



POLITECHNIKA  
GDAŃSKA



ANNA WITKOWSKA

SYNTEZA UKŁADU  
STEROWANIA STATKIEM  
MORSKIM DYNAMICZNIE  
POZYCJONOWANYM  
W WARUNKACH NIEPEWNOŚCI

GDAŃSK 2019

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

REDAKTOR SERII

*Zbigniew Krzemiński*

RECENZENCI

*Zdzisław Kowalczyk*

*Mirosław Tomera*

PROJEKT OKŁADKI

*Jolanta Cieślawska*

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
<http://pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>  
zamówienia prosimy kierować na adres [wydaw@pg.edu.pl](mailto:wydaw@pg.edu.pl)

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2019

ISBN 978-83-7348-779-6

# SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	7
1. WSTĘP .....	11
1.1. Przegląd stanu wiedzy .....	14
1.2. Struktura monografii .....	20
2. DYNAMICZNE POZYCJONOWANIE STATKU .....	23
2.1. Struktura systemu DP .....	25
2.1.1. Układ kierowania i nawigacji .....	27
2.1.2. Układ sterowania .....	28
2.2. Wymagania systemu DP .....	29
3. MODEL STATKU DYNAMICZNIE POZYCJONOWANEGO .....	31
3.1. Model symulacyjny statku .....	31
3.1.1. Kinematyka statku .....	32
3.1.2. Dynamika statku .....	34
3.1.3. Uwzględnienie zakłóceń środowiskowych .....	35
3.2. Modele uproszczone dynamiki statku .....	37
3.2.1. Liniowy model LF .....	39
3.2.2. Liniowy model WF .....	40
3.3. Układ napędowy .....	41
3.3.1. Układ generowania sił i momentu naporu .....	42
3.3.2. Ograniczenia pędników i sterów .....	43
3.4. Przykładowe modele statku .....	44
3.4.1. Model wymiarowy .....	44
3.4.2. Model bezwymiarowy .....	46
3.4.3. Układ generowania sił i momentu naporu – pierwsza konfiguracja .....	47
3.4.4. Układ generowania sił i momentu naporu – druga konfiguracja .....	48
4. METODY ALOKACJI SIŁ I MOMENTU DLA SYSTEMU DP .....	50
4.1. Sformułowanie zadania alokacji .....	50
4.1.1. Zadanie alokacji liniowej bez ograniczeń .....	51
4.1.2. Zadanie alokacji liniowej z ograniczeniami .....	52
4.1.3. Zadanie optymalizacji kwadratowej z ograniczeniami .....	52
4.1.4. Zadanie alokacji nieliniowej bez ograniczeń .....	53
4.1.5. Zadanie alokacji nieliniowej z ograniczeniami .....	54
4.2. Metody numeryczne alokacji .....	55
4.2.1. Metody macierzy pseudoodwrotnej .....	56
4.2.2. Uogólnione rozwiązania odwrotne .....	56
4.2.3. Kaskadowe uogólnione rozwiązania odwrotne .....	57
4.2.4. Metoda bezpośrednia .....	57
4.3. Metoda predykcyjna alokacji .....	57
4.4. Badania metod alokacji .....	59
4.5. Podsumowanie .....	67

5. DYNAMICZNE POZYCJONOWANIE STATKU PRZY NIEDOKŁADNEJ INFORMACJI O ZAKŁÓCENIACH ZEWNĘTRZNYCH .....	69
5.1. Struktura systemu .....	70
5.2. Regulator backstep .....	73
5.3. Adaptacyjny regulator backstep .....	76
5.4. Odporny regulator backstep .....	78
5.5. Ślizgowy regulator backstep z filtracją funkcji stabilizujących .....	80
5.6. Odporny regulator backstep z filtracją funkcji stabilizujących .....	83
5.7. Przykład dynamicznego pozycjonowania statku .....	87
5.7.1. Badania regulatora backstep .....	87
5.7.2. Badania regulatora adaptacyjnego backstep .....	88
5.7.3. Badania regulatora odpornego backstep .....	91
5.7.4. Badania regulatora ślizgowego backstep z filtracją .....	92
5.7.5. Badania regulatora odpornego backstep z filtracją .....	93
5.8. Podsumowanie .....	95
6. DYNAMICZNE POZYCJONOWANIE STATKU PRZY NIEDOKŁADNEJ INFORMACJI O PARAMETRACH BEZWŁADNOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKACH HYDRODYNAMICZNYCH .....	96
6.1. Synteza regulatora DP .....	97
6.1.1. Model matematyczny .....	97
6.1.2. Wielowymiarowy regulator z adaptacją parametryczną .....	99
6.1.3. Odporna modyfikacja algorytmu .....	102
6.2. Badania symulacyjne .....	103
6.2.1. Struktura układu sterowania .....	104
6.2.2. Optymalizacja regulatora .....	105
6.2.3. Alokacja sił i momentu .....	106
6.2.4. Analiza wrażliwości układu .....	109
6.3. Podsumowanie .....	112
7. ZASTOSOWANIE SIECI RADIALNEJ DO DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA PRZY NIEPEWNOŚCI STRUKTURALNEJ OBIEKTU .....	113
7.1. Budowa sieci radialnej .....	113
7.2. Wielowymiarowy regulator z adaptacją funkcjonalną .....	115
7.2.1. Synteza regulatora backstep z aproksymatorem neuronowym .....	115
7.2.2. Badania regulatora backstep z aproksymatorem neuronowym .....	119
7.3. Analiza wpływu zmian parametrów modelu na jakość sterowania .....	121
7.3.1. Opis metody .....	121
7.3.2. Badania symulacyjne .....	122
7.4. Podsumowanie .....	128
8. DYNAMICZNE POZYCJONOWANIE STATKU PRZY NIEDOKŁADNEJ INFORMACJI O PARAMETRACH MACIERZY EFEKTYWNOŚCI PĘDNIKÓW .....	129
8.1. Synteza regulatora z dynamiczną alokacją .....	130
8.1.1. Wielowymiarowy regulator z adaptacją parametryczną .....	132
8.1.2. Dynamiczna alokacja .....	136
8.2. Badania symulacyjne .....	136
8.2.1. Struktura układu sterowania .....	136
8.2.2. Porównanie algorytmów alokacji .....	138
8.2.3. Badania z częściową stratą sił naporu .....	139
8.2.4. Badania z całkowitą stratą sił naporu .....	141
8.3. Podsumowanie .....	142

---

9. PODSUMOWANIE .....	143
ZAŁĄCZNIK .....	147
Z1. Stabilność układów nieautonomicznych .....	147
BIBLIOGRAFIA .....	150
Streszczenie w języku polskim .....	160
Streszczenie w języku angielskim .....	160



# WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

## Oznaczenia

- $A_{FC}$  – rzut powierzchni czołowej statku  
 $A_{LC}$  – rzut powierzchni bocznej statku  
 $A_{oa}$  – całkowita długość statku  
 $\mathbf{B}, (\mathbf{B}'')$  – macierz efektywności pędników, rzeczywista (w skali)  
 $\mathbf{b}$  – wektor błędu modelowania dynamiki statku i zakłóceń  
 $\tilde{\mathbf{b}}$  – błąd estymacji wektora  $\mathbf{b}$ , liczony jako różnica pomiędzy wektorem wartości rzeczywistych i estymowanych  $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} - \hat{\mathbf{b}}$   
 $\mathbf{C}, (\mathbf{C}'')$  – macierz Coriolisa i dośrodkowa bryły sztywnej i mas dodanych, rzeczywista (w skali)  
 $C_{cX}, C_{cY}, C_{cN}$  – współczynniki oporów ruchu, w kierunku odpowiednio wzdłużnym, poprzecznym i kątowym  
 $\mathbf{D}, (\mathbf{D}'')$  – macierz zawierająca hydrodynamiczne siły tłumiące, rzeczywista (w skali)  
 $\mathbf{E}$  – macierz diagonalna wzmocnień szumu białego procesu Markowa  
 $\mathbf{E}(\mathbf{X})$  – wektor błędu aproksymacji  
 $\mathbf{F}$  – macierz diagonalna stałych czasowych procesu Markowa  
 $iter\_alg(t)$  – liczba iteracji algorytmu, w chwili  $t$   
 $K > 0$  – dodatnie, stałe wzmocnienie  
 $\mathbf{K}, (\mathbf{K}'')$  – macierz współczynników sił naporu, rzeczywista (w skali)  
 $\mathbf{K}_i$  – dodatnio określona diagonalna macierz wzmocnień regulatora  
 $L$  – długość całkowita statku  
 $\mathbf{M}, (\mathbf{M}'')$  – macierz bezwładności bryły sztywnej i mas dodanych, rzeczywista (w skali)  
 $m$  – masa statku  
 $sgn(s_2)$  – wektor funkcji przełączających (signum), zależnych od wektora błędu  $s_2$   
 $T$  – stała czasowa filtru  
 $\mathbf{T}, (\mathbf{T}'')$  – macierz stałych czasowych w modelu dynamiki urządzeń wykonawczych, rzeczywista (w skali)  
 $\mathbf{T}(\boldsymbol{\beta})$  – macierz konfiguracji pędników  
 $\Delta T$  – krok czasowy  
 $time\_alg(t)$  – czas obliczeń algorytmu, w chwili  $t$   
 $U, (U'')$  – wypadkowa prędkość statku, rzeczywista (w skali)  
 $\mathbf{u}$  – wektor rzeczywistych wartości sygnałów sterujących nastawami pędników  
 $\mathbf{u}_c$  – wektor zadanych wartości sygnałów sterujących nastawami pędników  
 $u_i$  – sygnały sterujące nastawami pędników  
 $\mathbf{u}_0$  – wektor początkowy sygnałów sterujących nastawami pędników  
 $V_{rc}$  – prędkość prądów morskich względem statku  
 $\mathbf{v}, (\mathbf{v}_d)$  – wektor prędkości statku: wzdłużnej, poprzecznej i kątowej, rzeczywisty (zadany)  
 $\mathbf{v}_c$  – wektor prędkości prądów morskich  
 $\mathbf{W}_u$  – dodatnio określona macierz wagowa, diagonalna, sygnałów sterujących  
 $\mathbf{W}_\tau$  – dodatnio określona macierz wagowa, diagonalna, sił i momentu  
 $\mathbf{w}_i$  – wektor białego szumu gaussowskiego o zerowej wartości średniej  
 $w_i$  – biały szum gaussowski o zerowej wartości średniej  
  
 $\boldsymbol{\alpha}$  – wektor funkcji stabilizujących/wirtualnych zmiennych sterujących  
 $\boldsymbol{\Gamma}, \boldsymbol{\Gamma}_i$  – dodatnio zdefiniowana diagonalna macierz wzmocnień adaptacji  
 $\gamma, \gamma_i$  – wzmocnienie adaptacji  
 $\gamma_{rc}$  – kierunek prądów morskich względem statku

$\boldsymbol{\eta}_i$ ( $\boldsymbol{\eta}_{id}$ )	– wektor pozycji i kąta kursowego statku, rzeczywisty (zadany)
$\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$	– estymata wektora $\boldsymbol{\theta}_i$
$\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i$	– błąd estymacji wektora $\boldsymbol{\theta}_i$ , liczony jako różnica pomiędzy wektorem wartości rzeczywistych i estymowanych $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i = \boldsymbol{\theta}_i - \hat{\boldsymbol{\theta}}_i$
$\lambda_{\min}(\cdot)$	– minimalna wartość własna macierzy
$\omega_{0i}$	– dominująca częstotliwość fali
$\sigma_i$	– parametr intensywności fali
$\zeta_i$	– współczynnik tłumiący fali
$\tau$	– funkcja strojąca, zależna od zmiennych stanu
$\boldsymbol{\tau}$	– wektor sił i momentu działających na kadłub statku
$\boldsymbol{\tau}_c$	– wektor zadanych wartości sił i momentu z regulatora
$\boldsymbol{\tau}_{fala}$	– wektor sił i momentu od zakłóceń falowych
$\boldsymbol{\tau}_{LF}$	– wektor sił i momentu o charakterze wolnozmiennym
$\boldsymbol{\tau}_{prądy}$	– wektor sił i momentu od zakłóceń powodowanych przez prądy morskie
$\boldsymbol{\tau}_{thr}$	– wektor sił i momentu od urządzeń napędowych
$\boldsymbol{\tau}_{WF}$	– wektor sił i momentu o charakterze szybkozmiennym
$\boldsymbol{\tau}_{wiatr}$	– wektor sił i momentu od zakłóceń wiatrowych
$\Phi_i$	– macierz regresji
$\ \cdot\ _F$	– norma Frobeniusa

### Skróty

3DOF	– 3 stopnie swobody ruchu (ang. <i>3 degrees of freedom</i> )
AB	– adaptacyjny regulator typu backstep (ang. <i>adaptive backstepping</i> )
ABSMC	– adaptacyjny ślizgowy regulator typu backstep (ang. <i>adaptive backstepping sliding mode control</i> )
ADRC	– sterowanie oparte na idei aktywnej kompensacji zakłóceń (ang. <i>active disturbance rejection control</i> )
ASM	– metody zbiorów aktywnych (ang. <i>active set methods</i> )
B	– regulator typu backstep (ang. <i>backstepping</i> )
BSMC	– ślizgowy regulator typu backstep (ang. <i>backstepping sliding mode control</i> )
CA	– układ alokacji sterowania (sił i momentu) (ang. <i>control allocation</i> )
CGI	– kaskadowe uogólnione rozwiązania odwrotne (ang. <i>cascaded generalized inverse</i> )
CLF	– kontrolna funkcja Lapunowa (ang. <i>control Lyapunov function</i> )
DA	– bezpośrednia metoda alokacji (ang. <i>direct allocation</i> )
DCCA	– łańcuchowa metoda alokacji (ang. <i>daisy chain control allocation</i> )
DGPS	– różnicowy Globalny System Pozycjonowania (ang. <i>differential Global Positioning System</i> )
DNV	– norweskie towarzystwo klasyfikacyjne (ang. <i>Det Norske Veritas</i> )
DP	– dynamiczne pozycjonowanie (ang. <i>dynamic positioning</i> )
DPS	– system dynamicznego pozycjonowania (ang. <i>dynamic positioning system</i> )
DSC	– sterowanie oparte na idei wykorzystania filtra różniczkującego sygnał wirtualnej zmiennej sterującej i uwzględnienia dynamiki filtra w regułach sterowania (ang. <i>dynamic surface control</i> )
EKF	– rozszerzony filtr Kalmana (ang. <i>extended Kalman filter</i> )
FDD	– system wykrywania i diagnozy uszkodzeń (ang. <i>fault detection and diagnosis</i> )
FT	– odporny na uszkodzenia (ang. <i>fault tolerant</i> )
GA	– algorytm genetyczny (ang. <i>genetic algorithm</i> )
GAS	– globalnie asymptotyczna stabilność (ang. <i>global asymptotic stability</i> )
GI	– metoda uogólnionych rozwiązań odwrotnych (ang. <i>generalized inverse</i> )
GPS	– Globalny System Pozycjonowania (ang. <i>Global Positioning System</i> )
GUAS	– globalnie jednostajna asymptotyczna stabilność (ang. <i>global uniform asymptotic stability</i> )



- IB – integrator typu backstep (ang. *integrator backstepping*)
- IMO – Międzynarodowa Organizacja Morska (ang. *International Maritime Organization*)
- LF – niskoczęstotliwościowe/wolnozmiennie (ang. *low frequency*)
- LMI – liniowa nierówność macierzowa (ang. *linear matrix inequality*)
- LQG – regulator liniowo-kwadratowy Gaussa (ang. *linear-quadratic-Gaussian*)
- LQR – regulator liniowo-kwadratowy (ang. *linear-quadratic regulator*)
- LS – metoda najmniejszych kwadratów (ang. *least squares*)
- MIMO – układ z wieloma wejściami i wyjściami (ang. *multiple input, multiple output*)
- MLS – metoda minimalnych najmniejszych kwadratów (ang. *minimal least squares*)
- MPC – algorytm sterowania predykcyjnego (ang. *model predictive control*)
- MPCA – predykcyjny algorytm alokacji (ang. *model predictive control allocation*)
- MSS – metoda oparta na idei wielokrotnego sterowania po powierzchniach ślizgowych (ang. *multiple-surface sliding*)
- NB – metoda typu backstep z neuronowym aproksymatorem (ang. *neural backstepping*)
- NBC – struktura nieliniowa blokowo-sterowalna (ang. *nonlinear block controllable*)
- NN – sztuczne sieci neuronowe (ang. *neural networks*)
- N-PID – nieliniowy regulator PID (ang. *nonlinear PID*)
- PDF – funkcja gęstości prawdopodobieństwa (ang. *probability distribution function*)
- PF – filtr cząsteczkowy (ang. *particle filter*)
- PI – pseudoodwrotność (ang. *pseudo-inverse*)
- PMS – układ zarządzania energią (ang. *power management system*)
- PSO – algorytm rojowy optymalizacji (ang. *particle swarm optimization*)
- RBF – radialne funkcje bazowe (ang. *radial basic functions*)
- RLS – metoda rekurencyjna najmniejszych kwadratów (ang. *recursive least squares*)
- RPI – metoda redystrybucji pseudoodwrotnych rozwiązań (ang. *redistributed pseudo-inverse*)
- SISO – układ z jednym wejściem i jednym wyjściem (ang. *single input, single output*)
- SLS – sekwencyjna metoda najmniejszych kwadratów (ang. *sequential least squares*)
- SM – sterowanie ślizgowe (ang. *sliding mode*)
- SSL – logika przełączania z nadzorem (ang. *supervisory switching logic*)
- STS – operacje przeładunku towaru pomiędzy statkami na otwartym morzu (ang. *ship to ship transfer*)
- TD – śledzące układy różniczkujące (ang. *tracking differentiators*)
- UKF – bezwonny filtr Kalmana (ang. *unscented Kalman filter*)
- UUB – jednostajna ostateczna ograniczoność (ang. *uniform ultimate boundedness*)
- VBS – wektorowa metoda sterowania typu backstep (ang. *vectorial backstepping steering*)
- WF – oscylacyjne szybkozmiennie (ang. *wave frequency*)
- WLS – metoda ważona najmniejszych kwadratów (ang. *weighted least squares*)