

PROJEKTOWANIE ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO DLA NAPĘDU ROBOTA PODWODNEGO

W artykule przedstawiono projekt i model matematyczny łożysk magnetycznych pędnika wodnego przeznaczonego do napędu pojazdów i robotów podwodnych. Na podstawie symulacji komputerowej wykazano, że stożkowe łożyska magnetyczne zapewniają bezawaryjną i bezobsługową pracę pędnika w wodzie morskiej.

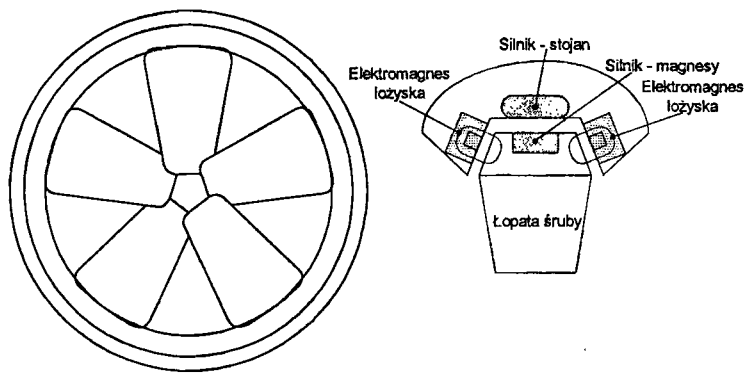
MAGNETIC BEARING DESIGN FOR UNDERWATER ROBOT DRIVE

In the paper there is presented project and mathematical model of magnetic bearings for water propeller. Such propellers are used to drive the underwater vehicles and robots. It was proved in computer simulation that cheaper conical magnetic bearings are sufficient to support the underwater robot propeller. The magnetic bearings guarantee, that the propeller works without breakdown in the water sea.

1. WSTĘP

Do napędu pojazdów i robotów podwodnych wykorzystywane są pędniki wodne, które umożliwiają precyzyjne manewrowanie robotem lub pojazdem pod wodą. Koncepcja pędnika pierścieniowego, który nie posiada wału jest znana od wielu lat, jednak dopiero po zastosowaniu aktywnych zawieszek magnetycznych staje się możliwe wykonanie w pełni niezawodnego bezobsługowego napędu. Pędnik wodny jest silnikiem elektrycznym zintegrowanym z pędnikiem śrubowym (rys. 1.1). Zastosowany silnik jest klasycznym silnikiem z magnesami trwałymi, które rozmieszczone są na obwodzie pierścienia. Do pierścienia mocowane są końce łopat śruby napędowej. Pierścień (wirnik) jest utrzymywany w stanie lewitacji przez łożyska magnetyczne (rys. 1.1).

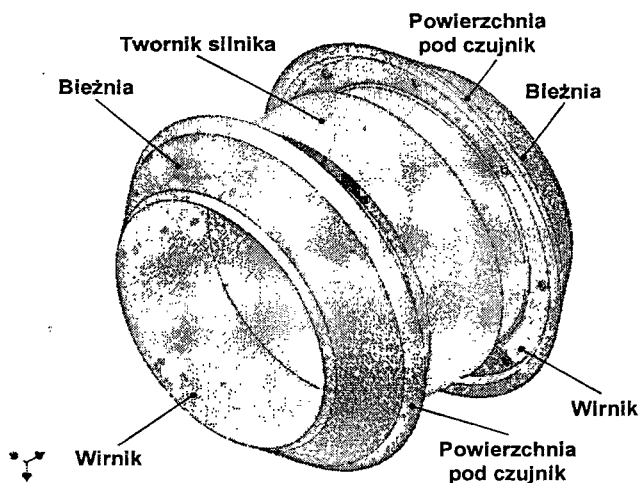
Zastosowanie klasycznych łożysk w pędniku jest niemożliwe ze względu na niszczący wpływ wody morskiej oraz brak możliwości smarowania. Natomiast niekonwencjonalne łożyska (np. ceramiczne), w których występuje kontakt mechaniczny pomiędzy wirującymi parami kinematycznymi, nie zapewniają wysokiej niezawodności. Pierścień pędnika posiada bardzo duży moment bezwładności, tym samym podczas manewrowania pojazdu, wystąpią bardzo duże momenty giroskopowe. Momenty te są przenoszone przez elementy łożysk, tym samym łożyska ulegają intensywnemu zużyciu. Dlatego najlepszym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie aktywnych łożysk magnetycznych, które zapewniają bezkontaktowe łożyskowanie wirnika oraz umożliwiają przenoszenie znacznych sił.



Rys. 1.1. Koncepcja pędnika wodnego.

2. PROJEKT WĘZŁA ŁOŻYSKOWEGO PĘDNIKA WODNEGO

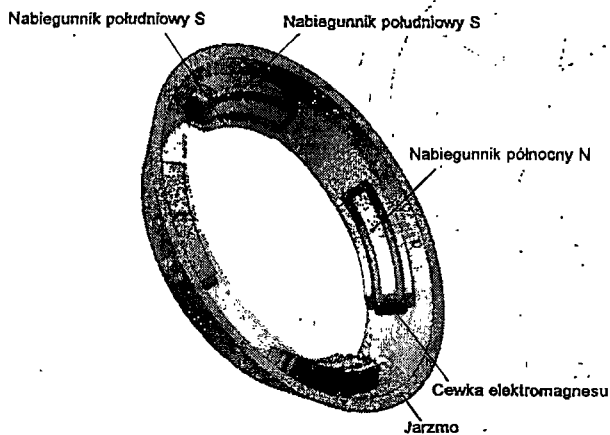
Projektując pędnik wodny, rozpatrywano koncepcję użycia węzła łożyskowego z trzema łożyskami - jednym osiowym i dwoma promieniowym. Jednak brak wystarczającego miejsca uniemożliwił przyjęcie takiego rozwiązania. Szczególnie istotnym ograniczeniem jest umieszczenie twornika elektrycznego silnika napędowego w centralnej części wirnika (rys. 2.1).



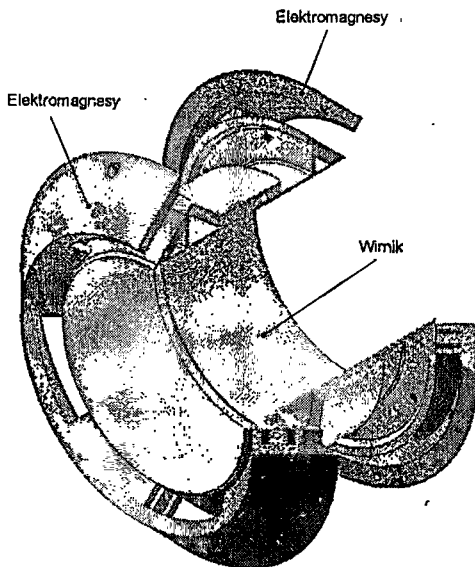
Rys. 2.1 Wirnik pędnika

Ze względu na brak wystarczającej ilości wolnego miejsca, wykorzystano skrośne (stożkowe) łożyska magnetyczne. W łożysku tego typu ograniczono liczbę siłowników elektromagnetycznych do czterech. Siły elektromagnetyczne przykładane są pod kątem, stąd każda z sił elektromagnetycznych generuje dwie składowe (pionową i poziomą), które wykorzystywane są do ograniczenia pięciu stopni swobody wirnika. Szósty stopień swobody, ograniczany jest przez silnik napędzający wirnika. Dodatkowe zalety zastosowania tego typu łożysk, to ograniczenie liczby zasilaczy (z dziesięciu do ośmiu)

i liczby czujników mierzących położenie wirnika w szczelinie powietrznej (z pięciu do czterech).



Rys. 2.2. Elektromagnesy łożysk magnetycznych



Rys. 2.3. Konstrukcja węzła łożyskowego pędnika wodnego

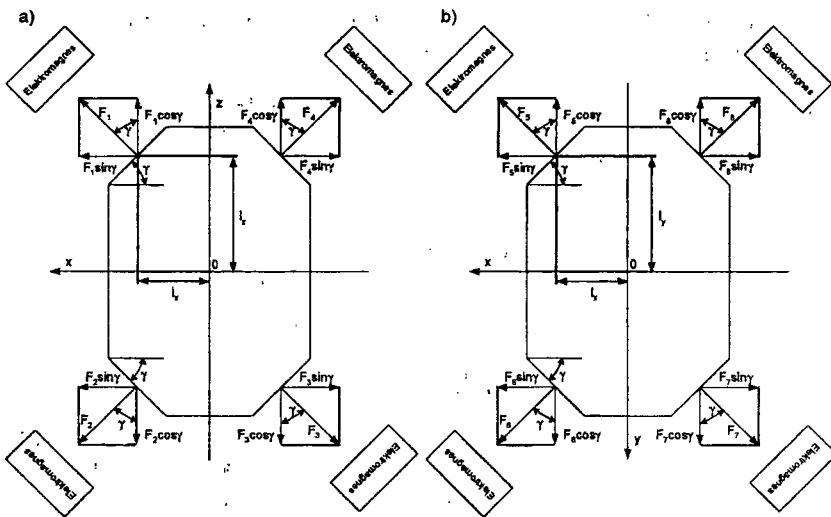
Wirnik jest pierścieniem o dużej średnicy wewnętrznej (rys. 2.1). Wewnątrz wirnika umieszczone są łopaty pędnika. Wirnik wyposażony został w bieźnię wykonane z materiału ferromagnetycznego. Bieźnia jest ściętym stożkiem wsuniętym na wirnik pędnika. Obok bieźni umieszczone są powierzchnie, które współpracują z czujnikami wiroprowadowymi. W pędniku umieszczone są cztery czujniki, które określają zmianę szczeliny powietrznej na potrzeby sterowania. Powierzchnie pod czujniki wykonane są z materiału diamagnetycznego. Bieźnie oraz powierzchnie pod czujniki umieszczone są

symetrycznie na wirniku pędnika. W centralnej części wirnika umieszczony jest twornik silnika napędowego.

Wirnik łożyskowany jest przez homopolarne łożyska magnetyczne. W pędniku umieszczono zespoły elektromagnesów na wspólnym jarzmie (rys. 2.2). Z jarzma wyprowadzone są nabiegunniki elektromagnesów. Wewnętrzne nabiegunniki posiadają polaryzację magnetyczną północną, zewnętrzne natomiast są nabiegunnikami południowymi elektromagnesów. Tym samym strumień magnetyczny przenika od nabiegunnika wewnętrznego do nabiegunników zewnętrznych przez bieźnię. Takie rozmieszczenie nabiegunników ogranicza indukowanie prądów wirowych w bieźni łożyska, ponieważ bieźnia zawsze przemieszcza się pod nabiegunnikami tej samej polaryzacji magnetycznej i nie ulega przemagnesowaniu. Na rysunku 2.3 przedstawiono pełny system łożyskowania pędnika.

W pędniku, elektromagnesy należące do tego samego siłownika są rozmieszczone w różnych jarzmach, co odróżnia systemy łożyskowania wirników z łożyskami promieniowymi od systemu z łożyskami stożkowymi. Stąd, tak zaprojektowany węzeł łożyskowania musi być wykonany bardzo dokładnie.

Na rysunku 2.4 przedstawiono siły elektromagnetyczne generowane przez poszczególne elektromagnesy.



Rys. 2.4. Siły elektromagnetyczne generowane przez elektromagnesy łożysk

Każdy z elektromagnesów generuje siłę elektromagnetyczną, której wartość zależy od położenia wirnika w szczelinie powietrznej oraz od wartości prądu przepływającego przez cewki elektromagnesów [2]:

$$\begin{aligned}
 F_{e1} &= k_i i_{w1} + k_s w_1 + F_0, & F_{e3} &= -k_i i_{w1} - k_s w_1 + F_0, \\
 F_{e2} &= k_i i_{w2} + k_s w_2 + F_0, & F_{e4} &= -k_i i_{w2} - k_s w_2 + F_0, \\
 F_{e5} &= k_i i_{w3} + k_s w_3 + F_0, & F_{e7} &= -k_i i_{w3} - k_s w_3 + F_0, \\
 F_{e6} &= k_i i_{w4} + k_s w_4 + F_0, & F_{e8} &= -k_i i_{w4} - k_s w_4 + F_0,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

gdzie: k_i, k_s – sztywność prądowa i przemieszczeniowa elektromagnesu, F_0 – siła punktu pracy elektromagnesu w_1, w_2, w_3, w_4 – przemieszczenie wirnika w szczelinie powietrznej, $i_{w1}, i_{w2}, i_{w3}, i_{w4}$ – prąd sterujący cewkami elektromagnesów.

Ruch wirnika w szczelinie powietrznej jest złożeniem ruchu obrotowego wokół osi Oy i Oz oraz ruchu postępowego w kierunku osi Ox, Oy i Oz :

$$w = T_q q, \quad (2.2)$$

gdzie: w – wektor przemieszczeń wirnika w szczelinach powietrznych: $w = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]^T$, q – wektor przemieszczeń wirnika: $q = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta]^T$, którego elementy to: x, y, z – przemieszczenie wirnika w kierunku osi Ox, Oy i Oz , α, β – obrót wokół osi Oy i Oz , T_q – macierz transformacji:

$$T_q = \begin{bmatrix} \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & l_z \sin \gamma - l_x \cos \gamma & 0 & \dots \\ \sin \gamma & 0 & -\cos \gamma & l_z \sin \gamma + l_x \cos \gamma & \dots & 0 \\ \sin \gamma & -\cos \gamma & 0 & 0 & -l_z \sin \gamma - l_x \cos \gamma & \dots \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 & -l_z \sin \gamma + l_x \cos \gamma & \dots \end{bmatrix},$$

gdzie: l_x, l_y, l_z – odległość punktu w którym jest przyłożona siła elektromagnetyczna od środka geometrycznego wirnika (rys. 2.4), γ – nachylenie bieźni łożyska.

3. Równania ruchu obrotowego i postępowego wirnika

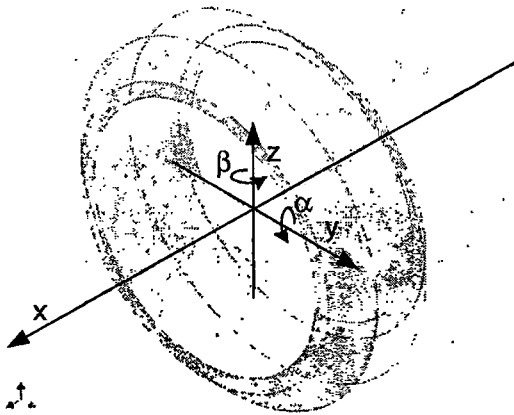
Ruch wirnika jest opisany pięcioma równaniami:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_{ex} + G_x, \\ m\ddot{y} &= F_{ey} + G_y, \\ m\ddot{z} &= F_{ez} + G_z, \\ I_y\ddot{\alpha} + (I_x - I_z)\Omega\dot{\beta} &= M_{ey} + M_{zy}, \\ I_z\ddot{\beta} - (I_x - I_y)\Omega\dot{\alpha} &= M_{ez} + M_{zz}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdzie: m – masa wirnika, I_x, I_y, I_z – momenty bezwładności, F_{ex}, F_{ey}, F_{ez} – wypadkowa siła elektromagnetyczna przyłożona do wirnika odpowiednio w kierunku osi Ox, Oy i Oz , M_{ey}, M_{ez} – moment siły elektromagnetycznej, G_x, G_y, G_z – siły zewnętrzne wytrącające wirnik z punktu pracy, M_{zy}, M_{zz} – moment siły zewnętrznej wytrącającej wirnik z punktu pracy.

Wypadkowa siła elektromagnetyczna, która przeciwdziała ruchowi wirnika w kierunku osi Ox, Oy i Oz , wynosi:

$$\begin{aligned} F_{ex} &= (F_{e1} - F_{e3}) \sin \gamma + (F_{e2} - F_{e4}) \sin \gamma + (F_{e5} - F_{e7}) \sin \gamma + (F_{e6} - F_{e8}) \sin \gamma, \\ F_{ey} &= (-F_{e5} + F_{e7}) \cos \gamma + (F_{e6} - F_{e8}) \cos \gamma, \\ F_{ez} &= (F_{e1} - F_{e3}) \cos \gamma + (-F_{e2} + F_{e4}) \cos \gamma. \end{aligned} \quad (3.2)$$



Rys. 3.1. Przesunięcie wirnika

Różnica sił elektromagnetycznych generowanych przez elektromagnesy jest równa:

$$\begin{aligned}
 F_{w1} &= 2k_1 i_{w1} + 2k_s w_1, \\
 F_{w2} &= 2k_1 i_{w2} + 2k_s w_2, \\
 F_{w3} &= 2k_1 i_{w3} + 2k_s w_3, \\
 F_{w4} &= 2k_1 i_{w4} + 2k_s w_4.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Po uwzględnieniu (3.3) w (3.2), otrzymamy:

$$\begin{aligned}
 F_{ex} &= (F_{w1} + F_{w2} + F_{w3} + F_{w4}) \sin \gamma, \\
 F_{ey} &= (-F_{w3} + F_{w4}) \cos \gamma, \\
 F_{ez} &= (F_{w1} - F_{w2}) \cos \gamma.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Następnie wyznaczmy momenty od sił elektromagnetycznych:

$$\begin{aligned}
 M_{ey} &= F_1 \sin \gamma l_z + F_2 \cos \gamma l_x + F_3 \sin \gamma l_z + F_4 \cos \gamma l_x \\
 &\quad - F_1 \cos \gamma l_x - F_2 \sin \gamma l_z - F_3 \cos \gamma l_x - F_4 \sin \gamma l_z, \\
 M_{ez} &= F_5 \sin \gamma l_y + F_6 \cos \gamma l_x + F_7 \sin \gamma l_y + F_8 \cos \gamma l_x \\
 &\quad - F_3 \cos \gamma l_x - F_6 \sin \gamma l_y - F_7 \cos \gamma l_x - F_8 \sin \gamma l_y.
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Jeżeli l_x , l_y , l_z i γ zostaną tak dobrany, by:

$$\begin{aligned}
 l_x \cos \gamma &= l_z \sin \gamma, \\
 l_z &= l_y,
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

to momenty od sił elektromagnetycznych zostaną sprowadzone do zera.

Układ równań (3.1) zastąpimy równaniem macierzowym [1]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_z,
 \tag{3.7}$$

gdzie: M – macierz masowa, G – macierz groskopowa, F_e – macierz momentów i sił elektromagnetycznych: $F_e = [F_{ex} \ F_{ey} \ F_{ez} \ M_{ey} \ M_{ez}]^T$, F_z – macierz momentów i sił zewnętrznych: $F_z = [G_x \ G_y \ G_z \ M_{zy} \ M_{zz}]^T$, \dot{q}, \ddot{q} – pierwsza i druga pochodna wektora q po czasie.

Uwzględniając w (3.7) wypadkową siłę elektromagnetyczną, otrzymamy:

$$M\ddot{q} + G\dot{q} = T_F [K_i i_w + K_s w + F_0] + F_z, \quad (3.8)$$

gdzie: K_i , K_s , F_0 – odpowiednio macierz sztywności prądowej i przemieszczeniowej elektromagnesów, T_F – macierz transformacji sił elektromagnetycznych w szczelinach powietrznych do układu globalnego związanego z wirnikiem, i_w – wektor prądów sterujących łożyskiem $i_w = [i_{w1} \ i_{w2} \ i_{w3} \ i_{w4}]^T$,

W równaniu (3.8) występuje wektor w , którego elementy mierzone są przez czujniki wiroprądowe. Ruch wirnika względem obudowy opisany jest wektorem przemieszczeń q , który nie jest bezpośrednio mierzony przez czujniki. Między przemieszczeniami q i w występuje macierz transformacji, którą wyznacza się z równań (2.2). Równania ruchu przyjmują postać:

$$M\ddot{q} + G\dot{q} = T_F [K_i i_w + K_s T_q q + F_0] + F_z, \quad (3.9)$$

gdzie: T_q – macierz transformacji między przemieszczeniami wirnika i przemieszczeniami w szczelinach powietrznych.

Do opisu pędnika wykorzystamy model w przestrzeni stanu [1]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + M^{-1}T_F F_0 + M^{-1}F_z, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (3.10)$$

gdzie: A , B , C – odpowiednio macierz stanu, wejść i wyjść pędnika:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 5} & I_{5 \times 5} \\ M^{-1}T_F K_i K_s T_q & -M^{-1}G \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 4} \\ M^{-1}T_F K_i \end{bmatrix}, \quad C = [T_q \quad 0_{4 \times 5}],$$

x – wektor stanu:

$$x = [q \quad \dot{q}]^T, \quad (3.11)$$

u – wektor sterowań:

$$u = i_w,$$

y – wektor wyjść:

$$y = w. \quad (3.12)$$

Do sterowania pędnikiem wykorzystamy regulator włączony w torze sterowania od wektora wyjść:

$$i_w = -K_R y, \quad (3.13)$$

gdzie: K_{Rr} – wzmacnienie regulatora. Uwzględniając równanie pomiaru w prawie sterowania (3.13), otrzymamy:

$$i_w = -K_{Rr} Cx. \quad (3.14)$$

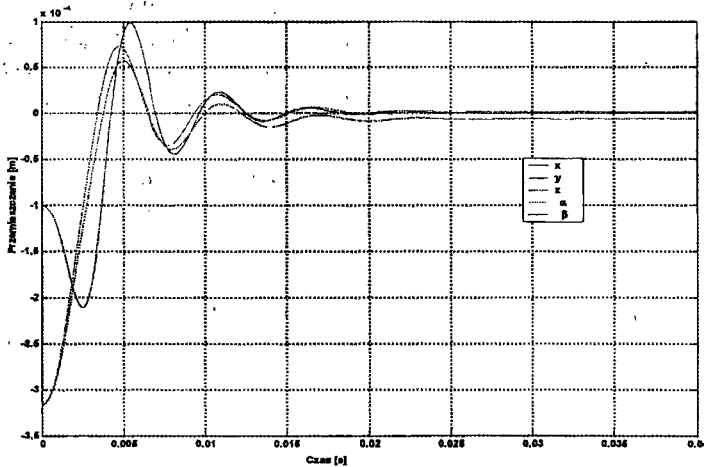
Tym samym model symulacyjny opisany będzie w przestrzeni stanu równaniami:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A - BK_{Rr}C]x + M^{-1}T_F F_0 + M^{-1}F_z, \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (3.15)$$

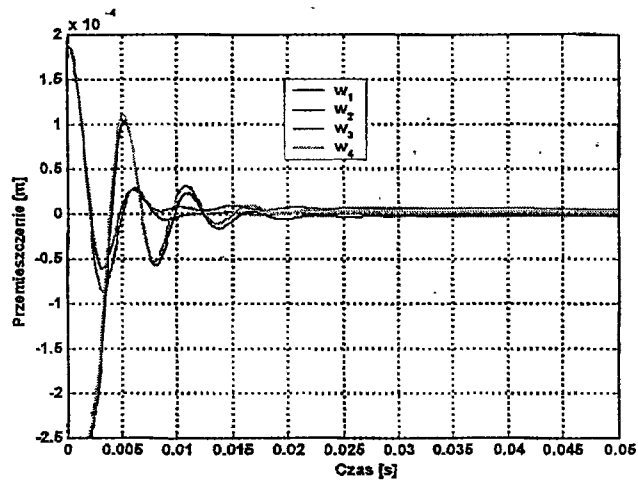
Na podstawie powyższych zależności można oszacować parametry regulatora sterującego położeniem wirnika.

4. BADANIA SYMULACYJNE

Korzystając z programu Matlab-Simulink wykonano model symulacyjny pędnika wodnego. Do sterowania modelem wykorzystano regulatory typu PID. Następnie przeprowadzono badania symulacyjne.



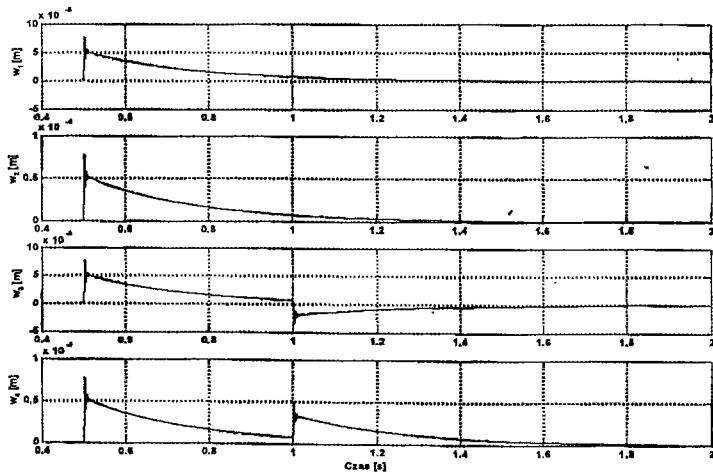
Rys. 4.1. Przemieszczenie wirnika w kierunku osi Ox, Oy i Oz z położenia spoczynkowego.



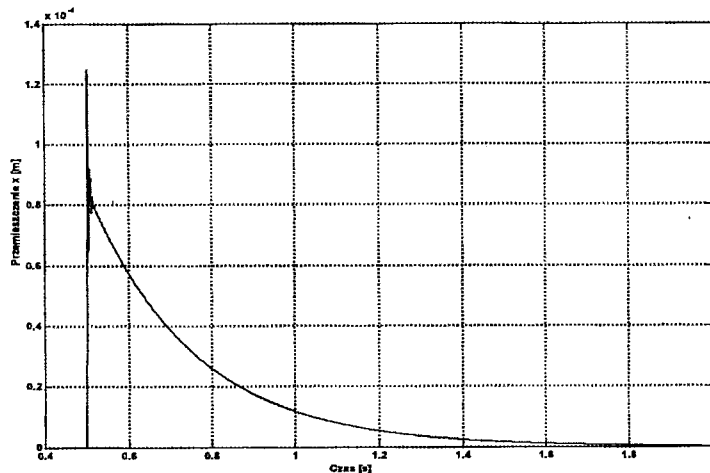
Rys. 4.2. Przesunięcie wirnika z położenia spoczynkowego

Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę ruchu wirnika w szczelinie powietrznej, po włączeniu zawieszek do pracy. Założono, że pędnik po wyłączeniu zasilania zajmuje przypadkowe położenie opierając bieżnię o elektromagnesy. Po włączeniu zasilania, układ sterowania powinien podnieść wirnik do punktu pracy. Przeprowadzono analizę ruchu wirnika w szczelinach powietrznych (w_1 , w_2 , w_3 , w_4) oraz ruchu wirnika względem obudowy (x , y , z , α , β).

Wyniki symulacji przedstawione są na rysunku 4.1 i 4.2. Wirnik po włączeniu zasilania wykonuje ruch w szczelinie i po zaniku procesu przejściowego zajmuje położenie odpowiadające punktowi pracy wirnika.



Rys. 4.3. Przesunięcie wirnika po wymuszeniu skokiem siły, która wytrąca wirnik z punktu pracy



Rys. 4.4. Przemieszczenie wirnika w kierunku osi Ox po wymuszeniu skokiem siły

W drugim etapie badań przeprowadzono analizę ruchu wirnika po wymuszeniu skokiem siły o wartości 1500 [N] w kierunku osi Ox oraz po wymuszeniu 500 [N] w kierunku promieniowym (oś Oy i Oz). Badania wykonano przy założeniu, że wirnik obraca się z prędkością 1000 [obr/min]. Ruch wirnika przedstawiony jest na rysunku 4.3 i 4.4.

5. Podsumowanie

Zastosowane w pędniku zawieszenie magnetyczne charakteryzuje się wieloma zaletami. Znakomicie nadaje się do łożyskowania wentylatorów. W wentylatorach z łożyskami stożkowymi można przenieść napęd na zewnątrz kanału przepływowego. Opierając się o podobne rozwiązania można uprościć konstrukcje wentylatorów w poduszkowcach, śmigła ogonowe w śmigłowcach, kinematycznych akumulatorów energii oraz stabilizatorów położenia sztucznych satelitów.

Zastosowanie łożysk stożkowych znacznie upraszcza konstrukcję węzła łożyskowego oraz obniża koszt jego wykonania. W węzłach z łożyskami stożkowymi występuje redukcja liczby zasilaczy, regulatorów oraz czujników, które stanowią znaczny udział w kosztach wykonania węzła. Jednak wymagana jest wysoka precyzja wykonania siłowników elektromechanicznych. Nieznaczne odchylenia w konstrukcji wirnika mogą powodować generowanie szkodliwych momentów od sił elektromagnetycznych (nie spełniony jest warunek (3.6)).

W oparciu o przedstawioną w artykule koncepcję opracowano dokumentację techniczną pędnika, która jest w trakcie realizacji.

Literatura

- [1] Pod redakcją Z. Gosiewski: „Inteligentne łożyska magnetyczne” Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej nr 7T07C03617, Warszawa 2002 r.
- [2] K. Falkowski: „Opracowanie laboratoryjnego modelu giroskopu z magnetycznie zawieszonym wirnikiem i jego badanie”, Rozprawa doktorska, Warszawa 1999 r.