

Szymon Lipiński, Daria Supińska
Politechnika Wroclawska, Wrocław

SYMULACJA PROSTEGO SILNIKA MAGNETOHYDRODYNAMICZNEGO

SIMULATION OF BASIC MAGNETOHYDRODYNAMIC MOTOR

Streszczenie: Silnik magneto hydrodynamiczny jest maszyną elektryczną, w której elementem bezpośrednio wprawianym w ruch jest płyn znajdujący się w polu magnetycznym. W opisanym przykładzie taką rolę pełni osolona woda przewodząca prąd znajdującą się w zewnętrznym polu magnetycznym pochodzącym od manganu ferrytowego. W artykule zawarto model matematyczny zjawisk pozwalający na przewidywanie zachowania się płynu oraz wykorzystany model numeryczny, który wstępnie zweryfikowano na modelu fizycznym w laboratorium. Omawiane urządzenie wprawia w ruch obrotowy wodę znajdującą się w szalce Petriego, której zewnętrzna ścianka wyłożona jest taśmą miedzianą. Na dnie szalki położony jest magnes ferrytowy w kształcie pierścienia. Całość zasilana jest prądem stałym przepływającym poprzez płyn z umieszczonej centralnie elektrody wykonanej z miedzianego drutu do znajdującej się na zewnątrz elektrody utworzonej z taśmy miedzianej, którą wyłożona jest zewnętrzna ścianka.

Abstract: Magneto hydrodynamic drive is a type of electric drive, where force acts directly on fluid without mechanical moving parts. The fluid in most cases conducts electric current in magnetic field creating force. Article includes mathematical model allowing to predict fluid behavior together with incorporated numerical model, which was preliminary verified on physical model on test rig. In described example salty water conducts direct current from central electrode made of copper wire to external electrode made of thin copper sheet covering external wall of Petri dish. External magnetic field is provided by ferrite magnet located on the bottom of the vessel. In result water spins in directions according to forces created in conductor exposed to magnetic field.

Słowa kluczowe: metoda objętości skończonych, magneto hydrodynamika, maszyny elektryczne, analiza numeryczna

Keywords: finite volume method, magneto hydrodynamics, electric drive, numerical analysis

1. Wprowadzenie

Maszyny elektryczne zdefiniowane jako urządzenia zamieniające energię elektryczną na mechaniczną, i odwrotnie, kojarzone są zwykle z maszynami, w których zarówno stojan jak i część ruchoma rozpatrywane są jako bryły sztywne. Najpopularniejszymi przykładami takich rozwiązań mogą być powszechnie stosowane silniki oraz generatory prądu stałego i przemiennego, w których moc przekazywana jest do maszyny przez obracający się wał. Takie maszyny wirujące wraz z silnikami liniowymi i przekładnikami stanowią większość tego co klasycznie kojarzy się z maszynami elektrycznymi. Jednak wraz z rozwojem nauki i postępem technologicznym pojawiają się nowe rozwiązania, takie jak silniki piezoelektryczne [1] i magneto hydrodynamiczne [2].

1.1. Definicja silnika magneto hydrodynamicznego

Magneto hydrodynamika (MHD) jest gałęzią nauki zajmującą się zachowaniem przewodzących gazów lub cieczy znajdujących się w polu elektromagnetycznym. Przykładami takich płynów mogą być elektrolity, ciekłe metale oraz plazma. Sama nauka została zapoczątkowana przez H. Alfvéna, który jako pierwszy zauważył, że plazma budująca Słońce będzie opisywana równaniami elektromagnetyzmu oraz hydrodynamiki [3].

Silnik magneto hydrodynamiczny jest urządzeniem wprawiającym w ruch płyn bez użycia ruchomych elementów. Do przyspieszenia płynu używana jest energia elektryczna, która może być dostarczona z zewnątrz lub wytworzona wskutek zachodzących reakcji elektrochemicznych [2]. Zaletą takich silników jest brak posiadania łożyskowania i ruchomych elementów, które najczęściej ulegają zużyciu i determinują niezawodność maszyny. Jednak

jak okazało się w opisanym poniżej eksperymencie pojawiają się problemy związane z korozją elektrochemiczną. W przypadku, gdy w silniku wykorzystywana ma być plazma pojawiają się dodatkowe problemy związane z pracą w wysokiej temperaturze.

1.2. Przykłady i możliwości zastosowań

Silniki MHD początkowo testowano jako napęd statków morskich, gdzie słona woda miałaby być przyspieszana w specjalnym kanale generując ciąg. Pierwszym prototypem tego typu był opracowany w 1965 przez Stewarda Waya napęd łodzi podwodnej [4]. Innym przykładem podobnego rozwiązania jest napęd okrętu Yamato 1 [5]. W wyczerpujący sposób proces projektowania łodzi wraz z wynikami analiz numerycznych został przedstawiony przez D. Cebra i innych [6].

Inną rozwijaną gałęzią jest wykorzystywanie zjawisk MHD do napędu statków kosmicznych. Istnieje wiele rodzajów tego typu napędu, które mają zastąpić w podróżach kosmicznych konwencjonalne rakiety. Ich zasadniczą zaletą w stosunku do rakiet wykorzystujących spalanie jest wielokrotnie większy impuls właściwy, co pozwala na uzyskanie większych prędkości przy zużyciu tej samej masy gazu pędnego. Ze względu jednak na uzyskiwane małe wartości ciągu obecnie stają się one użyteczne dopiero po wyniesieniu statku na orbitę Ziemi [7], [8]. Korzyści wykorzystania takich napędów są zatem widoczne w przypadku misji międzyplanetarnych, ponieważ poprzez redukcję masy pędnika wynoszonej na orbitę uzyskuje się znaczne oszczędności. Ewentualne oszczędności mogą być też zapewnione poprzez skrócenie czasu przelotu, co jest szczególnie ważne w przypadku lotów załogowych.

Tak jak w przypadku klasycznych maszyn elektrycznych, maszyny MHD również mogą pracować generatorowo, czego przykładem może być patent zgłoszony przez R. L. Hundstada i S. Waya [9]. W zastrzeżonym rozwiązaniu prezentują oni sposób na zamianę energii cieplnej na elektryczną wykorzystując bezpośrednio przepływające spaliny poddane termionizacji w procesie spalania chemicznego.

2. Model numeryczny

2.1. Równania magnetohydrodynamiki

Przedstawiono poniżej równania magnetohydrodynamiki są zespołem równań zunifikowanych równań Maxwella i Naviera Stokesa, które

opisują zachowanie się przewodzącego płynu w polu elektromagnetycznym. Przedstawione formy równań są odpowiednio uproszczone do rozpatrywanego zagadnienia.

Pierwszym z nich jest równanie ciągłości (1), które jest matematycznym odzwierciedleniem zasady zachowania masy. Przedstawiona postać równania wskazuje, że w obliczeniach założono, że rozpatrywany płyn jest nieściśliwy. Jest to uzasadnione dla wody w temperaturze pokojowej i spodziewanych nie-wielkich wahań ciśnienia. Równanie (2) jest zaczerpnięte wprost z równań Maxwella i opisuje własności pola magnetycznego. Równanie indukcji Faradaya (3) odpowiada za sprzężenie pola magnetycznego z polem prędkości. Natomiast (4) opisuje drugą zasadę dynamiki Newtona dla elementu płynu, gdzie za zmianę pędu odpowiadają gradient ciśnienia, tarcie wewnętrzne oraz siły pochodzenia elektromagnetycznego (Ampera) [10], [11]. Równanie energii zostało pominięte ze względu na fakt, że nie rozpatrywano sprawności przetwarzania energii. Skutkiem ubocznym tego uproszczenia jest pominięcie ruchów konwekcyjnych, które jednak są pomijalnie małe ze względu na niską wysokość szalki. Ponadto przyjęto założenie, że środowisko jest liniowe, tj. wartości przenikalności, przewodności i lepkości są niezmiennie w całym zakresie obliczeń.

Równania te opisują wykorzystany do obliczeń model MHD zawarty w dodatku do programu Ansys Fluent nazwany metodą potencjału elektrycznego (Electric Potential Method) [12].

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

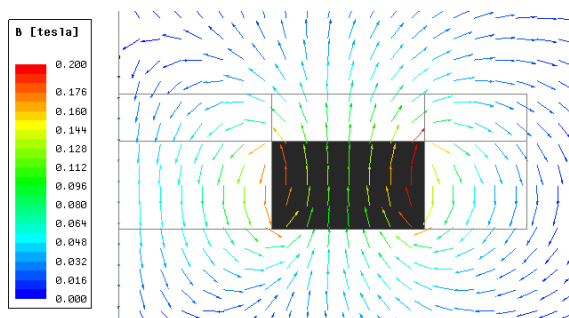
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \operatorname{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{\nabla^2 \mathbf{B}}{\mu \sigma}$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{\rho}$$

2.2. Wyniki obliczeń

Pierwszym etapem obliczeń było ustalenie rozkładu indukcji magnetycznej pochodzącej od magnesu. W tym celu przygotowano model osiowosymetryczny w programie Ansys Maxwell. Ponieważ magnes znajdujący się w szalce

Petrieego otoczony jest wodą, powietrzem, szkłem i drewnem, które mają przenikalność magnetyczną względną bliską jedności, dla prostoty całe otoczenie magnesu zamodelowano jako próżnię. Obszar obliczeniowy został ograniczony do połowy koła, na którego zewnętrznej krawędzi narzucono warunek brzegowy pozwalający otrzymanie wyników zbliżonych do otrzymanych dla nieskończonego obszaru obliczeniowego (rys. 1). Obliczenia wykonano dla magnesu ferrytowego F30, którego krzywą odmagnesowania pobrano ze strony dostawcy [13]. Wyniki rozkładu pola indukcyjnego przedstawiono na rysunku 2, na którym również zaznaczono obszary, dla których uśredniono wartości wektora indukcji w kierunku poosiowym B_{ri} i promieniowym B_{zi} . Osie r i z są odpowiednio osią poziomą i pionową na rysunku 1. Wartości te zebrano w tabeli 1 i wykorzystano w modelu numerycznym MHD na potrzeby definicji zewnętrznego pola magnetycznego.



Rys. 1. Rozkład wektorów indukcji magnetycznej w przekroju magnesu pierścieniowego z wyszczególnionymi obszarami płynu w modelu MHD

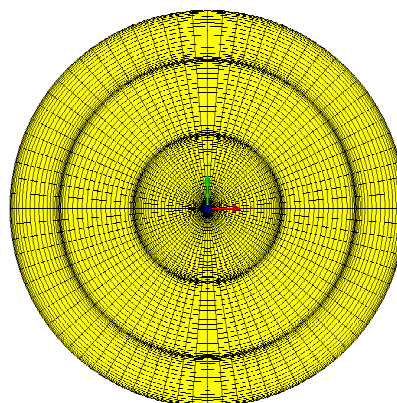
Tabela 1. Wartości średnie składowych wektora indukcji magnetycznej dla regionów z rys. 2

	1	2	3	4	5
B_{ri} , mT	-28.8	0	10.1	44.5	0
B_{zi} , mT	-28.0	-76.2	71.0	-11.7	-56.8

Wyniki obliczeń magnetostatycznych wykorzystano w modelu MHD do definicji zewnętrznego pola magnetycznego, ponieważ wykorzystywany program nie pozwala na bezpośrednie zamodelowanie pola pochodzącego od magnesu. Wykorzystane podejście pozwala na obliczenie prądów przepływających przez płyn na podstawie zadanego, jako warunki brzegowe potencjału oraz przewodności materiału i następnie obliczenie sił działających na przewo-

dzący płyn znajdujący się w zewnętrznym polu magnetycznym. Ponieważ środowisko jest liniowe wypadkowe pole magnetyczne powstaje w wyniku superpozycji zewnętrznego pola oraz pola wynikającego z przepływającego prądu. Zatem w takim przypadku narzucanie niezmiennego zewnętrznego pola magnetycznego jest uzasadnione. W razie konieczności zwiększenie dokładności obliczeń mogłoby być uzyskane przez zwiększenie stopnia dyskretyzacji zadanego pola magnetycznego. W rozpatrywanym przypadku ograniczono się do 5 obszarów.

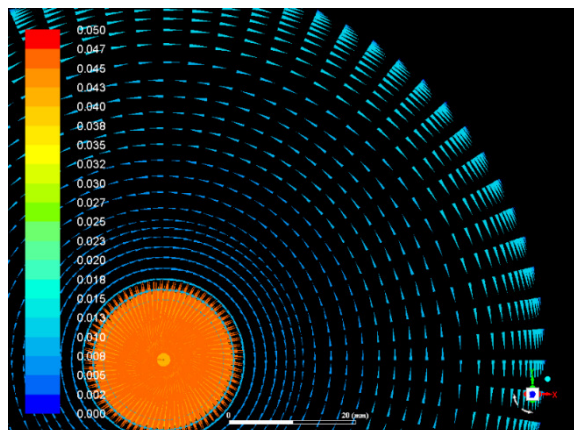
Ze względu na to, że przewodność ferrytu jest o wiele rzędów mniejsza od przewodności słonej wody objętość zajmowana przez magnes w obliczeniach MHD została całkowicie pominięta (rys. 3). Przyjęto, że prąd przepływa wyłącznie przez wodę od elektrody umieszczonej w centrum naczynia do zewnątrz. Wobec takiego kierunku przepływu prądu moment wytwarzany jest tylko dzięki składowej B_z pola magnetycznego i tylko te wartości przeniesiono do modelu MHD.



Rys. 2. Widok siatki obliczeniowej: widok z góry (żółty) oraz widok połowy przekroju w płaszczyźnie xz (czerwony)

Siatkę obliczeniową dla modelu przepływu płynu przedstawiono na rysunku 3. Zagęszczenie siatki przy ściankach naczynia pozwala na poprawne odwzorowanie warstwy przyściennej. Górną powierzchnię zamodelowano, jako całkowicie swobodną, to znaczy, że pominięto tarcie pomiędzy wodą a otaczającym powietrzem.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wektory prędkości dla powierzchni wody oraz przekroju przez naczynie. Widać na nich, że woda w różnych obszarach naczynia wiruje w przeciwnych kierunkach zgodnie z regułą lewej dłoni. Nieciągłości prędkości w pionie wynikają z niskiego stopnia dyskretyzacji zewnętrznego pola magnetycznego. Gdyby obszar obliczeniowy podzielić na większą liczbę regionów nie zaobserwowano by podobnego efektu.



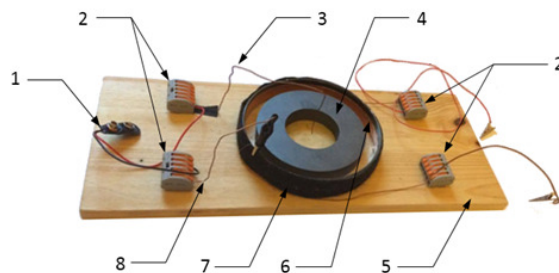
Rys. 3. Wektory prędkości wody na powierzchni naczynia

3. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na modelu znajdującym się na rysunku 7. Prezentowany model pozwala na zweryfikowanie modelu numerycznego w ujęciu jakościowym oraz w ograniczonym stopniu w ujęciu ilościowym. Największym problemem jest dokładne zmierzenie prędkości przepływu wody w poszczególnych miejscach. Ze względu na brak odpowiednio małych przyrządów pomiarowych dokonano pośredniej obserwacji. Na powierzchni wody umieszczono drobinki zmielonego pieprzu i zmierzono czas pełnego obrotu wokół osi naczynia. Znając odległość drobinki od osi można wyznaczyć średnią prędkość i porównać ją z obliczoną. Zestawienie danych zmierzonych i obliczonych pokazano w tabeli 2. Wynika z niej znacząca rozbieżność pomiędzy eksperymentem a pomiarem. Jej prawdopodobną przyczyną jest przyjęta w obliczeniach nieodpowiadająca warunkom pomiaru przewodność wody oraz niewystarczająca dokładność metody pomiarowej.

Tabela 2. Weryfikacja modelu numerycznego

Odległość od osi r , mm	Czas obiegu t , s	Prędkość średnia v_{av} , m/s	Prędkość obliczona v_c , m/s
5	2	$15.7 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$
20	8	$15.7 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$

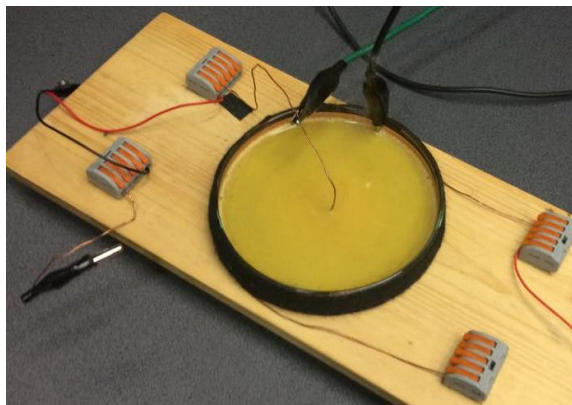


Rys. 4. Fizyczny model silnika MHD: 1 – wtyk na baterię 9V, 2 – złączki, 3 – katoda, 4 – magnes ferrytowy pierścieniowy (90 mm x 45 mm x 13 mm), 5 – drewniana podkładka, 6 – taśma miedziana, 7 – szalka Petriego (120 mm x 20 mm), 8 – anoda

Oprócz zasilania baterią o napięciu 9 V sprawdzono na stanowisku laboratoryjnym zachowanie się płynu dla większych napięć. Zgodnie z oczekiwaniami wraz ze zwiększeniem napięcia płyn przyspieszał, jednak podniesienia napięcia doprowadziło do hydrolizy i gwałtownego przyspieszenia korozji miedzi. Korozja postępowała na tyle szybko, że już po kilku minutach woda zmieniła zabarwienie na żółte, prędkość wirowania wody widocznie zmalała, a centralna elektroda w znacznej części skorodowała zmniejszając zauważalnie swój przekrój. Na rysunku 8 przedstawiono widok wody zanieczyszczonej powstałym w wyniku korozji chlorkiem miedzi (I).

4. Podsumowanie

Jak można zauważyć pomimo znacznego uproszczenia modelu numerycznego symulacja dobrze odzwierciedla rzeczywiste zachowanie się płynu. Zatem proponowane podejście pozwala skutecznie przewidzieć zachowanie płynu zgodnie z równaniami magnetohydrodynamiki. Przydatność proponowanego rozwiązania jest tym większa, ponieważ dla wielu rzeczywistych przypadków brak jest rozwiązań analitycznych.



Rys. 5. Widok zanieczyszczonej wskutek korozji wody poddanej napięciu 50 V

W celu ilościowego zweryfikowania modelu należałoby posłużyć się dokładniejszymi metodami pomiarowymi, ponieważ w trakcie wykonywania pomiarów obserwowane drobiny nie poruszały się dokładnie po okręgach co powoduje, że prędkości wyznaczone na podstawie czasu ich obiegu charakteryzują się bardzo dużą niepewnością pomiarową, którą trudno oszacować. Dodatkowo konieczny byłby pomiar przewodności używanej wody, w celu porównania czy obliczenia były przeprowadzone dla warunków w pełni odpowiadającym pomiarowi.

W przypadku gdy płynem wprawianym w ruch jest osolona woda należy zwrócić szczególną uwagę na materiał, z którego wykonane zostaną elektrody. Miedź okazała się silnie podatna na korozję i nie nadaje się do zastosowania w przypadku napędzania słonej wody, zatem w przyszłości należy do podobnych rozwiązań poszukiwać innych materiałów.

5. Literatura

- [1]. Vishnevsky V., Kavertsev V., Kartashev I., Lavrinenko V., Nekrasov M., Prez A., *Piezoelectric motor structures*, U.S. Pat. No. 4,019,073, 1977.
 [2]. Bednarek S., *Silniki magnetohydrodynamiczne z wewnętrznym zasilaniem*, XI SOKFD, Warszawa 2011.

[3]. Alfven H., *Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves*, Nature, Vol. 150, pp. 405-406, October 1942.

[4]. Way S., *Electromagnetic propulsion for cargo submarines*, J. Hydronautics 2: 49-57, 1968.

[5]. Takezawa S. et al., *Operation of the thruster for superconducting electromagnetohydrodynamic propulsion ship YAMATO-1*, Bull. Marine Eng. Soc. Japan 23: 46-55, 1995.

[6]. Cebon D. et al., *Experimental and Theoretical Study of Magnetohydrodynamic Ship Models*, PLoS ONE, 12, (6): e0178599, 2017.

[7]. Choueiri E. Y., *New dawn for electric rockets*, Scientific American, pp. 58-65, February 2009.

[8]. Lipiński S., *Review of electrically powered spacecraft propulsion systems*, 13th Students' Science Conference, Polanica Zdrój, 2015.

[9]. Way S. et al., *Magnetohydrodynamic generator*, U.S. Pat. No. 3,214,616, 1962.

[10]. Moreau R., *Magnetohydrodynamics*, Springer-Science+Business Media. B.V., 1990.

[11]. Murawski K., *Modelowanie i symulacje numeryczne zjawisk fizycznych*, Dokument elektroniczny:

http://kft.umcs.lublin.pl/kmur/download/papers/2011/K_Murawski_num_methods_hyper.pdf

[12] ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules, Release 17.2, August 2016.

[13]. <http://www.magnesy.eu/mp-90-x-45-x-13--f30---magnes-ferrytowy-t-977.html#>, Dostęp: 15-10-2017.

Autorzy

Szymon Lipiński
 Politechnika Wrocławska
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
szymon.lipinski@pwr.edu.pl

Informacje dodatkowe

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 390.