji magnetycznych [1]. Przy braku zewnętrznego pola magnetycznego nie wykazują namagnesowania. Zachowują się wtedy podobnie do cieczy newtonowskiej.

**Autor korespondujący:**

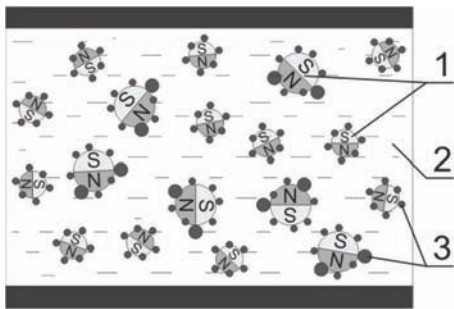
Adam Piłśniak, adam.pilsniak@polsl.pl

**Artykuł recenzowany**

nadesłany 20.07.2020 r., przyjęty do druku 26.08.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Budowa cieczy magnetycznej przy braku zewnętrznego pola magnetycznego

Fig. 1. Magnetic fluid structure without external magnetic field

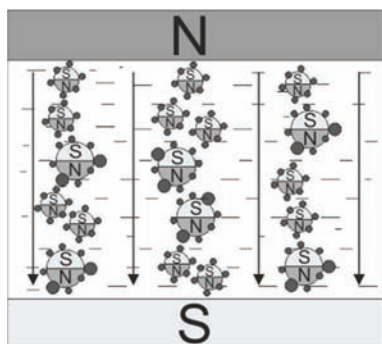
Model cieczy magnetycznej przedstawiono na rys. 1. Jej trzy składowe to [2]: 1 – cząsteczki ferromagnetyczne, 2 – ciecz nośna, 3 – niemagnetyczna powłoka powierzchniowa (środek powierzchniowo aktywny).

Pierwszy składnik jest cieczą z natury niemagnetyczną, którą może być: woda, olej syntetyczny lub mineralny, nafta, ciecze węglowodorowe lub fluorowodorowe, estry, diestry. Cząstki ferromagnetyczne stanowią pojedyncze domeny magnetyczne (mikromagnesy), składają się z: żelaza, kobaltu, niklu, oraz ich tlenków (najczęściej  $Fe_3O_4$ ). Cząsteczki te są koloidalnie zawieszone w elektrycznie i magnetycznie obojętnej cieczy nośnej. Ponieważ na cząstki działają tzw. siły Van der Waalsa (siły wzajemnego przyciągania się cząsteczek) oraz siły przyciągania magnetycznego, a także poddane są ruchom termicznemu, zatem w wyniku przypadkowych zderzeń mogłyby łączyć się w zespoły. Aby temu zapobiec cząstki pokrywa się warstwą środka powierzchniowo aktywnego tworząc na powierzchni niemagnetyczną sprężystą powłokę, która podczas zderzeń cząstek zapobiega ich łączeniu się.

W przypadku braku zewnętrznego pola magnetycznego cząsteczki cieczy poddają się ruchom termicznemu i momenty magnetyczne związane z każdą z cząsteczek są zorientowane przypadkowo. Po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego momenty magnetyczne cząstek orientują się względem linii sił pola magnetycznego – cząsteczki układają się wzdłuż linii sił pola tworząc łańcuchy, nie poddając się ruchom termicznym (rys. 2).

Zmiany wartości przyłożonego pola magnetycznego powodują zmiany lepkości cieczy. Im większa będzie wartość pola magnetycznego tym większe powstaną naprężenia łańcuchów, a co za tym idzie – większa lepkość cieczy. Zmiany lepkości, zarówno przy zwiększaniu jak i zmniejszaniu wartości pola magnetycznego, występują w czasie pojedynczych mikrosekund.

Ciecze magnetyczne są zaliczane do cieczy nienewtonowskich i można je opisać posługując się modelem Bingham’a [3]:



Rys. 2. Struktura cieczy magnetycznej przy obecności pola magnetycznego

Fig. 2. Magnetic fluid structure in the presence of the external magnetic field

$$\tau = \tau_0(B) + \mu\dot{\gamma}, \tag{1}$$

gdzie:  $\tau$  – naprężenie styczne;  $\tau_0(B)$  – naprężenie graniczne indukowane przez pole magnetyczne o indukcji  $B$ ;  $\mu$  – lepkość dynamiczna cieczy;  $\dot{\gamma}$  – szybkość odkształcania postaciowego.

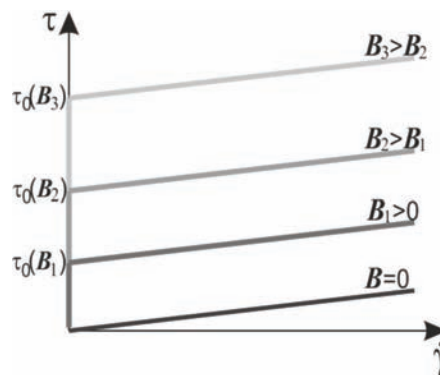
Model ten wyraża zmiany naprężenia stycznego  $\tau$  w zależności od szybkości odkształcania postaciowego cieczy oraz naprężenia granicznego indukowanego przez pole magnetyczne  $\tau_0(B)$ .

Powyższe równanie (1) jest słuszne dla naprężeń  $\tau$  większych od naprężenia granicznego  $\tau_0(B)$ . Poniżej granicy plastyczności, tj. dla naprężeń  $\tau$  mniejszych od naprężenia granicznego, ciecz zachowuje się jak ciało sprężyste i obowiązuje wówczas zależność:

$$\tau = G(B)\gamma \tag{2}$$

przy czym:  $G(B)$  – zależny od indukcji magnetycznej moduł sprężystości postaciowej.

Zależność naprężenia stycznego od szybkości odkształcania (1) została przedstawiona na rys. 3.

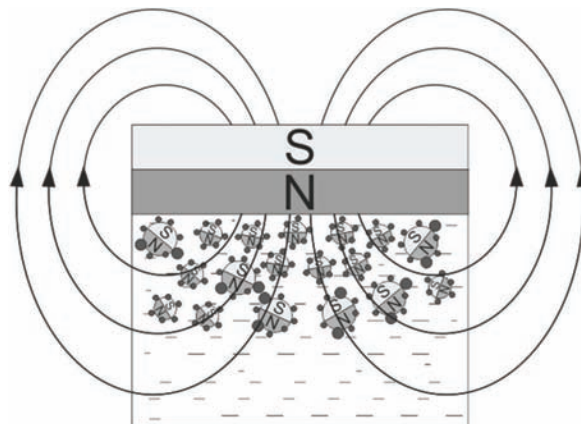


Rys. 3. Model Bingham’a dla cieczy magnetycznej

Fig. 3. Bingham model for magnetic fluid

Jeśli tylko fragment objętości cieczy magnetycznej znajduje się w polu magnetycznym, to obserwuje się przesunięcie cząstek w jego kierunku. Dzięki temu możliwa jest również zmiana gęstości cieczy w określonych regionach (rys. 4).

Stosując ciecze magnetyczne należy zwracać uwagę na zależność ich parametrów od temperatury. Obecnie wytwarzane ciecze charakteryzują się dobrą stałością właściwości w funkcji temperatury. Podstawowa lepkość cieczy nieznacznie zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Także jej przenikalność magnetyczna wykazuje bardzo niewielki spadek przy wzroście temperatury.



Rys. 4. Fragment objętości cieczy magnetycznej w niejednorodnym polu

Fig. 4. Magnetoreological fluid in the nonhomogeneous magnetic field

Wyróżnia się dwa rodzaje cieczy magnetycznych: nanomagneto-reologiczne, które są nazywane także ferromagnetycznymi (ang. *ferrofluids*), oraz mikromagneto-reologiczne MR (ang. *magneto-rheological fluids*), powszechnie zwane magneto-reologicznymi. Główną cechą tych cieczy są duże zmiany lepkości uzyskiwane po przyłożeniu stosunkowo niewielkich wartości pola magnetycznego. Z tego powodu cieczce te nadają się szczególnie dobrze do zastosowań w systemach wymagających dużej dynamiki. Dłuższe pozostawanie cieczy MR w bezruchu (kilka dni) skutkuje sedymentacją cząsteczek, co jest niekorzystną cechą tych cieczy.

### 3. Stanowisko do badania przenikalności magnetycznej cieczy MR

Urządzenie pomiarowe do pomiaru przenikalności magnetycznej cieczy magnetycznej jest złożone z pojemnika na ciecz magnetyczną, cewek pomiarowych, cewki wzbudzającej i rdzenia ferromagnetycznego zamykającego obwód magnetyczny (rys. 5).

Cewki urządzenia pomiarowego są ustawione w następujący sposób: cewka wzbudzająca okala cewki pomiarowe i pojemnik z cieczą magnetyczną, pierwsza cewka pomiarowa umieszczona jest wokół pojemnika z cieczą magnetyczną, druga cewka pomiarowa umieszczona jest na wewnętrznej stronie cewki wzbudzającej (rys. 6). Cewki pomiarowe mają tę samą liczbę zwojów.

Strumień magnetyczny  $\Phi_g$  wytwarzany przez cewkę wzbudzającą zamyka się przez wnętrze cewki wzbudzającej (pojemnik z cieczą magnetyczną i powietrze) i rdzeń magnetyczny. Część strumienia magnetycznego  $\Phi_g$  płynie przez pojemnik z cieczą magnetyczną  $\Phi_M$ , a pozostała część strumienia płynie przez powietrze wokół pojemnika z cieczą magnetyczną – przez płaszcz powietrzny  $\Phi_\delta$ .

Urządzenie pomiarowe działa na zasadzie pomiaru napięcia w dwóch cewkach pomiarowych. Indukowane w nich napięcia są adekwatne do przenikalności danego ośrodka. Podano model matematyczny, aby przedstawić zasadę działania urządzenia (rys. 7). Zależność opisującą urządzenie wyprowadzono ze strumieni.

$$\Phi_M = \Phi_g - \Phi_\delta \tag{3}$$

Strumień w cieczy magnetycznej opisuje zależność

$$\Phi_M = \frac{R_\delta}{R_\delta + R_M} \cdot \Phi_g, \tag{4}$$

gdzie:  $R_\delta$  – reluktancja powietrza;  $R_M$  – reluktancja cieczy magnetycznej.

Strumień płynący przez płaszcz powietrzny opisuje zależność:

$$\Phi_\delta = \frac{R_M}{R_\delta + R_M} \cdot \Phi_g, \tag{5}$$

Zależność opisującą urządzenie wyprowadzono ze stosunku strumienia cieczy magnetycznej do strumienia powietrza.

$$\frac{\Phi_M}{\Phi_\delta} = \frac{R_\delta}{R_M} = \frac{\frac{l}{S_\delta \cdot \mu_0}}{\frac{l}{S_M \cdot \mu_M \cdot \mu_0}} = \frac{S_M \cdot \mu_M}{S_\delta} = \mu_M \cdot \frac{S_M}{S_\delta}, \tag{6}$$

gdzie:  $l$  – średnia długość linii sił pola w cewce;  $S_\delta$  – pole przekroju cewki umieszczonej w powietrzu;  $S_M$  – pole przekroju cewki umieszczonej na zewnątrz pojemnika z cieczą.

Dla urządzenia pomiarowego założony stosunek  $S_M/S_\delta = 1$ , zatem

$$\mu_M = \frac{\Phi_M}{\Phi_\delta}. \tag{7}$$

Podstawiając do otrzymanego wzoru zależność

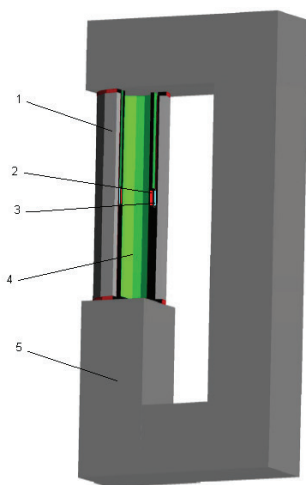
$$U = 4,44 \cdot \Phi \cdot z \cdot f = 4,44 \cdot S \cdot B \cdot z \cdot f, \tag{8}$$

otrzymujemy

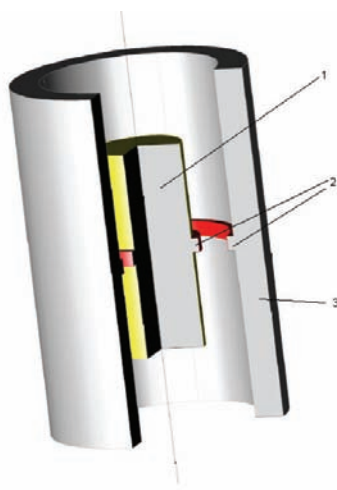
$$\mu_M = \frac{U_M}{U_\delta}, \tag{9}$$

gdzie:  $U_1$  – napięcie cewki nawiniętej na pojemniku z cieczą magnetyczną – cewki pomiarowej wewnętrznej,  $U_2$  – napięcie cewki umieszczonej w płaszczu powietrznym – cewki pomiarowej zewnętrznej,

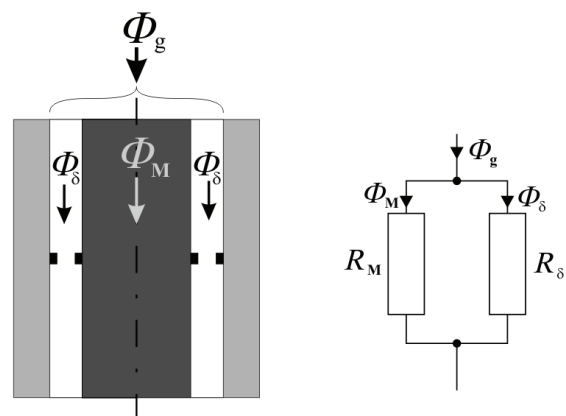
$$U = U_2 - U_1, \quad U_M = U_1.$$



Rys. 5. Urządzenie pomiarowe:  
1 – cewka wzbudzająca, 2,3 – cewki pomiarowe, 4 – ciecz magnetyczna, 5 – rdzeń ferromagnetyczny  
Fig. 5. The measuring device:  
1 – excitation coil, 2,3 – measuring coils, 4 – magnetic liquid, 5 – ferromagnetic core

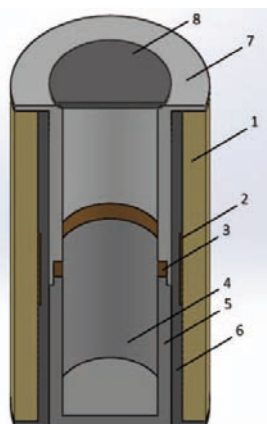


Rys. 6. Układ cewek  
1 – ciecz magnetyczna, 2 – cewki pomiarowe, 3 – cewka wzbudzająca  
Fig. 6. The coil system:  
1 – magnetic fluid, 2 – measuring coils, 3 – excitation coil

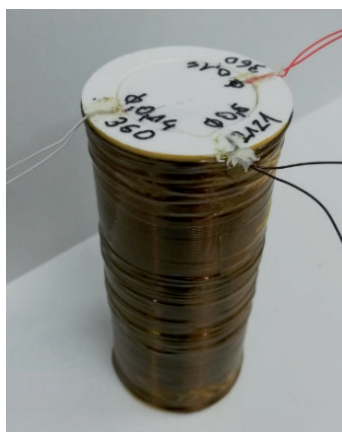


Rys. 7. Rozpływ strumienia magnetycznego wewnątrz cewki wzbudzającej  
Fig. 7. Magnetic flux flow inside the excitation coil

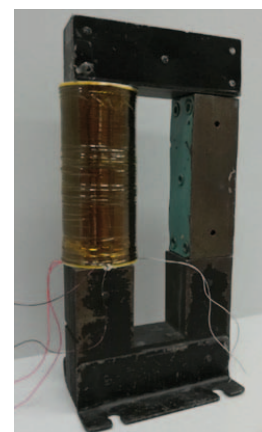




**Rys. 8. Wizualizacja 3D urządzenia do pomiaru przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej**  
 Fig. 8. 3D model of the measuring device for the magnetorheological fluid magnetic permeability



**Rys. 9. Wykonane urządzenie do pomiaru przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej**  
 Fig. 9. Measuring device for magnetic permeability of the magnetorheological fluid



**Rys. 10. Wykonane urządzenie do pomiaru przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej, wraz z obwodem magnetycznym**  
 Fig. 10. Measuring device for magnetic permeability of the magnetorheological fluid, including the ferromagnetic core

Wynika stąd końcowa zależność opisująca urządzenie:

$$\mu_M = \frac{U_1}{U_2 - U_1} \quad (10)$$

Opisywane urządzenie pomiarowe składa się z trzech cewek nawiniętych na karkasie, który jednocześnie pełni rolę pojemnika na ciecz magnetyczną. Cewka nr 1 jest cewką wzbudzącą natomiast cewki nr 2 i 3 są cewkami pomiarowymi. Karkas został wykonany w technologii druku 3D. Składa się on z trzech elementów: karkasu zewnętrznego (6) oraz dwóch karkasów wewnętrznych (5, 7), które po sklejeniu tworzą pojemnik na ciecz.

Nawinięcie wszystkich cewek zostało zrealizowane na autorskiej nawijarce do cewek liniowych. Pierwszym etapem było nawinięcie na karkasie zewnętrznym cewki pomiarowej zewnętrznej (2) składającej się z 360 zwojów. Znajduje się ona w specjalnym zagłębieniu, w połowie wysokości karkasu. Po jej nawinięciu zabezpieczono wykonane uzwojenie taśmą kaptonową. Kolejnym krokiem było nawinięcie cewki pomiarowej wewnętrznej (3) o 360 zwojach wykonanych drutem o średnicy 0,14 mm. Z racji tego, że powinna mieć bezpośredni kontakt z cieczą magnetyczną, nie było możliwości umieszczenia jej wraz z karkasem w urządzeniu pomiarowym. Z tego powodu została ona nawinięta na karkasie pomocniczym, z którego po nawinięciu została zdjęta. Aby po usunięciu karkasu cewka zachowała swój kształt, podczas nawijania każda warstwa uzwojenia była klejona za pomocą wysokotemperaturowego silikonu.

Karkasy wewnętrzne zostały tak zaprojektowane, aby po złożeniu pomiędzy nimi, w środku wysokości, znajdowała się przestrzeń na cewkę pomiarową wewnętrzną (3). Montaż urządzenia przebiegał w następującej kolejności. Cewkę odbiorczą umieszczono pomiędzy dwoma sklejonymi szczelnie karkasami wewnętrznymi (7) i (5). Tak przygotowane karkasy wewnętrzne zostały wsunięte do karkasu zewnętrznego (6), na którym nawinięto cewkę wzbudzącą. Składa się ona z 2121 zwojów wykonanych drutem o średnicy 0,5 mm. Gotowe urządzenie zostało zabezpieczone taśmą kaptonową (rys. 9). Pojemnik na ciecz magnetyczną (4) zabezpieczony jest przed dostawaniem się zanieczyszczeń za pomocą pokrywki (8).

## 4. Badania pomiarowe

Układ pomiarowy składa się z dwóch części. Pierwszą z nich jest wcześniej zaprojektowane, następnie wykonane urządzenie. Oprócz układu cewek pomiarowych, niezbędne jest dodatnie obwodu magnetycznego, jak przedstawiono na rys. 5. Zastosowanie rdzenia magnetycznego o wysokiej przenikalności magnetycznej, umożliwia ujednorodnienie strumienia magnetycznego wewnątrz cewki wzbudzającej, a co za tym idzie – również w cewkach pomiarowych. Charakterystyka magnesowania rdzenia ma drugorzędne znaczenie, ponieważ nie ma wpływu na rozdział strumienia w dzielniku strumienia. Zestawione urządzenie przedstawiono na rys. 10.

Ze względu na szeroki zakres napięć niezbędnych przy kompleksowym badaniu cieczy magnetoreologicznej, należało zestawić odpowiedni układ pomiarowy (rys. 11). W tym celu, jako generator przebiegu sinusoidalnego ( $U_{gen}$ ), zastosowano kartę pomiarową Analog Discovery II. Charakteryzuje się ona czteronastobitową rozdzielczością napięciową. Ze względu na duży zakres napięć i prądów potrzebnych do zasilenia cewki, należało zastosować wzmacniacz mocy o odpowiednich parametrach. Wykorzystano w tym celu wzmacniacz mocy audio klasy D, o maksymalnej mocy 200 W, przy obciążeniu 4  $\Omega$  i paśmie przenoszenia 20 Hz – 20 kHz. Urządzenie to należało odpowiednio dostosować do celów pomiarowych. Jedną z korekt było z bocznikowanie kondensatora wejściowego, celem maksymalnego obniżenia dolnej częstotliwości granicznej. Aby uzyskać dużą moc wzmacniacza, zasilono go ze źródła o napięciu  $\pm 50$  V i maksymalnym prądzie 1 A. Zastosowany zasilacz zapewnia szybkie ograniczenie prądu do ustalonych wcześniej parametrów.

Ze względu na niskie napięcia, indukowane w cewkach pomiarowych, zastosowano dwa multimetry SANWA PC5000A, umożliwiające pomiar wartości skutecznej. W badaniach wstępnych wykorzystywano zakresy pomiarowe 500 mV oraz 5 V. Wyniki pomiarów zamieszczono w tab. 1.

Dodatkowe parametry zamieszczone w tab. 1, które nie mają wpływu na bezpośrednie wyznaczenie wartości współczynnika przenikalności magnetycznej, określone zostały za pomocą pomiarów oscyloskopowych. Dotyczy to weryfikacji napięcia na cewce ( $U_c$ ) wzbudzającej oraz prądu ( $I$ ) przez nią płynącego.

## 5. Analiza wyników i niepewności pomiarów

Zrealizowany prototyp urządzenia do pomiaru przenikalności magnetycznej cieczy magnetoreologicznej został wstępnie zweryfikowany pomiarowo. Weryfikację przeprowadzono dla przypadku, gdy zbiornik na badaną ciecz był pusty. Umożliwia to sprawdzenie działania przyrządu dla przypadku, gdy współczynnik przenikalności magnetycznej próbki jest znany i równy jedności. Jest to sytuacja, gdy błędy pomiarowe, wynikające z układu geometrycznego rozmieszczenia cewek, są największe.

W celu poprawnego zinterpretowania wyników, oszacowano niepewność pomiarową. Wynika ona bezpośrednio ze wzoru na pomiar przenikalności (10). Ze względu na występowanie dwóch niezależnych zmiennych, należy określić niepewność złożoną [6]. W tym celu określono współczynniki wrażliwości  $c_1$  i  $c_2$ :

$$c_1 = \frac{\partial \mu_M}{\partial U_1} = \frac{U_2}{(U_2 - U_1)^2}, \quad (11)$$

$$c_2 = \frac{\partial \mu_M}{\partial U_2} = \frac{-U_1}{(U_2 - U_1)^2}. \quad (12)$$

Ostatecznie, niepewność złożona opisana jest wzorem [7]:

$$u(\mu_M) = \sqrt{\left[ \frac{U_2}{(U_2 - U_1)^2} \right]^2 u^2(U_1) + \left[ \frac{-U_1}{(U_2 - U_1)^2} \right]^2 u^2(U_2)}, \quad (13)$$

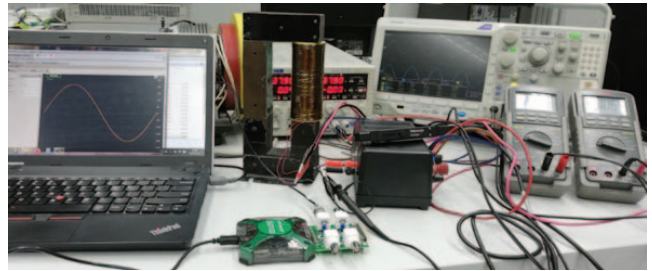
gdzie  $u(U_1)$  oraz  $u(U_2)$  są niepewnościami pomiaru napięć cewek nr 1 i nr 2. Wynikają one z klasy przyrządów SANWA PC5000A. Przyjmując, że wyniki te charakteryzują się rozkładem jednostajnym, określamy następujące zależności na niepewność:

dla zakresu 500 mV:

$$u(U) = \left( \frac{U \cdot 0,8\%}{100} + 0,6 \right) / \sqrt{3} \quad (14)$$

i dla zakresu 5 V:

$$u(U) = \left( \frac{U \cdot 0,8\%}{100} + 6 \right) / \sqrt{3}. \quad (15)$$



Rys. 11. Zestawiony układ pomiarowy  
Fig. 11. Complete measuring system

Tabela 1. Wyniki pomiarowe dla pomiarów przenikalności

Table 1. The measurement results

$f = 10 \text{ Hz}$								
$U_{\text{gen}}, \text{ mV}$	$U_v, \text{ V}$	$I, \text{ mA}$	$U_1, \text{ mV}$	$U_2, \text{ mV}$	$\mu_M$	$u(U_1), \text{ mV}$	$u(U_2), \text{ mV}$	$u(\mu_M)$
200	4,62	146	96,00	55,00	1,34	0,79	0,60	0,04
400	9,20	291	187,0	107,00	1,34	1,3	0,84	0,03
800	18,50	584	371,0	212,0	1,33	2,1	1,4	0,03
$f = 20 \text{ Hz}$								
$U_{\text{gen}}, \text{ mV}$	$U_v, \text{ V}$	$I, \text{ mA}$	$U_1, \text{ mV}$	$U_2, \text{ mV}$	$\mu_M$	$u(U_1), \text{ mV}$	$u(U_2), \text{ mV}$	$u(\mu_M)$
200	4,63	142	185,0	106,00	1,34	1,2	0,84	0,03
400	9,22	285	366,0	209,0	1,33	2,1	1,4	0,03
800	18,5	568	726,0	415,0	1,33	6,9	2,3	0,03
$f = 40 \text{ Hz}$								
$U_{\text{gen}}, \text{ mV}$	$U_v, \text{ V}$	$I, \text{ mA}$	$U_1, \text{ mV}$	$U_2, \text{ mV}$	$\mu_M$	$u(U_1), \text{ mV}$	$u(U_2), \text{ mV}$	$u(\mu_M)$
200	4,67	130	336,0	193,0	1,35	1,9	1,3	0,03
400	9,29	262	670,0	384,0	1,34	6,6	2,2	0,04
800	16,6	520	1331,0	761,0	1,34	9,7	7,0	0,04

Na podstawie pomiarów, powyższych rozważań i obliczeń, wykonano zestawienie wyników pomiarowych, wraz z ich niepewnościami pomiarowymi – tab. 1.

W przedstawionym przypadku, teoretyczna wartość przenikalności magnetycznej powinna być równa jedności. Można jednak zauważyć rozbieżności względem założeń, sięgające 35%. Przypadek ten jest jednak krytyczny i najbardziej zauważalny dla badanych ośrodków, których współczynnik przenikalności jest bliski jedności. Wynika to z wrażliwości dzielnika strumienia na geometrię układu cewek pomiarowych, a zwłaszcza cewki będącej w bezpośrednim kontakcie z badanym czynnikiem (cewka nr 1).

Aby zwiększyć czułość pomiarową urządzenia, zastosowano układ cewek wielowarstwowych. Aby geometria przepływu strumienia była zbliżona do założonego modelu, zastosowano drut o możliwie najmniejszej średnicy (0,14 mm), wynikającej z technicznych możliwości nawijarki. Zastosowanie cewek wielowarstwowych spowodowało pojawienie się błędu systematycznego.

## 6. Wnioski

Nietypowy pomiar, jakim jest wyznaczenie przenikalności magnetycznej cieczy o właściwościach magnetycznych, musi zostać zrealizowany w specyficzny sposób [8, 9]. W tym celu opracowano urządzenie przedstawione w artykule. Takie rozwiązanie daje możliwość szybkiej weryfikacji właściwości magnetycznych cieczy magnetoreologicznej.

Wykonanie urządzenia zgodnie z założeniami teoretycznymi okazało się niemożliwe. Pomimo zastosowania nowoczesnych technik (półautomatyczne uzwajanie cewek, druk 3D), nie udało się uzyskać poprawnego układu przestrzennego cewek. Geometria cewek pomiarowych nie zapewnia poprawności pomiaru strumienia, w pełni zgodnego z założeniami teoretycznymi dotyczącymi dzielnika strumienia.

Z przeprowadzonych pomiarów można wnioskować, że pojawiający się błąd jest systematyczny. Wtórna analiza budowy urządzenia dowiodła, że problemem znaczących błędów jest zastosowanie wielowarstwowych cewek pomiarowych, a zwłaszcza cewki znajdującej się w bezpośredniej bliskości cieczy magnetoreologicznej (cewki nr 1).

Pojawiający się błąd systematyczny może być zredukowany poprzez korekcję budowy opisywanego urządzenia. Zmianą będzie zastosowanie jednowarstwowych cewek pomiarowych. Mankamentem tej zmiany będzie zmniejszenie czułości pomiarowej układu, wynikającej ze zmniejszenia liczby zwojów cewek.

## Bibliografia

1. Myszkowski A., *Konstrukcja i badanie hamulca wahadłowego z cieczą magnetoreologiczną*, „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji”, Vol. 27, Nr 2, 2007, 131–136, [http://atmia.put.poznan.pl/Woluminy/Fil/ATMiA\_27\_2\_14.pdf].
2. Ławniczak A., Milecki A., *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
3. Szelaąg W., *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
4. Kowol P., *From simple experiments to modern mechatronic devices – development of MR fluid applications*. [w:] The 12th Conference on Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics. WZEE'2015, Proceedings. Kielce University of Technology, 2015, 45–48, DOI: 10.1109/WZEE.2015.7394022.
5. Kowol P., Szczygieł M., Kluszczyński K., *Przetworniki elektromechaniczne z cieczą magnetoreologiczną*. „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 80 nr 9, 2004, 830–833.
6. Skubis T., *Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiaru*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
7. *Ewaluacja danych pomiarowych. Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru*. Wydanie polskie, Warszawa, GUM, 2008, [www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Publikacje/Przewodnik\_JCGM\_100\_ver\_fin\_27\_08\_2019\_popr.pdf].
8. Kordonski W., Sekeres A., James R., *Method and apparatus for measurement of magnetic permeability of a material*. Patent US7557566, 2009, <https://patents.google.com/patent/US7557566B2/en>.
9. Laun H.M., Gabriel C., Schmidt G., *Primary and secondary normal stress differences of a magnetorheological fluid (MRF) up to magnetic flux densities of 1 T*. “Journal of non-newtonian fluid mechanics”, Vol. 148, 2008, 47–56, DOI: 10.1016/j.jnnfm.2007.04.019.
10. Kowol P., Szczygieł M., Lo Sciuto G., Capizzi G., *Modeling of Magnetorheological Fluids Relative Magnetic Permeability by using a Neural Network approach*, 20th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), June 16–18, 2020, Palermo, Italy.

# Stand for Measurement of the Magnetorheological Fluid Magnetic Permeability

**Abstract:** Magnetorheological fluid is a frequently used element in mechatronic systems. The reason is its specific mechanical properties, which depend on the applied external magnetic field. They are mainly used where variable viscosity of said medium is required. Measurement of magnetic parameters of liquids is a specific and challenging task which is due to both the state of aggregation (colloid) and unusual magnetic parameters. To measure the magnetic permeability, a structure in which the core is in the form of a cylinder made of liquid should be used. There are two measuring coils around the cylinder: one directly surrounding the liquid and the other with a correspondingly larger diameter. Everything is contained in a solenoid that forces the magnetic flux. The accuracy of the measurement depends on the configuration of the measuring system and the mechanical precision of each of its elements. The paper presents a mathematical model, method of operation and technical implementation of a device for studying the magnetic permeability of a magnetorheological liquid. Measurements were made for the manufactured device when the magnetic permeability coefficient of the sample is known and equal to one. The conducted analysis of the measurements provides the basis for the evaluation of the developed measuring stand.

**Keywords:** magnetorheological fluid, magnetic permeability, measurements of magnetic properties

## dr inż. Adam Piłśniak

adam.pilslniak@polsl.pl  
ORCID: 0000-0002-4923-3855

Jest pracownikiem Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Otrzymał stopień doktora nauk technicznych w roku 2007. Jest członkiem Komisji Metrologii oddziału PAN w Katowicach na okres 2019–2022. Jego zainteresowania naukowe skupiają się głównie na elektronicznych układach nieliniowych oraz wykorzystaniu materiałów ferromagnetycznych. Jest autorem i współautorem kilkudziesięciu prac naukowych opublikowanych w kraju i za granicą oraz współautorem patentu.



## dr inż. Paweł Kowol

pawel.kowol@polsl.pl  
ORCID: 0000-0002-5855-7763

Jest pracownikiem Katedry Mechatroniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Otrzymał stopień doktora nauk technicznych w 2007 r. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na zastosowaniach cieczy magnetoreologicznych w układach mechatronicznych, a w szczególności na przetwornikach elektromechanicznych z cieczą magnetoreologiczną. Jest autorem i współautorem kilkudziesięciu prac naukowych opublikowanych w kraju i za granicą oraz współautorem dwóch patentów.



## mgr inż. Grzegorz Ziolo

g.ziolo@wp.pl  
ORCID: 0000-0002-0897-6206

Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach na kierunku Elektrotechnika. Dwukrotnie zdobył pierwsze miejsce w konkursie „Najlepsza praca dyplomową z elektryki” organizowanym przez Oddział Gliwicki SEP. Zwycięskie prace to: projekt inżynierski „Goniometr fotometryczny” oraz praca magisterska „Nawijarka małych cewek”. Pracuje jako inżynier elektryk w branży robotyki mobilnej. Jego głównymi zainteresowaniami są: automatyzacja procesów produkcyjnych, druk 3D, maszyny sterowane numerycznie. Jest współautorem kilku prac naukowych opublikowanych w kraju oraz jednej za granicą (w recenzji).



## Grazia Lo Sciuto

glosciuto@dii.unict.it  
ORCID: 0000-0001-9384-7232

W 2006 roku ukończyła Wydział Elektrotechniki na Uniwersytecie w Katanii, uzyskując tytuł magistra drugiego stopnia w zakresie projektowania polimerowych podłoży do obwodów elektronicznych dla St Microelectronics. Uzyskała doktorat z elektroniki stosowanej na Roma Tre University w Rzymie we Włoszech w 2016 r. Od 2013 r. jest pracownikiem naukowym na Uniwersytecie w Katanii na Sycylii we Włoszech. Jej obecne badania obejmują urządzenia elektroniczne, polimery półprzewodnikowe, materiały organiczne, nowatorskie urządzenia fotowoltaiczne i sieci neuronowe stosowane w złożonych systemach, takich jak energia odnawialna, przetwarzanie sygnałów, rozpoznawanie wzorców i biometria.

