PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Paweł TOFILSKI[1], Mariusz NAJGEBAUER[2], Krzysztof KLUSZCZYŃSKI[3]
ORCID: [1]0009-0009-3256-7574; [2]0000-0001-9441-1924; [3]0000-0002-3685-3756
DOI: 10.15199/48.2025.11.14

Badania pomiarowe właściwości magnetycznych membran magnetoreologicznych z punktu widzenia możliwości ich wykorzystania w przetwornikach elektromechanicznych

Badania pomiarowe właściwości magnetycznych membran magnetoreologicznych z punktu widzenia możliwości ich wykorzystania w przetwornikach elektromechanicznych

[1] mgr inż. Paweł Tofilski, Politechnika Krakowska, Katedra Infotroniki i Cyberbezpieczeństwa E-3, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, E-mail: pawel.tofilskii@doktorant.pk.edu.pl
[2] dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, Katedra Elektroenergetyki, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42–201 Częstochowa, E-mail: mariusz.najgebauer@pcz.pl
[3] prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Katedra Infotroniki i Cyberbezpieczeństwa E-3, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczynski@.pk.edu.pl

Adres do korespondencji: pawel.tofilskii@doktorant.pk.edu.pl

Streszczenie. Przeprowadzono badania szerokiej gamy próbek membran magnetoreologicznych o różnym stosunku masowym, czyli o różnym stosunku masy proszku ferromagnetycznego do masy silikonu. Stosunek masowy zmieniano w zakresie od 0, 25:1 do 3:1. Badania prowadzono z wykorzystaniem zautomatyzowanego systemu do pomiarów właściwości magnetycznych REMACOMP® C. W programie FEMM 4.2 przeanalizowano wpływ stosunku masowego na wartość rozwijanej siły reluktancyjnej na przykładzie 1-komorowej membranowej pompy elektromagnetycznej.

Słowa kluczowe: właściwości magnetyczne membran magnetoreologicznych, przenikalność magnetyczna membran magnetoreologicznych, elektromagnetyczna pompa z membraną magnetoreologiczną, siła reluktancyjna działająca na membranę magnetoreologiczną.

Abstract. Tests were carried out on a wide range of magnetorheological membrane samples with different mass ratios, i.e. with different mass ratios of ferromagnetic powder to silicone. The mass ratio was changed in the range from 0, 25:1 to 3:1. The research was conducted using a automated magnetic material measuring system REMACOMP® C. Developed reluctance force was analyzed in the FEMM 4.2 program using the example of a 1-chamber membrane electromagnetic pump.

Keywords: magnetic properties of magnetorheological membranes, magnetic permeability of magnetorheological membranes, electromagnetic pump with magnetorheological membrane, reluctance force acting on magnetorheological membrane.

Wstęp

Magnetoreologiczne elastomery (MRE) są nowego typu materiałami, charakteryzującymi się zdolnością odkształcania (a więc wykazującymi dużą sprężystość) oraz właściwościami magnetycznymi, czyli podwyższoną w stosunku do próżni (powietrza) zdolnością do przewodzenia strumienia magnetycznego.

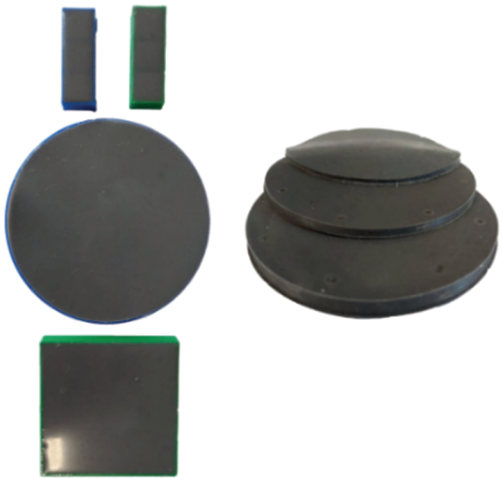
Pierwsze obserwacje efektu magnetoreologicznego dotyczyły cieczy (MRF). Badania te były prowadzone przez Otto Rabinowa w latach 40-tych XX wieku [1, 2]. Badania nad magnetoreologicznymi elastomerami podjęte zostały w latach 80-tych ubiegłego wieku przez Zvi Rigbiego i Leif Jilkena [3]. W kolejnych dekadach skupiano się na doskonaleniu receptur oraz technologii MRE poprzez wprowadzanie nowych typów matryc, wykonanych z polidimetylosiloksanu (PDMS) [4], poliuretanu (PU), kauczuku naturalnego (NR) czy też elastomeru etylenowo-akrylowego (AEM). Rozwój teorii materiałów MRE dotyczył analizy mechanizmów rozprowadzania fazy zdyspergowanej (sypkiego proszku

ferromagnetycznego) w matrycy będącej fazą ciągłą, jak też różnic we właściwościach elastomerów MRE, wynikających z wykorzystania różnych proszków ferromagnetycznych (o cechach izotropowych, bądź też anizotropowych) [4, 5, 6, 7]. Oryginalny model magnetoreologicznego elastomeru, bazujący na teorii perkolacji został zaproponowany w [8]. Nowe możliwości wytwarzania magnetoreologicznych elastomerów z uwzględnieniem wykorzystania technologii druku 3D zostały zaproponowane w [6, 9–11].

Elastomery magnetoreologiczne są obiecującymi materiałami, których zakres zastosowań będzie się systematycznie coraz bardziej poszerzał. Od kilkunastu lat prowadzone są badania nad ich zastosowaniem w elektromagnetycznych pompach membranowych, elektromagnetycznych wstrząsarkach, tłumikach drgań, mikrogeneratorach elektrycznych, magnetoreologicznych aktuatorach, czy też sensorach nowego typu [5, 12–18]. Projektowanie takich urządzeń oraz formułowanie efektywnych modeli matematycznych dla badań symulacyjnych wymaga znajomości parametrów, współczynników oraz charakterystyk, opisujących ich właściwości mechaniczne oraz magnetyczne.

Autorzy publikacji opracowali własną laboratoryjną metodę wytwarzania membran magnetoreologicznych, która wykorzystuje syntetyczny silikon formierski, dostarczany w formie płynu dwuskładnikowego oraz proszku ferromagnetycznego [17, 19]. Umiejętność samodzielnego wytwarzania membran magnetoreologicznych w warunkach laboratoryjnych daje możliwość szerokich zmian ich kształtów (w zależności od przewidywanych zastosowań mogą to być kształty regularne np. kołowe, prostokątne lub kwadratowe, jak też dowolne kształty nieregularne). Istotne znaczenie dla badań ma to, że można uzyskiwać membrany o dowolnych grubościach. Kolejną ważną korzyścią, związaną z opracowaniem własnej metody, jest możliwość zmiany ilości proszku ferromagnetycznego, zawartego w materiale nośnym i oddziaływania w ten sposób na właściwości magnetyczne membran (rys. 1).

Zawartość proszku ferromagnetycznego w silikonie syntetycznym charakteryzuje się przez podanie tzw. stosunku masowego, czyli stosunku masy proszku ferromagnetycznego do masy syntetycznego silikonu. W przeprowadzonych badaniach ten stosunek był zmieniany w zakresie od 0,25:1 do 3:1 (z krokiem 0,25). Należy podkreślić, że kluczowe znaczenie ma proces właściwego zmieszania i równomiernego rozprowadzenia proszku ferromagnetycznego. Inne ważne elementy procesu technologicznego to: suszenie, odgazowywanie w warunkach próżniowych itp.



Rys. 1. Membrany magnetoreologiczne o różnych kształtach oraz o różnych grubościach wytwarzane własną metodą laboratoryjną

Laboratoryjna metoda otrzymywania membran magnetoreologicznych

Z punktu widzenia chemicznego technologia wytwarzania membran magnetoreologicznych to proces otrzymywania kompozytu w procesie mieszania dwóch składników: silikonu czyli matrycy, stanowiącej fazę ciągłą oraz sypkiego proszku ferromagnetycznego, będącego fazą zdyspergowaną (rozprowadzaną w silikonie). W opracowanej metodzie jest wykorzystywany syntetyczny silikon formierski typu RPRO 10 produkowany przez firmę Reschimica (silikon ten wybrano po przeprowadzeniu wielu prób z różnymi jego rodzajami). Wykorzystany proszek ferromagnetyczny (składający się z czystego żelaza) jest sprzedawany przez firmę Chaos Trade (producent gwarantuje, że średnice ziaren nie przekraczają wymiarów 63 μm).

Obie fazy w zadanej proporcji masowej są wpierw mieszane w pojemniku, następnie poddawane są procesowi odgazowania w komorze próżniowej i na końcu – wylewane do form o zadanym kształcie geometrycznym. Formy są wytwarzane w technologii druku 3D z filamentu PLA. Czas utwardzania zależy od grubości membrany i w zależności od zawartości proszku ferromagnetycznego waha się w granicach od 4 do 10 godzin.

Program badań obejmuje określenie właściwości magnetycznych membran magnetoreologicznych w zależności od stosunków masowych. Właściwości magnetyczne były badane z wykorzystaniem systemu do pomiaru właściwości magnetycznych REMACOMP® C-200 firmy Magnet-Physik – Dr. Steingroever GmbH. System pomiarowy pozwala na wykonywanie pomiarów zgodnie ze standardami IEC 60404, tj. dla sinusoidalnego przebiegu indukcji magnetycznej w próbce [20, 21]. Układ umożliwia pracę w dwóch trybach:

przy założeniu sinusoidalnego przebiegu natężenia pola magnetycznego lub też – indukcji magnetycznej. Pomiary zrealizowano w trybie pierwszym, wymuszając natężenie pola magnetycznego o amplitudzie 2500 A/m. Częstotliwość przemagnesowywania próbek zmieniano w fazie wstępnej w zakresie od 10 Hz do 50 Hz (z krokiem 10 Hz). Pomiary wykonano na próbkach toroidalnych stanowiących rdzeń magnetyczny (przyjęto średnicę wewnętrzną próbki 50 mm oraz średnicę zewnętrzną 75 mm). Na każdej próbce nawinięto dwa uzwojenia: pierwotne (magnesujące) i wtórne (pomiarowe). Uzwojenie wtórne, na zaciskach którego jest mierzona wyindukowana siła elektromotoryczna, jest uzwojeniem wewnętrznym, zaś uzwojenie pierwotne, przez które przepływa prąd wytwarzający pole magnetyczne – uzwojeniem zewnętrznym. Wszystkie próbki zostały uzwojone w jednakowy sposób. Uzwojenia wtórne o liczbie zwojów 101 zostały nawinięte jednowarstwowo przewodem miedzianym o średnicy 0,2 mm. Zwoje zostały rozłożone równomiernie wzdłuż całego pierścienia. Uzwojenia pierwotne posiadają również liczbę zwojów 101 i zostały nawinięte w identyczny sposób przewodem o średnicy 0,4 mm. Liczby zwojów i średnice przewodów zostały dobrane eksperymentalnie.

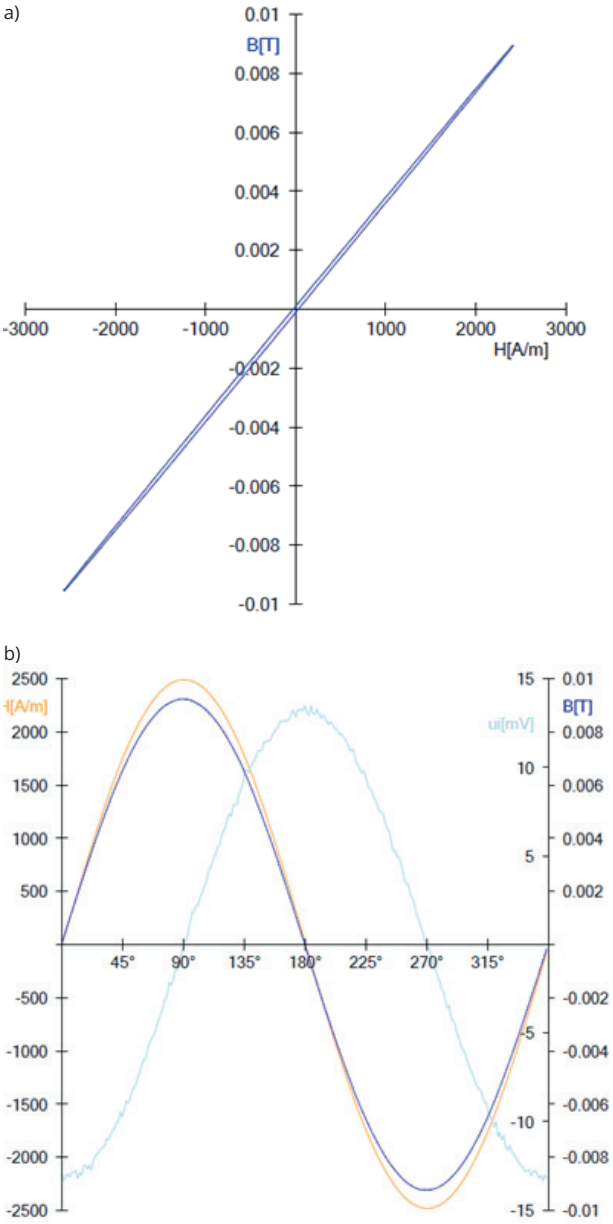
Rys. 2. Struktura próbki a) magnetoreologiczna membrana w kształcie toroidalnym, stanowiąca rdzeń magnetyczny, umieszczona na karkasie o grubości 1 mm, b) próbka z nawiniętym uzwojeniem wtórnym, c) próbka z nawiniętym uzwojeniem pierwotnym

Wykonano 3 serie próbek. Każda seria obejmuje 12 próbek (o identycznych wymiarach geometrycznych i tej samej grubości 3 mm), różniących się między sobą zawartością proszku ferromagnetycznego. Badane stosunki masowe próbek to: 0,25:1; 0,5:1; 0,75:1; 1:1; 1,25:1; 1,5:1; 1,75:1; 2:1; 2,25:1; 2,5:1; 2,75:1; 3:1. Całkowita liczba próbek badanych systemem REMACOMP® C-200 wyniosła więc 36. Należy zwrócić uwagę, że wraz ze wzrostem stosunku masowego, wzrastają masy próbek. Wszystkie próbki przed wykonaniem pomiarów były więc ważone.

Analiza wyników pomiarowych

Na początku rozważmy uzyskane wyniki pomiarowe na podstawie jednej wybranej próbki (rys. 3). Jest to próbka o proporcji masowej 1:1 badana przy częstotliwości 50 Hz. Rysunek 3a prezentuje charakterystykę magnesowania w postaci pętli histerezy, zaś na rysunku 3b są pokazane: przebieg natężenia pola magnetycznego, stanowiącego wymuszenie (kolor pomarańczowym) oraz przebieg indukcji pola magnetycznego, będący odpowiedzią na wymuszenie (kolor zielony). Należy zwrócić uwagę, że oba przebiegi są prawie sinusoidalne, co jest uwarunkowane praktycznie liniową zależnością B (H).

Jak widać na rysunku 3, charakterystyka magnesowania próbki jest bardzo wąską pętlą histerezy. Tym niemniej postanowiono pokazać pętle dla wszystkich próbek o różnym stosunku masowym, jak też uwidocznić wpływ częstotliwości na kształt zdjętych pętli.



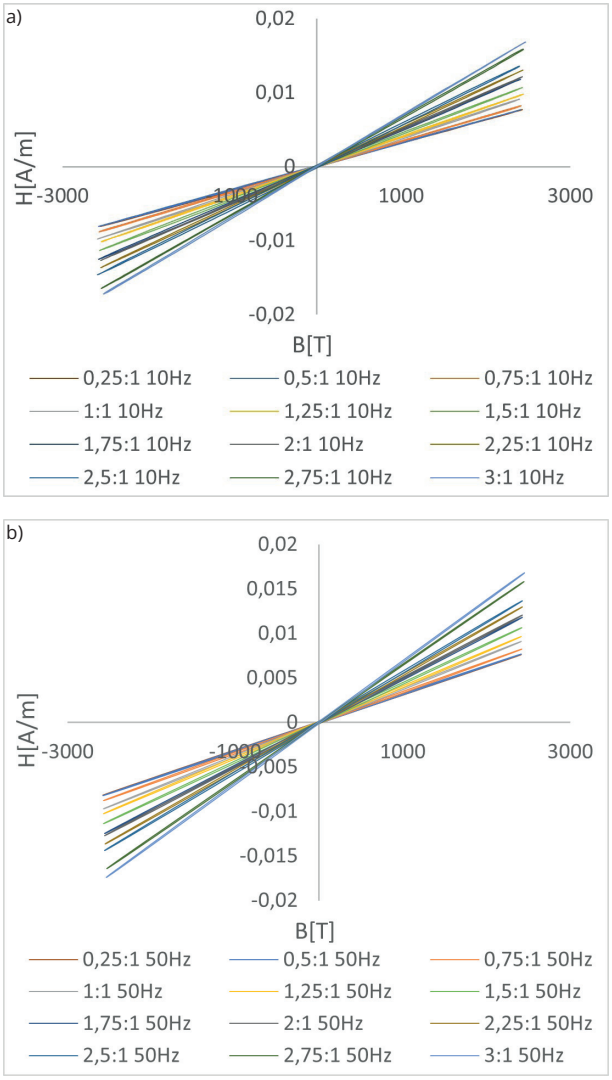
Rys. 3. Wyniki badań właściwości magnetycznych przy użyciu systemu REMACOMP® C-200 dla próbki o proporcji masowej 1:1 przy częstotliwości zasilania 50 Hz a) pętla histerezy magnetycznej b) przebiegi czasowe natężenia pola magnetycznego, indukcji magnetycznej oraz napięcia przyłożonego na zaciski uzwojenia pierwotnego

Zdjęte pętle histerezy dla próbek o wszystkich badanych stosunkach masowych zestawiono razem na rysunkach sporządzonych oddzielnie dla dwóch skrajnych częstotliwości: 10 Hz (rys. 4a) i 50 Hz (rys. 4b). Jak widać, różnice te są bardzo nieznaczne (co potwierdzają też dalsze zestawienia liczbowe, zawarte w Tabeli1).

Pętle histerezy są tak ekstremalnie wąskie, a ich przebiegi tak silnie zbliżone do linii prostej, że można mówić z wysokim stopniem dokładności o nachyleniu pętli histerezy względem osi odciętych. Tangens tego kąta jest równy bezwzględnej wartości przenikalności magnetycznej:

(1) $$\mu_r \cdot \mu_o = B/H$$

gdzie:
μ_o – wartość przenikalności magnetycznej próżni (10^{-7}),
μ_r – względna wartość przenikalności magnetycznej próbki.



Rys. 4. Pętle histerezy dla badanych próbek o różnych stosunkach masowych przy dwóch skrajnych częstotliwościach a) częstotliwość 10 Hz, b) częstotliwość 50 Hz

Względne wartości przenikalności próbek, wyznaczone na podstawie wzoru (1) w zależności od ich stosunku masowego i częstotliwości, zestawiono w Tabeli 1.

Tab. 1. Zależność względnej przenikalności magnetycznej od stosunku masowego przy częstotliwości 10 Hz i 50 Hz

Stosunek masowy	Względna przenikalność magnetyczna przy częstotliwości 10 Hz	Względna przenikalność magnetyczna przy częstotliwości 50 Hz	Masa próbki [g]
0, 25:1	2, 51	2, 51	9, 73
0, 5:1	2, 61	2, 53	10, 48
0, 75:1	2, 71	2, 72	11, 76
1:1	3, 01	3, 00	13, 97
1, 25:1	3, 18	3, 17	15, 49
1, 5:1	3, 52	3, 51	18, 23
1, 75:1	3, 89	3, 88	20, 73
2:1	3, 97	3, 96	20, 99
2, 25:1	4, 26	4, 26	22, 88
2, 5:1	4, 49	4, 47	23, 96
2, 75:1	5, 15	5, 14	26, 72
3:1	5, 43	5, 45	27, 89

Na podstawie Tab.1. sporządzono rysunek 5, przedstawiający względną przenikalność magnetyczną w funkcji stosunku masowego dla wszystkich badanych próbek dla częstotliwości 10 Hz i 50 Hz. Na rysunku tym pokazano również wykres masy próbek w zależności od ich stosunku masowego.

Jak wynika z Tabeli 1 i rysunku 5, zwiększenie zawartości proszku ferromagnetycznego od proporcji masowej 0,25:1 do wartości 3:1 spowodowało 2,16-krotny wzrost względnej przenikalności magnetycznej. Przeprowadzone badania w pełni potwierdzają przewidywania, że im wyższa zawartość proszku ferromagnetycznego w silikonie, tym wyższa względna przenikalność magnetyczna membrany magnetoreolo-

Rys. 5. Charakterystyka względnej przenikalności magnetycznej w funkcji stosunku masowego przy częstotliwości 10 Hz i 50 Hz oraz charakterystyka mas badanych próbek w funkcji stosunku masowego

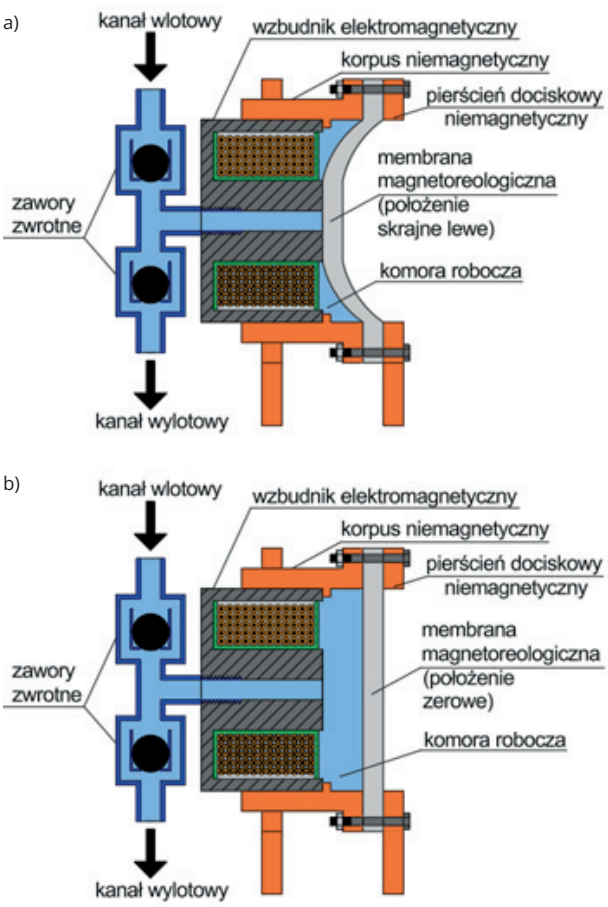
gicznej. Wraz ze wzrostem zawartości proszku wartości względnej przenikalności magnetycznej wzrastają od wartości 2,51 do 5,43.

Wzrostowi zawartości proszku ferromagnetycznego towarzyszy też wzrost masy próbek. Przy wzroście proporcji wagowej od 0,25:1 do 3:1 nastąpiło 2,87-krotne zwiększenie masy próbki.

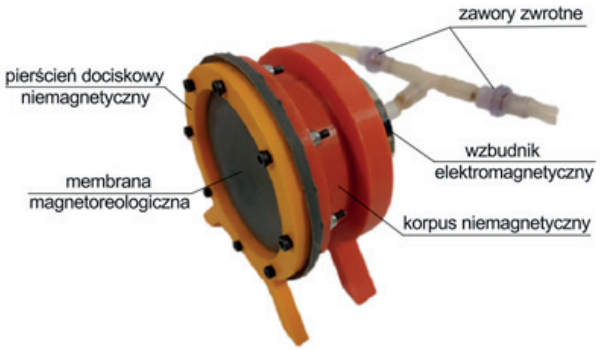
Wpływ przenikalności magnetycznej membrany magnetoreologicznej na rozkład pola magnetycznego i siłę reluktancyjną w przetworniku elektromechanicznym na przykładzie membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną

Schemat ideowy 1-komorowej membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną oraz zdjęcie zbudowanego prototypu przedstawiono odpowiednio na rysunku 6 oraz rysunku 7.

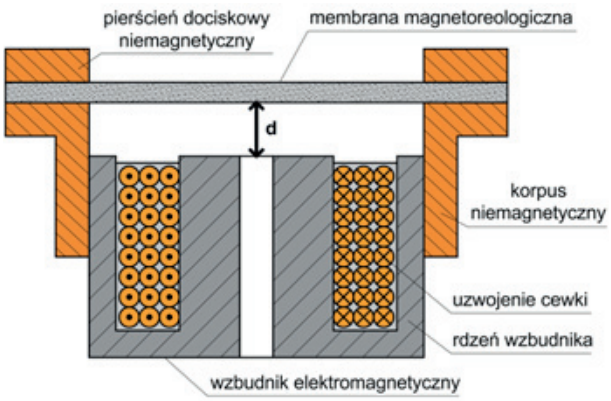
Zasadniczą część pompy stanowi cylindryczny wzbudnik elektromagnetyczny z membraną magnetoreologiczną, którego przekrój przedstawiono w powiększonej skali na rysunku 8. Membrana magnetoreologiczna mocowana jest na wzbudniku za pomocą niemagnetycznego korpusu i niemagnetycznego pierścienia dociskowego wykonanego z filamentu PLA. Odległość membrany od powierzchni czołowej wzbudnika jest oznaczona przez *d* (w prowadzonych badaniach jest to parametr zmienny).



Rys. 6. Schemat ideowy 1-komorowej membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną, a) położenie skrajne lewe membrany b) położenie zerowe membrany



Rys. 7. Zdjęcie prototypu 1-komorowej pompy elektromagnetycznej z fragmentem instalacji hydraulicznej



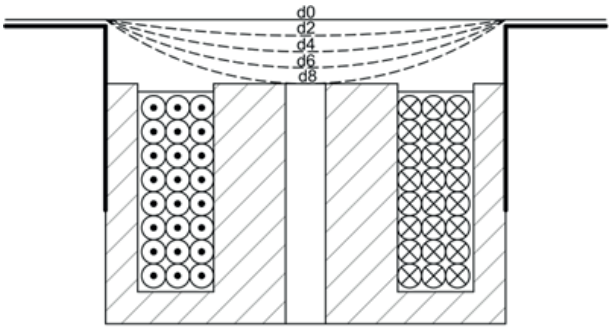
Rys. 8. Przekrój poprzeczny wzbudnika elektromagnetycznego z uwidocznionym sposobem mocowania membrany magnetoreologicznej

Rozkład pola elektromagnetycznego we wzbudniku elektromagnetycznym, jak też wartości sił działających na membranę magnetoreologiczną, wyznaczono metodą elementów skończonych w programie FEMM 4.2. Postanowiono rozważyć dwa przypadki.

W pierwszym przypadku, zbliżonym do rzeczywistości, zakłada się, że pod wpływem działającej siły reluktancyjnej membrana ulega ugięciu. Na obecnym etapie badań, przy braku danych mechanicznych membran, kształty ugiętej membrany zostały umownie przyjęte i wygenerowane przy wykorzystaniu funkcji „arc segment" programu FEMM 4.2 (rys. 9). Stopień ugięcia membrany jest opisany parametrem d. Parametr d to odległość pomiędzy punktem środkowym membrany nieugiętej, a punktem środkowym memb-

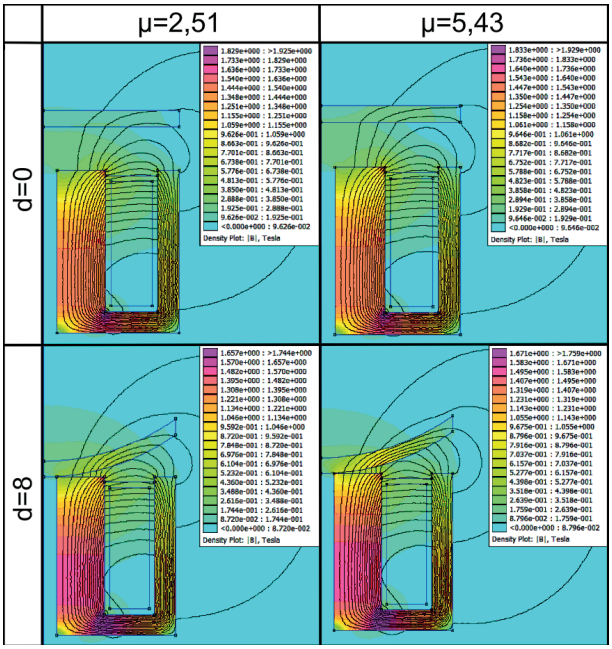
rany wygiętej. Przyjęto stopnie ugięcia od d0 do d8 czyli od 0 mm do 8 mm, co 1 mm.

Membrana magnetoreologiczna ugina się pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego cewki wzbudzenia (zasilanej prądem I) na membranę magnetoreologiczną, która posiada właściwości magnetyczne dzięki obecności proszku ferromagnetycznego. Jest to siła o naturze reluktancyjnym.



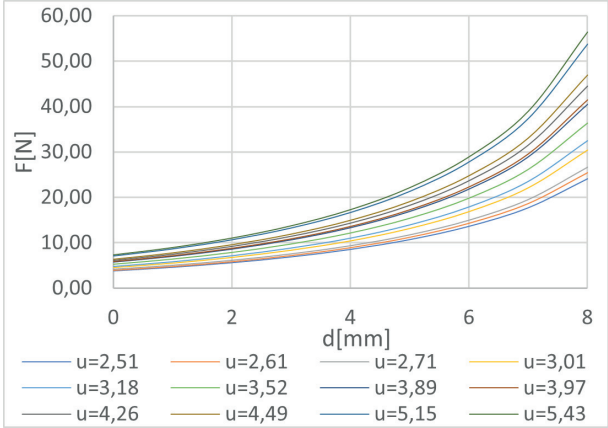
Rys. 9. Rozpatrywane, umownie przyjęte kształty wygiętej membrany magnetoreologicznej (wygenerowane przez funkcję „arc segment" programu FEMM 4.2)

Uzyskane rozkłady pól magnetycznych dla skrajnych przypadków zawartości proszku ferromagnetycznego, związanych z wartościami przenikalności magnetycznej: μ = 2,51 (stosunek masowy 0,25:1) oraz μ = 5,43 (stosunek masowy 3:1) przedstawiono na rysunku 10 dla dwóch skrajnych położeń membrany: membrana nieugięta (d = 0) oraz membrana maksymalnie ugięta (d = 8).



Rys. 10. Rozkłady przestrzenne pól magnetycznych w elektromagnetycznej pompie z membraną magnetoreologiczną o przenikalności μ = 2, 51 oraz μ = 5, 43, dla membrany nieugiętej (d = 0 mm) oraz membrany maksymalnie ugiętej (d = 8 mm)

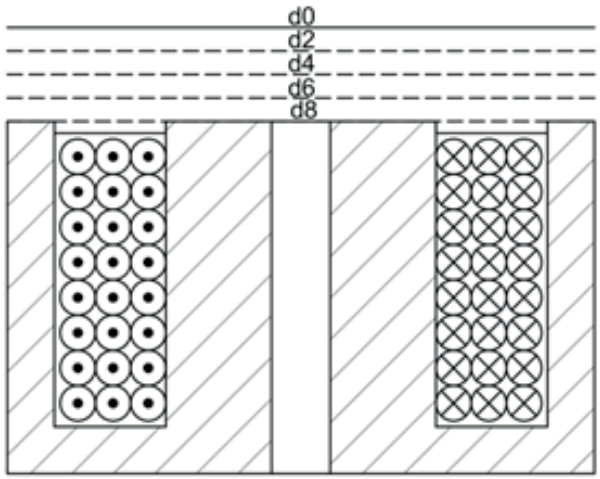
To, jak zmiana przenikalności magnetycznej wpływa na zmianę siły reluktancyjnej przy różnych ugięciach membrany pokazuje rysunek 11.



Rys. 11. Wykresy sił reluktancyjnych w funkcji ugięcia membrany magnetoreologicznej dla elektromagnetycznej pompy z membranami o różnych przenikalnościach elektromagnetycznych

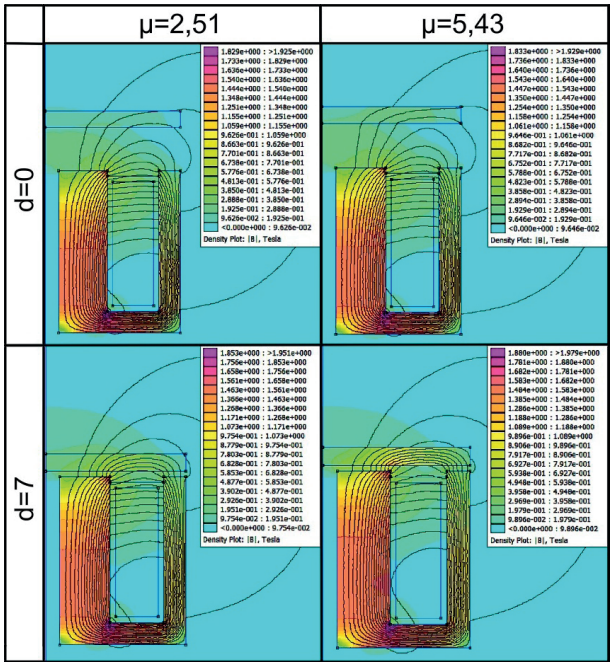
Przy położeniu spoczynkowym membrany (d = 0) zmiana przenikalności magnetycznej z wartości 2,51 do wartości 5,43 zmienia wartość siły reluktancyjnej z 3,77 N do 7,28 N. Siła wzrasta więc 1,93 krotnie. Przy zmianie położenia membrany z spoczynkowego (d = 0) do maksymalnego ugięcia (d = 8) oraz dla przenikalności magnetycznej równej 5,43 wartość siły reluktancyjnej zmienia się z 7,28 N, aż do 56,47 N. Siła wzrasta więc 7,76 krotnie.

Jak wspomniano wcześniej, postanowiono też rozpatrzyć drugi prostszy przypadek zakładając, że membrana nie wygina się, ale przesuwa równolegle do powierzchni wzbudnika. W przypadku tym odległość membrany od wzbudnika jest również scharakteryzowana przez parametr d (przyjęto stopnie przesunięcia membrany od *d0* do *d8* czyli od 0 mm do 8 mm, co 1 mm) tak, jak to pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Rozpatrywane położenia membrany magnetoreologicznej dla uproszczonego przypadku zakładającego, że membrana megnetoreologiczna przesuwa się równolegle do powierzchni wzbudnika

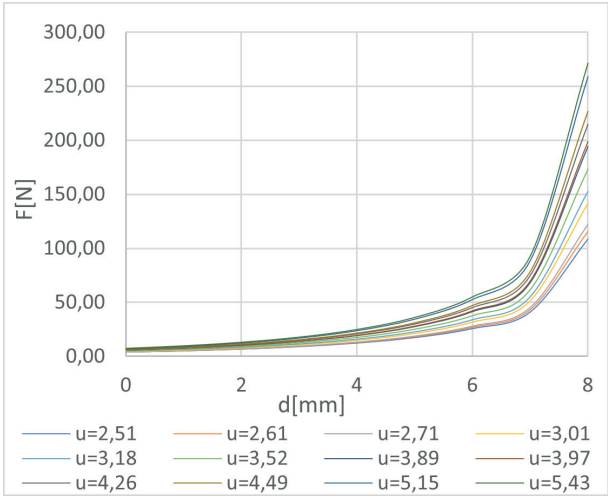
Uzyskane rozkłady pól magnetycznych dla skrajnych przypadków zawartości proszku ferromagnetycznego, związanych z wartościami przenikalności magnetycznej: $\mu = 2{,}51$ (stosunek masowy 0,25:1) oraz $\mu = 5{,}43$ (stosunek masowy 3:1) przedstawiono na rysunku 13 dla dwóch skrajnych położeń membrany: membrana nieprzesunięta ($d = 0$) oraz membrana silnie zbliżona do powierzchni czołowej wzbudnika ($d = 7$).



Rys. 13. Rozkłady przestrzenne pól magnetycznych w elektromagnetycznej pompie z membraną magnetoreologiczną o przenikalności $\mu = 2{,}51$ oraz $\mu = 5{,}43$, dla membrany przesuwającej się równolegle do powierzchni wzbudnika dla $d = 0$ mm oraz $d = 7$ mm (przypadek uproszczony)

Wykresy, ilustrujące przebieg siły w zależności od przesunięcia membrany (które sporządzono w identyczny sposób, jak w przypadku pierwszym), są przedstawione na rysunku 14.

Wartości siły reluktancyjnej działającej na membranę magnetoreologiczną w tym drugim przypadku są około 4-krotnie wyższe, niż w przypadku pierwszym. Spowodowane jest to tym, że w przypadku pierwszym (rys. 8) strumień magnetyczny musi zawsze przejść przez niemagnetyczny korpus (o przenikalności względnej $\mu = 1$), łączący wzbudnik elektromagnetyczny z punktami zamocowania membrany magnetoreologicznej. Istotnym wnioskiem dla doskonalenia konstrukcji pompy magnetoreologicznej jest więc to, że korpus łączący wzbudnik z membraną magnetoreologiczną powinien być wykonany z materiału magnetycznego. Przy budowie nowego prototypu autorzy planują wykonanie korpusu ze stali magnetycznej (powiększy to jednak ciężar pompy) oraz z magnetycznego filamentu (charakteryzującego się względną przenikalnością około $\mu = 5$). Analiza wyników z rysunków 11 i 14 wskazuje również na celowość uwzględniania rzeczywistego kształtu ugiętej membrany. Oznacza to, że przy projektowaniu przetworników elektromechanicznych z membranami magnetoreologicznymi konieczna jest znajomość zarówno parametrów mechanicznych, jak i magnetycznych membrany, a obliczanie rozkładów przestrzennych pól magnetycznych powinno być skorelowane z obliczeniami naprężeń mechanicznych, decydujących o kształcie ugiętej membrany.



Rys. 14. Wykresy sił reluktancyjnych w funkcji przesunięcia membrany magnetoreologicznej dla elektromagnetycznej pompy z membranami o różnych przenikalnościach elektromagnetycznych (przypadek uproszczony)

Podsumowanie

Przeprowadzono badania szerokiej gamy próbek membran magnetoreologicznych o różnym stosunku masowym czyli o różnym stosunku masy proszku ferromagnetycznego, stanowiącego masę zdyspergowaną do masy silikonu, będącego matrycą. Dla wszystkich próbek wykonano pomiary pętli histerezy magnetycznej oraz wyznaczono zależność względnej przenikalności magnetycznej od ilości zawartego proszku ferromagnetycznego. Następnie na przykładzie zbudowanego prototypu elektromagnetycznej 1-komorowej pompy membranowej, w oparciu o obliczenia polowe zrealizowane w programie FEMM 4.2, przeanalizowano wpływ stosunku masowego membran magnetoreologicznych na rozkład przestrzenny pola magnetycznego oraz na wartość rozwijanej siły reluktancyjnej. Wyciągnięto wnioski dotyczące możliwości doskonalenia konstrukcji elektromagnetycznej pompy membranowej.

Przyjęto: 29.09.2025, **zaakceptowano:** 05.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Rabinow J., The magnetic fluid clutch, AIEE Transactions, 67 (1948), nr 2, 1308–1315.
[2] Hafeez M. A., Usman M., Umer M. A., Hanif A., Recent progress in isotropic magnetorheological elastomers and their properties: a review, Polymers, 12 (2020), nr 12, 292.
[3] Rigbi Z., Jilken L., The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 37 (1983), 267–276.
[4] Puente Córdova J. i in., Anisotropic and isotropic MREs based on PDMS, Polymers, 10 (2018), nr 12, 1343.
[5] Kang J., Sun S., Xu Z. i in., Recent advances in magnetorheological elastomers: materials, fabrication, and applications, Materials, 13 (2020), nr 20, 4597–4609.
[6] Liu Y., Review on magnetorheological elastomers: structure, modeling, and future trends, Advanced Engineering Materials, 25 (2023), nr 10, 2300182.
[7] Saber M. i in., Development and modeling of anisotropic MREs, Advanced Engineering Materials, 25 (2023), nr 10, 2300567.
[8] Snarskii A., Shamonin M., Percolation theory model of magnetorheological elastomers, arXiv, 2020; arXiv: 2002.11762.
[9] Gao F., Li Y., Zhang L., Yan H., Structural characteristics of MREs based on ethylene/acrylic elastomer, Micro Nano Lett., 13 (2018), nr 4, 466–470.
[10] Peng Y., Zhang Y., Li W. i in., 3D printing of MREs for next-generation smart devices, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2024.
[11] Perales Martínez I. E. i in., Hybrid MREs with micronano iron particles: enhanced properties, Polymers, 15 (2023), nr 18, 3703.
[12] Yao J., Gao Y., Electromagnetic diaphragm metering pump based on magnetorheological elastomer, patent CN 113007076A, 22 czerwca 2021.
[13] Kaleta J., Materiały magnetyczne SMART: budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
[14] Kiarie W., Gaunkar N. P., Jiles D. C., Barron E., Bartlett M. D., Finite element study on magnetomechanical properties of magnetorheological elastomer used in advanced mechanical systems, abstrakt z konferencji APS March Meeting, 4 marca 2019.
[15] MorenoMateos M. A., Hossain M., Steinmann P., GarciaGonzalez D., Hybrid magnetorheological elastomers enable versatile soft actuators, npj Computational Materials, 8 (2022), nr 1, 1–14.
[16] Sideris E. A., De Lange H. C., Pumps operated by solid-state electromechanical smart material actuators – a review, Sensors and Actuators A: Physical, 307 (2020), 111915.
[17] Tofilski P., Kluszczyński K., Koncepcja i budowa laboratoryjnego modelu pompy wyposażonej w elastyczną membranę ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego, Przegląd Elektrotechniczny, 8 (2024), nr 8, s. 115–119.
[18] Tofilski P., Kluszczyński K., Budowa i badania porównawcze różnych koncepcji membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym, Przegląd Elektrotechniczny, 101 (2025), nr 1, s. 270–275.
[19] Sołtys K. Bartel. S. Kluszczyński K., Laboratoryjna metoda wytwarzania proszków ferromagnetycznych i elastycznych materiałów magnetycznych oraz eksperymentalne badania ich zachowania w elektromagnetycznej komorze 3D, Przegląd Elektrotechniczny, R. 99, Nr 7, 2023, 169–175.
[20] IEC 60404–6:2018; Magnetic Materials. Part 6: Methods of Measurement of the Magnetic Properties of Magnetically Soft Metallic and Powder Materials at Frequencies in the Range 20 Hz to 100 kHz by the Use of Ring Specimens. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2018.
[21] Gryś Sł., Najgebauer M., An attempt of accuracy assessment of the hysteresis loop and power loss in magnetic materials during control measurements, Measurement, 174 (2021), 108962