

STRUKTURA SYSTEMU STEROWANIA STATKIEM DYNAMICZNIE POZYCJONOWANYM

Roman ŚMIERZCHAŁSKI¹

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 348 23677 e-mail: roman.smierzchalski@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono funkcje i zadania systemu dynamicznego pozycjonowania (DP) statku. Omówiono zagadnienia sterowania - stabilizacji pozycji i kierunku (kursu rzeczywistego statku) przy małej prędkości manewrowania oraz modele statku DP. Określono wymagania towarzystw klasyfikacyjnych dla statków DP. Przedstawiono wielowarstwową strukturę systemu sterowania statkiem DP, gdzie do podstawowych problemów należy zaliczyć filtrację sygnałów oraz estymację wielkości mierzonych i niemierzonych, dobór metody sterowania i regulatora DP oraz alokację sterów i napędów.

Słowa kluczowe: struktura sterowania statku DP, dynamiczne pozycjonowanie, modele statku, wymagania statku DP.

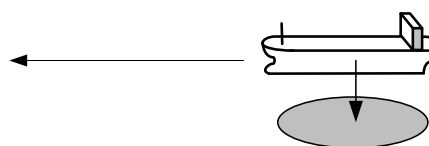
1. DYNAMICZNE POZYCJONOWANIE (DP)

1.1. Sterowanie statkiem DP

W nawigacji morskiej rozróżnia się dwa podstawowe sposoby sterowania statkiem: sterowanie po trajektorii i dynamiczne pozycjonowanie (DP) [4]. Ze względu na rozwój technologii wydobywania kopalin, ropy naftowej z mórz i oceanów, morskiej energetyki wiatrowej, prac podwodnych itp. występuje coraz większe zainteresowanie badaczy zagadnieniami sterowania statkami dynamicznie pozycjonowanymi obsługującymi te instalacje. Sterowanie DP ma szczególne zastosowanie dla statków, które bez udziału systemów cumowniczych stabilizują pozycję i kierunek z określoną dokładnością. Analizując funkcje i zadania sterujące, jakie muszą realizować statki DP, przyjmuje się, że statek posiada możliwość dynamicznego pozycjonowania (DP), jeśli jest w stanie utrzymać określoną dokładność pozycji i kierunku (kursu). Obiekty te aby realizować te funkcje wyposażone są w specjalizowane urządzenia i układy automatyki, pozwalające na sterowanie ruchem w trzech kierunkach swobody. Ma to szczególne zastosowanie przy morskich poszukiwaniach ropy naftowej na dużych głębokościach, za pomocą specjalistycznych statków wiertniczych. Wykorzystanie systemów DP ma również miejsce w sterowaniu skomplikowanymi obiektami morskimi, takimi jak: pogłębiarki, statki dostawcze platform wiertniczych i wydobywczych, zbiornikowce transportowe, statki układające kable i rurociągi na dnie, produktowce, wycieczkowe i statki badawcze hydrograficzne. Zadanie dynamicznego pozycjonowania może również dotyczyć sterowania precyzyjnego np. przy układaniu kabli na dnie oraz manewrowania przy małych prędkościach w wąskich przejściach, portach itp.

Zazwyczaj statki te realizują swoje zadania przy małych prędkościach. Zasadniczy podział metod sterowania

statkiem, wiąże się właśnie z uwzględnieniem jego prędkości obejmuje sterowanie przy małych oraz przy większych prędkościach. Przyjmuje się, że ruch statku poniżej 2 m/s [2, 3, 4] odbywa się przy małych prędkościach i dotyczy procesów sterowania obejmujących dynamiczne pozycjonowanie, gdzie celem jest utrzymywanie stałej pozycji geograficznej i kierunku, czyli kąta ustawienia dziobu statku względem północy (N) (ang. *stationkeeping*, *seakeeping*), niezależnie od zakłóceń działających na statek (rys. 1).

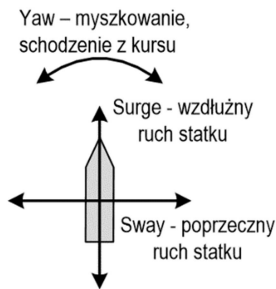


Rys. 1. Zadanie dynamicznego pozycjonowania statku

Jednocześnie należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem prędkości pędniki stają się mniej wydajne, a jakość dynamicznego pozycjonowania stopniowo będzie się zmniejszać [6].

Dynamiczne pozycjonowanie stanowi odrębną grupę zagadnień w zakresie sterowania statkiem. Sterowanie DP obejmuje takie problemy jak: estymacja wykorzystując rozszerzoną filtrację Kalmana wartości pomiarowych kierunku, pozycji, prędkości oraz przyspieszeń, sterowanie wielowymiarowymi układami nieliniowymi, sterowanie predykcyjne, alokację pędników, optymalizację zasilania w energię i adaptację z modelami odniesienia oraz inne [6, 7]. Pozycja statku jest mierzona przez jeden lub większą liczbę urządzeń pomiaru pozycji odniesienia, a informację o kursie zapewniają żyrokompasy. Różnicę pomiędzy wartością zadaną a mierzoną generuje uchyb, a system DP w trybie automatycznym działa w celu zminimalizowania tych uchybów. Z kolei precyzja dynamicznego pozycjonowania wymaga zaawansowanych algorytmów sterowania [12]. Zakłada się, że sterowanie odbywa się niezależnie w trzech kierunkach swobody ruchu: wzdłużnego (ang. *surge*), poprzecznego (ang. *sway*) i odchylenia kierunku ustawienia dziobu (ang. *yaw*), nazywane również odchyleniem od kursu rzeczywistego statku lub myszkowaniem (rys. 2). Sterowanie to ma za zadanie kompensację zakłóceń środowiska morskiego takich jak zakłócenia od wiatru, falowania oraz prądu morskiego, działających na kadłub

poprzez wykorzystanie pędników, sterów strumieniowych i urządzeń sterowych statku.



Rys. 2. Trzy stopnie swobody statku DP

Dokładną definicję systemów DP określają przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, np. [1], na podstawie rezolucji IMO Maritime Safety Committee [7] i w [5].

1.2. Wymagania dla statków DP

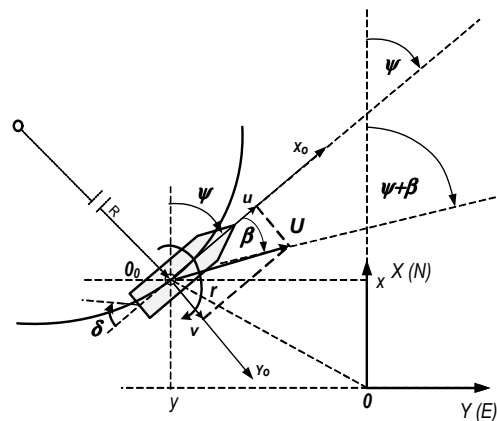
Statki z systemem DP znacznie upraszczają zadania i operacje wykonywane na morzu, szczególnie przy wydobywaniu ropy naftowej. Funkcje, jakie realizują te statki, są w stanie wyeliminować pracę holowników, a także charakteryzują się szybką reaktywnością na zmiany warunków pogodowych lub parametrów pracy. Przynosi to wszechstronność wykorzystania tego typu statków. Wadą systemów DP jest wysoki poziom złożoności rozwiązań i tym samym wrażliwość na awarie poszczególnych urządzeń, wchodzących w skład systemu DP. Za przykład może posłużyć zanik energii elektrycznej, brak napędu, a więc awaria steru strumieniowego, awaria urządzeń sterujących czy układów automatyki i pomiarowych. Wymagania dla systemów dynamicznego pozycjonowania statku określają przepisy towarzystw klasyfikacyjnych na podstawie Rezolucji IMO *Maritime Safety Committee* Circular 645 [7]. Rezolucja ta, w celu zapewnienia bezpieczeństwa na morzu, definiuje zakres procesu pozycjonowania statku i niezbędne wymagania. Dotyczą one konstrukcji, wyposażenia, eksploatacji, funkcjonowania, obsługi, układów sterowania oraz sposobu testowania statków DP, spełniających te wymagania. Szczegółowy zakres wymogów opisują przepisy towarzystw klasyfikacyjnych ABS, DNV, Lloyds inne publikacje [8, 9]. Można przyjąć że podstawowym wymaganiem jest zachowanie możliwości wykonywania założonych funkcji statku DP, również w wypadku wystąpienia losowych zdarzeń awaryjnych i niesprawności poszczególnych elementów systemu. W zależności od klasy systemu DP, parametrem oceny jest odporność systemu na określone pojedyncze niesprawności. Aby podnieść poziom bezpieczeństwa pracy i dyspozycyjności systemów DP, nowoczesne rozwiązania rozbudowane są o dodatkowe urządzenia nadmiarowe. Rezolucja IMO *Maritime Safety Committee* Circular 645 [7] określa wymagania bezpieczeństwa i zakres wyposażenia dla trzech typów głównych klas nadmiarowych systemów DP. Klasa 1 nie wymaga redundancji, podczas gdy klasa 3 wymaga najwyższego poziomu zwielokrotnienia urządzeń – maksymalnie 3. Redundancja, oznaczająca nadmiarowość wybranych systemów, zapewnia dyspozycyjność i bezpieczeństwo ruchu statku w utrzymaniu pozycji i kierunku. Redundancja zapewnia ciągłość ruchu statku nawet w wypadku pojedynczych awarii systemów okrętowych takich jak system pędników, zespoły prądowców, system dystrybucji energii, system

komputerowy i określania pozycji. Dla niektórych operacji na morzu redundancja nie jest wymagana, np. dla statków badawczych, na których chwilowa utrata zdolności DP, nie przynosi zagrożenia bezpieczeństwu życia lub uszkodzenia sprzętu.

1.3. Modele statku DP

W zależności od celów sterowania stosowane są określone modele statku. Modele statku DP wyznaczające charakterystyki statycznych i własności dynamiczne, pozwalają na przeprowadzenie szeregu zadań projektowych związanych ze sterowaniem. Są to, między innymi, dobór struktury układu i algorytmów sterowania. Zadania te są niezbędne do określania sterowania pozwalającego na utrzymywanie stałej pozycji i kierunku oraz manewrowania przy małych prędkościach z określoną dokładnością. Ponadto niezbędne jest wyznaczanie ograniczeń sygnałów alarmowych, bezpieczeństwa, badanie wpływu zakłóceń (w tym zewnętrznych, hydrodynamicznych środowiska morskiego) na zachowanie się statku, sposobu sterowania napędami oraz doboru urządzeń wykonawczych i pomiarowych na jakość sterowania statkiem [11, 12].

Zakładając że w modelu statku DP, wartości amplitudy kołysań, kiwań oraz nurzań, w ruchu w płaszczyźnie poziomej, są małe, bliskie zeru to liczbę stopni swobody można zredukować do trzech (Rys. 2). Ruch statku w trzech stopniach swobody opisywany jest w układzie współrzędnych nieruchomych O związanych z układem odniesienia na płaszczyźnie (x, y) oraz układem współrzędnych O_0 powiązowanym z określonym punktem kadłuba (x_0, y_0) , poruszającego się statku. Wielkości charakteryzujące ruch statku w płaszczyźnie poziomej o trzech stopniach swobody zostały przedstawione na Rys 3 [11].



Rys. 3. Ruch statku DP w płaszczyźnie poziomej, gdzie: U – wektor prędkości wypadkowej, δ – wychylenie steru, β – kąt dryfu

Ruch ten opisują zmienne stanu w postaci zredukowanych wektorów współrzędnych pozycji i orientacji η , związane z ustalonym punktem płaszczyzny oraz prędkości kadłuba statku, powiązane z określonym punktem tego statku [2, 11]:

$$\eta = [x, y, \psi]^T \text{ i } \mathbf{v} = [u, v, r]^T \quad (1)$$

gdzie: η – wektor zredukowany współrzędnych liniowych i kątowej, \mathbf{v} – wektor zredukowany prędkości liniowych i kątowej, x, y odpowiednio to współrzędne pozycji statku w układzie O , ψ - kurs statku względem północy (N), u, v - składowa liniowa prędkości: wzdluzna i poprzeczna, r -

prędkość kątowna zwrotu statku. Uwzględniając wektory η i v , to równania (2) i (3) opisują zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi tych wektorów i określa macierzowy model statku DP [2, 10, 11]:

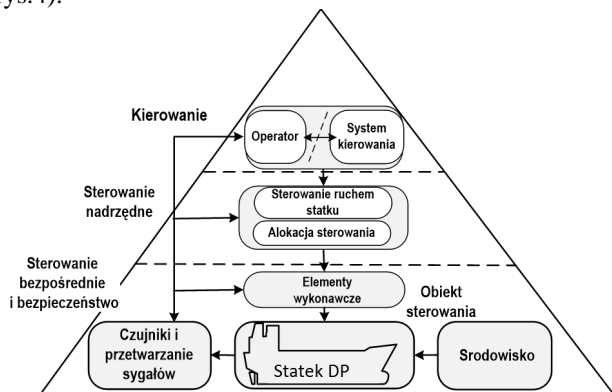
$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) + g_0 = \tau(\dot{v}, v, \eta) \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (3)$$

gdzie: $M = M_{RB} + M_A$ to macierz bezwładności inercji, a M_{RB} i M_A odpowiednio masa statku jako bryły sztywnej oraz masy dodane wody towarzyszącej, $C(v)$ - macierz Coriolisa dotycząca masy statku i wody towarzyszącej, $D(v)$ - macierz tłumienia hydrodynamicznego, $g(\eta)$ - wektor sił i momentów grawitacyjnych - wypornościowych, g_0 - wektor używany przy balastowaniu statku, $\tau(\dot{v}, v, \eta)$ - wektor wejść wymuszających i sterujących, $J(\eta)$ - macierz transformacji ruchomego układu współrzędnych O_0 związanych z ustalonym punktem statku do układu współrzędnych O związanych z ustalonym punktem ziemi.

2. STRUKTURA UKŁADU STEROWANIA DP

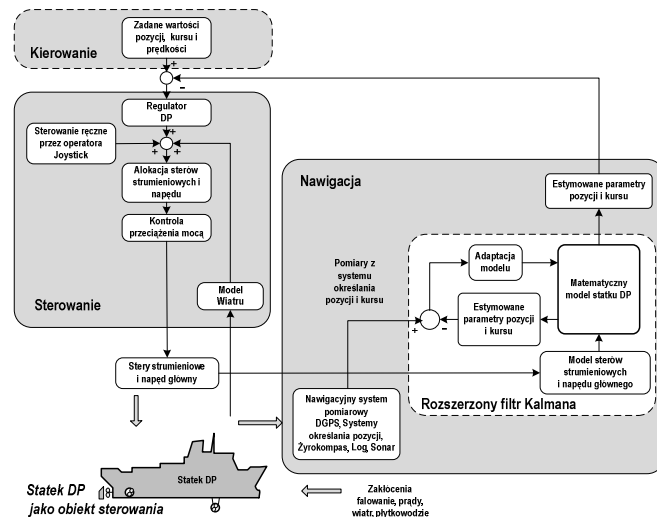
System sterowania statkiem DP można sprowadzić do wielowarstwowego systemu sterowania statkiem [11] (rys.4).



Rys. 4. Wielowarstwowy system sterowania statkiem DP

Odnosząc się do wielowarstwowej struktury sterowania statkiem, w systemach DP istotne znaczenie ma warstwa sterowania i blok nawigacji (rys. 5). Warstwa kierowania statkiem nie bierze udziału w procesie sterowania z tego względu, że w większości trybów pracy DP, wszystkie pożądane ustawienia punktów zwrotu i parametry nie są wyznaczane automatycznie, a określone bezpośrednio przez operatora. W związku z tym warstwę kierowania można pominąć w systemie sterowania ruchem statku DP. Zgodnie z założeniem, sterownie DP odbywa się przy małych prędkościach statku i wymaga określenia przez operatora punktów zwrotu i parametrów osiągnięcia tych punktów. Parametry te, to kursy rzeczywiste, z jakimi statek powinien osiągnąć poszczególne punkty zwrotu, prędkości i promienie skrętu dochodzenia do kolejnych punktów zwrotu. Na tej podstawie można przyjąć zmodyfikowaną strukturę systemu dynamicznego pozycjonowania (rys. 5). W systemie tym występują dwie pętle sterowania: pętla otwarta ze sprzężeniem wyprzedzającym, gdzie sygnał sprzężenia generowany jest przez blok modelowania wiatru oraz pętla zamkniętego sterowania, gdzie zadane wartości pozycji i kursu są porównywane z wartościami estymowanymi. W układzie sterowania DP, ze względu na specyficzne zadanie utrzymania pozycji z określoną dokładnością, wprowadzono szereg dodatkowych bloków. System ten oparty jest na

adaptacyjnym modelu statku, który zawiera hydrodynamiczny opis własności dynamicznych statku i umożliwia wyznaczenie estymowanych parametrów pozycji oraz kursu. Model, uwzględniając zmienne charakterystyki współczynników oporów oraz mas towarzyszących statku, opisuje ruch i reakcję statku, w zależności od sił i momentów działających na kadłub. Zaprojektowany model statku jest dostrajany podczas prób morskich, co minimalizuje odchylenie modelu od rzeczywistego ruchu statku.



Rys. 5. Systemu sterowania DP [11]

W systemie DP urządzenia pomiarowe nie pozwalają na bezpośredni pomiar sił i momentów działających na kadłub statku, podczas ruchu i działania zakłóceń od wiatru, fal i prądów morskich. W systemie sterowania DP, poprzez stosowanie filtracji sygnałów - dyskretny rozszerzony filtr Kalmana, określa się estymowane wartości prędkości, pozycji i kursu dla ruchu w trzech stopniach swobody ruchu poziomego: wzdłużnego, poprzecznego i odchylenia od kursu rzeczywistego, z wykorzystaniem adaptacyjnego modelu statku. Uwzględnienie wielkości możliwych do pomiaru: kierunku i prędkości wiatru (falowanie oraz prądy morskie nie są mierzone w systemach DP), prędkości obrotowej, kąta wychylenia płatów śruby napędów oraz kąta obrotu sterów strumieniowych działających na statku, pozwala na wprowadzenie modeli sygnałów działających na kadłub. Model wiatru określa siły generowane przez wiatr, przy uwzględnieniu zmiennych współczynników w funkcji mierzonych wartości prędkości i kierunku. Model napędów i sterów strumieniowych określa siły i kierunek naporu na kadłub, wykorzystując charakterystyki zmian wielkości mierzonych prędkości obrotowej i kąta wychylenia płatów śruby oraz obrotów (sprężenie od napędów i sterów strumieniowych). Analizując schemat działania systemu DP, przedstawiony na Rys. 5, do podstawowych problemów należy zaliczyć filtrację sygnałów oraz estymację wielkości mierzonych i niemierzonych, dobór metody sterowania i regulatora DP oraz alokację sterów i napędów. Ze względu na to, że nie wszystkie wielkości pomiarowe są dostępne, czyli mierzalne, wówczas ich wartości można estymować na podstawie modelu matematycznego, wiążącego wielkości estymowane $\hat{x}(t)$ i mierzone $x(t)$. Filtracja sygnałów pomiarowych i estymacja stanu jest ważnym elementem systemu DP. Dynamiczne pozycjonowanie jest realizowane przy małych wartościach prędkości wzdłużnej i poprzecznej

statku. W związku z tym, pomiar bezpośredni tych prędkości nie jest dostępny. Możliwe jest obliczenie estymowanych wartości prędkości na podstawie pomiarów pozycji i kierunku przez obserwatora stanu. Pomiar pozycji i kierunku jest zakłócony ze względu na działanie wiatru, fal i prądów morskich, a także przez szumy czujników pomiarowych. Zakłócenia można podzielić na wolno-zmienne (LF - low frequency), na które nałożone są zakłócenia szybko zmienne (WF - wave frequency). Zakłócenia oscylacyjne szybkozmienne należy odfiltrować tak, aby nie były sygnałem wejściowym w zamkniętym układzie sterowania pozycją i kierunkiem. Natomiast odfiltrowane zakłócenia wolno-zmienne (o niskiej częstotliwości), związane z odchyleniem od pozycji zadanej i kierunku, będą kompensowane przez system napędowy - stery strumieniowe. Realizuje się to za pomocą filtracji fali (LF i WF) pomiaru pozycji i pomiarów pozycji oraz ich estymacji. W systemach DP filtrowanie fali i estymacja stanu są rozwiązywane za pomocą rozszerzonego filtru Kalmana. Główną wadą tego podejścia jest to, że kinematyczne równania ruchu muszą być linearyzowane dla zdefiniowanego zbioru stałych kątów, określających kierunek [3, 10]. W systemach DP koncentruje się sygnały z nawigacyjnych urządzeń pomiarowych położenia oraz kierunki i porównuje się je z wartościami modelu. W przypadku różnic dokonuje się uaktualnień modelu, uwzględniając wartości rzeczywiste. Strojenie modelu statku następuje w procesie adaptacji i w miarę upływu czasu strojenia, niepewność modelu zmniejsza się wraz z procesem uczenia się. Dzieje się tak na podstawie pomiarów rzeczywistych z czujników zamontowanych na statku. Zastosowanie rozszerzonego filtru Kalmana pozwala na optymalne, samoadaptujące filtrowanie zakłóceń wysokich częstotliwości mierzonych wartości kursu i pozycji, optymalne łączenie uzyskanych pomiarów z różnych systemów określania pozycji, gdzie oblicza się wariancję dla każdego systemu pomiaru pozycji i ustala się wagę tego pomiaru (ang. *multisensor fusion*) [11]. Łączenie pomiarów pozycji umożliwia przetwarzanie wielkości mierzonych z różnych źródeł pomiarowych, tak aby uzyskać nowe i pełniejsze dane pomiarowe, niemożliwe do osiągnięcia z pojedynczego źródła informacji. W wypadku utraty pomiarów pozycji, system zawiera tryb obliczania pozycji na podstawie uprzednio ustalonego położenia. Oznacza to, że system pozwala na określenie przybliżonej pozycji bez aktualizacji pomiaru.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Artykuł omawia najważniejsze funkcje i zadania systemu dynamicznego pozycjonowania statku. Do zadań systemu DP zalicza się: stabilizację pozycji geograficznej i kierunku (kursu rzeczywistego statku). Rozpatrywano

zagadnienia sterowania i modeli statku DP przy małej prędkości manewrowania oraz wymagania towarzystw klasyfikacyjnych dla tego typu statków. Omówiono szczegółowo funkcjonowanie poszczególnych warstw struktury systemu sterowania statkiem DP. Do najważniejszych problemów poruszanych w sterowaniu statkiem DP są: wybór algorytmów i metod sterowania, filtrację sygnałów oraz estymację wielkości pomiarowych oraz optymalizacja alokacji napędów.

4. BIBLIOGRAFIA

1. DnV. Rules for Classification of Ships PART 6 Ch. 7 Dynamic Positioning Systems. Norway : Det Norske Veritas AS, 2011.
2. Fossen T. I., Guidance and Control of Ocean Vehicles. Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 1994.
3. Fossen T. I., Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Trondheim : Marine Cybernetics AS, 2002.
4. Golding B. K., Industrial Systems for Guidance and Control of Marine Surface Vessels. Trondheim, Norway : Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics, 2004.
5. Holvik J. 1998. Basics of Dynamic Positioning. Houston : Dynamic Positioning Conference, 1998.
6. International Marine Contractors Association. 2007. Guidelines for The Design and Operation of Dynamically Positioned Vessels. Londyn : International Marine Contractors Association, 2007.
7. International Maritime Organization. 1994. Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning Systems, IMO MSC Circular 645. London : IMO, 1994.
8. Marine Technology Society. DP Vessel Design Philosophy Part 1 i 2. Houston, Dynamic Positioning Committee , 2011.
9. Rowley U.H. 2002. DP Integration and Technology Growth on Workboats. Dynamic Positioning Conference 2002.
10. Sørensen A. J., Marine cybernetics: modeling and control, Fifth Ed. Trondheim, Norway : Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
11. Śmierzchalski R., Automatykacja i sterowanie statkiem, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk (2013), ISBN 978-83-7348-487-0
12. Witkowska A., Metody alokacji sterowań w układach dynamicznego pozycjonowania statku, Aktualne problemy automatyki i robotyki/ ed. Krzysztof Malinowski, Jerzy Józefczyk, Jerzy Świątek Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2015, s.634-643.

STRUCTURE OF CONTROL SYSTEM DYNAMICALLY POSITIONED SHIP

The article presents the functions and tasks of the system dynamic positioning (DP) of ship. Control problems were discussed - to stabilize the position and direction (the ship's course) at low speed maneuverability and also ship models DP. It specifies the requirements of classification societies for ships DP. The article discusses the multilayer structure of the ship DP control system, where the basic problems include filtering signals and estimation of the size of the measured and unmeasured, choice of control methods and monitoring and the allocation of the DP drives.

Keywords: dynamic positioning (DP), control structure of the ship DP, ship models, ship requirements.