

Paweł Zalewski*

MODELE Z FILTREM KALMANA I ROZMYTE W SYSTEMACH DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA

1. Zadania stawiane systemowi dynamicznego pozycjonowania

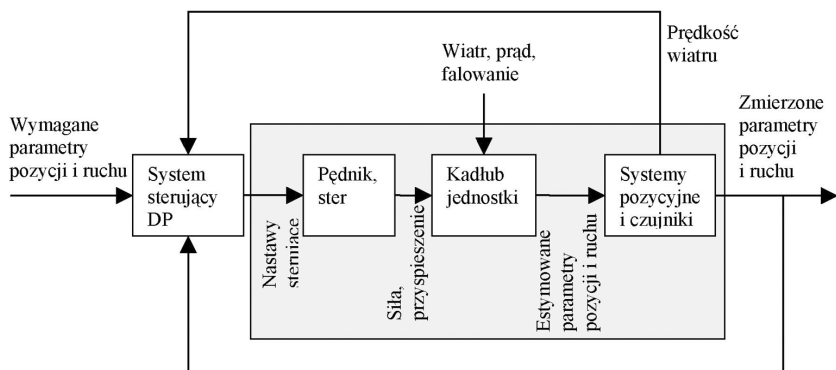
Zgodnie z powszechnie przyjętymi definicjami przez dynamiczne utrzymywanie pozycji jednostki pływającej (terminologia stosowana w [9, 12]), coraz częściej nazywane także dynamicznym pozycjonowaniem [5] (oraz DP od ang. *dynamic positioning*), rozumiemy „technikę automatycznego utrzymania w określonych granicach pozycji jednostki pływającej poprzez sterowanie urządzeniami napędowo-sterowymi generującymi siły przeciwdziałające wpływowi sił wiatru, falowania i prądu” [1], a system dynamicznego pozycjonowania to: „hydrodynamiczny system utrzymania lub kontroli pozycji oraz kursu jednostki pływającej za pomocą zcentralizowanego sterowania ręcznego lub automatycznego w reakcji na zmiany warunków hydrometeorologicznych w założonych granicach” [2]. Należy tu nadmienić, iż słowo „pozycjonowanie” wypiera określenia opisowe takie jak „dynamiczne ustalanie pozycji” oraz „dynamiczne utrzymywanie pozycji” szczególnie w komercyjnych publikacjach firm sprzedających na polskim rynku systemy DP (np. www.it-rem.pl) oraz wśród operatorów systemów DP (zob. www.wikipedia.pl — dynamiczne pozycjonowanie, internetowe forum offshore itp.). Atutami określeń „pozycjonowanie” i „DP” są zwięzłość i komunikatywność, w związku z czym można spodziewać się utrwalenia ich w normie językowej.

Aby zapewnić sterowanie pozycją (parametry x , y w układzie kartezjańskim współrzędnych) oraz kursem (ψ) system DP musi wykonywać następujące zadania (rys. 1 i 2):

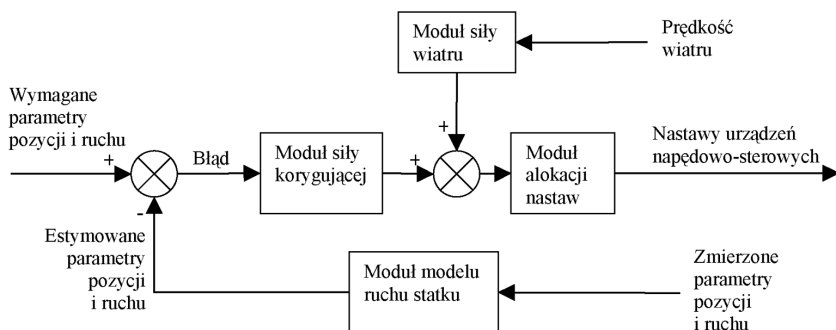
- przewidywać ruch statku (wyznaczać wektor stanu) na podstawie modelu hydrodynamicznego;
- mierzyć ruch statku na podstawie informacji uzyskiwanych z systemów pozycyjnych i czujników;

* Wydział Nawigacyjny, Akademia Morska w Szczecinie

- wyznaczać nieznaną siłę i jej moment wynikające z różnicy pomiędzy predykcją a pomiarem;
- wyznaczać siłę i jej moment wynikające z różnicy pomiędzy wartością aktualną wektora stanu a zadaną przez operatora;
- wyznaczać i zadawać korygujące nastawy urządzeń napędowo-sterowych.



Rys. 1. Schemat systemu DP



Rys. 2. Schemat systemu sterującego DP na podstawie [4]

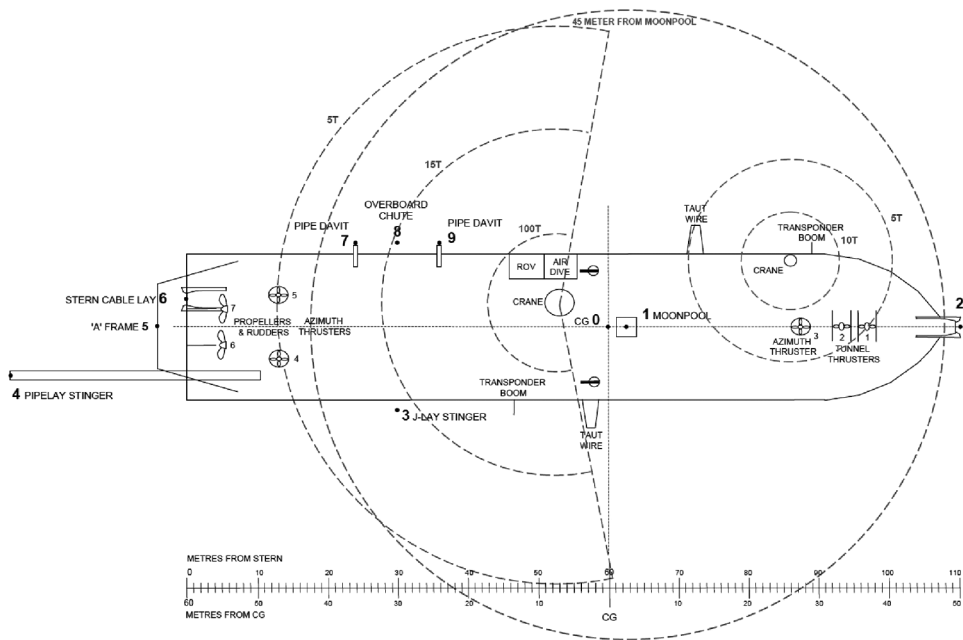
Po zakończeniu w sierpniu b.r. projektu „Centrum Technologii Nawigacyjnych” finansowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Akademia Morska w Szczecinie stała się użytkownikiem systemu DP Kongsberg K-Pos, spełniającego normy klasyfikacyjne DP Class 2, o częściowo otwartej strukturze, zintegrowanego z wielozadaniowym symulatorem manewrowo-nawigacyjnym statku typu Kongsberg Polaris. Zbudowany symulator DP połączony z zewnętrznym modelem statku, akwenu i środowiska umożliwia tworzenie scenariuszy symulacyjnych praktycznie wszystkich zadań stawianych jednostkom DP oraz zmianę podstawowych parametrów wewnętrznego modelu statku w celu jego analizy i dostosowania do modelu zewnętrznego (podrozdz. 1.3 i rys. 5).

1.1. Estymacja pozycji i prędkości

W celu estymacji pozycji i prędkości statku system DP pobiera informację z:

- systemów pozycyjnych np. DGPS, hydroakustycznych;
- urządzeń kursowych np. żyrokompasów;
- systemów inercyjnych (VRS) oraz modelu hydrodynamicznego opartego o fizyczny opis ruchu statku.

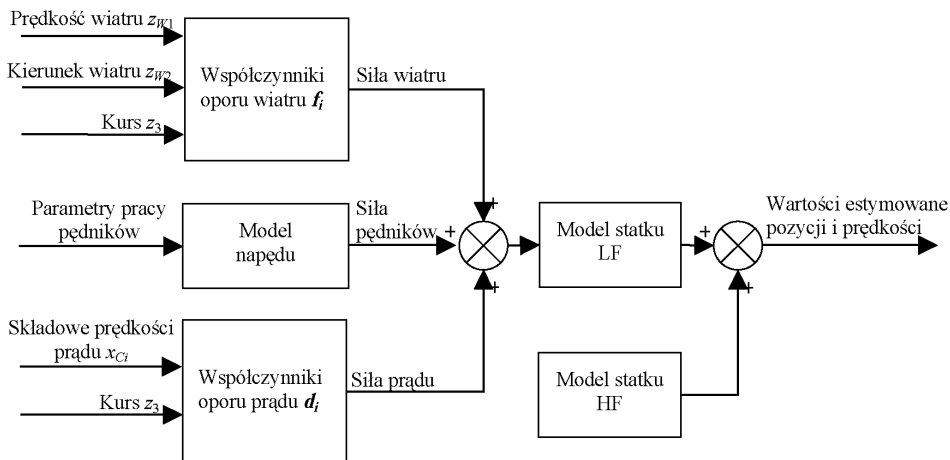
Każdy z systemów pozycyjnych dokonuje pomiarów pozycji statku w płaszczyźnie poziomej, a każdy z żyrokompasów pomiarów kursu statku. Ich sygnały są konwertowane do wspólnego formatu i weryfikowane pod względem wiarygodności (aby wyeliminować ewentualne niesprawności systemów pozycyjnych i kursowych). Otrzymane na tym etapie wartości pomiarów są jednakże obciążone błędami wynikającymi z zaszumienia sygnałów pomiarowych zależnego od rodzaju metody pomiarowej i charakterystyk urządzeń. Dodatkowe błędy wprowadzają pomiary VRS, mające na celu sprowadzenie zmian pozycji wynikających z kołysania i kiwania do przyjętego punktu odniesienia. Przykładowe punkty oznaczone cyframi arabskimi przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Położenie punktów odniesienia dla systemów pozycyjnych na wielozadaniowej jednostce DP MSV „Challenger” [8]

Model hydrodynamiczny również dostarcza przybliżoną (także obciążoną błędami) informację o wektorze stanu statku. W celu kontroli przemieszczenia jednostki DP w ukła-

dzie równań ruchu wyróżnia się składowe oscylacyjne ruchu, wynikające z oddziaływania fal, od pozostałych składowych równań [3, 4]. W efekcie powszechnie stosowany model hydrodynamiczny 3DOF (w trzech stopniach swobody w płaszczyźnie poziomej) jest sumą przewidywanych reakcji statku na wymuszenia zewnętrzne niskiej częstotliwości (model LF) oraz wysokiej częstotliwości (model HF) – rysunek 4.



Rys. 4. Model ruchu statku w systemie DP

1.2. Układy współrzędnych w modelu ruchu

Analizując dynamikę ruchu statku wyróżnia się jego aspekty kinematyczne (geometryczne) oraz kinetyczne (analiza sił powodujących ruch). W związku z powyższym wygodnie jest przyjąć w modelu hydrodynamicznym dwa układy współrzędnych: NED (*North East Down* – topocentryczny, kartezjański względem elipsoidy odniesienia np. WGS84, uzyskiwany poprzez transformację z ECEF – układu geocentrycznego obracającego się wraz z Ziemią) oraz układ o tym samym początku (0,0,0), co NED, ale dwóch osiach równoległych odpowiednio do osi wzdłużnej i poprzecznej statku (x, y) i trzeciej osi z wspólnej z NED (rys. 5). Szczególnym przypadkiem drugiego układu współrzędnych może być układ dowiązany do jednego z punktów odniesienia na statku (rys. 3) – ang. *body frame*, czyli układ statkowy lub pokładowy. Ruch statku i jego dynamika analizowane będą w układzie statkowym, a następnie przekształcane do NED, siły i momenty działające na kadłub analizowane będą w układzie statkowym. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w podrozdziale 1.1 i na rysunku 5 model procesu zmiany pozycji i kursu można przedstawić za pomocą zależności liniowych:

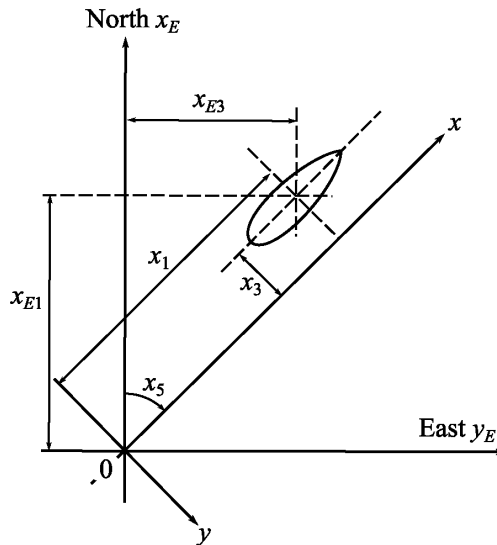
$$x_1 = x_{L1} + x_{H1} \quad (1)$$

$$x_3 = x_{L3} + x_{H3} \quad (2)$$

$$x_5 = x_{L5} + x_{H5} \quad (3)$$

gdzie:

- x_1 — współrzędna pozycji w kierunku x ,
- x_3 — współrzędna pozycji w kierunku y ,
- x_5 — współrzędna kątowa kursu,
- x_{Li} — zmienne pozycji i kursu z modelu LF,
- x_{Hi} — zmienne pozycji i kursu z modelu HF.



Rys. 5. Układy współrzędnych w modelu hydrodynamicznym systemu DP na podstawie [3 i 11]

1.3. Model LF

Model niskiej częstotliwości to zapis matematyczny przemieszczenia kadłuba spowodowanego siłami wiatru, pędników i prądu wody w układzie współrzędnych statkowych – wzdłuż i w poprzek kadłuba statku oraz dookoła punktu odniesienia w kadłubie. Układ współrzędnych równoległy do układu statkowego (rys. 4) pozostaje nieruchomy w momencie wyliczania wymuszeń — podczas jednego kroku dyskretnego całkowania. Wyznaczona prędkość chwilowa i zmiany współrzędnych pozycji są przekształcane do tego układu, a następnie do NED. Procedura ta jest powtarzana w każdym kroku czasowym całkowania.

Przyjęte za [3 i 6] równania modelu LF stosowane w komercyjnych systemach DP to różniczkowe równania liniowe drugiego rzędu:

$$\dot{x}_{L1} = x_{L2} \quad (4)$$

$$\dot{x}_{L2} = -\frac{d_1}{m_1}|x_{L2} - x_{C1}|(x_{L2} - x_{C1}) + \frac{1}{m_1}(u_1 + v_1) + \eta_{L1} \quad (5)$$

$$\dot{x}_{L3} = x_{L4} \quad (6)$$

$$\dot{x}_{L4} = -\frac{d_2}{m_2}|x_{L4} - x_{C2}|(x_{L4} - x_{C2}) + \frac{1}{m_2}(u_2 + v_2) + \eta_{L2} \quad (7)$$

$$\dot{x}_{L5} = x_{L6} \quad (8)$$

$$\dot{x}_{L6} = -\frac{d_3}{m_3}|x_{L6}|x_{L6} - \frac{d_4}{m_3}|x_{L4} - x_{C2}|(x_{L4} - x_{C2}) + \frac{1}{m_3}(u_3 + v_3 + x_{C3}) + \eta_{L3} \quad (9)$$

w których występujące zmienne to:

- x_{L1} — współrzędna pozycji w kierunku x (przesunięcie wzdłużne);
- x_{L2} — składowa prędkości w kierunku x (prędkość wzdłużna);
- x_{L3} — współrzędna pozycji w kierunku y (przesunięcie poprzeczne);
- x_{L4} — składowa prędkości w kierunku y (prędkość poprzeczna);
- x_{L5} — współrzędna kątowa kursu (zmiana kursu);
- x_{L6} — prędkość kątowa (prędkość zmiany kursu);
- x_{C1} — składowa prędkości prądu wody w kierunku x ;
- x_{C2} — składowa prędkości prądu wody w kierunku y ;
- x_{C3} — moment siły prądu wynikający z ewentualnej niedoskonałości modelu (błędów modelu);
- v_1 — składowa siły wiatru w kierunku x ;
- v_2 — składowa siły wiatru w kierunku y ;
- v_3 — moment siły wiatru;
- u_1 — składowa siły naporu pędników w kierunku x ;
- u_2 — składowa siły naporu pędników w kierunku y ;
- u_3 — moment siły naporu;

- $\eta_{Li}, i = 1, 2, 3$ — zmienne losowe reprezentujące białe, gaussowskie szумы odpowiednich procesów o wartościach oczekiwanych 0;
- $d_i, i = 1, 2$ — współczynniki sił oporu [kg/m], przedstawiane w funkcji powierzchni podwodzia i kąta α — różnicy kursu i kierunku prądu wody;
- $d_i, i = 3, 4$ — współczynniki momentów oporu odpowiednio w [kg $\times$ m²] i [kg], przedstawiane w funkcji powierzchni podwodzia i kąta α — różnicy kursu i kierunku prądu wody;
- $m_i, i = 1, 2$ — stałe współczynniki bezwładności — masy [kg];
- $m_i, i = 3$ — stały współczynnik bezwładności — moment bezwładności [kg $\times$ m²].

Wartości prędkości prądu występujące w równaniach (5), (7), (9) otrzymywane są na podstawie przekształcenia składowych prędkości prądu w układzie NED z zastosowaniem macierzy obrotu C .

$$C = \begin{bmatrix} \cos x_5 & -\sin x_5 \\ \sin x_5 & \cos x_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_{C1} \\ x_{C2} \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} x_{C1}^{NED} \\ x_{C2}^{NED} \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie:

- x_5 — suma składowych LF i HF zmiany kursu dana równaniem (3),
- x_{C1}^{NED} — składowa prędkości prądu wody w kierunku północnym (N) w układzie topocentrycznym,
- x_{C2}^{NED} — składowa prędkości prądu wody w kierunku wschodnim (E) w układzie topocentrycznym,

Składowe prądu w układzie topocentrycznym spełniają zależności:

$$\dot{x}_{C1}^{NED} = \eta_{C1} \quad (12)$$

$$\dot{x}_{C2}^{NED} = \eta_{C2} \quad (13)$$

$$\dot{x}_{C3}^{NED} = \eta_{C3} \quad (14)$$

gdzie $\eta_{Ci}, i = 1, 2, 3$ oznaczają zmienne losowe reprezentujące białe, gaussowskie szумы odpowiednich procesów o wartościach oczekiwanych 0.

Prędkość i kierunek wiatru modelowane są jako suma wolno zmieniających się składowych wartości średnich i szybko zmieniających się składowych (porywy wiatru).

$$\dot{x}_{w1} = \eta_{w1} \quad (15)$$

$$\dot{x}_{w2} = a_1 x_{w2} + \eta_{w2} \quad (17)$$

$$\dot{x}_{w3} = \eta_{w3} \quad (18)$$

$$\dot{x}_{w4} = a_2 x_{w4} + \eta_{w4} \quad (19)$$

gdzie:

- x_{w1} — wolno zmieniająca się składowa prędkości wiatru;
- x_{w2} — szybko zmieniająca się składowa prędkości wiatru;
- x_{w3} — wolno zmieniająca się składowa kierunku wiatru
(kierunek wektora — dokład wieje);
- x_{w4} — szybko zmieniająca się składowa kierunku wiatru;
- $\eta_{wi}, i = 1, 2, 3, 4$ — zmienne losowe reprezentujące białe, gaussowskie szумы
odpowiednich procesów o wartościach oczekiwanych 0;
- $a_i, i = 1, 2$ — współczynniki stałe.

Siły i moment wiatru $v_i, i = 1, 2, 3$, zdefiniowane w modelu LF wynoszą wobec powyższego:

$$v_i = f_i(\beta)(x_{w1} + x_{w2})^2 \quad (20)$$

gdzie f_i są współczynnikami sił i momentu oporu od wiatru zależne od powierzchni nawiewu w funkcji kąta β pomiędzy kierunkiem wiatru a kursem statku:

$$\beta = x_{w3} + x_{w4} - x_5 \quad (21)$$

Wartości siły i momentu naporu pędników u_i wyznaczone są jako wypadkowe oddziaływań wszystkich pędników i sterów. Siła składowa każdego pędnika siła wyznaczana jest w funkcji prędkości obrotowej, skoku i kierunku śruby/steru oraz względnej prędkości wody w stosunku do pędników. Ponieważ operacje DP przeprowadzane są ze względnie niedużymi prędkościami wyznaczone nastawy pędników zależą będą bezpośrednio od zmierzonych podczas prób morskich maksymalnych sił naporu pędników do przodu i wstecz $u_i^{\max+}, u_i^{\max-}$ (ang. *maximum thruster forces at a bollard pull condition*) oraz od położenia pędników w układzie statkowym licząc od CG (rys. 3).

Okienko dialogowe przedstawione na rysunku 6 umożliwia zmianę parametrów sił i położenia pędników oraz naporu wiatru (modyfikacja% powierzchni nawiewu) w stosunku do pierwotnych oddziaływań w symulatorze DP.

Configuration	Max. force (ton)		Momentum arm (m)	
	Pos	Neg	X	Y
Bow Tunnel 1	15.0	-15.0	36.5	0.0
Bow Tunnel 2	15.0	-15.0	33.0	0.0
Bow Azimuth	17.0	-28.0	27.5	0.0
Port Azimuth	45.0	-28.0	-46.5	-5.5
Stbd Azimuth	45.0	-26.0	-46.5	5.5
Port Propeller	40.0	-26.0	-56.3	-6.0
Stbd Propeller	40.0	-10.0	-56.3	6.0

Rudder effect (%)

Wind effect (%) Surge Sway Yaw

OK Cancel Apply

Rys. 6. Zmienne parametry modelu DP w symulatorze Kongsberg K-Pos w AM w Szczecinie

1.4. Model HF

Model wysokiej częstotliwości to zapis matematyczny przemieszczenia kadłuba spowodowanego harmonicznymi siłami falowania. Przemieszczenie wzdłużne (postępowe), poprzeczne (burtowe) i kątowe (myszgowanie) modelowane są za pomocą trzech niezależnych oscylatorów harmonicznymi o zmiennej częstotliwości drgań uzupełnionych zmiennymi losowymi reprezentującymi szumy procesów (błędy modelu i nieprzewidywalne zmiany fali) [3].

W związku z powyższym równania modelu HF:

$$\dot{x}_{H1} = x_{H2} \quad (22)$$

$$\dot{x}_{H2} = -\omega_1^2 x_{H1} + \eta_{H1} \quad (23)$$

$$\dot{x}_{H3} = x_{H4} \quad (24)$$

$$\dot{x}_{H4} = -\omega_2^2 x_{H3} + \eta_{H2} \quad (25)$$

$$\dot{x}_{H5} = x_{H6} \quad (26)$$

$$\dot{x}_{H6} = -\omega_3^2 x_{H5} + \eta_{H3} \quad (27)$$

$$\dot{\omega}_1 = \eta_{H4} \quad (28)$$

$$\dot{\omega}_2 = \eta_{H5} \quad (29)$$

$$\dot{\omega}_3 = \eta_{H6} \quad (30)$$

gdzie:

x_{H1} — składowa HF przemieszczenia w kierunku x ;

x_{H2} — składowa HF prędkości w kierunku x ;

x_{H3} — składowa HF przemieszczenia w kierunku y ;

x_{H4} — składowa HF prędkości w kierunku y ;

x_{H5} — składowa HF zmiany kursu;

x_{H6} — składowa HF prędkości kątowej;

ω_1 — częstotliwość przemieszczeń wzdłużnych HF;

ω_2 — częstotliwość przemieszczeń burtowych HF;

ω_3 — częstotliwość myśkowania HF;

η_{Hi} , $i = 1, 2, \dots, 6$ — zmienne losowe reprezentujące białe, gaussowskie szумы procesów o wartościach oczekiwanych 0.

1.5. Model pomiarów

Pomiary w systemach DP odbywają się za pomocą systemów pozycyjnych takich jak DGPS-DGlonass (ewentualnie RTK), hydroakustycznych, radarowych, laserowych, inklinometrycznych; urządzeń kursowych — żyrokompasów lub kompasów DGPS; systemów inercyjnych (VRS, MRU). Przyjmując pomiary jednym systemem pozycyjnym i kursowym — nie wdając się w rozważania dotyczące kalibracji i weryfikacji wiarygodności wielu systemów (dla Kongsberg K-Pos zostały one przedstawione w [7]) — model pomiaru pozycji i kursu można zdefiniować równaniami:

$$z_1 = x_1 + w_1 \quad (31)$$

$$z_2 = x_3 + w_2 \quad (32)$$

$$z_3 = x_5 + w_3 \quad (33)$$

gdzie:

- z_1 — pomiar współrzędnej pozycji w kierunku x ,
- z_2 — pomiar współrzędnej pozycji w kierunku y ,
- z_3 — pomiar współrzędnej kątowej kursu,
- w_i — zmienne losowe reprezentujące szумы pomiarów: przyjmuje się je za wzajemnie niezależne, białe, o zerowych wartościach oczekiwanych oraz o znanych rozkładach gaussowskich ($i = 1, 2, 3$).

Pomiary prędkości i kierunku wiatru również można przyrównać do odpowiednich wartości modelowych:

$$z_{w1} = x_{w1} + x_{w2} + w_{w1} \quad (34)$$

$$z_{w2} = x_{w3} + x_{w4} + w_{w2} \quad (35)$$

gdzie:

- z_{w1} — zmierzona prędkość wiatru;
- z_{w2} — zmierzony kierunek wiatru względem osi x ;
- w_{wi} — zmienne losowe reprezentujące szумы pomiarów: przyjmuje się je za wzajemnie niezależne, białe, o zerowych wartościach oczekiwanych oraz o znanych rozkładach gaussowskich ($i = 1, 2$).

2. Filtr Kalmana

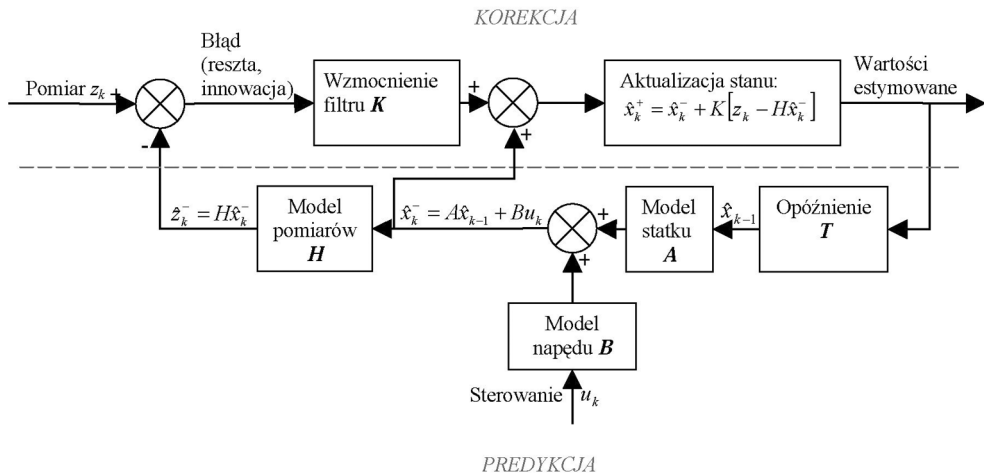
Przedstawione w rozdziale 1 liniowe równania różniczkowe modelu ruchu i pomiarów można zapisać, grupując odpowiednie współczynniki niewiadomych w macierze, jako:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + \eta_{k-1} \quad (36)$$

$$z_k = Hx_k + w_k \quad (37)$$

a następnie estymować rozwiązania w sposób klasyczny przy użyciu filtru Kalmana (ze względu na występujące nieliniowości procesu stosuje się rozszerzony filtr Kalmana EKF [3, 4, 6], w którym na początku dokonuje się linearyzacji parametrów względem ich wartości średnich i wariancji).

W pierwszym kroku na podstawie wektora stanu z modelu statku w chwili k oraz poprzedniej estymaty wektora stanu w $k - 1$: $\hat{x}_{k-1}$ człon predykcyjny filtru Kalmana wyznacza przewidywaną pozycję i prędkość statku jako $\hat{x}_k^-$, $k = 1, 2, 3, \dots, n$ oraz po uwzględnieniu specyfikacji pomiarów jako $\hat{z}_k^-$ (rys. 7).



Rys. 7. Schemat filtru Kalmana w systemie DP na podstawie [4]

Pomiary z systemów pozycyjnych i żyrokompasów umożliwiają poprawienie predykcji (przewidywanych wartości wektora stanu). W drugim kroku w części korekcyjnej filtru następuje porównanie pomiarów z wartościami przewidywanymi. Wzmocnienie filtra Kalmana K , wyliczone zależnością (38), przyznaje mniejszą wagę mniej dokładnemu pomiarowi i większą wagę dokładniejszemu pomiarowi (w porównaniu z wartością z modelu). Poprzednio wyliczona wartość przewidywana $\hat{x}_k^-$ jest poprawiana o iloczyn wzmocnienia K i różnicy pomiędzy rzeczywistym pomiarem $\hat{z}_k^-$, a jego wartością estymowaną $\hat{z}_k^-$ (ta różnica nazywana jest resztą lub innowacją).

Odpowiednie symbole na rysunku 7 oznaczają:

- A — macierz przejścia wiążąca stan układu w chwili $k - 1$ ze stanem w chwili k , czyli macierz współczynników zmiennych (zazwyczaj trzech współrzędnych pozycji i kursu, trzech zmiennych prędkości, trzech zmiennych siły prądu nie biorąc pod uwagę kołysania, kiwania i nurzania — wymiar 9×9) w równaniach ruchu statku (1), (2), (3);
- B — macierz wiążąca wejście sterujące w chwili k ze stanem w chwili k , czyli macierz współczynników zmiennych w równaniach modelu napędu (5), (7), (9);
- H — macierz wiążąca stan układu w chwili k z pomiarem w chwili k , czyli macierz współczynników zmiennych w równaniach modelu pomiaru (31), (32), (33);
- K — wzmocnienie Kalmana

$$K = P^- H^T [H P^- H^T + R]^{-1} \quad (38)$$

P^- — kowariancja błędu procesu

$$P^- = AP^+ A^T + Q \quad (39)$$

P^+ — aktualizacja kowariancji błędu procesu

$$P^+ = [I - KH] P^- \quad (40)$$

R — macierz będąca miarą zmienności białego szumu pomiaru;

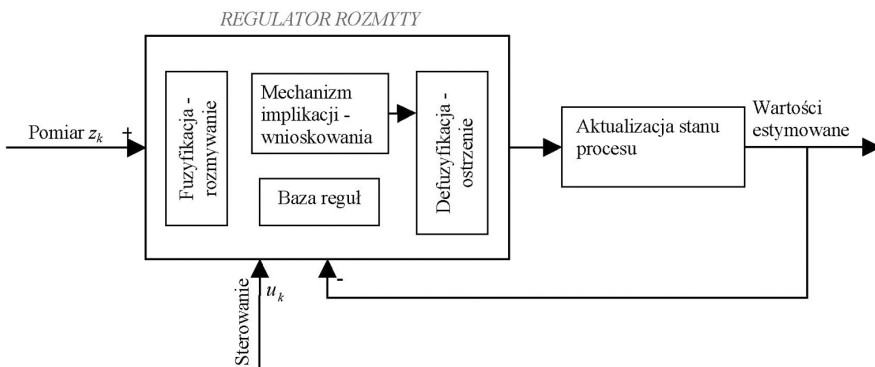
Q — macierz będąca miarą zmienności białego szumu procesu (modelu);

I — macierz jednostkowa o wymiarze jak P^+ .

3. Model rozmyty

Modele rozmyte mogą zastąpić lub uzupełnić klasyczną filtrację Kalmana, w szczególności zastępując proces strojenia polegający na odpowiednim doborze wzmocnień Kalmana zależnych od macierzy P i R .

Rysunek 8 przedstawia ogólny schemat regulatora rozmytego, w którym poszczególne bloki odpowiadają schematowi na rysunku 7.



Rys. 8. Regulator rozmyty w systemie sterowania statkiem

W przypadkach, gdy jest dostępna zwerbalizowana lub zarejestrowana w postaci wykonanych manewrów wiedza ekspercka modele rozmyte mogą stanowić alternatywne rozwiązanie dla całego modelu analitycznego ruchu statku, a w szczególności dla problemu sterowania po zadanej trajektorii, gdzie występuje ciągła zmiana parametrów wejściowych modelu. Przykłady takich rozwiązań zaprezentowano w [10 i 13].

W tego typu modelach są dwa wektory wejścia:

- x_k — wektor sześciu zmiennych definiujących ruch jednostki w trzech stopniach swobody, odpowiednio:
- P_{xy} — bieżąca pozycja ustalonego punktu kadłuba statku (odniesienia) określona dwoma zmiennymi (w dwóch wymiarach),
 - v_x — bieżąca prędkość wzdłużna kadłuba,
 - v_y — bieżąca prędkość poprzeczna kadłuba,
 - ω — bieżąca prędkość kątowna kadłuba,
 - ψ — bieżący kurs;

oraz

- y_k — wektor sześciu zmiennych definiujących wzorcowy ruch jednostki w trzech stopniach swobody:
- P_{xyr} — wymagana pozycja ustalonego punktu kadłuba statku określona dwoma zmiennymi,
 - v_{xr} — wymagana prędkość wzdłużna,
 - v_{yr} — wymagana prędkość poprzeczna,
 - ω_r — wymagana prędkość kątowna,
 - ψ_r — wymagany kurs.

W momencie czasu k , na podstawie wektorów x_k i y_k wyznaczone są wartości wejścia regulatora rozmytego (odchyłki pomiędzy x_k i y_k wynikające z wpływu nastaw pędników u_k):

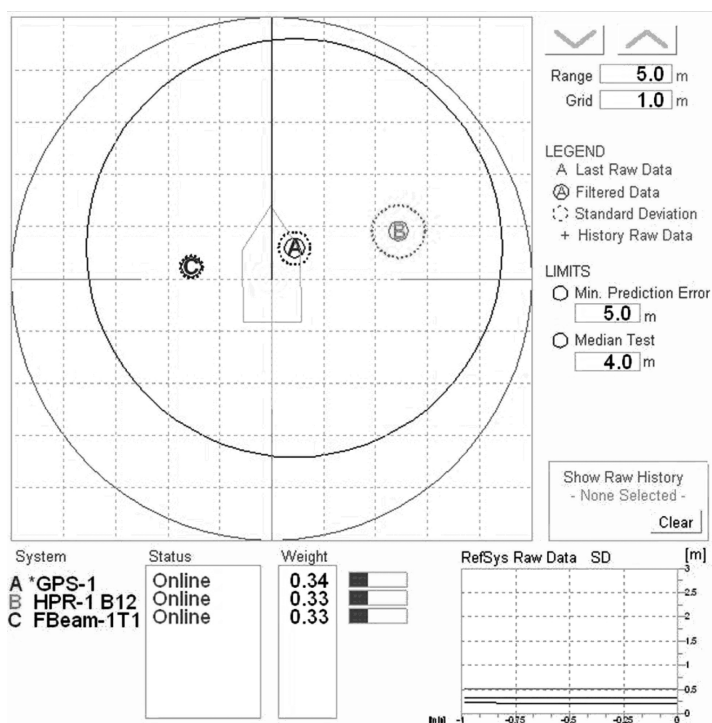
- ΔP_x — odchyłka pomiędzy wymaganą i bieżącą pozycją ustalonego punktu kadłuba statku (odniesienia),
- Δv_x — różnica pomiędzy wymaganą a bieżącą wartością prędkości wzdłużnej,
- Δv_y — różnica pomiędzy wymaganą a bieżącą wartością prędkości poprzecznej,
- $\Delta \omega$ — różnica pomiędzy wymaganą a bieżącą wartością prędkości kątownej,
- $\Delta \psi$ — odchyłka pomiędzy wymaganą a bieżącą wartością kursu.

Kolejny krok to fuzyfikacja — budowa funkcji przynależności wartości wejścia do zbiorów rozmytych — oraz wykorzystanie bazy reguł rozmytych, czyli odpowiednika modelu matematycznego ruchu statku. Wyniki fuzyfikacji są wykorzystywane w operacjach koniunkcji reguł rozmytych w celu uzyskania wypadkowych wartości przynależności do zbiorów rozmytych (reguły oparte o teorię Mamdaniego lub Takagi-Sugeno). Wypadkowe wartości przynależności do zbiorów rozmytych wejścia będące rezultatem operacji AND logiki

rozmytej (operator Zadeha lub iloczynu) są przyporządkowywane zbiorom rozmytym wyjścia poprzez operację wnioskowania (implikacji). Ilość, zmienne lingwistyczne i funkcje przynależności zbiorów rozmytych wyjścia, podobnie jak w przypadku wejścia, są parametrami dostrajanymi do danych eksperckich. W ostatnim kroku pracy modelu rozmytego na podstawie wartości funkcji przynależności do zbiorów rozmytych wyjścia wyznaczonych poprzez rozmyte wnioskowanie musi zostać ostatecznie wyliczona wartość wypadkowa w procesie tzw. ostrzenia (za mechanizm ostrzenia często przyjmowany jest środek ciężkości wartości przynależności do zbiorów rozmytych wyjścia).

4. Podsumowanie

Zastosowanie modeli z filtrem Kalmana oraz rozmytych umożliwia kontrolę ruchu jednostki DP mając jedynie przybliżoną wiedzę o jej dynamice (nieidealny model matematyczny) oraz obarczone błędami pomiary z systemów pozycyjnych i czujników. Rysunek 9 przedstawia różnice pomiędzy pomiarami a wartościami modelowymi uzyskanymi w symulatorze systemu DP Kongsberg K-Pos).



Rys. 9. Prezentacja stanu — z modelu (kontur kadłuba) i z trzech pomiarów systemami pozycyjnymi (okręgi A, B, C) w symulatorze DP

Wiarygodność estymowanych parametrów, a tym samym jakość kontroli, uzależniona jest od czasu jaki upłynął od ostatnio zmierzonych „dokładnie” parametrów. Wynika stąd konieczność jak najlepszego dostrojenia modeli do rzeczywistego systemu, w czym modele rozmyte zaczynają rywalizować z klasycznymi „kalmanowskimi”.

LITERATURA

- [1] *ABS*, Guide for thrusters and dynamic positioning systems, 1994, Section 3, 3.2.4.
- [2] *API*, Recommended Practice for Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures, 1995.
- [3] *Balchen J. G., Nils A. J., Eldar M., Steinar S.*: A Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control. Modeling, Identification and Control (MIC); vol. 1, No. 3, 1980, pp. 135–163.
- [4] *Cadet O.*: Introduction to Kalman Filter and its Use in Dynamic Positioning Systems. Dynamic Positioning Conference, Marine Technology Society, September 16–17, 2003.
- [5] *Cydejko J., Puchalski J., Rutkowski G.*: Statki i technologie off-shore w zarysie. Współczesne technologie transportu morskiego - tom 7, Trademar, Gdynia 2011.
- [6] *Fossen T., I.*: Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2011.
- [7] *Kongsberg Maritime AS*: Kongsberg K-Pos DP (OS) Dynamic Positioning System Operator Manual, Rel. 7.1, doc. No. 322281/A, Horten, October 2008.
- [8] *Kongsberg Maritime AS*: Vessel Description. Rel. 2008-12-15, Horten, Norway, December 2008.
- [9] *Mazurkiewicz B.*: Encyklopedia Inżynierii Morskiej. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk, 2009.
- [10] *Passino K., M.*: Biomimicry for Optimization, Control, and Automation, Springer-Verlag, London, UK, 2005.
- [11] *SNAME (1950)*: Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No. 1–5, April 1950, pp. 1–15.
- [12] *Szelangiewicz T.*: Podstawy teorii projektowania kotwicznych systemów utrzymywania pozycji jednostek pływających. Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk, 2003.
- [13] *Zalewski P.*: Path Following Problem for a DP Ship Simulation Model, Marine Navigation and Safety of Sea Transportation Series, Navigational Systems and Simulators, CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, 2011.