

ROZMYTE STEROWANIE RUCHEM OKRĘTU

W referacie opisano system rozmytego sterowania ruchem jednostki pływającej. System ten pracuje w układzie zamknięto-otwartym z kompensacją wpływu oddziaływania wiatru. Blok regulatora pracującego w pętli ze sprzężeniem zwrotnym ma strukturę hierarchiczną wykorzystującą wzajemnie koordynowane niezależne nieostre regulatory poszczególnych ruchów jednostki. Rozważania zilustrowano wynikami symulacji komputerowych.

FUZZY CONTROL OF A SHIP MOTION

In the paper a dynamic ship positioning control system utilizing fuzzy-logic technique is presented. The system operates in an open-closed loop control system with set-point changes and wind action being compensated. The controller has a hierarchical structure, in which independent co-ordinated fuzzy-logic controllers for vessel motion components are situated. The paper is completed with computer simulations.

1. WPROWADZENIE

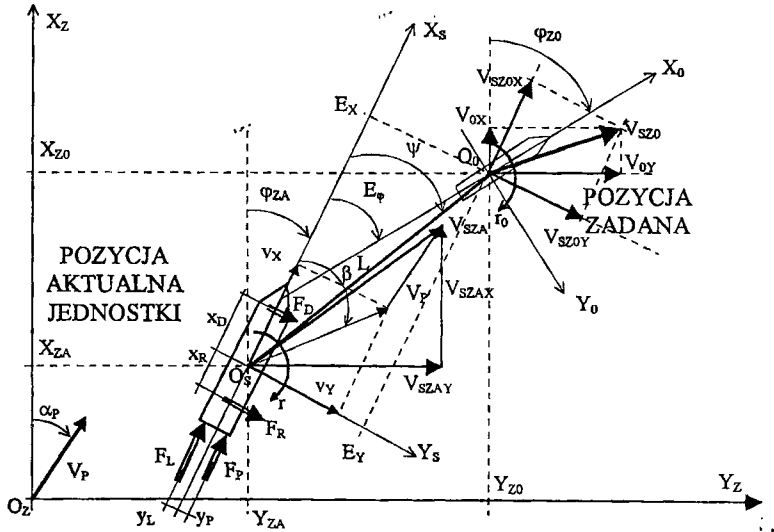
Układy automatycznego sterowania ruchem jednostki pływającej są od wielu lat obowiązkowym wyposażeniem każdej jednostki [6]. Jednak z zasady są to tzw. autopiloty wykorzystywane jedynie do realizacji najprostszego z zadań tzn. stabilizacji kursu i prędkości ruchu jednostki na akwenach bez ograniczeń nawigacyjnych. Układami sterowania o znacznie większej złożoności są systemy dynamicznego pozycjonowania jednostek pływających (DSP), bowiem zadaniem ich jest sterowanie wszystkimi składowymi powolnego ruchu płaskiego jednostki [5, 6]. Jest to niezbędne podczas utrzymywania jednostki nad zadanym punktem dna morza, przemieszczania jednostki po zadanej trajektorii lub śledzenia poruszającego się obiektu podwodnego. Pływająca w tych warunkach jednostka pływająca jest obiektem trudnym do sterowania co wynika z wielowymiarowości i istotnych nieliniowości jej właściwości dynamicznych [5,6].

W ostatnich latach obserwuje się szybki rozwój zastosowań w sterowaniu - nawet bardzo złożonymi procesami - metod fuzzy-logic. Pozwalają one bowiem prosto i w sposób jakościowy uwzględnić w algorytmie sterowania doświadczenia użytkowników. Przy ich pomocy uzyskiwane są w sposób naturalny wielowymiarowe struktury sterowania i układy regulacji z kompensacją zakłóceń [7].

Dzięki użyciu techniki fuzzy-logic do konstrukcji algorytmów autopilota uzyskać można bardzo dobrą jakość sterowania kursem i prędkością jednostki oraz wysoką odporność na zmiany warunków jej eksploatacji [1]. Jak wykazały badania opisywane w niniejszym referacie także użycie algorytmów fuzzy-logic w systemie DSP pozwala na uzyskanie bardzo wysokiej skuteczności ich działania [2-4].

2. MODEL RUCHU JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ

Ze względu na specyfikę układów sterowania rozmytego projektowanie omawianego układu oparto o symulacje komputerowe ruchu jednostki pływającej. Wykorzystywany podczas tych symulacji model matematyczny ruchu jednostki musi opisywać jej właściwości manewrowe w ruchu się z niewielkimi prędkościami (liniowymi i kątowymi) oraz dowolnymi wartościami kąta dryfu – sytuację taką oraz zastosowany system oznaczeń pokazuje rysunek 1.



Rys. 1. System oznaczeń wykorzystywany podczas sterowania ruchem jednostki

Tworząc symulator ruchu jednostki użyto do opisu płaskiego ruchu względnego jednostki równań o postaci:

$$(M + m_{11}) * \frac{dv_x}{dt} - (M + m_{22}) * v_y * r - m_{16} * r^2 = F_{Px} + F_{Dx} + F_{Ax} + F_{Fx} \quad (1)$$

$$(M + m_{22}) * \frac{dv_y}{dt} + (M + m_{11}) * v_x * r + m_{26} * \frac{dr}{dt} = F_{Py} + F_{Dy} + F_{Ay} + F_{Fy} \quad (2)$$

$$(J_{66} + m_{66}) * \frac{dr}{dt} + m_{62} * \frac{dv_y}{dt} + m_{62} * v_x * r + (m_{22} - m_{11}) * v_x * v_y = M_{Px} + M_{Dx} + M_{Ax} + M_{Fx} \quad (3)$$

gdzie: M, J_{66} - to masa i moment bezwładności jednostki określony względem pionowej osi przechodzącej przez jej środek ciężkości,
 m_{ii} - odpowiednie masy i momenty bezwładności wody towarzyszącej poszczególnym składowym oddziaływaniom,

- F_{Px}, F_{Py}, M_{Px} - składowe wypadkowe oddziaływania pedników,
- F_{Dx}, F_{Dy}, M_{Dz} - składowe wypadkowe wolnozmiennego oddziaływania wody,
- F_{Fx}, F_{Fy}, M_{Fz} - składowe wypadkowe oddziaływania faldowania,
- F_{Ax}, F_{Ay}, M_{Az} - składowe wypadkowe oddziaływania wiatru.

Występujące w (1-3) wolnozmiennne oddziaływania wody i wiatru opisują zależności:

$$F_{Dx} = \begin{cases} (v_x^2 + v_y^2) * c_{T0}(\sqrt{v_x^2 + v_y^2}) & \text{dla } \beta = 0 \\ (v_x^2 + v_y^2) * c_{Tx}(\beta) & \text{dla } \beta \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{Dy} = (v_x^2 + v_y^2) * c_y(\beta) + r^2 * c_{yp} \quad (5)$$

$$M_{Dz} = (v_x^2 + v_y^2) * c_m(\beta) + r^2 * c_{mp} \quad (6)$$

$$F_{Ax} = V_w^2 * S_{Ax}(\beta_w) \quad (7)$$

$$F_{Ay} = V_w^2 * S_{Ay}(\beta_w) \quad (8)$$

$$M_{Az} = V_w^2 * W_{Az}(\beta_w) \quad (9)$$

gdzie β to kąt dryfu jednostki, V_w i β_w prędkość i kierunek tzw. wiatru pozornego zaś c_{T0} , c_{Tx} , c_y , c_m , S_{Ax} , S_{Ay} oraz W_{Az} to charakterystyki oddziaływań hydro- i aerodynamicznych.

Oddziaływanie falowania (F_{Px} , F_{Py} , M_{Pz}) ma charakter losowy którego charakterystyki zależą od właściwości akwenu, pogody oraz ruchu jednostki [5,6].

Wartości liczbowe współczynników i funkcji występujących w równaniach (1-9) są również funkcjami stanu załadowania jednostki oraz głębokości akwenu.

„Ziemskie” położenie jednostki można określić uwzględniając ruch jej unoszenia z prądem morskim:

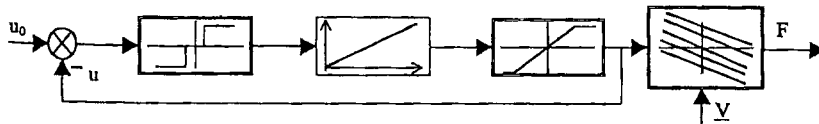
$$\varphi_{zA}(t) = \int_{t_0}^t r(t) dt + \varphi_{zA}(t_0) \quad (10)$$

$$x_{zA}(t) = \int_{t_0}^t \{V_p * \cos \alpha_p + v_x(t) * \cos(\varphi_{zA}(t)) - v_y(t) * \sin(\varphi_{zA}(t))\} dt + x_{zA}(t_0) \quad (11)$$

$$y_{zA}(t) = \int_{t_0}^t \{V_p * \sin \alpha_p + v_x(t) * \sin(\varphi_{zA}(t)) + v_y(t) * \cos(\varphi_{zA}(t))\} dt + y_{zA}(t_0) \quad (12)$$

gdzie V_p i α_p to aktualna prędkość i kierunek prądu morskiego.

Występujące w równaniach (1-3) oddziaływania sterujące F_{Px} , F_{Py} oraz M_{Pz} wytwarzane są przez zainstalowane na jednostce pedniki wykonawcze. W przypadku jednostki dla której projektowano układ rozmytego sterowania były to – pokazane na rysunku 1 - dwie śruby napędu głównego o zmiennym skoku oraz zainstalowane na dziobie i rufie nastawne tunelowe stery strumieniowe. Strukturę pedników - zamodelowanych w programie symulatora ruchu jednostki - pokazuje rysunek 2.

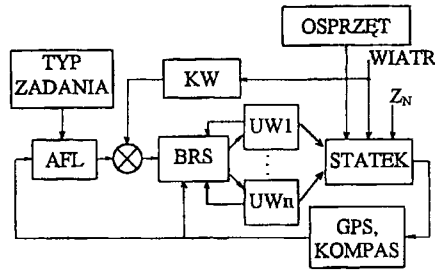


Rys. 2. Struktura zamodelowanego pednika wykonawczego jednostki (u_0 – zadany skok śruby napędowej pednika, u – rzeczywisty skok śruby napędowej pednika, V – prędkość wody opływającej śrubę napędową pednika, F – wytworzone oddziaływanie pednika)

3. STRUKTURA SYSTEMU POZYCJONOWANIA

Ponieważ sterowanie ruchem jednostki pływającej odbywa się w obecności silnych oddziaływań otaczającego ją środowiska (wiatr i falowanie), system pozycjonowania został

realizowany w pokazanej na rysunku 3 strukturze sterowania z kompensacją podstawowego zakłócenia - tzn. oddziaływania wiatru.



Rys. 3. Struktura układu sterowania ruchem jednostki pływającej

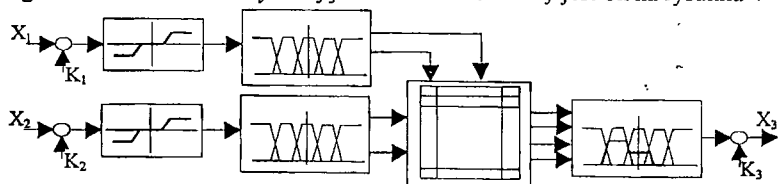
Struktura układu sterowania rozmytego z wielu względów decyduje o jego praktycznej przydatności. Związane jest to z bardzo szybkim zwiększaniem się liczby parametrów algorytmu rozmytego wraz ze wzrostem jego złożoności. Użyteczność algorytmu sterowania rozmytego wymaga zatem aby ujmował on w stopniu niezbędnym jedynie istotne właściwości sterowanego procesu [1-4, 7].

Jednak w przypadku projektowania autopilota rozmytego na problem wyboru jego struktury należy spojrzeć jeszcze z innej strony. Ponieważ jednostka posiada wiele pędników (UWi) zatem awaria - lub celowe wyłączenie - części z nich nie musi oznaczać całkowitej utraty jej tzw. zdolności manewrowych. Zachowanie zdolności manewrowych wymaga jednak odpowiedniej - do zakresu awarii lub wyłączeń - zmiany sposobu sterowania pozostałymi pędnikami. Użycie autopilota złożonego z dwu bloków, tzn. rozmytego autopilota „właściwego” (AFL) i bloku rozdziału sterowana pomiędzy pędniki (BRS) - rysunek 3 - pozwala aby zmiana taka uwzględniając dowolne konfiguracje urządzeń wykonawczych jednostki nie wymuszała równocześnie zmian skomplikowanego algorytmu rozmytego sterowania jej ruchem.

Z uwagi na hierarchiczność i złożoność struktury systemu DSP jego algorytmy opisane zostaną kolejno zaczynając od algorytmów warstwy sterowania bezpośredniego.

4. ALGORYTM REGULATORA SYSTEMU DSP

Podstawowym algorytmem sterowania wykorzystywanym w układzie DSP jest algorytm rozmytego regulatora PD - oznaczany dalej jako PD-FL. Pokazany jest on na rysunku 4

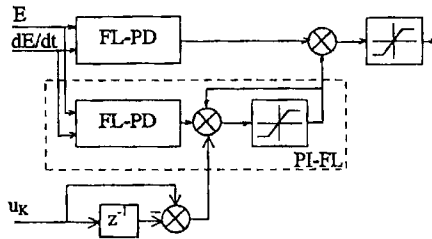


Rys. 4. Struktura regulatora PD-FL

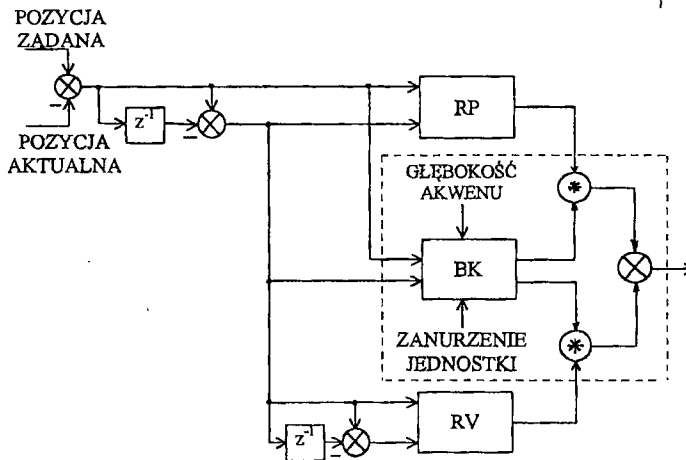
Algorytm PD-FL zrealizowano wykorzystując klasyczne metody sterowania nieostrego. Zastosowano zatem tzw. algorytm min-max w którym iloczyny i sumy rozmyte określano wg Zadeh'a, powierzchnie sterowania budowano przy pomocy tzw. metody skalowania, zaś

wyostrzenie realizowano metodą środka ciężkości powierzchni sterowania [7]. Wszystkie zmienne rozmywane są do 7 zbiorów.

Dwa algorytmy PD-FL połączone ze sobą tworzą – pokazany na rysunku 5 – regulator o działaniu PID oznaczany jako PDPI-FL. Do sterowania każdym trzech z ruchów składowych jednostki użyte zostały dwa regulatory typu PDPI-FL. Jeden z nich jest regulatorem położenia zaś drugi regulatorem prędkości. Wypadkowy sygnał sterujący ruchem jednostki zależy – w sposób rozmyty – od aktualnego błędu położenia jednostki, jej zanurzenia oraz głębokości akwenu - co pokazuje rysunek 6.



Rys. 5. Regulator PDPI-FL



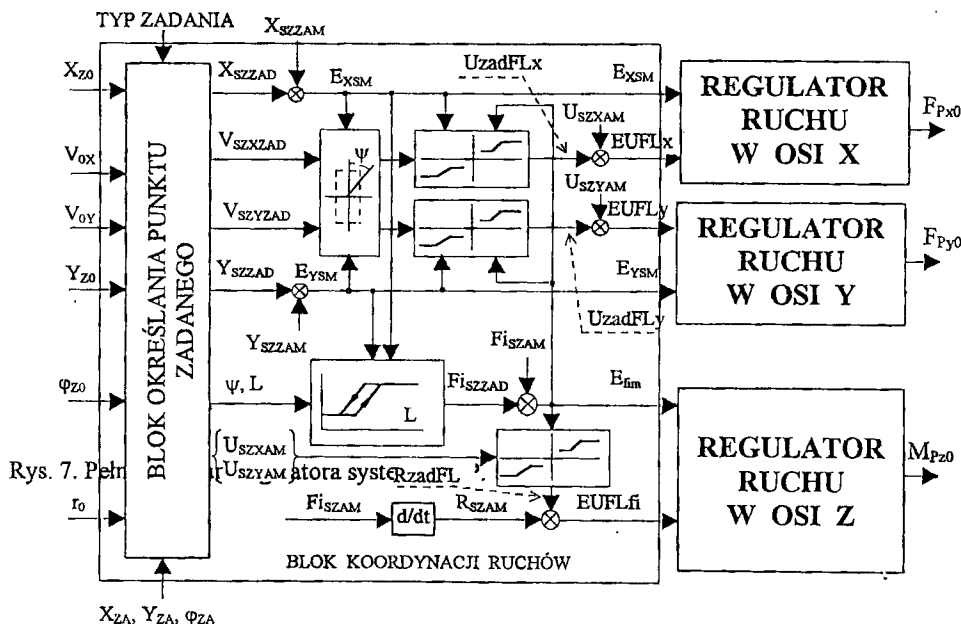
Rys. 6. Struktura regulatora ruchu składowego jednostki

Ponieważ ruchy jednostki wpływają na siebie wzajemnie, regulatory ruchów składowych połączono w strukturę pokazaną na rysunku 7. Występują w niej dodatkowe bloki koordynujące poszczególne ruchy jednostki w zależności od jej położenia względem punktu zadanego oraz narzuconych ograniczeń swobody manewrowania.

5. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU DSP.

Skuteczność działania opisanego regulatora układu DSP sprawdzono podczas symulacji komputerowych. Badano działanie regulatora sterującego jednostką o długości $L_{pp} = 64.2$ [m] i szerokości $B = 11.6$ [m] która w zależności od stanu załadowania ma wyporność $D = 1540 - 1730$ [T] oraz zanurzenie $T = 3.5 - 3.9$ [m]. Jednostka ta posiada:

- dwie śruby napędu głównego z których każda pozwala na uzyskanie naporu od -40kN do +80kN z czasem przestawiania wynoszącym 20 sek i dokładnością pozycjonowania wynoszącą 5%,
- dwa stery tunelowe z których każdy pozwala na uzyskanie naporu od -26kN do +26kN z czasem przestawiania wynoszącym 14 sek i dokładnością pozycjonowania wynoszącą 1%.



Rys. 7. Struktura pełnego regulatora autopilota rozmytego (blok AFL z rysunku 3).

Na rysunkach 8-11 pokazano przykładowe wyniki symulacji działania opisanego układu DSP podczas wykonywania przez okręt operacji poszukiwania, wykrycia i zidentyfikowania obiektu podwodnego.

Podczas takiej operacji okręt przeszukuje akwen płynąc wzdłuż trajektorii wyznaczonej przez punkty A-B-C-D. Nieznany obiekt podwodny został zlokalizowany w punkcie E przy pomocy echosondy dziobowej w chwili gdy okręt znajdował się w punkcie F. Na polecenie operatora system sterowania „wygenerował” trajektorię G-H-I-J-K-L-M przepływając wzdłuż której okręt zachowa bezpieczną odległość od wykrytego obiektu podwodnego mając go równocześnie przez cały czas przed dziobem. Pozwoli to na „obejście” obiektu z boku przy pomocy echosondy dziobowej. Po rozpoznaniu obiektu podwodnego operator może podjąć np. decyzję o ewentualnym jego podniesieniu - zatrzymując okręt na pozycji E. Następnie okręt kontynuuje przeszukiwanie akwenu - powracając od punktu E na trajektorię A-B-C-D.

Rysunek 8 pokazuje przebieg opisaną powyżej operacji w idealnych warunkach pogodowych oraz przy dokładnej znajomości położenia i prędkości okrętu. Podczas symulacji - wyniki której pokazuje rysunek 9 - informacja o położeniu i prędkości ruchu jednostki jest silnie zakłócona (np. położenie jest znane z dokładnością +/-5 [m]) lecz warunki hydrometeorologiczne są w dalszym ciągu idealne. Na rysunku 10 pokazano wynik symulacji podczas której zachowano dokładną znajomość położenia i prędkości okrętu lecz operacja

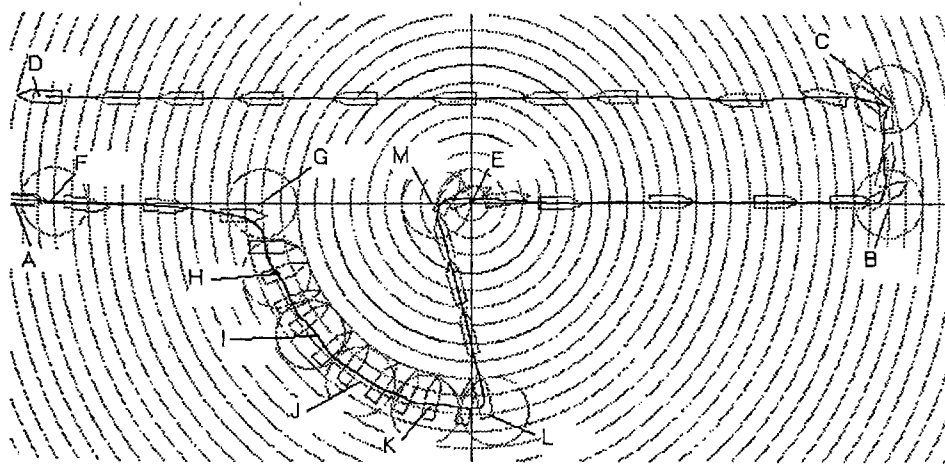
przeprowadzana jest w obecności silnego boczego prąd dopychającego okręt w kierunku rozpoznawanego obiektu podwodnego. Podczas symulacji wyniki której pokazuje rysunek 11 wystąpiły równocześnie oba te czynniki – co odpowiada sytuacji „rzeczywistej”.

6. PODSUMOWANIE.

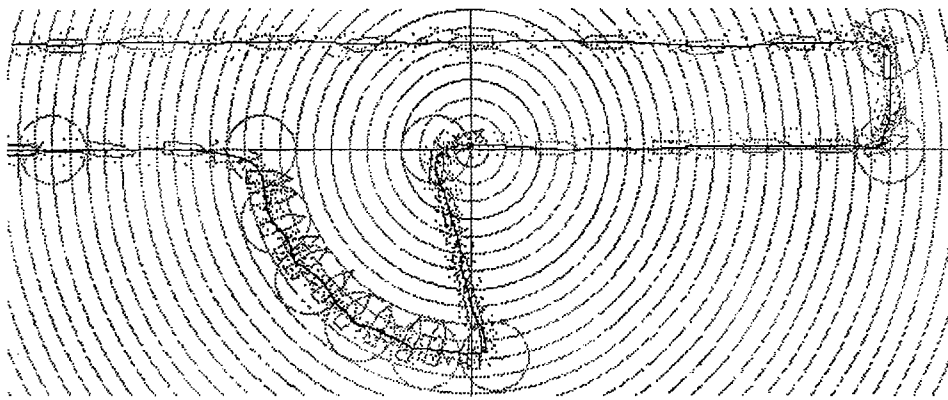
Przedstawiona struktura regulatora systemu DSP charakteryzuje się dużą skutecznością sterowania. Jej strojenie jest proste i wykonane może być w oparciu o wyniki typowych prób morskich zdolności manewrowych jednostki. Algorytm jest odporny na zarówno zmiany stanu załadowania jednostki jak i zmiany warunków hydrometeorologicznych. Obecnie przedstawiony algorytm sterowania rozmytego jest wykorzystywany do sterowania ruchem dwu okrętów ratowniczych Polskiej Marynarki Wojennej.

LITERATURA

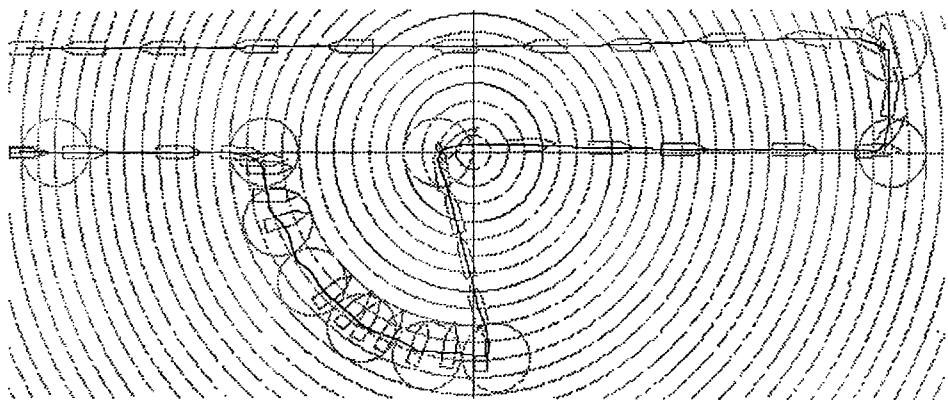
- [1] Broel-Plater B.: *Autopilot fuzzy-logic*, mat. V Kraj. Konf. „Automatyzacja i eksploatacja systemów sterowania”, AMW, Gdynia 1995, str. 155-162
- [2] Broel-Plater B.: *A DSP system using fuzzy-logic technique*, Proc. 4th International Conference „Application of computer systems”, Szczecin, 1997, pp. 401-406.
- [3] Broel-Plater B.: *Fuzzy control for vessel motion*, Proc. 5th International Symposium on Methods and Models in Automation, Międzyzdroje, 1998, pp. 697-702
- [4] Broel-Plater B.: *Rozmyte sterowanie ruchem jednostki pływającej*, XIII Krajowa Konferencję Automatyki, Opole, 1999, str. 292-296
- [5] Fossen T.I.: *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1994
- [6] Lisowski J.: *Statek jako obiekt automatycznego sterowania*, Wyd. Morskie, Gdańsk, 1991
- [7] Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna EXIT, Warszawa, 1999



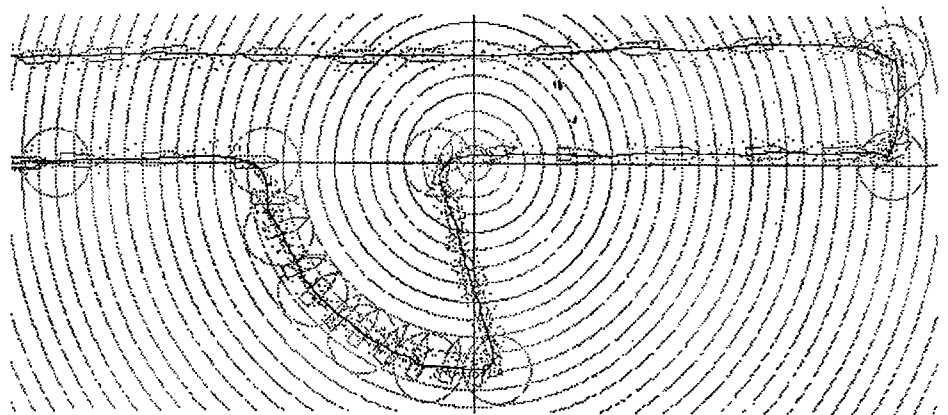
Rys. 8. Przebieg operacji poszukiwania i rozpoznania obiektu podwodnego w warunkach idealnych



Rys. 9. Przebieg operacji z zakłóconymi pomiarami położenia i prędkości ruchu okrętu



Rys. 10. Przebieg operacji w obecności bocznego prądu dopychającego okręt do rozpoznawanego obiektu



Rys. 11. Przebieg operacji w warunkach „rzeczywistych”