

doi:10.15199/48.2025.01.58

## Budowa i badania porównawcze różnych koncepcji membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono cztery różne rozwiązania membranowej pompy elektromagnetycznej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym. Zbudowano ich prototypy, opisano budowę oraz omówiono zasady działania. Na opracowanym stanowisku laboratoryjnym z zewnętrzną instalacją hydrauliczną dokonano w sposób doświadczalny porównania wydajności pomp 1-komorowych i 2-komorowych, jak też wydajności pomp z magnesem trwałym oraz bez magnesu trwałego przy uwzględnieniu różnych częstotliwości zasilania pompy elektromagnetycznej.

**Abstract.** This paper presents four different solutions for a magnetorheological membrane electromagnetic pump with a permanent magnet. Their prototypes were built, construction described, and operating principles discussed. The performance of the 1-chamber and 2-chamber pumps, as well as the performance of the pumps with and without permanent magnets are compared experimentally on a laboratory stand with external hydraulics installation, taking also into account the different supply frequencies of the electromagnetic pump (**Construction and comparative studies of different concepts of an electromagnetic diaphragm pump with a magnetorheological diaphragm and a permanent magnet**).

**Słowa kluczowe:** pompa membranowa, pompa z elastyczną membraną magnetoreologiczną, technologia wykonania membrany magnetoreologicznej, druk 3D.

**Keywords:** membrane pump, flexible magnetorheological membrane pump, magnetorheological membrane fabrication, 3D printing technology.

### Wstęp

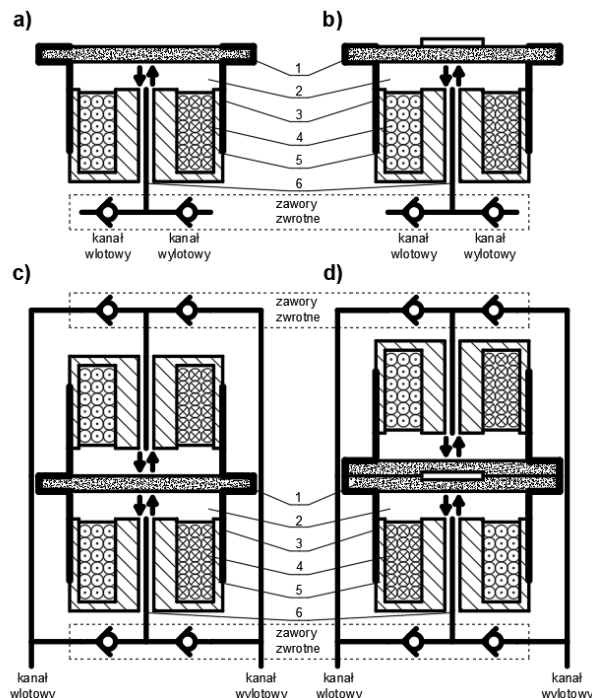
Pompy są urządzeniami wykorzystywanymi przez człowieka od czasów starożytnych. Różnią się budową i zasadą działania. Na przestrzeni dziejów ich konstrukcje były systematycznie rozwijane i doskonalone. Istotne znaczenie dla ich dynamicznego rozwoju miało wynalezienie maszyny parowej, silnika elektrycznego oraz silnika spalinowego [1, 2]. Jednym z popularnych rozwiązań konstrukcyjnych są pompy membranowe, nazywane też pompami przeponowymi. Membrana może być w nich napędzana w sposób mechaniczny przy wykorzystaniu wyżej wymienionych silników [3, 4]. W ostatnim okresie pojawiły się doniesienia o pompach membranowych napędzanych bezpośrednio w sposób pneumatyczny lub elektromagnetyczny [5, 6]. Odnosnie do pomp elektromagnetycznych, to w dostępnych opisach patentowych są proponowane pompy z membraną magnetoreologiczną napędzaną za pomocą wzbudników elektromagnetycznych, bądź też pompy z membraną zwykłą (niemagnetyczną) wyposażoną w magnes trwały lub magnesy trwałe, również wprawiane w ruch za pomocą wzbudników elektromagnetycznych [7, 8]. W literaturze technicznej brak jest jednak bliższych informacji o badaniach właściwości eksploatacyjnych takich pomp.

Celem niniejszego artykułu jest porównanie budowy i zasad działania różnych rozwiązań pomp z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym oraz doświadczalne porównanie ich wydajności. Dla skuteczności działania takich pomp istotne znaczenie ma membrana magnetoreologiczna, jej właściwości mechaniczne i magnetyczne oraz wymiary geometryczne [9 - 15]. W zbudowanych prototypach autorzy wykorzystali membrany magnetoreologiczne, które zostały wytworzone w laboratorium uczelnianym według własnej technologii, opisaniej w [16, 17].

### Opólna charakterystyka poszczególnych koncepcji membranowej pompy elektromagnetycznej

W artykule rozważono cztery koncepcje membranowej pompy elektromagnetycznej, które są przedstawione na rys. 1. Są to: elektromagnetyczna pompa 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego, elektromagnetyczna pompa 1-komorowa z membraną

magnetoreologiczną i magnesem trwałym umieszczonym w jej części środkowej, elektromagnetyczna pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego oraz elektromagnetyczna pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym w jej części środkowej.



Rys. 1. Cztery różne koncepcje budowy pompy elektromagnetycznej a) 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego b) 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym umieszczonym w jej części środkowej c) 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego d) 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym w jej części środkowej, gdzie: 1 - membrana magnetoreologiczna, 2 - komora robocza, 3 - korpus, 4 - cewka wzbudnika, 5 - rdzeń wzbudnika, 6 - kanał wewnętrzny

Według przedstawionych powyżej koncepcji zbudowano cztery różne prototypy pomp elektromagnetycznych. W ich budowie wykorzystano te same wzbudniki elektromagnetyczne i takie same membrany magnetoreologiczne. Prototypy różnią się tylko elementami obudowy mechanicznej i zasadą działania. Wykonane prototypy zostały zainstalowane na stanowisku badawczym, umożliwiającym określenie ich podstawowych właściwości eksploatacyjnych.

Należy zwrócić uwagę na następujące istotne cechy różniące budowę i działanie poszczególnych prototypów:

- w pompie 1-komorowej (rys.1a, b) ciecz robocza jest zasysana do komory roboczej poprzez kanał wlotowy wyposażony w zawór zwrotny (jest to tak zwana faza zasysania), a następnie wyrzucana z komory roboczej poprzez kanał wylotowy, który również jest wyposażony w zawór zwrotny (jest to tak zwana faza wyrzutowa). Konsekwencją jest to, że strumień cieczy roboczej wypływający z pompy nie jest ciągły. Ciecz robocza wypychana jest z pompy jedynie w fazie wyrzutowej,

- w pompie 2-komorowej (rys.1c, d) w każdej z komór roboczych faza zasysania oraz faza wyrzutowa nakładają się na siebie. W przedziale czasu, w którym pierwsza komora zasysa ciecz roboczą poprzez kanał wlotowy, ciecz robocza z drugiej komory jest wyrzucana z pompy poprzez kanał wylotowy. Konsekwencją jest to, że strumień cieczy roboczej, wypływający z pompy jest ciągły: przez zawór wylotowy płynie naprzemiennie ciecz robocza wypychana albo z jednej, albo z drugiej komory pompy,

- w pompie 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego (rys.1a) membrana magnetoreologiczna jest przyciągana do wzbudnika pod wpływem działania pola magnetycznego wytworzonego przez prąd płynący w wzbudniku. Powrót membrany do pozycji spoczynkowej (przy wyłączonym wzbudniku elektromagnetycznym) jest skutkiem działania siły sprężystości membrany,

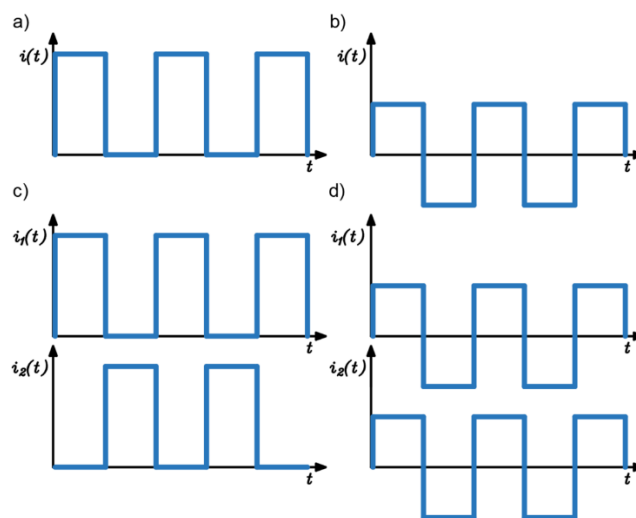
- w pompie 2-komorowej bez magnesu trwałego (rys.1c) membrana magnetoreologiczna jest wprawdzie przyciągana do pierwszego wzbudnika przez pole magnetyczne wytworzone przez prąd wzbudzenia płynący przez pierwszy wzbudnik, a następnie (po wyłączeniu prądu wzbudzenia w pierwszym wzbudniku) jest przyciągana do drugiego wzbudnika (aż do osiągnięcia kolejnego położenia skrajnego) przez pole magnetyczne wytworzone przez prąd wzbudzenia płynący przez drugi wzbudnik. Siła sprężystości membrany naprzemiennie albo wspomaga ten ruch, albo mu się przeciwstawia,

- w pompie 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i z magnesem trwałym umiejscowionym w części środkowej (rys.1b), membrana magnetoreologiczna jest przyciągana do wzbudnika przez siłę działającą pomiędzy magnesem trwałym, a zasilanym wzbudnikiem elektromagnetycznym. Przez wzbudnik przyciągana jest również sama membrana magnetoreologiczna, ale wartość tej siły (mającej charakter siły reluktancyjnej) jest kilkakrotnie mniejsza od siły pochodzącej od magnesu trwałego. Membrana magnetoreologiczna powraca do pozycji spoczynkowej po zmianie kierunku przepływu prądu przez cewkę wzbudnika, ponieważ zmiana kierunku przepływu prądu powoduje powstanie siły elektromagnetycznej, która odpycha magnes trwały. Działanie tej siły jest dodatkowo wspomagane siłą sprężystości membrany,

- w pompie 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i z magnesem trwałym umiejscowionym w jej części środkowej (rys.1d), membrana magnetoreologiczna jest przyciągana do pierwszego wzbudnika przez siłę działającą pomiędzy magnesem trwałym, a zasilanym pierwszym wzbudnikiem

elektromagnetycznym oraz jest równocześnie odpychana przez siłę, działającą pomiędzy drugim wzbudnikiem elektromagnetycznym (zamontowanym w pozycji odwróconej) i magnesem trwałym. Membrana magnetoreologiczna zaczyna przemieszczać się do kolejnego położenia skrajnego po dokonaniu równoczesnej zmiany kierunku przepływu prądu w obu wzbudnikach elektromagnetycznych. Siła sprężystości membrany naprzemiennie albo wspomaga ten ruch, albo mu się przeciwstawia.

Przebiegi okresowych prądów zmiennych lub przemiennych, zasilających pojedynczą cewkę w przypadku pomp 1-komorowych lub dwie cewki w przypadku pomp 2-komorowych, są przedstawione (dla wszystkich czterech koncepcji pomp elektromagnetycznych z rys.1) na rys.2. Należy zwrócić uwagę, że przebiegi prądów zasilających cewki wzbudników elektromagnetycznych w pompie z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym mają taki sam kierunek, ale wytworzone przez nich pola magnetyczne mają kierunek przeciwny ze względu na to, że wzbudnik drugi jest ułożony odwrótnie w stosunku do wzbudnika pierwszego. Amplitudy prądów w przypadku pomp elektromagnetycznych z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym są kilkakrotnie mniejsze, niż w przypadku pomp elektromagnetycznych z membraną magnetoreologiczną i bez magnesów trwałych.

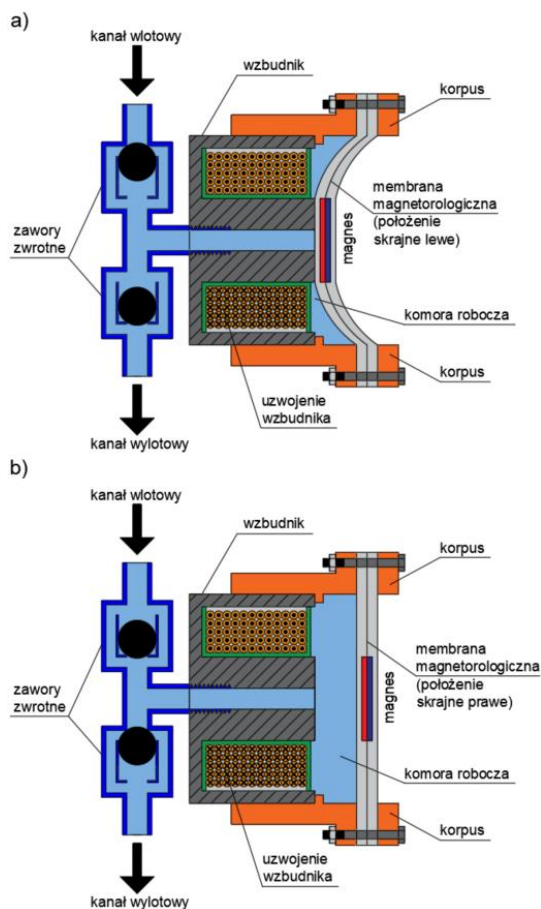


Rys.2. Sposób zasilania cewki (cewek) dla czterech koncepcji pompy elektromagnetycznej a) przebieg okresowego prądu zmiennego  $i(t)$  zasilającego cewkę pojedynczego wzbudnika w pompie 1-komorowej bez magnesu trwałego b) przebiegi okresowych prądów przemiennych  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  zasilających cewki pary wzbudników w pompie 2-komorowej bez magnesu trwałego c) przebieg okresowego prądu zmiennego  $i_1(t)$  zasilającego cewkę pojedynczego wzbudnika w pompie 1-komorowej z magnesem trwałym d) przebiegi okresowych prądów przemiennych  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  zasilających cewki pary wzbudników w pompie 2-komorowej z magnesem trwałym

Jak wspomniano, w przypadku umiejscowienia magnesu trwałego w części środkowej membrany, siły elektromagnetyczne pochodzące od współdziałania magnesu trwałego ze wzbudnikami elektromagnetycznymi są kilkakrotnie większe od sił reluktancyjnych, działających pomiędzy wzbudnikami elektromagnetycznymi, a membraną magnetoreologiczną. Na skutek tego jest możliwe znaczące zmniejszenie prądu cewki (cewek) wzbudzenia.

## Charakterystyka budowy i opis zasady działania elektromagnetycznej pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym

Budowa elektromagnetycznej pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym w jej części środkowej jest przedstawiona na rys.2.



Rys.3. Rysunek poglądowy elektromagnetycznej pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym umieszczonym w jej części środkowej

W jej skład wchodzi:

- wzbudnik elektromagnetyczny o kształcie cylindrycznym. Przekrój poprzeczny rdzenia stalowego przypomina wyglądem dużą literę „E”. Cewka wzbudzenia jest nawinięta wokół rdzenia wewnętrznego. Rdzeń wewnętrzny wzbudnika jest przewiercony, a powstały w ten sposób kanał łączy komorę roboczą z zewnętrzną instalacją hydrauliczną,
- korpus o kształcie cylindrycznym (wykonany z filamentu PLA w technologii druku 3D), który jest nasunięty na wzbudnik elektromagnetyczny,
- elastyczna okrągła membrana magnetoreologiczna, zamocowana na cylindrycznym korpusie w sposób przedstawiony na rys.2,
- magnes trwały, umiejscowiony na stałe we wnętrzu membrany,
- zewnętrzna instalacja hydrauliczna, która zawiera dwa zawory zwrotne, stanowiące kanał wlotowy i kanał wylotowy pompy.

Komorę roboczą 1-komorowej pompy o kształcie walca jest ograniczona przez membraną magnetoreologiczną, powierzchnię czołową wzbudnika oraz powierzchnię wewnętrzną korpusu pompy. Metalowe powierzchnie, ograniczające komorę roboczą, muszą być zabezpieczone

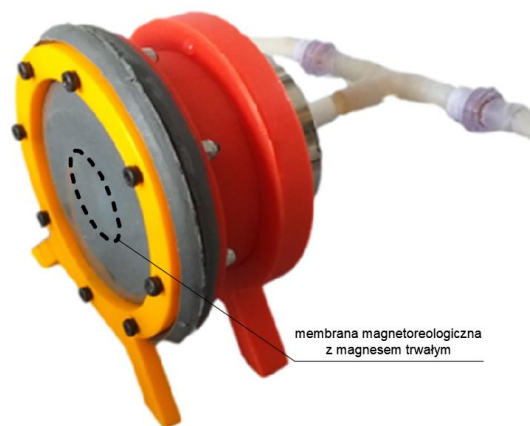
przed korozją. Jak wspomniano, komora robocza jest połączona z zewnętrzną instalacją hydrauliczną za pośrednictwem kanału roboczego.

Po wzbudzeniu cewki strumień magnetyczny, wytwarzany przez cewkę wzbudzenia oraz magnes trwały, zamyka się poprzez rdzeń wewnętrzny wzbudnika elektromagnetycznego, komorę roboczą, membraną magnetoreologiczną (wyposażoną w magnes trwały), korpus pompy oraz zewnętrzną część rdzenia wzbudnika elektromagnetycznego. Pomoczą magnesu trwałego, a cewką wzbudnika elektromagnetycznego zasilaną prądem przemiennym okresowym o przebiegu prostokątnym (rys.2b), powstaje siła elektromagnetyczna, która w zależności od kierunku przepływu prądu jest na przemian siłą przyciągającą lub odpychającą magnes trwały. W przedziałach czasu, w których membrana jest przyciągana do powierzchni czołowej wzbudnika elektromagnetycznego, objętość komory roboczej maleje, a ciecz znajdująca się w komorze roboczej jest wyrzucana na zewnątrz (jest to faza wyrzutowa cyklu pracy pompy). W chwili, w której membrana jest całkowicie przyciągnięta do powierzchni czołowej wzbudnika pompy, objętość komory roboczej jest równa 0. W przedziałach czasu, w których membrana jest odpychana od powierzchni czołowej wzbudnika elektromagnetycznego, objętość komory roboczej wzrasta, a ciecz jest zasysana do wnętrza komory roboczej ze zbiornika zewnętrznego poprzez kanał wlotowy (jest to faza zasysania cyklu pracy pompy). W chwili, w której membrana znajduje się w pozycji neutralnej (rys.1b), następuje zmiana kierunku przepływu prądu w cewce wzbudzenia wzbudnika elektromagnetycznego (rys.2b).

Poprzez zmianę częstotliwości okresowego prądu przemiennego o przebiegu prostokątnym (zasilającego cewkę wzbudnika elektromagnetycznego) można sterować natężeniem przepływu cieczy. Amplituda przebiegów prostokątnych jest tak dobrana, aby następowało jak najpełniejsze przyciągnięcie membrany magnetoreologicznej do powierzchni wzbudnika oraz całkowite opróżnienie komory roboczej.

Elektromagnetyczna pompa 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego przedstawiona na rys.1a różni się od pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym (rys.1b) tylko tym, że nie posiada magnesu trwałego. Pompa ta jest jednak inaczej zasilana i sterowana. Przebieg prądu zasilającego cewkę wzbudnika pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego jest przedstawiona na rys.2a.

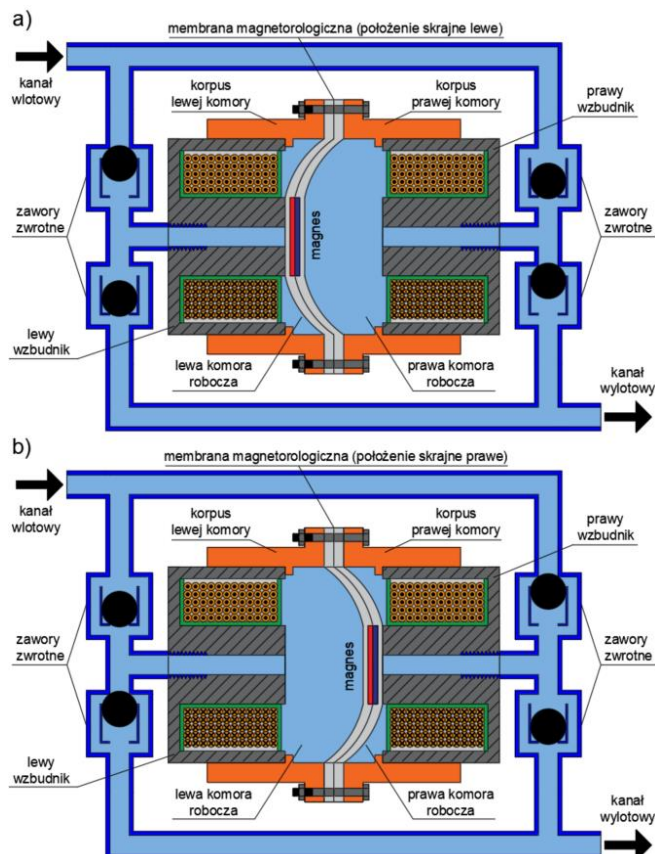
Zdjęcie pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym jest przedstawione na rys.4.



Rys.4. Pompa 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym (zdjęcie)

### Charakterystyka budowy i opis zasady działania elektromagnetycznej pompy 2-komorowej membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym

Rozwinięciem konstrukcji pompy 1-komorowej jest pompa 2-komorowa. Powstaje ona poprzez odpowiednie konstrukcyjne zintegrowanie pompy 1-komorowej z drugą pompą 1-komorową, ułożoną w pozycji odwrotnej (a więc w układzie odbicia zwierciadlanego). Budowa elektromagnetycznej pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym w jej części środkowej jest przedstawiona na rys.3.



Rys.5. Rysunek poglądowy elektromagnetycznej pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym w jej części środkowej

W jej skład wchodzi:

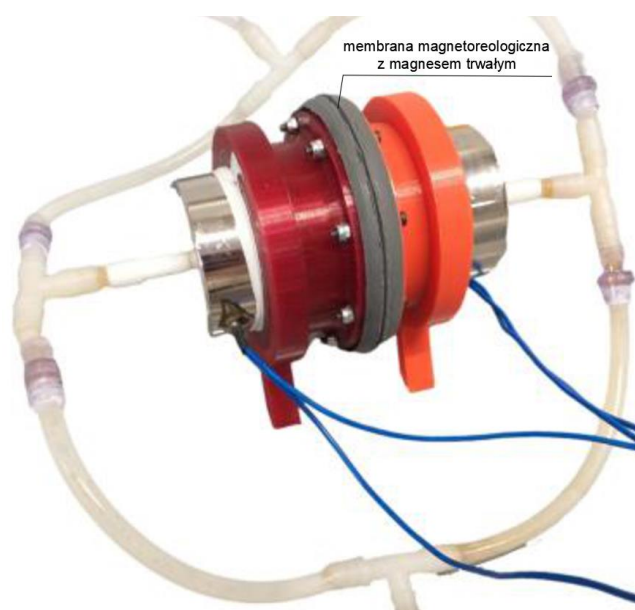
- dwa jednakowe wzbudniki elektromagnetyczne o kształcie cylindrycznym, które są umiejscowione naprzeciw siebie, przy czym wzbudnik drugi jest odwrócony w stosunku do wzbudnika pierwszego (jak widać na rys.3, rdzenie wewnętrzne obu wzbudników są przewiercone),
- dwa jednakowe korpusy o kształcie cylindrycznym, które są ze sobą zestawione i połączone tak, jak pokazano na rys.3,
- elastyczna okrągła membrana magnetoreologiczna zamocowana pomiędzy cylindrycznymi korpusami,
- magnes trwały umiejscowiony na stałe we wnętrzu membrany,
- zewnętrzna instalacja hydrauliczna, która zawiera cztery zawory zwrotne oraz kanał wlotowy i wylotowy.

Pompa posiada dwie komory robocze: lewą komorę roboczą i prawą komorę roboczą. Komory robocze pompy są rozdzielone membraną i połączone z zewnętrzną instalacją hydrauliczną za pośrednictwem dwóch kanałów roboczych, znajdujących się w środku rdzeni wewnętrznych obu wzbudników elektromagnetycznych.

Przy lewym skrajnym położeniu membrany (rys.3a) maksymalna objętość prawej komory roboczej jest ograniczona membraną magnetoreologiczną (przyciągniętą do lewego wzbudnika), powierzchnią wewnętrzną prawego korpusu pompy, zaś przy prawym skrajnym położeniu membrany (rys.3b) maksymalna objętość lewej komory roboczej jest ograniczona membraną magnetoreologiczną (przyciągniętą do prawego wzbudnika), powierzchnią wewnętrzną lewego korpusu pompy. W każdym cyklu pracy w miarę tego, jak objętość prawej komory roboczej się powiększa, objętość lewej komory roboczej maleje i odwrotnie: gdy objętość prawej komory maleje, objętość lewej komory ulega powiększeniu.

Cewki wzbudzenia są zasilane prądami okresowymi przemiennymi o przebiegu prostokątnym, pokazanymi na rys.2d. Konsekwencją takiego zasilania pompy jest to, że w przedziałach czasowych, w których magnes trwały (wraz z membraną) jest przyciągany do powierzchni czołowej lewego wzbudnika elektromagnetycznego, jest on równocześnie odpychany przez prawy wzbudnik elektromagnetyczny (dzieje się tak, ponieważ przy tych samych kierunkach przepływu prądów i przy odwróconym ułożeniu wzbudnika drugiego w stosunku do wzbudnika pierwszego, kierunki wytwarzanych pól magnetycznych są przeciwne). W chwili, w której membrana z magnesem trwałym (przyciąganym do powierzchni czołowej przez lewy wzbudnik pompy i odpychanym równocześnie przez prawy wzbudnik), znajdzie się w pozycji przedstawionej na rys.3a, objętość lewej komory roboczej jest równa 0, a objętość prawej komory roboczej jest maksymalna. Przy takiej pozycji membrany ciecz, znajdująca się w lewej komorze, zostaje z niej wyrzucona, zaś prawa komora robocza zostaje wypełniona cieczą. Dla lewej komory roboczej jest to więc koniec fazy wyrzutowej, zaś dla prawej komory - koniec fazy zasysania. W tym momencie następuje zmiana kierunku przepływu prądów w cewkach obu wzbudników elektromagnetycznych i membrana zaczyna się przemieszczać w kierunku przeciwnym od lewego skrajnego położenia (rys.3a) do prawego położenia skrajnego (rys.3b).

Należy zwrócić uwagę, że w pompie 2-komorowej fazie wyrzutowej, zachodzącej w jednej komorze roboczej, towarzyszy równocześnie faza zasysania w drugiej komorze roboczej.



Rys.6. Pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym umieszczonym w jej części środkowej (zdjęcie)

Poprzez zmianę częstotliwości okresowych prądów przemiennych o przebiegach prostokątnych, zasilających cewki pary wzbudników elektromagnetycznych, można sterować natężeniem przepływu cieczy. Amplitudy przebiegów prostokątnych są tak dobrane, aby w każdym cyklu pracy następowało całkowite napełnienie i całkowite opróżnienie komór roboczych.

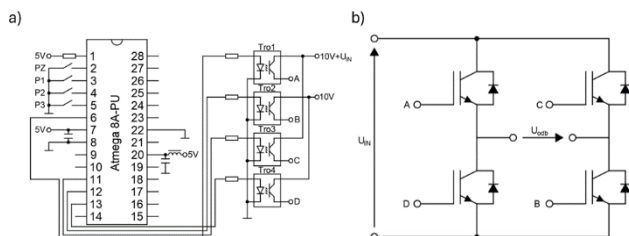
Elektromagnetyczna pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego przedstawiona na rys.1c różni się od pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym z rys.1d tylko tym, że nie posiada magnesu trwałego. Pompa ta jest jednak inaczej zasilana i sterowana. Przebieg prądu zasilającego cewkę drugiego wzbudnika pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego w stosunku do prądu cewki pierwszego wzbudnika jest przesunięty o pół okresu, co przedstawiono na rys.2c.

Zdjęcie wykonanej pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym prezentuje rys.6.

### Opis układu zasilania i sterowania pomp elektromagnetycznych oraz wyniki badań doświadczalnych

Układ sterowania pompami elektromagnetycznymi musi zapewnić ich zasilanie prądami przemiennymi lub zmiennymi, których przebiegi są przedstawione na rys.2. Przyjęto, że częstotliwość  $f$  zasilania pomp będzie zmieniana w przedziale od 1Hz do 5Hz (co 1Hz).

Schemat elektryczny układu zasilania i sterowania pomp przedstawia rys.7. Jednostką sterującą jest mikrokontroler Atmega 8A-PU, współpracujący z układem fototranzystorów (rys.7a). Pompy są zasilane z zasilacza przez tranzystorowy mostek H (rys.7b). Układ sterowania ma charakter uniwersalny: ten sam układ został wykorzystany do sterowania wszystkimi czterema prototypami pomp. Każdej pompie odpowiada jednak inny algorytm sterowania.



Rys.7. Schemat elektryczny układu zasilania i sterowania pompami elektromagnetycznymi a) mikrokontroler sterujący Atmega 8A-PU z układem fototranzystorów b) końcówka mocy (tranzystorowy mostek H)

Zadaniem pomp było przepompowanie objętości  $0.5\text{dm}^3$  cieczy roboczej (wody) pomiędzy dwoma zbiornikami umieszczonymi na tej samej wysokości. Wartość prądu (wartości prądów) dobierano według wcześniej przedstawionych kryteriów, związanych z zapewnieniem całkowitego opróżnienia komory roboczej pompy.

Przeprowadzono kolejno próby dla: pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym, pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym oraz pompy 1-komorowej z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego. Niemożliwym okazało się dokończenie próby dla pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego ze względu na zbyt wysoką wartość prądu wzbudzenia (prowadzącą do przegrania wzbudników elektromagnetycznych).

Wartości czasów, potrzebnych do przepompowania cieczy roboczej (wody) przez poszczególne trzy przebadane prototypy pomp elektromagnetycznych, przy częstotliwościach zasilania zmienianych co 1Hz w zakresie od 1Hz do 5Hz, są zestawione w tab.1. Wyniki tych badań są zestawione w tabeli 1.

### Podsumowanie

Zbudowano i uruchomiono cztery prototypy pomp elektromagnetycznych, opracowanych według koncepcji przedstawionych na rys.1. Badaniom pomiarowym poddano trzy prototypy pomp: pompę 1-komorową z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym, pompę 2-komorową z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym oraz pompę 1-komorową z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego.

Tabela 1. Wartości czasów potrzebnych do przepompowywania cieczy roboczej dla poszczególnych rozwiązań pomp elektromagnetycznych

Elektromagnetyczna pompa 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym		
f [Hz]	Czas [s]	Wydajność [l/min]
1	360	0,083
2	330	0,091
3	310	0,097
4	295	0,102
5	285	0,105
Elektromagnetyczna pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym		
f [Hz]	Czas [s]	Wydajność [l/min]
1	240	0,125
2	210	0,143
3	190	0,158
4	175	0,171
5	165	0,182
Elektromagnetyczna pompa 1-komorowa z membraną magnetoreologiczną bez magnesu trwałego		
f [Hz]	Czas [s]	Wydajność [l/min]
1	420	0,071
2	390	0,077
3	360	0,083
4	330	0,091
5	300	0,100

Zgodnie z przewidywaniami najbardziej wydajną okazała się pompa 2-komorowa z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym. Wydajność pompy 2-komorowej z magnesem trwałym jest wyższa od wydajności pompy 1-komorowej z magnesem trwałym przy wszystkich częstotliwościach zasilania (przy częstotliwości 1Hz – o 50%, a przy częstotliwości 5Hz – o 73%).

W elektromagnetycznej pompie 1-komorowej bez magnesu trwałego konieczne było około 3-krotne zwiększenie prądu zasilającego cewkę. Pomimo tak zwiększonej wartości prądu, jej wydajność w stosunku do elektromagnetycznej pompy 1-komorowej z magnesem trwałym była przy wszystkich częstotliwościach zasilania niższa (przy częstotliwości 1Hz – o 17%, zaś przy częstotliwości 5Hz – o 5%).

Dla pompy 2-komorowej z magnesem trwałym przy wzroście częstotliwości z 1Hz do 5Hz wydajność pompy wzrosła o 45%, zaś dla pompy 1-komorowej z magnesem trwałym – o 26%. Jak widać pompa 2-komorowa jest znacznie wydajniejsza od pompy 1-komorowej.

Otrzymane rezultaty pokazują, że jest celowe dalsze doskonalenie koncepcji elektromagnetycznej pompy 2-komorowej z membraną magnetoreologiczną i magnesem trwałym.

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Tofilski, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: pawel.tofilskii@doktorant.pk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl

#### LITERATURA

- [1] Stępień M., Pompy, wyd. 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
- [2] Zarzycki R. Prywer J., Techniczna mechanika płynów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [3] Nesbitt B., Handbook of pumps and pumping: Pumping manual international. Elsevier, 2006.
- [4] Karassik, Igor J. *Pump handbook*. 2001.
- [5] Murawski, K., Pustelny, T., Grad, L., Murawska, M., Wizyjny pomiar objętości wyrzutowej komory pneumatycznej pozaustrojowej pompy wspomaganie serca, Przegląd Teleinformatyczny, 3 (40), 3 – 45 (2015).
- [6] Sideris, E. A., and H. C. De Lange. Pumps operated by solid-state electromechanical smart material actuators-A review. *Sensors and Actuators A: Physical* 307 (2020): 111915.
- [7] YAO JIANFEI; GAO YU. Electromagnetic diaphragm metering pump based on magnetorheological elastomer, CN Patent CN113007076A, 2021.06.22.
- [8] Stephen John CookRichard Edward Clark. Diaphragm pump with magnetic actuator, WO Patent WO9531642A1, 1995.11.23.
- [9] Kaleta, Jerzy. Materiały magnetyczne SMART: budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
- [10] Datta J. Włoch M. Inżynieria elastomerów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
- [11] Saechtling H., Tworzywa sztuczne. Poradnik, WNT, Warszawa 2007.
- [12] Muhammad Arslan Hafeez, Muhammad Usman, Malik Adeel Umer, and Asad Hanif. Recent progress in isotropic magnetorheological elastomers and their properties: A review. *Polymers*, 12(12), 2020.
- [13] Dan Zhao, Bing Wang, Zhenghang Zhao, Shuaihu Wang, Song Yang, and Na Dong. The simulation of magnetomechanical properties of magnetorheological elastomers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 649(1):012003, oct 2019.
- [14] Sung Soon Kang, Kisuk Choi, Jae-Do Nam, and Hyoung Jin Choi. Magnetorheological elastomers: Fabrication, characteristics, and applications. *Materials*, 13(20), 2020.
- [15] Miguel Angel Moreno-Mateos, Mokarram Hossain, Paul Steinmann, and Daniel Garcia-Gonzalez. Hybrid magnetorheological elastomers enable versatile soft actuators. *npj Computational Materials*, 8(1):1–14, 2022.
- [16] 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.
- [17] Tofilski P. Kluszczyński K., Koncepcja i budowa laboratoryjnego modelu pompy wyposażonej w elastyczną membranę ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego. Materiały konferencyjne „XVII Konferencja naukowa „Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki PTEiS”, Częstochowa – Złoty Potok, 2023.