

PROJEKT MIKROPROCESOROWEGO SYSTEMU STEROWANIA PRECYZYJNEGO JEDNOSTKĄ PLYWAJĄCĄ

Streszczenie: w ramach niniejszej pracy podjęto próbę implementacji algorytmu sterowania precyzyjnego ruchu okrętu poruszającego się z minimalnym odchyleniem bocznym wzdłuż zadanej trajektorii na mikrokontrolerze 8051. Przy wyborze tego zadania, spośród zadań sterowania precyzyjnego, kierowano się praktycznym znaczeniem problemu dla okrętów wykonujących prace hydrograficzne.

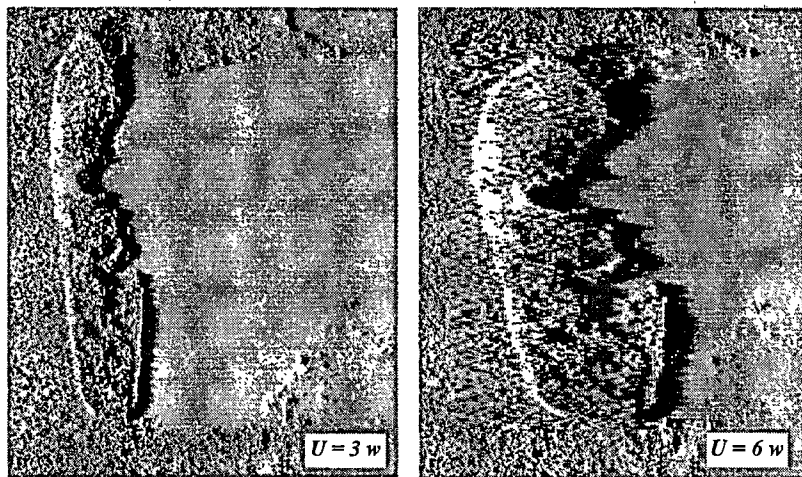
THE PROJECT A MICROPROCESSOR'S PRECISION CONTROL SYSTEM OF SHIP

Abstract: In this paper was presented a theorem about ship's precision control system in motion along trajectory and trial a practical application this system in microcontroller 8051. The results those works are applicated in hydrografic ship.

1. WPROWADZENIE

Współcześnie w celu sprawnego i dokładnego prowadzenia okrętu poruszającego się z małą prędkością wykorzystuje się układy sterowania będące modyfikacją steru konwencjonalnego, śruby napędowej i aktywnych urządzeń sterowych np. steru strumieniowego. Zadaniem, będącego przedmiotem niniejszej pracy, mikroprocesorowego układu precyzyjnego sterowania okrętem jest generacja sygnałów sterujących zapewniających bezpieczny ruch jednostki na torach wodnych, w kanałach, na redach i basenach portowych oraz przy wykonywaniu specjalnych zadań. W praktyce zadania te można sprowadzić do wykonania zaplanowanej sekwencji manewrów okrętem takiej jak: obrót okrętu, przemieszczenie równoległe okrętu oraz prowadzenie okrętu z ograniczoną prędkością wzdłuż zadanej trajektorii [14]. Każde z wymienionych zadań manewrowych posiada własną specyfikę. Poddając analizie cechy charakteryzujące proces sterowania precyzyjnego w celu zapewnienia odpowiedniej efektywności sterowania należy wykorzystywać aktywne urządzenia sterujące. W większości przypadków realizacja zadań sterowania precyzyjnego, zwłaszcza w układzie otwartym, zależy od wiedzy i doświadczenia nawigatorów w zakresie ogólnej znajomości dynamiki okrętu, działania urządzeń napędowo-sterujących oraz wpływu zakłóceń środowiskowych [3, 13]. Tylko część wymienionych czynników może być określona w sposób obiektywny, inne są trudne do jednoznacznego określenia, a ich wpływ można określić subiektywnie tylko na podstawie wiedzy i doświadczenia nawigatora.

W ramach niniejszej pracy podjęto próbę implementacji algorytmu sterowania precyzyjnego ruchu okrętu poruszającego się z minimalnym odchyleniem bocznym wzdłuż zadanej trajektorii na mikrokontrolerze 8051 [6]. Przy wyborze tego zadania, spośród zadań sterowania precyzyjnego, kierowano się praktycznym znaczeniem problemu dla okrętów wykonujących prace hydrograficzne. W czasie takich prac okręty porusza się w zadanym akwenie jak najdokładniej wzdłuż profili podstawowych. Jednym z warunków, aby na hydrolokatorze uzyskać w miarę wierny obraz obiektu jest mała prędkość okrętu (rys.1). Jednak przy zmniejszeniu prędkości poniżej krytycznej, przy której okręt nie reaguje na wychylenie steru, sternik traci nad nim kontrolę, jednostka staje się niesterowna [7, 14].



Rys.1. Zniekształcenia obrazu sonarowego spowodowane różną prędkością okrętu na profilu hydrograficznym.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że najlepsze wyniki prac hydrolokacyjnych uzyskuje się przy prędkości okrętu rzędu $1 \div 2$ węzłów co przy sterowaniu ręcznym nie zawsze jest realne.

Zgodnie z zasadami teorii sterowania, okręt poruszający się z niewielką prędkością wzdłuż zadanej trajektorii jest wielowymiarowym, nieliniowym i niestacjonarnym obiektem sterowania. Jego dokładne parametry jako obiektu sterowania są z reguły nieznane, poddany jest działaniu addytywnych zakłóceń środowiskowych o energii porównywalnej z możliwościami energetycznymi urządzeń wykonawczych. W pracy przyjęto założenie o niepełnej określoności parametrów okrętu, co wynika bezpośrednio z trudności w ich predykcji lub identyfikacji. Trudności w dokładnym wyznaczeniu parametrów wynikają z zawsze niepełnej wiedzy o wpływie różnych czynników na dynamikę okrętu. Wynikają też z szacunkowych pomiarów tych czynników dokonywanych na okręcie oraz z dużej szybkości zmian parametrów dynamicznych w przypadku oddziaływania zakłóceń środowiska morskiego [1, 2, 3].

Z przeprowadzonej analizy problemu wynika, że do syntezy układu sterowania okrętem można zastosować logikę rozmytą, zajmującą się nieprecyzyjnie określonymi wielkościami dając możliwość operowania nimi w ściśle matematycznym sensie [5, 17, 21]. Przykładem takiego braku precyzji w określaniu parametrów może być okręt,

traktowany jako obiekt sterowania. Na podstawie takiego podejścia można budować układy sterowania z regulatorami rozmytymi [16]. Podstawowym uzasadnieniem zastosowania w sterowaniu regulatorów rozmytych zamiast klasycznych jest to, że te ostatnie przed ich zastosowaniem wymagają dokładnego określenia dynamiki procesu, w którym będą pracować. Dokładna dynamika procesu sterowania okrętem nie jest w pełni znana co utrudnia dobór odpowiedniego typu regulatora klasycznego i jego nastaw. W rzeczywistości reguły sterowania ruchem okrętu mają charakter werbalny, a ich treść wynika z doświadczenia nabytego przez człowieka prowadzącego dany obiekt co przemawia za zastosowaniem teorii zbiorów rozmytych [5, 17, 21].

2. OPIS DYNAMIKI OKRĘTU W RUCHU PŁASKIM

Rozpatrując okręt jako obiekt sterowania traktuje się go jako ciało sztywne o pewnej skończonej masie powiększonej o masę wody towarzyszącej [8, 11, 12, 13]. Przez masę wody towarzyszącej należy rozumieć pewną ilość cząsteczek wody otaczającej okręt i wraz z kadłubem podlegającą przyspieszaniu w czasie jego ruchu. Musi ona być uwzględniona za względu na niejednorodny charakter ruchu. Dla uproszczenia okręt można zastąpić punktem materialnym o ustalonej masie umieszczonym w jego środku ciężkości. Początek układu współrzędnych związanych z okrętem przyjmuje się w jego środku ciężkości O a oś X pokrywa się z osią diametralną okrętu.

Zadanie sterowania okrętem ogranicza się do ruchu na płaszczyźnie nieruchomego układu współrzędnych geograficznych (X, Y) , z osią X skierowaną w kierunku północy N . W dowolnej chwili czasu t ruch okrętu określa jego pozycja $p(X_0, Y_0, t) = p(\varphi, \lambda, t)$, prędkość U , kurs Ψ i kąt dryfu β . W czasie ruchu należy przyjąć, że prędkość zmienia się o dU , kąt dryfu o $d\beta$. W związku z tym okręt i związany z nim układ współrzędnych (x, y) obróci się o kąt α .

Zakładając, że środek ciężkości kadłuba okrętu leży w płaszczyźnie diametralnej kadłuba ($x_G \neq 0$ i $y_G = 0$) otrzyma się następującą postać równań sił i momentów, opisujących ruch okrętu w płaszczyźnie poziomej wynikającą z praw dynamiki Newtona [3, 13, 15, 18, 19, 20]:

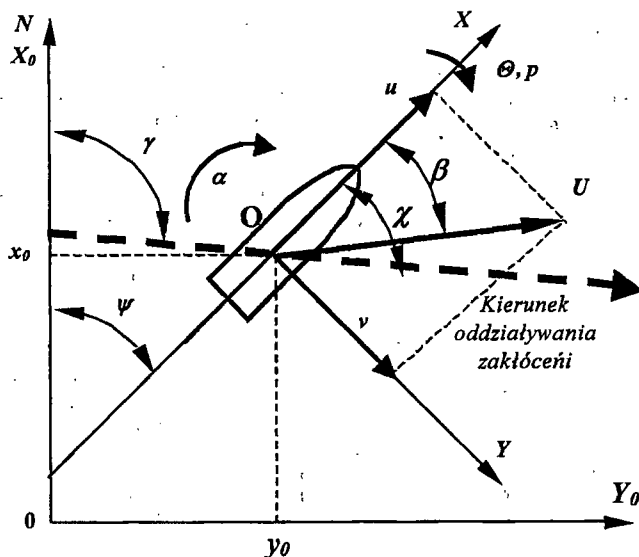
$$\begin{aligned} m \left(\dot{u} - v r - x_G \dot{r}^2 \right) &= X_{calc} \\ m \left(\dot{v} + u r + x_G \dot{r} \right) &= Y_{calc} \\ I_z \dot{r} + m x_G \left(\dot{v} + u r \right) &= N_{calc} \end{aligned} \quad (2.1)$$

gdzie:

m – masa okrętu,

I_z – moment bezwładności względem osi Z ,

x_G – współrzędna położenia środka ciężkości kadłuba.



Rys. 2. Oznaczenia przyjęte do opisu ruchu okrętu na płaszczyźnie

W równaniach (2.1) X_{calc} , Y_{calc} , N_{calc} oznaczają sumę sił i momentów oddziałujących na kadłub okrętu w osiach XYZ , które powstają w wyniku oddziaływania hydrodynamiki środowiska oraz działania śruby napędowej, urządzeń sterujących i zakłóceń hydrometeorologicznych. Siły i momenty hydrodynamiczne zależą nieliniowo od parametrów ruchu okrętu [3, 4, 13]:

$$\begin{aligned} X &= X_{calc}(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, F_{ss}) \\ Y &= Y_{calc}(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) \\ N &= N_{calc}(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

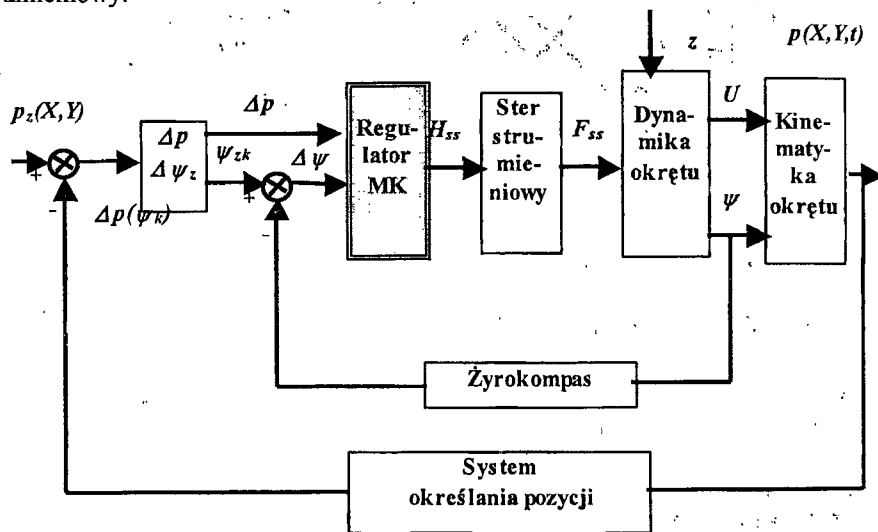
3. PROBLEM STABILIZACJI TRAJEKTORII OKRĘTU

Sterowanie okrętem wzdłuż zadanej trajektorii jako zadanie stabilizacji trajektorii, realizować można w układzie ręcznym przez sternika lub w układzie zamkniętym przez zastosowanie odpowiedniego typu regulatora [19]. W praktyce wykorzystuje się dwie struktury układów stabilizacji trajektorii, realizujących kolejne zmiany kursu zadanego oraz sterowanie bezpośrednie [9, 10, 16].

Pierwsza ze struktur polega na kolejnych zmianach kursu zadanego $\Delta\psi_z$, obliczanych za pomocą układu sterowania zawierającego komputer i regulator stabilizujący kurs zadany ψ_z . Dodatkowo komputer może identyfikować zmieniające się parametry dynamiki okrętu i zakłóceń oraz w przypadku konwencjonalnego regulatora na bieżąco przestrajac w pętli sprzężenia zwrotnego jego nastawy [9, 10].

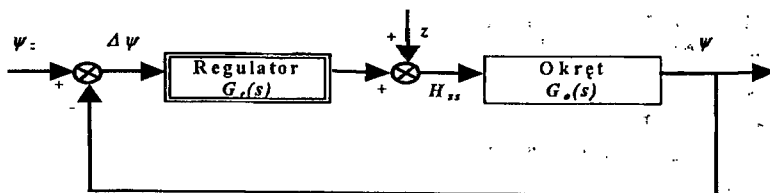
Działanie struktury drugiego typu polega na bezpośredniej cyfrowej regulacji, wykorzystujący mikroprocesorowy układ regulacji działający w układzie nadążnym, za pomocą wielkości sterujących w postaci błędu pozycji Δp i kąta kursowego generuje odpowiednią wielkość siły naporu steru strumieniowego, dokonując zmian skoku śruby nastawnej steru H_{ss} [9, 10, 13].

Na rysunku 3 pokazano projektowany mikroprocesorowy układ stabilizacji trajektorii na torze wodnym wykorzystujący jako element wykonawczy w swym działaniu ster strumieniowy.



Rys. 4. Schemat blokowy układu stabilizacji trajektorii okrętu:
MK – mikroprocesorowy regulator, z – zakłócenia (wiatr, fala, prąd)

W układzie występują dwa ujemne sprzężenia zwrotne, pierwsze od rzeczywistej pozycji okrętu $p(X, Y, t)$ mierzonej za pomocą systemu określenia pozycji i drugie zależne od aktualnego kursu okrętu ψ mierzonego za pomocą żyrokompasu. Zadaniem całego układu jest utrzymywanie okrętu na zadanej trajektorii $p_z(X, Y)$, minimalizując odchylenie boczne od linii określonej przez kolejne punkty zwrotu (rys. 2). Każdy kolejny k -ty odcinek trajektorii może być określony przez kurs ψ_z . Wpływ zakłóceń na kadłub okrętu powoduje, że jego aktualna pozycja w danej chwili czasu $p(X, Y, t)$ nie pokrywa się z punktem na trajektorii zadanej. Wówczas w celu skompensowania odchylenia okrętu od zadanej trajektorii wyznacza się nowy zadany kurs ψ_z prowadzący okręt do najbliższego punktu zwrotu.



Rys. 5. Schemat blokowy układu regulacji kursu przy pomocy steru strumieniowego

Tak więc proces stabilizacji trajektorii można traktować jako wieloetapowy proces stabilizacji kursu okrętu (rys. 5). Można tutaj zastosować regulację typu PID reprezentowaną przez transmitancję rzeczywistego regulatora [5, 13, 15, 20]:

$$G_r(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_m s} \right) \quad (3.1)$$

gdzie: k_p – współczynnik wzmocnienia,

T_i – czas zdwojenia,

T_d – czas wyprzedzenia,

T_m – stała czasowa rzeczywistego członu różniczkującego regulatora.

Podstawiając do ogólnych równań ruchu okrętu (2.1) odpowiednie wartości charakteryzujące dynamikę okrętu jako obiektu sterowania za pomocą steru strumieniowego, stałą czasową siła naporu-zmiana kursu oraz czas opóźnienia wynikający z inercji mechanizmów steru, otrzymuje się przydatną dla celów syntezy sterowania uproszczoną transmitancję:

$$G_o(s) = \frac{k e^{-T_{oss} s}}{s(1 + T_{ss} s)} \quad (3.2)$$

gdzie: T_{ss} – stała czasowa napór-kurs,

T_{oss} – opóźnienie wynikające z dynamiki steru strumieniowego.

Zależność (3.2) przedstawia reakcję okrętu na zmiany siły naporu zależne od prędkości obrotowej n_{ss} lub skoku H_{ss} śruby nastawnej steru strumieniowego. Transmitancja okrętu, jako obiektu regulacji kursu za pomocą oddziaływania steru strumieniowego, opisuje jego własności jako układu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem, o charakterze astatycznym. Zależy on od parametrów dynamiki okrętu – k , T_{oss} , T_{ss} oraz od nastaw regulatora – k_p , T_i , T_d .

3.1. Sformułowanie problemu jako zadania sterowania rozmytego

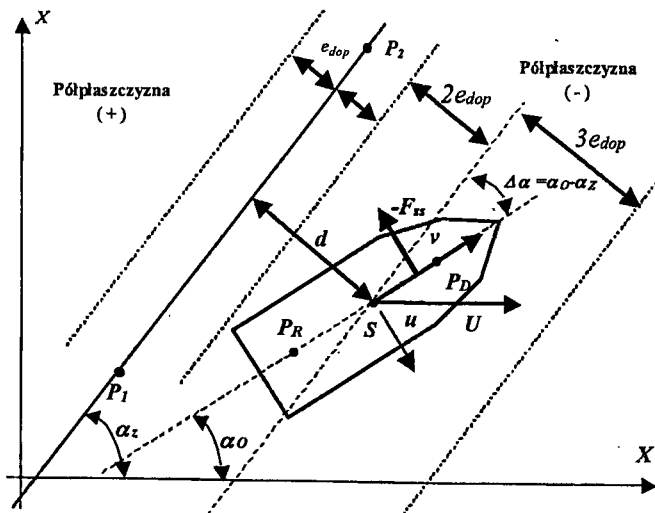
Rozwiązanie ogólnie sformułowanego zadania sterowania, ujmującego w sposób kompleksowy wszystkie związane z powolnym ruchem okrętu aspekty jest zagadnieniem bardzo złożonym [3, 13, 15].

Zakres pracy ograniczony jest do syntezy układu sterowania okrętem poruszającym się z niewielką prędkością wzdłuż zadanej prostoliniowej trajektorii, w warunkach oddziaływania zakłóceń. Nadrzędnym celem układu sterowania jest minimalizacja poprzecznego odchylenia środka ciężkości okrętu od wyznaczonej trajektorii [13, 14]. Układ sterowania, spełniający powyższe założenia, zapewni wykonywanie zadań hydrograficznych z wymaganą dokładnością. Wybór takiego zakresu pracy uwzględni duże praktyczne znaczenie problemu oraz możliwość wykorzystania jednego z aktywnych urządzeń sterujących okrętem w postaci steru strumieniowego. Biorąc pod uwagę założenia teorii sterowania automatycznego, okręt idąc z małą prędkością wzdłuż zadanej trajektorii, profilu hydrograficznego, jest wielowymiarowym, nieliniowym i niestacjonarnym obiektem o nieznanych dokładnie parametrach dynamicznych. Poddawany jest też działaniu zakłóceń addytywnych o energii

porównywalnej z możliwościami energetycznymi wykonawczych urządzeń sterujących. Przyjęcie założenia o nieokreśloności parametrów dynamicznych okrętu wynika z trudności w ich predykcji lub identyfikacji. Trudności te wynikają z niepełnej wiedzy o wpływie i wzajemnych powiązaniach różnych istotnych czynników mających wpływ na dynamikę okrętu. Nadrzędnym kryterium sterowania jest bezpieczeństwo okrętu i jego bezpośredniego otoczenia [2, 13, 14]. W pracy pomijam ten aspekt sterowania zakładając, że ruch okrętu nie będzie odbywał się w warunkach kolizyjnych z innymi obiektami.

Ze względu na występujące nieokreśloności parametrów dynamiki okrętu w przyjętym zakresie sterowania małymi prędkościami ruchu do rozwiązania tak sformułowanego zadania proponuje się wykorzystać układ sterowania działający w oparciu o zasady logiki rozmytej.

Przy realizacji układu sterowania (rys. 4) zakłada się, że manewry wykonywane są przez okręt samodzielnie przy pomocy steru dziobowego strumieniowego regulując wartością siły naporu F_{ss} oraz dodatkowo zmieniając wartość siły naporu napędu głównego lewej lub prawej śruby F_{n1} i F_{n2} . Za włączanie do pracy odpowiedniego regulatora odpowiedzialny jest blok rozdziału sterowania. Przyjmuje się, że istnieje system pomiarowy dostarczający dokładnej informacji o położeniu okrętu w postaci dwóch identycznych umieszczonych w punktach $P_D(x_D, y_D)$ i $P_R(x_R, y_R)$ na kadłubie urządzeń DGPS oraz parametrach jego ruchu [11, 13, 19]. Okręt porusza się na płaszczyźnie XY wzdłuż prostoliniowej trajektorii wyznaczonej przez punkty $P_1(x_0, y_0)$ i $P_2(x_1, y_1)$. Okręt powinien iść wzdłuż trajektorii P_1P_2 z odchyleniem bocznym nie większym niż $\pm e_{dop}$. Wielkość e_{dop} zależy od dokładności układu wyznaczania pozycji oraz od założonych ograniczeń wynikających z wykonywanego zadania hydrograficznego – stanowi wielkość wejściową. Graficznie zadanie sterowania podczas stabilizacji ruchu okrętu na zadanej trajektorii przedstawione jest na rys. 6.



Rys. 6. Układy współrzędnych do opisu ruchu okrętu podczas wykonywania prac hydrograficznych

Wielkość odchylenia okrętu od zadanej trajektorii d określa odległość punktu S od prostej P_1P_2 obliczana według zależności:

$$d = \text{sign}[(x_2 - x_1)(y_0 - y_1) - (x_0 - x_1)(y_2 - y_1)] \frac{|(y_2 - y_1)x_0 + (x_2 - x_1)y_0 + x_1y_1 - y_1x_2|}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (3.3)$$

gdzie: x_0y_0 – współrzędne punktu S ; x_1y_1 – współrzędne punktu P_1 ;

x_2y_2 – współrzędne punktu P_2 .

$d < 0$ – punkt S znajduje się w półpłaszczyźnie (-)

$d > 0$ – punkt S znajduje się w półpłaszczyźnie (+)

4. WNIOSKI

Obecny stan wiedzy dotyczący projektowania układów sterowania rozmytego jest sformalizowany w niewielkim stopniu. O skuteczności ich działania w znacznej mierze decyduje doświadczenie i intuicja projektanta oraz wykorzystanie wiedzy praktycznej sterników i nawigatorów. Określają oni strukturę algorytmu sterowania rozmytego oraz decydują o sposobie w jaki opisane w nim zostaną zasady opisujące działanie sterowanego procesu [13].

Projektowanie algorytmów sterowania rozmytego jest procesem iteracyjnym, w którym na drodze badań i subiektywnej oceny skuteczności wielu wersji algorytmu dochodzi się do rozwiązania najlepiej spełniającego wymagania użytkownika. Wymagania te niejednokrotnie sformułowane są nieprecyzyjnie. Długotrwałość takiego postępowania powoduje, że projektowanie układu sterowania rozmytego musi bazować na wynikach symulacji komputerowych. Dopiero próby morskie służące do dostrojenia układu stanowią ostateczną weryfikację skuteczności jego działania. O efektywności działania układu sterowania zaprojektowanego w toku symulacji komputerowych decyduje dokładność przyjętego modelu matematycznego ruchu okrętu. Model opracowany na podstawie teoretycznych linii kadłuba nie jest dokładny i nie ujmuje wszystkich zjawisk wpływających na właściwości manewrowe jednostki. Dotychczasowe próby praktyczne pokazały jednak, że zastosowanie sterowania rozmytego charakteryzuje się znaczną „odpornością” dzięki czemu po dostrojeniu na okręcie skutecznie może sterować jego ruchem.

LITERATURA

1. Broel-Plater B.: Rozmyte sterowanie powolnym ruchem jednostki pływającej, materiały VII Krajowej Konferencji Naukowo-Dydaktycznej „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia, 13 – 15 października 1999 r., s. 367 – 374
2. Broel-Plater B., Haberek R.: Rozmyte sterowanie ruchem okrętu, materiały I Międzynarodowej Konferencji „Perspektywy i rozwój systemów ratownictwa i obronności w XXI wieku”, Gdańsk 2001, s. 89-94
3. Fossen T., I.: Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore 1994, 480 pp

4. Hansen A., D.: Predictive Control and Identification – Applications to Steering Dynamics, Ph.D. dissertation, Department of Mathematical Modelling (IMM), Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen 1996, 307 pp.
5. Jantzen J.: Tuning Of Fuzzy PID Controllers, Tech. Report no 98-H 871, Lyngby, Denmark, 1999
6. Jiang Jia-Hua, Lu Xiang-Run: Development of Adaptive Track-Keeping Module with the Course Loop Fuzzy Control, conference paper IMECE'91, Shanghai 1991
7. Kijma K., Katuno T., Nakiri Y., Furukawa Y.: On Manoeuvring Performance of a Ship with Parameter of Loading Condition, proceedings JSNAJ, no. 168, 1990
8. Lisowski J., Małecki J.: Dynamika okrętu w układzie sterowania sterem strumieniowym, materiały VII Krajowej Konferencji Naukowo – Dydaktycznej „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1999, s. 239 – 246.
9. Małecki J., Szalek R., Trawiński L.: Mikroprocesorowy sterownik transmisji danych nawigacyjnych, materiały VII Krajowej Konferencji Naukowo – Dydaktycznej „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, Gdynia 1999, s. 227 -234,
10. Małecki J., Garus J., Szalek R.: Okrętowy zestaw komputerowy wspomagający pracę nawigatora, materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo – Technicznej „Rola nawigacji w zabezpieczeniu działalności ludzkiej na morzu”, cz. 1, Gdynia 1998, s. 149 – 158
11. Małecki J, Lisowski J.: Symulacja sterowania precyzyjnego ruchem statku, Pomiar Automatyka Robotyka 10/2000, s. 9 – 13.
12. Małecki J., Lisowski J.: Sterowanie precyzyjne ruchem jednostki pływającej, materiały konferencyjne Automation'2000 Konferencji Naukowo-Technicznej „Automatyzacja – nowości i perspektywy”, Warszawa, 12 – 14 kwietnia 2000 r., s. 325 – 332
13. Małecki J.: Synteza układu sterowania okrętem przy małych prędkościach ruchu z wykorzystaniem steru strumieniowego, rozprawa doktorska, Gdynia AMW 2001, s. 119
14. Małecki J.: Problemy stabilizacji okrętu na trajektorii z wykorzystaniem steru strumieniowego, Seminarium Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN. Gdynia 2002, s. 17 - 24
15. Maryniak J., Dąbrowski Z., Skórski W., W.: Elementy dynamiki jachtu żaglowego, wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom 2001
16. Mendel J.: Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial, Proceedings of the IEEE, vol. 83, No. 3, March 1995, pp. 345-377
17. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999
18. Rhee K., P., Kunho Kim: A New Sea Trial Method for Estimating Hydrodynamic Derivatives, Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 3, No. 3, 1999
19. Sørensen A. J., Ådnanes A. K., Fossen T.: A New Method of Thruster Control Positioning of Ships Based on Power Control, Proc. Of the 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, MCMC'97, 1997
20. van Amerongen, J.: Adaptive Steering of Ships – A Model Reference Approach, Automatica, Vol.20, 1984, pp. 3 – 14
21. Yager R., R., Filev D., P.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT Warszawa 1995