

Koncepcja i budowa laboratoryjnego modelu pompy wyposażonej w elastyczną membranę ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję nowej pompy z elastyczną membraną ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego, bazującą na zasadzie działania pompy z elastyczną membraną, poruszaną w sposób mechaniczny za pośrednictwem układu napędowego korbowego. Omówiono sposób wytworzenia elastycznej membrany ferromagnetycznej w warunkach laboratoryjnych. Przedstawiono budowę prototypu i zaprezentowano wyniki badań potwierdzające poprawność działania pompy.

Abstract. This paper presents the concept of a new flexible ferromagnetic membrane pump driven by an electromagnetic exciter, based on the principle of a flexible membrane pump moved mechanically via a crank drive system. The method of manufacturing a flexible ferromagnetic membrane under laboratory conditions is depicted. The construction of a prototype is described and the results of laboratory tests confirming the correctness of the pump's operation are presented. (**Concept and construction of a laboratory model of a pump equipped with a flexible ferromagnetic membrane driven by an electromagnetic exciter**)

Słowa kluczowe: pompa membranowa, pompa z elastyczną membraną ferromagnetyczną, technologia wykonania membrany ferromagnetycznej, druk 3D.

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

Wstęp

Pompy znane są od zarania dziejów jako urządzenia przeznaczone do podnoszenia cieczy na wyższy poziom. Najstarsze - proste w budowie - konstrukcje pomp były nazywane czerpadłami. Czerpadło takie typu pojemnikowo-ciężłowego, datowane na około 1700 r. p.n.e., zostało przez archeologów odnalezione w Kairze (Egiptcie). Służyło ono do pompowania wody ze studni o głębokości prawie 90 m [1].

Na przestrzeni dziejów narodziło się wiele pomysłowych rozwiązań konstrukcyjnych pomp o bardzo różnych zasadach działania, zarówno o ruchu obrotowym, jak i prostoliniowym [2].

Zwięzła klasyfikacja pomp z punktu widzenia ich budowy i zasady działania zostanie przedstawiona w następnym rozdziale.

Klasyfikacja pomp

Pompa jest maszyną roboczą, przetłaczająca czynnik roboczy ze zbiornika o niższym ciśnieniu do zbiornika o wyższym ciśnieniu, czyli jest urządzeniem wytwarzającym różnicę ciśnień, umożliwiającą zmianę poziomu energii potencjalnej cieczy roboczej. Proces tłoczenia wymaga energii mechanicznej, która jest dostarczana za pomocą układu napędowego. Układ ten napędza organy robocze pompy, którymi mogą być wirniki, tłoki, rotory itp.

Pompę z układem napędowym klasyfikuje się jako maszynę hydrauliczną bierną. Maszyną hydraulicznie czynną, czyli maszyną o odwrotnym sposobie działania w stosunku do maszyny hydraulicznej biernej, jest silnik wodny czyli tzw. turbina, która przetwarza energię potencjalną cieczy roboczej w energię kinetyczną cieczy.

Maszyny hydrauliczne, które mogą pracować zarówno jako pompy (maszyny hydraulicznie bierne) lub też jako turbiny (maszyny hydraulicznie czynne) określa się mianem pompoturbin lub maszyn wodnych odwracalnych, czyli takich, które mogą w pewnym przedziale czasu pracować jako pompy, a w innym - jako turbina.

Odnosnie do klasyfikacji pomp możemy wyróżnić dwa główne rodzaje pomp: **pompy wyporowe** oraz **pompy wirowe**. Różnią się one sposobem wytwarzania różnicy ciśnień w komorach roboczych.

Pompy wyporowe wypierają z obszaru ssawnego, poprzedzającego wlot, określoną dawkę czynnika roboczego przy pomocy organu roboczego (jak wspomniano wcześniej, może to być wirnik, tłok czy też rotor) do obszaru tłocznego, znajdującego się za wylotem. Aby taka pompa działała poprawnie, komory ssawne oraz tłoczne muszą być szczelne oraz wzajemnie od siebie odizolowane. W kolejnym etapie pompy wyporowe możemy podzielić – w zależności od charakteru wykonywanego ruchu organu roboczego – na cztery grupy:

- pompy o ruchu postępowo-zwrotnym organu roboczego, do których należą pompy: tłokowe (nurnikowe), wielotłoczkowe, membranowe itd.,
- pompy o ruchu obrotowo-zwrotnym organu roboczego, którymi są przykładowo pompy o ruchu skrzydełkowym,
- pompy o ruchu obrotowym organu roboczego, do której to grupy należą pompy łopatkowe, zębate, krzywkowe, śrubowe, ślimakowe, labiryntowe itd.,
- pompy specjalne, w których organ roboczy wykonuje ruchy jeszcze innego rodzaju np. ruch obiegowy lub ruch precesyjny.

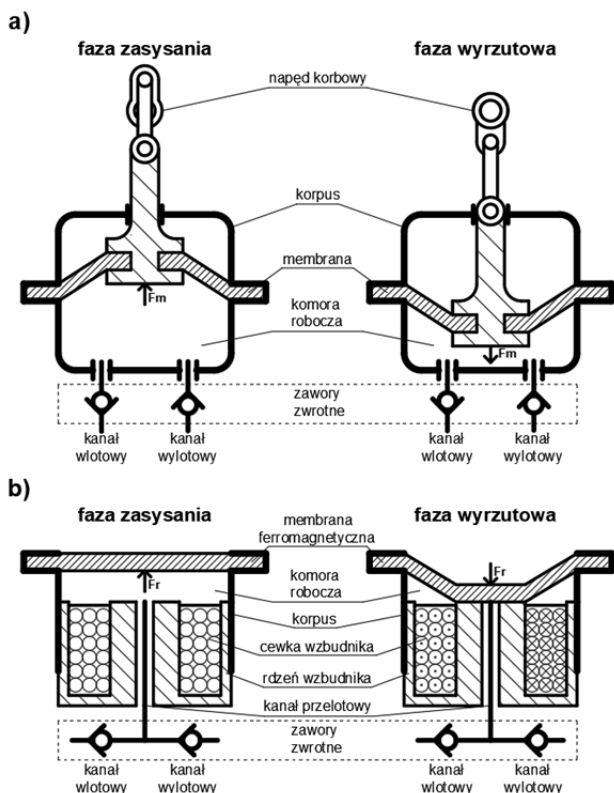
Pompy wirowe zwiększają krążenie czynnika roboczego za pomocą wirnika osadzonego na obracającym się wale. Pompy wirowe można podzielić na:

- pompy krętne: odśrodkowe, helikoidalne, diagonalne, śmigłowe, odwracalne itp.,
- pompy krążeniowe: z bocznymi kanałami, peryferalne, z pierścieniem wodnym itd. [1, 3, 4, 5].

Na wstępie autorzy artykułu dokonali analizy pompy wyporowej o ruchu postępowo-zwrotnym organu roboczego, wyposażonej w elastyczną membranę (przeponę), poruszaną w sposób mechaniczny za pośrednictwem układu napędowego korbowego wywierającego na membranę siłę o wartości F_m . Schemat ideowy takiej pompy jest przedstawiony na rys.1a. W skrócie pompę taką określa się mianem **pompy membranowej** (przeponowej). Konstrukcja takiej właśnie pompy legła u podstaw koncepcji pompy nowego typu.

Istotą tej nowej koncepcji jest zastąpienie elastycznej membrany, poruszanej w sposób mechaniczny, membraną ferromagnetyczną wykonaną z elastomeru, napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego wytwarzającego

zmienne pole magnetyczne. Koncepcję działania tej pompy (na tle zasady działania pompy klasycznej membranowej – rys.1a) przedstawia rys.1b).



Rys. 1. Koncepcja budowy i zasada działania pompy nowego typu z membraną ferromagnetyczną na tle pompy z membraną napędzanej za pomocą układu korbowego: a) pompa napędzana za pomocą układu korbowego, b) pompa napędzana za pomocą wzбудnika elektromagnetycznego

Skutkiem działania zmiennego pola magnetycznego na elastomerową ferromagnetyczną membranę jest powstanie elektromagnetycznej siły reluktancyjnej o wartości F_r . Założono, że w projektowanym prototypie zostanie wykorzystany elastomer ferromagnetyczny, którego sposób wytwarzania w warunkach laboratoryjnych został opisany w [8]. Ponadto przyjęto, że wzбудnik elektromagnetyczny będzie odpowiednio dobranym wzбудnikiem produkowanym w sposób seryjny. Dla umożliwienia przepływu czynnika roboczego poprzez wzbudnik w jego części środkowej wykonano kanał przelotowy (poprzez przewiercenie rdzenia ferromagnetycznego). Pompę taką będziemy dalej nazywać pompą z elastyczną membraną ferromagnetyczną napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego, a w skrócie - pompą z membraną ferromagnetyczną.

Praca każdej pompy obejmuje fazę zasysania czynnika roboczego oraz fazę wyrzutową, związaną z przetaczaniem czynnika (płynu) roboczego. Na rys.1a pokazano ułożenie mechanizmu korbowego i membrany dla fazy zasysania (strona lewa) oraz dla fazy wyrzutowej (strona prawa). W identyczny sposób zilustrowano na rys.1b ułożenie membrany ferromagnetycznej w fazie zasysania (strona lewa) oraz w fazie wyrzutowej (strona prawa). W fazie wyrzutowej membrana ferromagnetyczna jest przyciągana przez zasilaną prądem cewkę wzbudzenia, a w fazie zasysania – przy wyłączonym prądzie w cewce wzbudzenia – membrana powraca do pozycji początkowej pod wpływem działania siły sprężystości.

Elementem kluczowym, decydującym w dużej mierze o skuteczności działania takiej pompy nowego typu, jest elastyczna membrana ferromagnetyczna o kształcie kołowym. Autorzy postanowili zbudować prototyp takiej pompy w małej skali i sprawdzić zasadę jej działania w sposób eksperymentalny. Zdecydowano, że ferromagnetyczna elastyczna membrana kołowa zostanie samodzielnie wykonana w laboratorium uczelnianym według technologii, omówionej w [8, 9].

Technologia wykonania elastycznej membrany ferromagnetycznej o kształcie kołowym.

Jak wspomniano wcześniej, kluczowym elementem pompy napędzanej za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego jest elastyczna membrana ferromagnetyczna. Membranę postanowiono wykonać z elastomeru (materiału polimerowego), posiadającego odpowiednio wysoki współczynnik sprężystości [6, 7]. Uzyskanie właściwości magnetycznych membrany wymaga równomiernego rozproszczenia w jej objętości proszku ferromagnetycznego. Stopień zagęszczenia proszku w elastomerze rzutuje w sposób bezpośredni na jego zastępczą względną przenikalność magnetyczną. Należy jednak pamiętać o tym, że zwiększaniu zawartości proszku ferromagnetycznego w elastomerze będzie towarzyszyć niekorzystna zmiana sprężystości membrany. Konieczne jest uzyskanie kompromisu pomiędzy ilością proszku ferromagnetycznego, a właściwościami mechanicznymi membrany: im więcej proszku ferromagnetycznego, tym lepsze właściwości magnetyczne membrany – i równocześnie: im więcej proszku ferromagnetycznego, tym mniejsza sprężystość membrany i gorsze jej właściwości mechaniczne.

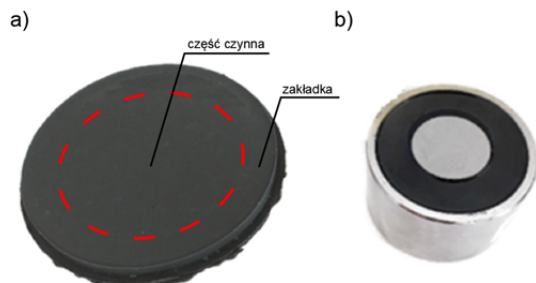
Dobranie odpowiednich proporcji pomiędzy ilością materiału polimerowego (stanowiącego podłoże), a ilością proszku ferromagnetycznego wymagało szeregu laboratoryjnych eksperymentów. Jako podłoże wykorzystano kauczuk syntetyczny typu A o twardości równej 10 w skali Shore'a (po zaschnięciu wykazuje on właściwości zbliżone do ludzkiej skóry). Stosunek wagowy pomiędzy masą kauczuku syntetycznego (podłożem), a masą proszku ferromagnetycznego zmieniano w kolejnych próbach w granicach od 1:0.5 do 1:3. Przygotowane mieszanki wylewano do odpowiednich form o kształcie kołowym. Przyjęto, że grubości wytwarzanych membran będą się zmieniać co 1 mm od grubości 2 mm do grubości 5 mm.

Biorąc pod uwagę kryterium sformułowane w części początkowej rozdziału (ukierunkowane na kompromis pomiędzy możliwie dużą względną przenikalnością magnetyczną elastomeru, a równocześnie odpowiednio wysoką sprężystością membrany) wybrano do zastosowania w budowanym prototypie pompy membranę o stosunku wagowym kauczuku syntetycznego do proszku ferromagnetycznego 1:1. Należy nadmienić, że przy wyższej wartości stosunku wagowego następuje nie tylko pogorszenie sprężystości membrany, ale również w sposób bardzo wyraźny zwiększa się jej podatność na rozerwanie, co całkowicie eliminuje możliwość jej wykorzystania w pompie elektromagnetycznej.

Zdjęcie wybranej membrany o stosunku wagowym syntetycznego kauczuku do proszku ferromagnetycznego 1:1 i grubości 3mm, charakteryzującej się odpowiednią sprężystością, odpornością na rozerwanie i wystarczającą względną przenikalnością magnetyczną (wynosi ona nieco ponad 3), prezentuje rys.2a.

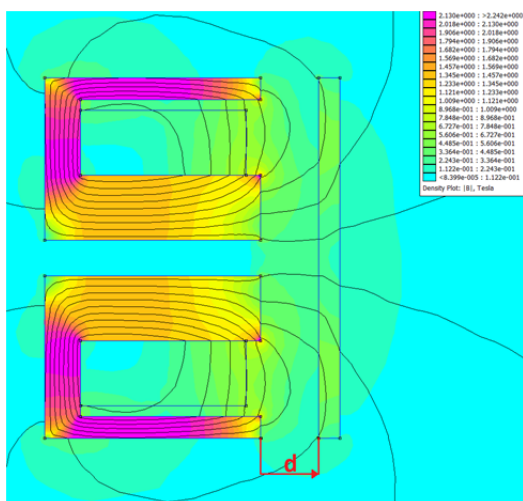
Dobór wzbudnika elektromagnetycznego oraz odległości membrany od powierzchni wzbudnika

Na podstawie wstępnych prób przyjęto, że w pompie elektromagnetycznej zostanie wykorzystany wzbudnik przedstawiony na rys.2b. Posiada on średnicę 50 mm i wysokość 30 mm. Średnica części czynnej wybranej membrany z rys.2a odpowiada średnicy wzbudnika (pozostała zewnętrzna część membrany stanowi zakładkę nachodzącą na korpus pompy).



Rys.2. Główne elementy konstrukcji pompy elektromagnetycznej: a) membrana wykonana z kauczuku syntetycznego domieszkaną proszkiem ferromagnetycznym, b) dobrany wzbudnik elektromagnetyczny o średnicy 50 mm i wysokości 30 mm

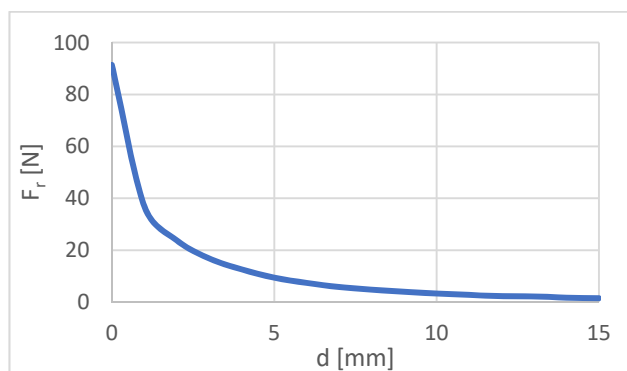
Kierując się wymiarami geometrycznymi oraz danymi podanymi przez producenta przeprowadzono badania symulacyjne oddziaływania wzbudnika na membranę ferromagnetyczną w programie FEMM 4.2. Przyjęto, że części ferromagnetyczne wzbudnika są wykonane z materiału: US Steel Type 2-S (jego względna przenikalność magnetyczna w części liniowej charakterystyki magnesowania to: $\mu_{Fe}=9400$). Względna przenikalność magnetyczna membrany ferromagnetycznej (o stosunku wagowym kauczuku syntetycznego do proszku ferromagnetycznego 1:1) została wyznaczona we współpracy z Laboratorium Pomiarów Magnetycznych Politechniki Częstochowskiej [10] – wynosi ona: $\mu_m=3,33$. Obliczenia polowe wykonano przy maksymalnym prądzie wzbudzenia $I=1,5A$. Wyznaczony rozkład przestrzenny pola magnetycznego dla układu: „wzbudnik - membrana ferromagnetyczna” przy przykładowym położeniu membrany: $d=8$ mm przedstawia rys.3.



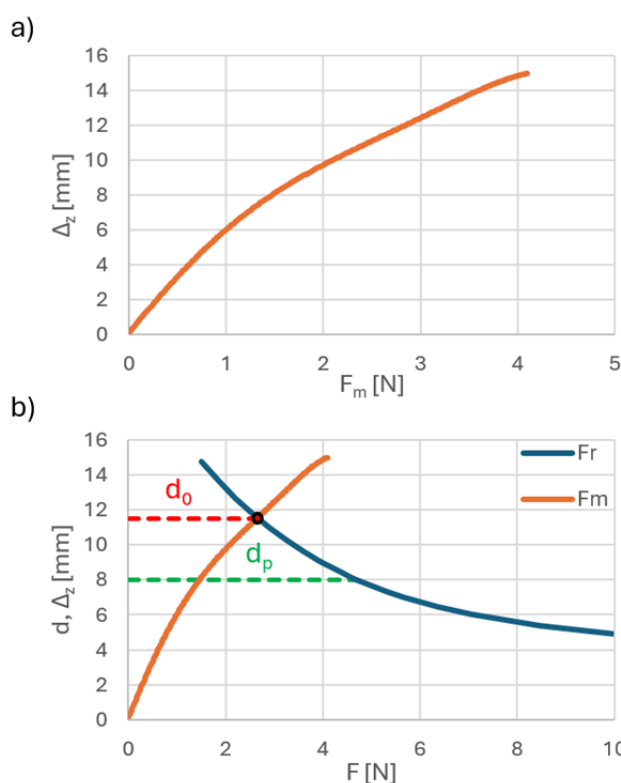
Rys.3. Rozkład pola elektromagnetycznego dla wzbudnika elektromagnetycznego z membraną ferromagnetyczną wyznaczony w programie FEMM 4.2

W kolejnych obliczeniach badano wpływ odległości zamocowania membrany od powierzchni wzbudnika d na

wartość siły reluktancyjnej. Rys.4 przedstawia wykres siły reluktancyjnej F_r w funkcji odległości d , którą zmieniano w granicach od 0 mm do 15 mm.



Rys.4. Siła reluktancyjna F_r działająca na membranę ferromagnetyczną w funkcji odległości zamocowania membrany d , wyznaczona na podstawie obliczeń polowych



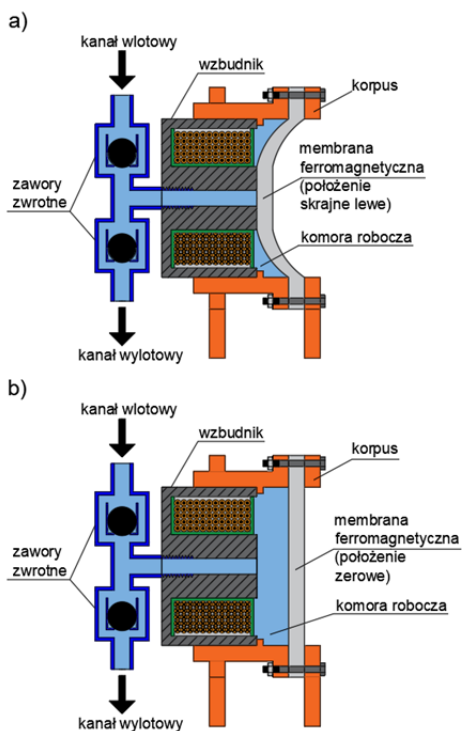
Rys.5. Wyznaczenie odległości d_0 i d_p na podstawie eksperymentu fizycznego i obliczeń polowych: a) charakterystyka odkształcenia (ugięcia membrany) $\Delta_z=f(F_m)$, b) zestawienie na wspólnym rysunku charakterystyki odkształcenia $\Delta_z=f(F_m)$ z charakterystyką odległości zamocowania membrany w funkcji siły reluktancyjnej $d=f^{-1}(F_r)$

Dobór w prototypie pompy odległości zamocowania membrany ferromagnetycznej w stosunku do powierzchni wzbudnika elektromagnetycznego jest zagadnieniem o istotnym znaczeniu. Membranę należy umieścić co najmniej w takiej odległości d_0 , aby po zasileniu cewki wzbudzenia prądem maksymalnym membrana dochodziła do powierzchni wzbudnika. Pożądaną jest jednak to, aby przyciągnięta membrana rozplaszczała się na powierzchni rdzenia. To rozplaszczenie wymaga przyjęcia mniejszej odległości d_p ($d_p < d_0$). Odległość ta została wyznaczona w sposób doświadczalny poprzez zdjęcie wpierv (za pomocą odważników lokowanych w środku poziomo rozpiętej membrany) charakterystyki odkształcenia (ugięcia membrany) Δ_z w funkcji siły mechanicznej F_m (rys.5a), a

następnie zestawienie jej na wspólnym rysunku z charakterystyką $d=f^{-1}(F_r)$ (czyli charakterystyką $F_r=f(d)$ z rys.4, przedstawioną w odwrotnych osiach). Obie zestawione razem charakterystyki: $\Delta_z=f(F_m)$ oraz $d=f^{-1}(F_r)$ są pokazane na rys.5. Odległość d_0 , spełniająca warunek styku powierzchni membrany z powierzchnią rdzenia, jest wyznaczona przez punkt przecięcia obu charakterystyk ($d_0(F_r)=\Delta_z(F_m)$) i wynosi: $d_0=11,5$ mm. Jak wcześniej wskazano, odległość d_p musi być mniejsza, aby dochodziło do rozplaszczenia się membrany na rdzeniu. Ostatecznie, po uwzględnieniu rezultatów prób laboratoryjnych przeprowadzonych na zbudowanym prototypie, odległość tą ustalono na: $d_p=8$ mm.

Opis budowy prototypu pompy elektromagnetycznej z membraną ferromagnetyczną

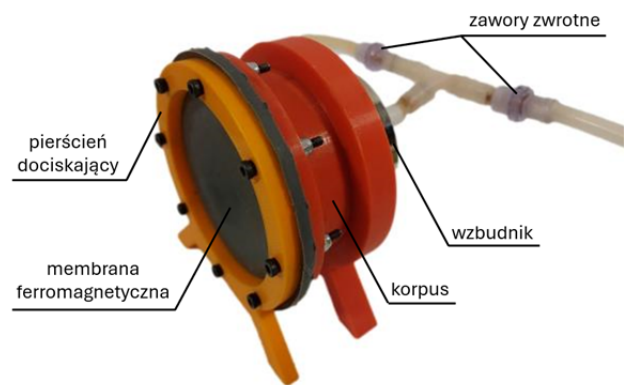
Konstrukcję elektromagnetycznej pompy z membraną ferromagnetyczną przedstawiono w sposób schematyczny na rys.6. Pompa widoczna jest na nim w dwóch skrajnych położeniach: stan maksymalnego wychylenia membrany, któremu odpowiada wartość maksymalna prądu we wzбудniku elektromagnetycznym (rys.6a) oraz stan neutralny, któremu odpowiada zerowa wartość prądu we wzбудniku elektromagnetycznym: $I=0$ (rys.6b).



Rys.6. Przekrój konstrukcji pompy z membraną ferromagnetyczną ze wzбудnikiem elektromagnetycznym: a) membrana w położeniu skrajnie lewym (prąd cewki wzbudzenia jest równy prądowi maksymalnemu), b) membrana w położeniu neutralnym (prąd w cewce wzbudzenia jest równy 0)

Jak widać na rys.6, pompa zawiera następujące elementy konstrukcyjne: wzбудnik elektromagnetyczny o średnicy 50 mm (rys.2b), membranę ferromagnetyczną o grubości 3 mm (rys.2a) oraz korpus i podstawę korpusu, które zostały wykonane w technologii druku 3D z filamentu PLA. Na rys.6 widoczna jest też instalacja hydrauliczna złożona z przewodów hydraulicznych oraz dwóch zaworów zwrotnych, stanowiących kanał wlotowy i kanał wylotowy pompy.

Prototyp pompy po jej zmontowaniu wraz z instalacją hydrauliczną jest widoczny na zdjęciu na rys.7.

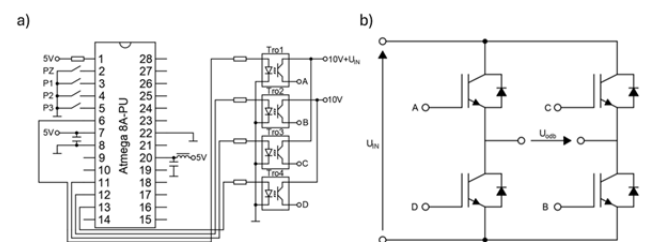


Rys.7. Pompa elektromagnetyczna z membraną ferromagnetyczną wraz z instalacją hydrauliczną

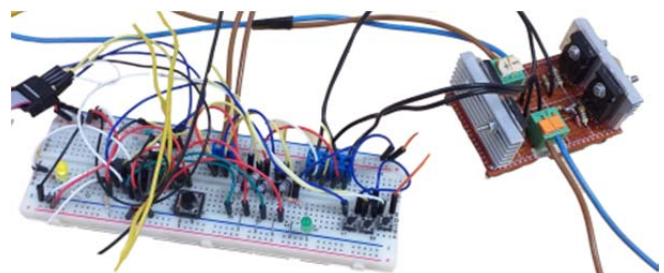
Opis układu zasilania i sterowania pompą

Układ sterowania pompą elektromagnetyczną musi zapewnić jej cykliczną pracę. Wymaga to załączania i wyłączania prądu w cewce wzbudzenia wzбудnika elektromagnetycznego z regulowaną częstotliwością f (założono, że częstotliwość f będzie mogła być zmieniana w granicach od 1 do 200 Hz).

Schemat elektryczny układu zasilania i sterowania przedstawia rys.8., zaś widok obu zmontowanych układów (zdjęcie) – rys.9.



Rys.8. Układ sterowania z końcówką mocy: a) mikrokontroler sterujący Atmega 8A-PU z układem fototranzystorów, b) końcówka mocy (tranzystorowy mostek H)



Rys.9. Zdjęcie zmontowanego układu zasilania i sterowania

Testy sprawdzające poprawność działania pompy

Zadaniem zbudowanego prototypu pompy było przetaczanie wody (czynnika roboczego) pomiędzy dwoma zbiornikami o objętości 500 cm³. Jest oczywiste, że częstotliwość f zasilania układu napędowego pompy decyduje o szybkości przetaczania czynnika roboczego. Po przeprowadzeniu eksperymentów przy różnych częstotliwościach stwierdzono, że dla zapewnienia właściwego przepływu cieczy roboczej (wody) częstotliwość ta powinna wynosić 5 Hz. Przy częstotliwości $f=5$ Hz czas przetoczenia cieczy pomiędzy zbiornikami o objętości 500 cm³ wyniósł 5 min.

Podsumowanie

Autorzy opracowali koncepcję pompy membranowej o nowej zasadzie działania. Pompa napędzana jest siłą reluktancyjną, będącą wynikiem oddziaływania pola magnetycznego wytwarzanego przez wzbudnik elektromagnetyczny na membranę ferromagnetyczną, wykazującą właściwości magnetyczne (względna przenikalność magnetyczna wykonanej membrany to: $\mu_m=3,33$). Dokonano polowych obliczeń projektowych z wykorzystaniem programu FEMM 4.2 i zbudowano prototyp pompy. Dla wykonanego prototypu pompy opracowano mikroprocesorowy układ sterowania i przeprowadzono badania laboratoryjne działania pompy.

Wyniki badań eksperymentalnych w pełni potwierdziły poprawność działania pompy nowego typu - pompy z elastyczną membraną ferromagnetyczną, napędzaną za pomocą wzbudnika elektromagnetycznego i wskazują na celowość dalszego rozwijania przedstawionej koncepcji pompy.

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] Tackett, Herbert H., James A. Cripe, and Gary Dyson. "Positive displacement reciprocating pump fundamentals-power and direct acting types." Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 2008.
- [5] Karassik, Igor J. Pump handbook. 2001.
- [6] Datta J. Włoch M. Inżynieria elastomerów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
- [7] Saechtling H., Tworzywa sztuczne. Poradnik, WNT, Warszawa 2007.
- [8] 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.
- [9] Sołtys K. Bartel. S. Kluszczyński K., Instalacja do wytwarzania proszku ferromagnetycznego metodą elektrolizy w warunkach laboratoryjnych. Materiały konferencyjne „LV Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME”, Poznań, 2022.
- [10] Najgebauer M., Szczygłowski J., Nowoczesne tendencje rozwojowe w inżynierii materiałów magnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 84, Nr. 4, 2008, 136-139