

prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski  
dr inż. Krzysztof Falkowski  
Wojskowa Akademia Techniczna

mgr inż. Leszek Matuszewski  
Politechnika Gdańska

## STOŻKOWE ŁOŻYSKA MAGNETYCZNE

W artykule przedstawiono konstrukcję stożkowych łożysk magnetycznych. Ten typ łożyska znakomicie nadaje się do łożyskowania krótkich wirników o znacznych średnicach. Autorzy zastosowali łożyska magnetyczne do łożyskowania wirnika pędnika wodnego.

### THE CONICAL SHAPED MAGNETIC BEARINGS

In this paper was presented construction of conical shaped magnetic bearings. The kind of magnetic bearing has a special advantages for suspend short rotors with high diameter. Authors applied the conical shaped magnetic bearings to suspend the rotor of water propeller.

#### 1. WSTĘP

W grupie łożysk magnetycznych, podobnie jak w klasycznych łożyskach, można wyróżnić łożyska: promieniowe, osiowe i stożkowe. Przedstawiona klasyfikacja związana jest z kierunkiem przenoszonych przez łożysko obciążeń (kierunkiem generowania siły elektromagnetycznej w łożysku magnetycznym). Ponieważ łożyska generują siły elektromagnetyczne w różnych płaszczyznach, to ich konstrukcja jest różna zależnie od typu. Łożysko promieniowe przeznaczone jest do generowania sił elektromagnetycznych, które przeciwdziałają ruchom promieniowym wirnika. W systemie łożyskowania wirnika najczęściej występują dwa promieniowe łożyska, które ograniczają cztery stopnie swobody wirnika. Każde z łożysk posiada dwa siłowniki elektromechaniczne oraz dwa czujniki mierzące ruch wirnika w szczelinie powietrznej. Dopełnieniem takiego systemu łożyskowania musi być łożysko osiowe, które ogranicza ruch wzdłużny wirnika. Łożysko tego typu posiada jeden siłownik elektromechaniczny oraz co najmniej jeden czujnik określający położenie wirnika w szczelinie powietrznej łożyska. Tym samym system łożyskowania wirnika sztywnego zbudowany jest z dwu łożysk promieniowych i jednego osiowego (pięć różnicowych siłowników i co najmniej pięć czujników) [2].

Jeżeli zastosujemy łożyska stożkowe do budowy węzła łożyskowego, to możemy ograniczyć liczbę siłowników do czterech oraz zastosować tylko cztery czujniki określające położenie wirnika w szczelinie powietrznej. Dodatkową zaletą zastosowania tego typu systemów łożyskowania jest możliwość łożyskowania wirników krótkich o znacznych średnicach (wirniki posiadające kształt pierścienia lub koła). W wirnikach tego typu brak jest miejsca na umieszczenie dwu łożysk promieniowych i łożyska osiowego [1].

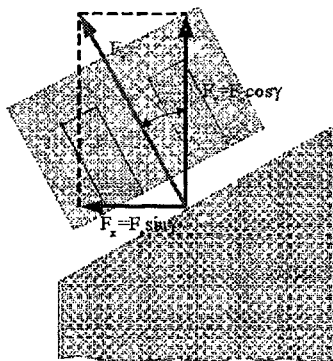
W artykule przedstawiona jest konstrukcja pędnika przeznaczonego do napędzania pojazdu podwodnego. Wirnik pędnika posiada ograniczenia, jakim jest brak miejsca na umieszczenie trzech łożysk, dlatego zastosowano łożyska stożkowe. Jednocześnie redukcji uległa liczba siłowników (elektromagnesów, wzmacniaczy mocy) i czujników mierzących położenie wirnika w szczeliny powietrznej.

## 2. ŁOŻYSKO STOŻKOWE

Siłę elektromagnetyczną generowaną przez elektromagnes łożyska stożkowego można rozłożyć na składową osiową i promieniową:

$$\begin{aligned} F_x &= F_e \sin \gamma, \\ F_y &= F_e \cos \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

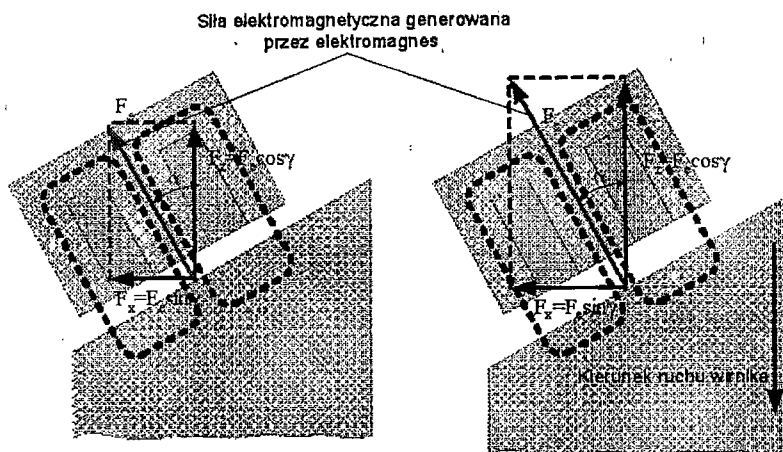
gdzie:  $F_e$  – siła elektromagnetyczna generowana przez elektromagnes,  $F_x$ ,  $F_y$  – składowa osiowa i promieniowa siły elektromagnetycznej,  $\gamma$  - nachylenie powierzchni stożkowej łożyska magnetycznego (rys. 1).



Rys. 1. Składowe siły elektromagnetycznej w łożysku stożkowym

Zmieniając wartość siły elektromagnetycznej generowanej przez elektromagnes, można przeciwdziałać ruchowi wirnika zarówno w kierunku promieniowym jak i osiowym. Jednak zmiana siły elektromagnetycznej generowanej przez pojedynczy elektromagnes spowoduje nie tylko korzystne przeciwdziałanie ruchowi wirnika, ale również wywoła ruch w drugiej płaszczyźnie łożyskowania.

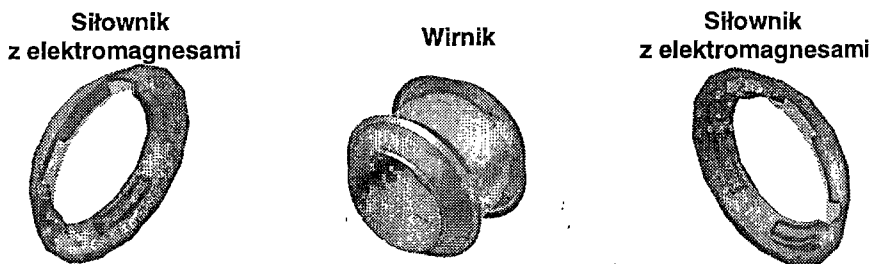
Rozpatrzmy ruch wirnika w dół co powoduje zwiększenie szczeliny powietrznej. Informacja z czujnika mierzącego położenie wirnika w szczeliny powietrznej przesyłana zostanie do układu sterowania. Następnie układ sterowania wygeneruje sygnał sterujący siłownikiem elektromechanicznym, tak by siła elektromagnetyczna została zwiększona. Siła ta powinna sprowadzić wirnik do zadanego położenia. Zwiększenie siły elektromagnetycznej powoduje zwiększenia składowej przeciwdziałającej ruchowi postępowemu, ale jednocześnie zwiększona zostanie składowa promieniowa, która będzie przyciągać wirnik do elektromagnesu (rys. 2).



Rys. 2. Zmiana składowych siły elektromagnetycznej przy ruchu zwory w łożysku stożkowym

Powyższemu zjawisku można tylko przeciwdziałać przez zbudowanie systemu łożyskowania, w którym zmiana siły elektromagnetycznej generowanej w promieniowej płaszczyźnie łożyskowania powoduje jednocześnie zmianę sił elektromagnetycznych w elektromagnesach siłowników, które przeciwdziałają ruchowi osiowemu wirnika.

Do sterowania położeniem wirnika wykorzystamy osiem elektromagnesów, które są rozmieszczone po cztery w oddzielnych jarzmach (jarzmo lewe i prawe rys. 3).

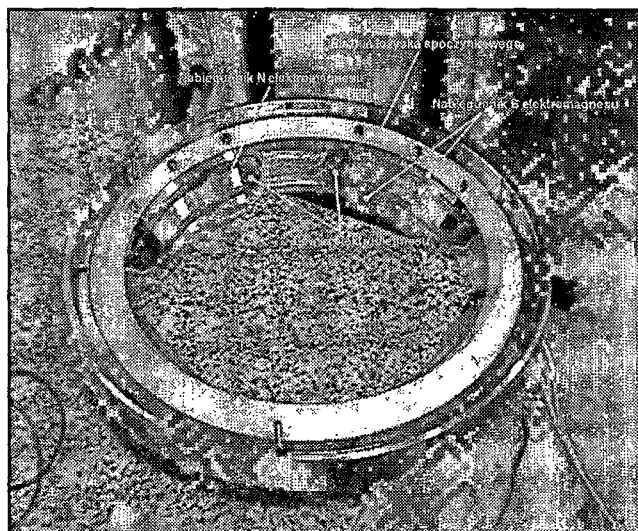


Rys. 3. System łożyskowania pędnika

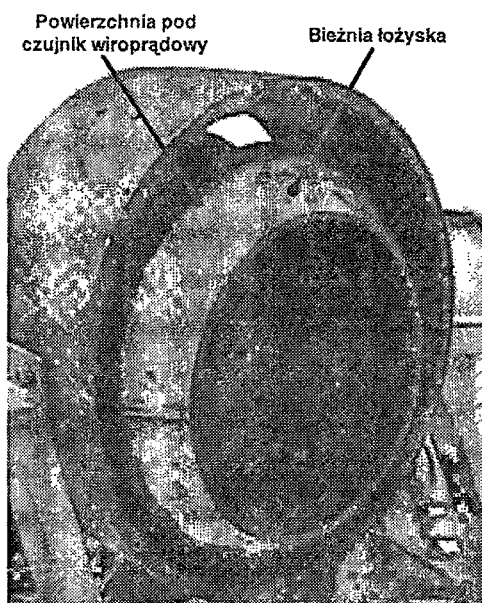
Pomiędzy jarzmami znajduje się łożyskowany wirnik, z powierzchniami stożkowymi. Powierzchnie te stanowią bieżnie łożyska oraz powierzchnie pod czujniki pomiarowe mierzące położenie wirnika w szczeliny powietrznej. Jarzma są wykonane symetrycznie tym samym każda z cewek elektromagnesów posiada dokładnie tą samą liczbę zwojów. Węzeł łożyskowania pędnika jest symetryczny mechanicznie i magnetycznie.

Na rysunku 4 przedstawione jest jarzmo łożyska magnetycznego z zaznaczonymi nabiegownikami północnym (N) i południowym (S) oraz nawiniętą cewką elektromagnesu. Bezpośrednio w jarzmie umieszczony jest specjalny pierścień z tworzywa sztucznego (bieżnia łożyska spoczynkowego rys. 4), który ogranicza ruch

wirnika w szczelinie powietrznej. Pierścień zabezpiecza wirnik i elektromagnesy przed uszkodzeniem przy nadmiernych przemieszczeniach wirnika (np. stany awaryjne pracy pędnika i nadmierne przypadkowe wymuszenia).



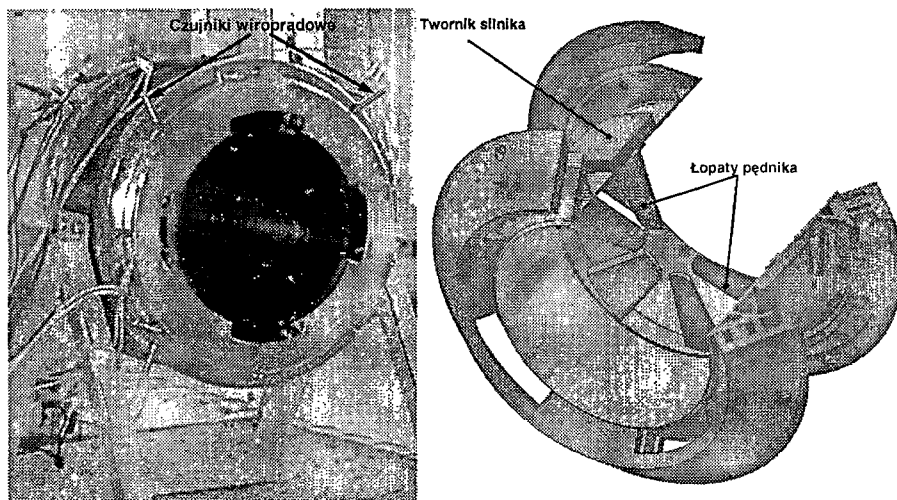
Rys. 4. Elektromagnesy łożyska stożkowego



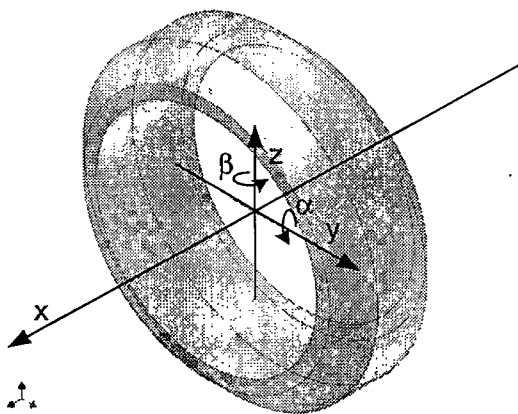
Rys. 5. Wirnik pędnika z bieżnią łożyska magnetycznego i powierzchnią pod czujnik pomiarowy

W jarzmie i pierścieniu umieszczone są nagwintowane otwory do mocowania bezkontaktowych wiroprowadzących czujników przemieszczeń.

Na wirniku umieszczone są ferromagnetyczne pierścienie, które są bieźniami łożyska magnetycznego pierścienia zamykają obwody magnetyczny siłowników. Powyżej bieźni łożyska znajduje się powierzchnia stożkowa z materiału diamagnetycznego, która współpracuje z czujnikami wiroprowadzowymi. Bieźnie łożysk i powierzchnie pod czujniki rozmieszczone są symetrycznie na wirniku. Taka konstrukcja wirnika pozwala umieścić w centralnej części wirnika silnik napędowy pędnika wodnego (rys. 6).



Rys. 6. Pędnik na stanowisku laboratoryjnym



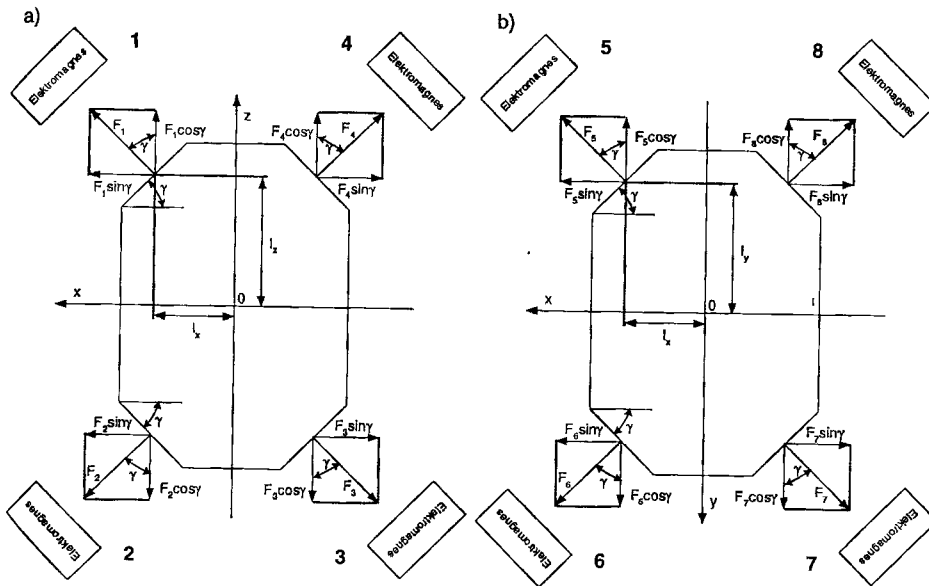
Rys. 7. Układ współrzędnych związanych z pędnikiem

W tak wykonanym pędniku wybrane zostały pary elektromagnesów, które po objęciu pętlą sprzężenia zwrotnego wykorzystano do zbudowania różnicowych siłowników elektromechanicznych [3]. Mechanizm sterowania siłownikiem jest identyczny jak w siłowniku łożyska promieniowego [2]. Cztery czujniki wiroprowadzowe mierzą położenie

wirnika w szczelinie powietrznej  $w_1, w_2, w_3$  i  $w_4$ . Ruch wirnika w szczelinie powietrznej jest sumą ruchu postępowego i obrotowego wirnika, stąd rejestrowane przez czujniki przemieszczenia odpowiednio wynoszą [3]:

$$\begin{aligned} w_1 &= x \sin \gamma + z \cos \gamma + (l_z \sin \gamma - l_x \cos \gamma) \alpha, \\ w_2 &= x \sin \gamma - z \cos \gamma + (l_z \sin \gamma + l_x \cos \gamma) \alpha, \\ w_3 &= x \sin \gamma - y \cos \gamma - (l_y \sin \gamma + l_x \cos \gamma) \beta, \\ w_4 &= x \sin \gamma + y \cos \gamma - (l_y \sin \gamma - l_x \cos \gamma) \beta, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $x, y, z$  – przemieszczenie wirnika w kierunku osi  $Ox, Oy$  i  $Oz$ ,  $\alpha, \beta$  – obrót wokół osi  $Oy$  i  $Oz$ ,  $\gamma$  – nachylenie bieżni łożyska,  $l_x, l_y, l_z$  – odległość punktu w którym jest przyłożona siła elektromagnetyczna od środka geometrycznego wirnika (rys. 7).



Rys. 8. Składowe siły elektromagnetyczne w pedniku

Jeżeli w wirniku zapewniona jest symetria mechaniczna i magnetyczna to zmniejszenie szczeliny pod elektromagnesem 1 o  $w_1$ , powoduje zwiększenie szczeliny pod elektromagnesem nr 3. Podobnie szczeliny zmieniają się pod pozostałymi elektromagnesami. Tym samym do sterowania łożyskiem możemy zastosować rozwiązania wykorzystywane w promieniowych i osiowych łożyskach magnetycznych [2]. Podstawowym elementem odróżniającym łożyska stożkowe od promieniowych to umieszczenie elektromagnesów należących do tego samego siłownika w dwu różnych jarmach. W takim rozwiązaniu unikamy sprzężeń magnetycznych między obwodami magnetycznymi elektromagnesów. Jednak elektromagnesy i wirnik muszą być wykonane bardzo dokładnie ze względu na zachowanie symetrii mechanicznej.

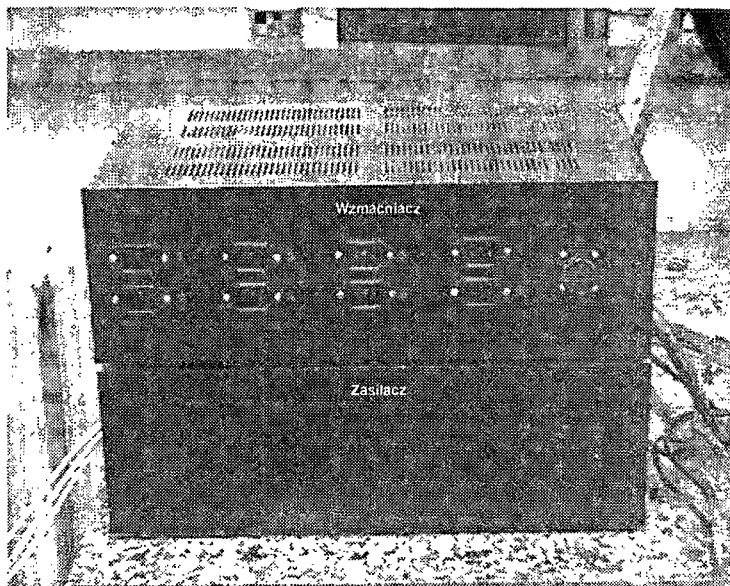
Szczegóły sterowania siłownikami elektromechanicznymi pednika omówione zostały przez autorów w [1] i [3].

### 3. WZMACNIACZ MOCY PWM

Integralnym elementem siłownika elektromechanicznego jest wzmacniacz mocy. Elektromagnes w połączeniu z wzmacniaczem oraz zasilaczem stanowi pełny siłownik elektromechaniczny. W tym miejscu należy rozszerzyć i wyjaśnić pojęcie zasilacza i wzmacniacza. Większość używanych urządzeń jest zasilana z dostępnej sieci energetycznej jedno lub trójfazowego prądu przemiennego. Zadaniem zasilacza jest zamiana prądu przemiennego na stały oraz dostarczenie napięć o amplitudzie wymaganej przez układy elektroniczne wzmacniaczy. Zasilacz powinien zapewnić moc niezbędną do prawidłowej pracy całego systemu łożyskowania magnetycznego.

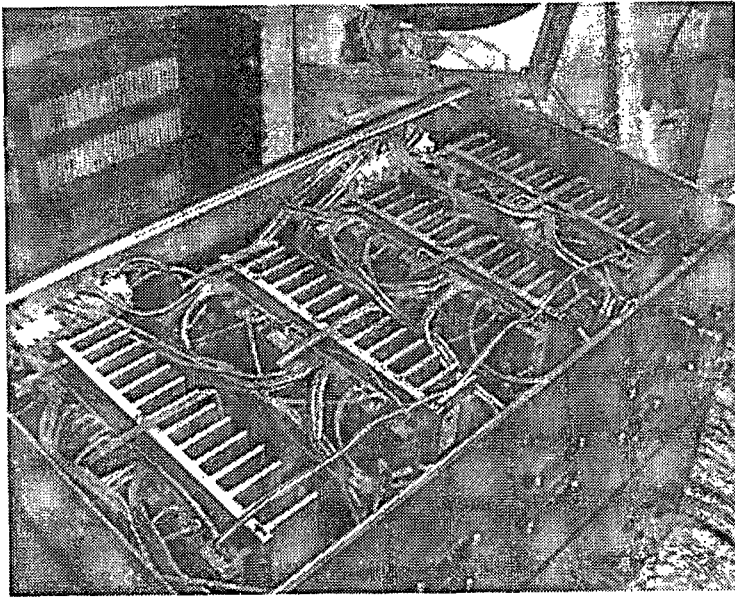
Wzmacniacz mocy pełni funkcję precyzyjnego układu dostarczania energii do łożyska magnetycznego. W siłownikach elektromechanicznych wzmacniacze muszą być sterowane zewnętrznym sygnałem cyfrowym lub analogowym. Takie parametry wzmacniaczy jak moc oraz pasmo przenoszenia, decydują o właściwościach dynamicznych łożyska magnetycznego.

W pędniku wodnym zastosowano wzmacniacze mocy z modulacją szerokością impulsu (PWM ang. pulse with modulation). Przygotowany został specjalny uniwersalny zestaw zbudowany z zasilacza oraz ośmiu wzmacniaczy mocy (rys. 9 i 10).

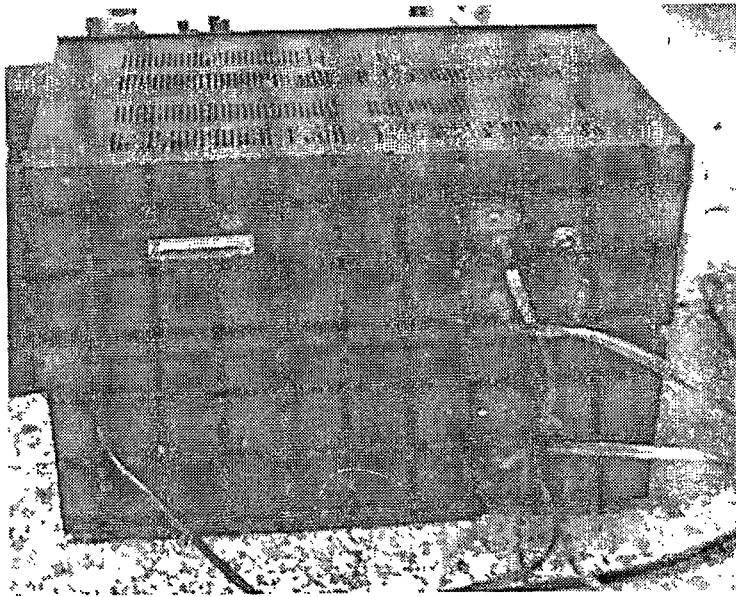


Rys. 9. Zasilacz i wzmacniacze pędnika wodnego

Zasilacz dostarcza do systemu napięcie prądu stałego stabilizowane 24 [V] i  $\pm 15$  [V]. Wzmacniacz składa się z ośmiu niezależnych kanałów, z których każdy jest oddzielnie sterowany zewnętrznym sygnałem napięciowym 0+10 [V].



Rys. 10. Wzmacniacze pędnika wodnego



Rys. 11. Tylny panel z złączami zasilacza oraz złączem kontrolnym

Zarówno zasilacz jak i wzmacniacz wyposażony jest w złącza, którymi przesyłane są sygnały sterujące z regulatora cyfrowego oraz wysyłane sygnały energetyczne do cewek elektromagnesów (zadana wartość prądu w cewce elektromagnesu). Zestaw wyposażony został w dodatkowe złącze umożliwiające monitorowanie sygnałów



sterujących cewkami elektromagnesów (napięcie 0+10 [V] odpowiadające zakresowi prądów sterujących – rys.11).

Uniwersalny zestaw zasilania może zostać wykorzystany w dowolnym łożysku magnetycznym, którego cewki dostosowane są do pracy przy maksymalnym prądzie do 10 [A] i prądzie punktu pracy maksymalnie do 5 [A]. Moc dostarczana przez wzmacniacz wynosi 240 [W].

#### 4. PODSUMOWANIE

Zaprojektowany węzeł łożyskowy może być wykorzystany do łożyskowania wirników charakteryzujących się znacznymi średnicami. Tym samym zaproponowane rozwiązanie może być wykorzystane w napędach wentylatorowych poduszkowców, w śmigłowcach za pomocą pędnika można zastąpić śmigło ogonowe. Szczególnie liczne zastosowanie znajdują tego typu urządzenia w technice morskiej (stery strumieniowe, napęd w pojazdach i robotach podwodnych) [3].

Dodatkową zaletą zaproponowanego rozwiązania jest zastosowanie łożyska magnetycznego, które znacznie poprawia właściwości eksploatacyjne urządzeń czyniąc je bezobsługowymi. W klasycznych systemach łożyskowania, łożyska ulegają szybkiemu zużyciu. Podczas manewrowania pojazdu występuje silny moment giroskopowy, który powoduje niszczenie klasycznych łożysk. Dodatkowo sygnały z czujników można wykorzystać do monitorowania stanu technicznego pojazdu.

Pomimo wielu zalet przedstawionego rozwiązania występują ograniczenia przy przenoszeniu obciążeń osiowych. Jeżeli chcemy uzyskać dużą siłę osiową to powinniśmy dążyć do jak największego kąta  $\gamma$ . Jednak znaczne nachylenie powierzchni powoduje silne sprzężenia pomiędzy siłownikami. Zastosowany przez autorów kąt nachylenia  $38^\circ$  zabezpiecza uzyskanie pożądanej składowej osiowej siły elektromagnetycznej, jednak powoduje silne sprzężenia między siłownikami.

Najprostszym rozwiązaniem jest zmiana kąta nachylenia powierzchni stożkowych siłowników i bieżni. Zmiana taka powoduje znaczne obniżenie składowej osiowej siły elektromagnetycznej, która jest podstawową składową przenoszącą główne obciążenie.

W większości opracowań, gdzie omawiane są rozwiązania z łożyskami stożkowymi, stosuje się kąty z zakresu  $15^\circ$ + $20^\circ$  [4]. Dobór optymalnego kąta, zapewniającego uzyskanie odpowiednich składowych siły osiowej przy ograniczeniu sprzężeń między siłownikami jest przedmiotem dalszych prac autorów.

#### Literatura:

1. Gosiewski Z., Falkowski K. „”,Konferencja Automation 2003, str. 399-406, Warszawa, marzec 2003.
2. Gosiewski Z., Falkowski K.: „Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne” - Monografia, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003 r.
3. Falkowski K., Matuszewski L.: “Ring Thruster With Magnetic Bearings”, International Conference OCEANS2003, San Diego, USA, 2003.
4. Jussi K. Lahteenmaki, Erkki J. Lantto: “Optimalization of the conical angle of cone – shaped active magnetic bearings”, Sixth International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 224-233, USA, 1998.