

**ZESZYTY NAUKOWE NR 2 (74)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Stanisław Gucma

**Układy współrzędnych stosowane w nawigacji
na akwenach ograniczonych**

Słowa kluczowe: nawigacja pilotażowa, nawigacja na akwenach ograniczonych,
układy współrzędnych w nawigacji pilotażowej

*Przedstawiono lokalne układy współrzędnych stosowane w nawigacji na akwenach
ograniczonych oraz typowe przykłady ich zastosowań.*

Coordinate Systems Used in Navigation on Confined Areas

Key words: pilotage navigation, navigation in restricted areas, coordinate systems
in pilotage navigation

*The article deals with local coordinate systems used in navigation in restricted
areas. Typical examples of such systems are shown.*

Wprowadzenie

Nawigacja na akwenach ograniczonych nazywa się często nawigacją pilotażową lub pilotową. Nazwa ta wywodzi się z tego, że przy prowadzeniu nawigacji na akwenach ograniczonych często asystuje pilot, a proces nawigacji morskiej, w którym on uczestniczy, nazywany jest pilotażem.

W procesie nawigacji na akwenach ograniczonych, ze względu na szybkie zmiany położenia statku w stosunku do obiektów brzegowych, pozycję obserwowaną i zliczoną nie wyznacza się na mapie nawigacyjnej, tak jak przy nawigacji na akwenach nieograniczonych i przybrzeżnych. Położenie statku jest określane w procesie myślowym prowadzącego statek pilota czy kapitana, a nawigacja pilotażowa oparta jest na dobrej znajomości lokalnych warunków nawigacyjnych oraz ich wpływu na wykonywane przez określony statek manewry. Pilot nie posługuje się wtedy współrzędnymi geograficznymi, lecz współrzędnymi lokalnymi, które zależą od rodzaju drogi wodnej, wykonywanego manewru oraz stosowanej metody określenia pozycji statku.

W artykule przedstawiono układy współrzędnych oraz przykłady ich wykorzystania w nawigacji na akwenach ograniczonych.

1. Stosowane układy współrzędnych w nawigacji pilotażowej

W procesie nawigacji pilotażowej nawigator nie posługuje się współrzędnymi geograficznymi, lecz współrzędnymi lokalnymi, które zależą od rodzaju drogi wodnej i wykonywanego w danym momencie manewru, a także od stosowanej metody określania pozycji statku. Są to następujące układy współrzędnych:

- radialny układ współrzędnych związany z pojedynczym znakiem nawigacyjnym,
- brzegowy układ współrzędnych związany z linią brzegową,
- torowy układ współrzędnych związany z osią toru wodnego.

Radialny układ współrzędnych

Radialny układ współrzędnych jest stosowany w przypadku podejścia lub przejścia statku obok pojedynczego znaku nawigacyjnego, brzegowego punktu charakterystycznego czy też obiektu radarowego.

Biegunem radialnego układu współrzędnych jest znak nawigacyjny, w stosunku do którego jest określana pozycja (rys. 1). Teoretycznymi współrzędnymi biegunowymi są tu: namiar rzeczywisty na statek i odległość statku od znaku nawigacyjnego $P(NR_z, D)$. W praktyce stosuje się inne współrzędne biegunowe,

a mianowicie namiar ze statku na znak nawigacyjny i odległość znaku od statku $P(NR, D)$. Jest to tożsamy system, gdyż pomiędzy tymi namiarami występuje następująca zależność:

$$NR_z = NR \pm 180^\circ$$

gdzie:

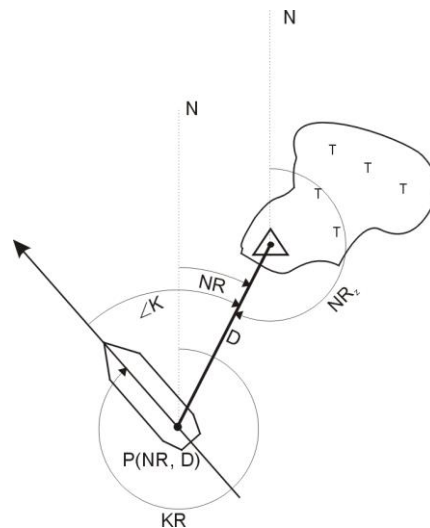
- NR_z – namiar rzeczywisty ze znaku nawigacyjnego na statek,
- NR – namiar rzeczywisty ze statku na znak nawigacyjny.

W przypadku pływania na stałym kursie (np. przejście torem wodnym) stosuje się w praktyce nie namiar rzeczywisty, lecz kąt kursowy na ten znak, gdyż przy $KR = \text{const.}$ pozycję we współrzędnych biegunowych można zapisać w postaci $P(\sphericalangle K, D)$, co wynika z następującej zależności:

$$NR_z = KR + \sphericalangle K \pm 180^\circ$$

gdzie:

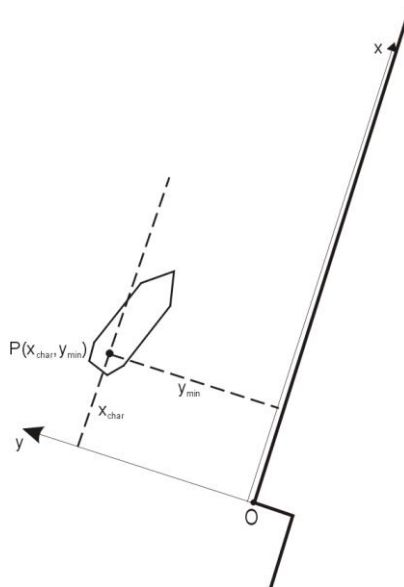
- KR – stały kurs rzeczywisty statku,
- $\sphericalangle K$ – kąt kursowy na znak nawigacyjny.



Rys. 1. Radialny układ współrzędnych
Fig. 1. The radial coordinate system

Brzegowy układ współrzędnych

Brzegowy układ współrzędnych jest stosowany przy manewrach podejścia statku do nabrzeża lub przejścia statku wzdłuż linii brzegu. Jest to układ współrzędnych prostokątnych, w którym oś odciętych x jest zgodna z linią nabrzeża (linią brzegową), natomiast oś rzędnych y jest do niej prostopadła i zawsze skierowana w stronę wody (rys. 2). Początkiem układu współrzędnych jest zazwyczaj charakterystyczny punkt brzegowy lub obiekt radarowy, taki jak rampa w przypadku promów i statków typu ro-ro lub koniec nabrzeża czy pirsu. Współzrzednymi układu brzegowego jest najczęściej najmniejsza odległość pozycji obserwatora lub anteny radarowej od brzegu (y_{\min}) oraz odległość pozycji obserwatora od punktu charakterystycznego nabrzeża (x_{char}), mierzona wzdłuż linii brzegowej. Pozycję tę można zapisać następująco $P(x_{\text{char}}, y_{\min})$.

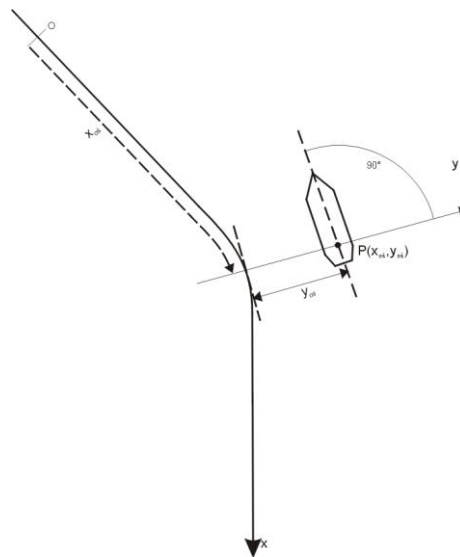


Rys. 2. Brzegowy układ współrzędnych
 Fig. 2. The coastal coordinate system

Torowy układ współrzędnych

Torowy układ współrzędnych jest stosowany przy żegludze po torach wodnych różnego typu. Jest to układ współrzędnych, w którym oś odciętych x jest zgodna z osią toru wodnego lub osią pasa ruchu w przypadku rozgraniczzonego ruchu dwukierunkowego (rys. 3). Oś rzędnych y jest prostopadła do stycznej osi

toru w danym punkcie i skierowana w prawą stronę od kursu statku, czyli kierunek osi jest zależny od kierunku ruchu statku na torze wodnym. Współzrzednymi układu torowego są: odległość pozycji obserwatora od osi toru (y_{os}) w prawo (+) lub lewo (-) określana zazwyczaj w metrach oraz długość osi toru od początku układu do punktu rzutu pozycji obserwatora na tę oś (x_{os}). Pozycję tą można zapisać następująco $P(x_{os}, y_{os})$.



Rys. 3. Torowy układ współrzędnych
Fig. 3. The waterway coordinate system

2. Przykłady zastosowań w nawigacji pilotażowej różnych układów współrzędnych

W nawigacji na akwenach ograniczonych najczęściej są wykorzystywane następujące terestyczne (optyczne) metody określania pozycji statku:

- pozycja określana na podstawie oceny kąta kursowego i odległości do pojedynczego znaku nawigacyjnego, przy znanym kursie statku (radialny układ współrzędnych);
- pozycja określana na torze wodnym oparta na różnych typach nabieżników optycznych (torowy układ współrzędnych);
- pozycja określana na torze wodnym na podstawie oceny odległości do brzegu (torowy układ współrzędnych);
- pozycja określana na podstawie oceny odległości do brzegu i jego elementów (brzegowy układ współrzędnych).

Pod pojęciem oceny parametrów nawigacyjnych, takich jak odległość czy kąt kursowy należy rozumieć wzrokowe określenie tych parametrów bez wykorzystania przyrządów nawigacyjnych. Metoda ta jest powszechnie stosowana na akwenach ograniczonych i jest oparta na doświadczeniu nawigatora prowadzącego nawigację.

W czasie prowadzenia nawigacji na akwenach ograniczonych często zmienne są metody określania pozycji i związanych z nią układów współrzędnych. Są to następujące typowe przypadki:

1. Na statku idącym torem wodnym oznakowanym nabieżnikami i pławami pozycja generalnie jest określana we współrzędnych torowych, opartych na nabieżnikach. Przechodząc obok stawy lub pławy zmieniany jest układ współrzędnych na radialny a pozycja jest wyznaczana na podstawie trawersu i odległości trawersowej. Pozycja ta następnie jest porównywana z pozycją określoną na podstawie nabieżnika po zmianie układu współrzędnych z radialnego na torowy.
2. Na statku idącym prostoliniowym odcinkiem toru wodnego pozycja jest określana na podstawie nabieżnika we współrzędnych torowych. Wchodząc na zakole toru oznakowanego stawą lub pławą zwrotną zmieniany jest układ współrzędnych na radialny, a pozycja jest określana zgodnie z namiarem na stawę i odległością do niej.
3. Na statku idącym torem wodnym pozycja jest wyznaczana jedną z metod terestrycznych we współrzędnych torowych. Przy podejściu do nabrzeża zmieniany jest układ współrzędnych z torowego na brzegowy, a pozycja jest określana na podstawie oceny odległości do brzegu i jego elementów.

Manewr podejścia do pojedynczego znaku nawigacyjnego

Manewr podejścia statku do pojedynczego znaku nawigacyjnego jest stosowany w przypadku takich sytuacji nawigacyjnych jak:

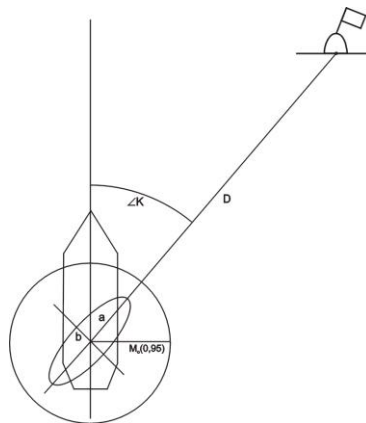
- wejście do portu – podejście do stawy lub pławy wejściowej,
- oczekiwanie na pilota przy pławie pilotowej,
- manewr zakotwiczenia statku na kotwiczowisku oznakowanym systemem pław itp.

Określenie pozycji przy podejściu statku do pojedynczego znaku nawigacyjnego polega na ocenie wzrokowej kąta kursowego na ten znak $\sphericalangle K$ oraz odległości do niego D . Znając kurs rzeczywisty statku, można określić namiar rzeczywisty na statek NR_Z , a tym samym pozycję statku we współrzędnych radialnych $P(NR_Z, D)$ (rys. 4).

Dokładność określania pozycji statku przy podejściu do znaku nawigacyjnego zależy od dokładności oceny kąta kursowego i odległości do tego znaku.

Dokładność wzrokowej oceny kąta kursowego zależy od warunków przeprowadzenia pomiaru (oceny). Do warunków oceny należy:

- rodzaj obserwacji, rozróżniane są dwa rodzaje obserwacji:
 - dzienna do znaku nawigacyjnego,
 - nocna do światła nawigacyjnego;
- wielkości kąta kursowego;
- prędkości zmiany kąta kursowego, co zależy od:
 - odległości do obiektu,
 - prędkości statku;
- doświadczenie obserwatora.



Rys. 4. Ocena dokładności pozycji statku określonej na podstawie wzrokowego pomiaru kąta kursowego i odległości do pojedynczego znaku nawigacyjnego

Fig. 4. An assessment of the vessel position accuracy based on visual measurement of relative bearing and distance to a single navigational mark

Rodzaj obserwacji (dzienna, nocna) w przypadku pomiaru kąta kursowego ma mały wpływ na dokładność jego oceny. Doświadczenie obserwatora ma również pomijalny charakter, gdyż nawigację na akwenach ograniczonych prowadzi zazwyczaj pilot lub kapitan, czyli nawigator o dużym doświadczeniu. W związku z powyższymi uwarunkowaniami można przyjąć w praktyce, że dokładność wzrokowej oceny kąta kursowego zależy od:

- wartości kąta kursowego,
- prędkości zmiany kąta kursowego.

Przeprowadzone przez autora badania ekspertowe wykazały, że największe dokładności oceny kąta kursowego uzyskiwane są, gdy znak nawigacyjny znajduje się w strefie dziobowej lub w okolicach trawersu, czyli gdy kąt kursowy

zawiera się w granicach $\nabla K = 000^\circ \div 015^\circ$ lub $\nabla K = 080^\circ \div 100^\circ$. W tabeli 1 przedstawiono dokładności oceny kąta kursowego dla dwóch prędkości zmiany kąta kursowego:

- małe prędkości zmiany ($0^\circ/\text{min} \div 15^\circ/\text{min}$),
- duże prędkości zmiany ($> 15^\circ/\text{min}$).

Dokładność wzrokowej oceny odległości zależy od warunków przeprowadzania pomiaru (oceny). Do warunków oceny należy:

- rodzaj obserwacji, rozróżniane są dwa rodzaje obserwacji:
 - dzienna do znaku (obiektu) nawigacyjnego,
 - nocna do światła nawigacyjnego;
- prędkości zmiany odległości;
- wysokości oka obserwatora nad poziomem morza;
- doświadczenie obserwatora.

Tabela 1

Dokładność oceny wzrokowej kątów kursowych
The accuracy of relative bearing visual assessment

Lp.	Wielkość kąta kursowego [°]	Średni błąd wzrokowej oceny kąta kursowego m ∇K [°]	
		mała prędkość zmiany kąta kursowego $0^\circ/\text{min} \div 15^\circ/\text{min}$	duża prędkość zmiany kąta kursowego $> 15^\circ/\text{min}$
1.	$000^\circ \div 015^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$
2.	$015^\circ \div 045^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
3.	$045^\circ \div 080^\circ$	$\pm 7^\circ$	$\pm 15^\circ$
4.	$080^\circ \div 100^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
5.	$100^\circ \div 180^\circ$	$\pm 7^\circ$	$\pm 15^\circ$

Rodzaj obserwacji (dzienna, nocna) ma duży wpływ na wielkość błędów wzrokowej oceny odległości. W przypadku obserwacji dziennej błędy te są minimum dwukrotnie mniejsze niż przy obserwacji nocnej. Obserwację nocną należy identyfikować z oceną odległości do światła nawigacyjnych, gdyż w przypadku oceny odległości do oświetlonych obiektów błędy te będą miały mniejsze wartości. Należy przypuszczać, że w pomiarze odległości do obiektu oświetlonego błędy będą osiągać wartości średnie pomiarów dziennych i nocnych. Prędkość zmiany odległości i wysokość oka obserwatora mają wprawdzie wpływ na wielkość błędów oceny odległości, lecz zależności te obecnie są słabo rozpoznane.

W tabeli 2 przedstawiono dokładności wzrokowej oceny odległości dla obserwacji dziennej i nocnej w zakresie mierzonej odległości $0 \div 1,0$ mili morskiej,

określone na podstawie badań ekspertowych. Dane te dotyczą obserwatora o średnim doświadczeniu. W przypadku obserwatora z dużym doświadczeniem wartości błędów można zmniejszyć nawet o około 25%.

Tabela 2
Dokładność wzrokowej oceny odległości (dla zakresu pomiaru 0 ÷ 1,0 mili morskiej)
The accuracy of visual assessment of distance (ranges 0 – 1.0 Nm)

Lp.	Rodzaj obserwacji	Współczynnik (k) określający średni błąd wzrokowej oceny odległości [m_D] w stosunku do zmierzonej odległości D
1.	Obserwacja dzienna	$\pm 0,10$
2.	Obserwacja nocna do światła nawigacyjnego	$\pm 0,25$
3.	Obserwacja nocna do oświetlonego obiektu	$\pm 0,17$

Znając błędy oceny wzrokowej kąta kursowego i odległości do znaku nawigacyjnego, można określić dokładność pozycji statku wyznaczonej tą metodą. Do oceny dokładności wykorzystano elipsę błędów. Dużą półą elipsy określa się następująco:

$$a = m_D = k \cdot D \text{ [m]}$$

gdzie:

- D – odległość do znaku nawigacyjnego [m],
- k – współczynnik błędu określony według tabeli 2.

Małą półą elipsy jest określana z wykorzystaniem następującej zależności:

$$b = \frac{m_{NR_z} \cdot D}{57,3^\circ} \text{ [m]}$$

gdzie:

- m_{NR_z} – błąd średni namiaru rzeczywistego ze znaku nawigacyjnego na statek [$^\circ$].

Błąd średni namiaru rzeczywistego ze znaku nawigacyjnego na statek określa się następująco:

$$m_{NR_z} = \sqrt{m_{\angle K}^2 + m_{KR}^2} \text{ [m]}$$

gdzie:

- $m_{\angle K}$ – błąd średni wzrokowej oceny kąta kursowego określony wg tabeli 1 [°],
 m_{KR} – błąd średni utrzymania statku na zadanym kursie [°].

Parametry elipsy błędu pozycji określonej przy różnych kątach kursowych i odległościach do pojedynczego znaku nawigacyjnego przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

Parametry elipsy błędu pozycji określonej na podstawie wzrokowej oceny kąta kursowego i odległości do pojedynczej stawy
Elipse error parameters of position inaccuracy for visual measurement of relative bearing and distance to a single beacon

Lp.	Odległość do znaku nawigacyjnego [m], [mila morska]	Półosie elipsy błędów a [m], b [m]											
		obserwacje dzienne						obserwacje nocne					
		kąty kursowe $\angle K$ [°]											
		10°		50°		90°		10°		50°		90°	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	50 m	5	3,1	5	6,1	5	4,6	12,5	3,1	12,5	6,1	12,5	4,6
2	100 m	10	6,3	10	12,2	10	9,2	25	6,3	25	12,2	25	9,2
3	0,1 mili morskiej	18,5	11,6	18,5	22,6	18,5	17,1	46,3	11,6	46,3	22,6	46,3	17,1
4	0,2 mili morskiej	37	23,2	37	45,2	37	34,2	92,5	23,2	92,5	45,2	92,5	34,2
5	0,5 mili morskiej	92,5	58,2	92	113,0	92,5	85,7	231,5	58,2	231,5	113,0	231,5	85,7
6	1,0 mili morskiej	185	116,4	185	189,3	185	171,3	463	116,4	463	189,3	463	171,3

Przejście torem wodnym z oznakowaniem bocznym

Podczas żeglugi torem wodnym do określenia pozycji często jest wykorzystany nabieżnik utworzony samoistnie przez boczne oznakowanie prostoliniowych torów wodnych stawami lub pławami. Zasada wykorzystania tego typu nabieżnika jest oparta na porównaniu kątów utworzonych między lewymi Θ_1 i prawymi Θ_2 stawami lub pławami oznakowania bocznego (rys. 5).

Podstawowym parametrem nabieżnika utworzonego z dwóch par staw charakteryzującym jego czułość jest bezpieczne odchylenie boczne, określone na poziomie ufności 0,95. Wielkość kątowa bezpiecznego odchylenia bocznego, podobnie jak w nabieżniku klasycznym, jest sumą wykrywalnej różnicy kątów oraz błędu średniego różnicy kątów nabieżnika w sektorze jego czułości, czyli:

$$\Theta_b(0,95) = \Theta_z + m_\Theta(0,95)$$

gdzie:

- Θ_z – wykrywalna przez oko ludzkie różnica kątów Θ_1 i Θ_2 ,
 $m_\Theta(0,95)$ – błąd średniej różnicy kątów nabieżnika w sektorze jego czułości.

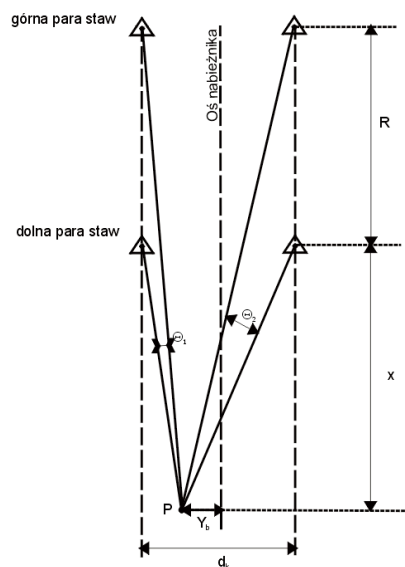
Bezpieczne odchylenie boczne nabeźnika utworzonego z dwóch par staw na poziomie ufności 0,95 jest określone według następującej zależności (rys. 5):

$$Y_b(0,95) = \Theta_b(0,95) \cdot x \left(\frac{x}{R} + 1 \right)$$

Dla nabeźników dziennych wielkość kątową bezpiecznego odchylenia bocznego można przyjąć jako równą $\Theta_b^d(0,95) = 4'$ ($1,16 \cdot 10^{-3}$ rad), natomiast dla nabeźników nocnych tego typu równą $\Theta_b^n(0,95) = 5'$ ($1,45 \cdot 10^{-3}$ rad) [1]. Należy zaznaczyć, że przedstawione zależności odchyłeń bocznych dają jedynie przybliżone wyniki, nieuwzględniające kątów pionowych i wysokości znaków nabeźnika, jasności światel i ich zasięgów, kształtu znaków itp. Są one jednak wystarczająco dokładne do praktycznego zastosowania w nawigacji.

W przypadku, gdy w procesie nawigacji na torze wodnym z oznakowaniem bocznym nie jest wykorzystywana metoda nabeźnikowa, pozycja statku jest określana w stosunku do osi toru wodnego na podstawie oceny następujących parametrów:

- różnicy kątów Θ_1 i Θ_2 ,
- wielkości kątów Θ_1 i Θ_2 tworzących nabeźniki klasyczne z bocznych staw systemu oznakowania,
- położenia statku w stosunku do staw znajdujących się przed i za trawersem.



Rys. 5. Nabeźnik utworzony z dwóch par staw
 Fig. 5. Leading mark composed of two pairs of beacons

Oceniając dokładność określania odległości statku (obserwatora) od osi toru wodnego, można z pewnym przybliżeniem przyjąć, że błąd kierunkowy pozycji prostopadły do osi toru wodnego zależy od poprzecznej odległości między stawami w parach i dla obserwacji dziennej wynosi:

$$p_y(0,95) = \pm (0,05 \div 0,2) \cdot d_k$$

gdzie:

- p_y – błąd kierunkowy poprzeczny do osi toru wodnego na poziomie ufności 0,95,
- d_k – poprzeczna odległość między stawami w parze [m].

Przy obserwacji nocnej do świateł nawigacyjnych wartości błędu wzrosną o około 100%. Dolną wartość należy przyjąć dla statku znajdującego się między stawami danej pary ($x = 0$), natomiast górną, gdy statek znajduje się między parami staw w połowie ich rozstawu ($x = R/2$). Wielkości te są praktycznie dopuszczalne w przypadku:

- małych odległości między stawami w parach ($d_k \leq 300$ m),
- stosunku rozstawu staw i odległości między nimi mieszczącego się w przedziale $15 \geq R/d \geq 5$.

Podejście do nabrzeża

Podczas manewru podejścia statku do nabrzeża pozycja jego jest określana we współrzędnych brzegowych, które szacuje się następująco:

1. Odległość statku (obserwatora) od brzegu y_{\min} jest określana na podstawie wzrokowej oceny najbliższej odległości do brzegu.
2. Odległość obserwatora od punktu charakterystycznego mierzona wzdłuż linii brzegowej x_{char} określa się na podstawie oceny kąta kursowego i odległości do tego punktu, przy czym uwzględniane są tu liniowe parametry statku.

Dokładność określenia tych współrzędnych zależy od:

- rodzaju obserwacji, rozróżniamy dwa rodzaje obserwacji:
 - dzienna,
 - nocna;
- prędkości zmiany odległości;
- wysokości oka obserwatora nad poziomem morza;
- odległości od brzegu;
- doświadczenia obserwatora.

Przy odległości do nabrzeża nie przekraczającej 200 m błędy tych współrzędnych określone na poziomie ufności 0,95 wynoszą odpowiednio:

- w porze dziennej $m_{y_{\min}}(0,95) = m_{x_{\text{char}}}(0,95) = 0,1 \cdot D$;
- w porze nocnej przy widocznym nabrzeżu $m_{y_{\min}}(0,95) = m_{x_{\text{char}}}(0,95) = 0,2 \cdot D$
gdzie: D – odległości określone przy ocenie współrzędnych.

Wnioski

W artykule zaprezentowano trzy układy współrzędnych wykorzystywane w nawigacji pilotażowej oraz przedstawiono typowe przykłady zastosowania poszczególnych układów:

- 1) radialny układ współrzędnych przy podejściu do pojedynczej stawy,
- 2) torowy układ współrzędnych przy przejściu toru wodnego oznakowanego bocznie,
- 3) brzegowy układ współrzędnych przy manewrach podejścia do nabrzeża (cumowanie statku).

Literatura

1. Gucma S., *Nawigacja pilotażowa*, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk (w druku).

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr inż. kpt.ż.w. Stanisław Kołaczyński, prof. AMW
prof. dr hab. inż. kpt.ż.w. Eugeniusz Łusznikow, prof. AM

Adres Autora

prof. dr hab. inż. Stanisław Gucma
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin