

prof. dr hab. inż. Józef LISOWSKI
mgr inż. Józef MAŁECKI
Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

STEROWANIE PRECYZYJNE RUCHEM JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ

W referacie przedstawiony jest problem sterowania jednostką pływającą poruszającą się z niewielką prędkością za pomocą steru strumieniowego. Sterowanie odbywa się w zamkniętym układzie sterowania automatycznego. Jako obiektu sterowania użyto modelu statku typu B-481 wyposażonego w stery strumieniowe. Opracowano program pozwalający na symulację procesu sterowania. Zamieszczono i opisano wyniki jego działania.

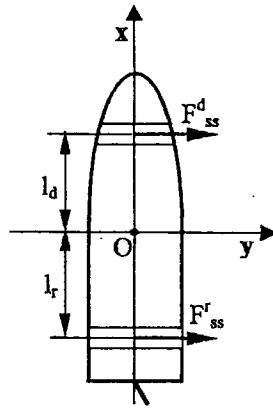
PRECISION CONTROL OF SHIP'S MOTION

In this paper is presented problem precision control of ship's motion of assistance the trusters. Control of ship's is in automatic control system. The control object is mathematical model of ship B-481 with thrusters. Make simulation computer program works in automatic control of ship's. The results his actions are described.

1. WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych zagadnień występujących obecnie w nawigacji morskiej jest zapewnienie bezpieczeństwa statku poruszającego się z małą prędkością np. w basenie portowym lub w kanale. Dlatego jednostki o większym tonażu coraz częściej wyposażane są w stery strumieniowe. Jest to niezwykle istotne ponieważ podczas manewrowania z niewielką prędkością klasyczny ster traci swą efektywność – jednostka staje się niesterowna. Rozwiązaniem w takim przypadku może być wykorzystanie w procesie sterowania sterów strumieniowych. Sterowanie statkiem za pomocą sterów strumieniowych odbywa się na podstawie doświadczenia i wiedzy kapitanów z zakresu znajomości ogólnych zasad działań steru strumieniowego i bezwładności statku. Dlatego istotnym jest poznanie zasad sterowania precyzyjnego, które w pełni zobrazowałoby użycie steru strumieniowego. W pracy przedstawiony jest program symulujący działanie jednostki pływającej sterowanej sterami strumieniowymi. Program pozwala zapoznanie się z zasadami sterowania za pomocą sterów strumieniowych. W układzie sterowania ruchem okrętu za pomocą steru strumieniowego w ograniczonym akwencie wielkością sterującą jest siła naporu steru F_s lub prędkość strumienia wody, a wyjściową kurs ψ .

Stery strumieniowe z tunelem cylindrycznym, prostopadłym do płaszczyzny symetrii statku, są obecnie najczęściej stosowanymi urządzeniami pomocniczymi służącymi do sterowania statkiem. Charakteryzują się one prostą budową i łatwą obsługą oraz niezawodnością podczas pracy. Zasada działania steru strumieniowego pokazana jest na rys. 1.



W tunelu umieszczony jest pędnik (ze śrubą stałą lub nastawną), który poprzez obrót śruby przepompowuje wodę z jednej burty na drugą. Powstaje w ten sposób siła naporu (F^d_{ss} , F^r_{ss}) oddziałująca na kadłub w miejscu jego połączenia z pędnikiem. Siła ta jest przeciwnie skierowana do kierunku ruchu strumienia przepływającej tunelem wody.

Oznaczenia przyjęte na rysunku to:

F^d_{ss} – siła naporu steru dziobowego;

F^r_{ss} – siła naporu steru rufowego;

l_d , l_r – odległość sterów od środka ciężkości okrętu O;

O – środek ciężkości jednostki.

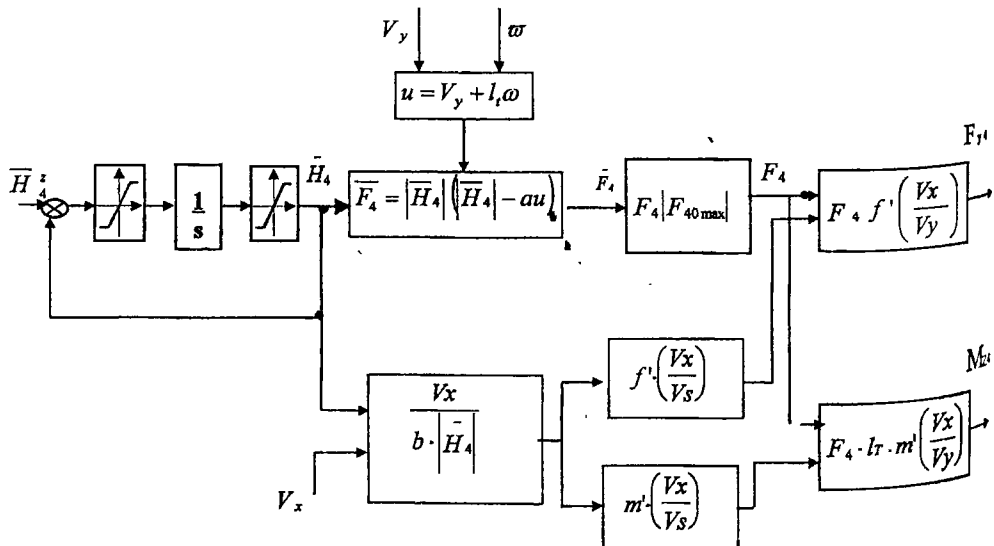
Rys. 1. Siły naporu sterów strumieniowych: dziobowego F^d_{ss} i rufowego F^r_{ss}

2. MODEL STERU STRUMIENIOWEGO

Aby opracować model matematyczny steru strumieniowego przyjęto następujące założenia:

- pędnikiem steru jest śruba nastawna,
- tunel steru znajduje się poniżej linii wodnej,
- w pobliżu wylotu tunelu nie występują rozległe przeszkody stałe, mogące spowodować spadek efektywności pracy steru,
- oś tunelu leży dokładnie w płaszczyźnie poziomej,
- czas pracy steru z pełnym obciążeniem jest nieograniczony.

Schemat blokowy modelu steru strumieniowego wg [3] przedstawiony jest na rys.2.



Rys.2. Schemat blokowy modelu steru strumieniowego.

Właściwości dynamiczne mechanizmu zmiany skoku śruby steru strumieniowego oraz układu sterowania nadeżnego skokiem opisane są w pracy [3]. Ważniejsze oznaczenia na powyższym rysunku to:

\dot{H}_4 - chwilowa prędkość zmiany skoku śruby steru strumieniowego,

$\dot{H}_{4\max}$ - prędkość maksymalna skoku,

$\bar{H}_4(H_4^z)$ - względny skok rzeczywisty (zadany),

d_4 - próg nasycenia układu hydraulicznego zmiany skoku.

\bar{F}_{40} - względna siła naporu steru strumieniowego przy prędkości okrętu $V=0$,

F_{40} - wartość rzeczywista siły naporu steru przy prędkości okrętu $V=0$,

Ruch statku znacząco wpływa na efektywność pracy sterów strumieniowych [1]. Na efektywność pracy steru strumieniowego ma także wpływ prędkość statku w kierunku własnej osi. Analiza takiego problemu zawarta jest w wielu publikacjach m.in. w [2, 13, 14]. Wyniki badań modeli fizycznych wykazują, że główną przyczyną zmniejszania się siły i momentu steru strumieniowego na płynącym statku jest powstawanie obszaru podciśnienia wzdłuż burty statku, po stronie wylotowej steru. Powstaje wówczas tzw. siła ssania, która jest zawsze skierowana przeciwnie do siły naporu śruby steru. Obecny stan wiedzy nie pozwala na dokładne określenie zależności siły i momentu steru strumieniowego od parametrów ruchu statku i parametrów konstrukcyjnych kadłuba. Określa się to jedynie metodami empirycznymi, umożliwiającymi oszacowanie tych zależności np.: metoda Norrbina [6], Ridley'a [11], Niemann [13].

3. PROCES STEROWANIA

Uproszczeniem uogólnionego opisu dynamiki statku jako obiektu sterowania sterem strumieniowym jest sprowadzenie nieliniowych równań stanu [4] do równania liniowego i przedstawienie go w postaci transmitancji. Linearyzacja opisu nieliniowego dokonywana jest dla małych zmian współrzędnych stanu procesu wokół ustalonego punktu pracy (X_0, Y_0, Ψ_0, Ψ) przy stałej prędkości poruszania się statku: $F_{ss} = F_{ss0} = const.$, $V_0 = const.$ Wówczas nieliniowe równania stanu przyjmują następującą postać równań liniowych: i po przekształceniu Laplace'a [3] tych równań otrzyma się następujące postacie transmitancji statku sterowanego sterem strumieniowym:

$$G_1(s) = \frac{\Psi(s)}{F_{ss}(s)} = \frac{k_1 \cdot (1 + T_3 \cdot s)}{s \cdot (1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)} \quad (1)$$

oraz:

$$G_2(s) = \frac{\beta(s)}{F_{ss}(s)} = \frac{k_2 \cdot (1 + T_4 \cdot s)}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)} \quad (2)$$

gdzie:

a_i, b_i - współczynniki niezależne od zmiennych stanu ani od wielkości sterujących i zakłócających,

β - kąt dryfu,

Ψ - kurs statku,

F_s - siła naporu śruby napędowej statku,

F_{ss} - siła naporu śruby steru strumieniowego,

V_0 - prędkość początkowa statku.

k_1, k_2 - wartości współczynników wzmacnienia

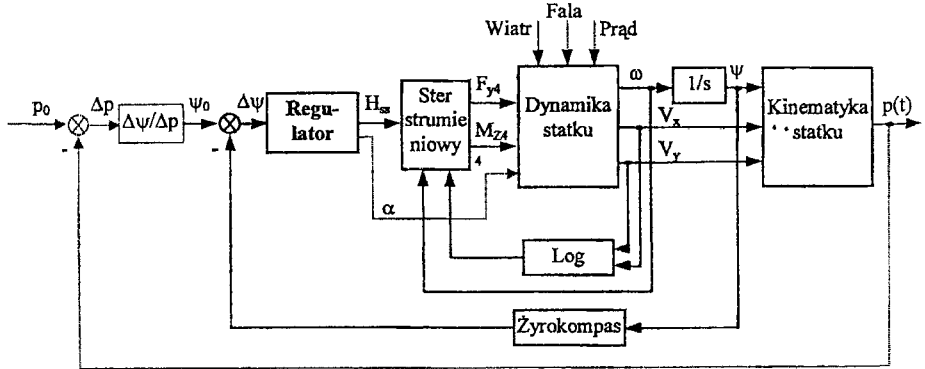
Transmitancja statku, jako obiektu regulacji kursu za pomocą oddziaływania steru strumieniowego, przedstawia jego własności inercyjne pierwszego rzędu z opóźnieniem o charakterze astatycznym. Natomiast transmitancja statku, jako obiektu regulacji kąta dryfu przez wykorzystanie do tego celu steru strumieniowego, przyjmuje postać inercji pierwszego rzędu z opóźnieniem, lecz o działaniu statycznym.

Wartość współczynnika wzmocnienia k_1 jest odwrotnie proporcjonalna do ustalonej prędkości poruszania się statku, a k_2 odwrotnie proporcjonalna do kwadratu tej prędkości. Stałe czasowe są odwrotnie proporcjonalne do prędkości statku. Wartości parametrów transmitancji statku: $k_1, k_2, T_1, T_2, T_3, T_4$ zależą (oprócz prędkości) od następujących wielkości [4]:

- załadowania statku,
- momentu bezwładności statku względem osi pionowej,
- współczynników hydrodynamicznych uogólnionych równań dynamiki statku,
- zakłóceń (falowanie, wiatr, prąd).

4. PROGRAM SYMULACYJNY

Program bazuje na następującej strukturze zamkniętego układu sterowania statkiem przy użyciu steru strumieniowego [4, 15].



Rys. 3. Schemat blokowy zamkniętego układu sterowania.

Aby sterować modelem statku należy zadawać wartości prędkości V , wychYLENIA łopatek sterów strumieniowych H_{sr} oraz wychYLENIA steru płetwowego α . Rys. 4 przedstawia widok ekranu programu symulacyjnego. Główną część ekranu zajmuje akwen, pośrodku którego znajduje się obrys kadłuba użytego modelu statku (widok z góry). Po lewej stronie umieszczone są cztery wskaźniki. Pierwszy (najwyższy) dotyczy prędkości wzdłużnej statku. Wskazówka grubsza wskazuje rzeczywistą prędkość statku, natomiast cieńsza (w chwili wejścia do programu pokrywa się z grubszą) odwzorowuje wartość zadaną. Pod wskaźnikami na jaśniejszym polu obie wartości wyświetlane są za pomocą cyfr (wartość zadana - z lewej, wartość rzeczywista z prawej strony). Analogicznie zbudowane są wskaźniki, które wskazują wychYLENIE łopatek śrub sterów strumieniowych oraz wskaźnik wychYLENIA steru płetwowego. W chwili początkowej wskaźówki tych wskaźników ustawione są na wartość zero. Na dolnej listwie umieszczone są aktualne współrzędne położenia statku odniesione do jego współrzędnych (X - oś pionowa, Y - oś pozioma) oraz aktualny kurs statku.

W górnej części ekranu znajduje się menu główne z interfejsem operatora.

Możliwe są dwa tryby sterowania modelem statku:

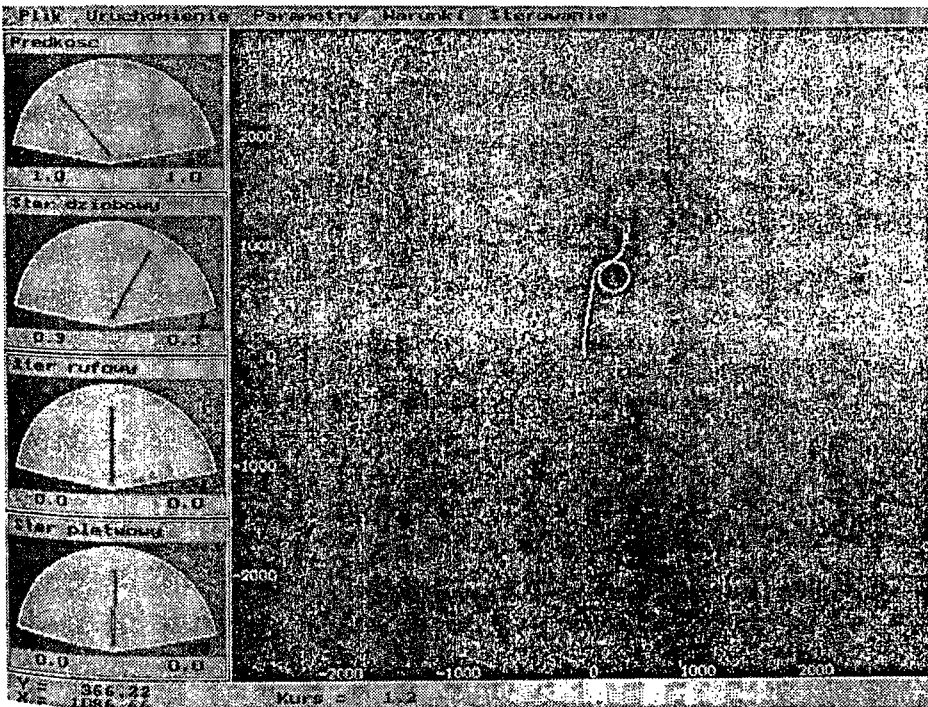
- sterowanie ręczne - ręczne ustawianie wartości prędkości wzdłużnej, wychylenia łopatek sterów strumieniowych oraz wychylenia steru płetwowego.
- sterowanie automatyczne - prędkość ustala się samoczynnie na wartość 1 węzła, a układ sterowania zostaje zamknięty sprzężeniem zwrotnym poprzez regulator PID.

W programie symulacyjnym został użyty regulator PID o transmitancji:

$$G(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

Regulator utrzymuje zadany kurs poprzez sterowanie dziobowym sterem strumieniowym. Zmiany kursu zadanego oraz parametrów regulatora k_p , T_i , T_d można dokonywać w menu głównym. Podczas sterowania automatycznego można korygować nastawy prędkości, wychylenia steru płetwowego oraz wychylenia łopatek strumieniowego steru rufowego. Daje to możliwość precyzyjnego sterowania prędkością poprzeczną statku na zadanym kursie.

W czasie symulacji na ekranie pozostaje ślad toru po jakim poruszał się środek ciężkości modelu w czasie symulacji, uwidocznione to jest na rys. 4.



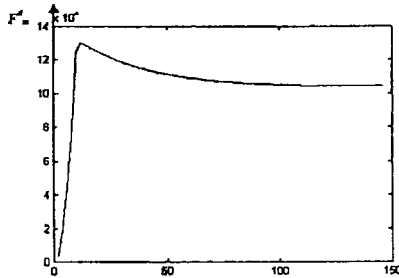
Rys. 4. Widok ekranu programu symulacyjnego.

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

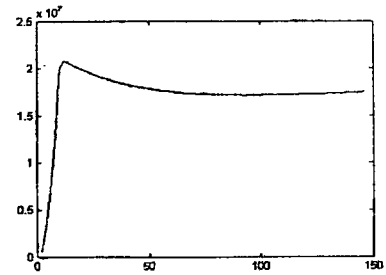
Do symulacji sterowania statkiem przy pomocy sterów strumieniowych wykorzystany został model matematyczny statku typu B - 481. Parametry konstrukcyjne statku, potrzebne do obliczenia współczynników modelu oraz opis tego modelu zawiera praca [3]. Model wyposażony jest w dwa stery strumieniowe - dziobowy i rufowy.

5.1. Badania symulacyjne w procesie sterowania ręcznego

Badania przeprowadzono przy pełnym załadunku statku, przy różnej prędkości wzdłużnej, aby określić zależność sił F_{ss} i momentów M_{ss} sterów strumieniowych w dziedzinie czasu. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych modelu jednostki dla steru dziobowego: prędkość statku $V = 0$, wychylenie łopatek obu sterów maksymalnie w prawo.



Rys 5. Zależność $F_{ss}^d(t)$.



Rys. 6. Zależność $M_{ss}^d(t)$.

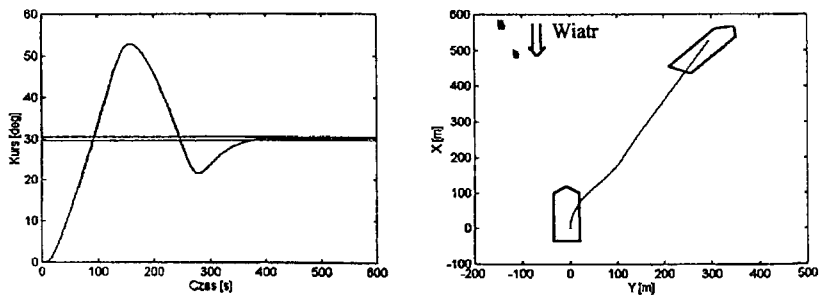
5.2. Badania symulacyjne podczas sterowania automatycznego

Próby wykonano dla różnych zmian kursu zadanego z kursu pod wiatr przy różnych warunkach pogodowych (zmiana siły wiatru) i dla dwóch nastaw regulatora.

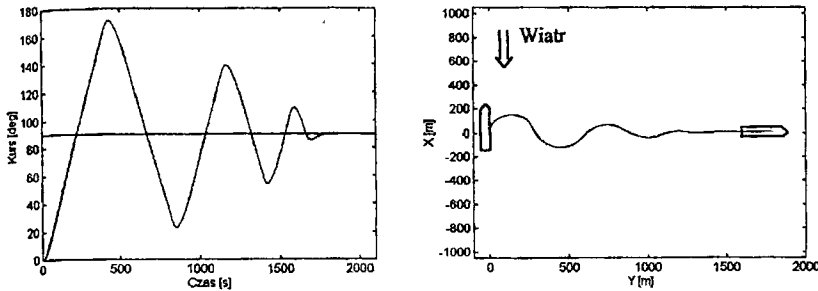
a) nastawy Zieglera - Nicholsa

Doboru nastaw dokonano poprzez ustawienie regulatora na działanie tylko członu P i doprowadzenie zamkniętego układu regulacji do drgań niegasnących. Po ustaleniu krytycznego współczynnika wzmocnienia k_{kr} i czasu oscylacji T_{osc} wyznaczono nastawy regulatora: $k_p = 0,6$ $k_{kr} = 0,6$ $T_i = 0,5$ $T_{osc} = 60$ $T_d = 0,125$ $T_{osc} = 15$.

Poniżej przedstawiono zależności ilustrujące przebiegi czasowe kursu oraz trajektorie statku podczas wykonywanych manewrów. Badania przeprowadzono przy pełnym załadunku statku przy prędkości wzdłużnej równej 1 [w].



Rys. 7. Przebieg czasowy kursu statku $\psi = f(t)$ i trajektoria statku podczas manewru zmiany kursu o 30° przy sile wiatru $3^\circ B$.

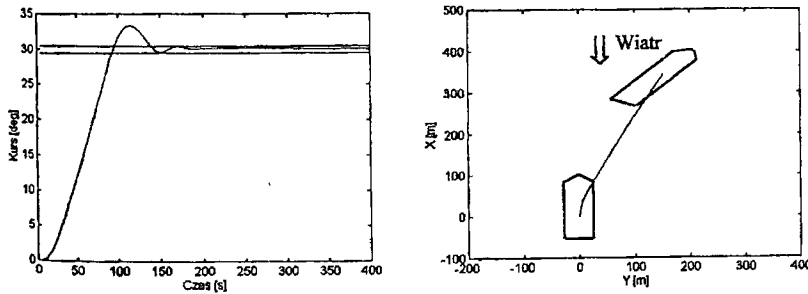


Rys. 8. Przebieg czasowy zmiany kursu statku $\psi = f(t)$ i jego trajektoria podczas manewru zmiany kursu o 90° przy sile wiatru 3° B.

b) nastawy dobrane w sposób heurystyczny

Doboru nastaw dokonano doświadczalnie poprzez analizę działania układu regulacji. Dobrane nastawy wynoszą: $k_p = 2$ $T_i = 100000$ $T_d = 10$.

Poniżej przedstawiono wykresy ilustrujące przebiegi czasowe kursu oraz trajektorie statku podczas wykonywanych manewrów. Badania przeprowadzono przy pełnym załadunku statku przy prędkości wzdłużnej równej 1 [w].



Rys. 9. Przebieg czasowy kursu statku $\psi = f(t)$ i trajektoria statku podczas manewru zmiany kursu o 30° przy sile wiatru 3° B.

6. WNIOSKI

Wykonane badania symulacyjne wykazały, że skuteczność działania poprzecznych sterów strumieniowych zależy w dużym stopniu od prędkości ruchu statku względem wody. Największe wartości siły naporu oraz momentu, a więc największą skuteczność działania ster strumieniowy osiąga przy prędkościach ruchu statku równych lub bliskich zero. Jeśli prędkość statku wzrasta wartości siły i momentu gwałtownie maleją i osiągają minimum przy około 5 [w]. Przy większych prędkościach następuje ponowny wzrost siły i momentu. Badania symulacyjne wykazały również, że użycie sterów strumieniowych na zatrzymanym modelu powoduje nadanie mu nie tylko prędkości poprzecznej, ale także wzdłużnej. Kurs statku zmienia się nieznacznie w prawo podczas ustalonej prędkości zadanej silnika napędu głównego przy zerowych nastawach wychylenia łopatek sterów strumieniowych, co jest wywołane oddziaływaniem steru strumieniowego na kadłub statku i zachodzi również w warunkach rzeczywistych. Stanowi to dowód na to, że model w realistyczny sposób odwzorowuje obiekt rzeczywisty.

Zastosowanie nastaw Zieglera - Nicholasa pozwoliło na obserwacje układu sterowania. Dzięki temu nastawy regulatora można było skorygować tak aby polepszyć jakość regulacji. W wyniku badań i analizy wyników uzyskano nastawy regulatora PID, które znacznie polepszają wskaźniki regulacji. Takie wskaźniki jakości regulacji pozwalają na stwierdzenie, że przy małych prędkościach statku (ok. 1 [w]) stabilizacja kursu może odbywać się za pomocą tylko dziobowego steru strumieniowego przy współpracy z regulatorem PID o odpowiednich nastawach. Regulacja kursu może odbywać się dla szerokiego zakresu zmian kursu zadanego (do 180 [deg]) oraz warunków pogodowych (do 5 w skali Beauforta).

LITERATURA

1. Gajek J., *Zespół silnik wysokoprężny - śruba nastawna - kadłub statku jako obiekt sterowania*. Bud. Okr., nr 2, 1972.
2. Galbas J., *Skuteczność manewrowania dziobowych sterów strumieniowych w zakresie ograniczonej prędkości statku*. Bud. Okr., nr 1, 1982.
3. Galbas J., *Synteza układu sterowania precyzyjnego statkiem za pomocą sterów strumieniowych*. Praca doktorska, Gdańsk 1988.
4. Galbas J., Lisowski J., Krajczyński E., *Okrętowe stery strumieniowe*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1986.
5. Kulikow S., Hramkin M., *Wodometnyje dwiziteli*, Sudostrojenie, Leningrad 1980.
6. Lebediew E., Pierszyc R., Rusickij A., *Sredstva aktywnogo uprawlenija sudami*, Sudostrojenie, Leningrad 1969.
7. Lisowski J., *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1981.
8. Norrby R., *Evaluation of side thruster performance*. Int. Shipbuild. Progr. No. 8, 1974.
9. Nowicki A., *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1978.
10. Ostrowski W., *Weryfikacja modelu dynamiki statku sterowanego przy pomocy steru strumieniowego*, Praca magisterska WSM, Gdynia 1982.
11. Ridlay D., *Observations on the effect of vessel speed on bow thrusters performance*. Mar. Technology. No. 7, 1969.
12. Wełnicki W., *Sterowność okrętu*, PWN, Warszawa 1966.
13. Więckiewicz W., *Efektywność pracy sterów strumieniowych na pływających statkach*. Bud. Okr. nr 1 1984.
14. Więckiewicz W., *Spadek efektywności pracy dziobowego steru strumieniowego na pływającym statku*. Praca doktorska, IMP PAN Gdańsk 1986.
15. Psujek K., *Opracowanie i badania układu sterowania statkiem z wykorzystaniem steru strumieniowego*, praca magisterska, WSM, Gdynia 1999.