

Uniwersytet Morski w Gdyni

Wydział Elektryczny

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Andrzej Rak

**Kompleksowy układ sterowania ruchem statku
handlowego we wszystkich fazach podróży
morskiej**

Promotor:
dr hab. inż. Witold Gierusz

Promotor pomocniczy:
dr inż. Monika Rybczak

Gdynia 2022

Pamięci mego ojca

Składam serdeczne podziękowania:

Promotorowi,
dr hab. inż. Witoldowi Gieruszowi
– za cierpliwość,

Koleżankom i Kolegom
z Katedry Automatyki Okrętowej
– za udostępnienie wyników własnych badań
i za wnikliwe uwagi na temat niniejszej pracy,

Zespołowi Fundacji Bezpieczeństwa
Żeglugi i Ochrony Środowiska
– za nieocenioną pomoc w przeprowadzeniu
eksperymentów na jeziorze,

mojej Żonie
– za wyrozumiałość,

Autor.

Spis treści

Spis ważniejszych oznaczeń	iii
Spis skrótów	v
Spis rysunków	vii
Spis tabel	xi
Wprowadzenie	1
1. Metody sterowania ruchem statku	6
1.1. Klasyczne metody sterowania kursem statku	7
1.2. Przegląd współcześnie stosowanych metod sterowania statkiem	8
1.2.1. Zagadnienie sterowania kursem	8
1.2.2. Sterowanie wzdłuż zadanej trajektorii	9
1.2.3. Układy dynamicznego pozycjonowania	10
1.2.4. Kompensacja kołysań bocznych statku	10
1.2.5. Integracja układów sterowania ruchem statku	11
1.3. Systematyka metod sterowania jako następstwo dekompozycji zadania realizacji pełnomorskiej podróży autonomicznego statku	11
1.4. Układy przełączające w sterowaniu ruchem statku	15
1.4.1. Idea przełączania bezuderzeniowego	17
1.4.2. Metoda śledzenia sygnałów wyjściowych regulatora aktywnego	19
2. Obiekt sterowania i układ pomiarowo-kontrolny	21
2.1. Izomorficzny model statku morskiego	21
2.2. Oprzyrządowanie układu pomiarowo-kontrolnego	23
2.2.1. Urządzenia nawigacyjne	25
2.2.2. Układ energetyczny modelu i urządzenia wykonawcze	32
2.2.3. Urządzenia sterujące	37
2.3. Akweny testowe	41
3. Układ sterujący ruchem statku wykorzystujący grupę regulatorów	44
3.1. Regulatory składowe	44
3.1.1. Wielowymiarowy regulator LMI ruchu statku z małymi prędkościami	45
3.1.2. Regulator ruchu wzdłuż zadanej trajektorii na wodach ograniczonych	49
3.1.3. Regulator predykcyjny dla prędkości eksploatacyjnych	52
3.2. Układ przełączania bezuderzeniowego – PBU	58
3.3. Techniczna realizacja środowiska badawczego	59
3.3.1. Układ do przeprowadzania wstępnych badań symulacyjnych	59
3.3.2. Architektura docelowego układu badawczego działającego w czasie rzeczywistym	61
3.3.3. Implementacja układu wykorzystującego grupę regulatorów	72
4. Wyniki badań eksperymentalnych	76
4.1. Metodologia badań opracowanego układu sterowania	76
4.2. Badania wielowymiarowego regulatora wykorzystującego liniowe nierówności macierzowe LMI	78
4.3. Badania regulatora adaptacyjnego PID-GS	84
4.4. Badania regulatora predykcyjnego	91

4.5.	Badania podukładu przełączania bezuderzeniowego pomiędzy regulatorami	96
4.6.	Badania układu sterowania autonomicznego modelu statku realizującego podróż z portu do portu	103
4.7.	Analiza wyników badań eksperymentalnych	109
4.7.1.	Miary jakości działania układu sterowania ruchem modelu izomorficznego	109
4.7.2.	Zestawienie i dyskusja wartości wskaźników dla poszczególnych eksperymentów	110
4.7.3.	Uwagi dotyczące wyników badań układu sterowania dla podróży „od kei do kei”	115
4.7.4.	Próba identyfikacji źródeł zaburzeń pomiaru pozycji modelu izomorficznego za pomocą GPS	115
	Zakończenie	117
	A. Model matematyczny statku treningowego <i>Dorchester Lady</i> . . .	121
A.1.	Układy współrzędnych stosowane w opisie ruchu statku na płaszczyźnie (3DOF)	121
A.2.	Równania podstawowe	122
A.3.	Siły i momenty hydrodynamiczne	124
A.3.1.	Siły i moment generowane przez pędniki gondolowe	126
A.3.2.	Siły i moment generowane przez tunelowy ster strumieniowy	129
A.3.3.	Siły i moment generowane przez obrotowy ster strumieniowy	130
A.3.4.	Siły i moment pochodzące od wiatru	131
A.4.	Uwagi do implementacji w środowisku MATLAB-Simulink	132
	Bibliografia	134

Spis ważniejszych oznaczeń

Aby zachować ugruntowane zwyczajem oznaczenia, zarówno z obszaru teorii układów regulacji automatycznej, jak i dziedziny sterowania ruchem statku, niektóre symbole w niniejszej pracy były używane do określenia więcej niż jednego elementu. Ich znaczenie łatwo jednak odróżnić z kontekstu, w jakim zostały użyte.

Pusty kwadrat w sąsiedztwie symbolu wskazuje, że może się tam znaleźć oznaczenie elementu, do którego symbol się odnosi.

\mathbf{A}_{\square}	– macierz stanu
B	– szerokość statku
\mathbf{B}_{\square}	– macierz wejściowa równań stanu
\mathbf{C}_{\square}	– macierz wyjściowa równań stanu
C_B	– współczynnik pełnotliwości kadłuba statku
d_{LOS}	– odległość pomiędzy początkiem układu współrzędnych $(X_s, 0_s, Y_s)$ a śledzonym punktem (x_{LOS}, y_{LOS})
\mathbf{D}_{\square}	– macierz przejściowa równań stanu
D	– wyporność statku
e_{\square}	– uchyb regulacji
I_z	– moment bezwładności wokół osi Z_s układu związanego z kadłubem statku
J_{\square}	– funkcja celu – wskaźnik jakości
k_{\square}	– współczynnik wzmocnienia transmitancji
\mathbf{K}	– macierz wzmocnień regulatora stanu
L	– długość statku
\mathcal{L}^{-1}	– transformata odwrotna Laplace'a
m	– masa statku
n_{AZ}	– względna prędkość obrotowa śrub pędników gondolowych
N_{\square}	– moment działający na statek wokół osi Z_s układu związanego z kadłubem statku
r	– prędkość kątowna statku
r_{AZ}	– prędkość obrotu pędników gondolowych
R	– droga wyprzedzenia manewru
\mathbb{R}	– zbiór liczb rzeczywistych
ss_o	– względna siła naporu obrotowego steru strumieniowego
ss_t	– względna siła naporu tunelowego steru strumieniowego
t_s	– okres próbkowania układu regulacji
T	– zanurzenie statku
T_{int}	– stała całkowania
T_{\square}	– stała czasowa transmitancji
u	– prędkość podłużna statku – sygnał wejściowy obiektu
U	– prędkość statku nad dnem
v	– prędkość poprzeczna statku

V_w	– prędkość wiatru pozornego
x	– współrzędna w osi X (North) położenia statku w układzie NED
	– wektor stanu układu dynamicznego
X_{0Y}	– kartezjański układ współrzędnych NED związany z nieruchomym punktem w przestrzeni
$X_d0_dY_d$	– kartezjański układ współrzędnych NED związany z bieżącym odcinkiem trajektorii
$X_s0_sY_s$	– kartezjański układ współrzędnych związany z kadłubem statku
X_{\square}	– siła działająca na statek wzdłuż osi X_s układu związanego z kadłubem statku
y	– współrzędna w osi Y (East) położenia statku w układzie NED
	– sygnał wyjściowy obiektu
	– wielkość regulowana
y_e	– boczna odchyłka od trajektorii zadanej
Y_{\square}	– siła działająca na statek wzdłuż osi Y_s układu związanego z kadłubem statku
α	– kąt obrotu steru strumieniowego obrotowego
β	– kąt dryfu
γ_w	– kierunek wiatru pozornego
δ_{AZ}	– kąt obrotu pędników gondolowych
θ_n	– kąt namiaru na najbliższy punkt zwrotu względem bieżącego kąta kursowego
ρ	– kąt kursowy aktualnego odcinka trajektorii zadanej
τ_{\square}	– siły i moment wyznaczone w regulatorze wielowymiarowym
ψ	– kurs statku
ψ_{LOS}	– kurs powrotu na trajektorię
$\hat{\square}$	– wielkość estymowana
\square^{max}	– maksymalna wartość sygnału lub parametru
\square^{min}	– minimalna wartość sygnału lub parametru
\square_z	– zadana wartość sygnału lub parametru

Spis skrótów

AIS	Automatic Identification System
API	Application Programming Interface
ASV	Autonomous Surface Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BIMCO	Baltic and International Maritime Council
CACSD	Computer Aided Control System Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLI	Command Line Interface
DGPS	Differential Global Positioning System
DP	Dynamic ship Positioning
DWT	Deadweight Tonnage
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
ECS	Electronic Chart System
FBŻiOŚ	Fundacja Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska
FPGA	Field-programmable Gate Array
FPSO	Floating Production Storage and Offloadnig
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade
GPS	Global Positioning System
HDT	Heading from True North
HIL	Hardware In the Loop
ICS	International Chamber of Shipping
IMO	International Maritime Organisation
LB	lewa burta
LCC	Large Crude Carrier
LMI	Linear Matrix Inequalities
LNG	Liquified Natural Gas
LOS	Line-of-Sight
LQG	Linear Quadratic Gaussian Control
MASS	Marine Autonomous Surface Ship
MMG	Maneuvering Modeling Group
MPC	Model Predictive Control
MRAS	Model Reference Adaptive System
NED	North-East-Down
NG	napęd główny
NMEA	National Marine Electronics Association
PB	prawa burta
PBU	przełączanie bezuderzeniowe
PM	Position Mooring
PID-GS	Proportional, Integral, Derivative – Gain Scheduling Control
PLC	Programmable Logic Controller
ROT	Rate of Turn
RTK	Real-Time Kinematic

SBM/SPM	Single Buoy Mooring/Single Point Mooring
SISO	Single Input Single Output
SLRT	Simulink Real-Time Toolbox
STCW	Standards of Training, Certification and Watchkeeping
TET	Task Execution Time
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
UDP	User Datagram Protocol
ULCS	Ultra Large Container Ship
UNREP	Underway Replenishment
UTC	Universal Time Coordinated
UTP	Unshielded Twisted Pair
VLCC	Very Large Crude Carrier
VLCS	Very Large Container Ship
VTS	Vessel Traffic System
WGS	World Geodetic System
WOPC	Weather Optimal Positioning Control

Spis rysunków

1.1	Chronologia rozwoju układów automatycznego sterowania ruchem statku od początku XX w. do czasów współczesnych	6
1.2	Schemat ilustrujący fazy podróży morskiej od kei do kei	12
1.3	Matryca doboru niezbędnych funkcjonalności i struktury układu sterowania ruchem statku realizującego podróż autonomiczną	13
1.4	Ogólny schemat układu sterowania ruchem statku	14
1.5	Schemat przełączalnego układu sterowania dla statku treningowego <i>Blue Lady</i>	16
1.6	Schemat układu śledzenia sygnału sterującego	19
2.1	Plan boczny gazowca LNG 140 000 m ³ , pierwowzoru modelu <i>Dorchester Lady</i>	21
2.2	Fotografia modelu <i>Dorchester Lady</i> podczas prób na jeziorze Silm w Iławie-Kamionce	22
2.3	Sylwetka izomorficznego modelu gazowca LNG <i>Dorchester Lady</i>	23
2.4	Schemat blokowy układu pomiarowo-kontrolnego	24
2.5	Fotografie pulpitu sterowniczego modelu <i>Dorchester Lady</i>	25
2.6	Fotografia anteny systemu GPS zainstalowanej na <i>Dorchester Lady</i>	26
2.7	Kompas żyroskopowy Anschütz STANDARD 20	27
2.8	Anemometr ultradźwiękowy Gill WindObserver II	29
2.9	Fotografia ilustrująca konstrukcję elektromechanicznego logu łopatkowego modelu <i>Dorchester Lady</i>	31
2.10	Bateria akumulatorów 120 V _{DC} . Źródło zasilania modelu <i>Dorchester Lady</i>	32
2.11	Schemat blokowy układu energetycznego <i>Dorchester Lady</i>	33
2.12	Fotografie napędu głównego statków wykorzystujący pędniki gondolowe	34
2.13	Fotografia mechanizmu napędu gondolowego modelu <i>Dorchester Lady</i>	35
2.14	Fotografie dziobowego steru strumieniowego	35
2.15	Ster strumieniowy obrotowy	36
2.16	Fotografia urządzeń w przedziale dziobowym <i>Dorchester Lady</i>	37
2.17	Zdjęcie sterownika SLRT <i>Target</i> – komputera przemysłowego Axiomtek IPC934-230-FL	39
2.18	Fotografia monitora/konwertera sygnałów przesyłanych łączyami szeregowymi	40
2.19	Schemat architektury dedykowanego, lokalnego sterownika mikroprocesorowego	40
2.20	Mapa jeziora Silm	41
2.21	Fotografia infrastruktury portu w Ośrodku Manewrowania Statkami w Iławie-Kamionce	42
2.22	Mapa akwenów manewrowych na jeziorze Silm	43
3.1	Ogólna struktura układu sterowania statkiem wykorzystującego grupę regulatorów	44
3.2	Schemat układu regulacji wielowymiarowej <i>Dorchester Lady</i>	45
3.3	Ilustracja wyznaczania prędkości zadanych dla regulatora LMI na podstawie położenia statku względem bieżącego punktu zwrotu	48
3.4	Przebieg charakterystyk skokowych zidentyfikowanych modeli liniowych danych transmitancją zapisaną równaniem 3.6 dla stałego kąta obrotu pędników $\delta_{AZ} = -40^\circ$ i wybranych nastaw prędkości obrotowej śrub napędu głównego n_{AZ}	49

3.5	Ilustracja idei algorytmu LOS z promieniem wodzącym	51
3.6	Ilustracja idei sterowania predykcyjnego z przesuwym horyzontem . . .	52
3.7	Ilustracja sposobu wyznaczania zadanego kursu statku metodą <i>Line-of-Sight</i>	53
3.8	Wykresy porównujące przebiegi prędkości kątowej dla zidentyfikowanego modelu liniowego i zbioru testowego	57
3.9	Schemat blokowy układu regulacji MPC stosowanego w reżymie pływania po wodach otwartych	57
3.10	Schemat blokowy realizacji układu przełączania bezuderzeniowego metodą śledzenia sygnału wyjściowego regulatora aktywnego	59
3.11	Diagram symulacji programowej układu sterowania ruchem <i>Dorchester Lady</i> w środowisku Simulink	60
3.12	Ogólny schemat architektury głównego sterownika układu pomiarowo-kontrolnego	62
3.13	Główny diagram układu pomiarowo-kontrolnego wykorzystywanego na modelu izomorficznym <i>Dorchester Lady</i>	64
3.14	Przebieg zmian czasu obliczeń jednego cyklu (TET) w sterowniku <i>Target</i> podczas eksperymentu, w którym przełączano regulatory	65
3.15	Diagram symulacyjny modelu <i>Dorchester Lady</i> przeznaczony do pracy w układzie HIL	67
3.16	Zrzut ekranu komputera <i>Target</i> z oscyloskopami graficznymi i numerycznymi wyświetlającymi dane aplikacji czasu rzeczywistego podczas eksperymentu	68
3.17	Widok podstawowego okna graficznego interfejsu użytkownika układu pomiarowo-kontrolnego	70
3.18	Widok zakładki interfejsu z wyświetlaniem czasowych przebiegów wybranych sygnałów z układu pomiarowo-kontrolnego	71
3.19	Widok okna panelu manewrowego z możliwością ręcznego zadawania parametrów i obserwowania stanu pędników modelu <i>Dorchester Lady</i> . . .	71
3.20	Diagram Simulinka zawierający układ regulatorów – centralny moduł sterujący modelem izomorficznym <i>Dorchester Lady</i>	73
3.21	Widok struktury nadrzędnego układu decyzyjnego zrealizowanego w formie diagramu tranzykcji stanów biblioteki <i>Sateflow</i>	75
4.1	Schemat ideowy konfiguracji testowych układu sterowania	76
4.2	Fotografia konfiguracji sprzętu do symulacji HIL w laboratorium UMG	77
4.3	Widok trajektorii zadanej eksperymentów z regulatorem LMI – początek zaznaczono strzałką	78
4.4	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-1-S; symulacja HIL działania układu z wielowymiarowym regulatorem LMI dla słabych i umiarkowanych zakłóceń wiatrowych	80
4.5	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-1-R; eksperyment na jeziorze z wielowymiarowym regulatorem LMI dla niewielkich i umiarkowanych zakłóceń wiatrowych	81
4.6	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-2-S; symulacja HIL działania układu z wielowymiarowym regulatorem LMI dla silnych zakłóceń wiatrowych	82
4.7	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-2-R; eksperyment na jeziorze z wielowymiarowym regulatorem LMI dla silnych zakłóceń wiatrowych	83
4.8	Ilustracja trajektorii zadanej dla eksperymentów z regulatorem PID-GS; punkt początkowy zaznaczono strzałką	84
4.9	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-1-S; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 9$ oraz silnych zakłóceń wiatrowych	85
4.10	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-1-R; eksperyment na jeziorze z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 9$ oraz silnych zakłóceń wiatrowych	86

4.11	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-2- S ; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 4$ oraz umiarkowanych zakłóceń wiatrowych	87
4.12	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-2- R ; eksperyment na jeziorze z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 4$ oraz umiarkowanych zakłóceń wiatrowych	88
4.13	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-3- S ; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości napędu głównego n_{AZ} malejącej od 9 do 4 oraz silnego wiatru	89
4.14	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-3- R ; eksperyment w warunkach rzeczywistych działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości napędu głównego n_{AZ} malejącej od 9 do 4 oraz silnego wiatru	90
4.15	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-1- S ; wyniki symulacji HIL dla układu z regulatorem MPC przy umiarkowanych zakłóceniami wiatrowych	92
4.16	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-1- R ; wyniki eksperymentu na jeziorze dla układu z regulatorem MPC przy umiarkowanych zakłóceniami wiatrowych	93
4.17	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-2- S ; wyniki symulacji HIL dla układu z regulatorem MPC przy silnych zakłóceniami wiatrowych	94
4.18	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-2- R ; wyniki eksperymentu na jeziorze dla układu z regulatorem MPC przy początkowo silnych, później słabnących zakłóceniami wiatrowych	95
4.19	Widok mapy z planem zadanej trajektorii dla prób z przełączaniem regulatorów; początek oznaczony strzałką	96
4.20	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1- S ; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego podczas zwrotów na prawą i na lewą burzę	97
4.21	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1- R ; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego podczas zwrotów na prawą i na lewą burzę	98
4.22	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1a- S ; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego dla pędników pozostających w spoczynku	99
4.23	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1a- R ; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego dla pędników pozostających w spoczynku	100
4.24	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1b- S ; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego w czasie aktywności pędników	101
4.25	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1b- R ; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego w czasie aktywności pędników	102
4.26	Widok mapy z planem zadanej trajektorii dla podróży „od kei do kei”	103
4.27	Widok map z zarejestrowanymi trajektoriami wyjścia <i>Dorchester Lady</i> z portu	104
4.28	Widok map z zarejestrowanymi trajektoriami wejścia <i>Dorchester Lady</i> do portu	105
4.29	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby Q2Q-1- S ; symulacja HIL pełnej podróży „od kei do kei”	107
4.30	Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby Q2Q-1- R ; eksperyment przeprowadzony w formie podróży „od kei do kei” na jeziorze.	108
4.31	Diagramy zmian kąta obrotu pędników dla prób z regulatorem MPC – po lewej dla symulacji (S), po prawej dla eksperymentów rzeczywistych (R); czerwoną, przerywaną linią oznaczono wartości średnie	113

4.32	Ilustracja ukształtowania terenu na półwyspie nad jeziorem Silm	116
A.1	Ilustracja określania parametrów ruchu statku w układach współrzędnych kartezjańskich: X0Y – NED (ang. <i>North-East-Down</i>) oraz $X_s0_s Y_s$ związanym z kadłubem statku	122
A.2	Schemat blokowy modelowania dynamiki pędników	123
A.3	Ilustracja rozkładu siły napędowych generowanych przez pędnik gondolowy	127
A.4	Ilustracja rozkładu sił oporu generowanych przez pędnik gondolowy . .	129
A.5	Widok układu pomiarowego parametrów wiatru i fali na jeziorze Silm .	132
A.6	Schemat blokowy elementów składowych modelu symulacyjnego <i>Dorchester Lady</i>	133

Spis tabel

2.1	Podstawowe parametry modelu <i>Dorchester Lady</i> i rzeczywistego gazowca LNG 140 000 m ³	22
2.2	Wybrane parametry odbiornika Leica GPS System 1200	26
2.3	Format komunikatu NMEA-0183 LLQ <i>Leica Local Position and Quality</i>	27
2.4	Wybrane parametry kompasu żyroskopowego Anschütz STANDARD 20	28
2.5	Format komunikatu NMEA-0183 HDT <i>Heading from True North</i>	28
2.6	Format komunikatu NMEA-0183 ROT <i>Rate of Turn</i>	29
2.7	Wybrane parametry anemometru Gill WindObserver II	30
2.8	Format komunikatu <i>ASCII Polar</i>	30
2.9	Format rekordu transmisji AIS i ECDIS na stosowany na jeziorze Silm	31
2.10	Kody identyfikacyjne modeli statków w symulatorze systemu AIS	32
2.11	Parametry komputera przemysłowego Axiomtek IPC934- 230-FL [15]	39
3.1	Wartości charakterystyczne układu przeliczającego parametry trajektorii na prędkości zadane regulatora LMI	48
3.2	Wartości nastaw regulatora PID-GS dla wybranych punktów pracy	51
3.3	Wartości współczynników modelu 3.18	56
3.4	Wartości nastaw regulatorów w układzie PBU	59
4.1	Sekwencja manewrów testowych regulatora LMI	79
4.2	Sekwencja zwrotów w scenariuszu badań regulatora PID-GS	84
4.3	Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora LMI	110
4.4	Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora PID-GS	111
4.5	Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora MPC	112
4.6	Wskaźniki oceny jakości sterowania podczas przełączania regulatorów	114
4.7	Wskaźniki oceny kosztów sterowania podczas przełączania regulatorów	114
A.1	Dopuszczalne zakresy sygnałów zadanych pędników <i>Dorchester Lady</i>	123
A.2	Parametry dynamiki poszczególnych urządzeń napędowych	124
A.3	Parametry równań współczynników oporu wiatrowego	132

Wprowadzenie

Pierwsze dwie dekady XXI wieku przyniosły bardzo wiele przeobrażeń w dziedzinie transportu morskiego. Można je przedstawiać w różnorodnych kontekstach: technologicznym, ekonomicznym, socjologicznym. W niniejszej pracy jako punkt odniesienia wyróżnione zostały trzy powszechnie zauważane aspekty zmian:

- ◆ niestannie rosnące (mimo okresowych wahań) zapotrzebowanie na przewóz towarów drogą morską wynikające z rosnących obrotów handlu światowego,
- ◆ ogólnoświatowe braki kwalifikowanych kadr w żegludze,
- ◆ dostępność efektywnych ekonomicznie, zaawansowanych technologii sterowania i komunikacji.

Obroty światowego handlu rejestrowane od 1948 roku przez Światową Organizację Handlu (wcześniej GATT) wykazują nieustanny trend rosnący. Był on szczególnie silny w ostatnim dwudziestoleciu [182]. Zjawisko to powodowało wzrost popytu na przewozy morskie, gdyż ocenia się, że 70% całości transportowanych towarów, a w przypadku transportu międzynarodowego nawet 90%, jest przewożonych drogą morską [148]. Budowa dużej liczby nowych statków w odpowiedzi na rosnący popyt, a zatem zwiększenie pola konkurencji, spowodowała walkę o minimalizację kosztów przewozu jednego kontenera, czy też jednej tony towaru. Zjawisko to, mimo zawirowań związanych z pandemią SARS-CoV-2, wciąż jest obserwowane, a prognozy instytucji branżowych wskazują na jego utrwalenie w najbliższych latach [72].

Jednym z elementów polityki zmniejszania kosztów eksploatacji statku było ograniczenie liczebności załogi. Proces ten rozpoczął się już w końcu lat 80-tych XX wieku. Do jego przyspieszenia i pogłębienia przyczynił się trzeci z czynników wymieniony na początku tego rozdziału. Rozwój technologii automatycznego sterowania i pomiarów doprowadził do powstania siłowni bezwachtowych, a także ograniczenia obsady wacht nawigacyjnych. Z jednej strony przyniosło to rzeczywiste zmniejszenie kosztów eksploatacji statków, z drugiej zaowocowało znacznym wzrostem wymagań względem kompetencji załóg pływających.

Proces ten nabrał charakteru tak zwanego „błędnego koła”. Budowanie coraz większej liczby statków, w których eksploatacji pokładano olbrzymi nacisk na zmniejszenie kosztów operacyjnych, poprzez wprowadzanie nowoczesnych technologii, tworzyło zapotrzebowanie na wysokospecjalistyczne kadry do ich obsługi. Jednocześnie, to samo zjawisko tworzyło barierę wejścia do zawodu marynarza, zniechęcając potencjalnych kandydatów o niewystarczających kwalifikacjach. Brak kadr prowadził do zwiększania stopnia automatyzacji, a to znowu podnosiło próg umiejętności potencjalnych eksploatorów maszyn i urządzeń okrętowych¹. Opublikowany w lipcu 2021 roku raport przygotowany wspólnie przez International Chamber

¹ Naturalnie, wzrost wymagań dotyczący wiedzy technicznej był tylko jednym z kilku czynników zmniejszających dopływ kadr marynarskich. Jednak jego wpływ był i jest

od Shipping i BIMCO [23] wskazuje na istniejący stały deficyt oficerów spełniających standardy STCW i prognozuje zwiększenie się tego niedoboru do ponad 26 000 osób w 2026 roku.

Braki kadrowe są jednym z powodów, dla których postuluje się dalsze zmniejszenie liczebności załóg aż do osiągnięcia stanu, w którym statek towarowy pozbawiony załogi odbywałby podróż w pełni autonomicznie „od kei do kei”. Międzynarodowa Organizacja Morska proponuje rozłożenie tego procesu na cztery unormowane etapy określane jako stopnie autonomiczności statku morskiego (ang. *Marine Autonomous Surface Ship Degrees*) [73]:

MASS Degree 1 *Statek, na którym procesy są zautomatyzowane i istnieje system wspomagania decyzji.* Załoga na takim statku nadzoruje i monitoruje istniejące systemy i funkcje. Niektóre operacje są zautomatyzowane i czasowo mogą być realizowane bez nadzoru. Jednakże załoga w każdej chwili może przejąć sterowanie wszystkimi procesami.

MASS Degree 2 *Zdalnie sterowany statek obsadzony załogą.* Jednostka jest sterowana i nadzorowana z zewnątrz. Załoga pozostaje na burcie i jest gotowa do przejęcia sterowania systemami i funkcjami statku.

MASS Degree 3 *Bezzałogowy statek zdalnie sterowany.* Jednostka jest sterowana i nadzorowana z zewnątrz. Nie ma na niej załogi.

MASS Degree 4 *W pełni autonomiczny statek bezzałogowy.* Systemy zainstalowane na statku sterują procesami i nadzorują jego funkcje bez udziału człowieka.

Wiele eksploatowanych współcześnie jednostek morskich mieści się w definicji pierwszego stopnia autonomiczności. Natomiast osiągnięcie wyższych stopni łączy się z rozwiązaniem wielu zagadnień nie tylko z dziedziny technologii, ale także prawa, ekonomii, socjologii, zarządzania, polityki czy nawet etyki. Złożoność i interdyscyplinarność problemów, jakie stoją przed zespołami badawczymi, zatrzymuje większość projektów na etapie testów i symulacji. Najbardziej zaawansowany projekt w skali przemysłowej, jakim jest niewielki (120 TEU), mający pływać po wewnętrznych wodach norweskich, kontenerowiec *Yara Birkeland* posuwa się bardzo powoli do przodu i notuje niemal dwuletnie opóźnienie [83]. We wrześniu 2019 roku japońska firma armatorska NYK Line przeprowadziła testy autonomicznego sterowania statkiem na pewnym etapie podróży z Chin do Japoni [133], a w maju 2020 roku testy zdalnego sterowania holownikiem według standardu MASS Degree 2 [134]. Służby portowe Finlandii przygotowują natomiast program szkolenia pilotów, którzy wykorzystując infrastrukturę lokalnych stacji VTS (ang. *Vessel Traffic System*) wprowadziliby zdalnie statki do portów. Byłaby to fragmentaryczna realizacja funkcji zdefiniowanych dla MASS Degree 2 [154].

Rozwiązywanie takich właśnie cząstkowych zadań stanowi znaną w historii techniki metodę efektywnej realizacji układów o złożonej, wielowarstwowej i wielofunkcyjnej strukturze. Ideę tę zastosowano także do określenia zakresu tej rozprawy. Koncentruje się ona wokół realizacji jednego składnika z całości obszaru problematyki MASS, jakim jest układ automatycznego sterowania ruchem statku podczas podróży „od kei do kei”. Układ taki byłby pomocny w przypadku pierwszego stopnia autonomiczności, wskazany dla drugiego i trzeciego i naturalnie niezbędny w przypadku układu realizującego pełną autonomię statku.

wyraźnie widoczny. Przedstawianie pozostałych czynników, zwłaszcza ekonomicznych i kulturowych, wykracza poza zakres niniejszej pracy.

Przystępując do rozwiązania postawionego zagadnienia, należy rozważyć możliwości i ograniczenia zastosowania w omawianym kontekście poszczególnych paradygmatów sterowania poczynając od klasycznych układów PID.

Sukces technologii liniowych układów automatyki, przejawiający się w ich powszechnej obecności w rzeczywistych instalacjach przemysłowych, można przypisać, między innymi, względnej łatwości ich projektowania. Stojący za tą technologią ugruntowany aparat matematyczny został zaimplementowany w postaci licznych narzędzi komputerowego wspomaganie projektowania układów sterowania CACSD (ang. *Computer-Aided Control System Design*). Jest także często standardowym modułem dostępnym w strukturze przemysłowych sterowników programowalnych. Dzisiaj synteza regulatora liniowego, jedno- czy też wielowymiarowego jest zadaniem względnie łatwym i niezbyt czasochłonnym. Niestety, bezsprzeczne zalety technologii układów liniowych ogranicza fenomen powszechnego występowania nieliniowości w obiektach rzeczywistych.

W konsekwencji większość sterowników liniowych projektuje się dla określonego punktu pracy układu. Zmiany parametrów wokół tego punktu mogą powodować pogorszenie wydajności linowego układu regulacji, nawet jeśli projektant zastosuje metody sterowania odpornego. Innym podejściem do rozwiązania tego problemu są regulatory adaptacyjne. Niestety układy te w zastosowaniach przemysłowych są, w przypadku nieprawidłowego działania, trudne w diagnostyce, a także, znacznie bardziej niż klasyczne układy liniowe, narażone na ryzyko utraty stabilności.

Dlatego powszechną praktyką dla układów, których własności zmieniają się w znacznym stopniu, jest projektowanie więcej niż jednego regulatora liniowego, dla różnych punktów pracy i przełączanie między nimi. Umożliwia to stabilną i zadowalającą jakość sterowania układu w całym zakresie roboczym. Najprostszym przykładem mogą tu być regulatory typu *gain-scheduling*. Jednakże, określając pojęcie przełączalnych układów sterowania, przyjmuje się najczęściej, że zmianie ulegają nie tylko nastawy regulatora, ale także jego struktura, cały regulator lub jeszcze większa grupa bloków w układzie [95]. Zjawisko przełączania występuje również jako dodatkowy składnik innych, nieprojektowanych w tym paradygmacie procedur sterowania, na przykład, gdy pojawia się potrzebna zmiany trybu pracy ze sterowania ręcznego na sterowanie automatyczne.

Przełączanie w układach sterowania może być źródłem stanów przejściowych powodujących bardzo duże i szybkie zmiany wartości sygnałów. W konsekwencji pogarszają się znacząco parametry jakościowe regulacji, przeciążane urządzenia wykonawcze ulegają częstszym awariom, a w krańcowych wypadkach może dojść do utraty stabilności układu. Aby przeciwdziałać tym efektom, w układach o zmiennej strukturze stosuje się często techniki przełączania bezuderzeniowego.

Układy przełączane są rzadkością w sterowaniu statkami. Ogromna większość funkcjonujących obecnie układów sterowania ich ruchem to autopiloty realizujące funkcję stabilizatora kąta kursowego jednostki płynącej z prędkością marszową i regulatora zwrotu. Duża część z nich wykorzystuje struktury PID z dołączonymi elementami nieliniowymi typu nasycenie czy strefa martwa. Nowsze konstrukcje posiadają już wspomniane funkcje adaptacji do warunków pogodowych i stanu załadowania statku, a także możliwość sprzężenia z systemem ECDIS i pobierania informacji o planie podróży. Autopiloty takie nie są przystosowane do pracy z małymi prędkościami i do sterowania sterami strumieniowymi. Nie używa się ich zatem podczas

manewrów, kiedy pilot przebywa na mostku, w nietypowych warunkach pogodowych, a także w rejonach intensywnego ruchu innych jednostek. Z drugiej strony, autopiloty mające możliwość sterowania wieloma pędnikami przy niewielkich prędkościach są stosowane na statkach specjalistycznych takich jak np. jednostki off-shore, statki ratownicze, czy pływające dźwigi i stanowią osobną kategorię od wspomnianych wyżej autopilotów statków towarowych.

Powyższe rozważania pozwalają stwierdzić iż, biorąc pod uwagę różne formy ruchu statku towarowego w podróży „od kei do kei”, naturalnym wyborem paradygmatu układu sterowania dla tego zadania jest grupa regulatorów pracujących w układzie przełączania bezuderzeniowego. Stąd sformułowano następującą tezę:

Zastosowanie układu kompleksowego sterowania ruchem statku w systemie „od kei do kei” znacząco przyczyni się do realizacji idei autonomicznego statku morskiego, co w efekcie poprawi wyniki ekonomiczne w żegludze morskiej dzięki redukcji załóg oraz przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa takiego transportu.

Weryfikacja tezy będzie efektem realizacji celu głównego pracy, jakim jest:

Opracowanie i wdrożenie na rzeczywistym obiekcie pływającym kompleksowego systemu sterowania ruchem statku z wykorzystaniem kilku współdziałających regulatorów o odmiennych zasadach działania

Powyższy cel główny rozdzielono na trzy cele szczegółowe:

1. Opracowanie regulatora pośrednich prędkości, łączącego układ sterowania ruchem statku poruszającego się z dowolną prędkością i z dowolnym kątem dryfu, w jeden kompletny system sterowania;
2. Wybór i wdrożenie metody przełączania bezuderzeniowego oraz sprawdzenie celowości stosowania takiego rozwiązania w żegludze;
3. Weryfikacja proponowanych rozwiązań podczas eksperymentów na rzeczywistym obiekcie pływającym.

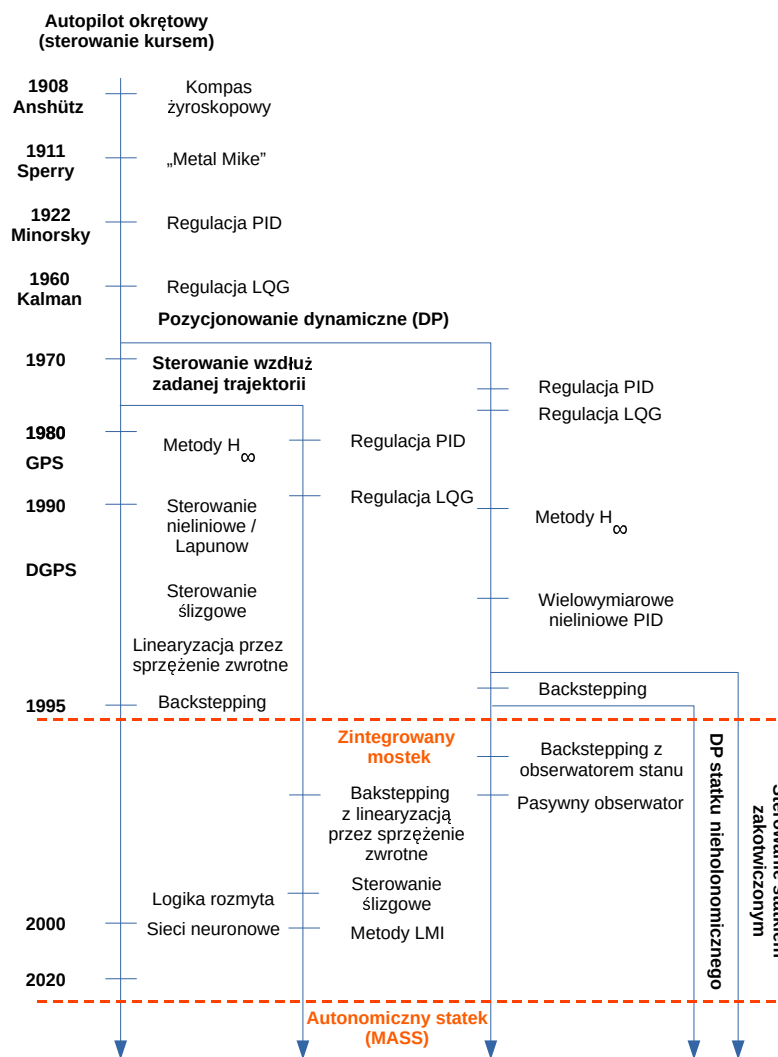
Podjęta na wczesnym etapie realizacji pracy decyzja o weryfikacji proponowanego układu sterowania na jednym ze statków treningowych zbudowanych i użytkowych przez Fundację Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie-Kamionce pociągnęła za sobą powstanie celu dodatkowego pracy. Fundacja, w odpowiedzi na potrzeby rynku, jest zainteresowana budową infrastruktury szkoleniowej w zakresie nadzoru/manewrowania statkami na poziomach MASS Degree 2 i MASS Degree 3. Osiągnięcie celu głównego pracy byłoby istotnym krokiem w procesie budowy takiej infrastruktury.

Rozprawę podzielono na cztery rozdziały. W pierwszym dokonano przeglądu metod sterowania ruchem statku na tle historycznym. Zaprezentowano w nim także ideę sterowania bezuderzeniowego oraz technikę wybraną do implementacji w projektowanym, kompleksowym układzie regulacji. Drugi rozdział zawiera opis obiektu sterowania, jakim jest izomorficzny model gazowca LNG *Dorchester Lady* używany jako statek treningowy do szkolenia nawigatorów. W trzecim rozdziale opisano szczegółowo realizację kompleksowego układu sterowania statkiem w podróży „od kei do kei”. Czwarty rozdział przedstawia wyniki symulacji komputerowych typu *Hardware In*

the Loop i badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym zarówno poszczególnych składowych, jak i całości zbudowanego w ramach pracy układu sterowania. Do rozprawy dołączono dodatek, w którym zamieszczono opis matematycznego modelu obiektu sterowania, stosowanego podczas badań symulacyjnych.

1. Metody sterowania ruchem statku

Epoka automatycznego sterowania statkiem rozpoczęła się wraz ze skonstruowaniem pierwszego urządzenia do pomiaru kursu, z którego można było odczytać jego wartość środkami technicznymi – żyrokompasu [45]. Urządzenie to zbudowali niemal równolegle w pierwszej dekadzie XX wieku: Hermann Anschütz-Kaempfe w Europie i Elmer Sperry w USA. Firmy założone w przez obu wynalazców rozpoczęły wkrótce budowę elektromechanicznych autopilotów okrętowych. Jednakże rzeczywisty rozwój układów automatycznego sterowania ruchem statku rozpoczęła w latach 20-tych ubiegłego wieku publikacja Mikołaja Minorskiego [107] przedstawiająca opracowany przez niego autopilot proporcjonalno-całkująco-różniczkujący.



Rysunek 1.1. Chronologia rozwoju układów automatycznego sterowania ruchem statku od początku XX w. do czasów współczesnych (adaptowano z: [48])

Rysunek 1.1 ilustruje chronologię rozwoju układów automatycznego sterowania ruchem statku i wdrażania pojawiających się nowych technologii w tej dziedzinie. Przedstawiony w dalszej części niniejszego rozdziału przegląd publikacji odnoszących się do omawianej tematyki oparto na tym schemacie.

1.1. Klasyczne metody sterowania kursem statku

Konwencjonalne regulatory PID były podstawą budowy autopilotów okrętowych do połowy lat 80-tych XX wieku. Działały one w układach jednowymiarowych SISO (ang. *Single Input Single Output*) regulując kurs jednostki najczęściej za pomocą wychylenia płetwy sterowej. Idea regulacji PID nie została zarzucona i jest ważną składową także ogromnej części współczesnych autopilotów.

Istotną słabością układów regulacji kursu opartych na „czystych” regulatorach PID było to, iż współdziałały ze statkiem, który ze swej natury jest obiektem zdecydowanie nieliniowym i niestacjonarnym. Zakłócenia działające na morzu także mają silnie zmienny charakter. Uzupełniano więc regulatory o elementy nieliniowe, wprowadzając na przykład nastawialne strefy nieczułości i poziomy nasycenia dla wychylenia płetwy sterowej, a także możliwość zmiany nastaw wzmocnień regulatora w zależności od pogody i stanu załadowania statku. Elementy nieliniowe znacząco pogarszały jednak jakość sterowania przy dobrej pogodzie, a poprawne ustawienie parametrów autopilota sprawiało trudność oficerom nawigacyjnym i prowadziło do utrzymywania nieoptymalnych parametrów podróży¹. Przykładem takiego autopilota okrętowego był instalowany na statkach budowanych przez polskie stocznie do lat 80-tych XX wieku autopilot TS-75 produkowany przez Wytwórnię Sprzętu Komunikacyjnego w Warszawie [98].

Kwestię indukowanych przez fale zakłóceń powodujących myszkanie statku, a przez to nieustanne reakcje urządzeń sterownych, prowadzące do ich szybkiego zużycia próbowano rozwiązać, stosując układy filtrów wycinających i/lub dolnoprzepustowych w układzie kaskady, lecz wprowadzały one dodatkowe, często silne przesunięcie fazowe i pogarszały jakość regulacji [49], [157].

Zasadniczą zmianę przyniósł początek lat 60-tych. Rudolf Kalman opublikował niemal jednocześnie opis regulacji LQG oraz filtru pozwalającego na estymację stanu układu liniowego [79], [80]. Projektowanie układów regulacji w dziedzinie częstotliwości zaczęto zastępować syntezą w przestrzeni stanów. Idee te dość szybko przeniknęły do układów stosowanych w sterowaniu kursem statku. Pojawiły się w rozwiązaniach wielu badaczy i są eksplorowane do dziś. Znaczące przykłady można znaleźć w pracach Koyamy [84], Norrbina [130], van Amaerongena i van Nauta Lemkego [6], [7], Katebiego i in. [81], Passeniera [138], Fossena i in. [46], [52], Nguyena i in. [123], Thomasa i Sclavounos’a [163], Wondergema i in. [181]. Spośród krajowych autorów można wymienić publikacje Chocianowicza i Pejasia [38], Gierusza i in. [59], Morawskiego i in. [108], [110] oraz Tomery [164].

¹ Także autor, podczas swojej krótkiej kariery w charakterze oficera elektryka okrętowego, w latach 80-tych i 90-tych ubiegłego wieku, został wezwany do naprawy „zepsutego” autopilota, który okazał się w pełni sprawny, lecz jego nastawy całkowicie nie odpowiadały stanowi pogody i załadowania statku.

1.2. Przegląd współcześnie stosowanych metod sterowania statkiem

Umownie można przyjąć, że początkiem współczesnych rozwiązań w dziedzinie sterowania ruchem statku są nowe technologie, które zostały wprowadzone szerzej do branży morskiej w latach 70-tych XX wieku. Przede wszystkim, wspomniane wyżej idee sterowania mające swoje źródło w pracach Kalmana, mogły się „zmaterializować” w rzeczywistych układach regulacji dzięki pojawieniu się minikomputerów. Drugim ważnym elementem było rozpowszechnienie użycia radiowych, hiperbolicznych systemów nawigacji: Decca, Loran i Omega. Co prawda ich początki sięgają II Wojny Światowej, lecz dopiero w latach 70-tych XX wieku osiągnęły one swoją dojrzałość, a przy tym rozpoczęto produkcję odbiorników, które automatyzowały określanie pozycji statku. Przykładem szczytowej technologii tamtych lat może być autopilot NAUTOMAT firmy Anschütz, który był urządzeniem hybrydowym. W jego skład wchodził analogowy regulator PID, jednocześnie urządzenie to wykorzystywało do sterowania statkiem po trajektorii minikomputer PDP-10 firmy DEC sprzężony z odbiornikiem DECCA [98]. W następnej kolejności szerokim otwarciem bramy umożliwiającym implementację nowych paradygmatów sterowania było, o dekadę późniejsze, pojawienie się tanich i wydajnych maszyn cyfrowych opartych na mikroprocesorach. W 1983 roku decyzją administracji amerykańskiej udostępniono system nawigacji satelitarnej NAVSTAR (dzisiaj znany jako GPS) użytkownikom cywilnym [137]. Upowszechnienie tego systemu w początku lat 90-tych, wraz z intensyfikacją produkcji tanich układów mikroprocesorowych, dało początek procesowi scalania funkcji urządzeń nawigacyjnych. Rozwijająca się obecnie integracja elementów mostka nawigacyjnego prowadzi ostatecznie do zanikania autopilota jako osobnego urządzenia. Coraz częściej projektuje się go, po prostu, jako jeden z modułów programowych szerszego systemu sterowania, zarządzania i komunikacji na statku.

Uporządkowanie i przedstawienie metod współcześnie stosowanych do sterowania ruchem statku jest zadaniem trudnym, gdyż wiele rozwiązań przekracza ramy jednej dziedziny zarówno w wymiarze stosowanych metod sterowania, jak i w aspekcie parametrów, które mają być sterowane. Poniżej zaproponowano taksonomię przyjmowaną często w publikacjach przeglądowych [47], [146], mając na uwadze, że przyporządkowanie wielu prac przez innych autorów mogłoby być odmienne.

1.2.1. Zagadnienie sterowania kursem

Kwestia sterowania kursem była, jak już wspomniano, pierwszym i niejako tradycyjnym zagadnieniem podlegającym automatyzacji. Ograniczenia klasycznej regulacji PID starano się przełamać na kilka sposobów: stosując sterowanie nieliniowe lub wybrany rodzaj adaptacji albo też projektując układ odporny na zmianę parametrów obiektu.

Przykładem sterowania nieliniowego z linearyzacją przez sprzężenie zwrotne mogą być publikacje Morawskiego i in. [114], Tzenga i in. [173], oraz Zwierzewicza [187].

W przypadku sterowania adaptacyjnego stosowano metodę *gain scheduling*, na przykład w pracy Salmana [153], choć najszerszej znane są rozwiązania układów adaptacyjnych z modelem odniesienia (MRAS) zespołów badawczych skupionych wokół van Amerongena [4], [5], [9], Åströma [13],

[14], [78] a także prace Lima [96], [97] oraz zespołu naukowców japońskich Ariego i in. [10].

Przykłady zastosowania regulatorów odpornych wykorzystujących normę H_∞ lub liniowe nierówności macierzowe (LMI) znaleźć można w pracach: Donhy [39], Gierusza [56], Hu i in. [69], Pomirskiego [142], Rybczak [149], [151].

Innym sposobem rozwiązywania problemów powodowanych przez nieliniowości w procesie regulacji kursu jest sterowanie ślizgowe. Przykłady jego zastosowania przedstawiają prace Papouliasa i Healey'a [136], Tomery [170] oraz Zhanga i in. [184].

Od połowy lat 90-tych w teorii sterowania bardzo wyraźnie zaznaczył się nurt układów odwołujących się do zagadnień sztucznej inteligencji. Paradigmat ten, szczególnie teoria zbiorów rozmytych i sztucznych sieci neuronowych, znalazł także szerokie zastosowanie w omawianych układach. Roberts i in. przedstawili w swoim artykule przeglądowym [147] ciekawą perspektywę tych zagadnień. W literaturze międzynarodowej można znaleźć wiele szczegółowych rozwiązań. Na przykład w pracach van Amerongena i in. [8], Burnsa [35], Guo i in. [66], Lyne'a i Passino [90], Polkinghorne'a i in. [141], Unara i Murray-Smitha [174], Zhanga i in. [185] oraz Zirilliego i in. [186]. Tematyka sztucznej inteligencji w kontekście sterowania statkiem podjęta została także w polskich ośrodkach naukowych, między innymi w pracach: Borkowskiego [24], Kwiesielewicz i Tomery [87], Morawskiego i Raka [119] Morawskiego i Tomery [120], Nguyen Conga [128] i Tomery [165], [169].

Najnowszym chronologicznie podejściem stosowanym w projektowaniu układów regulacji kursu jest metoda *backstepping*. Jej początki sięgają roku 1990. W zastosowaniach morskich pojawiła się kilka lat później. Przykładem są publikacje z końca lat 90-tych zespołu skupionego wokół Fossena [53] [63]. Metoda ta zdobyła dużą popularność i stosowana jest do projektowania także układów regulacji wielowymiarowej. Zagadnienia związane ze sterowaniem kursem można znaleźć w publikacjach Asadiego i Khayatiana [11], Bhatta i in. [21], Eskego i in [44]. Spośród autorów krajowych wiodącą osobą jest Witkowska ze współpracownikami [178], [179], [180].

1.2.2. Sterowanie wzdłuż zadanej trajektorii

Gdy zachodziła potrzeba minimalizacji odchyłki statku od założonej trasy ruchu w klasycznym układzie SISO z regulacją kursu, nawigator sprawdzał z pewną częstotliwością pozycję statku i w miarę potrzeby korygował kurs zadany autopilota. Jak wspomniano wyżej, pojawienie się na statkach maszyn cyfrowych, które mogły współpracować z systemami automatycznego określania pozycji, umożliwiło poszerzenie funkcji autopilota okrętowego i zautomatyzowanie sterowania wzdłuż zadanej trajektorii. Zadanie to często realizowano za pomocą układu kaskadowego. Przykłady takiego rozwiązania można znaleźć w publikacjach Bibuliego i in. [22], Cahariji i in. [36], Fredriksena i Pettersen [55], Morawskiego i in. [115], [116], Moreiry i in. [121] oraz Trybusa i in. [171]. W przypadku regulatora bezpośredniego staje się on strukturą o jednym wejściu (kąt wychylenia steru) i dwóch wyjściach (kurs statku i poprzeczna odchyłka od trajektorii zadanej) lub, w przypadku kiedy dopuszcza się także manewry prędkością statku, o dwóch wejściach (kąt wychylenia steru i zadane obroty śruby napędowej) i trzech wyjściach (kurs i prędkość wzdłużna statku oraz poprzeczna odchyłka od trajektorii zadanej). Do syntezy takiego układu regulacji stosowano metody przedstawione wyżej

dla układów sterowania kursem, co można zauważyć w pracach Bergego i in. [20], Borkowskiego [25], Fossena [50], Kuli i Tomery [85], Lefebera i in. [92], Morawskiego i in. [109] [111], Wahla i Gillesa [175] oraz Zwierzewicza [188].

Jako pewną odmianę sterowania statkiem wzdłuż zadanej trajektorii można traktować zadanie „UNREP” czyli względną stabilizację pozycji dwóch statków płynących równolegle w niewielkiej odległości od siebie w celu dokonania przeładunku. Wśród prac zajmujących się w ostatnich latach tym zagadnieniem można wymienić publikacje Huanga i in. [70], Kyrkjebø i in. [88] oraz Miller [103], [104].

1.2.3. Układy dynamicznego pozycjonowania

Pojawienie się w połowie lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku półzanurzalnych platform wiertniczych na zatoce meksykańskiej zbiegło się z odkryciem złóż naftowych na Morzu Północnym. Do funkcji układów sterowania budowanych wówczas licznie pływających platform wiertniczych i jednostek pomocniczych dołączono zadanie stabilizacji położenia kadłuba nad dnem morza w trzech stopniach swobody² – DP (ang. *Dynamic Positioning*). Początkowo realizowano to zadanie za pomocą trzech niezależnych układów regulacji PID dla każdego z wymiarów osobno [29]. Jak już wspomniano wcześniej, idea syntezy regulatorów w przestrzeni stanów, która narodziła się w tym czasie, szybko zaowocowała wielowymiarowymi układami sterowania. W tym obszarze badań głównymi ośrodkami, z naturalnych przyczyn, były te położone w krajach wokół Morza Północnego. Patrz prace: Ambrosino i in. [3], Balchena i in. [16], Breivika i in. [30], Fossena [46], Fotakisa i in. [54], oraz Pettersen i Fossena [140].

Pewną odmianą zadania DP jest zagadnienie stabilizacji statku zakotwiczonego – PM (ang. *Position Mooring*). Pojawiło się ono jako osobny obszar badawczy w połowie lat dziewięćdziesiątych (patrz: rysunek 1.1) w ośrodku w Trondheim i związane jest z działalnością norweskich koncernów z branży *off-shore* [158]. Podobnie, pokrewnym zagadnieniem do DP jest pogodowa optymalizacja stabilizacji pozycji – WOPC (ang. *Weather Optimal Positioning Control*), która zajmuje się stabilizacją położenia statku z jednoczesną optymalizacją wydatku na sterowanie poprzez utrzymywanie diametralnej kadłuba w linii naporu wiatru [46].

Z punktu widzenia sterowania statkiem podczas wszystkich faz podróży „od kei do kei”, co jest przedmiotem niniejszej pracy, zadania realizowane przez układy DP pokrywają się w ogromnej mierze z zagadnieniami sterowania precyzyjnego z małymi prędkościami podczas manewrów w porcie (ang. *Maneuvering Control*). Ten aspekt sterowania ruchem statku znajduje swoje odbicie w pracach między innymi Breivika i in. [30], Fossena [48], Lee i in. [91], Tomery [166].

1.2.4. Kompensacja kołysań bocznych statku

Kołysania statku, szczególnie przechyły boczne, pochodzące najczęściej od zakłóceń meteorologicznych są znaczącą niedogodnością dla pasażerów na promach i wycieczkowcach. Zagrożają także bezpieczeństwu ładunku, zwłaszcza na statkach o wysoko położonym środku ciężkości i przewożących

² Układ 3DOF stanowią tu współrzędne położenia i orientacji w lokalnym, dwuwymiarowym układzie współrzędnych kartezjańskich związanym z nieruchomym punktem nad dnem morza.

ładunki podatne na przemieszczenie, jak kontenerowce, samochodowce i ciężarowce. Najprostszą metodą zmniejszania kołysań bocznych kadłuba było budowanie stępek anty przechyłowych. Już około stu lat temu stosowano również zbiorniki tłumiące przechyły. Sperry także opracował i testował układy kompensacji kołysań. Wykorzystywał w tym celu żyroskopy o znacznej masie [19]. Przykład jego rozwiązania zilustrowany jest w pracy Forda [45]. W późniejszym okresie zaczęto stosować aktywne i pasywne zbiorniki anty przechyłowe oraz płetwy boczne sterowane klasycznymi regulatorami PD lub PDD² [18].

Szczegółowa prezentacja układów kompensacji kołysań bocznych wykracza poza zakres niniejszej pracy. Zainteresowany czytelnik znajdzie ich solidny przegląd w pracach Kuli [86], Pereza i Blankego [139] oraz Robertsa [146].

1.2.5. Integracja układów sterowania ruchem statku

W ostatniej dekadzie XX wieku wyraźnie zarysowała się tendencja do integracji urządzeń nawigacyjnych i układów sterowania statkiem. Jak już wspomniano w pierwszej części niniejszej sekcji, sprzyjało temu pojawienie się tanich i niezawodnych komputerów o stosunkowo dużych mocach obliczeniowych, powszechny dostęp do satelitarnych systemów określania pozycji, rozwój map elektronicznych oraz systemu radiowej wymiany informacji o ruchu statków – AIS (ang. *Automatic Identification System*). Współcześnie prace dotyczące sterowania wyłącznie kursem statku stanowią niewielki odsetek wszystkich publikacji w omawianej dziedzinie. Autorzy częściej proponują rozwiązania dla zagadnień, które łączą kilka obszarów przedstawionych wyżej. Przykładem mogą być publikacje Gierusza i in. [60], Miller i Rybczak [105], Skjetnega i in. [156], oraz Tomery [167]. Dostępne są także prace wprost dotyczące automatyzacji sterowania statkiem podczas całej podróży z portu do portu, wśród nich: Breivika [27], Breivika i Fossena [28]. Morawskiego i in. [112] czy Tomery [168].

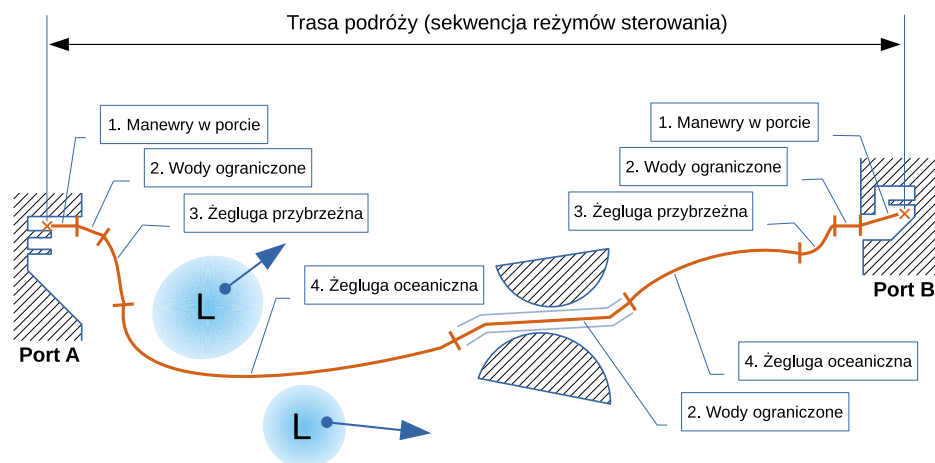
Idea pokonywana całej trasy podróży statku lub znaczącej jej części w reżymie sterowania automatycznego nieodłącznie wiąże się z omawianą we wstępie koncepcją autonomicznego statku handlowego MASS (ang. *Marine Autonomous Surface Ship*). Zagadnieniom, które skupiają się wokół tej idei, poświęcony jest następny podrozdział.

1.3. Systematyka metod sterowania jako następstwo dekompozycji zadania realizacji pełnomorskiej podróży autonomicznego statku

Przeprowadzenie bezzałogowego statku w sposób ekonomiczny i bezpieczny pomiędzy dwoma portami jest niezwykle złożonym zadaniem. Spośród związanych z tym zagadnień wymienionych we wprowadzeniu, w niniejszej części pracy skoncentrowano się na aspekcie technicznym, w szczególności na określeniu struktury układu sterowania ruchem takiej jednostki.

W przypadku statku obsadzonego załogą to jego kapitan odpowiada za przygotowanie i późniejszą realizację planu podróży [77]. Jej specyfika pozwala wyróżnić w tym planie charakterystyczne etapy (patrz: rysunek 1.2):

- ◆ manewry w porcie,



Rysunek 1.2. Schemat ilustrujący fazy podróży morskiej od kei do kei; Obszary oznaczone literą **L** symbolizują niższe atmosferyczne – strefy złej pogody (adaptowano z: [77])

- ◆ żeglugę na wodach ograniczonych,
- ◆ żeglugę przybrzeżną,
- ◆ żeglugę oceaniczną.

Statek rozpoczynając podróż, pokonuje te etapy zgodnie z kolejnością zapisaną na powyższej liście. Przy wchodzeniu do portu kolejność jest odwrotna. Podczas krótkich podróży statek może nie przejść do etapu żeglugi oceanicznej i pozostać przez cały rejs na etapie żeglugi przybrzeżnej. Podobnie, podczas długich rejsów, żegluga oceaniczna może zostać tymczasowo przerwana etapem żeglugi przybrzeżnej lub po wodach ograniczonych na przykład ze względu na przejście statku przez wąską cieśninę, lub archipelag wysp. Specyfika kolejnych etapów podróży wymaga adekwatnych funkcjonalności układu sterowania. Schemat zależności pomiędzy czynnikami decydującymi o realizacji tych funkcjonalności przedstawia rysunek 1.3.

W przypadku manewrów w porcie istotna jest precyzja realizacji zaplanowanych manewrów. Na przykład nabrzeża w portach najczęściej nie są na tyle rozległe, aby manewrujący statek mógł przeregulować docelowe położenie o pół czy nawet ćwierć swojej długości. Mogłoby to także utrudnić lub uniemożliwić wykorzystanie infrastruktury przeładunkowej. Drugim istotnym czynnikiem jest odporność układu sterowania na awarie. Statek używa w porcie praktycznie wszystkich pędników. Awaria jednego z nich lub utrata części zasilania powinna być kompensowana przez pozostałe, pracujące urządzenia. Bardzo często rozpoczętego w porcie manewru nie można już przerwać bez poważnych konsekwencji, nie można także postawić statku w dryfie ani osadzić awaryjnie na mieliźnie. Czynniki te, w połączeniu z naturalną podczas manewrów, niską prędkością kadłuba, wskazują na potrzebę skoncentrowania się dla tego etapu podróży na implementacji wielowymiarowego regulatora prędkości kątowej i składowych prędkości postępowej³ oraz odpornego na awarie układu alokacji mocy dla aktywnych pędników zainstalowanych na statku.

Na etapie żeglugi po wodach ograniczonych, na torach podejściowych, kotwicowiskach, kanałach, rzekach czy w strefach rozgraniczenia ruchu istotnym

³ Ruch statku w porcie można, ze względu na znikomy wpływ falowania i w pewnej mierze wiatru, analizować na płaszczyźnie – dla trzech stopni swobody.

		Dominujący czynnik decyzyjny	Prędkość statku	Metoda sterowania	Kluczowy podsystem (rys. 1.5)
Kolejne etapy podróży morskiej	Manewry w porcie	Precyzja Odporność na awarie	Mala i bardzo mala	Sterowanie precyzyjne (MIMO)	Układ regulacji
	Żegluga po wodach ograniczonych	Margines bezpieczeństwa Prawo drogi	Manewry prędkością	Sterowanie wzdłuż zadanej trajektorii	Nadrzędny układ nawigacyjny
	Żegluga przybrzeżna	Prawo drogi	Eksploatacyjna	Sterowanie kursem (SISO)	Nadrzędny układ nawigacyjny
	Żegluga oceaniczna	Optymalizacja czynników ekonomicznych Decyzje właścicielskie	Eksploatacyjna	Sterowanie kursem (SISO)	Warstwa zarządzania

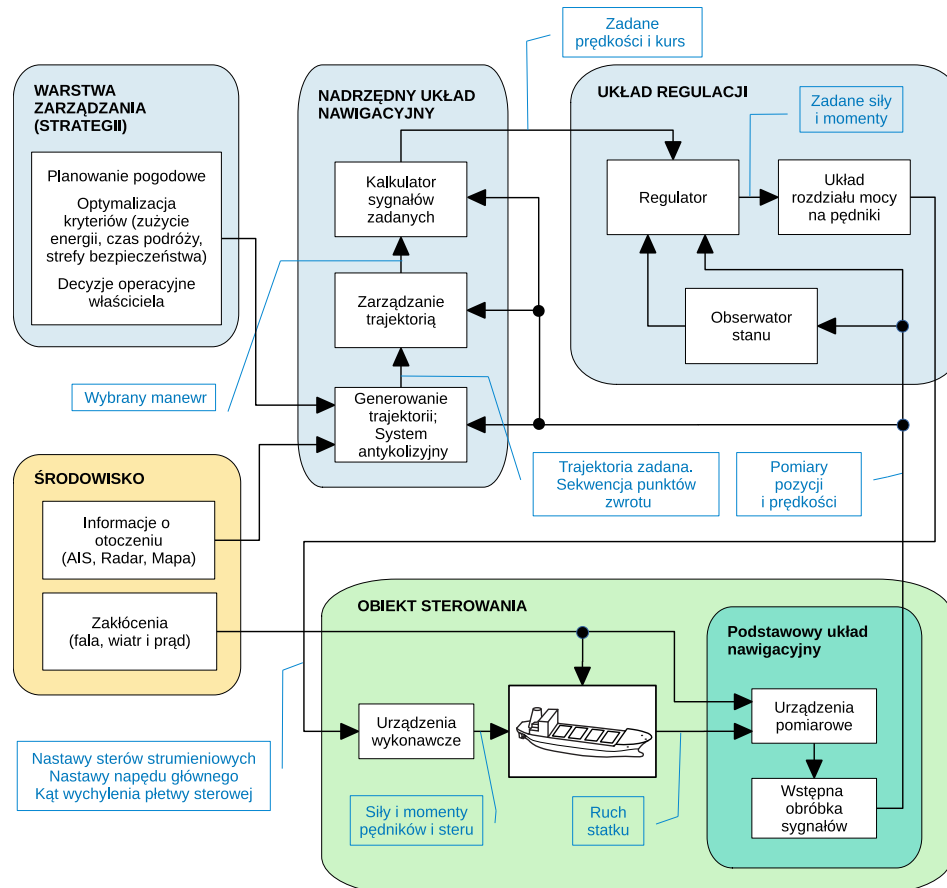
Rysunek 1.3. Matryca doboru niezbędnych funkcjonalności i struktury układu sterowania ruchem statku realizującego podróż autonomiczną; Czerwoną linią zaznaczono etapy podróży, które ze względu na jednakowe: prędkość statku i metodę jego sterowania, stanowią z punktu widzenia układu regulacji to samo zadanie

czynnikiem jest utrzymanie dopuszczalnej odchyłki od zadanej trajektorii ruchu. Nie jest wymagana tak duża precyzja w manewrowaniu, jak podczas ruchu w porcie. Niezbędne jest natomiast utrzymywanie bezpiecznego marginesu możliwych sterowań na niespodziewane manewry. Obszary takie charakteryzują się dużą ilością różnorodnych przeszkód nawigacyjnych oraz intensywnym ruchem jednostek. Zazwyczaj statek porusza się z prędkością niższą od eksploatacyjnej. Może ona jednak ulegać zmianie, na przykład w celu uniknięcia sytuacji kolizyjnej. Na tym etapie podróży szczególnie odpowiedzialną rolę odgrywa nadrzędny układ nawigacyjny, którego istotnym składnikiem jest system antykolizyjny (rysunek 1.4).

Żegluga przybrzeżna jest etapem podróży pokonywanym z prędkością eksploatacyjną. Regulator stabilizuje wybrany kurs. Statek porusza się po linii łamanej, lecz punkty zwrotu oddalone są znacznie od siebie. Nie minimalizuje się chwilowej wartości odchyłki bocznej, a nawet często się jej nie wyznacza na bieżąco. Natomiast w tym etapie zaznacza się wpływ czynników ekonomicznych na proces sterowania. Ze względu na duży ruch innych jednostek, rola układu antykolizyjnego jest wciąż bardzo duża.

Przechodząc do etapu żeglugi oceanicznej, statek utrzymuje prędkość eksploatacyjną. Wyznaczona trasa jest także linią łamaną, nawet jeśli ma ona charakter ortodromy. Można przyjąć, że w dłuższej perspektywie czasowej, zależnie od prędkości podróży i szerokości geograficznej, statek porusza się stałym kursem. Czynnikami decydującymi stają się parametry ekonomiczne. Na przykład dobowe koszty czarteru jednostki, minimalizacja zużycia paliwa czy ustalony czas podróży. W znacznie większym stopniu uwzględnia się także kwestie środowiskowe jak na przykład obszary złej pogody (rysunek 1.2), sprzyjające lub przeciwnie prądy morskie czy też zalodzenie. Czynnikiem nadrzędnym nad wszystkimi przedstawionymi pozostają decyzje operacyjne

właściciela. Aby umożliwić realizację tych zadań, układ sterowania musi być wyposażony w algorytmy optymalizacji i zarządzania. Zazwyczaj stanowią one jego trzecią, najwyższą warstwę.



Rysunek 1.4. Ogólny schemat układu sterowania ruchem statku

Należy przy tym zauważyć, że etapy podróży przybrzeżnej i oceanicznej z punktu widzenia metody sterowania i utrzymywanej prędkości są tożsame. Zatem nie wymagają osobnych układów regulacji. Proponuje się dla nich wspólną nazwę: „Podróż po wodach otwartych”. Zaznaczono to symbolicznie czerwoną ramką na rysunku 1.3. Możemy więc stwierdzić, że układ sterowania ruchem statku powinien, podczas podróży autonomicznej, pracować w trzech reżymach: sterowania precyzyjnego, które jest bardzo bliskie pozycjonowaniu dynamicznemu, sterowania wzdłuż zadanej trajektorii po wodach ograniczonych, oraz sterowania kursem po wodach otwartych. Przykłady konkretnych technik, które mogą być użyte do realizacji tych zadań, przedstawiono w poprzednim podrozdziale.

Schemat blokowy układu sterowania, który mógłby realizować wszystkie omówione zadania, zilustrowano na rysunku 1.4. Wydzielono w nim wspomniane wcześniej trzy warstwy funkcjonalne: układ regulacji, nadrzędny układ nawigacyjny oraz warstwę zarządzania. Wszystkie one powinny być aktywne w każdym z trzech reżymów sterowania. Jednakże, jak zaznaczono, podczas pływania na akwenu ograniczonym rośnie rola układu nawigacyjnego a na wodach otwartych rola warstwy tworzenia strategii.

W rezultacie, uwagi przedstawione w tym podrozdziale prowadzą do konstatacji, że próba realizacji regulatora z rysunku 1.4 w postaci jednorodnego układu byłaby pomysłem chybnym. Naturalnym rozwiązaniem wydaje się

struktura przełączana o zmiennej funkcjonalności, zależnie od reżimu pływania. Następny podrozdział przedstawia krótki przegląd opublikowanych rozwiązań o takim charakterze w układach sterowania ruchem statku.

1.4. Układy przełączające w sterowaniu ruchem statku

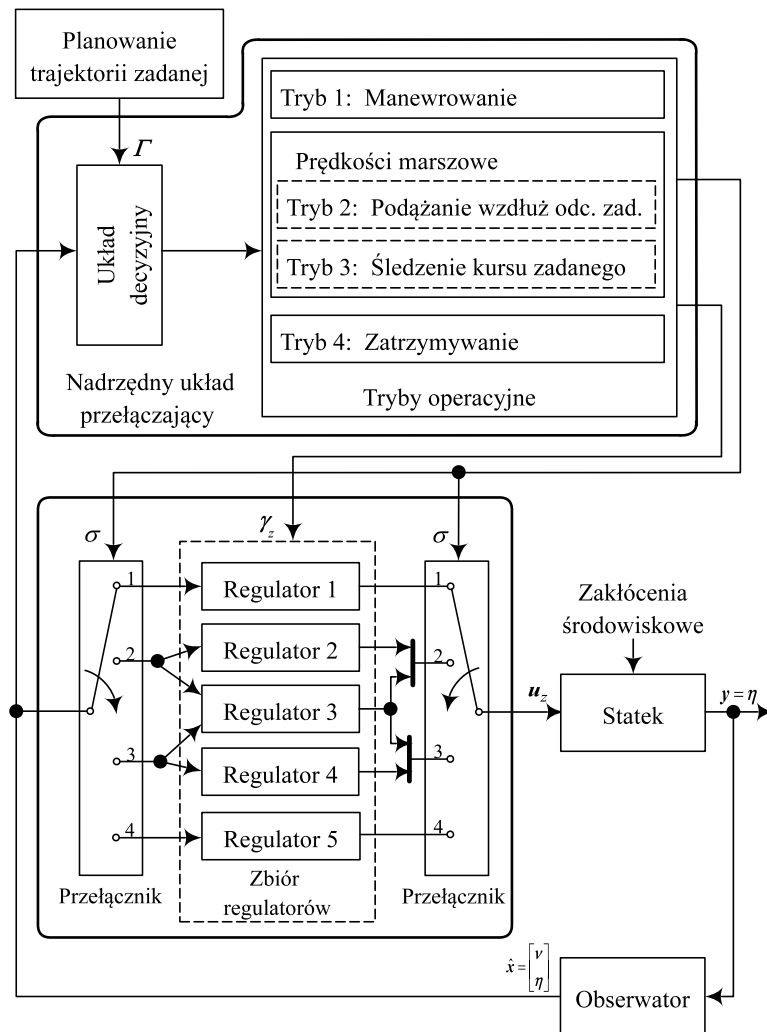
Sterowanie ruchem statku, zwłaszcza w realizacji podróży „od kei do kei”, jest procesem szczególnie przystającym do warunków, w których można efektywnie stosować układy przełączające. Proces ten posiada wiele źródeł nieliniowości i niestacjonarności parametrów, a ponadto charakteryzuje się zmiennym poziomem zakłóceń, często o znacznej amplitudzie. Należy tu wspomnieć w szczególności:

- ◆ zmienne grupy możliwych do użycia urządzeń sterujących w zależności od prędkości postępowej i reżimu pływania,
- ◆ nieliniowość dynamiki kadłuba statku w zależności od zakresów zmian jego kąta kursowego i prędkości postępowej,
- ◆ nieliniowości i nasycenia wszystkich urządzeń sterujących i napędowych,
- ◆ zmienność dynamiki kadłuba w zależności od stopnia załadowania,
- ◆ zmienny poziom zakłóceń falowych, wiatrowych i prądu morskiego,
- ◆ zakłócenia pochodzące od płytkowodzia i niesymetrii opływu kadłuba w sąsiedztwie brzegu (ang. *bank effect*),
- ◆ ograniczenia sterowań dla określonych akwenów wynikające z przepisów bezpieczeństwa.

Czynniki te przyczyniły się do powstania wielu projektów badawczych w dziedzinie sterowania ruchem statku, w których wykorzystywano przełączanie w obrębie układów regulacji. Bańka i in. [17] pokazali układ stabilizacji położenia statku wiertniczego, dla którego zaprojektowano regulatory w przestrzeni stanów. W roli układu tłumiącego gwałtowne skoki sygnałów sterujących zastosowali oni dwuczęściowy układ odsprzęgający. Alessandri i in. [1] przedstawili kompletny układ sterowania okrętem patrolowym, który może pływać w czterech reżymach: stabilizacji ruchu po trajektorii prostoliniowej, regulatora zwrotu, manewrowania na małych prędkościach oraz utrzymywania stałej pozycji i kąta kursowego. Ich wyniki badań nie są pełne ze względu na niejawną naturę ich badań związanych z przemysłem obronnym. Można jednak domniemywać, że zmiany w układzie regulacji odbywają się bez kompensacji składowych przejściowych pochodzących od przełączania.

Podobny projekt opracował Tomera. Cykl jego publikacji sumuje się w monografii [168]. Na rysunku 1.5 przedstawiono strukturę układu sterowania zaimplementowaną w tym projekcie. Analogicznie do rozwiązania Alessandriego, Tomera wyróżnił cztery reżymy operacyjne pływania statku: manewrowanie z małymi prędkościami, zatrzymanie na trajektorii, sterowanie wzdłuż zadanej sekwencji punktów zwrotu i stabilizacja kursu dla prędkości eksploatacyjnych. Wielką zaletą tego projektu jest to, iż opiera się on na wynikach otrzymanych podczas eksperymentów przeprowadzonych w układzie rzeczywistym na statku treningowym *Blue Lady* zbudowanym w skali 1:24 i pływającym po jeziorze Silm. Niestety nie zastosowano w tym układzie mechanizmów przełączania bezuderzeniowego.

Najbardziej zaawansowanym projektem w dziedzinie zastosowania układów przełączających w sterowaniu ruchem statku jest cykl prac zespołu



Rysunek 1.5. Schemat przełączalnego układu sterowania dla statku trenin-gowego *Blue Lady* [168]

badawczego związanego z Norweskim Uniwersytetem Technicznym w Trondheim. Koncentrowały się one na sterowaniu statkiem do zadań *off-shore*. Z natury zadań spełnianych przez takie statki wynika szczególna pozycja systemu pozycjonowania dynamicznego. W pierwszej dekadzie naszego wieku skupiono się właśnie na tym zagadnieniu. Cykl badań najpełniej podsumowuje rozprawa Nguyena [125]. Zaprojektował on układ pozycjonowania dynamicznego, który następnie testowano na modelu statku *off-shore* w skali 1:30, pływającym w basenie. Dodatkowe informacje można znaleźć w artykułach Nguyena i in. [126], [127] oraz Nguyena i Sørensen [124]. Przełączanie w zaprojektowanym układzie pozycjonowania wynikało przede wszystkim z potrzeby dopasowania się do zmiennego stanu morza. Metod przełączania bezuderzeniowego nie stosowano.

Kolejna dekada prac tego zespołu została zilustrowana w rozprawie Brodtkorb [32]. Autorka, bazując na wynikach wcześniejszych prac, rozwinęła technikę estymowania parametrów stanu morza oraz zaproponowała lepsze estymatory stanu dynamiki statku. Inni członkowie zespołu ulepszyli algorytmy sterowania. Rozszerzono także funkcjonalność systemu o tryby pływania po trajektorii i manewrowania z małymi prędkościami [33], [34]. Przeprowadzono badania na modelu statku wiertniczego w skali 1:90, jak

również na rzeczywistym statku badawczym *R/V Gunnerus*. W układzie sterowania nie stosowano opisywanych wyżej metod przełączania bezuderzeniowego, a w celu uniknięcia skokowych zmian sygnałów sterujących, interpolowano je w stanach przejściowych odpowiednio dobranymi funkcjami wagowymi.

Oprócz wspomnianych w tym przeglądzie projektów dotyczących układów przełączających w okrętowych układach sterowania istnieją jeszcze publikacje dotyczące przełączania w sterowaniu jednostek typu AUV i ASV, układów stabilizacji przechyłów bocznych statku i sterowania jego napędem głównym. Pominęto je, ponieważ nie przystają do tematyki niniejszej pracy skupionej na procesie podróży „od kei do kei” statku towarowego.

1.4.1. Idea przełączania bezuderzeniowego

Wspomniany wyżej proces przełączania wprowadza silną nieliniowość do pętli sterowania [37]. Jest to bardzo kłopotliwe i często niebezpieczne zjawisko. W praktycznej realizacji układów regulacji może ono wymusić działanie pewnych części lub całości układu na krańcowych, dopuszczalnych poziomach sygnałów i/lub krańcowych wartościach ich pochodnych. Zazwyczaj prowadzi to do znaczącego pogorszenia jakości sterowania. Może także naruszyć zabezpieczenia i doprowadzić do utraty stabilności i zniszczenia układu. Techniki niwelowania niepożądanych skutków tych procesów przejściowych określa się właśnie jako „przełączanie bezuderzeniowe”, które w dalszych częściach pracy określane będzie skrótowo PBU⁴.

Ideę stojącą za wszystkimi technikami przełączania bezuderzeniowego można zilustrować na przykładzie przedstawionym w przeglądowej publikacji Graebe’go i Ahlena [64].

Przyjmijmy założenie, że pewien liniowy układ dynamiczny, na przykład przestrajany filtr, jest zaimplementowany na tym samym komputerze co algorytm przełączania, i że pierwotny sygnał wyjściowy tego filtru miał wartość u_1 zaś sam filtr po przestrojeniu jest opisany równaniami stanu

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}e(t) \\ u_2(t) &= \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}e(t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Przełączenie bezuderzeniowe w pewnej chwili t_s oznacza, że

$$u_2(t_s) \approx u_1(t_s) \quad (1.2)$$

oraz

$$\left. \frac{d^k u_2(t)}{dt^k} \right|_{t=t_s} \approx \left. \frac{d^k u_1(t)}{dt^k} \right|_{t=t_s} \quad k = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

dla najwyższego możliwego stopnia pochodnej n . Prowadzi to nie tylko do minimalizacji nieciągłości sygnału, lecz także do możliwie gładkich zmian jego pochodnych.

⁴ W literaturze przedmiotu używane są powszechnie, również w publikacjach nie angielskich, angielskie akronimy: BT – *Bumpless Transfer* i AWBT – *Anti-Windup and Bumpless Transfer*.

Podstawiając zależności 1.1 i 1.2 do równania 1.3 otrzymuje się dla czasu $t = t_s$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}e \\
 \frac{du_1}{dt} &= \mathbf{C}Ax + \mathbf{C}Be + \mathbf{D}\frac{de}{dt} \\
 \frac{d^2u_1}{dt^2} &= \mathbf{C}A^2x + \mathbf{C}ABe + \mathbf{C}B\frac{de}{dt} + \mathbf{D}\frac{d^2e}{dt^2} \\
 &\vdots \\
 \frac{d^{n-1}u_1}{dt^{n-1}} &= \mathbf{C}A^{n-1}x + \mathbf{C}A^{n-2}\mathbf{B}e + \dots + \mathbf{C}B\frac{d^{n-2}e}{dt^{n-2}} + \mathbf{D}\frac{d^{n-1}e}{dt^{n-1}}.
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

Zakładając, że system dany równaniami 1.1 jest obserwowalny i jego wektor stanu x ma wymiar n , wówczas macierz obserwowalności Kalmana jest niesingularna i ma postać

$$\mathcal{O} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}A \\ \mathbf{C}A^2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}A^{n-1} \end{bmatrix}. \tag{1.5}$$

Zatem wektor

$$\begin{aligned}
 x = \mathcal{O}^{-1} &\left\{ \begin{bmatrix} u_1 \\ \frac{du_1}{dt} \\ \frac{d^2u_1}{dt^2} \\ \vdots \\ \frac{d^{n-1}u_1}{dt^{n-1}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{C}B \\ \mathbf{C}AB \\ \vdots \\ \mathbf{C}A^{n-2}\mathbf{B} \end{bmatrix} e - \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{D} \\ \mathbf{C}B \\ \vdots \\ \mathbf{C}A^{n-3}\mathbf{B} \end{bmatrix} \frac{de}{dt} \right. \\
 &\left. - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{D} \\ \mathbf{C}B \\ \vdots \\ \mathbf{C}A^{n-4}\mathbf{B} \end{bmatrix} \frac{d^2e}{dt^2} - \dots - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \mathbf{D} \end{bmatrix} \frac{d^{n-1}e}{dt^{n-1}} \right\} \tag{1.6}
 \end{aligned}$$

jednoznacznie określa stan x , dzięki któremu $(n-1)$ pochodnych sygnałów wyjściowych strojonego filtru dopasowuje się do odpowiednich pochodnych sygnałów wyjściowych układu odniesienia. Niestety równość ta nie pozwala na wyznaczanie pożądanego stanu w rzeczywistych aplikacjach, gdyż wymaga znajomości $(n-1)$ pochodnych dla u_1 oraz e . Wielkości te, a szczególnie uchyb e ze swojej natury jest obciążony bardzo dużym poziomem szumów. W standardowym podejściu aproksymuje się zatem jego wartość za pomocą filtru pasmowego:

$$\frac{d^k e}{dt^k} \approx \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s^k}{e_m s^m + \dots + e_1 s + 1} E(s) \right\} \tag{1.7}$$

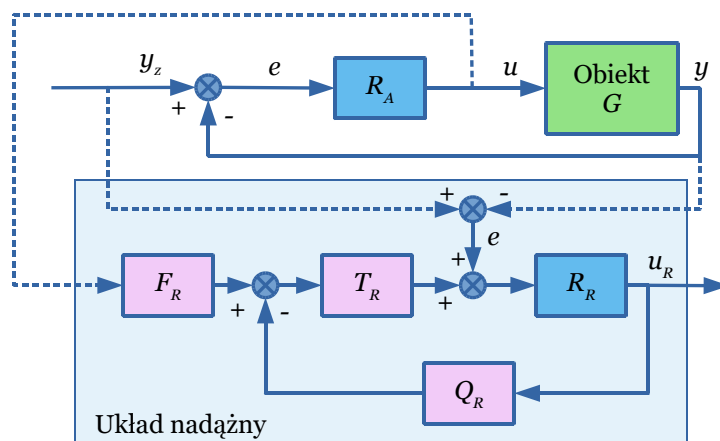
gdzie $E(s)$ oznacza transformatę Laplace'a uchybu a $[e_m s^m + \dots + e_1 s + 1]$, $m \geq n-1$ jest wielomianem obserwatora, którego rząd i bieguny dopasowuje się do aktualnego poziomu szumu. Podejście to nadal będzie wrażliwe

na szumy pomiarowe, zwłaszcza dla wyższych pochodnych dlatego też, mimo swej atrakcyjności, może mieć zastosowanie co najwyżej w układach niskich rzędów.

Prostota rozwiązania przedstawianego przez równanie 1.6 dobrze wyjaśnia istotę przełączania bezuderzeniowego jako procesu sterowania stanem pewnego układu dynamicznego tak, aby jego wyjścia były w pożądanym stopniu dopasowane do wyjść układu, z którym następuje przełączenie. W gruncie rzeczy, równania 1.6 i 1.7 można interpretować jako prosty obserwator odtwarzający przybliżony stan systemu poprzez różniczkowanie jego wyjść. W układach rzeczywistych niezbędne byłyby jednak bardziej złożone obserwatory, a szczególnie takie, które w znacznie większym stopniu są odporne na zakłócenia. Kolejną słabością przedstawionego rozwiązania są przesunięcia fazowe i ograniczenia pasma sygnałów wprowadzane przez filtr przybliżający wartości pochodnych, opisany równaniem 1.7. Istotnym zagadnieniem jest także możliwość estymowania zmiennych stanu regulatora, których w wielu układach rzeczywistych nie można uzyskać. Stąd istnieją techniki nie tyle usuwania, ile ograniczania skutków przełączania, najczęściej na drodze stosowania dodatkowych bloków dynamicznych i sprzężeń w układzie regulacji.

1.4.2. Metoda śledzenia sygnałów wyjściowych regulatora aktywnego

W jaki sposób można zatem rozwiązać kwestię przełączania pomiędzy regulatorem aktywnym a rezerwowym w klasycznym układzie ze sprzężeniem zwrotnym? Jedną z narzucających się niejako technik utrzymania wartości sygnałów wyjściowych regulatora rezerwowego blisko wartości wyjściowych regulatora aktywnego, jest zastosowanie metod znanych z teorii sterowania. Można przedstawić ten przypadek jako zadanie zaprojektowania układu regulacji, jak na rysunku 1.6, w którym sygnał u_R będzie nadsyłał za sygnałem u . Dla zachowania przejrzystości przykładu rysunek ten przedstawia układ SISO, lecz całość opisu można bardzo łatwo rozszerzyć do układu wielowymiarowego.



Rysunek 1.6. Schemat układu śledzenia sygnału sterującego

Aktywny regulator R_A steruje obiektem G według klasycznej reguły

$$y = \frac{R_A G}{1 + R_A G} y_z, \quad (1.8)$$

natomiast dodatkowe bloki i sprzężenia tworzą układ o dwóch stopniach swobody, w którym

$$u_R = \frac{F_R T_R R_R}{1 + T_R R_R Q_R} u + \frac{R_R}{1 + T_R R_R Q_R} (y_z - y). \quad (1.9)$$

Zatem sygnał wyjściowy regulatora rezerwowego u_R jest formowany tak, aby nadążał za wartością wyjściową bloku F_R , czyli za filtrowanym sygnałem u sterującym obiektem G . Sygnał uchybu regulacji $e = y_z - y$ układu aktywnego 1.8 stanowi zakłócenie na wejściu „obiekta” w układzie nadążnym. Wobec tego, chcąc uzyskać warunki przełączenia bezuderzeniowego, projektant musi tak dobrać parametry F_R , T_R i Q_R , aby warunek $u_R - u \approx 0$ był osiągalny niezależnie od zakłócenia e . W aplikacjach rzeczywistych rozwiązanie, w którym $F_R = Q_R = 1$, jest często wystarczające. Wówczas układ nadążny ma jeden stopień swobody i projektant określa wyłącznie dynamikę bloku T_R .

Aby zachować czytelność, na rysunku 1.6 nie zaznaczono przełączników oraz bloku nadzorującego przełączanie. W przypadku układu, który miałby przełączać regulatory R_A i R_R w obie strony, a tak dzieje się praktycznie we wszystkich rzeczywistych aplikacjach, niezbędny jest także drugi, symetryczny układ nadążny, w którym bloki R_A i R_R pełnią przeciwne role. Rozwiązanie takie przedstawiono w podrozdziale 3.2. W konfiguracji z większą liczbą przełączanych regulatorów prowadzi to do istotnej wady, gdyż sieć pętli nadążnych w znacznym stopniu komplikuje strukturę całości układu regulacji oraz może wymagać dużych mocy obliczeniowych, a to generuje wysokie koszty aplikacji. Należy też pamiętać, że częstotliwość przełączeń pomiędzy regulatorami jest ograniczona czasami zanikania procesów przejściowych w pętlach układów nadążnych.

Z drugiej strony, metoda śledzenia sygnałów wyjściowych regulatora aktywnego ma istotne zalety. Przede wszystkim nie narzuca ona ograniczeń na wewnętrzną konstrukcję regulatorów składowych. Można, na przykład, za jej pomocą przełączać w układzie sygnały zadane do urządzeń wykonawczych pomiędzy regulatorem cyfrowym i analogowym. Przełączanie odbywa się wyłącznie na podstawie wartości: zadanej, regulowanej oraz sterującej, mierzonych w układzie aktywnym. Sygnały te są zazwyczaj dostępne w każdym systemie sterowania.

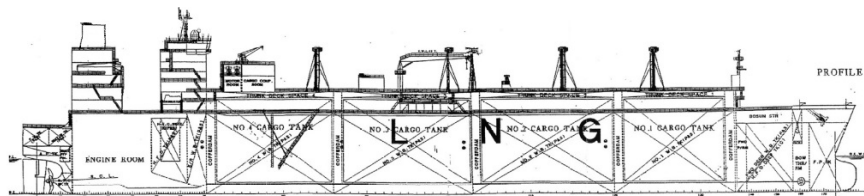
Zalety te znalazły wyraz w publikacjach, które przedstawiają zastosowania nadążnych układów PBU. Na przykład Graebe i Ahlen w artykule [65] opisali przełączanie w układzie regulacji poziomu płynnej stali w formie odlewniczej dla systemu SISO. Iriondo i in. zademonstrowali przykłady implementacji omawianej metody w rzeczywistym sterowniku PLC. W jednej z aplikacji był to układ stabilizacji poziomu cieczy w układzie trzech zbiorników [74], a w drugiej układ regulacji temperatury i poziomu cieczy w pojedynczym zbiorniku [75]. Nie są natomiast znane autorowi zastosowania tej metody w realizacji układów sterowania ruchem statku.

2. Obiekt sterowania i układ pomiarowo-kontrolny

W niniejszym rozdziale przedstawiono obiekt oraz środki techniczne, których użyto podczas prowadzenia badań. Skupiono się szczególnie na opisie modelu statku oraz jego wyposażenia. Model ten, jeden z kilku wykorzystywanych w Ośrodku Manewrowania Statkami Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie-Kamionce, służy do szkolenia nawigatorów zgodnie z zaleceniami konwencji IMO STCW Code (Annex Chapter II) [82]. Jednocześnie modele te stanowią unikalne w skali światowej środowisko badań nad układami sterowania ruchem statku. Asumpt do takiego twierdzenia daje fakt, iż z jednej strony, eksperymentów z użyciem rzeczywistych statków towarowych, ze względu na przepisy bezpieczeństwa i olbrzymie koszty, nie wykonuje się. Z drugiej strony, modele izomorficzne, na których testuje się zazwyczaj układy sterowania, budowane są z reguły w zakresie skal od 1:50 do 1:100, a to wyraźnie pogarsza warunki przybliżania zjawisk występujących podczas ruchu rzeczywistego statku.

2.1. Izomorficzny model statku morskiego

Wszystkie elementy badanego systemu sterowania były projektowane i testowane dla obiektu, jakim jest izomorficzny model gazowca LNG zbudowany w skali 1:24 o nazwie *Dorchester Lady*. Został on zbudowany z zachowaniem praw podobieństwa geometrycznego i kinematycznego. W przypadku podobieństwa dynamicznego zachowano stałość liczby Frouda, natomiast nie została zachowana liczba Reynoldsa, gdyż zarówno statek rzeczywisty i model poruszają się w środowisku o tej samej gęstości – w wodzie. Mimo to, przy odpowiednim doborze układu napędowego, model z bardzo dobrym przybliżeniem odwzorowuje właściwości kinematyczne i dynamiczne pełnowymiarowego gazowca.



Rysunek 2.1. Plan boczny gazowca LNG 140 000 m³, pierwowzoru modelu *Dorchester Lady* [57]

Rysunek 2.1 przedstawia plan boczny oryginalnego gazowca LNG, który był podstawą opracowania konstrukcji modelu izomorficznego [57].

Zdjęcie na ilustracji 2.2 prezentuje sylwetkę modelu na jeziorze Silm, natomiast w tabeli 2.1 zestawiono jego podstawowe parametry oraz analogiczne wartości dla odpowiadającego mu statku pełnomorskiego.



Rysunek 2.2. Fotografia modelu *Dorchester Lady* podczas prób na jeziorze Silm w Iławie-Kamionce

Napęd główny *Dorchester Lady* stanowią dwa jednośrubowe, ciągnące pędniki gondolowe umieszczone na rufie¹. Dodatkowo statek wyposażony jest w części dziobowej w dwa stery strumieniowe: tunelowy i obrotowy, przy czym ten drugi pełni rolę symulatora holownika. Oznacza to, że jego stałe czasowe zostały tak dobrane, aby odpowiadały czasom przejścia holownika z burty na burtę przed dziobem statku oraz naprężania i luzowania holu. Urządzenia te opisano w sekcji 2.2.2.

Tabela 2.1. Podstawowe parametry modelu *Dorchester Lady* i rzeczywistego gazowca LNG 140 000 m³ [82]

Parametr	<i>Dorchester Lady</i>	Statek rzeczywisty
Wyporność całkowita D [T]	8,21	113 500
Długość L [m]	11,55	277,2
Szerokość B [m]	1,8	43,2
Zanurzenie T [m]	0,5	12,0
Współczynnik pełnotliwości C_B [-]	0,78	0,78
Prędkość maksymalna U^{max} [kn]	4,1	20,1

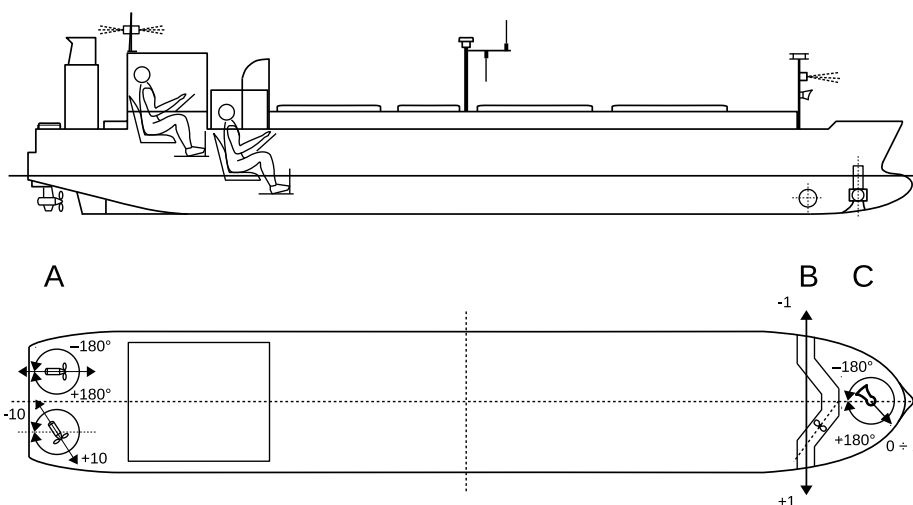
Podstawowym urządzeniem do pomiaru pozycji i prędkości modelu jest odbiornik GPS, pracujący w trybie RTK². Składowa wzdłużna prędkości po wodzie jest mierzona także za pomocą logu mechaniczno-elektrycznego, lecz nie jest on przystosowany do współpracy z układem sterowania automatycznego. Kurs statku mierzony jest za pomocą żyrokompasu, a pomiar kierunku i prędkości wiatru pozornego za pomocą anemometru ultradźwiękowego. Na

¹ W ścisłym sensie są to pędniki azymutalne, jako że, ze względu na konieczność zachowania skali, szczególnie wymiarów gondoli, elektryczny napęd śruby umieszczony jest w kadłubie a w gondoli jedynie przekładnia. Biorąc jednak pod uwagę ich konstrukcję i właściwości hydromechaniczne można je sklasyfikować jako klasyczne napędy gondolowe (patrz: porównanie na rysunku 2.12).

² Tryb RTK (ang. *Real Time Kinematic*) pozwala, na podstawie informacji przekazywanych drogą radiową ze stacji referencyjnej, na precyzyjne określanie pozycji anteny GPS dla obiektu w ruchu w czasie rzeczywistym. Unika się czasochłonnego etapu *post-processingu*. Stosuje się wówczas filtrację Kalmana lub algorytm LAMBDA [68].

jeziorze Silm działa także radiowy system przekazywania wzajemnej informacji o ruchu modeli naśladujący AIS. Wszystkie wymienione urządzenia nawigacyjne przedstawiono w sekcji 2.2.1.

Model *Dorchester Lady* jest przystosowany do wymiany części rufowej. Kadłub jednostki może być rozdzielony na wysokości grodzi pomiędzy kabinami obu operatorów. W trakcie kursów szkoleniowych prowadzonych w Ośrodku Manewrowania Statkami wykorzystuje się również model w konfiguracji z rufą wyposażoną w napęd z jedną śrubą o stałym skoku i ster płetwowy. Istnieje też możliwość rekonfiguracji rufy z napędami gondolowymi do układu dwóch śrub stałych i dwóch płetw sterowych. Kursanci mają wówczas unikalną możliwość porównania właściwości tego samego statku z trzema różnymi układami napędu.

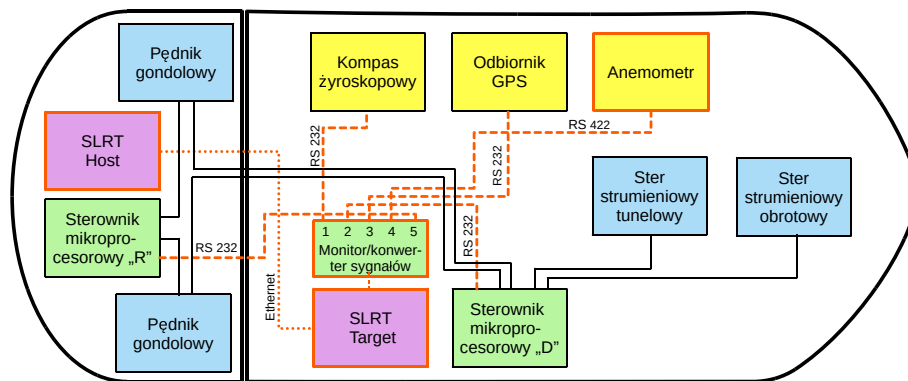


Rysunek 2.3. Sylwetka izomorficznego modelu gazowca LNG *Dorchester Lady*. Na rzucie poziomym zaznaczono położenie poszczególnych pędników oraz zakresy ich wartości zadanych: A – rufowe pędniki gondolowe; B – tunelowy ster strumieniowy; C – ster strumieniowy obrotowy

W istocie, jak można zauważyć na rysunku 2.1, dla prototypu pełnowymiarowego gazowca LNG był projektowany klasyczny napęd jednośrubowy. Model w takiej konfiguracji nie był obiektem badań w niniejszej pracy. Miało to jednakże wpływ na specyficzną konfigurację lokalnych sterowników urządzeń wykonawczych *Dorchester Lady*, co przedstawiono w sekcji 2.2.3.

2.2. Oprzyrządowanie układu pomiarowo-kontrolnego

Układ pomiarowo-kontrolny wykorzystywany w trakcie badań jest rozszerzoną wersją układu sterowania ręcznego modelu zbudowanego z myślą o realizacji kursów szkoleniowych. Jego schemat blokowy prezentuje rysunek 2.4. Przedstawia on konfigurację wykorzystywaną do sterowania automatycznego. Elementy używane wyłącznie podczas sterowania ręcznego, niewłączone do części wspólnej, pominięto dla zachowania czytelności schematu. Bloki i połączenia zaznaczone czarnymi liniami oznaczają tę część układu, która jest zamontowana na stałe i wykorzystywana jest w obu reżymach eksploatacji modelu. Bloki urządzeń instalowanych dodatkowo oraz dodatkowe połączenia sygnałowe oznaczone są liniami koloru czerwonego.



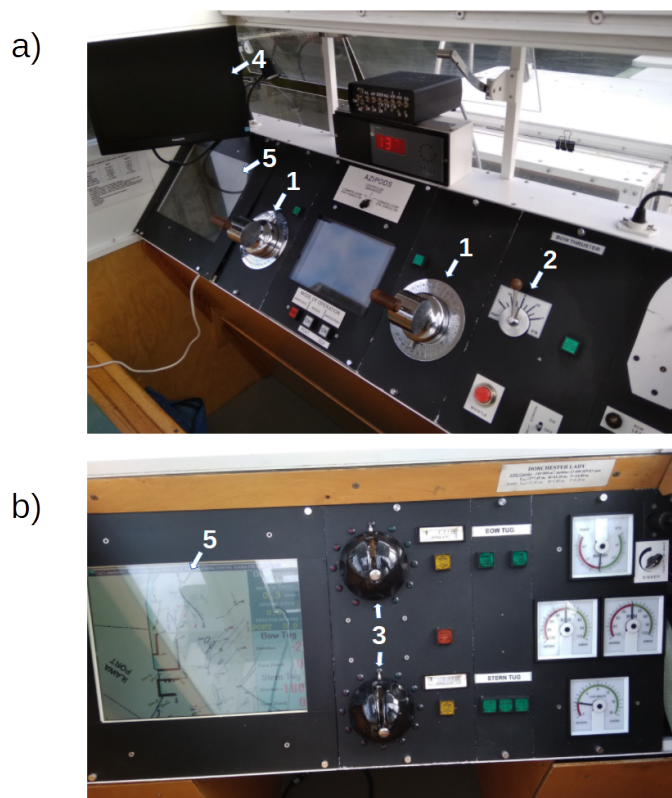
Rysunek 2.4. Schemat blokowy układu pomiarowo-kontrolnego. Kolorem żółtym oznaczono urządzenia nawigacyjne, niebieskim – pędniki, zielonym – dedykowane sterowniki mikroprocesorowe, a purpurowym – komputery PC będące platformą dla układu sterowania w środowisku *Simulink Real-Time Target*. Linie kreskowane oznaczają łącza szeregowo RS, linia kropkowa – łącza Ethernet, a linie ciągłe – stałe połączenia analogowe. Czerwonymi liniami wyróżniono te elementy, które stanowią rozszerzenie względem układu sterowania ręcznego, używanego podczas szkoleń

Efektom budowy modelu z wymienną rufą jest obecność w układzie dwóch lokalnych sterowników mikroprocesorowych. Oznaczone są one na rysunku 2.4 kolorem zielonym. Sterownik „D” (dziobowy) obsługuje oba stery strumieniowe oraz sygnały zadanych i rzeczywistych prędkości obrotowych śrub pędników głównych. Sterownik „R” (rufowy) kontroluje wyłącznie kąty obrotu obydwu gondol. Podział ten umożliwia wspomnianą wcześniej rekonfigurację napędu do dwóch śrub stałych z dwoma sterami płetwowymi za pomocą dodatkowego modułu montowanego na rufie. Natomiast, po wymianie całości rufy, sterownik „D” kontroluje zarówno prędkość obrotową pojedynczej śruby, jak i kąt wychylenia płetwy sterowej.

Dodatkowy sterownik mikroprocesorowy oznaczony kolorem zielonym, opisany jako monitor/konwerter jest urządzeniem zbudowanym na potrzeby układu pomiarowo-kontrolnego. Służy on do diagnostyki parametrów i treści komunikacji szeregowo. Poszczególne komunikaty mogą być monitorowane na lokalnym wyświetlaczu. Jeśli zachodzi taka potrzeba, sterownik ten może również konwertować wybrane kanały połączeń pomiędzy standardami RS 232 a RS 422.

Rysunek 2.5 przedstawia widok pulpitów sterowniczych, odpowiednio nawigatora oraz „szypra” operującego sterami obrotowymi symulującymi działanie holowników³. W trakcie badań nie rejestrowano parametrów ruchu statku podczas sterowania ręcznego z wyjątkiem prób identyfikacji dynamiki modelu. Tryb ten stosowano również w trakcie dojazdów i powrotów z akwenów testowych oraz w sytuacjach awaryjnych.

³ Nastawnik holownika (steru obrotowego) rufowego umieszczony w dolnej części pulpitu ma zastosowanie wyłącznie, kiedy model jest wyposażony w rufę z napędem jednośrubowym. Rufowy ster strumieniowy obrotowy jest jej stałym elementem. Kompensuje on znacznie słabsze możliwości wytwarzania składowych sił poprzecznych do diametralnej kadłuba w stosunku do rufy wyposażonej w pędniki gondolowe.



Rysunek 2.5. Fotografie pulpitów sterowania ręcznego modelu *Dorchester Lady*: **a)** – Stanowisko nawigatora; widoczne nastawniki obu pędników gondolowych (1) i dźwignia dziobowego steru strumieniowego (2), w lewym, górnym rogu dodatkowy monitor komputera *SLRT Target* (4); **b)** – Pulpit operatora holowników z ich nastawnikami (3); Oba operatorzy mają do dyspozycji ekran symulatora mapy elektronicznej ECDIS (5)

Poszczególne grupy urządzeń, wyróżnione na rysunku 2.4 kolorami, przedstawione są kolejnych częściach niniejszego rozdziału.

2.2.1. Urządzenia nawigacyjne

Model, jakim jest *Dorchester Lady*, nie może być wyposażony we wszystkie urządzenia nawigacyjne, które instalowane są na odpowiadającym mu statku morskim. Przykładem oczywistym jest choćby radar. Mimo to oprzyrządowanie modelu pozwala kursantowi na podejmowanie decyzji manewrowych na podstawie analogicznych informacji nawigacyjnych jak na pełnowymiarowym statku. Poniższe sekcje przedstawiają to wyposażenie.

Odbiornik GPS

Zasadniczą różnicą pomiędzy odbiornikiem systemu GPS zamontowanym na pełnomorskim statku a odbiornikiem na opisywanym modelu jest konieczność zwiększenia dokładności określania pozycji ze względu na różnicę skali obu jednostek. Dlatego też w Ośrodku Manewrowania Statkami umiejscowiono stację referencyjną GPS, a odbiorniki na modelach pracują w trybie RTK, który zapewnia dokładność określania pozycji rzędu 1...3 centymetrów [68].

Urządzenie zastosowane na *Dorchester Lady* to odbiornik Leica System 1200. Ze względu na swoje cechy jest on używany głównie do pomiarów



Rysunek 2.6. Fotografia anteny systemu GPS zainstalowanej na *Dorchester Lady*

geodezyjnych. Jego podstawowe parametry zebrano w tabeli 2.2. Pozostałe dane można znaleźć w broszurze [93].

Tabela 2.2. Wybrane parametry odbiornika Leica GPS System 1200

Parametr	Wartość
Typ odbiornika	Dwuczęstotliwościowy, geodezyjny RTK
Liczba kanałów	12 L1 + 12 L2
Dokładność (RMS) kinematycznego pomiaru w trybie RTK po inicjalizacji	Pozioma: 10 mm + 1 ppm Pionowa: 20 mm + 1 ppm
Czas akwizycji	Zwykle 30 s
Napięcie zasilania	12 V _{DC} (10,5...28 V _{DC})
Temperatura pracy	-40...60°C

Rysunek 2.6 przedstawia zdjęcie anteny odbiornika GPS zainstalowanej na modelu. Umieścił ją na maszcie nad geometrycznym środkiem kadłuba (patrz: rysunek 2.3), który z dobrym przybliżeniem odpowiada położeniu jego środka ciężkości. Dzięki temu minimalizuje się błąd określania pozycji związany z masyżowaniem statku.

Odbiornik GPS przesyła dane do systemu pomiarowo-kontrolnego za pomocą złącza RS 232 (patrz: rysunek 2.4) w standardzie NMEA-0183. Format tego komunikatu przedstawiono w ramce poniżej. Składa się on z szeregu pól oddzielonych przecinkami. Zawartość poszczególnych pól opisano w tabeli 2.3 [93].

```

$-LLQ,hhmmss.ss,mmddyy,eeeeee.eee,M,nnnnnn.nnn,M,
x,xx,x.x,x.x,M*hh<CR><LF>
```

Dodatkowo odbiornik ten połączony jest łączem radiowym ze wspomnianą lokalną stacją referencyjną dostarczającą danych dla technologii

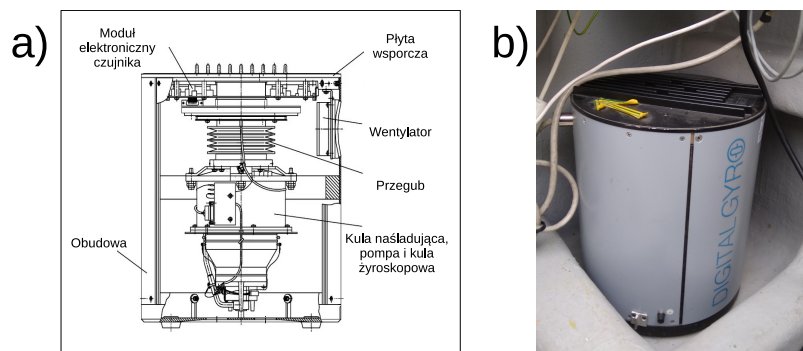
Tabela 2.3. Format komunikatu NMEA-0183 LLQ *Leica Local Position and Quality*

Indeks	Wartość	Opis
0	\$ – LLQ	Znacznik komunikatu
1	hhmmss.ss	Czas UTC
2	mmddy	Data UTC
3	eeeeee.eee	Pozycja - East [m]
4	M	Metr – stały tekst
5	nnnnnn.nnn	Pozycja - North [m]
6	M	Metr – stały tekst
7	x	Jakość pozycji: 0 = not valid, 1 = GPS Nav Fix, 2 = DGPS Fix, 3 = RTK Fix
8	xx	Liczba satelitów uwzględniona przy obliczaniu pozycji
9	x.x	Dokładność pozycji [m]
10	x.x	Wysokość nad poziomem morza [m]
11	M	Metr – stały tekst
12	*hh	Suma kontrolna
13	<CR><LF>	Znaki powrotu karetki i nowej linii

RTK. Łącze to zestawione jest za pomocą modemów SATELLINE-2ASxE na częstotliwości 449,7875 MHz.

Kompas żyroskopowy

Do pomiaru kąta kursowego oraz prędkości kątowej modelu służy kompas Anschütz STANDARD 20. Jego wybrane parametry przedstawiono w tabeli 2.4. Mimo że model ten nie jest już produkowany⁴, wciąż jest powszechnie używany na jednostkach morskich ze względu na jego liczne zalety, a zwłaszcza niezawodność i wytrzymałość.



Rysunek 2.7. Kompas żyroskopowy Anschütz STANDARD 20: a) – schemat konstrukcji [145], b) – fotografia kompasu zainstalowanego na modelu

Jest to kompas o klasycznej konstrukcji z dwużyroskopową kulą pływającą w kuli naśladowującej wypełnionej płynem. Całość zawieszona jest na przegubie Cardana w obudowie na płycie wsporczej zwanej „stolikiem”. Rysunek 2.7 przedstawia schemat konstrukcji i widok kompasu umieszczonego na

⁴ Firma Raytheon Anschütz oferuje obecnie jego następcę: kompas Anschütz STANDARD 22.

Dorchester Lady. Parametry techniczne urządzenia przedstawione w tabeli 2.4, a szczególnie wartości uchybów: statycznego i dynamicznego, wskazują, że jest on wystarczająco dobrym źródłem informacji o kącie kursowym modelu.

Tabela 2.4. Wybrane parametry kompasu żyroskopowego Anschütz STANDARD 20 [145]

Parametr	Wartość	Jednostka
Napięcie zasilania	24 (18...36)	[V _{DC}]
Zakres temp. pracy	-10...55	[°C]
Czas ustalania	3	[h]
Uchyb statyczny	$\leq \pm 0,1 * sec(Lat)$ ¹ RMS	[°]
Uchyb dynamiczny ²	$\leq \pm 0,4 * sec(Lat)$	[°]
Dop. prędkość ką. kuli naśladowującej	70	[°/s]
Dop. przysp. ką. kuli naśladowującej	150	[°/s ²]
Dop. przechyły boczne i wzdłużne	± 45	[°]

¹ $sec(Lat)$ oznacza funkcję secans szerokości geograficznej aktualnego położenia kompasu.

² Przy zachowaniu dopuszczalnych wartości okresowych kołysań bocznych i wzdłużnych oraz prędkości kątowej.

Kompas żyroskopowy przesyła dane do sytemu pomiarowo-kontrolnego za pomocą łącza RS 232C (patrz: rysunek 2.4) w standardzie NMEA-0183. Nadawane są dwa komunikaty: o kącie kursowym statku (HDT) i jego prędkości kątowej (ROT). Ich formaty podane są w ramce poniżej.

```

$-HDT,xxx.xxx,T*hh<CR><LF>
$-ROT,xxx.x,A*hh<CR><LF>
```

Wyjaśnienia znaczenia kolejnych pól komunikatów znajdują się odpowiednio w tabelach 2.5 oraz 2.6.

Tabela 2.5. Format komunikatu NMEA-0183 HDT *Heading from True North*

Indeks	Wartość	Opis
0	\$-HDT	Znacznik komunikatu
1	xxx.xxx	Kąt kursowy [°]
2	T	Stały tekst (<i>True North</i>)
3	*hh	Suma kontrolna
4	<CR><LF>	Znaki powrotu karetki i nowej linii

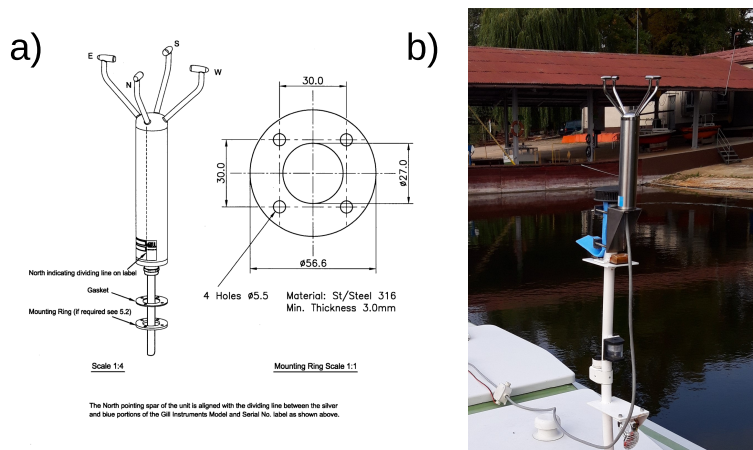
Anemometr

Specyfiką zakłóceń środowiskowych na jeziorze Silm jest to, że ze względu na kształt i wymiary tego akwenu (patrz: podrozdział 2.3), fala jest krótka i wyjątkowo rzadko osiąga wysokość, która powoduje odczuwalne kołysania modeli. Z drugiej strony, nawet niewielkie podmuchy wiatru mają duży wpływ na ruch statku o dużej powierzchni nadwodnej części kadłuba, do

Tabela 2.6. Format komunikatu NMEA-0183 ROT *Rate of Turn*

Indeks	Wartość	Opis
0	\$-ROT	Znacznik komunikatu
1	xxx.x	Prędkość kątowna [°/min] „-” oznacza ruch dziobu w lewo
2	A	A: dane poprawne, V: dane błędne
3	*hh	Suma kontrolna
4	<CR><LF>	Znaki powrotu karetki i nowej linii

których zalicza się także *Dorchester Lady*. Zgodnie z prawami zachowania podobieństwa, aby prędkość wiatru oddziałującego na model odpowiadała prędkości wiatru działającego na statek rzeczywisty, powinna być pomnożona przez pierwiastek z geometrycznej skali modelu. Stąd niewielki podmuch wiatru na jeziorze, rzędu 2 m/s odpowiada silnej bryzie o prędkości prawie 10 m/s (5° w skali Beauforta) dla statku pełnomorskiego.



Rysunek 2.8. Anemometr ultradźwiękowy Gill WindObserver II: a) – rysunek montażowy [62]; b) – widok anemometru zainstalowanego na maszcie *Dorchester Lady*

Zatem, aby poprawnie ocenić wpływ zakłóceń wiatrowych na proces sterowania, istnieje potrzeba dokładnego i szybkiego pomiaru kierunku i prędkości wiatru na jeziorze. Dlatego też przeciętnej jakości wiatromierz używany na modelu podczas kursów manewrowych zastąpiono precyzyjnym anemometrem ultradźwiękowym Gill WindObserver II. Rysunek 2.8 prezentuje fotografię tego urządzenia zamontowanego na dziobowym maszcie *Dorchester Lady*. Jego podstawowe parametry zawarto w tabeli 2.7.

Anemometr może przysyłać dane łączem analogowym lub cyfrowym. W omawianym przypadku zastosowano łącze cyfrowe RS 422. Transmisja danych odbywała się komunikatami w formacie *ASCII Polar* [62], których składnię przedstawiono w ramce poniżej.

<STX>A, kkk, ppp. pp, M, ddd. dd, +ttt. tt, 00, <ETX>hh

Znaczenie poszczególnych pól wyjaśniono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Wybrane parametry anemometru Gill WindObserver II [62]

Parametr	Wartość	Jednostka
Prędkość wiatru:		
<i>Zakres</i>	0...65	[m/s]
<i>Dokładność</i>	±2 (@ 12m/s)	[%]
<i>Rozdzielczość</i>	0,01	[m/s]
<i>Offset</i>	±0,01	[m/s]
Kierunek wiatru:		
<i>Zakres</i>	0...359	[°]
<i>Dokładność</i>	±2	[°]
<i>Rozdzielczość</i>	1	[°]
Próg zadziałania	0,01	[m/s]
Zasilanie	12 (9...30)	[V _{DC}]

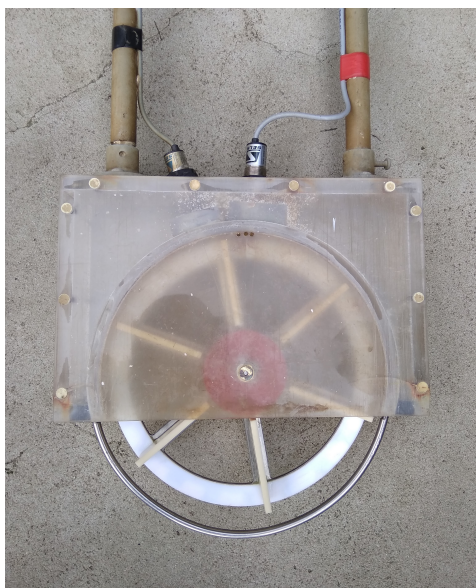
Tabela 2.8. Format komunikatu *ASCII Polar*

Indeks	Wartość	Opis
0	<STX>	Początek treści komunikatu
1	A .. Z	Identyfikator urządzenia
2	kkk	Kierunek wiatru [°]
3	ppp.pp	Prędkość wiatru [m/s]
4	M	Jednostki – m/s
5	ddd.dd	Prędkość dźwięku [m/s]
6	±ttt.tt	Temperatura powietrza [°C]
7	00	Status: 00 – OK lub kod błędu
8	<ETX>	Koniec treści komunikatu
8	hh	Suma kontrolna

Log

Składowa wzdłużna prędkości modelu po wodzie mierzona jest za pomocą łopatkowego logu mechaniczno-elektrycznego. Konstrukcję jego elementu pomiarowego ilustruje fotografia na rysunku 2.9. Element ten umieszczony jest w przeznaczony do tego studziencie, w osi symetrii kadłuba w ten sposób, że nieosłonięta część koła łopatkowego wystaje poniżej dna statku. Ruch kadłuba i jednoczesny opór hydrodynamiczny powodują ruch obrotowy koła, którego prędkość i kierunek obrotów mierzone są za pomocą czujników widocznych na fotografii w górnej części osłony.

Log skalowany jest na mili pomiarowej wyznaczonej na jeziorze. Pomiar należy uznać za mało dokładny, zwłaszcza w zakresie niewielkich prędkości – poniżej 3 kn. Wartości sygnałów są przy tym, dla celów szkoleniowych, skalowane tak, aby odpowiadały prędkościom rzeczywistego statku wyrażonym w węzłach. Wymienione czynniki decydują o tym, że urządzenie to nie jest sprzężone z układem pomiarowo-kontrolnym i podczas prób pełni rolę wskaźnika pomocniczego dla operatora. Natomiast prędkość modelu jest odtwarzana na podstawie pomiarów pozycji.



Rysunek 2.9. Fotografia ilustrująca konstrukcję elektromechanicznego logu łopatkowego modelu *Dorchester Lady*

Symulator AIS

Na jeziorze Silm przygotowano do celów szkoleniowych system pełniący funkcję podobną do AIS oraz dostarczający dane do lokalnych symulatorów ECDIS i pozwalający na dokumentowanie wykonanych manewrów w bazie Ośrodka Manewrowania Statkami. Przez analogię do rzeczywistego standardu AIS informacje przekazywane są drogą radiową. Wykorzystywane są przy tym, podobnie jak w przypadku transmisji poprawek GPS-RTK, radiomodemy SATELLINE. Treść komunikatów dotyczy wybranych parametrów ruchu modeli. Format rekordu długości 27 bajtów, przesyłanego przez każdego uczestnika systemu przedstawiono w tabeli 2.9.

Tabela 2.9. Format rekordu transmisji AIS i ECDIS na stosowany na jeziorze Silm

Nr bajtu	Opis	Jednostka
1 – 2	Identyfikator modelu	[–]
3 – 4	Kurs ψ	[°]
5 – 6	Kąt obrotu, δ_{AZL} lub $ssod_{\alpha}$	[°]
7	Ciąg (siła), n_{AZL} lub $ssod$	[%]
8	Ciąg (siła), ng	[%]
9	Ciąg (siła), n_{AZP} lub $ssor$	[%]
10 – 11	Kąt obrotu, δ_{AZP} lub $ssor_{\alpha}$	[°]
12	Kąt wychylenia steru δ	[°]
13	Prędkość U	[kn]
14 – 17	Współrzędna x	[m]
18 – 21	Współrzędna y	[m]
22	Ciąg (siła), $sstd$ / holownik	[%]
23 – 24	Dokładność GPS	[m]
25	Suma kontrolna	[–]
26	<CR>	
27	<LF>	

Dane przesyłane są cyfrowo, w formacie binarnym z synchronizacją czasową. Na bieżącym etapie rozwoju systemu⁵ częstotliwość przesyłania kompletnego zestawu danych ustalono na 1 Hz. Na tej podstawie, biorąc pod uwagę przepływność modemów, określono pojemność całego systemu symulacji AIS na sześć jednostek. Ich listę przedstawia tabela 2.10.

Tabela 2.10. Kody identyfikacyjne modeli statków w symulatorze systemu AIS

Lp.	Nazwa modelu	Typ	Kod identyfikacyjny AIS
1	Warta	LCC	w1
2	Blue Lady	VLCC	b2
3	Dorchester Lady	LNG	d3
4	Cherry Lady	VLCS	c4
5	Kołobrzeg	Ferry	k5
6	Lady Marie	ULCS	l6

2.2.2. Układ energetyczny modelu i urządzenia wykonawcze

Wszystkie urządzenia zainstalowane na modelu *Dorchester Lady* zasilane są elektrycznie. Podstawowym źródłem energii na statku jest bateria akumulatorów kwasowo-ołowiowych 120 V_{DC}. Rysunek 2.10 przedstawia widok przedziału kadłuba, w którym umieszczono tę baterię.

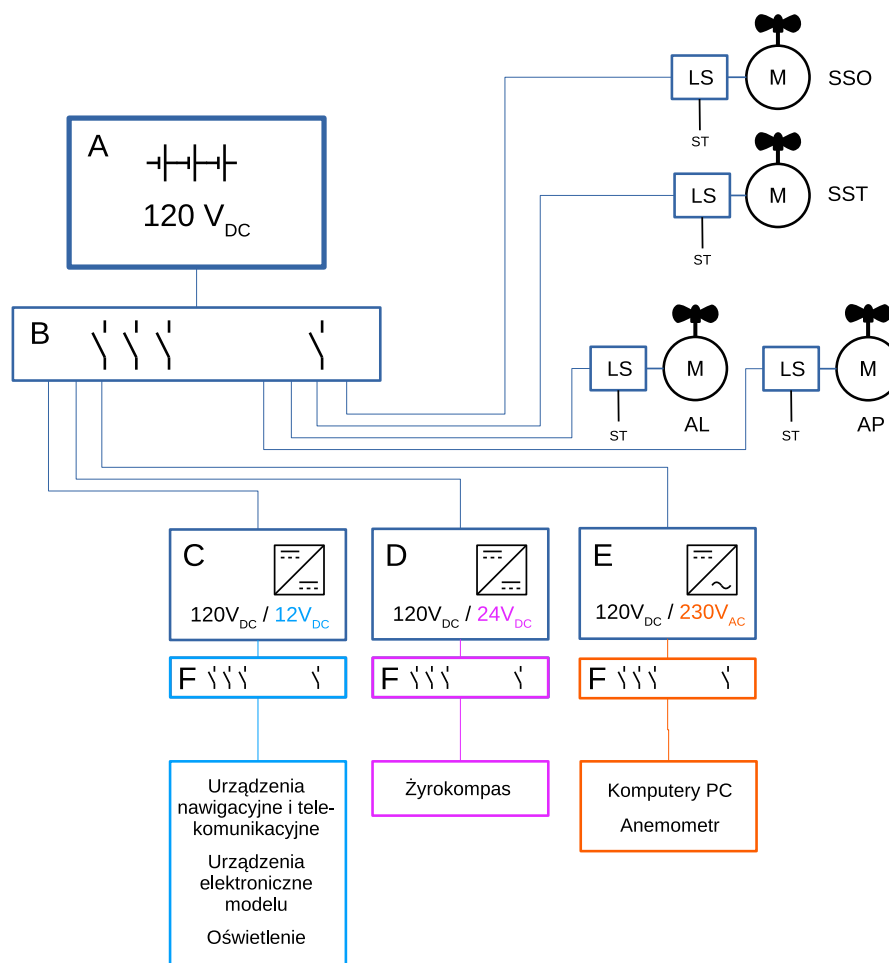


Rysunek 2.10. Bateria akumulatorów 120 V_{DC}. Źródło zasilania modelu *Dorchester Lady*

Układ energetyczny modelu nie jest zbyt złożony. Jego schemat przedstawiono na rysunku 2.11. Energia elektryczna z baterii jest przekazywana na poszczególne odbiorniki za pośrednictwem głównej rozdzielnicy. Największymi z nich są silniki azipodów i sterów strumieniowych. Maszyny te dobrano do napięcia baterii. Wszystkie pochodzą z typoszeregu silników

⁵ Informacje te pochodzą z rozmów osobistych prowadzonych z pracownikami FBŻiOŚ jesienią 2019 roku.

prądu stałego z magnesami trwałymi: K-77xx firmy Wamel [176]. Uzyskano w ten sposób duży stopień wzajemnej wymienialności tych maszyn na wypadek awarii. Ich prędkość obrotowa jest regulowana metodą PWM przez lokalne sterowniki. Na rysunku 2.11 oznaczono je symbolem LS.



Rysunek 2.11. Schemat blokowy układu energetycznego *Dorchester Lady* gdzie: A – bateria akumulatorów, B – rozdzielnica główna, C – przetwornica 12V_{DC}, D – przetwornica 24V_{DC}, E – przetwornica 230V_{AC}, F – rozdzielnice pomocnicze, LS – lokalne sterowniki silników napędowych, ST – sygnały sterujące, AL AP – azipody: lewy i prawy, SST – ster strumieniowy tunelowy, SSO – ster strumieniowy obrotowy

Zakresy nastaw wszystkich wymienionych urządzeń napędowych zebrano w tabeli A.1 zamieszczonej w dodatku. Parametry te oraz położenie poszczególnych pędników na tle sylwetki statku zaznaczono także na rysunku 2.3.

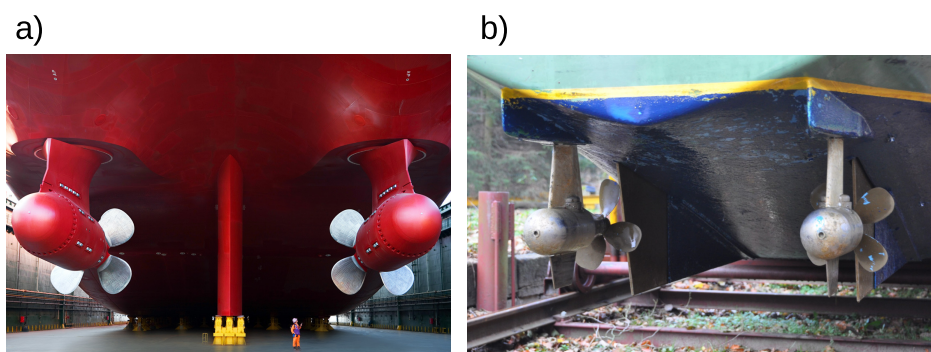
Urządzenia wymagające innych napięć zasilane są poprzez trzy przetwornice:

- ◆ 120 V_{DC} / 12 V_{DC}.
- ◆ 120 V_{DC} / 24 V_{DC},
- ◆ 120 V_{DC} / 230 V_{AC},

Zasilają one odpowiednie grupy urządzeń za pośrednictwem własnych rozdzielnic pomocniczych.

Pędniki gondolowe

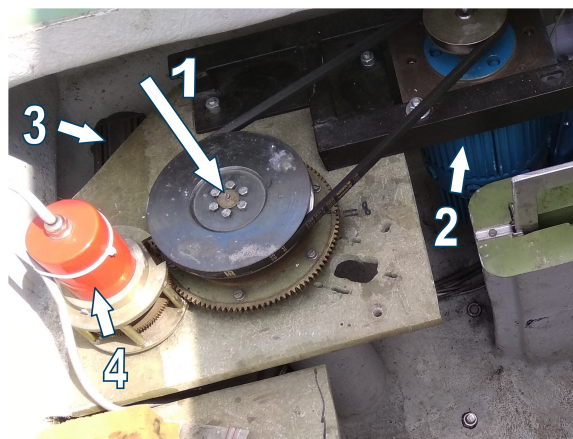
Najczęściej spotykanym rozwiązaniem napędu głównego statku jest pojedyncza śruba o stałym skoku napędzana silnikiem wysokoprężnym na paliwo ciężkie poprzez linię wałów, na której, jeśli obroty silnika są zbyt wysokie, stosuje się przekładnię. Zastosowanie silników elektrycznych w roli napędu głównego statku przeddefiniowuje niejako podstawowe parametry takiego klasycznego rozwiązania. Przede wszystkim można zastosować konfigurację, w której śruba (lub śruby) napędu głównego, mogą obracać się wokół osi pionowej, co znacząco poprawia zdolności manewrowe statku, szczególnie dla małych prędkości kadłuba. Statek z napędem azymutalnym lub gondolowym może, w efekcie, wchodzić do portu bez asysty holowników. Można także znacznie efektywniej regulować prędkość obrotową śruby. Energia elektryczna jest wytwarzana poprzez grupę znacząco mniejszych od pojedynczego silnika głównego generatorów, które mogą być rozmieszczone w różnych pomieszczeniach na statku. Pozwala to na większą elastyczność w aranżacji siłowni okrętowej. Siłownia taka wytwarza przy tym znacznie mniej dokuczliwe drgania kadłuba, co jest istotne na promach i statkach wycieczkowych. Sprawność napędu gondolowego, ze względu na dobry dopływ wody do śruby, jest większa o około 8% w porównaniu z napędem klasycznym, a średnica cyrkulacji statku może być zmniejszona nawet o 30% [41].



Rysunek 2.12. Fotografie napędu głównego statków wykorzystujący pędniki gondolowe: **a)** – azipody firmy ABB zainstalowane na rosyjskim tankowcu dowozowym 71 254 DWT *Vasily Dinkov* [155], **b)** – napęd modelu *Dorchester Lady*

Wadą napędu gondolowego jest znaczne skomplikowanie układów siłowni okrętowej, zarówno od strony mechanicznej, jak i w szczególności elektrycznej, a co za tym idzie wyższe koszty inwestycyjne. Dodatkowo statek z takim napędem ma tendencję do utraty stateczności w ruchu prostoliniowym.

W trakcie eksploatacji napędy gondolowe pracują zwykle w dwóch trybach. Jeżeli statek płynie z prędkością eksploatacyjną, gondole sprzęgają się ze sobą w układzie sterowania, a ich kąty obrotu ogranicza się do nieco mniejszych wartości niż dopuszczalne kąty wychylenia steru płetwowego – około $\pm 20^\circ$. Natomiast w czasie manewrowania z małymi prędkościami gondole mogą być obracane niezależnie, a ich kątów obrotu się nie ogranicza. Pozwala to na swobodne kształtowanie wektorów sił i momentów działających na kadłub, których źródłem jest napęd główny. Ma to decydujący wpływ na bardzo dobre właściwości manewrowe całego statku. Z drugiej strony, konfiguracja z kilkoma pędnikami położonymi blisko siebie (patrz:



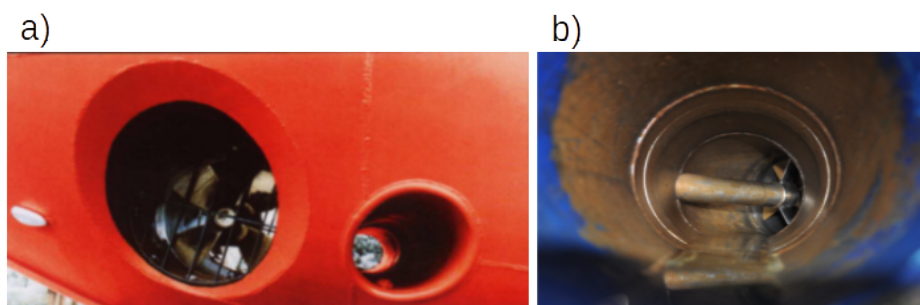
Rysunek 2.13. Fotografia mechanizmu napędu gondolowego modelu *Dorchester Lady*: 1 – oś przekładni napędu śruby, która geometrycznie pokrywa się z osią obrotu gondoli; 2 – silnik napędowy śruby; 3 – silnik zmiany kąta obrotu gondoli; 4 – czujnik pomiarowy kąta obrotu gondoli

rysunek 2.12) pociąga za sobą konieczność uwzględnienia interakcji między nimi. Jest to zagadnienie złożone i, szczególnie w przypadku sterowania ręcznego, wymaga dużego doświadczenia nawigatora [57].

Śruby na podach modelu *Dorchester Lady* napędzane są poprzez przekładnie wspomnianymi silnikami elektrycznymi prądu stałego umieszczonymi w kadłubie. Ilustruje to rysunek 2.13. Mimo to, jak wyjaśniono w przypisie na stronie 22, uznaje się je za napędy gondolowe.

Ster strumieniowy tunelowy

Zadaniem tunelowego steru strumieniowego jest wytworzenie siły prostopadłej do osi podłużnej statku. Stery strumieniowe umieszczone są zazwyczaj na dziobie i rzedziej na rufie. Dla statków o dużej powierzchni bocznej podatnych na działanie wiatru (promy pasażerskie, samochodowce) stosuje się podwójne, a nawet potrójne układy sterów tunelowych. Użycie steru strumieniowego podczas manewrowania z małymi prędkościami pozwala na wykonywanie ciasnych zwrotów oraz manewrów typu obrót statku w miejscu lub ruch boczny. Podczas ruchu z prędkościami eksploatacyjnymi ster strumieniowy jest bezużyteczny, gdyż jego sprawność jest minimalna, a przy tym zwiększa on opory ruchu wzdłużnego [31].



Rysunek 2.14. Fotografie dziobowego steru strumieniowego: **a)** – realizacja na statku morskim z widocznym tunelem wyrównawczym [42]; **b)** – realizacja na modelu *Dorchester Lady*. Na obu zdjęciach widoczna jest śruba napędu

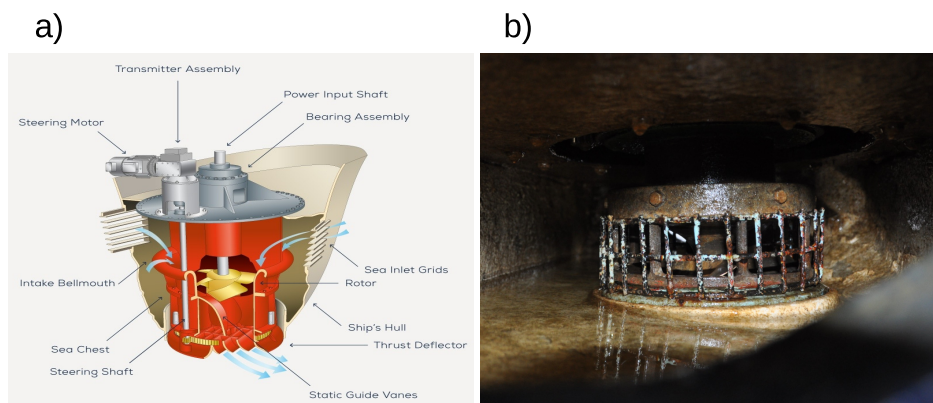
Na modelu *Dorchester Lady* zainstalowano pojedynczy ster strumieniowy na dziobie. Napędzany jest on omawianym wcześniej silnikiem prądu stałego i śrubą o stałym skoku.

Ze względu na opory hydrodynamiczne nie zastosowano osi napędowej z przekładnią kątową, lecz prostą oś. Stąd tunel posiada charakterystyczne wygięcie (patrz: rysunki 2.14 oraz 2.16).

Aby móc równoważyć moment obrotowy wytwarzany na rufie przez napędy gondolowe podczas manewrowania (szczególnie podczas ruchu boczno), ster strumieniowy dziobowy musi mieć zwiększoną moc. Na modelu *Dorchester Lady* zainstalowany napęd odpowiada sterowi strumieniowemu o mocy 9000 kW dla pełnowymiarowego statku. W przypadku tego samego kadłuba z klasycznym napędem głównym wystarczającym byłby ster strumieniowy o mocy 2000 kW [82].

Ster strumieniowy obrotowy

W przeciwieństwie do sterów strumieniowych tunelowych stery obrotowe pozwalają na sterowanie kierunkiem wytwarzanego naporu, a więc i działającej na kadłub siły.



Rysunek 2.15. Ster strumieniowy obrotowy: **a)** – poglądowy rysunek wyjaśniający konstrukcję i zasadę działania steru obrotowego w układzie analogicznym do zastosowanego na modelu [160]; **b)** – widok od strony kanału dopływowego na kratę zabezpieczającą i fragment śruby napędowej steru zainstalowanego na modelu *Dorchester Lady*

Na modelu *Dorchester Lady* zainstalowano ster strumieniowy obrotowy, który odpowiada układowi znanemu pod angielską nazwą *rotating pump thruster with vertical shaft* [160]. Rysunek 2.15a przedstawia zasadę działania takiego pędnika. Woda dopływająca bocznymi kanałami do śruby o stałym skoku jest tłoczona w dół. Wylot głównego kanału, umieszczony na dnie statku jest zaopatrzony w obrotowy zespół łopatek kierujących strumień wody pod kątem około 15° względem powierzchni dna, w kierunku ustalonym przez kąt obrotu ramy zespołu.

Stery strumieniowe tego typu wykorzystuje się na stosunkowo niewielkich jednostkach ze względu na ograniczone moce maksymalne. Ich główną zaletą, obok sterowania kierunkiem siły naporu, jest możliwość ich użycia na płytkich wodach [31]. Pędnik ten pełni na modelu funkcje symulatora holownika, gdyż jego parametry zostały tak dobrane aby czas obrotu ramy zespołu od kąta -90° do kąta $+90^\circ$ był zbliżony do czasu przejścia holownika

z burty na burtę przed dziobem rzeczywistego statku (przy zachowaniu skali). Możliwość obrotu o pełny kąt oznacza, że możliwa jest symulacja pracy holownika zarówno ciągnącego, jak i pchającego kadłub statku.



Rysunek 2.16. Fotografia urządzeń w przedziale dziobowym *Dorchester Lady* gdzie: 1 – napęd steru strumieniowego tunelowego, 2 – tunel, 3 – napęd steru strumieniowego obrotowego, 4 – silnik wykonawczy ustawiający zespół łopatek sterujących kierunkiem strumienia wylotowego, 5 – przetwornik pomiarowy kąta obrotu zespołu łopatek sterujących, 6 – bloki balastowe

Jako że oba stery strumieniowe położone są blisko siebie, w podobnej odległości od środka masy okrętu, a skuteczność steru obrotowego jest, w porównaniu ze sterem tunelowym, niewielka, można go podczas wyznaczania sterowań dla modelu *Dorchester Lady* pominąć. Nabiera on natomiast znaczenia w przypadku gdy model jest wyposażony w rufę z klasycznym napędem jednośrubowym.

Fotografia na rysunku 2.16 przedstawia widok dziobowego przedziału kadłuba modelu, w którym umieszczono oba stery strumieniowe. Zamontowany poziomo silnik (1) napędza przez przekładnię wał śruby steru tunelowego. Wał ten jest widoczny wewnątrz tunelu na ilustracji 2.14. Wspomniane wcześniej załamanie tunelu jest przysłonięte przez bloki balastowe (6). Pionowo umieszczony silnik elektryczny w dolnej części fotografii (3) to napęd steru obrotowego. Powyżej niego widoczny jest także przetwornik pomiarowy kąta obrotu łopatek sterujących kierunkiem strumienia wyrzucanej wody (5) oraz umieszczony poziomo silnik wykonawczy sterujący tymi łopatkami (4).

2.2.3. Urządzenia sterujące

Na grupę urządzeń sterujących składają się specjalizowane sterowniki mikroprocesorowe, oznaczone na schemacie blokowym układu pomiarowo-kontrolnego kolorem zielonym (patrz: rysunek 2.4) oraz komputery PC, które na tym schemacie wyróżniono kolorem purpurowym.

Główny kontroler – SLRT Host

Głównym sterownikiem (*Host*) pozwalającym na zastosowanie biblioteki Simulink Real-Time może być dowolny, przenośny komputer klasy PC, z zainstalowanym systemem operacyjnym MS Windows w wersji nie niższej niż 7, który spełnia co najmniej rekomendowane wymagania sprzętowe środowiska MATLAB⁶ [162]:

- ◆ procesor z rodziny x86-64 (4-core), który wspiera zestaw instrukcji AVX2,
- ◆ od 4 do 6 GB miejsca na dysku HDD (rekomendowany dysk SSD) dla typowej instalacji,
- ◆ 2 GB RAM,
- ◆ karta graficzna wspierająca bibliotekę OpenGL 3.3 z co najmniej 1 GB pamięci GPU.

Dodatkowo komputer ten powinien posiadać port Ethernet, który wykorzystuje się do połączenia go z komputerem *Target*. Można w tym celu wykorzystać sieć LAN, lecz w przypadku opisywanego układu stosowano połączenie *point-to-point*.

Komputer ten umieszczono w rufowej kabinie operatora na „mostku” (patrz: rysunek 2.5). Pozwalało to na sprawne operowanie całością urządzeń zainstalowanych na modelu podczas manewrów i eksperymentów.

Sterownik SLRT Target

Sterownik czasu rzeczywistego wykorzystujący bibliotekę SLRT, identyfikowany w jej nomenklaturze jako *Target* to także komputer klasy PC. Jednakże ze względu na uciążliwe warunki pracy wewnątrz kadłuba modelu⁷, zastosowano w tej roli komputer przemysłowy Axiomtek IPC934-230-FL (rysunek 2.17).

Cechuje się on bogatym zestawem portów wejścia – wyjścia, których specyfikację podano w tabeli 2.11. Mimo to zainstalowano w nim dodatkową, ośmioportową kartę łącz szeregowych RS-232 Quatech ESC-100 [144]. Decyzja ta była podyktowana dostępnością w bibliotece SLRT bloków obsługi portów szeregowych właśnie dla tej karty. W rozdziale 3 można znaleźć informacje, w jaki sposób bloki te zostały wykorzystane w oprogramowaniu systemu pomiarowo-kontrolnego.

Ze względu na szczupłość miejsca na stanowisku operatora holowników gdzie, ze względu na łącza (patrz: rysunek 2.4) umiejscowiono komputer sterujący *Target* oraz, ze względu na grodzie, które oddzielają część dziobową *Dorchester Lady* od wymiennej rufy, monitor tego komputera umieszczono w górnej kabinie, czyli na „mostku” przy pulpicie nawigatora. Jest on widoczny na górnej fotografii na rysunku 2.5. Ułatwiało to śledzenie przepływu danych pomiarowych podczas eksperymentów.

Monitor – konwerter sygnałów przesyłanych łączami szeregowymi

Przystosowanie *Dorchester Lady* do badań w układzie sterowania automatycznego było procesem w sposób istotny ingerującym w strukturę

⁶ Ze względu na konieczność zachowania zgodności oprogramowania z zainstalowanym w układzie pomiarowo-kontrolnym sprzętem używano MATLAB-a w wersji 2016b.

⁷ Z wieloletniego doświadczenia zespołu badawczego wynika, iż najbardziej krytycznym parametrem dla tego sterownika jest dopuszczalny zakres temperatury pracy. Testy na jeziorze prowadzono zarówno w temperaturach poniżej 0°C, jak i w nasłonecznione dni, kiedy temperatura wewnątrz kadłuba przekraczała 50°C. W tych warunkach komputery o typowych zakresach dopuszczalnych temperatur pracy działały wyjątkowo niestabilnie.



Rysunek 2.17. Zdjęcie sterownika SLRT *Target* – komputera przemysłowego Axiomtek IPC934-230-FL [15]

Tabela 2.11. Parametry komputera przemysłowego Axiomtek IPC934-230-FL [15]

Parametr/element	Wartość
Procesor	Intel® Core™ i7/i5/i3 4 generacji lub Celeron®
Chipset	Intel® Q87
Pamięć RAM	2 x 204-pin SO-DIMM DDR3-1333/1600, do 16 GB
Porty szeregowo	2 x RS-232, 2 x RS-232/422/485
Porty USB	2 x USB 3.0, 4 x USB 2.0
Porty Ethernet	2 x 10/100/1000 Mbps
Złącza dysków	2 x 2.5" SATA HDD, 1 x CFast™
Sloty rozszerzeń	2 PCI, 1 PCIe x1 i 1 PCIe x16
Zasilanie	DC ATX 150W, Wejście: 10...30 V _{DC}
Temperatura pracy	-10...55°C
Stopień ochrony obudowy	IP30

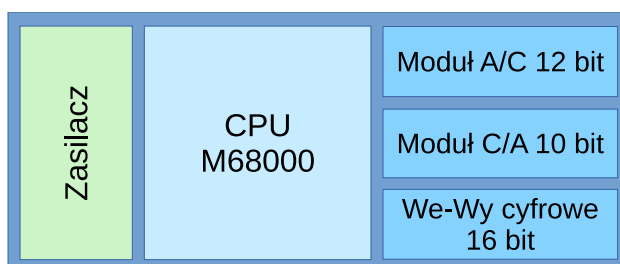
układu sterowania ręcznego, używanego podczas kursów manewrowych. Doświadczenia zebrane w trakcie wielokrotnych zmian konfiguracji modelu wskazywały, że najbardziej zawodnym elementem tej struktury były łącza transmisji szeregowo, zwłaszcza że w sposób naturalny układ pracujący na jeziorze narażony jest na podwyższony poziom wilgotności i temperatury. Z tego powodu zaprojektowano i wykonano system mikroprocesorowy do monitorowania i diagnostyki połączeń RS. Dodatkowo pozwala on na konwersję sygnału ze standardu 422/485 na 232. Funkcjonalność ta wykorzystywana była w kanale pomiaru wiatru, jako że sygnał z anemometru Gill WindObserver przy połączeniu z kartą Quatech potrzebuje takiej konwersji. Fotografia 2.18 przedstawia ogólny widok monitora/konwertera.



Rysunek 2.18. Fotografia monitora/konwertera sygnałów przesyłanych łączami szeregowymi

Lokalne sterowniki mikroprocesorowe

Model *Dorchester Lady* wyposażony jest, ze względu na wymienną część rufową, w dwa lokalne sterowniki mikroprocesorowe. Pozostałe modele użytkowane na jeziorze Silm sterowane są za pomocą jednego. Oznaczono je na schemacie 2.4 kolorem zielonym i symbolami odpowiednio: „R” dla sterownika rufowego i „D” dla dziobowego. Rysunek 2.19 przedstawia schemat architektury tych urządzeń. Jest ona wspólna dla układów zainstalowanych na wszystkich modelach.



Rysunek 2.19. Schemat architektury dedykowanego, lokalnego sterownika mikroprocesorowego

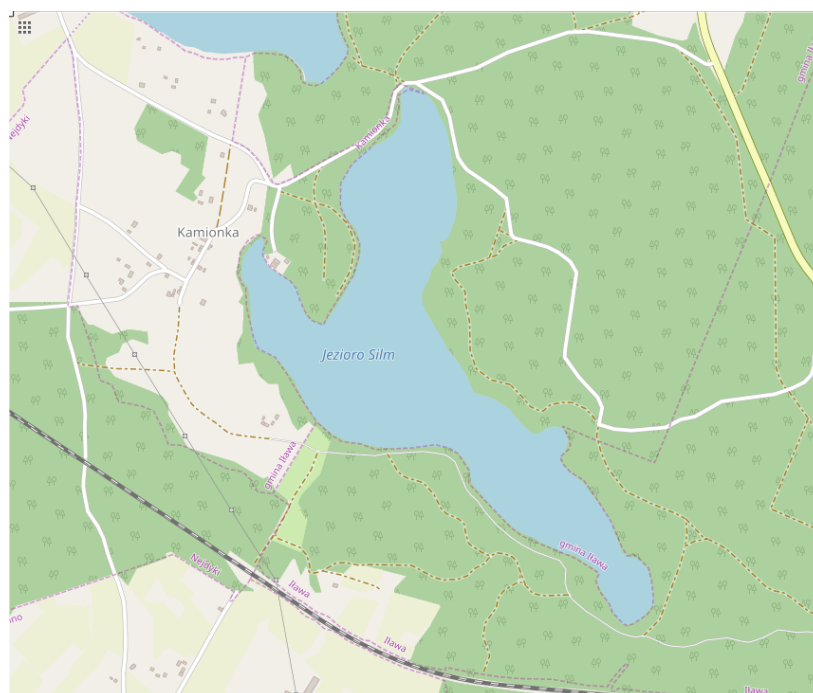
Sterowniki są dedykowaną konstrukcją zaprojektowaną i wykonaną przez pracowników FBŻiOŚ, dopasowaną do specyfiki modeli izomorficznych. Centralnym jej elementem jest mikroprocesor z rodziny M68000 firmy Motorola. W torach analogowych zastosowano przetworniki A/C – C/A firmy Maxwell, odpowiednio: 12-bitowe dla wejść i 10-bitowe dla wyjść. Dostępnych jest także 16 wejść/wyjść cyfrowych. Podobnie jak rozwiązanie sprzętowe, także oprogramowanie sterownika jest rozwiązaniem dedykowanym. Ze względu na kompatybilność wsteczną z innymi elementami układu zostało w całości zaprogramowane w assemblerze.

Sygnały wejściowe przetwarzane w sterownikach pochodzą z zadajników umieszczonych na pulpitych kontrolnych oraz z przetworników pomiarowych

w torach sprzężeń zwrotnych od urzędzeń wykonawczych. Sygnały wyjściowe sterują napędami modelu. Ponadto sterowniki te komunikują się z komputerem SLRT *Target* i lokalnym komputerem PC, który obsługuje wyświetlacze cyfrowe zainstalowane na modelu, w tym symulatory ECDIS i AIS.

2.3. Akweny testowe

Jeziro Silm w Iławie-Kamionce rozciąga się na około 1,25 km w osi W-E oraz 1,6 km w osi N-S. Jest ono rozczłonkowane na trzy zatoki: południowo-wschodnią, północną i zachodnią (patrz: rysunek 2.20). W tej ostatniej zlokalizowany jest Ośrodek Manewrowania Statkami Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska.



Rysunek 2.20. Mapa jeziora Silm (źródło: www.openstreetmap.org: 19,4968 – 19,5337 E; 53,5976 – 53,6161 N)

W pobliżu ośrodka oraz w środkowej i północnej części jeziora zlokalizowano wiele budowli i urządzeń skonstruowanych tak, aby odpowiadały rozmiarom modeli, które używane są podczas szkoleń. Są to:

- ◆ nabrzeża i baseny portowe,
- ◆ terminale kontenerowe, promowe, naftowe i gazowe,
- ◆ mola,
- ◆ kotwicowiska,
- ◆ płytkowodzie,
- ◆ tory wodne,
- ◆ obrotnice,
- ◆ rzeka,
- ◆ most,
- ◆ śluzy,
- ◆ obszary prądu morskiego,
- ◆ kanały,

- ◆ kanał płytkowodny,
- ◆ kanał z tzw. *bank effect*,
- ◆ stanowisko SBM (ang. *Single Buoy Mooring*).



Rysunek 2.21. Fotografia infrastruktury w Ośrodku Manewrowania Statkami w Iławie-Kamionce. Przy pomostach widoczne statki treningowe dostępne w ośrodku [12]

Fotografia 2.21 przedstawia widok z lotu ptaka na tereny Ośrodka Manewrowania. Widoczne są nabrzeża portowe, slip i zacumowane wszystkie modele szkoleniowe.

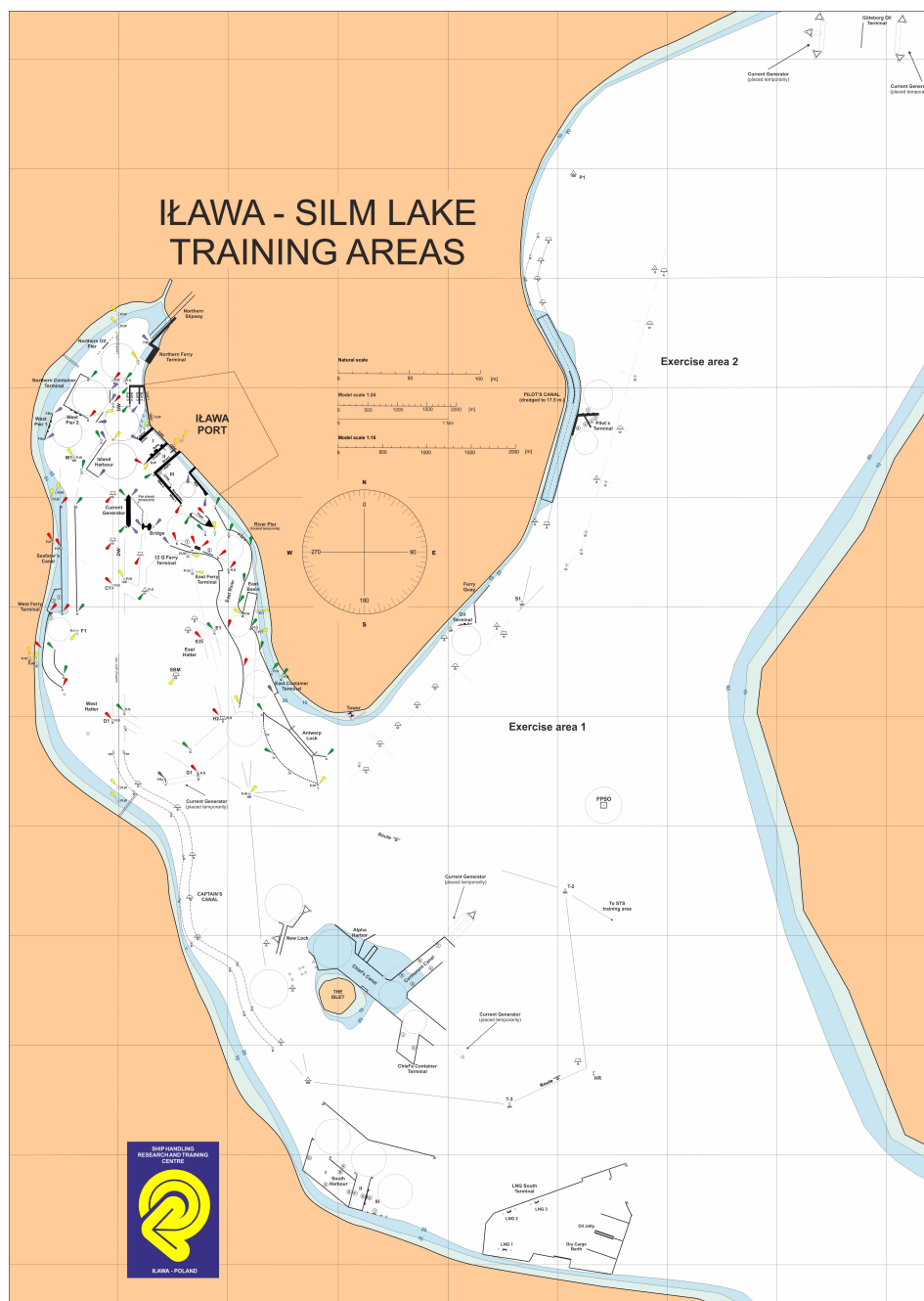
Ośrodek dysponuje także pomocniczymi jednostkami pływającymi. Są to:

- ◆ dwa modele holowników eskortowych,
- ◆ model statku FPSO (ang. *Floating Production Storage and Offloading*),
- ◆ dwie jednostki serwisowe o napędzie spalinowo-elektrycznym, służące do obsługi infrastruktury na jeziorze oraz pełniące funkcję mobilnych źródeł energii elektrycznej w oddalonych od bazy rejonach jeziora.

Elementy te tworzą bogatą infrastrukturę, dzięki której można w ośrodku odwzorować niemal wszystkie rodzaje manewrów wykonywanych przez jednostki marynarki handlowej. Na jeziorze buduje się także tymczasowo modele rzeczywistych terminali lub portów, jeśli niezbędne są do przeprowadzenia szkolenia⁸. Wszystkie konstrukcje wyposażono w odpowiednie oznakowanie oraz oświetlenie nawigacyjne, umożliwiające pływanie modeli także w nocy.

Na rysunku 2.22 przedstawiono mapę tych obszarów jeziora Silm, na których znajduje się omawiana infrastruktura. Mapa ta zawiera oznakowanie morskie i przeskalowana jest do układu współrzędnych używanego podczas szkoleń.

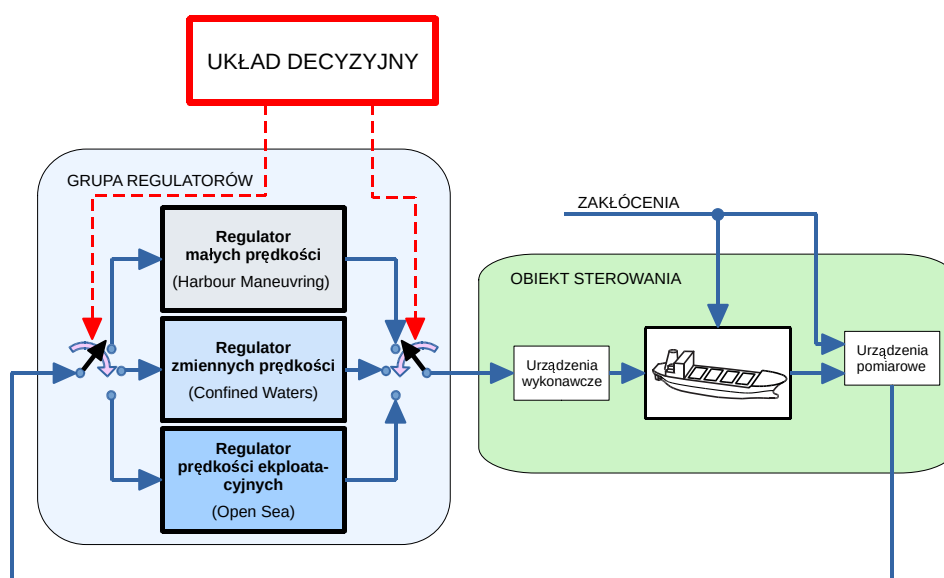
⁸ Na przykład, jesienią 2019 roku zbudowano na jeziorze odpowiednik terminalu DCT Gdańsk.



Rysunek 2.22. Mapa akwenów manewrowych na jeziorze Silm [82]

3. Układ sterujący ruchem statku wykorzystujący grupę regulatorów

Trzon systemu sterującego ruchem statku *Dorchester Lady* stanowią trzy regulatory, które są aktywowane w zależności od tego, w której fazie podróży morskiej znajduje się właśnie statek (patrz: podrozdział 1.3). Ogólną strukturę tego układu przedstawiono na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Ogólna struktura układu sterowania statkiem wykorzystującego grupę regulatorów

W pierwszej części niniejszego rozdziału opisano proces syntezy regulatorów składowych. Druga część przedstawia schemat zrealizowanego układu przełączania bezuderzeniowego oraz opisuje budowę nadrzędnego bloku, zarządzającego aktywowaniem regulatorów składowych. Rozdział kończy część przedstawiająca formę realizacji oprogramowania układu pomiarowo-kontrolnego jako całości, łącznie z elementami zastosowanymi w symulacjach.

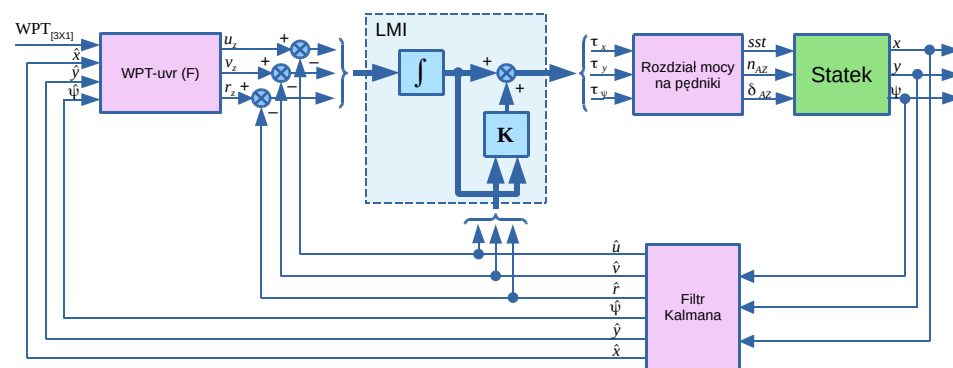
3.1. Regulatory składowe

Podczas doboru regulatorów składowych dla prędkości eksploatacyjnych i manewrowania w porcie, zdecydowano się na akomodację istniejących rozwiązań, które stosowano już do sterowania ruchem modeli treningowych. Koncepcja ta miała źródło w przekonaniu, iż zadanie syntezy takich układów od podstaw, szczególnie dla wielowymiarowego sterowania statkiem z małymi prędkościami, samo w sobie może być podstawą zaawansowanej pracy badawczej. Natomiast, dla przypadku manewrowania na wodach ograniczonych, ze

względu na spodziewaną, dużą zmienność nastaw prędkości obrotowej śrub pędników, zdecydowano się na budowę regulatora PID z adaptacją typu *Gain Scheduling*.

3.1.1. Wielowymiarowy regulator LMI ruchu statku z małymi prędkościami

Manewry statkiem w obrębie akwenów portowych, w przeciwieństwie do pływania poza portem, wymagają wykonywania sekwencji złożonych ruchów kadłuba statku: obrotów, przesunięć bocznych, wzdłużnych, skośnych czy przemieszczenia się po krzywej. Dlatego też zastosowano w tym reżymie wielowymiarowy układ sterowania, który umożliwi jednoczesne sterowanie we wszystkich trzech stopniach swobody statku, czyli prędkościami: wzdłużną u , poprzeczną v i kątową r . Schemat blokowy tego układu przedstawiono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2. Schemat blokowy wielowymiarowej regulacji modelu *Dorchester Lady* za pomocą regulatora ze sprzężeniem od stanu. Wielowymiarowe sygnały w obrębie regulatora zaznaczono pogrubioną linią dla zwiększenia czytelności schematu

Głównym jego elementem jest zmodyfikowany regulator ze sprzężeniem od stanu zaprojektowany z użyciem linowych nierówności macierzowych — LMI (ang. *Linear Matrix Inequalities*). Pełny opis projektowania pierwotnej wersji tego regulatora można znaleźć w rozprawie M. Rybczak [150]. Wybrano tę postać regulatora, gdyż skuteczność takiego rozwiązania została sprawdzona na obiekcie o podobnych do *Dorchester Lady* właściwościach. Synteza regulatora została przeprowadzona przez autorkę w sposób analogiczny do przedstawionego we wspomnianej publikacji. Modyfikacje obejmowały¹:

- ◆ identyfikację nowego modelu nominalnego,
- ◆ określenie jego niepewności parametrycznych,
- ◆ syntezy macierzy wzmocnień regulatora spełniających założone ograniczenia.

Na wejścia regulatora podawane są estymaty rzeczywistych prędkości kadłuba statku $\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}$ oraz uchyby tych prędkości, przy czym ich wartości zadane u_z, v_z, r_z wyliczanie są w bloku WPT-uvr, którego sposób działania

¹ Informacje na temat modyfikacji i cech nowego regulatora uzyskano na drodze kontaktów osobistych. Dotychczas (wrzesień, 2021r.) ukazała się tylko jedna publikacja [106] zawierająca fragmentaryczne informacje na temat wykonanych prac.

przedstawiony jest w sekcji na stronie 47. Blok ten zawiera także na swoim wyjściu filtr dolnoprzepustowy (F) mający postać macierzy inercji pierwszego rzędu o niewielkich stałych czasowych dobieranych heurystycznie, aby ograniczyć gwałtowne zmiany sygnału zadanego do regulatora. Estymaty prędkości u, v, r są odtwarzane w filtrze Kalmana na podstawie pomiarów pozycji x, y i kąta kursowego ψ . Informacje o aktualnym położeniu i orientacji kadłuba przekazywane są także w postaci odfiltrowanej $\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}$ do bloku WPT-uvr. Dzięki filtracji zmniejszane są zakłócenia pomiaru pozycji za pomocą odbiornika GPS, które powstają, gdy ten przełącza się pomiędzy trybami GPS – DGPS – RTK (patrz: sekcja 4.7.4).

Układ uzupełnia blok rozdziału mocy na pędniki, w którym wartości wyjściowe z regulatora, czyli zadane siły naporu wzdłużnego i poprzecznego τ_x, τ_y oraz momentu obrotowego kadłuba τ_ψ , przeliczane są na zadane wartości sygnałów sterujących urządzeń napędowych. Składają się na nie: względna prędkość obrotowa śruby dziobowego steru strumieniowego sst , względna prędkość obrotowa śrub pędników azymutalnych n_{AZ} oraz ich kąt obrotu δ_{AZ} .

Idea stosowania LMI do syntezy regulatora wielowymiarowego

Jak już wspomniano, metoda LMI w opisywanym układzie była narzędziem syntezy regulatora ze sprzężeniem od stanu. Pozwala ona rozwiązać wiele rodzajów zadań optymalizacyjnych pojawiających się w teorii sterowania [40]. W omawianym przypadku optymalizację z ograniczeniami w formie LMI wykorzystano w trzech zadaniach, dla których poszukuje się rozwiązań w przestrzeni wzmocnień regulatora stanu:

- ◆ lokowania biegunów układu zamkniętego na płaszczyźnie Gaussa tak, aby zostały spełnione założenia dotyczące jego właściwości dynamicznych,
- ◆ minimalizacji normy H_∞ , która związana jest z minimalizacją uchybów układu,
- ◆ minimalizacji normy H_2 , która stanowi wyznacznik energii wydatkowanej na sterowanie, a zatem kosztu sterowania.

Znalezienie macierzy wzmocnień, której wartości spełniają warunki wszystkich zadań, jest rozwiązaniem zagadnienia syntezy poszukiwanego regulatora.

Punktem wyjścia była identyfikacja liniowego modelu dynamiki statku w przestrzeni stanów dla ruchu z niewielkimi prędkościami:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{\text{HM}}\mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{HM}}\mathbf{u} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_{\text{HM}}\mathbf{x} + \mathbf{D}_{\text{HM}}\mathbf{u}, \quad (3.2)$$

dla którego uzyskano następujące wartości elementów poszczególnych macierzy:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{HM}} &= \begin{bmatrix} -1.00e-2 & 0 & -1.20e-2 \\ -4.70e-3 & -2.48e-2 & -1.73e-2 \\ -9.30e-3 & 0 & -3.11e-2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{\text{HM}} &= \begin{bmatrix} 3.83e-5 & 0 & -1.17e-7 \\ 9.08e-8 & 1.42e-5 & 1.97e-7 \\ -3.51e-6 & 0 & 5.35e-5 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{\text{HM}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \mathbf{D}_{\text{HM}} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Identyfikację przeprowadzono dla danych uzyskanych z matematycznego modelu nieliniowego przedstawionego w dodatku A. Zebranie wystarczająco obszernych zbiorów użytecznych danych dla rzeczywistego ruchu *Dorchester Lady* na jeziorze, pokrywających przestrzeń dynamicznych odpowiedzi modelu nie było możliwe, gdyż ilość czasu potrzebna dla wykonania niezbędnych prób w warunkach słabych zakłóceń środowiskowych znacząco przekraczała okresy, w których model był dostępny dla zespołu badawczego.

Macierze dane równaniami 3.3 tworzą układ wielowymiarowy (3x3), który jest zgodny ze schematem na rysunku 3.2. Mając do dyspozycji model nominalny, określono za pomocą nierówności macierzowych warunki, których spełnienie oznacza realizację kolejnych trzech etapów wymieniowych na początku tej sekcji. Dodatkowo do modelu liniowego wprowadzono niepewności parametryczne, odzwierciedlające ocenę jego niedokładności.

Liniowe nierówności macierzowe można zapisać w ogólnej postaci jako [26]:

$$\mathbf{F}(x) \triangleq \mathbf{F}_0 + \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_i x_i > 0, \quad (3.4)$$

gdzie: $x \in \mathbb{R}^m$ jest zmienną, a symetryczne macierze $\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $i = 0, \dots, m$ są danymi. Symbol: > 0 oznacza tu, że $\mathbf{F}(x)$ jest dodatnio określona, to jest $u^T \mathbf{F}(x) u > 0$ dla wszystkich niezerowych $u \in \mathbb{R}^n$. Liniowa nierówność macierzowa 3.4 tworzy wypukłe ograniczenie na x , to znaczy zbiór $\{x \mid \mathbf{F}(x) > 0\}$ jest wypukły.

Ciężar poprawnej syntezy omawianego układu regulacji spoczywał więc na takim sformułowaniu funkcji celu i ograniczeń nierównościowych (LMI) konstytutywnych dla kolejnych zadań, aby uzyskać problem optymalizacji wypukłej, który może być rozwiązany w przestrzeni parametrów regulatora [150]. Sama procedura maksymalizacji wartości funkcji celu realizowana była za pomocą standardowych narzędzi pakietu MATLAB rozszerzonych o preprocesor YALMIP [100].

Uzyskany w pierwszych próbach regulator nie usuwał uchybu statycznego w układzie. Dlatego też postanowiono wprowadzić do układu regulacji, podobnie jak w przypadku *Blue Lady*, dodatkową pętlę sprzężenia zwrotnego z całkowaniem wektora uchybów prędkości $e_\eta = [e_u \ e_v \ e_r]$. Aby jednak uniknąć wpływu zerowego bieguna członu całkującego pogarszającego dynamikę układu, zastąpiono go członem inercyjnym o dużym wzmocnieniu [151].

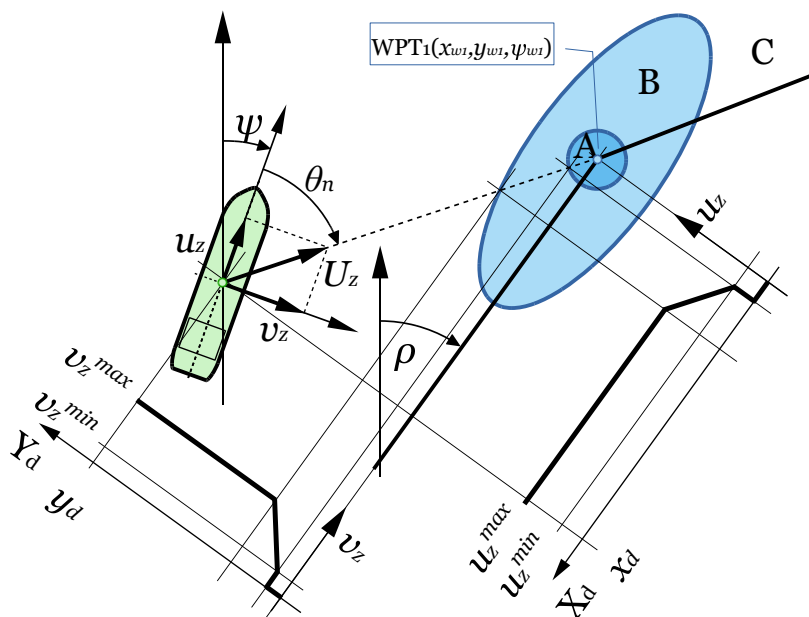
Ostatecznie uzyskano macierz wzmocnień \mathbf{K} regulatora od stanu o wartościach [106]:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1595.2 & -0.00 & 0.10 & -807.8 & -0.00 & 0.00 \\ -0.01 & 1664.8 & -36.00 & 0.00 & -897.90 & 2.00 \\ -6.10 & -28.00 & 435.40 & 35.00 & 16.00 & -23.44 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Metoda wyznaczania prędkości zadanych do układu regulacji wielowymiarowej na podstawie parametrów kolejnych punktów zwrotu

Zadanie sterowania ruchem statku w porcie wymaga, oprócz opisanego wyżej regulatora LMI, układu przetwarzającego informacje o pozycji statku względem trajektorii zadanej na wektor $\eta_z = [u_z \ v_z \ r_z]^T$. Na rysunku 3.2 został on przedstawiony w postaci bloku opisanego etykietą WPT-uvr.

W niniejszej pracy zastosowano układ, którego koncepcja została sformułowana w pracy W Gierusza [56]. Przedstawiono ją w formie graficznej na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3. Ilustracja wyznaczania prędkości zadanych dla regulatora LMI na podstawie położenia statku względem bieżącego punktu zwrotu [56]

Koncepcja ta zasadza się na tym, aby kierunek wektora całkowitej prędkości zadanej kadłuba statku U_z będącego sumą niezależnie sterowanych składowych u_z i v_z pokrywał się z kierunkiem kąta θ_n namiaru względem kąta kursowego statku ψ na najbliższy punkt zwrotu WPT_1 . Wówczas statek będzie przesuwiał się do tego punktu drogą oznaczoną na rysunku linią kreskowaną. Wartości prędkości składowych u_z i v_z są funkcjami położenia statku względem punktu zwrotu określonego w układzie współrzędnych związanym z bieżącym odcinkiem trajektorii (X_d, Y_d) . Jeżeli środek ciężkości statku znajduje się w obszarze C, wystarczająco daleko od punktu zwrotu, wówczas prędkości te przyjmują swoje wartości maksymalne u_z^{max} v_z^{max} wyznaczone według tzw. reguły prostokąta prędkości [56]. Po przekroczeniu granicy obszaru B o kształcie elipsy, której kierunek dłuższej osi pokrywa się z kierunkiem X_d , prędkości są zmniejszane liniowo do wartości minimalnych u_z^{min} v_z^{min} aż do osiągnięcia odległości równej promieniowi okręgu wyznaczającego obszar A. Koło A stanowi strefę stabilizacji pozycji statku ($u_z = v_z = 0$), jeżeli punkt WPT_1 jest końcowym punktem trajektorii zadanej. W przeciwnym wypadku układ przełączany jest na kolejny odcinek trajektorii. Analogiczne reguły odnoszą się do wyznaczania zadanej prędkości kątowej r_z . Nie zaznaczono jednak tego na rysunku, aby nie stracił on swojej czytelności.

Tabela 3.1. Wartości charakterystyczne układu przeliczającego parametry trajektorii na prędkości zadane regulatora LMI

Prędkości	u [m/s]	v [m/s]	r [°/s]
Graniczne: $ \square _z^{max}$	(-0.1 ... 0.18)	(-0.08 ... 0.08)	(-0.4 ... 0.4)
Minimalna: $ \square _z^{min}$	0.1	0.03	0.1

Przyjmuje się, iż ze względu na spadek wydajności sterów strumieniowych prędkość manewrowania U_z nie powinna być większa niż ~ 3 kn [31], [131]. Ze względu bezpieczeństwa, w przypadku *Dorchester Lady* limit ten zmniejszono dodatkowo do $|U_z^{max}| \leq 2$ kn. Odpowiednie wartości prędkości manewrowania uwzględniające skalę modelu *Dorchester Lady* przedstawione są w tabeli 3.1.

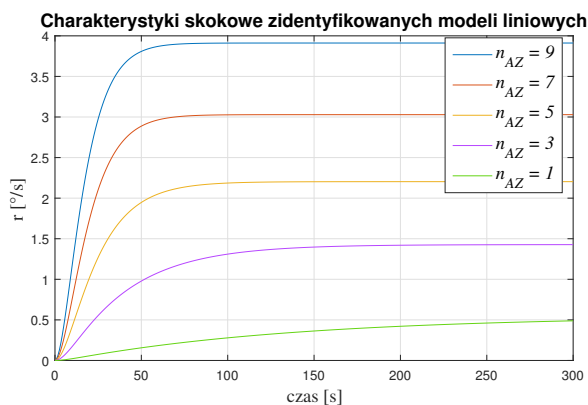
Promień koła oznaczającego obszar A wynosił przy tym 1,1 m, a osie elipsy definiującej obszar B odpowiednio: wielka 5 m i mała 2 m. Parametry te wyznaczono heurystycznie.

3.1.2. Regulator ruchu wzdłuż zadanej trajektorii na wodach ograniczonych

Reżym pływania po wodach ograniczonych cechuje zazwyczaj duża zmienność prędkości zadanej śrub napędów gondolowych n_{AZz} i kursu zadanego ψ_z statku. W zależności od charakteru akwenu zmienność ta może wystąpić w różnym stopniu, jednak projektowany układ regulacji powinien działać poprawnie dla wszystkich technicznie możliwych warunków. Dodatkowym czynnikiem, który należy uwzględnić w budowie regulatora, jest konieczność utrzymywania niewielkich odchyłeń od trajektorii zadanej, tak aby ruch statku odbywał się w granicach toru wodnego, który zazwyczaj jest wyznaczany na takich akwenach. Mając na uwadze powyższe czynniki zdecydowano się na budowę regulatora PID z adaptacją typu *gain-scheduling*. Struktura taka pozwala na użycie dobrze znanych metod syntezy układów regulacji i jest łatwa w diagnostyce.

Identyfikacja liniowych modeli dynamiki *Dorchester Lady* dla wybranych punktów pracy układu

Pierwszym krokiem w procedurze budowy układu regulacji było uzyskanie rodziny jednowymiarowych, liniowych modeli dynamiki statku dla wybranych punktów pracy. Odpowiadały one modelowi Nomoto II rzędu.



Rysunek 3.4. Przebieg charakterystyk skokowych zidentyfikowanych modeli liniowych danych transmitancją zapisaną równaniem 3.6 dla stałego kąta obrotu pędników $\delta_{AZ} = -40^\circ$ i wybranych nastaw prędkości obrotowej śrub napędu głównego n_{AZ}

Ich transmitancja operatorowa miała postać [98]:

$$\frac{r(s)}{\delta_{AZ}(s)} = \frac{ks(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (3.6)$$

Punkty pracy dobrano arbitralnie, na podstawie obserwacji właściwości manewrowych modelu *Dorchester Lady* sterowanego ręcznie. Parametrem je determinującym była względna nastawa prędkości obrotowej śrub napędu głównego wzięta ze zbioru $n_{AZ} \in \{1, 3, 5, 7, 9\}$

Do identyfikacji modeli liniowych użyto narzędzi z biblioteki *System Identification Toolbox* pakietu MATLAB. Rysunek 3.4 prezentuje ich charakterystyki skokowe dla kolejnych wartości nastawy prędkości obrotowej śrub napędu głównego. Charakterystyki te zdjęto dla przyjętego za maksymalny (co do wartości bezwzględnej) w tym reżymie pływania, kąta obrotu pędników $\delta_{AZ}^{max} = -40^\circ$.

Algorytm LOS z promieniem wodzącym

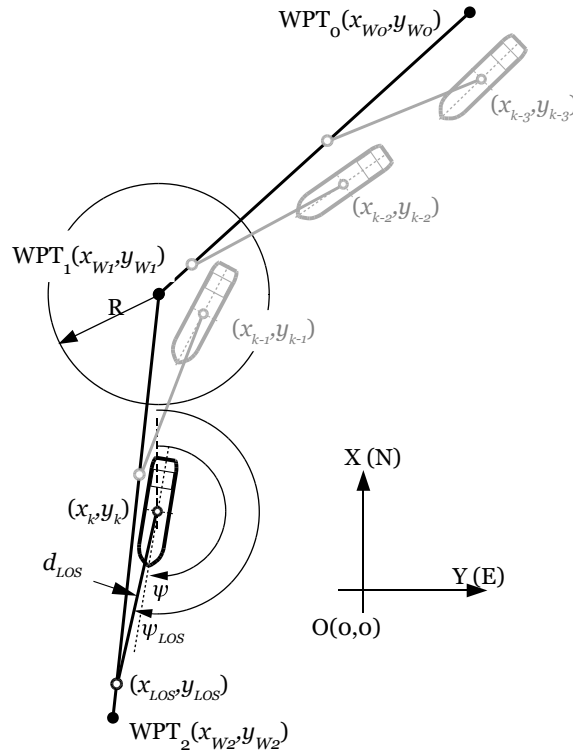
Regulator PID współpracuje z odmiennym, w stosunku do regulatora MPC, układem wyznaczającym kurs powrotu na trajektorię zadaną. Różnica wynika przede wszystkim z tego, iż w przypadku regulatora PID, jego naturalnym sygnałem wejściowym jest kurs ψ . Dodatkowo przedstawiony w następnym podrozdziale klasyczny algorytm LOS, na skutek przekaźnikowego przełączania kolejnych odcinków trajektorii powoduje, że współpracujący z nim regulator ma tendencję do przeregulowań podczas większych zmian kursu. Zjawisko to, w reżymie pływania po wodach otwartych jest w zasadzie nieistotne, gdyż statek poza sytuacjami awaryjnymi nie wykonuje na oceanie gwałtownych manewrów, natomiast układ taki zachowuje swoje bardzo dobre właściwości podczas stabilizacji ruchu na długich, prostoliniowych odcinkach trajektorii. Z kolei podczas pływania na wodach ograniczonych, zwłaszcza w torze wodnym wskazane jest, aby krzywa, po której porusza się statek, wpisywała się w kąt utworzony przez sąsiadujące odcinki trajektorii zadanej².

W konsekwencji w układzie LOS współpracującym z regulatorem PID-GS (*PID-Gain-Scheduling*) użyto zmodyfikowanej jego wersji nazywanej układem z promieniem wodzącym [142]. Zasadnicza modyfikacja względem klasycznego algorytmu polega na tym, że po osiągnięciu punktu zwrotu na końcu śledzonego odcinka trajektorii nowy kurs zadany zmienia się monotonicznie, a szybkość tej zmiany jest uwarunkowana relacjami pomiędzy długością odcinka d_{LOS} zwanego tu „promieniem”, prędkością postępową statku i jego własnościami dynamicznymi. W zależności od planowanej strategii pokonywania zwrotu można wpływać na kształt krzywej, po której porusza się statek zmieniając długość „promienia” d_{LOS} lub promienia okręgu wyznaczającego drogę wyprzedzenia manewru zwrotu R [108]. Ideę promienia wodzącego przedstawiono na rysunku 3.5.

Synteza regulatorów PID

Rodzina regulatorów PID zastosowanych do sterowania modelem *Dorchester Lady* w trakcie pływania na wodach ograniczonych została przygotowana z użyciem narzędzia *PID Tuner* biblioteki *Control System Toolbox*. Nastawy uzyskano dla modeli liniowych przedstawionych w pierwszej sekcji niniejszego podrozdziału, a następnie dostrojono podczas prób symulacyjnych. Regulatory te cechowały się strukturą szeregowo-równoległą, którą można zapisać

² Zalecenie takie wynika z interpretacji, w duchu dobrej praktyki morskiej, prawideł 8a, 10bi oraz 10biii konwencji w sprawie międzynarodowych przepisów o zapobieganiu zderzeniom na morzu COLREGS [152].



Rysunek 3.5. Ilustracja idei algorytmu LOS z promieniem wodzącym

w postaci transmitancji Laplace'a:

$$G_{PID}(s) = \frac{\delta_z(s)}{\psi_{err}(s)} = k_p \left(1 + \mathcal{N} \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_d s + 1} \right) \quad (3.7)$$

gdzie \mathcal{N} jest nieliniowym elementem o charakterze przełącznika:

$$\mathcal{N} = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } |\psi_{err}| > \psi_{err}^{pr} \\ 1 & \text{jeżeli } |\psi_{err}| \leq \psi_{err}^{pr} \end{cases} \quad (3.8)$$

który zabezpiecza człon całkujący przed zjawiskiem *windup'u*. Progową wartość uchybu kursu, przy której przełączany jest przełącznik ustalono eksperymentalnie na $\psi_{err}^{pr} = 7^\circ$.

Tabela 3.2. Wartości nastaw regulatora PID-GS dla wybranych punktów pracy

n_{AZ}	k_p	k_i	k_d
1	1.84	0.0082	47.3
3	1.08	0.0079	38.83
5	0.825	0.00686	12.02
7	0.618	0.004	6.17
9	0.503	0.002525	5.22

Poszczególne regulatory połączone w jeden układ PID-GS uzależniając aktualne nastawy od zadanej wartości prędkości obrotowej śrub pędników V_z , przy czym wartości nastaw pomiędzy punktami pracy ustalonymi podczas identyfikacji modeli liniowych uzyskiwano na drodze interpolacji liniowej.

W tabeli 3.2 przedstawiono wartości nastaw regulatora uzyskane dla wybranych punktów pracy.

3.1.3. Regulator predykcyjny dla prędkości eksploatacyjnych

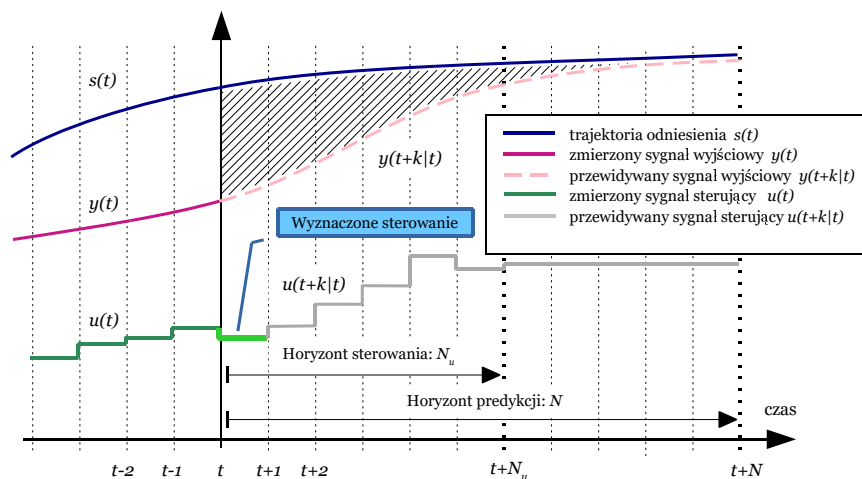
Dla fazy pływania po wodach otwartych wybrano układ wykorzystujący paradygmat sterowania predykcyjnego MPC (ang. *Model Predictive Control*) uzupełniony algorytmem wyznaczania trajektorii LOS (ang. *Line-of-Sight*). Podstawą do syntezy był regulator zbudowany dla modelu *Dorchester Lady* w ramach pracy badawczej Miller [104], do którego autorka wprowadziła następujące modyfikacje:

- ◆ zmianę struktury z przyrostowej na pozycyjną,
- ◆ ustalenie nastawy prędkości napędu głównego „cała naprzód” w miejsce „pół naprzód”.

Decyzja o wyborze tego regulatora do roli jednego z podukładów przełączanego układu sterowania podyktowana była bardzo dobrymi rezultatami jego stosowania w procesie stabilizacji kursu modelu *Dorchester Lady* pływającego, z prędkościami nieco mniejszymi od eksploatacyjnych, wzdłuż prostoliniowych lub niemal prostoliniowych odcinków trajektorii [106].

Idea sterowania predykcyjnego

Adaptacyjne sterowanie predykcyjne według metody MPC polega na wyznaczaniu w kolejnych krokach algorytmu takiej sekwencji sterowań $u(t+k|t)$ dla przedziału czasu zwanego horyzontem sterowania, aby minimalizować różnicę pomiędzy trajektorią odniesienia (zadaną) dla wielkości sterowanej $s(t)$ a przyszłą trajektorią tego sygnału $y(t+k|t)$ przewidywaną na podstawie znanego modelu obiektu sterowania dla przedziału czasu zwanego horyzontem predykcji. Różnicę tą obrazuje zakreskowany obszar na rysunku 3.6. Z wyznaczonej sekwencji sterowań na wejście urządzeń wykonawczych



Rysunek 3.6. Ilustracja idei sterowania predykcyjnego z przesuwającym horyzontem [129]

układu podaje się pierwsze z nich: $u(t+1)$, a cały algorytm „przesuwany” jest o jeden krok do przodu. Można zatem powiedzieć, że regulator predykcyjny cyklicznie rozwiązuje zadanie regulacji optymalnej z ograniczeniami, minimalizując przyjętą funkcję celu w całym horyzontie predykcji. Postać

sposób, że statek w rozpatrywanym momencie pokonuje bieżący odcinek trajektorii pomiędzy punktem zerowym a pierwszym. Dane punktu drugiego służą do obliczenia kąta zwrotu, który statek powinien wykonać po wejściu w okrąg o promieniu R wokół punktu WPT_1 .

Aby zminimalizować boczną odchyłkę od bieżącego odcinka trajektorii y_e , proponuje się przyjąć jako kurs zadany zamiar z pozycji (x, y) na punkt WPT_1 . Niestety, w przypadku, w którym odległość pomiędzy pozycją statku a pierwszym punktem zwrotu jest duża, a tak najczęściej podczas pływania na wodach otwartych bywa, uchyb ten zmniejszany byłby bardzo powoli. Stąd proponuje się modyfikację polegającą na tym, że zamiar wyznaczany jest na pewien punkt (x_{LOS}, y_{LOS}) położony na bieżącym odcinku trajektorii w odległości d_{LOS} od pozycji statku. Przy takich założeniach, kurs powrotu na trajektorię może być wyznaczony za pomocą formuły³:

$$\psi_{LOS} = \arctg \left(\frac{y_{LOS} - y}{x_{LOS} - x} \right). \quad (3.9)$$

Jeżeli odchyłka boczna od trajektorii jest większa od wartości d_{LOS} , wówczas kurs powrotu na trajektorię wyznacza się według zależności:

$$\psi_{temp} = -\operatorname{sgn}(y_e) \frac{\pi}{2} \quad \text{dla } |y_e| > d_{LOS} \quad (3.10)$$

$$\psi_{LOS} = \rho + \psi_{temp} \quad (3.11)$$

gdzie ρ jest kątem kierunkowym odcinka trajektorii określonego w układzie współrzędnych NED przez punkty WPT_0 i WPT_1 .

Ruch z kursem ψ_{LOS} wzdłuż bieżącego odcinka trajektorii jest kontynuowany do chwili, w której zostanie spełniony warunek:

$$\|(x_{W1} - x_{LOS}) (y_{W1} - y_{LOS})\| \leq R, \quad (3.12)$$

wówczas następuje przełączenie układu na następny odcinek trajektorii. Odbywa się to na drodze załączenia osobnego regulatora zwrotu [50], [168], lub przekaźnikowego przełączenia punktu (x_{LOS}, y_{LOS}) na nowy odcinek trajektorii [108], [122]. W naturalny sposób długości odcinków d_{LOS} oraz R decydują o sposobie wykonania zwrotu przez statek. W wielu pracach porusza się zagadnienia związane z adaptacją tych wielkości do warunków wykonywania zwrotu [50], [51], [94], [108]. Metoda LOS ze względu na swoją naturę cechuje się statyzmem, a to przy występowaniu zakłóceń hydrometeorologicznych może nie pozwolić na zbieżność odchyłki y_e do zera. Rozszerza się zatem klasyczny algorytm o elementy całkujące. Mówi się wtedy o metodzie ILOS (ang. *Integral Line-of-Sight*) [36]. W omawianym przypadku, ze względu na to, że statek porusza się z prędkością eksploatacyjną, a manewry są ograniczone do niewielkich kątów zwrotu, przyjęto jak proponuje Fossen [48], stałą wartość $d_{LOS} = nL$, gdzie L oznacza całkowitą długość modelu *Dorchester Lady*, a stały współczynnik ma wartość ustaloną eksperymentalnie: $n = 1,47$.

Algorytm LOS współpracuje z regulatorem predykcyjnym opartym na modelu. W takim układzie nie można jako sygnału odniesienia użyć wartości kursu, gdyż w modelowaniu zależności $\psi = f(\delta_{AZ})$ nie można usunąć składowej stałej i nieciągłości przy przejściu przez kąt pełny. Rozwiązaniem tej kwestii może być zastosowanie modelu przyrostowego lub prędkościowego

³ W oprogramowaniu użyto, naturalnie, funkcji `atan2`, dzięki której można poprawnie obliczyć wartości arcus tangens w czterech ćwiartkach koła trygonometrycznego.

$\psi = f(r_z)$. W omawianym przypadku przyjęto tę drugą koncepcję, stąd zależność LOS ma postać ilorazu:

$$r_{LOS} = \frac{(\beta(t) + \psi_{LOS}(t)) - (\beta(t-1) + \psi_{LOS}(t-1))}{t_s} \quad (3.13)$$

gdzie β oznacza kąt dryfu, który estymowany jest na podstawie parametrów wiatru pozornego, mierzonych anemometrem przedstawionym na stronie 28, zaś t_s jest okresem próbkowania układu.

Działanie całkujące uzależniono od wielkości odchyłki bocznej i wprowadzono jako korektę do r_{LOS} :

$$r_z = r_{LOS} + r_{corr} \quad (3.14)$$

$$r_{corr}(t) = \begin{cases} r_{corr}(t-1) + \frac{y_e}{15} r_{LOS}(t) T_i & \text{jeżeli } |y_e(t)| > 3,6 \wedge |r(t)| < 0,3 \\ & \text{lub } |y_e(t)| < 3,6 \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach.} \end{cases} \quad (3.15)$$

Symbol T_i powyżej oznacza stałą całkowania, a stałe: $2B = 3,6$ m (podwójna szerokość modelu) oraz $0,15 \max(\text{ROT}) = 0,3^\circ/\text{s}$ (15% maksymalnej prędkości kątowej modelu w tym reżymie pływania) oznaczają „małe wartości” odpowiednio odchyłki bocznej od trajektorii oraz prędkości kątowej modelu. Z tego względu działanie całkujące w algorytmie jest załączane, kiedy odchyłka boczna jest duża, a prędkość powrotu na trajektorię mała, albo gdy odchyłka jest na tyle niewielka, że jej całkowanie nie grozi *windup'em*.

Regulator LOS-MPC

Skuteczność działania regulatora predykcyjnego w podstawowym stopniu zależy od poprawności modelowania sterowanego obiektu lub procesu. W omawianym układzie regulacji zastosowano liniowy model dynamiki statku, mimo iż zależności dynamiczne dla *Dorchester Lady* są silnie nieliniowe. Zdecydowano się na taki krok, gdyż dla proponowanego reżymu pływania zadana prędkość obrotowa śrub napędu głównego jest stała, a ze względu na siły naporu hydrodynamicznego przy pełnej prędkości postępowej, kąty obrotu pędników ogranicza się do $\pm 20^\circ$. Wobec tego punkt pracy układu nie odbiega znacząco od punktu jego linearyzacji. Jeżeli zidentyfikowany model liniowy daje wystarczająco dokładne wyniki predykcji, zyskuje się, w porównaniu do modelu nieliniowego, znaczące obniżenie wymagań numerycznych, a co za tym idzie – kosztu, dla sprzętu przetwarzającego kod rzeczywistego regulatora.

Wspomniany model liniowy ma formę równań stanu:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{K}e_k \quad (3.16)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + e_k, \quad (3.17)$$

dla których macierze odpowiednio: stanu, wejścia, zakłóceniewa i wyjścia mają postać:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (3.18)$$

Identyfikację współczynników modelu przeprowadzono za pomocą narzędzi z biblioteki *Identification Toolbox* pakietu MATLAB na podstawie danych zebranych na drodze symulacji nieliniowego modelu matematycznego, przedstawionego w dodatku A z powodów, które przedstawiano już podczas opisu liniowego modelu nominalnego dla regulacji LMI na stronie 47.

Parametry uzyskanego modelu były ponownie strojone na podstawie danych z kilku zarejestrowanych sesji pomiarowych przeprowadzonych dla rzeczywistego statku treningowego na jeziorze. Na tym etapie wprowadzono uśrednianie modelu oraz regularyzację L_2 redukującą niepewność uzyskanych estymat parametrów [99]. Wartości współczynników regularyzacji λ i R_{reg} były optymalizowane za pomocą algorytmu genetycznego tak, aby dla danych weryfikacyjnych dopasowanie dla krótkookresowej predykcji (5 s) wynosiło co najmniej 85% a dla predykcji długookresowej (20 s) nie mniej niż 40% [106]. Eksperymenty na obiekcie rzeczywistym pokazały, że takie poziomy dopasowania modelu prowadziły do zgodnej z oczekiwaniami pracy regulatora MPC.

Tabela 3.3. Wartości współczynników modelu 3.18

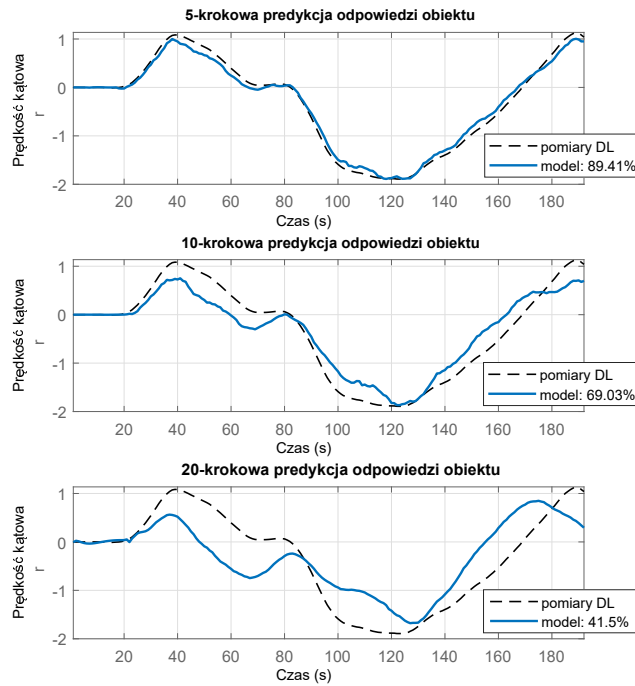
Parametr	Wartość	STD	R_{reg}
a_1	-0,2268	0,0153	100,327
a_2	1,4660	0,0489	100,327
a_3	-3,2020	0,0531	100,327
a_4	2,9610	0,0195	100,327
b_1	$-7,328e-5$	$2,41e-6$	101,264
b_2	$-6,608e-5$	$3,08e-6$	101,264
b_3	$1,019e-4$	$3,05e-5$	101,264
b_4	$-4,358e-4$	$3,29e-5$	101,264
k_1	1,709	0,0521	89,36
k_2	2,031	0,0719	89,36
k_3	2,374	0,0824	89,36
k_4	2,665	0,1000	89,36

W tabeli 3.3 przedstawiono zidentyfikowane liczbowe wartości parametrów modelu (3.16 – 3.18) wraz z miarami ich niepewności STD oraz współczynnikami regularyzacji R_{reg} . Współczynnik λ był wspólny dla wszystkich elementów macierzy i wynosił $\lambda = 0,377$. Porównanie przebiegów zmierzonych wartości prędkości kątowej r ze zbioru testowego oraz odpowiadających im wartości uzyskanych z modelu dla różnych poziomów horyzontu predykcji, z zaznaczeniem poziomu dopasowania, przedstawiono na rysunku 3.8.

Algorytm optymalizacji w strukturze regulatora minimalizuje następującą funkcję celu:

$$J = \eta_y \sum_{k=1}^N [r_z(t+k|t) - r(t+k|t)]^2 + \eta_u \sum_{k=0}^{N_u-1} [r_{AZ}(t+k|t)]^2. \quad (3.19)$$

W równaniu tym: η_y, η_u – oznaczają współczynniki wagowe minimalizacji uchybu sygnału wyjściowego i wydatku na sterowanie; r_z, r – wartość zadaną i regulowaną prędkości kątowej; r_{AZ} – prędkość zmian zadanego kąta obrotu pedników, a N, N_u – horyzonty odpowiednio predykcji i sterowania.



Rysunek 3.8. Wykresy porównujące przebiegi prędkości kątowej dla zidentyfikowanego modelu liniowego i zbioru testowego

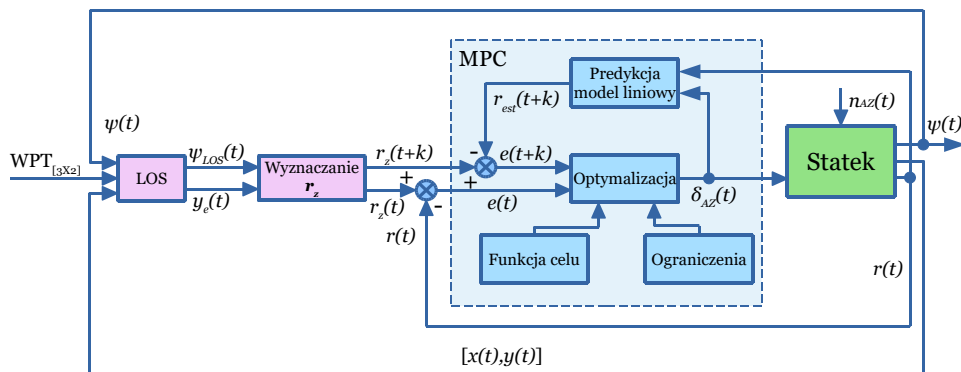
Na sygnał sterujący nałożono ograniczenia wynikające z warunków pracy oraz ograniczeń konstrukcyjnych azipodów. Dla kąta ich wychylenia było to:

$$-20^\circ \leq \delta_{AZ} \leq 20^\circ, \quad (3.20)$$

a dla prędkości kątowej:

$$-35^\circ/s \leq r_{AZ} \leq 35^\circ/s. \quad (3.21)$$

Przyjęto, na podstawie prób Kempfa, że maksymalna prędkość kątowa kadłuba *Dorchester Lady* w tych warunkach nie przekroczy $r^{max} = 2^\circ/s$, przy czym wartość ta była modyfikowana w zależności od tego, w jakiej fazie manewru znajdował się model [106].



Rysunek 3.9. Schemat blokowy układu regulacji MPC stosowanego w reżymie pływania po wodach otwartych

Ostatecznie kompletny układ sterowania dla reżymu pływania modelu na wodach otwartych z prędkościami eksploatacyjnymi prezentuje schemat na rysunku 3.9. Jak łatwo zauważyć, składają się na niego trzy główne elementy opisane powyżej:

- ◆ algorytm LOS wyznaczający kurs powrotu na bieżący odcinek trajektorii,
- ◆ blok określania wartości zadanej prędkości kątowej wraz z korektą całkującą,
- ◆ właściwy regulator MPC.

W sekcji 4.4 przedstawiono wyniki badań właściwości tego układu.

3.2. Układ przełączania bezuderzeniowego – PBU

Obserwacje, przeprowadzone na wczesnym etapie symulacji programowych działania grupy regulatorów w układzie przedstawionym na rysunku 3.1, w którym nie zaimplementowano modułu PBU doprowadziły do sformułowania następujących uwag dotyczących realizacji takiego elementu:

- ◆ Kiedy wielowymiarowy regulator LMI osiąga końcową pozycję na trajektorii, jego prędkości u, v, r oraz nastawy pędników $n_{AZ}, \delta_{AZ}, sst_z$ są bliskie zeru. Jest to efektem przyjętej dla tego regulatora strategii przełączania punktów zwrotu przedstawionej w poprzednim podrozdziale. Zatem, po zakończeniu pracy regulatora LMI, w momencie podejmowania pracy przez regulator PID-GS, z natury rzeczy nie ma potrzeby stosowania układu PBU.
- ◆ W sekwencji manewrów podczas wejścia do portu, w chwili kiedy regulator PID-GS kończy pracę, uruchamiana jest procedura „kopnięcia wstecz” napędem głównym w celu wytracenia resztek prędkości postępowej. W tej sytuacji zastosowanie PBU przed załączeniem regulatora LMI również traci rację bytu.
- ◆ Regulatory PID-GS oraz MPC są układami SISO, a ich struktury wewnętrzne znacznie różnią się między sobą. Na skutek tego najdogodniejszą w tej konfiguracji metodą PBU będzie metoda śledzenia sygnału wejściowego regulatora aktywnego (patrz: sekcja 1.4.2).

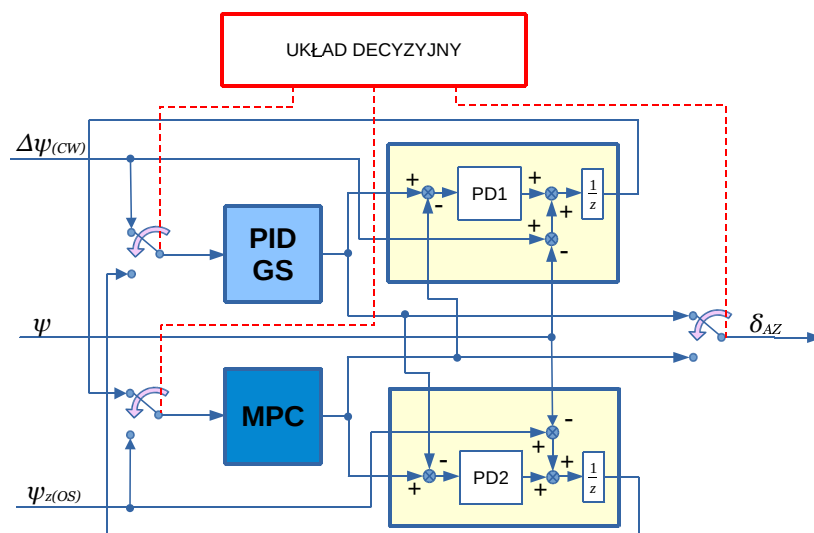
Na rysunku 3.10 przedstawiono schemat blokowy zrealizowanego układu, w którym wzięto pod uwagę powyższe założenia. Jest on symetrycznym rozwinięciem schematu z ilustracji 1.6. W rzeczywistej implementacji, co zaznaczono na rysunku, wprowadzono dodatkowe bloki opóźnień o jeden okres próbkowania $1/z$, aby uniknąć zjawiska pętli algebraicznych.

Klasyczne metody syntezy regulatorów nadążnych w tym układzie nie zdają egzaminu. Stąd nastawy projektowanych regulatorów uzyskano metodą prób i błędów podczas symulacji programowych. Przyporządkowano im struktury PD w postaci transmitancji:

$$G(s) = k_p + k_d \frac{s}{T_d s + 1} \quad (3.22)$$

których parametry zebrano w tabeli 3.4.

W następnym podrozdziale omawiającym techniczne aspekty implementacji przedstawionych tutaj elementów składających się na układ sterujący ruchem statku zaprezentowano także sposób, w jaki zrealizowano strukturę PBU.



Rysunek 3.10. Schemat blokowy realizacji układu przełączania bezuderzeniowego metodą śledzenia sygnału wyjściowego regulatora aktywnego

Tabela 3.4. Wartości nastaw regulatorów w układzie PBU

Regulator	k_p	k_d	T_d
PD 1	0,2	1,5	1
PD 2	0.3	0.001	1

3.3. Techniczna realizacja środowiska badawczego

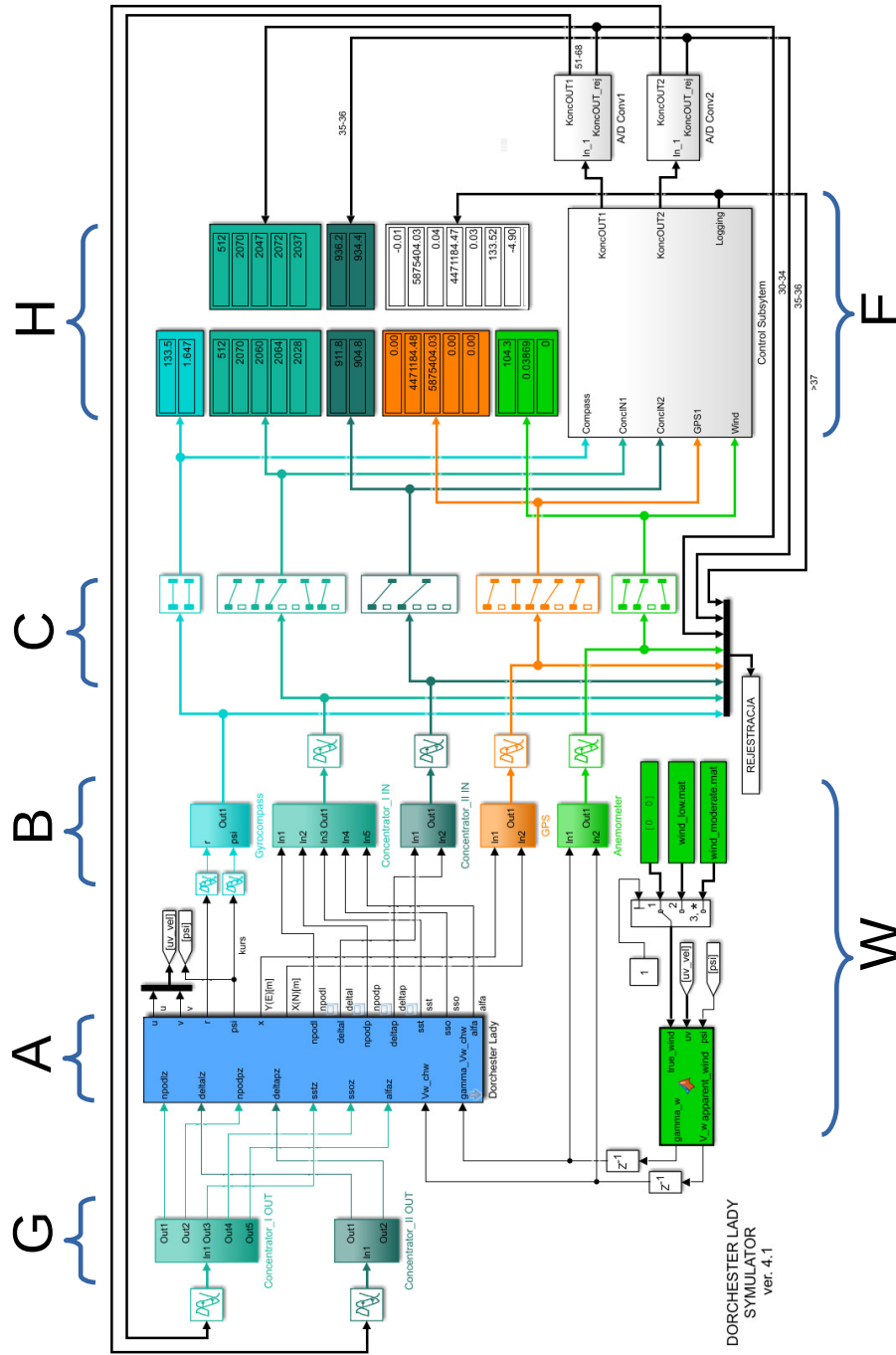
Obecny stan środowiska badawczego, na które składają się: statek treningowy, urządzenia kontrolno-pomiarowe i oprogramowanie stanowi rezultat organicznego wysiłku licznej grupy pracowników zarówno FBŻiOŚ, jak i Uniwersytetu Morskiego w Gdyni⁴. W niniejszym podrozdziale przedstawione są te jego elementy, które przygotowano na potrzeby niniejszej pracy choć tam, gdzie to wydaje się pomocne, stosowano odwołania do prac wykonanych z użyciem wcześniejszych wersji tego środowiska.

3.3.1. Układ do przeprowadzania wstępnych badań symulacyjnych

Początkowo próby działania układu sterowania ruchem statku *Dorchester Lady* przeprowadzono w formie symulacji czysto programowej w środowisku Simulink. Wykorzystywano tu dwie zasadnicze zalety takiego podejścia:

- ◆ znaczne przyspieszenie symulacji w stosunku do układów czasu rzeczywistego, zależnie od złożoności schematu, nawet o dwa rzędy wielkości,
- ◆ możliwość przeprowadzenia prób na pojedynczym komputerze z zainstalowanym środowiskiem MATLAB-Simulink bez dostępu do innych zasobów sprzętowych.

⁴ Naturalnie, włączając w to poprzedniczki Uniwersytetu: Wyższą Szkołę Morską i Akademię Morską w Gdyni.



Rysunek 3.11. Diagram symulacji programowej układu sterowania ruchem *Dorchester Lady* w środowisku Simulink

Rysunek 3.11 przedstawia przygotowany do tego typu badań diagram Simulinka. Poszczególne jego bloki i grupy bloków oznaczono w ten sposób, aby wskazać te, pełniące analogiczne funkcje do bloków głównego schematu układu czasu rzeczywistego z rysunku 3.13, który był punktem odniesienia dla struktur symulacyjnych.

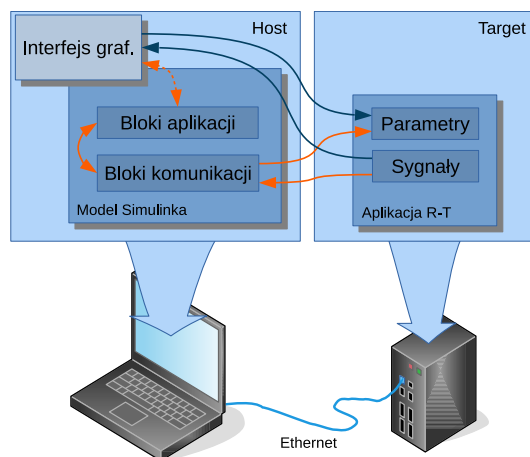
- A** Blok ten, wyróżniony niebieskim kolorem, zawiera implementację modelu matematycznego statku treningowego *Dorchester Lady*. Uwzględnia on zależności przedstawione w dodatku A. Jego główne składowe i procedurę budowy przedstawia sekcja A.4. Pełni on funkcję źródła informacji o wartościach odpowiednich sygnałów modelu matematycznego w kolejnych chwilach symulacji. W schemacie głównym układu czasu rzeczywistego 3.13 rolę tę ogrywa sterownik karty łączy szeregowych, dostarczający informacji o sygnałach pochodzących z urządzeń pomiarowych.
- B** Grupa bloków symulująca dekodery standardu NMEA 0183 i transmisji binarnej dla poszczególnych portów łączy szeregowych.
- C** Bloki selekcji przetwarzanych wielkości. Ich rolą jest odcięcie sygnałów niewykorzystywanych w układzie regulacji. Dodatkowo w tej grupie znajduje się blok multipleksera, który gromadzi odpowiednio uszeregowane sygnały z całości układu i przesyła je do tablicy REJESTRACJA, w której dokumentowany jest przebieg eksperymentu.
- E** Jest to główny blok układu pomiarowo-kontrolnego. Zawiera on implementację algorytmów poszczególnych regulatorów, jak również układu decyzyjnego. Jego konstrukcja przedstawiono w sekcji 3.3.3. Blok ten jest tak zaprojektowany, aby można go było przenieść pomiędzy schematem do symulacji czysto programowych a schematem symulacji w czasie rzeczywistym za pomocą operacji kopiuj-wklej. Znacząco skraca to testowanie kolejnych wersji oprogramowania.
- G** Bloki symulujące kodery transmisji binarnej będące niejako odwrotnościami bloków z grupy B o tych samych kolorach.
- H** Bloki wyświetlaczy znakowych, które zastępują oscyloskopy numeryczne dostępne tylko w implementacji czasu rzeczywistego.
- W** Grupa bloków, których funkcją jest odczytywanie z dysku lokalnego i dostarczanie do schematu sekwencji wartości prędkości i kierunku wiatru zarejestrowanego uprzednio na jeziorze (patrz: dodatek A).

3.3.2. Architektura docelowego układu badawczego działającego w czasie rzeczywistym

Cześć programowa układu pomiarowo-kontrolnego czasu rzeczywistego, która stanowi bazę dla algorytmów opisywanych w poprzednich częściach niniejszego rozdziału wykorzystuje dwa komputery PC oznaczone na rysunku 2.4 kolorem purpurowym. Powstała ona podobnie jak i poprzednie elementy w środowisku programowania i symulacji MATLAB-Simulink. Jest ona rozwinięciem systemów, które swój początek miały w końcu lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Były one budowane w zespole pracowników Katedry Automatyki Okrętowej, przy znaczącym udziale autora. Początkowo wykorzystywano jednostkowe, prototypowe układy komunikacji z modelem i oprogramowanie napisane w językach C i Pascal. W kolejnych etapach przeniesiono system na platformę MATLAB-Simulink i wykorzystywano specjalizowane biblioteki do tworzenia układów czasu rzeczywistego kolejno:

RT-Con⁵, xPC i *Simulink Real-Time*. Ewolucję tego oprogramowania można prześledzić w cyklu publikacji: [113], [117], [118], [143].

Bieżąca wersja oprogramowania oparta jest na bibliotece rozszerzeń środowiska MATLAB-Simulink nazwanej *Simulink Real-Time Toolbox* (SLRT). Biblioteka ta pozwala na tworzenie aplikacji czasu rzeczywistego na podstawie schematu blokowego Simulinka i uruchamianie jej na dedykowanym sterowniku połączonym z obiektem fizycznym. Oprogramowanie to można również stosować do przeprowadzania symulacji i testów w czasie rzeczywistym, w tym układów szybkiego prototypowania i układów *Hardware-In-the-Loop* (HIL). *Simulink Real-Time Toolbox* dostarcza sterowniki obsługi urządzeń wejścia-wyjścia w postaci bloków Simulinka oraz pozwala na automatyczne generowanie kodu aplikacji czasu rzeczywistego. Proces generowania oprogramowania wymaga zainstalowania w środowisku MATLAB-Simulink dodatkowych bibliotek: *MATLAB Coder* i *Simulink Coder* oraz zewnętrznego kompilatora języka C/C++. Do aplikacji można także dołączać moduły napisane w języku Fortran lub C/C++ wewnątrz funkcji opakowujących typu *C-Mex S-Function* [161].



Rysunek 3.12. Ogólny schemat architektury głównego sterownika układu pomiarowo-kontrolnego

Przygotowanie schematu Simulinka i kompilacja odbywa się na komputerze macierzystym (*Host*). Gotowa aplikacja czasu rzeczywistego jest przesyłana do dedykowanego sterownika (*Target*) łączem RS lub Ethernet. Na sterowniku tym musi być uruchomione wcześniej oprogramowanie jądra czasu rzeczywistego. Komputer macierzysty pełni wówczas rolę interfejsu do aplikacji. Za jego pomocą można obserwować i rejestrować sygnały sterownika *Target* oraz stroić jego parametry. Wykorzystuje się do tego bloki schematu Simulinka lub specjalizowane moduły biblioteki *Simulink Real-Time*. Można także wykorzystać mechanizmy API dostępu do sygnałów i parametrów, aby operować aplikacją czasu rzeczywistego za pomocą graficznego interfejsu użytkownika zaprogramowanego w MATLAB-ie lub za pomocą aplikacji stworzonej w zewnętrznym środowisku C/C++. Rysunek 3.12 przedstawia ogólny schemat architektury oprogramowania układu

⁵ Biblioteka RT-Con nie była produktem firmy The MathWorks Inc. lecz polskiej firmy InTeCo Sp. z o. o. z Krakowa. Pozwalała na tworzenie oprogramowania czasu rzeczywistego współpracującego ze środowiskiem MATLAB-Simulink na platformach Windows 95/98/NT.

pomiarowo-kontrolnego. Szczegółowy opis poszczególnych elementów tego schematu zawierają kolejne części niniejszego rozdziału.

Aplikacja czasu rzeczywistego na sterowniku *Target* może pracować także bez łączności z komputerem macierzystym *Host* – w trybie *Stand Alone*. Wówczas dostęp do jej parametrów i sygnałów uzyskuje się za pomocą komend w linii poleceń komputera *Target* lub zewnętrznego względem tej aplikacji interfejsu graficznego, wykorzystującego dedykowane API [161].

Przedstawiana technologia pozwala na stosowanie w roli sterownika *Target* komputerów z procesorami wielordzeniowymi, matrycami FPGA oraz wykorzystywanie większości dostępnych metod wymiany danych z urządzeniami przemysłowymi. Jednakże w ostatnim dziesięcioleciu firma The MathWorks Inc. rozwinęła kooperację z producentem platform czasu rzeczywistego Speedgoat GmbH preferując rozwiązania sprzętowe tej firmy. Urządzenia niektórych innych firm nie są już wspierane przez nowe wersje biblioteki *Simulink Real-Time*. Stąd, dla zachowania możliwości obsługi starszych, ale wciąż jeszcze używanych w istniejącym układzie pomiarowo-kontrolnym urządzeń opisywane oprogramowanie powstało w środowisku MATLAB-Simulink w wersji 2016b⁶.

Aplikacja czasu rzeczywistego

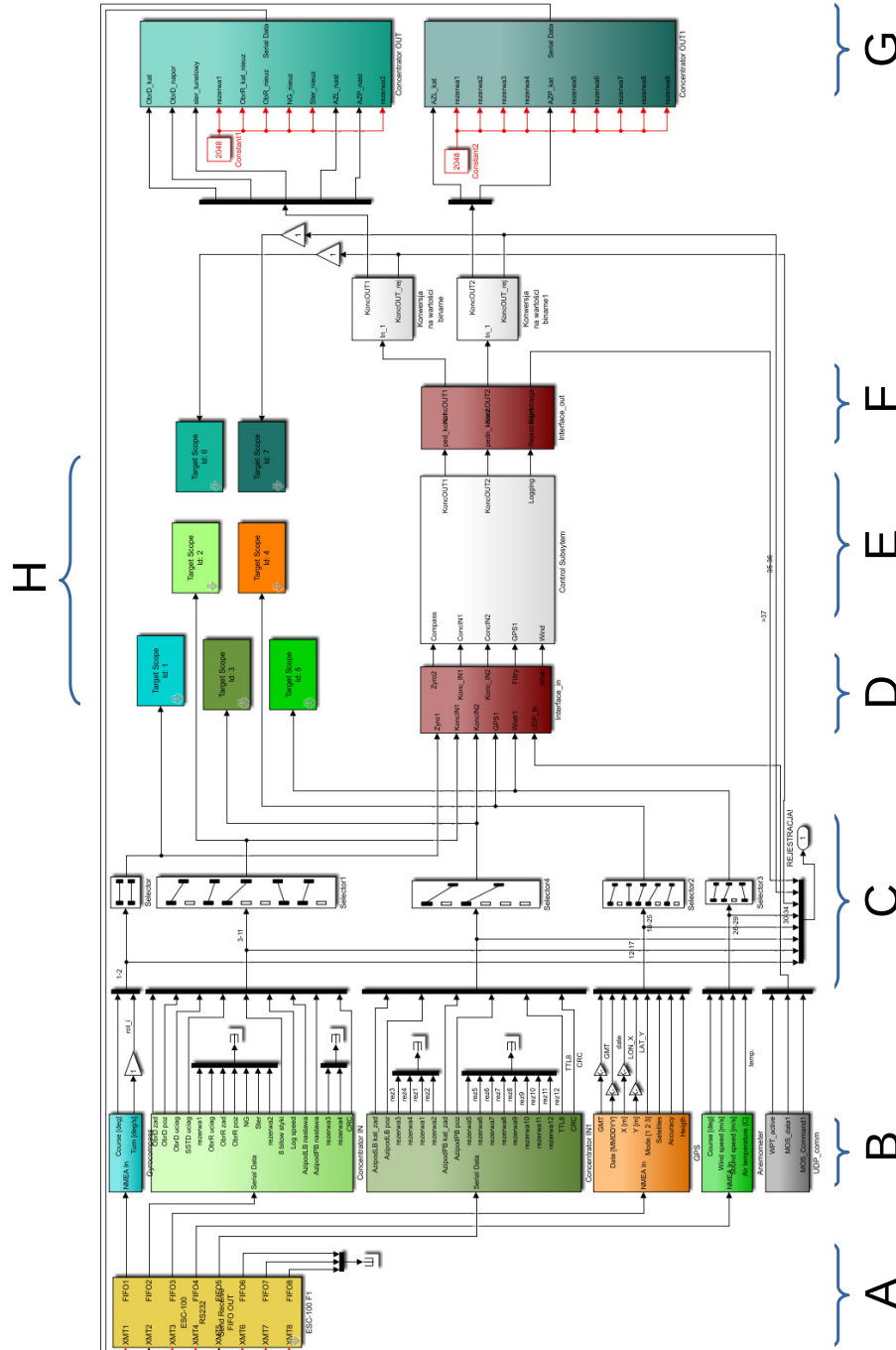
Aplikacja czasu rzeczywistego jest centralnym miejscem obróbki sygnałów w układzie pomiarowo-kontrolnym na statku treningowym *Dorchester Lady*. Jak zaznaczono wyżej została ona zaprogramowana w postaci diagramu Simulinka, który przedstawiony jest na rysunku 3.13.

Bloki i grupy bloków spełniających te same funkcje oznaczono kolejnymi literami alfabetu. W sekcji 3.3.1 przedstawiającej czysto programowy symulator środowiska badawczego tymi samymi literami oznaczono te same bloki lub ich funkcjonalne odpowiedniki.

- A** Blok ten odpowiada za dwustronną komunikację ze „światem” wokół układu regulacji. Zawiera on sterowniki obsługi wieloportowej karty łączy szeregowych ESC-100 przedstawionej w sekcji 2.2.3. Na schemacie systemu pomiarowo-kontrolnego 2.4 łączy te są oznakowane czerwonymi, kropkowanymi liniami.
- B** Kolumna bloków zawierająca dekodery sygnałów odbieranych łączami RS. Kolumna ta jest, w porównaniu ze schematem 3.11, uzupełniona o odbiornik i dekodery sygnałów z nadrzędnego układu zarządzającego trajektorią zadaną statku przesyłanych łączem UDP. Ten ostatni blok został przygotowany do wykorzystania w przyszłych wersjach środowiska badawczego w których „Układ Decyzyjny” (patrz: rysunek 3.1) będzie aplikacją działającą na osobnej platformie sprzętowej⁷.
- C** Selektory sygnałów i multiplexer zbierający dane do magazynu REJE-STRACJA
- D, F** Bloki specyficzne dla aplikacji czasu rzeczywistego, przenoszące sygnały i parametry o ustalonych etykietach, które są rozpoznawane, odczytywane i zapisywane w aplikacji graficznego interfejsu użytkownika

⁶ Firma The MathWorks Inc. prowadzi politykę wydawania dwóch wersji środowiska MATLAB-Simulink w roku. Wersje oznaczone są rocznikiem i literą „a” dla wydania wiosennego (marzec – kwiecień) oraz „b” dla jesiennego (wrzesień – październik).

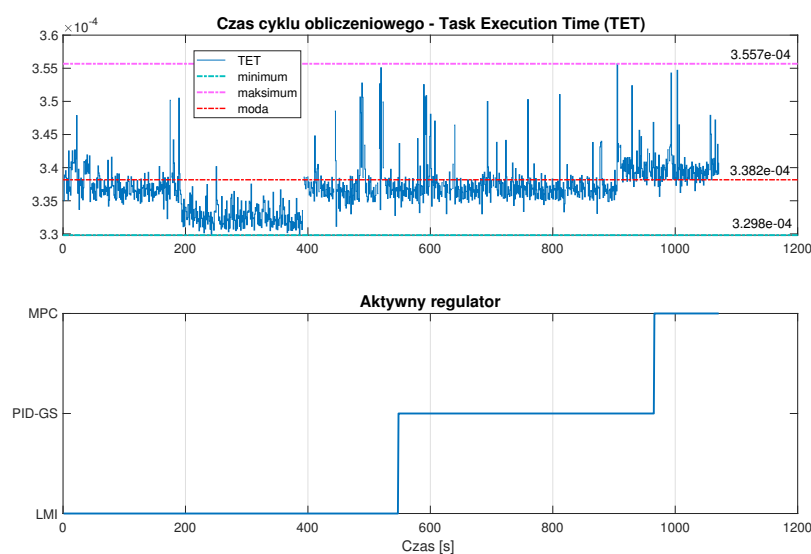
⁷ Bloku komunikacji UDP i związanych z nim modułów oprogramowania nie usunięto z prezentowanej wersji aplikacji czasu rzeczywistego, aby nie tworzyć kolejnej wersji oprogramowania układu pomiarowo-kontrolnego. Zwiększałoby to nakład pracy niezbędny do utrzymania spójności całego systemu.



Rysunek 3.13. Główny diagram układu pomiarowo-kontrolnego wykorzystywanego na modelu izomorficznym *Dorchester Lady*

- przedstawionej na stronie 66. Relacje pomiędzy interfejsem graficznym a innymi elementami układu sterowania przedstawiono na rysunku 3.12.
- E** Centralny blok, który jest kontenerem (blokiem typu *Subsystem*) zawierającym układ realizujący właściwe funkcje pomiarowo-kontrolne. Tożsamy z analogicznym blokiem na rysunku 3.11.
 - G** Bloki kodujące odpowiednie sygnały dla transmisji szeregowej za pomocą wieloportowej karty RS.
 - H** Oscyloskopy z biblioteki SLRT, które wyświetlają wybrane wartości na monitorze połączonym bezpośrednio do sterownika *Target*. Monitor ten, oznaczony cyfrą 4, jest widoczny w górnej części zdjęcia 2.5.

Taka struktura głównego schematu prowadzi do rozdzielania funkcjonalnego składników na blok kontenera zawierający elementy tworzące struktury regulatora oraz na podsystem komunikacji. Architekturę wnętrza bloku *Control System* przedstawiono w sekcji 3.3.3. Zasadniczą zaletą takiego podejścia jest to, iż rozdzielenie struktur utrudnia przypadkowe zmiany w części dotyczącej komunikacji spowodowane błędami identyfikacji bloków i sygnałów przez mniej doświadczonych użytkowników układu pomiarowo-kontrolnego. Część tą modyfikowano wielokrotnie rzadziej niż podsystem sterowania. Właściwie zmiany były tu wymuszane modernizacjami części sprzętowej układu pomiarowo-kontrolnego.



Rysunek 3.14. Przebieg zmian czasu obliczeń jednego cyklu (TET) w sterowniku *Target* podczas eksperymentu, w którym przełączano regulatory

Wszystkie schematy Simulinka, które wykorzystano w niniejszej rozprawie przetwarzane były na kod C w środowisku MATLAB-Simulink 2016b z wykorzystaniem bibliotek: *MATLAB Coder* (wersja 3.2), *Simulink Coder* (wersja 8.11), *Simulink Real-Time* (wersja 6.5) i *Stateflow* (wersja 8.8). Wygenerowany kod C kompilowany był do postaci wykonywalnej za pomocą pakietu Microsoft Visual C++ 2013 Professional. Transfer programu do komputera *Target* odbywał się łączem Ethernetowym *point-to-point* kablem UTP.

W trakcie wszystkich eksperymentów aplikacja, której diagram przedstawia rysunek 3.13, pracowała z okresem próbkowania 1 s. Jako algorytm

całkowania numerycznego przyjęto stało-krokovą metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu. W trakcie badań podjęto próbę oceny czasu reakcji aplikacji na zdarzenia w układzie. Pomiar przeprowadzone dla sterownika *Target* o parametrach przedstawionych w sekcji 2.2.3 i układu regulacji przedstawionego na schemacie 3.3.3 wskazały, że czasy jednego cyklu obliczeniowego TET (ang. *Task Execution Time*) [161] mieściły się w zakresie od 0,3298 ms do 0,3557 ms, a ich wartość modalna wynosiła 0,3382 ms. Zatem stwierdzono, iż omawiany układ spełnia wymogi sterowania w czasie rzeczywistym [89].

Rysunek 3.14 przedstawia w górnej części zarejestrowane wartości TET, a w dolnej wyróżnienie aktywnego regulatora dla pierwszych 1070 s eksperymentu. Są to dane z próby, której wyniki przedstawiono na rysunku 4.29. Przebieg zmian TET wskazuje, że przełączanie regulatorów nie ma widocznego wpływu na zmienność czasu cyklu obliczeniowego, a zakres tych zmian wynoszący w przybliżeniu 25 μ s, w porównaniu do okresu próbkowania, jest pomijalnie mały.

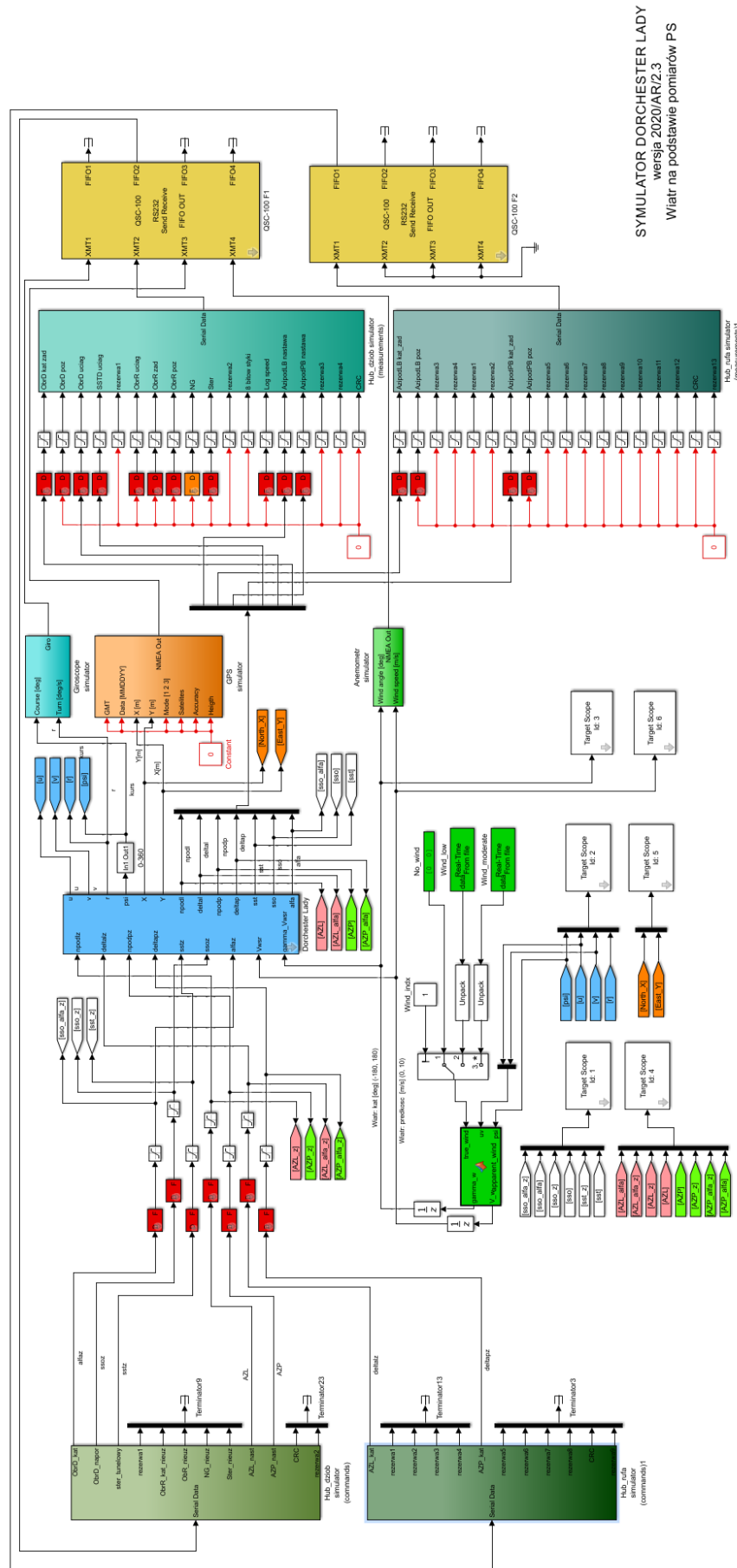
Model symulacyjny *Dorchester Lady* przystosowany do testów HIL-RT

Jak już zaznaczono wcześniej, wszystkie układy sterowania przed eksperymentami na statku treningowym testowano w układzie symulacji HIL (ang. *Hardware-In-the-Loop*). W testach tych aplikacja do sterowania w czasie rzeczywistym RT (ang. *Real-Time*) pozostawała niezmienną zarówno sprzętowo, jak i programowo i zachowywała swoją formę jak na rysunkach 3.12 i 3.13. Została ona jednak połączona nie z urządzeniami na statku treningowym, lecz z jego modelem pracującym w czasie rzeczywistym na osobnej maszynie tak, jak to pokazano na rysunku 4.1.

Wymagana była zatem nowa forma modelu symulacyjnego. Zrealizowano ją w formie diagramu, który pokazany jest na rysunku 3.15. Głównym elementem jest tu wyróżniony kolorem niebieskim blok modelu matematycznego *Dorchester Lady* identyczny z użytym podczas symulacji czysto programowej (patrz: sekcja 3.3.1). Pozostałe bloki mają tę samą funkcjonalność jak odpowiadające im kolorystycznie bloki na rysunkach 3.11 i 3.13. Jedyne różnice to grupa małych bloków w kolorze czerwonym, które realizują funkcje przetworników AC/CA oraz zastąpienie jednej ośmioportowej karty łączą szeregowych ESC 100 dwiema kartami czteroportowymi QSC 100.

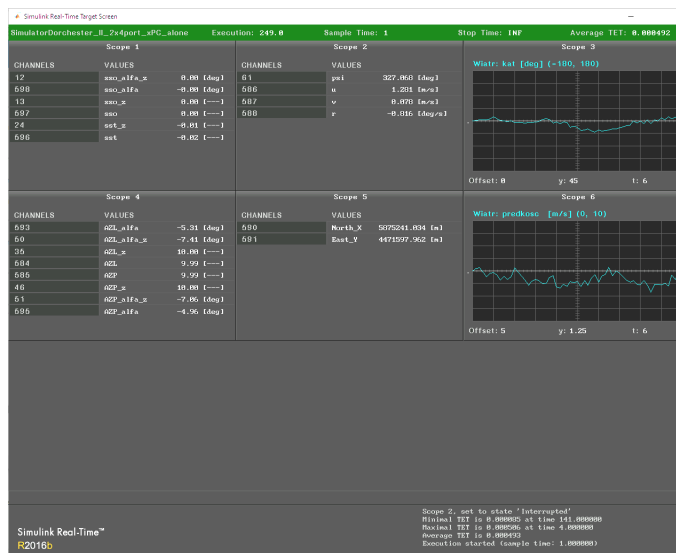
Oprogramowanie interfejsu użytkownika

Jak już wspomniano w początkowej części tego podrozdziału, oprogramowanie komputera macierzystego uzupełniono o graficzny interfejs użytkownika aplikacji czasu rzeczywistego. Biblioteka *Simulink Real-Time* umożliwia obserwację i rejestrację sygnałów oraz strojenie parametrów aplikacji na kilka sposobów. Najprostszą metodą jest wyświetlanie wartości poszczególnych sygnałów za pomocą oscyloskopów pracujących w czasie rzeczywistym, dedykowanych dla komputera *Target* (*Target Scope*), dostępnych w ramach tej biblioteki (patrz: rysunek 3.13). W omawianym przypadku, ze względu na potrzebę dokładnego określania wartości poszczególnych sygnałów, oscyloskopy te wykorzystywano w trybie numerycznym. Widok ekranu sterownika *Target* z oscyloskopami wyświetlającymi dane podczas prób w takim trybie przedstawia rysunek 3.16. Parametry aplikacji można stroić za pomocą poleceń wydawanych wprost z interfejsu CLI komputera *Target*.



SYMULATOR DORCHESTER LADY
wersja 2020/AR/2.3
Wzrost na podstawie pomiarów PS

Rysunek 3.15. Diagram symulacyjny modelu *Dorchester Lady* przeznaczony do pracy w układzie HIL



Rysunek 3.16. Zrzut ekranu komputera *Target* z oscyloskopami graficznymi i numerycznymi wyświetlającymi dane aplikacji czasu rzeczywistego podczas eksperymentu

Skomunikowanie komputera macierzystego ze sterownikiem *Target* możliwe jest także za pomocą narzędzi, które udostępnia moduł *Real-Time Explorer* będący częścią biblioteki *Simulink Real-Time*. Moduł ten zawiera panel, na którym można umieszczać komponenty graficzne do obserwacji i rejestracji sygnałów takie jak oscyloskopy *Host Scope*, wskaźniki graficzne czy bloki *File Scope*. Strojenie parametrów umożliwia gama komponentów takich jak przełączniki pokrętła i suwaki. Mechanizmy programowe dostępu do sygnałów i parametrów aplikacji czasu rzeczywistego uruchamianej na sterowniku *Target* są łatwe do wykorzystania, lecz *Real-Time Explorer* nie zapewnia elastyczności wystarczającej do budowy interfejsu zawierającego mapę elektroniczną akwenu i komponenty graficzne różne od standardowych. Znacznie większą swobodę tworzenia graficznego interfejsu użytkownika zapewnia podejście, w którym interfejs jest osobną aplikacją napisaną w języku MATLAB lub C/C++, w której komunikację zapewniają udostępnione funkcje API. W opisywanym rozwiązaniu przyjęto tę metodę. Interfejs napisano w języku MATLAB, stosując narzędzie *AppDesigner*.

Interfejs ten komunikuje się z aplikacją czasu rzeczywistego poprzez sygnały i parametry odpowiadającego jej schematu Simulinka. Typowym podejściem jest wówczas uruchamianie Simulinka na komputerze macierzystym w trybie *External*. W takim przypadku schemat Simulinka staje się interfejsem do aplikacji czasu rzeczywistego. Praca w trybie *External* blokuje wykorzystywanie mechanizmów opisanych powyżej dla *Real-Time Explorera*. Zadawanie parametrów do schematu Simulinka jest możliwe poprzez udostępnioną w tym celu strukturę. Jeżeli Simulink wykryje niezgodność wartości parametru w swoim bloku z odpowiadającą mu wartością w aplikacji na sterowniku *Target*, w najbliższym cyklu zegarowym prześle nową wartość do aplikacji. Zatem strojenie parametrów jest zadaniem łatwym. Natomiast nie istnieje, na poziomie schematu Simulinka, sprawny mechanizm, który pozwalałby na wysyłanie danych o zmianach wartości sygnałów w aplikacji *Target* do przestrzeni danych komponentów graficznych

interfejsu⁸. Mechanizm wymiany danych pomiędzy graficznym interfejsem użytkownika a aplikacją czasu rzeczywistego został zaznaczony na rysunku 3.12 strzałkami w kolorze czerwonym. Strzałka narysowana linią przerywaną odpowiada wspomnianemu wyżej zastrzeżeniu.

W rezultacie komunikację tę zrealizowano za pomocą funkcji `getsignal` i `setparam` działających bez pośrednictwa schematu Simulinka, z których pierwsza służy do pobierania wartości sygnałów, a druga do ustawiania parametrów w aplikacji sterownika *Target* (tg). Ramka poniżej zawiera przykład kodu do pobierania informacji o wartości sygnału o identyfikatorze `sstdID` przypisanym do linii posiadającej w strukturze schematu etykietę 'sst_z'. Etykieta ta odpowiada bieżącej wartości względnego naporu tunelowego steru strumieniowego.

```
1 % Get current BowThruster value
2 sstdID = app.tg.getsignalidsfromlabel('sst_z');
3 sstd=app.tg.getsignal(sstdID);
```

Przykład przekazania parametru z interfejsu do aplikacji czasu rzeczywistego obrazuje kolejna ramka. Przedstawia ona kod funkcji aktywowanej zmianą położenia suwaka o etykiecie 'BowThruster'. Jego nowa wartość 'Value' jest ustawiana jako własność o tej samej nazwie dla bloku 'sstd_man' w podsystemie 'Sterowania', który w strukturze tg odpowiada zadanej wielkości względnego naporu tunelowego steru strumieniowego.

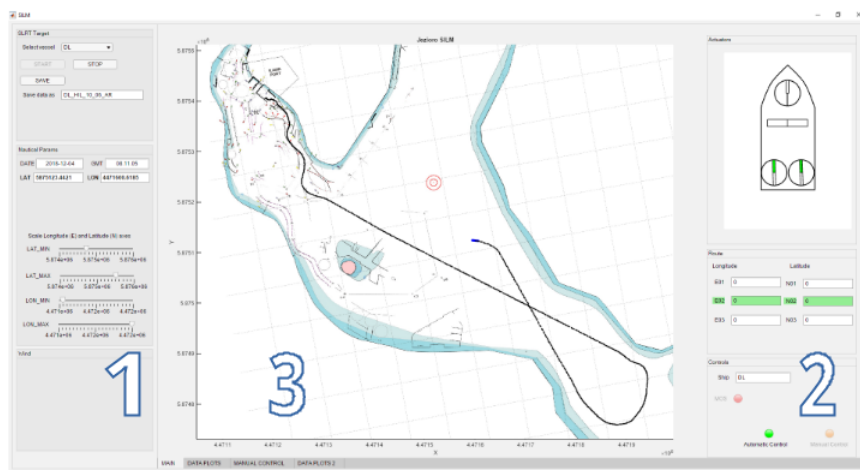
```
1 % Value changed function: BowThrusterSlider
2 function BowThrusterSliderValueChanged(app, event)
3     app.BowThrusterValue = app.BowThrusterSlider.Value;
4     setparam(app.tg, 'Sterowania/sstd_man', 'Value', ...
5         app.BowThrusterValue);
6 end
```

Dla odróżnienia od wymiany informacji za pośrednictwem bloków Simulinka omawiany sposób komunikacji oznaczony jest na schemacie 3.12 strzałkami w kolorze granatowym.

Taka organizacja przesyłu danych pomiędzy aplikacją i interfejsem użytkownika powoduje, iż niewłaściwym czynnikiem utrzymania poprawności komunikacji jest zachowanie spójności etykiet odpowiadających sobie składników struktury aplikacji czasu rzeczywistego (skompilowanego schematu Simulinka) oraz komponentów interfejsu graficznego. Stąd pochodzi istotna rola kontenerów przechowujących elementy o „standardowych” nazwach jaką pełnią bloki D i F oznaczone na schemacie 3.13 kolorem brązowym. Całość interfejsu graficznego została podzielona mechanizmem zakładek na trzy ekrany. Komponenty umieszczone na nich pogrupowano według kryterium funkcjonalności. Przedstawiono je poniżej w kolejnych sekcjach.

Ekran mapy elektronicznej ECS. Kluczowym elementem pierwszego ekranu przedstawiono na rysunku 3.17 jest mapa elektroniczna – ECS (ang. *Electronic Chart System*) jeziora Silm. Przy jej tworzeniu wykorzystano plik bitmapowy oraz bazę danych przygotowywane corocznie przez specjalistów z Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska. Współrzędne mapy

⁸ Uwaga ta dotyczy oprogramowania MATLAB-Simulink w wersji 2016b, którą stosowano przy tworzeniu omawianego systemu pomiarowo-kontrolnego. W bieżącej wersji biblioteki SLRT dostępne są narzędzia programowe, które nie mają tego ograniczenia.



Rysunek 3.17. Widok podstawowego okna graficznego interfejsu użytkownika układu pomiarowo-kontrolnego: 1 – Główne menu; 2 – Panel podstawowych parametrów ruchu statku; 3 – Mapa ECS środkowej części jeziora z wyświetloną trajektorią *Dorchester Lady* w trakcie realizacji eksperymentu

określone są w lokalnym, kartezjańskim układzie odniesienia i wyrażane są w metrach (patrz: tabela 2.3). Pozycja GPS określana jest dla elipsoidy WGS-84 i przeliczana do układu lokalnego z wykorzystaniem położenia lokalnej stacji referencyjnej RTK tak, aby minimalizować zniekształcenia wywoływane przez przekształcenie do układu kartezjańskiego⁹. Plik źródłowy mapy jest typu rastrowego stąd mapa i jej interfejs należą do kategorii RCDS (ang. *Raster Chart Display System*). Dopasowanie dystansów wyrażonych w pliku bitmapowym w pikselach do odległości mierzonych w lokalnym układzie współrzędnych za pomocą GPS, pozwala na wyświetlanie położenia sylwetki własnego statku oraz na prognozowanie i planowanie jego ruchu. Dzięki dostępnemu na jeziorze symulatorowi AIS można także rejestrować i wyświetlać na mapie ruch innych modeli izomorficznych na akwenie¹⁰.

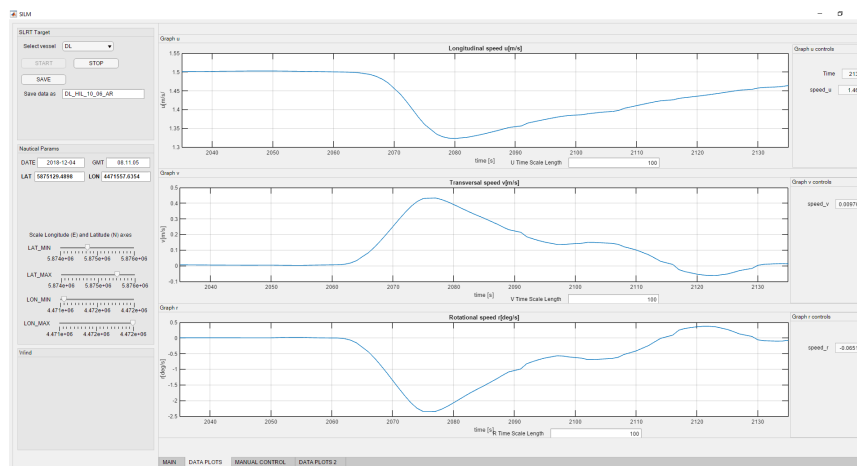
Odwzorowanie położenia wszystkich konstrukcji na jeziorze modyfikowane jest każdego roku wiosną, gdyż ze względu na zalodzenie jeziora, większa część konstrukcji jest demontowana na sezon zimowy. Podczas ich ponownego montażu wykonuje się planowane przebudowy oraz weryfikuje się położenie istotnych elementów poszczególnych konstrukcji. Zatem w każdym sezonie szkoleniowym mapa jest nieco inna.

Ekran wizualizacji parametrów procesu sterowania. Druga zakładka zawiera trzy okna oscyloskopowe do wyświetlania czasowych przebiegów wybranych sygnałów w układzie pomiarowo-kontrolnym (patrz: rysunek 3.18). Rozwiązania tego rodzaju nie występują w typowych interfejsach zintegrowanych systemów sterowania statkiem. Zakładka ta została zaprogramowana jako element omawianego układu pomiarowo-kontrolnego,

⁹ Informacje te uzyskano podczas bezpośrednich kontaktów z pracownikami FBŻiOŚ.

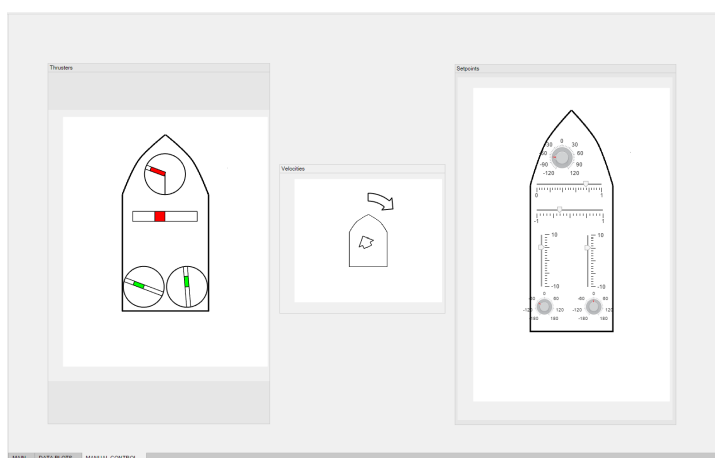
¹⁰ Dodatkowe informacje, dostarczane przez inne elementy interfejsu, pozwalałyby nazwać tę mapę uproszczonym symulatorem ECDIS (ang. *Electronic Chart Display Information System*) i w takiej roli mapa, którą na potrzeby niniejszego projektu dołączono do interfejsu pomiarowo-kontrolnego, stosowana jest podczas kursów szkoleniowych na jeziorze. Mając jednak na uwadze ścisłość terminologiczną, w niniejszej pracy będzie używany termin ECS [177].

gdyż podczas eksperymentów istnieje potrzeba bieżącej oceny tendencji zmian istotnych sygnałów. Natomiast dokładne wartości chwilowe pomiarów wyświetlane są na oscyloskopach czasu rzeczywistego oznaczonych literą H na rysunku 3.13, których ekrany wyświetlane są na monitorze sterownika *Target* (patrz: pozycja 4 na rysunku 2.5 oraz rysunek 3.16).



Rysunek 3.18. Widok zakładki interfejsu z wyświetlaniem czasowych przebiegów wybranych sygnałów z układu pomiarowo-kontrolnego

Ekran panelu manewrowego. Trzecie okno (patrz: rysunek 3.19) zawiera nastawniki wartości zadanych wszystkich pędników modelu *Dorchester Lady* i graficzne wskaźniki ich rzeczywistego stanu. Nastawniki i indykatory umieszczone są na tle schematycznych sylwetek statku. Pozwala to na szybką ocenę stanu manewrów. Komponenty te używane są podczas ręcznego sterowania statkiem treningowym. Z kolei w trybie sterowania automatycznego nastawniki są nieaktywne, a panel obrazujący stan pędników jest dostępny w oknie głównym interfejsu. Pomiędzy sylwetkami statków znajduje się wskaźnik chwilowych prędkości: postępowej i obrotowej kadłuba.



Rysunek 3.19. Widok okna panelu manewrowego z możliwością ręcznego zadawania parametrów i obserwowania stanu pędników modelu *Dorchester Lady*

Panele o funkcjonalności podobnej do przedstawionego na rysunku 3.19 są niemal obowiązkowym elementem zintegrowanego mostka na statkach z możliwością dynamicznego pozycjonowania kadłuba. W układzie omawianym w niniejszej pracy, na etapie manewrowania w porcie i automatycznego cumowania konfiguracja układu sterowania jest w zasadzie równoważna układom DP. Panel może wówczas odgrywać istotną rolę, jeżeli operuje nim osoba mająca doświadczenie w operowaniu takimi układami. Zazwyczaj jednak, podczas sterowania ręcznego *Dorchester Lady* wykorzystywano zadajniki i wskaźniki sprzętowe dostępne na pulpitych manewrowych (patrz: rysunek 2.5).

3.3.3. Implementacja układu wykorzystującego grupę regulatorów

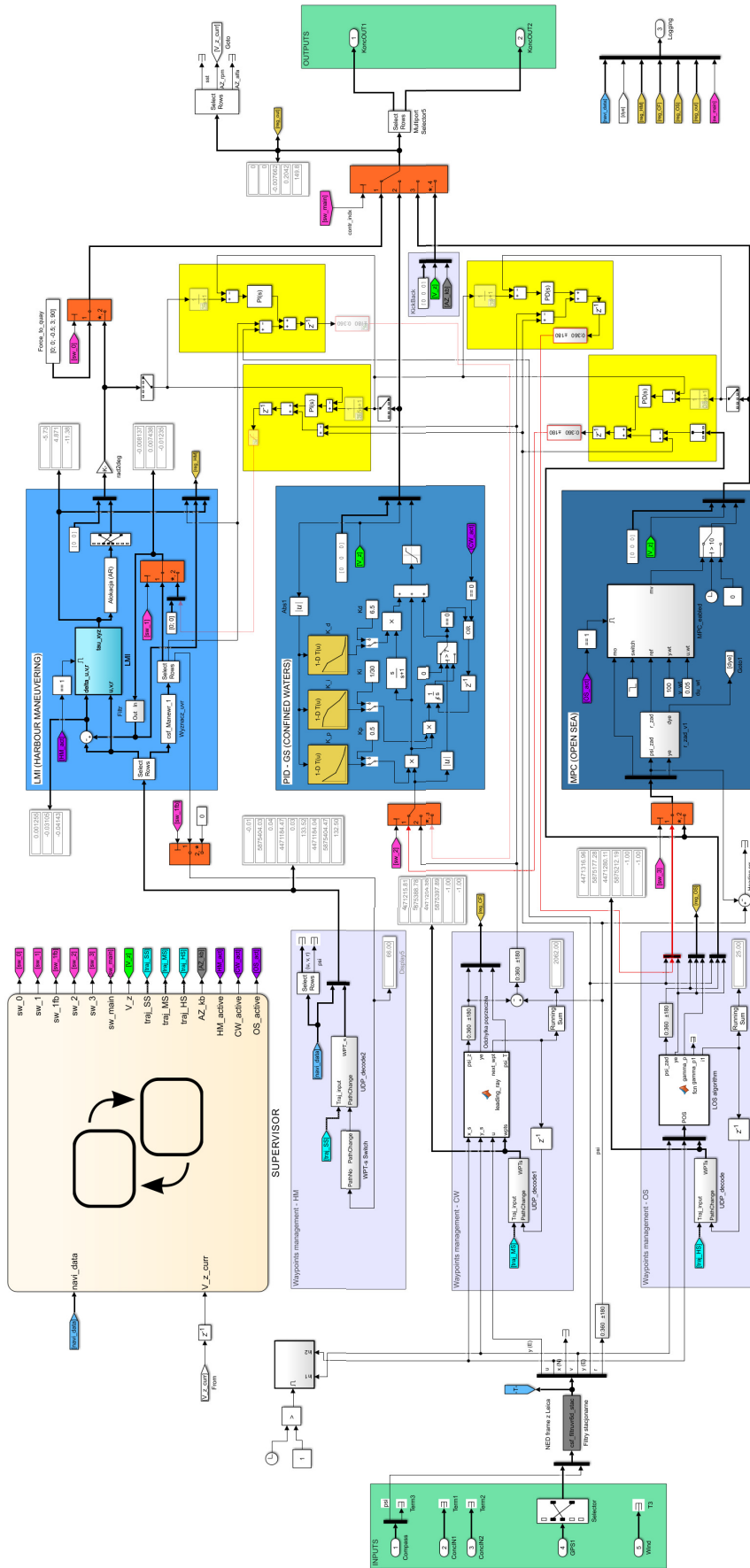
Zasadniczy moduł układu pomiarowo-kontrolnego zawierający bloki modelujące poszczególne regulatory wraz z mechanizmem ich przełączania pokazano na rysunku 3.20. Stanowi on realizację idei przedstawionej na ilustracji 3.1. Moduł ten na poprzednich schematach symbolizowany był przez jasnoszary blok o etykiecie *Control Subsystem*.

Główną rolę w tym diagramie odgrywają trzy grupy bloków przedstawione na tle niebieskich prostokątów o stopniowanych odcieniach. Reprezentują one struktury trzech omawianych w pracy regulatorów, kolejno od góry:

- ◆ LMI – który przeznaczony jest do sterowania wielowymiarowego podczas manewrów portowych (*Harbour Maneuvering*),
- ◆ PID-GS – który przeznaczony jest do pracy na wodach ograniczonych (*Confined Waters*),
- ◆ MPC – który przeznaczony jest do pracy na wodach otwartych (*Open Sea*).

Trzy niebiesko-szare prostokąty w lewej dolnej części diagramu to moduły przygotowania wartości zadanych dla poszczególnych regulatorów. W przypadku LMI są to bezpośrednio pozycja i orientacja statku dla trzech kolejnych punktów zwrotu, a dla pozostałych regulatorów parametry wyjściowe z algorytmów odpowiednio „LOS” oraz „LOS z promieniem wodzącym”, które przedstawiono w trakcie omawiania poszczególnych układów regulacji. W lewym górnym rogu znajduje się blok biblioteki *Stateflow* nazwany *SUPERVISOR*. Modeluje on układ przełączania regulatorów i jest omówiony w kolejnej sekcji tego podrozdziału. Bloki na jaskrawo-żółtym tle to modele regulatorów PD układów PBU. Przełączanie struktury jest natomiast realizowane za pomocą przełączników wieloportowych wyróżnionych kolorem pomarańczowym.

Diagram zawiera bloki pomocnicze, głównie wyświetlacze cyfrowe, które są bardzo wydajnymi narzędziami testowania poprawności działania poszczególnych modułów. Mogą one być wykorzystywane tylko w trybie symulacji programowej. Jednak, aby nie tworzyć zbędnych wersji oprogramowania, nie były one usuwane w trakcie eksperymentów czasu rzeczywistego, lecz jedynie komentowane. Podobnie dezaktywowane były bloki PBU związane z regulatorem LMI (patrz: zastrzeżenia na str. 58).



Rysunek 3.20. Diagram Simulinka zawierający układ sterujący modelem izomorficznym *Dorchester Lady* – centralny moduł sterujący układem regulatorów

Oprogramowanie układu decyzyjnego przełączania regulatorów

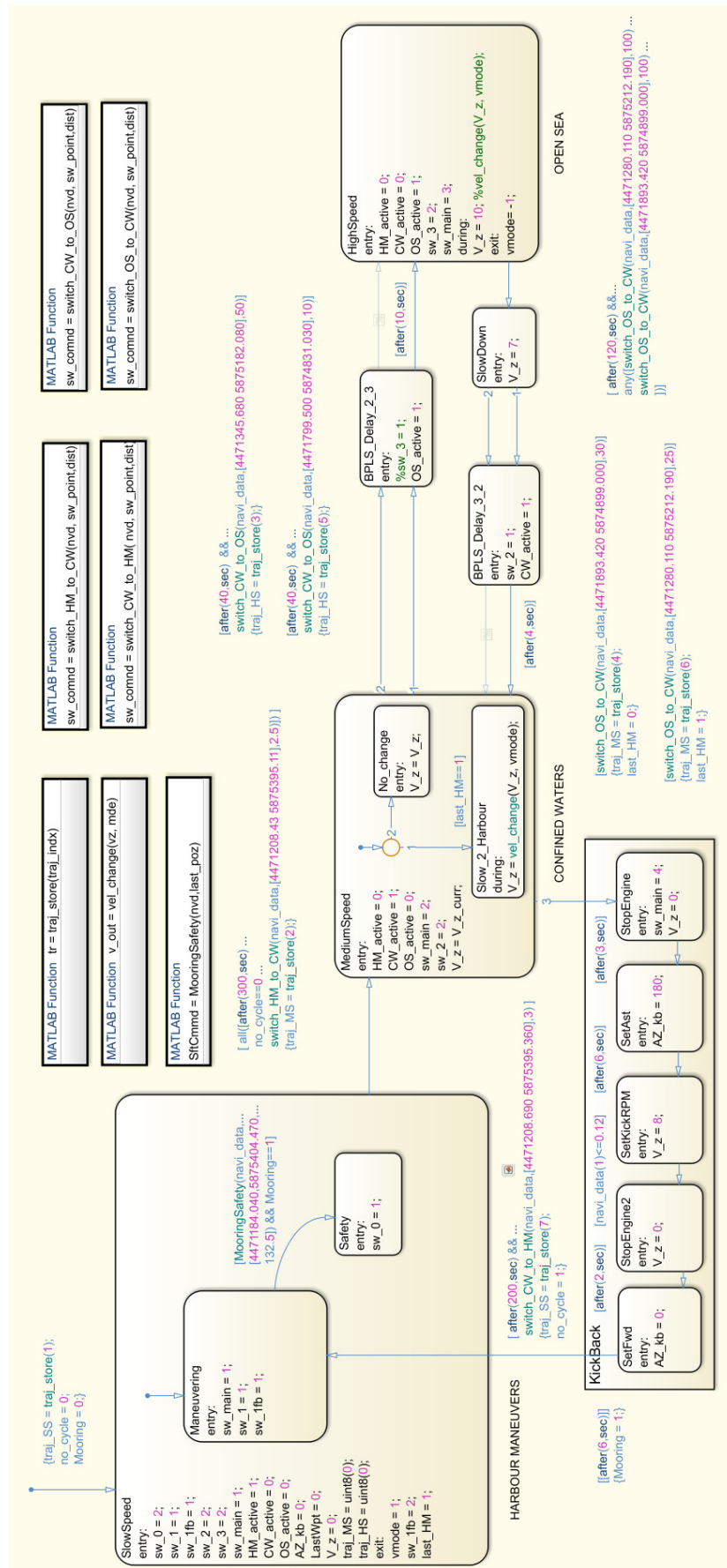
Za przełączanie w układzie PBU odpowiada układ decyzyjny (patrz: rysunki 3.1 i 3.10). Został on zrealizowany w postaci diagramu tranzycji stanów zaprogramowanego dzięki bibliotece *Stateflow* środowiska MATLAB-Simulink. Diagram ten przedstawiono na rysunku 3.21. Stany symbolizowane są przez czworokąty o zaokrąglanych narożnikach. Trzy z nich, o największych rozmiarach, odpowiadają trzem reżymom pracy układu regulacji. Grupa pięciu połączonych szeregowo bloków w dolnej części diagramu realizuje sekwencję stanów dla manewru „kopnięcia wstecz” napędem głównym podczas przechodzenia ze stanu pływania po wodach ograniczonych do stanu manewrowania w porcie. Wektory modelujące przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami obłożone są warunkami. Te z nich, które realizują przełączanie regulatorów, zaprogramowane są w postaci funkcji o nazwach rozpoczynających się od **switch_**. Definicje tych funkcji znajdują się w górnej części schematu. Wybór pomiędzy przełączaniem w układzie z blokiem PBU lub bez niego polega na konfiguracji elementów schematu, które oznaczone są zdwojonymi symbolami tranzycji.

Diagram *Stateflow* komunikuje się z nadrzędnym schematem układu sterowania za pomocą zestawu zmiennych wejściowych i wyjściowych. Najbardziej istotne z nich, które połączone są za pomocą bloków *Goto* z wejściami sterującymi bloków *Multiport Switch* (na schemacie 3.20) mają nazwy rozpoczynające się od znaków **sw_**.

Pozostałe trzy funkcje zdefiniowane wewnątrz diagramu realizują następujące działania:

- traj_store** – jest magazynem parametrów punktów zwrotu dla poszczególnych odcinków trajektorii. Parametry te są przesyłane na wejścia odpowiednich bloków układu sterowania w zależności od tego, które z zadań jest realizowane w danej chwili;
- vel_change** – zarządza zmianami prędkości zadanej napędu głównego szczególnie podczas wychodzenia i wchodzenia do portu;
- MooringSafety** – jest to funkcja pomocnicza. Wprowadzono ją na skutek uwag instruktorów prowadzących szkolenia dla FBŻiOŚ operujących pojęciem „dobrej praktyki morskiej”. Ustawia ona pędniki napędu głównego i tunelowego steru strumieniowego na działanie dopychające do kei, gdy model izomorficzny osiągnie końcowy punkt podróży oraz, gdy model pozostaje przy kei z układem sterowania w trybie automatycznym, a podróż jeszcze się nie rozpoczęła.

Prezentowany diagram *Stateflow* realizuje w bardzo niedoskonały sposób niewielki podzbiór funkcjonalności, jaką powinien reprezentować „Nadrzędny Układ Nawigacyjny” przedstawiony na ogólnym schemacie sterowania ruchem statku – na rysunku 1.4. Badania dotyczące realizacji takiego układu nadrzędnego, dla w pełni automatycznego statku prowadzone są w ostatnich latach przez wieloosobowe zespoły specjalistów [83], [133]. W niniejszej pracy starano się osiągnąć tylko taki poziom użyteczności tego składnika, który umożliwiałby testowanie projektowanych układów sterowania.



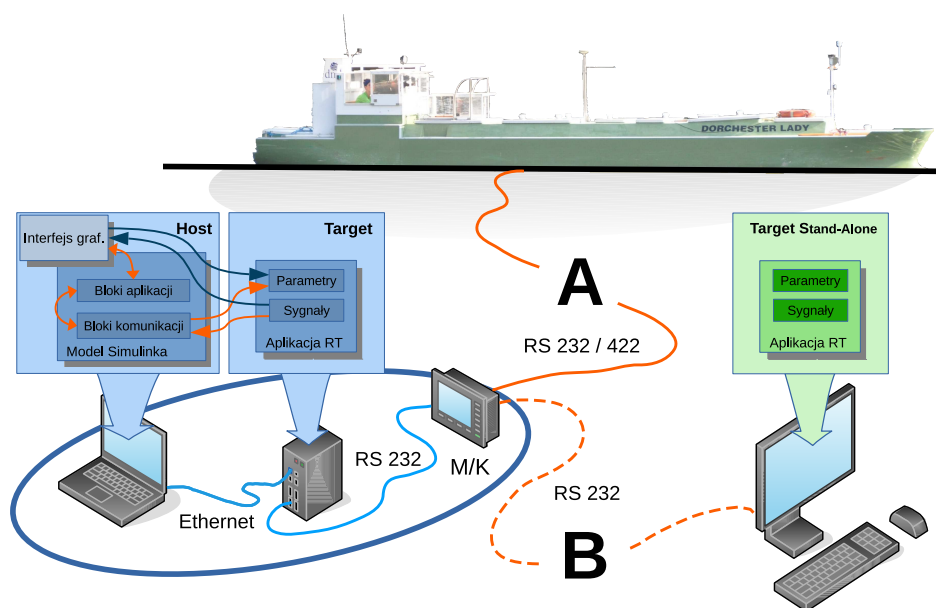
Rysunek 3.21. Widok struktury nadrzędnego układu decyzyjnego zrealizowanego w formie diagramu transycji stanów biblioteki *Sateflow*

4. Wyniki badań eksperymentalnych

W niniejszym rozdziale przedstawiono szczegółowe wyniki badań poszczególnych składowych, jak i całości zbudowanego układu sterowania. Eksperymenty przeprowadzono zarówno na drodze symulacji, jak i w układzie rzeczywistym. Przedstawiono także próbę syntetycznej oceny uzyskanych wyników, która będzie źródłem konkluzji zawartych w zakończeniu pracy.

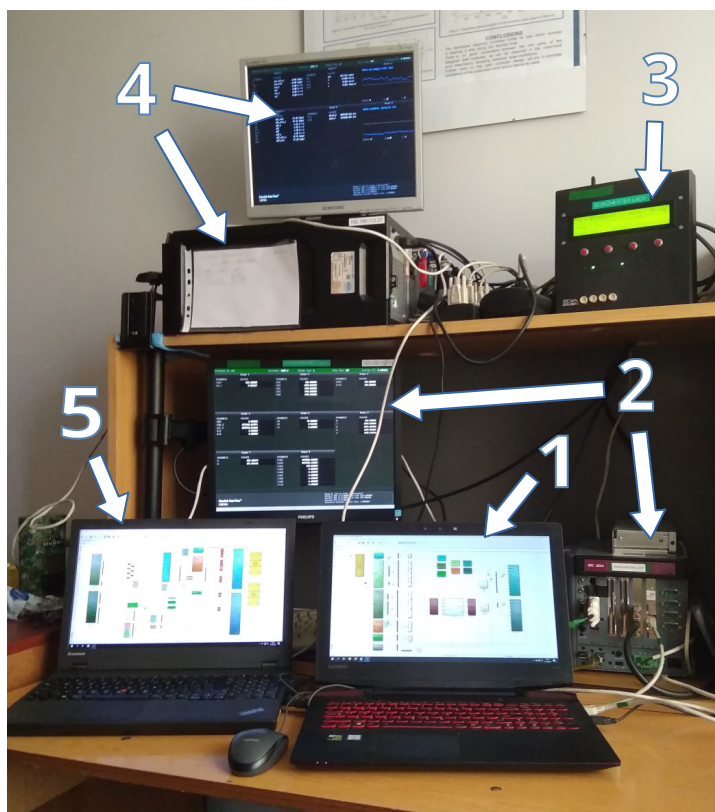
4.1. Metodologia badań opracowanego układu sterowania

Jak wspomniano wyżej, testowanie opracowanego układu sterowania przeprowadzono w dwóch konfiguracjach: z użyciem modelu matematycznego statku treningowego *Dorchester Lady* symulowanego na komputerze w czasie rzeczywistym w układzie HIL oraz bezpośrednio na statku treningowym pływającym po jeziorze, stanowiącym docelowy obiekt sterowania (patrz: rysunek 4.1). Zasadniczą zaletą takiego podejścia było zmniejszenie kosz-



Rysunek 4.1. Schemat ideowy konfiguracji testowych układu sterowania:
A – w układzie rzeczywistym (RT); B – *Hardware-In-the-Loop* (HIL)

tów i przyspieszenie procesu sprawdzania właściwości prototypu regulatora w porównaniu do bezpośrednich badań na obiekcie rzeczywistym. Symulacje programowe w środowisku Simulink były narzędziem weryfikacji poprawności zasadniczej funkcjonalności projektu na drodze wielu prób wykonywanych w znacznie przyspieszonej skali czasu. Symulacje HIL pozawalały natomiast na przetestowanie implementacji sprzętowej wygenerowanego kodu, jak i samego sprzętu. W przedstawianym układzie osiągnięto na tyle wysoką zgodność konfiguracji sprzętu do symulacji w wariantcie HIL z konfiguracją



Rysunek 4.2. Fotografia konfiguracji sprzętu do symulacji HIL w laboratorium UMG: 1 – Komputer *Host* regulatora; 2 – Sterownik *Target* regulatora z monitorem; 3 – Monitor/Konwerter łączy szeregowych; 4 – Komputer *Target* symulatora *Dorchester Lady*; 5 – Komputer *Host* symulatora

urządzeń instalowanych na modelu, że układ pomiarowo-kontrolny mógł być przenoszony pomiędzy tymi strukturami wyłącznie na drodze przełączenia wtyczek łączy interfejsów szeregowych. Całość sprzętu stosowanego podczas eksperymentów w konfiguracji HIL pokazano na rysunku 4.2.

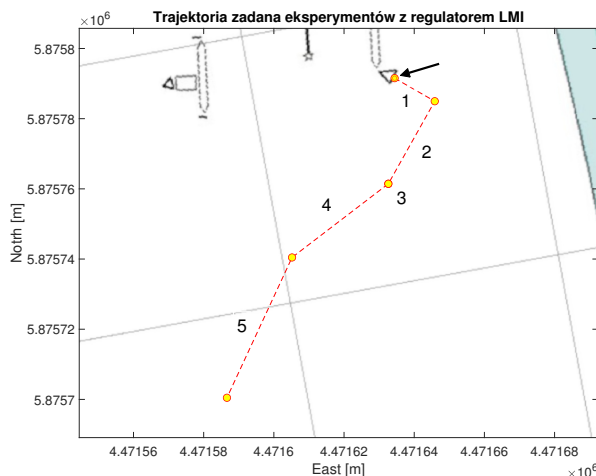
Podstawową wadą symulacji, niezależnie od ich formy, są niedokładności modelowania dynamiki samego statku oraz środowiska, w którym się on porusza. Głównym źródłem trudności w utrzymaniu zgodności modelu matematycznego z rzeczywistymi właściwościami *Dorchester Lady* był jej napęd azipodalny. Statek wyposażony w taki napęd charakteryzuje się słabą statecznością kursową. Stąd, przy napędach azipodalnych stosuje się często dodatkowe skegi w części rufowej kadłuba (patrz: rysunek 2.12). Słaba stateczność kursowa powoduje dużą zmienność zachowania statku w trakcie pływania wzdłuż linii prostej z niewielkimi kątami obrotów pędników. Statek jest wtedy bardzo czuły na niewielkie nawet rozkalibrowania i luzy w układzie kąta obrotu azipodów oraz na zmianę rozkładu mas w kadłubie. Niestety zjawiska takie obserwowane były na *Dorchester Lady* często ze względu na jej intensywną eksploatację podczas szkoleń. Co więcej, sylwetka tego modelu, typowa dla zbiornikowców LNG, charakteryzuje się dużą powierzchnią przekroju poprzecznego i podłużnego części nadwodnej kadłuba w stosunku do podwodnej, co powoduje dużą podatność tego typu jednostek na zakłócenia wiatrowe. Właściwości te, w połączeniu z brakiem dostatecznie dobrego modelu zmienności kierunku i prędkości wiatru na jeziorze podobnym do jeziora Silm, były drugim, istotnym źródłem rozbieżności wyników symulacji i pomiarów na obiekcie rzeczywistym.

Testy na izomorficznym modelu *Dorchester Lady* stanowiły ostatnią, najbardziej kosztowną i czasochłonną w stosunku do ilości materiału badawczego część eksperymentów.¹ Przeprowadzono je we wspomnianym już Ośrodku Manewrowania Statkami Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie-Kamionce wykorzystując układ pomiarowo-kontrolny, którego konfigurację przedstawiono na rysunku 4.1 (A).

W dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono odpowiadające sobie wyniki symulacji HIL i pomiarów w układzie rzeczywistym, które obrazują działanie poszczególnych składowych, jak i całości zrealizowanego układu sterowania. Wszystkie ilustracje w górnej swojej części prezentują zadane i zarejestrowane trajektorie modelu na tle elektronicznej mapy jeziora uzyskane zarówno dla prób symulacyjnych, jak i pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Poniżej fragmentu mapy przedstawiono wykresy czasowe wybranych sygnałów pozwalające ocenić właściwości procesu sterowania.

4.2. Badania wielowymiarowego regulatora wykorzystującego liniowe nierówności macierzowe LMI

Wielowymiarowy regulator LMI, którego algorytm przedstawiono w sekcji 3.1.1, przejmuje sterowanie statkiem w porcie podczas odchodzenia i dochodzenia do nabrzeża oraz cumowania. Specyfiką tego typu manewrów jest przesuwanie statku bokiem, skosem czy obroty wokół własnej osi z niewielką prędkością postępową. Nie nakłada się wówczas ograniczeń na kąt obrotu pędników azymutalnych, a ster strumieniowy jest intensywnie wykorzystywany.



Rysunek 4.3. Widok trajektorii zadanej eksperymentów z regulatorem LMI – początek zaznaczono strzałką

¹ Ze względu na duże zainteresowanie napędem azipodalnym, model od wczesnej wiosny do późnej jesieni jest niemal stale wykorzystywany podczas szkoleń prowadzonych przez FBŻiOŚ. Przygotowanie go do opisywanych pomiarów wymaga dodatkowego czasu na rekonfigurację zainstalowanych na nim urządzeń, stąd jego dostępność jest ograniczona. Ponadto, wszystkie eksperymenty, których wyniki przedstawiono w niniejszym rozdziale, przeprowadzono w 2020 roku, kiedy to epidemia SARS-Cov2 znacznie ograniczyła liczbę możliwych do przeprowadzenia sesji pomiarowych.

Aby ocenić właściwości omawianego układu regulacji, zaproponowano trajektorię zadaną ruchu statku w postaci sekwencji pięciu manewrów zdefiniowanych za pomocą punktów zwrotu. W wypadku sterowania wielowymiarowego, w którym uwzględnia się ruchy boczne i obrót, oprócz współrzędnych tych punktów w geograficznym układzie odniesienia, określa się także kąt kursowy, jaki ma być osiągnięty w danym punkcie. Umożliwia to zadawanie manewrów z dowolnym kątem dryfu. Zaprojektowaną trajektorię przedstawia rysunek 4.3. Poszczególne manewry wykonywane pomiędzy lub w kolejnych punktach zwrotu opisano w tabeli 4.1.

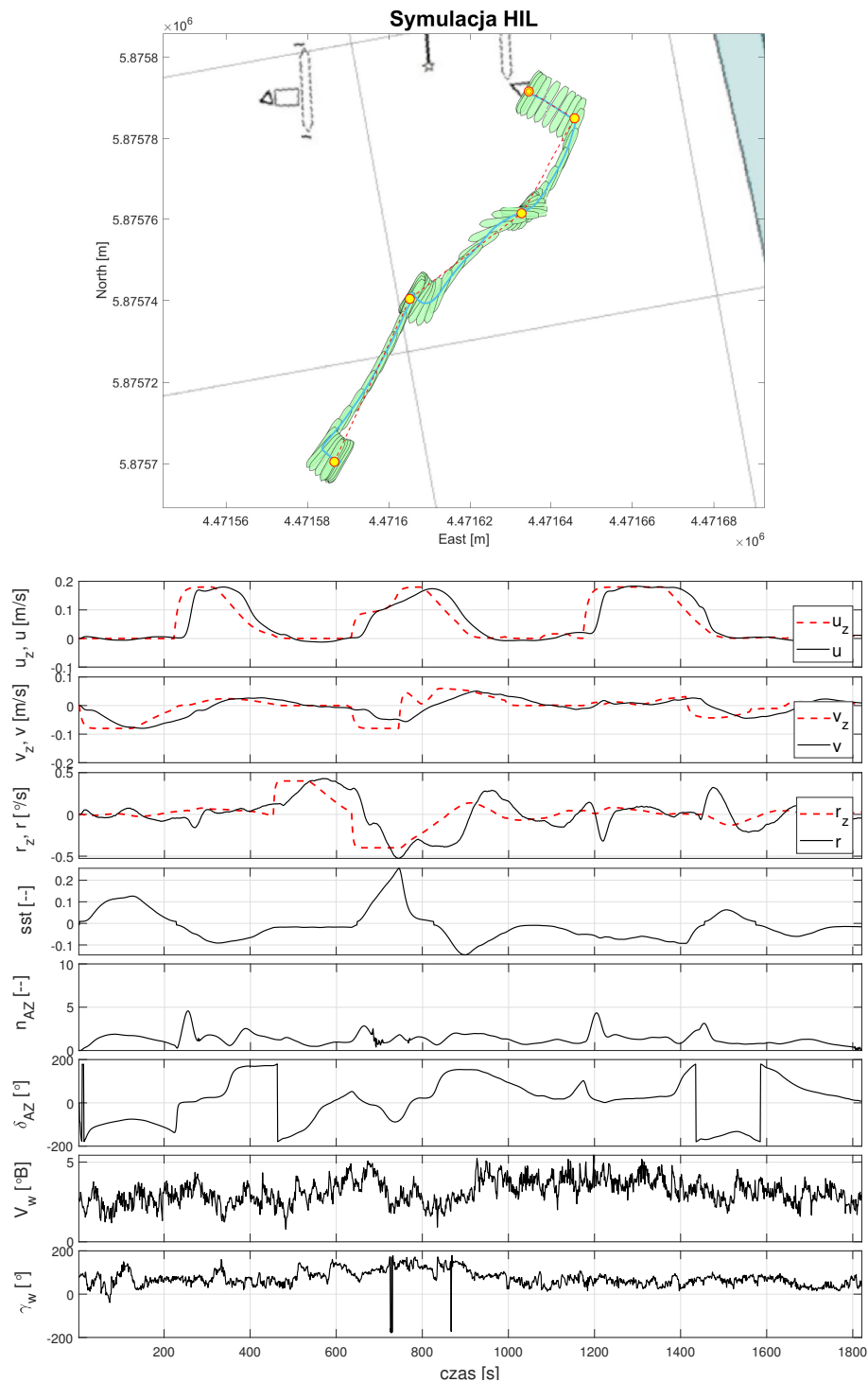
Tabela 4.1. Sekwencja manewrów testowych regulatora LMI

Manewr nr	Opis
1	Ruch boczny na LB na dystansie 11,2 m z zachowaniem kąta kursowego 210°.
2	Ruch do przodu na dystansie 27,0 m z zachowaniem kąta kursowego 210°.
3	Obrót w miejscu na PB o 60° do kąta kursowego 270°.
4	Ruch skosem do przodu na PB na dystansie 34,5 m z jednoczesnym obrotem na LB do kąta kursowego 210°.
5	Ruch naprzód na dystansie 44,1 m z zachowaniem kąta kursowego 210°.

Ze względu na możliwość kolizji z innymi jednostkami i urządzeniami w obrębie portu preferowano przeprowadzenie prób na jeziorze. Z drugiej strony na otwartym akwenie trudniej jest o wykonanie długotrwałych testów przy niewielkich zakłóceniach wiatrowych. Ostatecznie badania przeprowadzono na krańcach zatoki północnej korzystając z konstrukcji pomocniczych *Göteborg Oil Terminal* jako punktu startowego (patrz: rysunek 2.22).

Ograniczenia nałożone na prędkości manewrowania *Dorchester Lady* w porcie omówione na stronie 47 powodują, że nastawy względnych sił naporu pędników są niewielkie stąd bardzo duża podatność statku podczas prób na podmuchy wiatru. Drugim czynnikiem utrudniającym sterowanie w tym reżymie są, charakterystyczne dla azipodów, bardzo silne sprzężenia pomiędzy regulacją prędkości postępowej i kątowej.

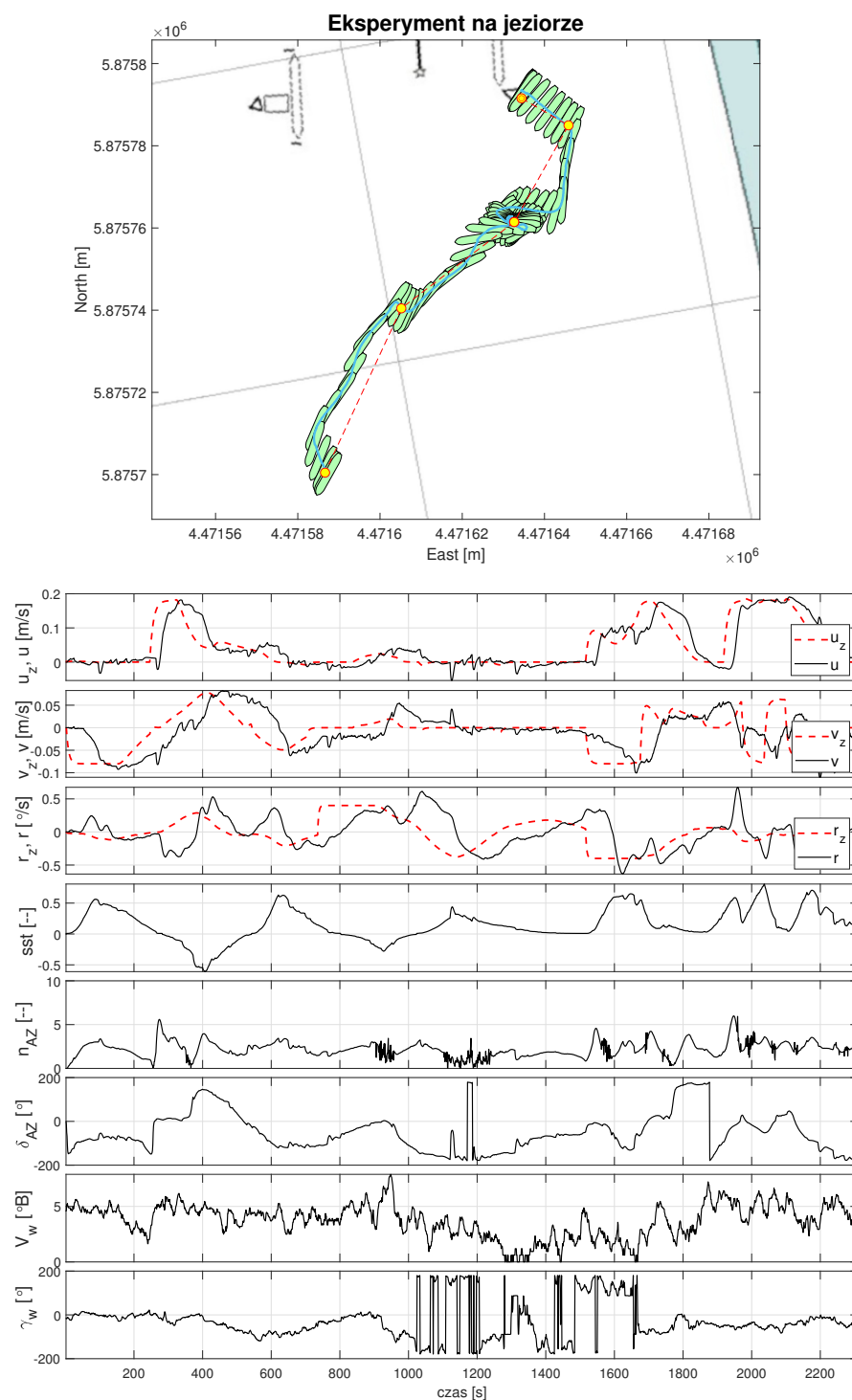
Ilustracje na kolejnych stronach przedstawiają wyniki eksperymentów symulacyjnych badanego układu regulacji oraz odpowiadających im prób na jeziorze. W górnej części, na mapie, zaznaczono kolejne punkty zwrotu i rzeczywistą trajektorię statku. Jego sylwetki rysowane są co 30 s. W dolnej części pokazano przebiegi zarejestrowanych sygnałów: u_z, u – zadanej i rzeczywistej prędkości podłużnej statku, v_z, v – zadanej i rzeczywistej prędkości poprzecznej statku, r_z, r – zadanej i rzeczywistej prędkości kątowej statku, sst – nastawy tunelowego steru strumieniowego, n_{AZ} – nastawy względnej prędkości obrotowej pędników gondolowych, δ_{AZ} – kąta wychylenia pędników oraz V_w, γ_w – odpowiednio: siły i kąta wiatru pozornego.



Rysunek 4.4. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-1-S; symulacja HIL działania układu z wielowymiarowym regulatorem LMI dla słabych i umiarkowanych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

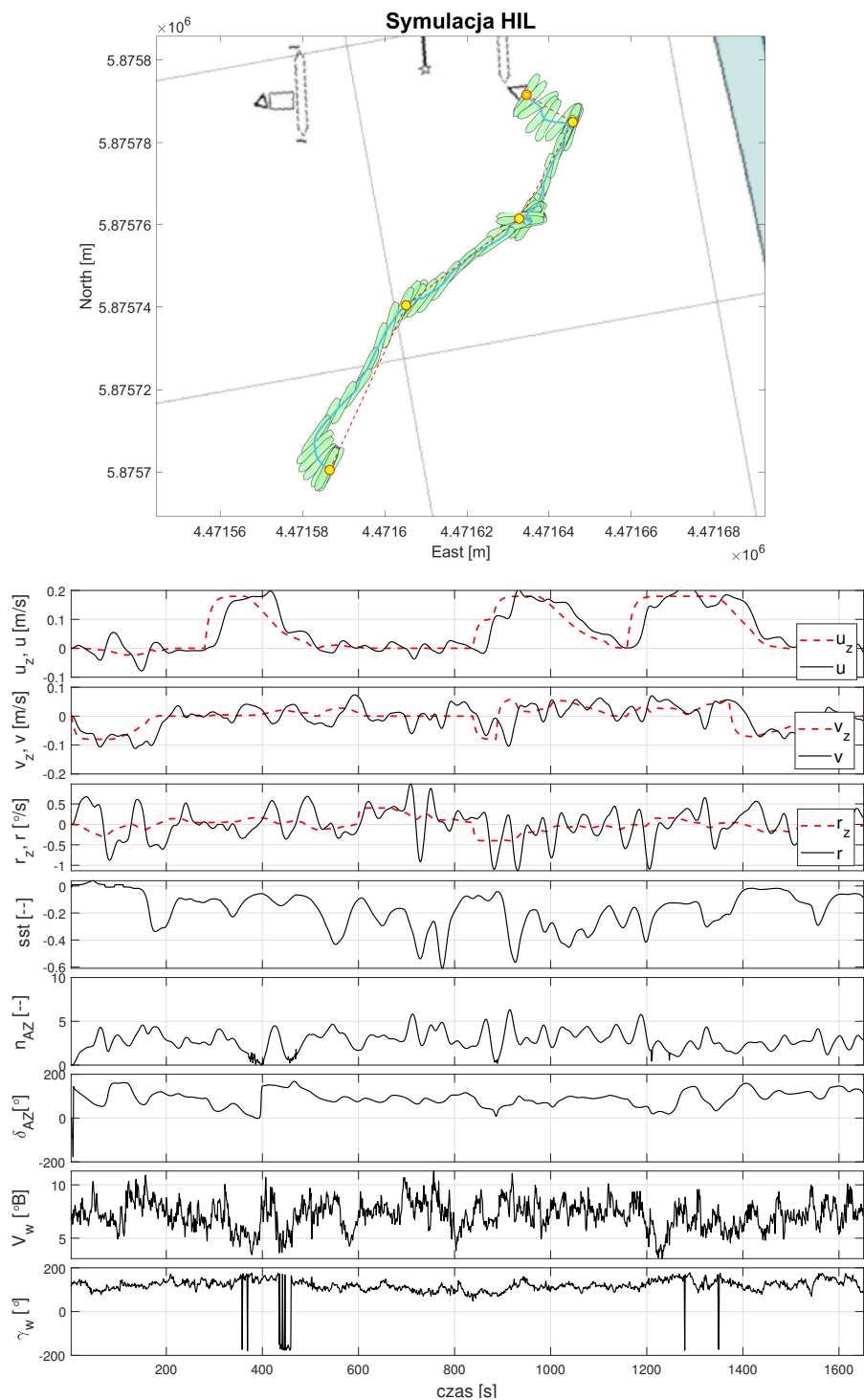
Podczas próby wiał słaby wiatr z prawej burty. Efekty sterowania prędkością podłużną u i poprzeczną v są dobre, a kątową r zadowalające. W chwilach szybkich zmian prędkości u wyraźnie daje o sobie znać efekt sprzężenia pomiędzy jej regulacją a sterowaniem prędkością r . Porównanie sygnałów zadanych i rzeczywistych prędkości u i r oraz nastaw n_{AZ} i δ_{AZ} azypodów dla ostatniego manewru zwalniania (1400...1500 s) stanowi tego dobitny przykład.



Rysunek 4.5. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-1-R; eksperyment na jeziorze z wielowymiarowym regulatorem LMI dla niewielkich i umiarkowanych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

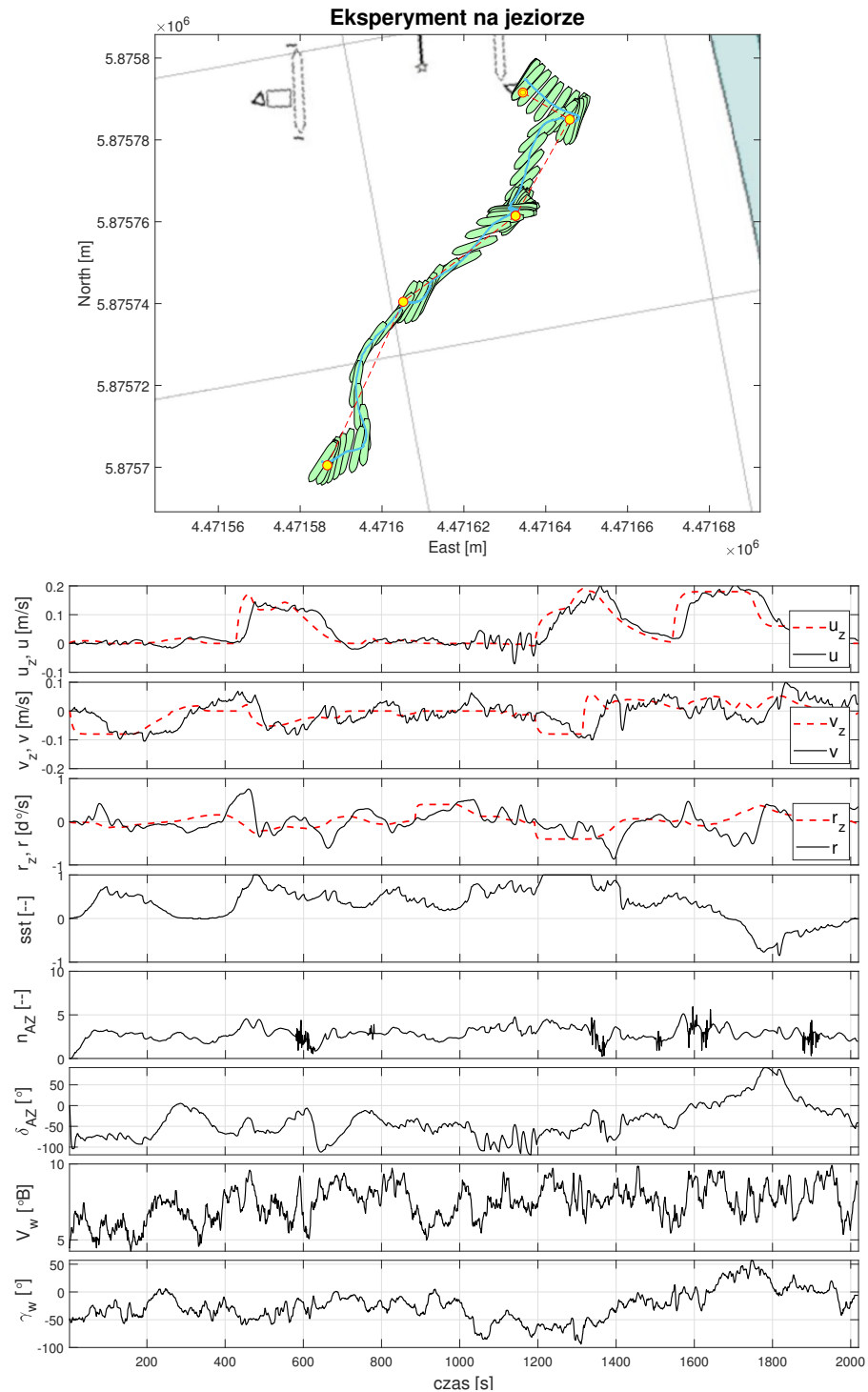
Podczas próby wiał umiarkowany wiatr z kierunku dziobu, z wyjątkiem okresu 1000...1700 s, kiedy wiał słabo z kierunków zmiennych. Podczas przełączania pomiędzy pierwszym a drugim manewrem, w okolicach 250 s, na „kopnięcie napędem” nałożyła się znacząca zmiana siły wiatru 2...5B. Spowodowało to rotację kadłuba na lewą burtę i wyraźny uchyb regulacji prędkości kątowej (300...400 s). Powrót na trajektorię trwał aż do trzeciego punktu zwrotu, co z kolei spowodowało długotrwałe próby spełnienia warunków przełączenia pomiędzy drugim a trzecim manewrem.



Rysunek 4.6. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-2-S; symulacja HIL działania układu z wielowymiarowym regulatorem LMI dla silnych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

W czasie próby wiał silny wiatr z prawej burty przechodzący od czasu do czasu w kierunku rufy. Taki charakter zakłóceń był źródłem reakcji azipodów, w której łatwo zauważyć wolnozmienny *offset*, zarówno w sygnale kąta obrotu δ_{AZ} (na prawą burzę), jak i prędkości obrotowej śrub n_{AZ} . Stworzyło to bardzo trudne warunki do regulacji prędkości – szczególnie kątovej r . Mimo bardzo dużych oscylacji tego sygnału statek zrealizował próbę, osiągając założone parametry dla wszystkich punktów zwrotu.



Rysunek 4.7. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby LMI-2-R; eksperyment na jeziorze z wielowymiarowym regulatorem LMI dla silnych zakłóceń wiatrowych

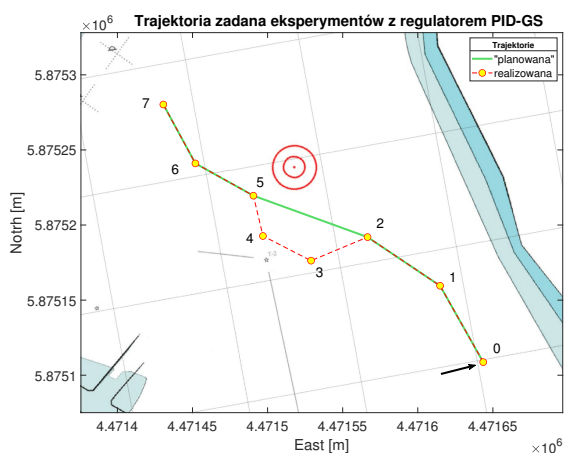
Komentarz:

W czasie próby wiał silny i porywisty wiatr z kierunków dziobowych. Stąd też średnie wartości nastaw pędników: $ssst$ i n_{AZ} , podobnie jak w próbie symulacyjnej, są wyraźnie większe niż podczas eksperymentów z niewielkimi zakłóceniami. Silny wiatr dziobowy stabilizuje kurs statku o sylwetce *Dorchester Lady*, a to paradoksalnie wspomagało działanie regulacji w kanale r . Zakłócenia odbiły się natomiast negatywnie na sterowaniu objema pozostałymi prędkościami. Łatwo zauważyć większą, w porównaniu z poprzednimi próbami, wariancję ich mierzonych wartości.

4.3. Badania regulatora adaptacyjnego PID-GS

Zadaniem regulatora PID-GS jest utrzymanie zadanych parametrów sterowania ruchem statku na wodach ograniczonych dla różnych nastaw prędkości obrotowej napędu głównego. Są to prędkości niższe niż marszowe, dlatego też dopuszcza się większy kąt obrotu pędników w porównaniu z pływaniem przy pełnych prędkościach. W tym przypadku było to $\pm 40^\circ$.

Zadana trajektoria ruchu statku ma zazwyczaj postać linii łamanej zdefiniowanej za pomocą sekwencji punktów zwrotu (ang. *waypoints*). Jest to charakterystyczne dla statku podczas manewrów w torze wodnym, w trakcie podejść do portów oraz pływania w cieśninach, rzekach i kanałach. Dlatego też badania regulatora PID-GS przeprowadzono według scenariusza odpowiadającego podanym warunkom. Trajektorię zadaną przedstawiono na rysunku 4.8. Składa się na nią osiem punktów zwrotu. Jej kształt



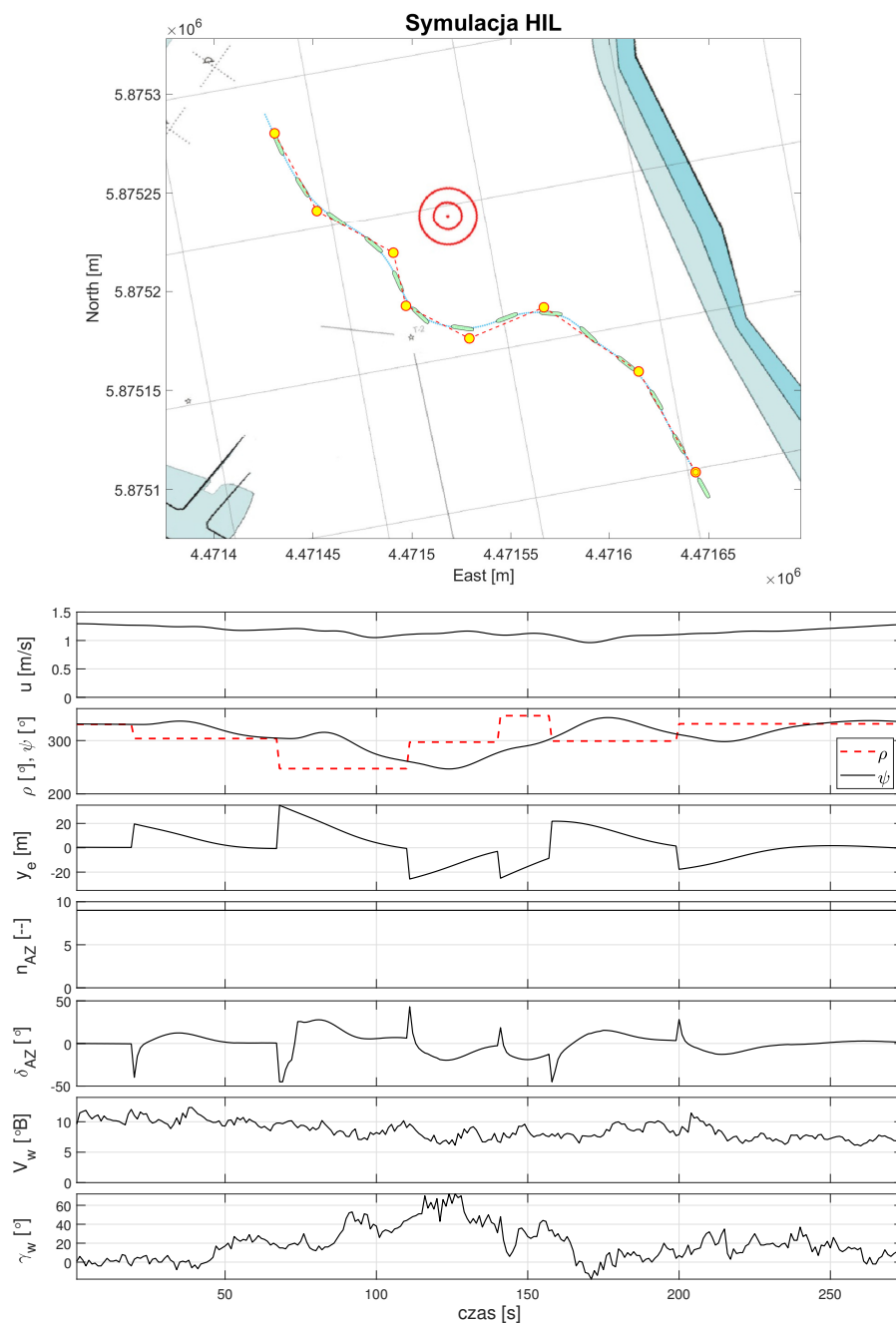
Rysunek 4.8. Ilustracja trajektorii zadanej dla eksperymentów z regulatorem PID-GS; punkt początkowy zaznaczono strzałką

dobrano tak, aby odpowiadał on manewrom z niewielkimi zmianami kursu ($\Delta\rho \leq 30^\circ$), które przerwane są „zdecydowanym” manewrem uniknięcia kolizji. Zmiany kąta kursowego odcinków trajektorii dla kolejnych zwrotów podano w tabeli 4.2. Zwroty 1 i 6 odpowiadają „zaplanowanej” trajektorii (linia ciągła), a zwroty od 2 do 5 manewrowi unikania kolizji, który nadaje ostateczny kształt trajektorii (linia przerywana).

Tabela 4.2. Sekwencja zwrotów w scenariuszu badań regulatora PID-GS

Nr zwrotu	1	2	3	4	5	6
Kierunek zwrotu	LB	LB	PB	PB	LB	PB
Kąt zwrotu $\Delta\rho$ [°]	26,70	56,47	49,80	49,48	47,56	32,34

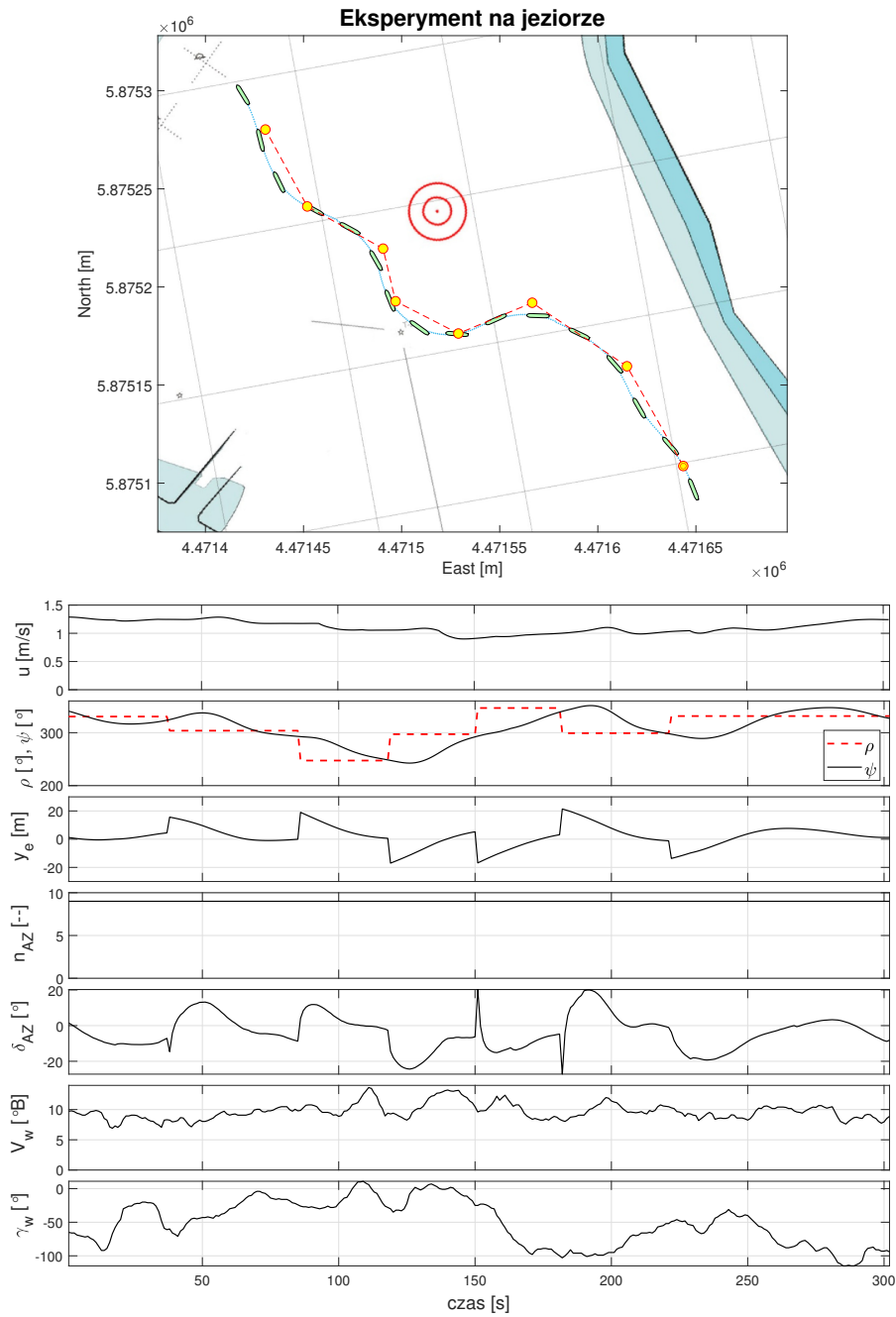
Kolejne rysunki prezentują wyniki symulacji i prób rzeczywistych z omawianym układem. Badano jego zachowanie dla zmiennych nastaw prędkości obrotowej napędu głównego i poziomów zakłóceń. Sylwetki statku na mapkach ilustrują zmianę jego pozycji i orientacji z okresem 20 s. Etykiety na wykresach przebiegu sygnałów oznaczają: u – prędkość podłużną statku, ρ – kąt kursowy bieżącego odcinka trajektorii, ψ – kurs statku, y_e – odchyłkę boczną od trajektorii, n_{AZ} – nastawę NG, δ_{AZ} – kąt wychylenia pędników oraz V_w, γ_w – odpowiednio siłę i kąt wiatru pozornego.



Rysunek 4.9. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-1-S; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 9$ oraz silnych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

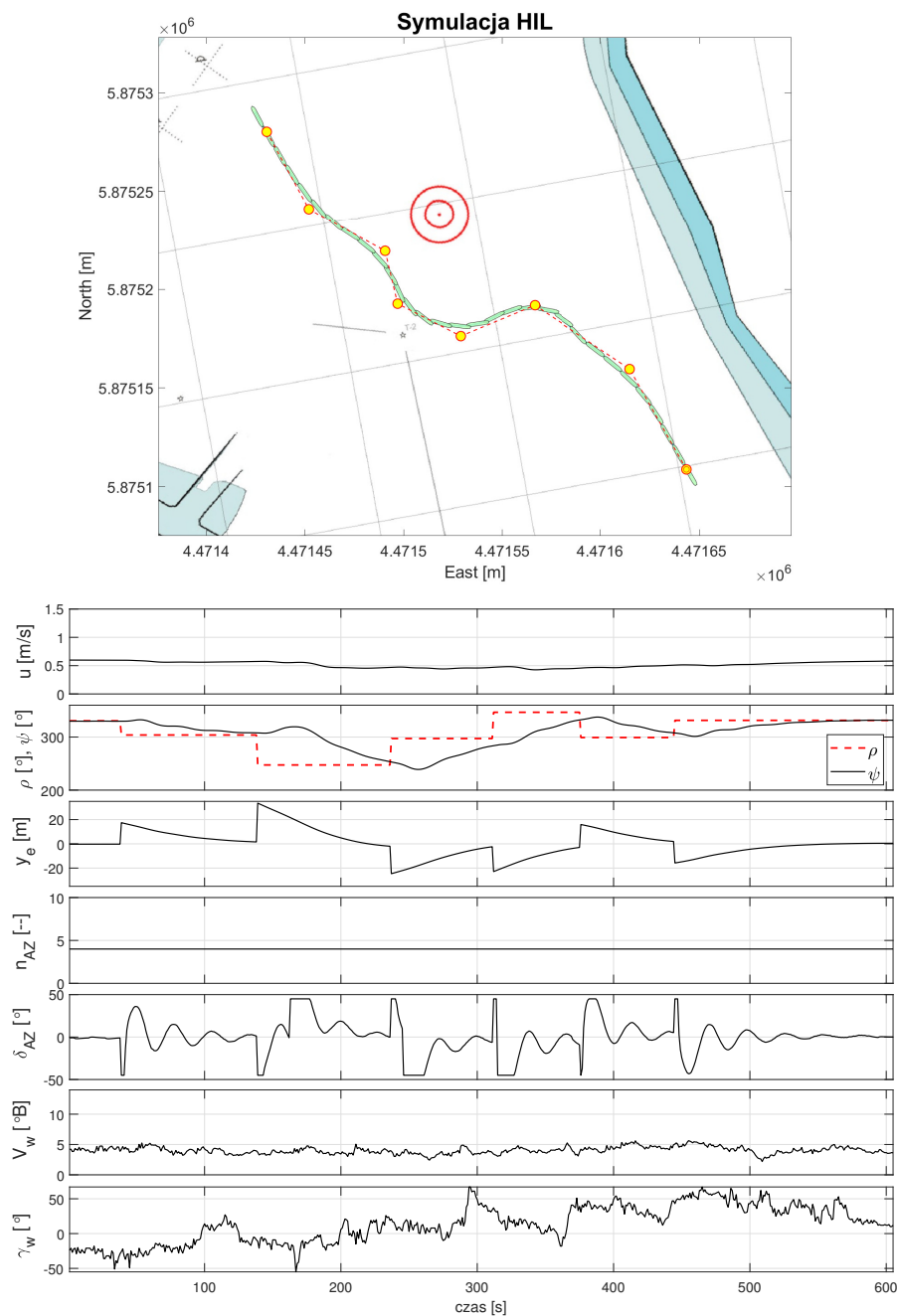
Próbie wykonano dla nastawy prędkości napędu głównego $n_{AZ} = 9$ i dla sygnału wiatru o znacznej sile osiągającej 8...10°B. Wiatr ten na pierwszym odcinku trajektorii wiał z kierunku przeciwnego do kursu statku. Tak silny wiatr od dziobu przeciwdziała dużym zmianom kursu, stąd do wykonania manewrów potrzebna jest mocna akcja urządzeń sterowych. Jest to widoczne na wykresie kąta δ_{AZ} , szczególnie przy drugim zwrocie. Silny wiatr i intensywne zmiany kąta obrotu pędników w środkowej części eksperymentu, prowadzą do wyraźnego spadku prędkości postępowej u , która odbudowuje się dopiero po zakończeniu zdecydowanych manewrów.



Rysunek 4.10. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-1-R; eksperyment na jeziorze z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 9$ oraz silnych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

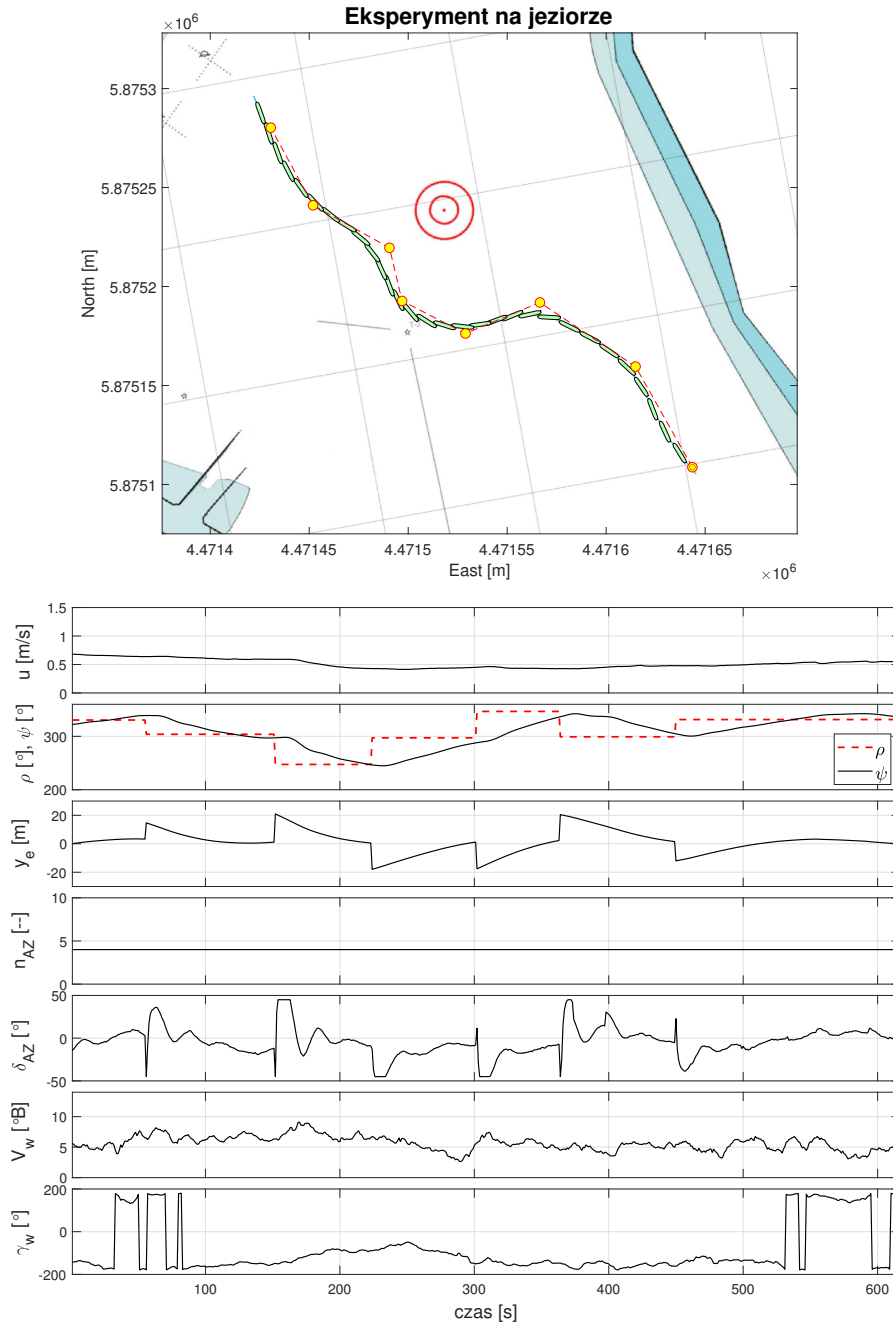
Próbie wykonano dla nastawy prędkości obrotowej pędników $n_{AZ} = 9$ w warunkach bardzo silnych zakłóceń. Siła wiatru pozornego V_w podczas całej próby oscylowała wokół 10°B . Jego kierunek γ_w przez większość czasu utrzymywał się w lewej, dziobowej ćwiartce. Powodowało to znaczny spadek prędkości postępowej u wzmacniany dodatkowo przez opory kadłuba wykonującego manewr „unikania kolizji” w środkowej części próby: 80...180 s. Mimo to układ regulacji skutecznie minimalizował odchyłkę boczną od trajektorii y_e , choć okupione to było znacznymi wartościami kąta obrotu pędników δ_{AZ} , które ze względu na różnicę kierunku wiatru i tak były mniejsze niż dla symulacji w zbliżonych warunkach (patrz: rysunek 4.9).



Rysunek 4.11. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-2-S; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 4$ oraz umiarkowanych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

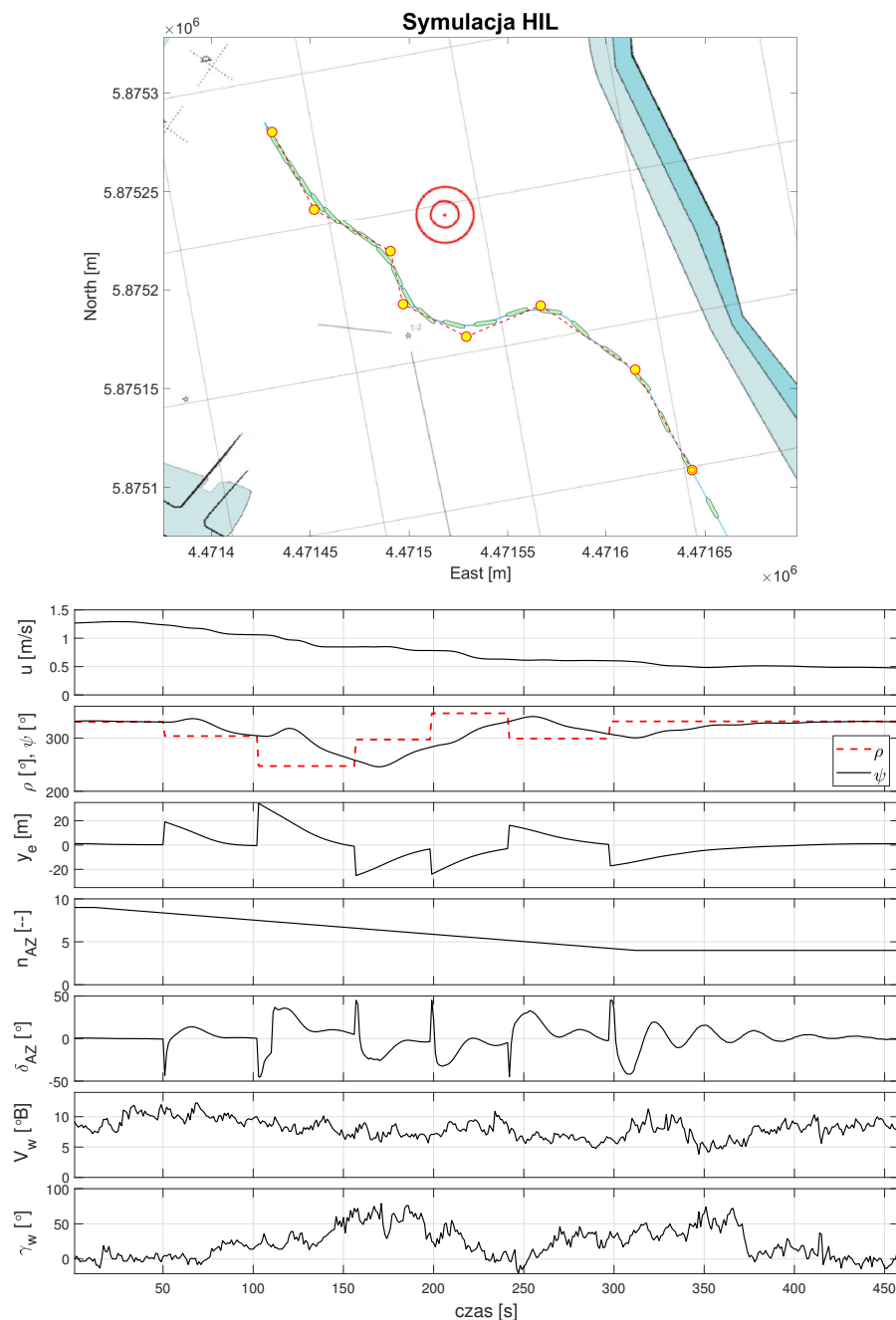
Próbie wykonano dla nastawy prędkości napędu głównego $n_{AZ} = 4$ i dla sygnału wiatru o umiarkowanej sile 4...5°B. Początkowo wiatr wiał od dziobu, by w drugiej połowie eksperymentu przejść na prawą burtę. Regulator bardzo dobrze nadąża za zmianami trajektorii, co jest widoczne zarówno na mapie, jak i na wykresie przebiegu y_e . Ze względu na zmniejszoną nastawę n_{AZ} odpowiadającą komendzie: „Wolno Naprzód” kąty wychYLENIA pędników δ_{AZ} są duże. Mimo to prędkość postępową u spada niewiele: z 0,6 do 0,5 m/s, a miejscami nieco poniżej 0,5 m/s.



Rysunek 4.12. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-2-R; eksperyment na jeziorze z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 4$ oraz umiarkowanych zakłóceń wiatrowych

Komentarz:

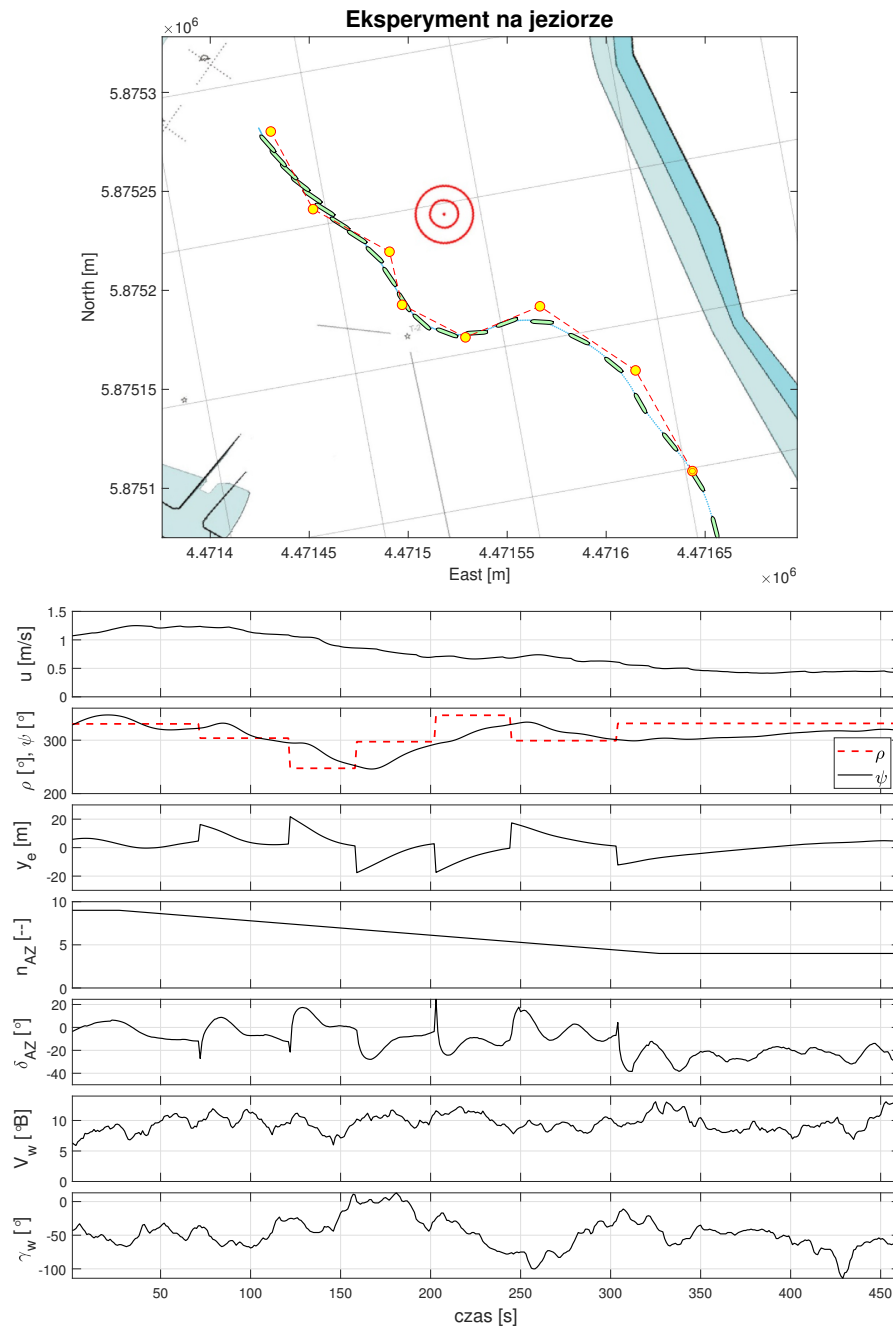
Próbie wykonano dla nastawy prędkości obrotowej pędników $n_{AZ} = 4$. Podczas eksperymentu wiał umiarkowany wiatr o sile zbliżonej do $V_w = 5^{\circ}B$ z kierunków rufowych. W takich warunkach statki o sylwetce podobnej do *Dorchester Lady* cechuje silna zawietrzność. Utrudnia to znacząco utrzymanie stałego kursu [131]. Mimo tego układ regulacji sprawnie minimalizował odchyłkę boczną y_e , lecz kąty obrotów pędników δ_{AZ} były bardzo duże, co spowodowane było ich mniejszą skutecznością przy obniżonej prędkości obrotowej śrub oraz wspomnianym działaniem wiatru.



Rysunek 4.13. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-3-S; symulacja HIL działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości napędu głównego n_{AZ} malejącej od 9 do 4 oraz silnego wiatru

Komentarz:

Próbę wykonano dla nastawy prędkości napędu głównego n_{AZ} malejącej monotonicznie w okresie 300 sekund od wartości 9 do wartości 4. Spadek ten rozpoczął się w 12 sekundzie eksperymentu. Adaptacja *Gain Scheduling* pozwoliła na sprawną redukcję odchyłki bocznej od trajektorii y_e . Stało się to, naturalnie, kosztem znacznego zwiększenia kątów obrotu azipodów δ_{AZ} . Łatwo to zauważyć porównując ich reakcje na pierwszy i ostatni zwrot na trajektorii, pamiętając o tym, że zadane kąty zwrotu w obu przypadkach różnią się nieznacznie (patrz: tabela 4.2).



Rysunek 4.14. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PID-GS-3-R; eksperyment w warunkach rzeczywistych działania układu z regulatorem PID-GS dla nastawy prędkości napędu głównego n_{AZ} malejącej od 9 do 4 oraz silnego wiatru

Komentarz:

Próbie wykonano dla nastawy prędkości obrotowej pędników, która początkowo wynosiła $n_{AZ} = 9$, a w 27 sekundzie zaczęła monotonicznie spadać do wartości $n_{AZ} = 4$, którą osiągnęła w 327 sekundzie. Podczas eksperymentu, z lewej ćwiartki dziobowej wiał bardzo silny wiatr, przekraczający $V_w = 10^\circ\text{B}$. Prędkość postępową statku u spadła, podobnie jak w próbie symulacyjnej, od wartości maksymalnej wynoszącej około 1,2 m/s do około 0,5 m/s. Mimo tak trudnych warunków układ regulacji minimalizował odchyłkę boczną y_e , choć działało to coraz wolniej. Ostatni zwrot trwał około 150 sekund i wymagał niemal stałego obrotu pędników o około 25° na lewą burtę.

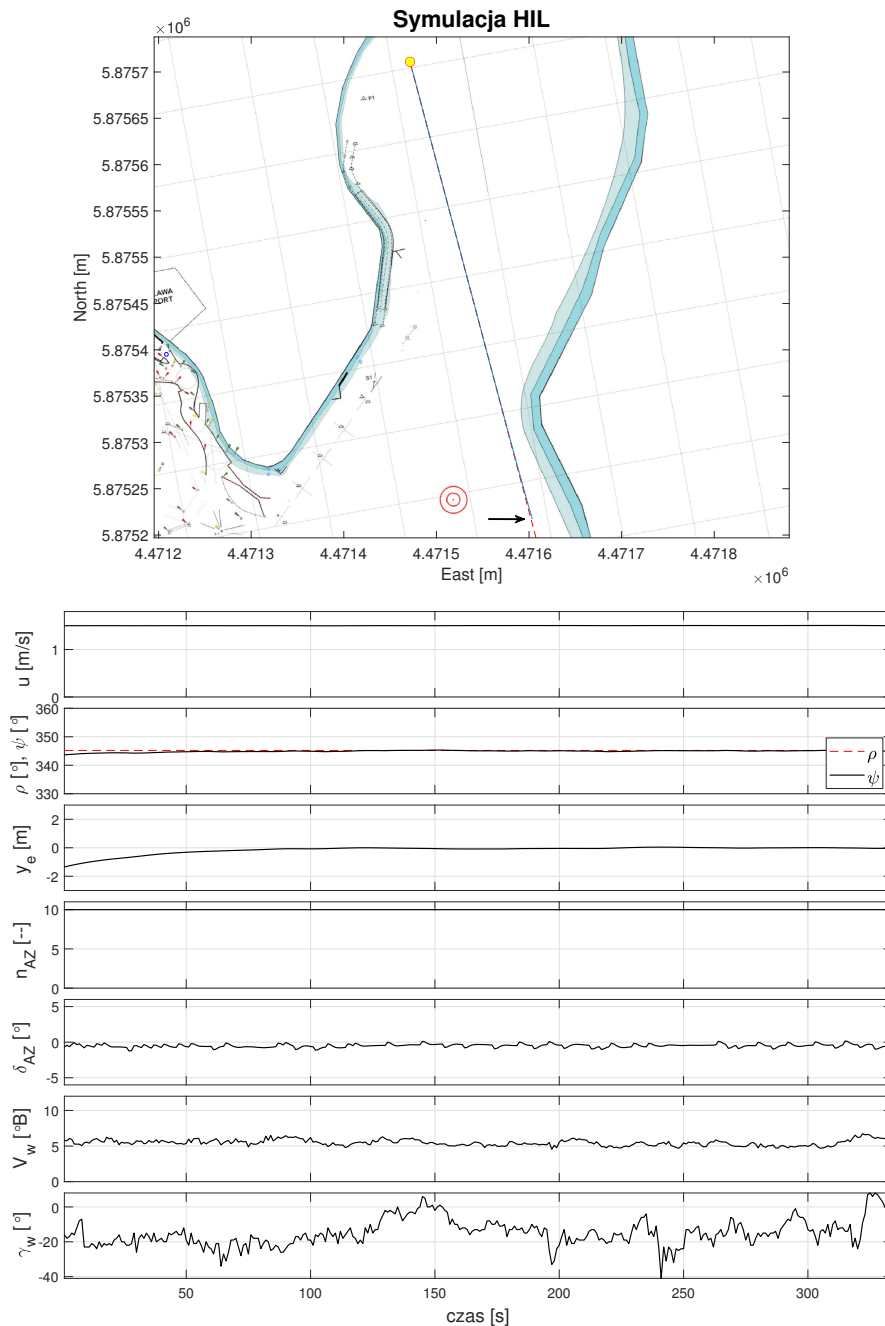
4.4. Badania regulatora predykcyjnego

Regulator predykcyjny, jak już wspomniano, dedykowany jest do zadania sterowania statkiem płynącym po wodach otwartych z prędkością eksploatacyjną. Zadanie to dla statków pełnomorskich charakteryzuje się niewielkimi i stosunkowo rzadkimi zmianami wartości kursu zadanego, które najczęściej wynikają z poprawki na znos i dryf lub zmiany kąta kursowego odcinka przybliżającego ortodromę, a także rzadko spotykanych w przypadku akwenów otwartych, manewrów unikania kolizji. Manewry takie wykonuje się zazwyczaj z dużym wyprzedzeniem za pomocą niewielkich zmian kursu i/lub prędkości. Wskaźniki jakości sterowania w tym reżymie uwzględniają przede wszystkim czynniki ekonomiczne, jak na przykład zużycie paliwa na 1 Mm. W kontekście procesu sterowania kursem statku przekłada się to na próbę minimalizacji myszgowania kadłuba wraz z jednoczesną minimalizacją oporów jego ruchu, które w istotny sposób zależą od częstości i amplitudy wychyleń steru. Jak wiadomo, jednoczesna minimalizacja odchyłki kursowej i kąta wychylenia steru to zjawiska przeciwstawne. Dychotomia ta znajduje swoje odbicie w powszechnie stosowanych wskaźnikach jakości sterowania statkiem na wodach otwartych.

Aby zbliżyć warunki badań regulatora predykcyjnego do przedstawionych wyżej, wybrano prostoliniową trajektorię ruchu w środkowej części jeziora, w której pojawiają się zakłócenia wiatrowe o mniej zmiennej, w porównaniu do akwenów w głębi zatok, charakterystyce. Kąt kursowy trajektorii zadanej dla wszystkich eksperymentów wynosił 345° , a nastawa prędkości obrotowej pędników 10, co odpowiada komendzie "Cała Naprzód". Ze względu na to, że dla prędkości marszowych opory ruchu pędnika ustawionego poprzecznie do kierunku ruchu statku byłyby olbrzymie, prowadzące nawet do jego uszkodzenia, standardowo podczas pływania na akwenach otwartych ogranicza się jego kąt obrotu. W przypadku opisywanych eksperymentów było to $\pm 20^\circ$. W niniejszej sekcji zaprezentowano dobrane parami wyniki symulacji i eksperymentów na jeziorze przeprowadzonych odpowiednio dla umiarkowanych i silnych zakłóceń wiatrowych.

Jak już wspomniano, ilustracje prezentujące wyniki eksperymentów składają się z dwóch części: mapy z trajektoriami statku i wykresów czasowych wybranych sygnałów. W przypadku badań regulatora MPC w górnej części, na mapie, przedstawiono zadaną (linia czerwona, przerywana) i rzeczywistą (linia ciągła niebieska) trajektorie statku. W dolnej części pokazano przebiegi zarejestrowanych sygnałów: u – prędkości podłużnej statku, ρ – kąta kursowego bieżącego odcinka trajektorii, ψ – kursu statku, y_e – odchyłki bocznej od trajektorii, n_{AZ} – względnej nastawy prędkości obrotowej śrub napędu głównego, δ_{AZ} – kąta wychylenia pędników oraz V_w, γ_w – odpowiednio: prędkości i kąta wiatru pozornego.

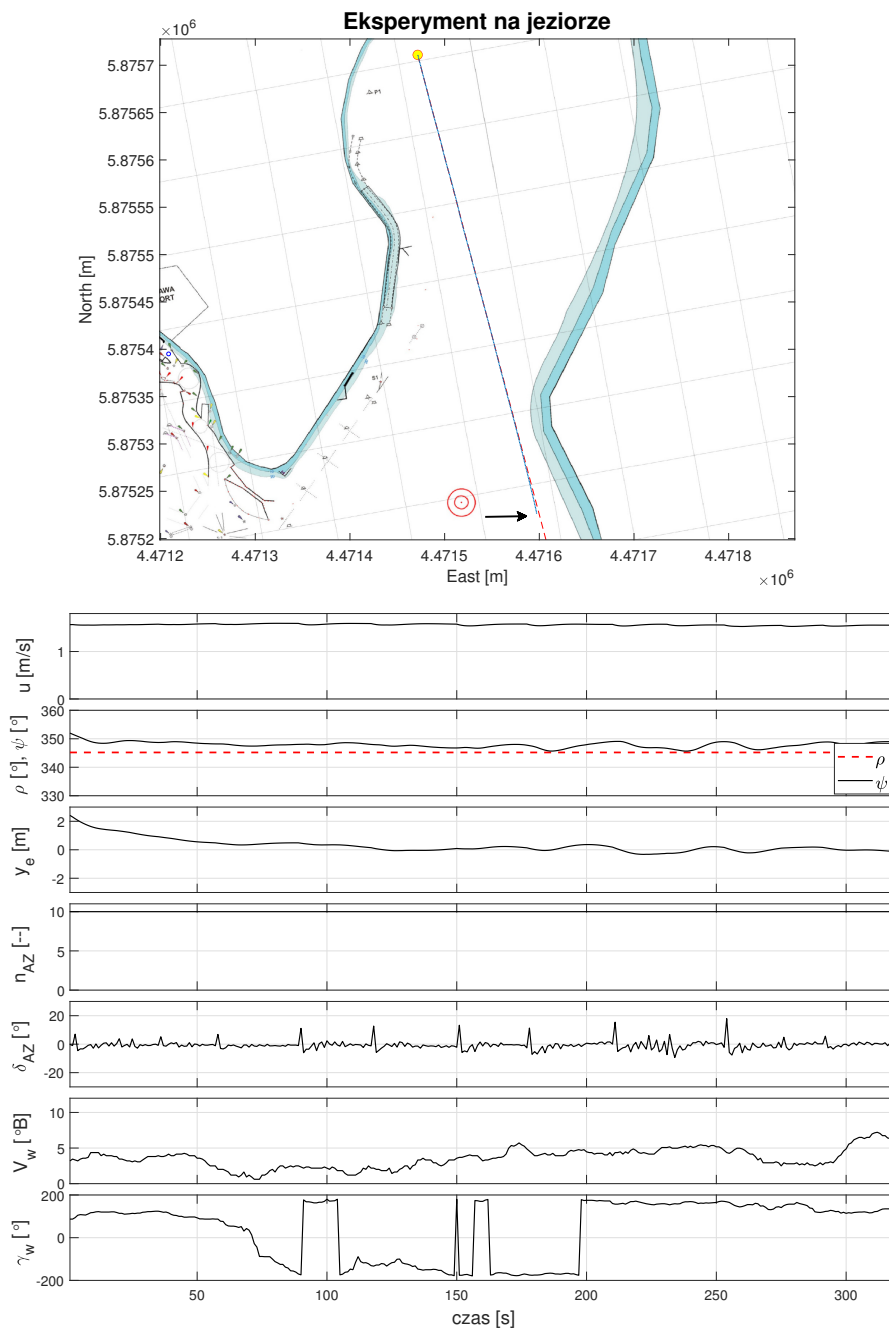
Aby zachować od początku eksperymentu prędkość statku blisko zadanej wartości maksymalnej, najazd na trajektorię miał postać łagodnego łuku. Stąd w początkowej fazie pomiarów rejestrowano wyraźnie widoczną na mapach i przebiegach czasowych większą wartość odchyłki bocznej, która zanikała wraz ze stabilizowaniem ruchu statku na trajektorii. Miejsce początkowe eksperymentu oznaczono strzałką.



Rysunek 4.15. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-1-S; wyniki symulacji HIL dla układu z regulatorem MPC przy umiarkowanych zakłóceniach wiatrowych

Komentarz:

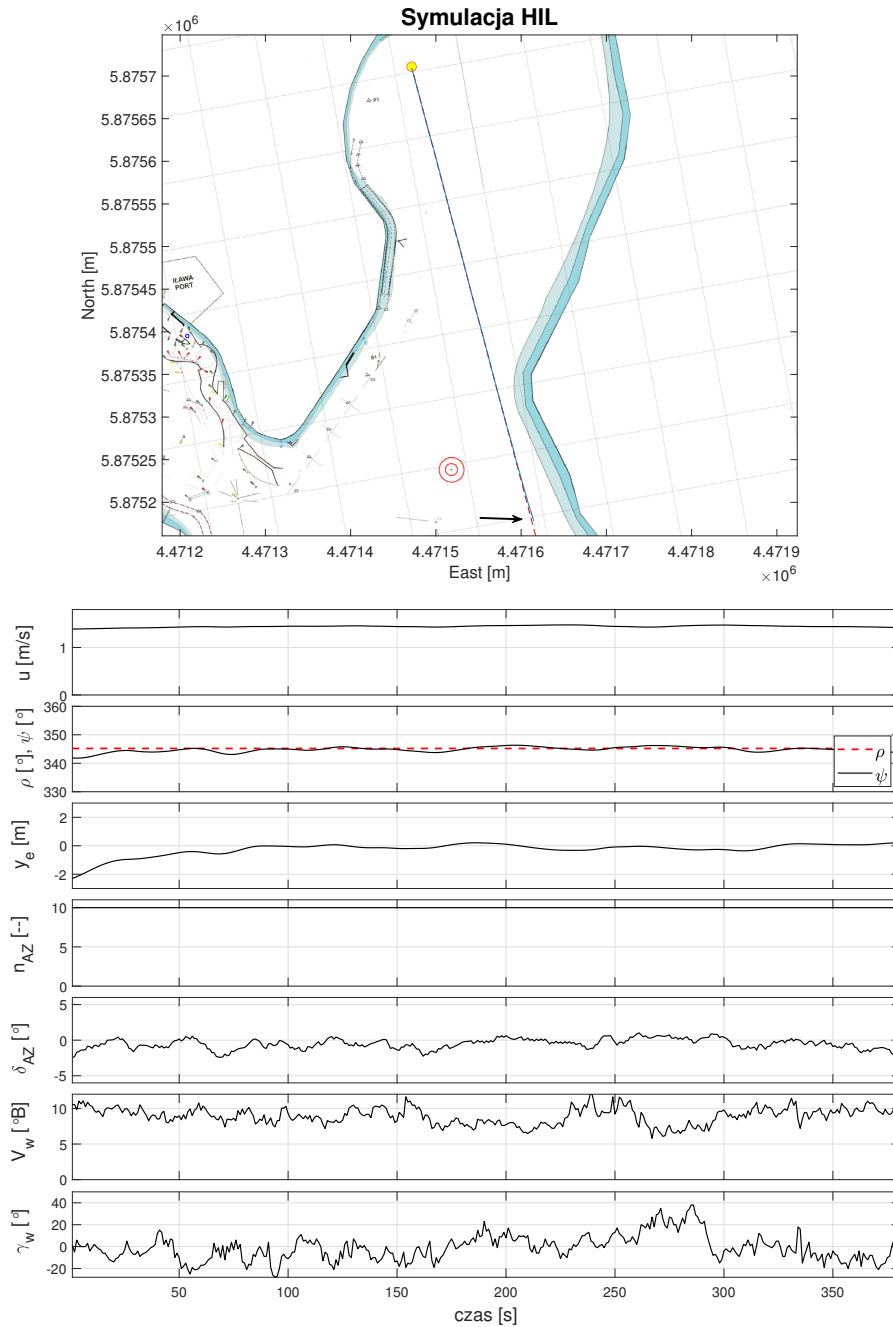
Zakłócenia podczas tej symulacji miały ustalony charakter. Siła wiatru V_w cały czas oscylowała w niewielkim zakresie wokół wartości 5°B . Jego kierunek γ_w mieścił się praktycznie w przedziale $(0^\circ, -45^\circ)$. Tak stabilne warunki spowodowały, że statek, który po początkowym stadium próby (0 – 50 s), w którym asymptotycznie zbliżał się do trajektorii, utrzymywał się na niej z minimalnym uchybem. Kąty wychylenia pędników δ_{AZ} były przy tym wyjątkowo małe – rzędu 1° . Stąd też nie zanotowano podczas tej próby widocznych spadków prędkości postępowej u .



Rysunek 4.16. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-1-R; wyniki eksperymentu na jeziorze dla układu z regulatorem MPC przy umiarkowanych zakłóceniach wiatrowych

Komentarz:

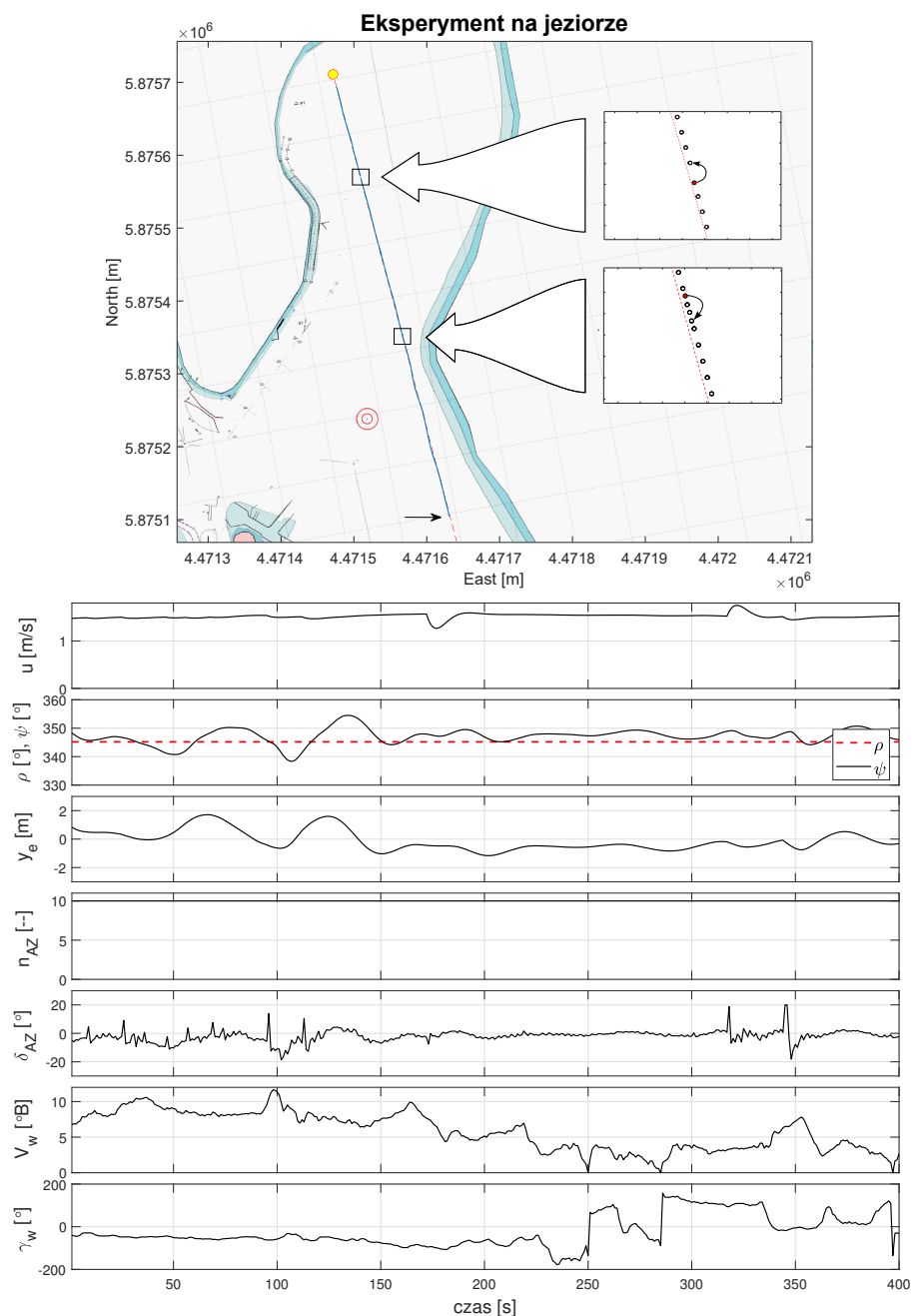
Próbie wykonano na jeziorze w warunkach umiarkowanych zakłóceń. Wiatr pozorny o średniej sile zbliżonej do 5°B wiał początkowo z prawego trawersu. W przybliżeniu po minucie przeszedł na lewą burtę, a następnie wiał do końca eksperymentu z rufy. Zakłócenia te były głównym źródłem reakcji pędników. Ich kąty obrotu δ_{AZ} były niewielkie z wyjątkiem charakterystycznych dla regulatora MPC "szpilek", które kompensowały pojawiającą się na skutek wiatru stałą odchyłkę boczną y_e . Zmiany kąta pędników w minimalnym stopniu wpływały na zmiany prędkości podłużnej u .



Rysunek 4.17. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-2-S; wyniki symulacji HIL dla układu z regulatorem MPC przy silnych zakłóceniach wiatrowych

Komentarz:

Symulację tę przeprowadzono dla warunków początkowych takich samych jak w symulacji poprzedniej, z wyjątkiem charakteru zakłóceń. Podczas eksperymentu wiatr osiągał, a czasem nawet przekraczał siłę 10°B . Wiał on od dziobu, z kierunków mieszczących się niemal przez cały czas trwania eksperymentu w zakresie $\pm 25^\circ$. Kąty wychylenia pędników δ_{AZ} były wyraźnie większe niż podczas symulacji MPC-1-S (Rysunek 4.15). Tak silny wiatr dziobowy spowodował także widoczne na przebiegu kursu ψ myszkowanie statku oraz wyraźny spadek prędkości podłużnej statku u .



Rysunek 4.18. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby MPC-2-R; wyniki eksperymentu na jeziorze dla układu z regulatorem MPC przy początkowo silnych, później słabnących zakłóceniach wiatrowych

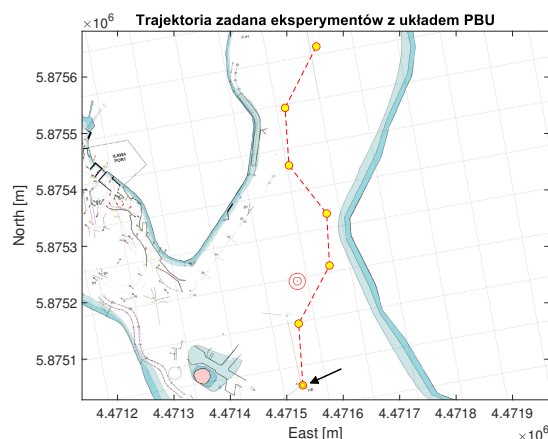
Komentarz:

Podczas eksperymentu zarejestrowano w 171 oraz 316 sekundzie skoki w pomiarach położenia statku. Na powiększeniach wybranych odcinków trajektorii zaznaczono spodziewaną pozycję statku oraz jej zmianę w chwili przeskoku: w pierwszym przypadku wstecz (około 2,2 m), a w drugim do przodu (około 1,8 m). Od początku próby, do 175 sekundy, wiał bardzo silny wiatr z lewego bajdewindu, przekraczający nawet 10°B . Mimo to odchyłka boczna y_e nie była większa od 2 m, co odpowiada w przybliżeniu szerokości kadłuba *Dorchester Lady*. Zakłócenia te były kompensowane wolnozmiennymi wychyleniami pędników, na które nakładały się charakterystyczne "szpilki". Spadek siły wiatru poniżej 5°B spowodował wyraźne zmniejszenie akcji pędników. Zjawisko „przeskoku” pozycji omówiono w podrozdziale 4.7.

4.5. Badania podukładu przełączania bezuderzeniowego pomiędzy regulatorami

Jak wspomniano w podrozdziale 3.2, z układu PBU wyłączono regulator LMI. Skutkiem tego przełączanie bezuderzeniowe odbywało się pomiędzy regulatorami MPC i PID-GS. Zatem, aby zbliżyć warunki eksperymentów do warunków pracy tych regulatorów, testy przeprowadzono dla statku zmieniającego łagodnie kurs przy nastawie prędkości obrotowej napędu $n_{AZ} = 9$. Moment przełączenia regulatorów dobrano tak, aby odbyło się ono zarówno wówczas kiedy pędniki pozostają w spoczynku, jak i wtedy kiedy wymuszają zwrot. Odpowiada to typowym sytuacjom, w których statek przechodzi ze stadium sterowania na wodach otwartych do fazy manewrowania na wodach ograniczonych.

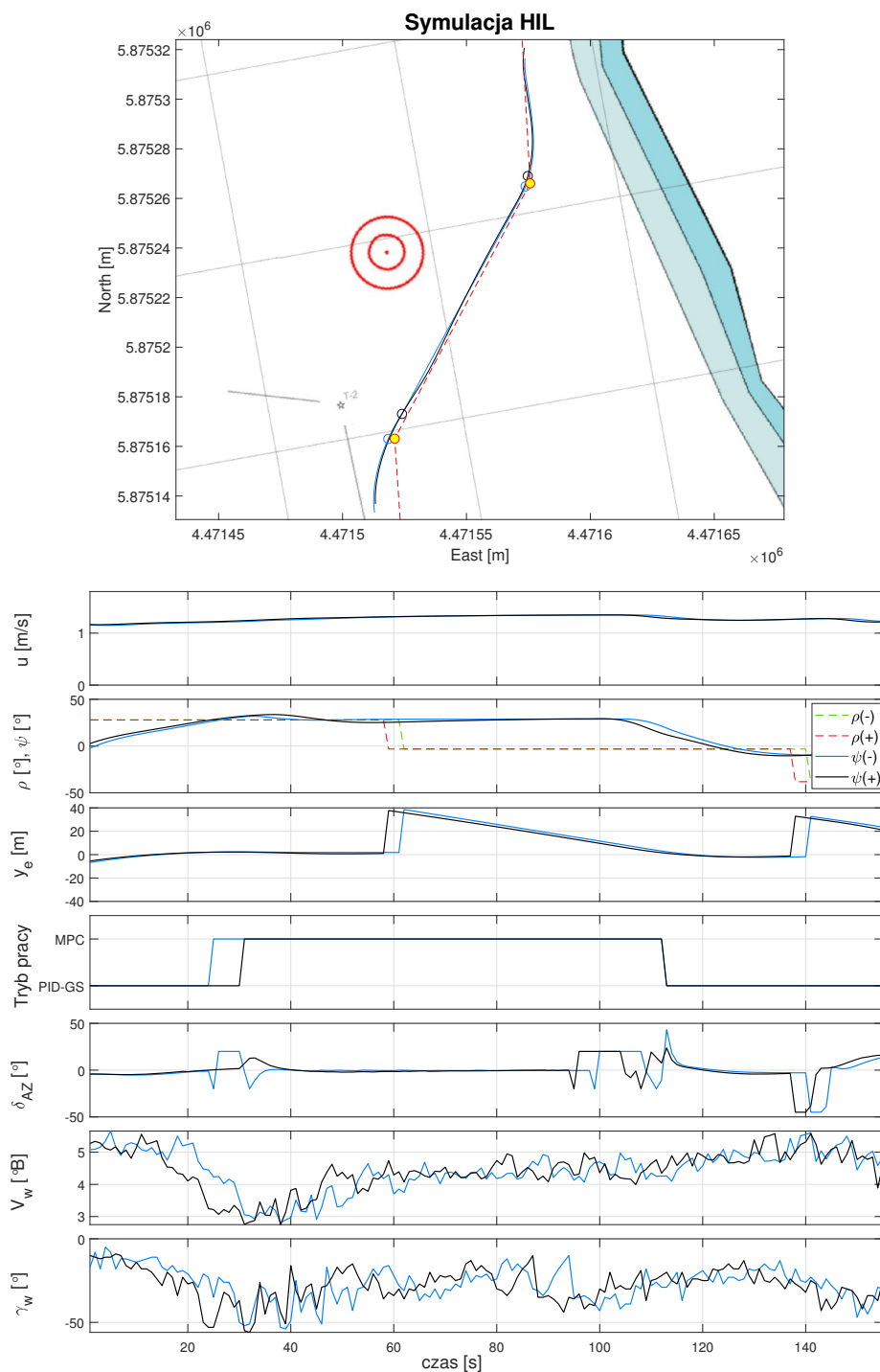
Do testów skonstruowano trajektorię z serią zwrotów o $31,8^\circ$ naprzemiennie, parami na prawą i na lewą burtę (patrz: rysunek 4.19)². Celem było zebranie dużej ilości danych, tak aby można było znaleźć przebiegi, w których warunki przełączania regulatora z aktywnym i nieaktywnym PBU byłyby na tyle zbliżone, żeby można było dokonać porównania. Ostatecznie zestawiono fragmenty pomiarów wokół drugiego i trzeciego punktu trajektorii, które odpowiadają tym założeniom.



Rysunek 4.19. Widok mapy z planem zadanej trajektorii dla prób z przełączaniem regulatorów; początek oznaczony strzałką

Na kolejnych rysunkach zaznaczono czerwoną, przerywaną linią – zadaną trajektorię ruchu statku, a niebieską linią – trajektorię statku płynącego z nieaktywnym układem PBU(-). Niebieskie okręgi na tej linii oznaczają miejsca przełączania regulatorów. Dla eksperymentów z aktywnym układem PBU(+) są to odpowiednio: czarna linia i czarne okręgi. Wykresy poniżej mapy przedstawiają kolejno przebiegi czasowe: u – prędkości podłużnej statku, ρ – kąta kursowego bieżącego odcinka trajektorii (czerwony – PBU(+), zielony – PBU(-)), ψ – kursu statku, y_e – odchyłki bocznej od trajektorii, Tryb pracy – symbolu załączonego regulatora, δ_{AZ} – kąta obrotu pędników azymutalnych, V_w , γ_w odpowiednio siły i kierunku wiatru pozornego. Dla wszystkich przebiegów czasowych do oznaczenia wyników pomiarów w układach PBU(-) i PBU(+), zachowano kolory linii analogiczne do oznaczeń na mapie.

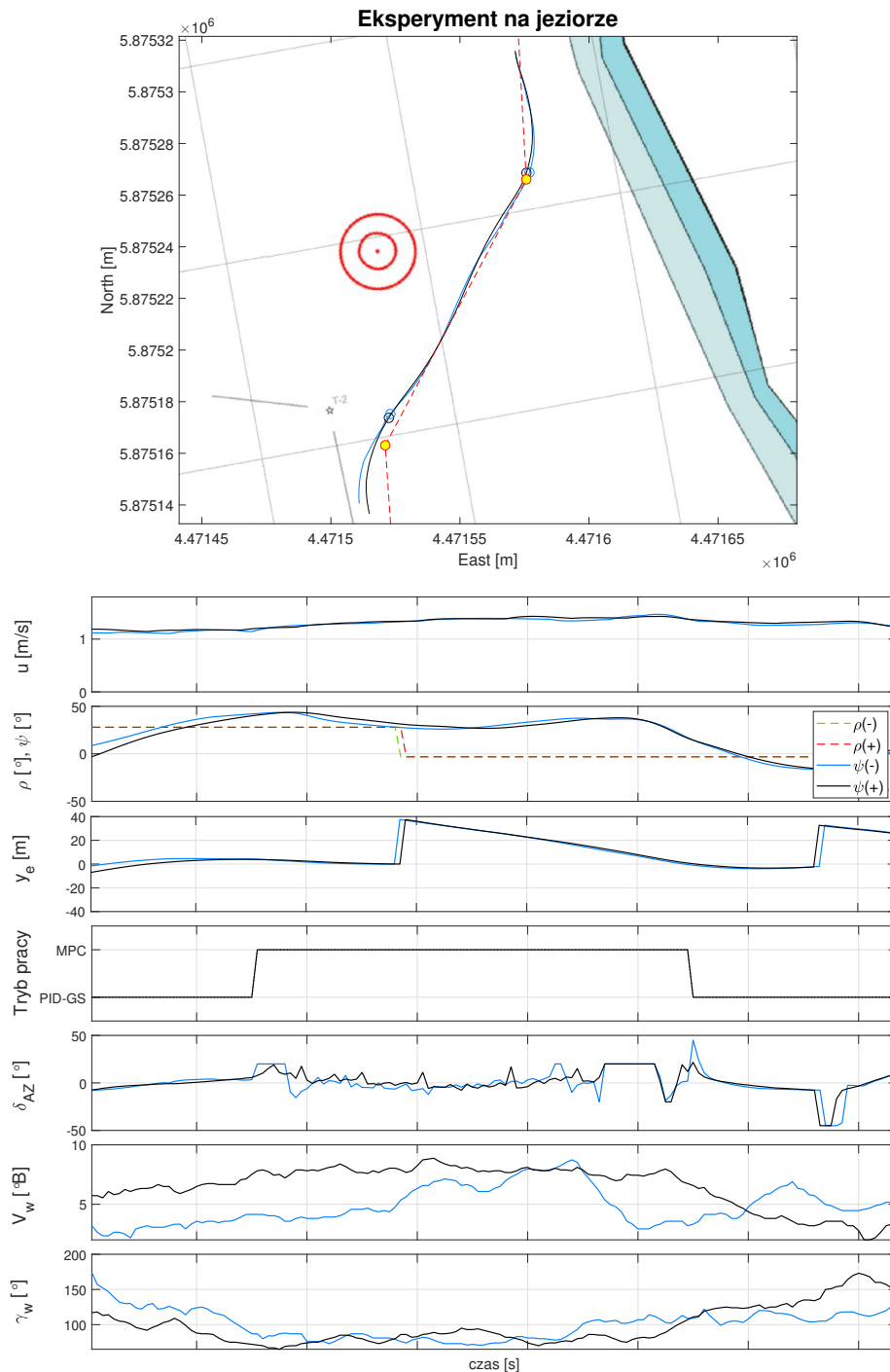
² Przyjęta wartość kąta zwrotu wynika z geometrii akwenu, na którym przeprowadzono próby. Uzyskano dzięki temu trajektorię składająca się z serii zwrotów o ten sam kąt oddaloną jednocześnie od obiektów, których omijanie mogłyby prowadzić do kolizji.



Rysunek 4.20. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1-S; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego podczas zwrotów na prawą i na lewą burtę

Komentarz:

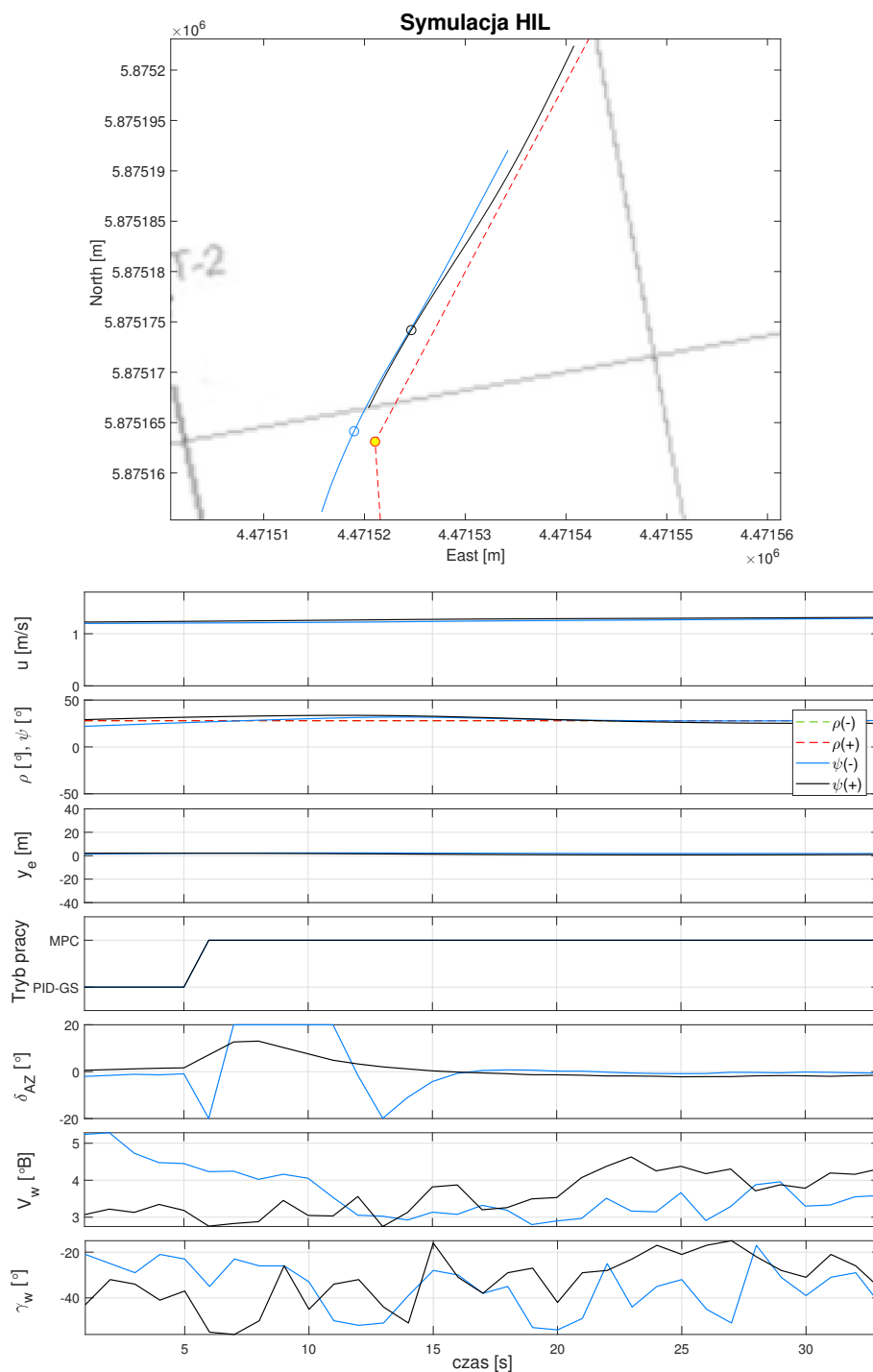
Symulację przeprowadzono dla umiarkowanego wiatru wiejącego z lewej ćwiartki dziobowej. Przełączenie podczas pierwszego zwrotu zachodzi, kiedy pędniki nie są praktycznie wychylane. Drugie przełączenie zbiega się z akcją „kontrowania” prędkości kątowej zwrotu. Stąd, aby zwiększyć czytelność wykresów, punkt ich synchronizacji ustalono w momencie drugiego przełączenia regulatorów.



Rysunek 4.21. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1-R; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego podczas zwrotów na prawą i na lewą burzę

Komentarz:

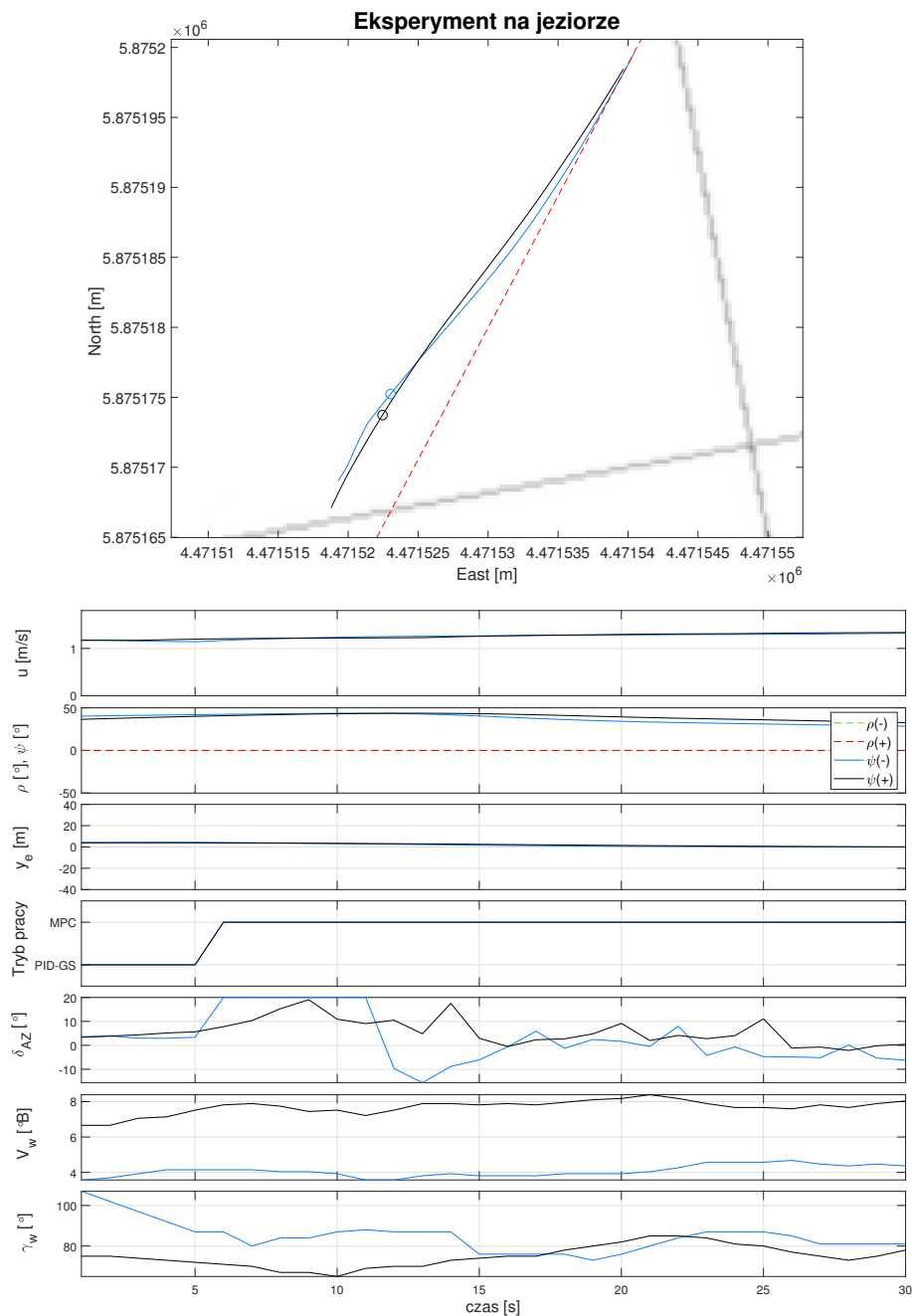
Pomiarów na jeziorze dokonano w warunkach umiarkowanych oraz momentami silnych zakłóceń. W przypadku obu prób wiatr wiał z prawej burty. Czas pracy regulatora MPC w obu przypadkach był identyczny, stąd momenty przełączania są zsynchronizowane. Regulator MPC wychylał pędniki znacznie intensywniej niż w próbie symulacyjnej. Źródłem tego zachowania jest silny wiatr – rzędu 5...9°B.



Rysunek 4.22. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1a-S; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego dla pędników pozostających w spoczynku

Komentarz:

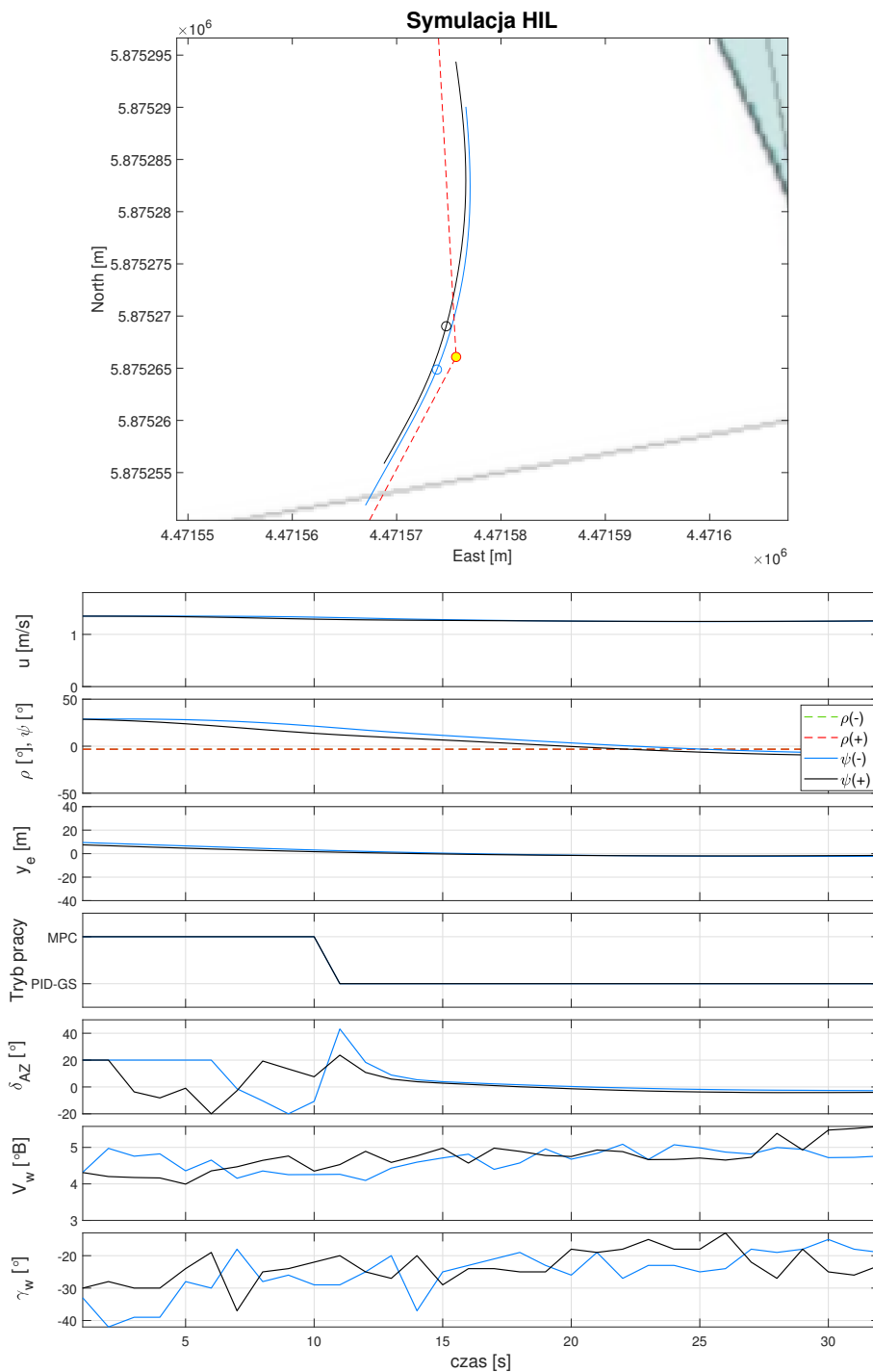
Powyższe wykresy przedstawiają wyizolowane dane pierwszego zwrotu z próby PBU-1-S. Przełączenie nastąpiło, gdy azipody przed momentem przełączenia pozostawały praktycznie w spoczynku (sygnał δ_{AZ}). Reakcja układu bez PBU (linia niebieska) jest zdecydowanie bardziej gwałtowna niż wówczas, kiedy układ PBU pozostawał załączony (linia czarna).



Rysunek 4.23. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1a-R; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego dla pędników pozostających w spoczynku

Komentarz:

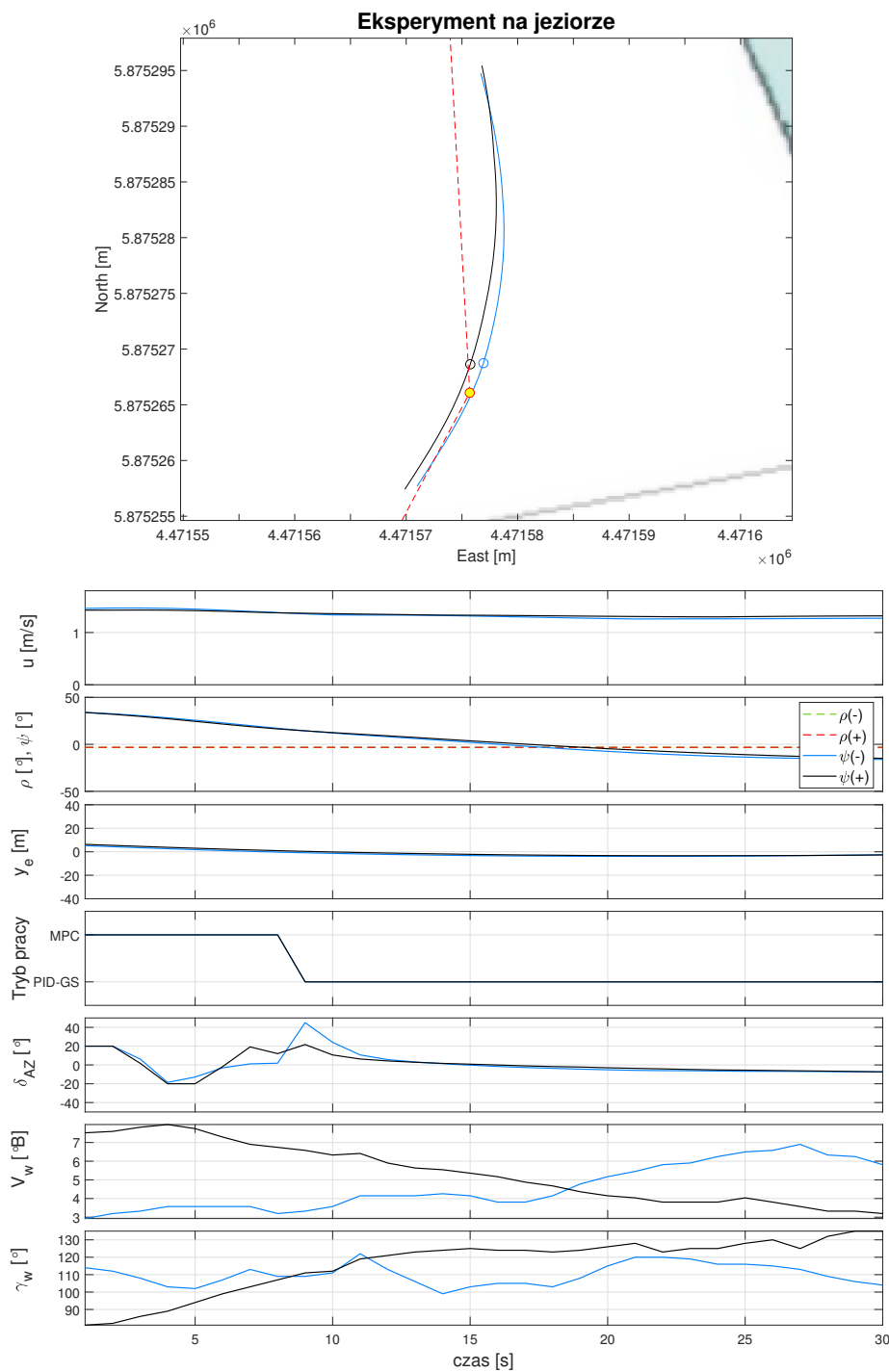
Podobnie jak w wypadku symulacji HIL reakcja azipodów (sygnał δ_{AZ}) układu bez PBU (linia niebieska) po przełączeniu jest zdecydowanie bardziej gwałtowna niż wówczas kiedy układ PBU był aktywny (linia czarna). Przebieg omawianego sygnału jest dla aktywnego PBU dodatkowo zniekształcony działaniem wiatru, który jest w przybliżeniu o 2...3°B silniejszy niż podczas eksperymentu z wyłączonym układem PBU.



Rysunek 4.24. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1b-S; symulacja HIL przełączania bezuderzeniowego w czasie aktywności pędników

Komentarz:

Przełączenie pomiędzy regulatorem MPC a PID-GS nastąpiło, kiedy układ regulacji wychyleniem azipodów kontrolował prędkość kątową manewru wejścia na nowy odcinek trajektorii. Różnica pomiędzy działaniem układu z PBU i bez jest niewielka. Ten drugi wytwarza jednak wyraźnie większą wartość zadaną kąta wychylenia pędników δ_{AZ} .



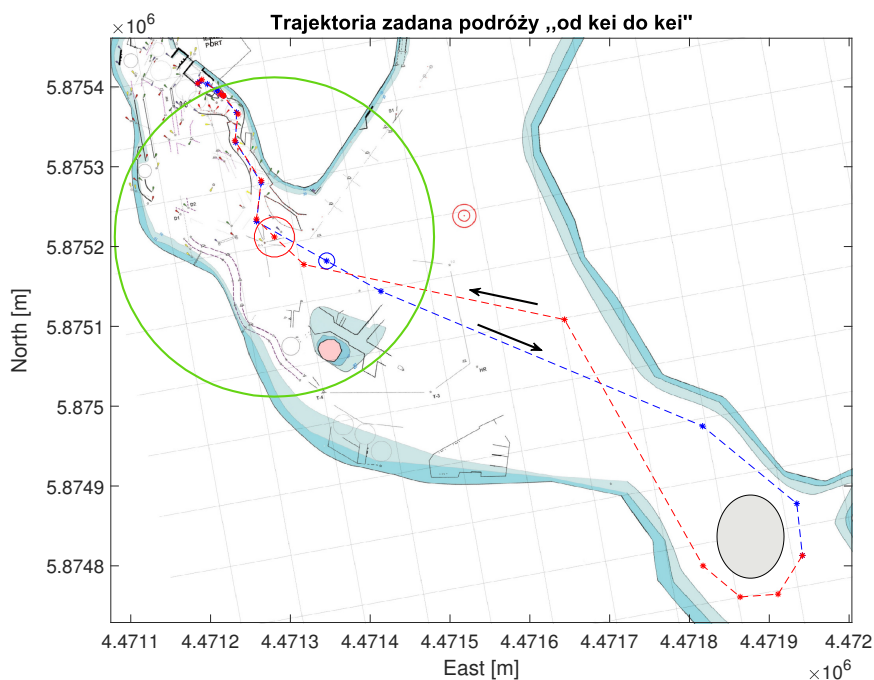
Rysunek 4.25. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby PBU-1b-R; eksperyment na jeziorze – próba przełączania bezuderzeniowego w czasie aktywności pędników

Komentarz:

Przełączenie pomiędzy regulatorami nastąpiło w bardzo podobnych dla obu prób warunkach. Jedynym wiatr dla układu z włączonym PBU był wyraźnie silniejszy. Mimo to, przełączenie spowodowało mniejszy w porównaniu z przeciwnym wypadkiem skok wartości zadanej δ_{AZ} .

4.6. Badania układu sterowania autonomicznego modelu statku realizującego podróż z portu do portu

Finalnie, wszystkie składowe układu sterowania ruchem statku przedstawione w niniejszym rozdziale połączono w jednym eksperymencie, którego celem była weryfikacja poprawności przyjętego rozwiązania problemu sterowania statkiem w podróży „od kei do kei”. Zaprojektowano zatem trajektorię próby, która zawiera wszystkie elementy takiego rejsu omówione w podrozdziale 1.3.



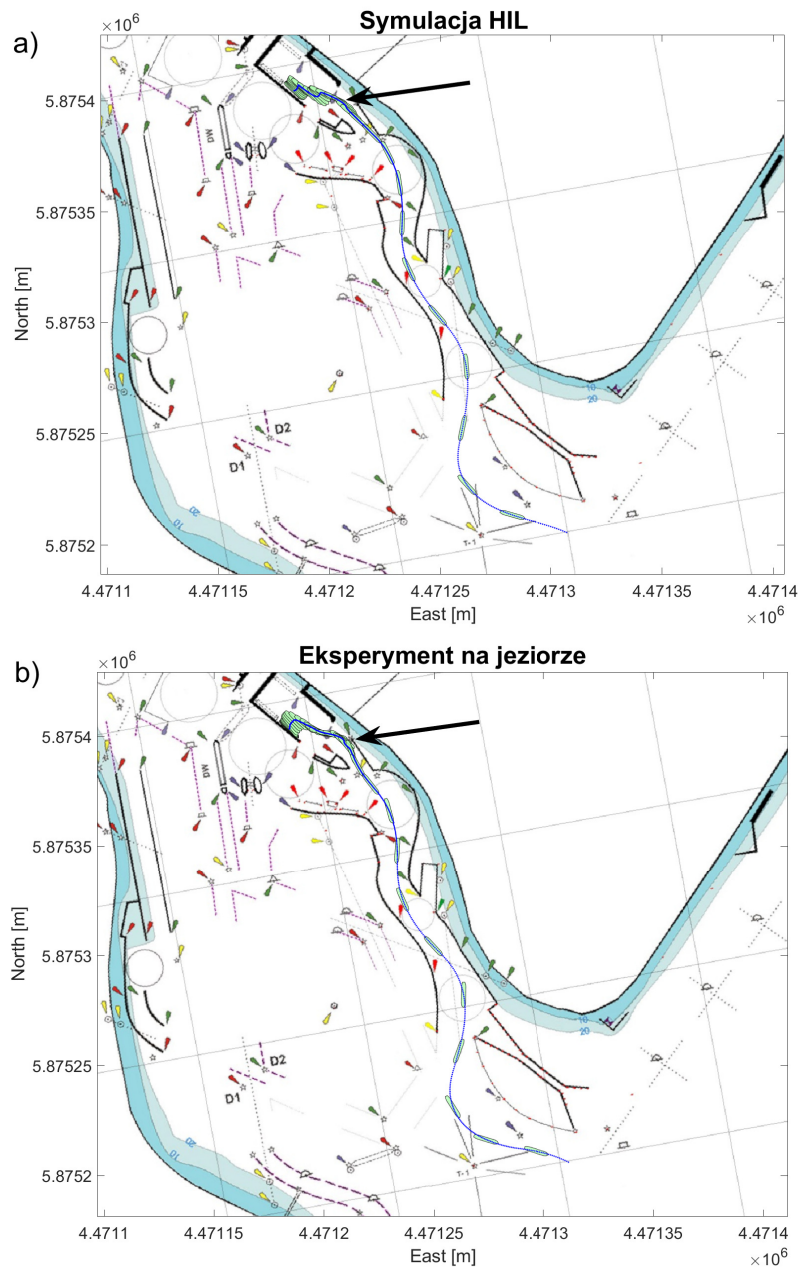
Rysunek 4.26. Widok mapy z planem zadanej trajektorii dla podróży „od kei do kei”. Czerwone i niebieskie okręgi na trajektorii oznaczają obszary aktywacji układu PBU. Zielony okrąg określa dystans przewidziany na wytracenie prędkości postępowej podczas powrotu do portu, przed przełączeniem w tryb pływania na wodach ograniczonych

Początek próby wyznaczono w domyślnym miejscu cumowania *Dorchester Lady*, przy kei *November*³. Model wykonywał manewry portowe aż do momentu wejścia w obszar rzeki *East River*, przy czym akwen ten traktowany był w tej próbie jako kanał portowy, gdyż urządzenia wytwarzające przepływ wody nie były dostępne podczas prób na jeziorze. Jako granice kanału i wód otwartych przyjęto południowo-wschodni kraniec obszaru *Antwerp Lock*. Na wschód od tego miejsca *Dorchester Lady* odbywała „oceaniczną” część swojej podróży.

Naturalnie, trasa tego rejsu ograniczona była rozmiarami samego akwenu oraz zasięgiem urządzeń nadających poprawkę RTK w systemie GPS. We wschodniej zatoce jeziora umieszczono wirtualną „wyspę” oznaczoną kolorem

³ Nazwy, do których odwołuje się niniejszy opis, można znaleźć na mapie akwenów treningowych przedstawionej na rysunku 2.22. Najłatwiej porównać wspomnianą mapę z mapkami w bieżącym rozdziale, na których wyświetlono trajektorie zarejestrowane podczas prób.

szarym, w której sąsiedztwie statek płynął w reżymie żeglugi na wodach ograniczonych (ze zmniejszoną prędkością i z załączonym regulatorem PID-GS). Po opłynięciu wyspy rozpoczęła się część powrotna podróży,

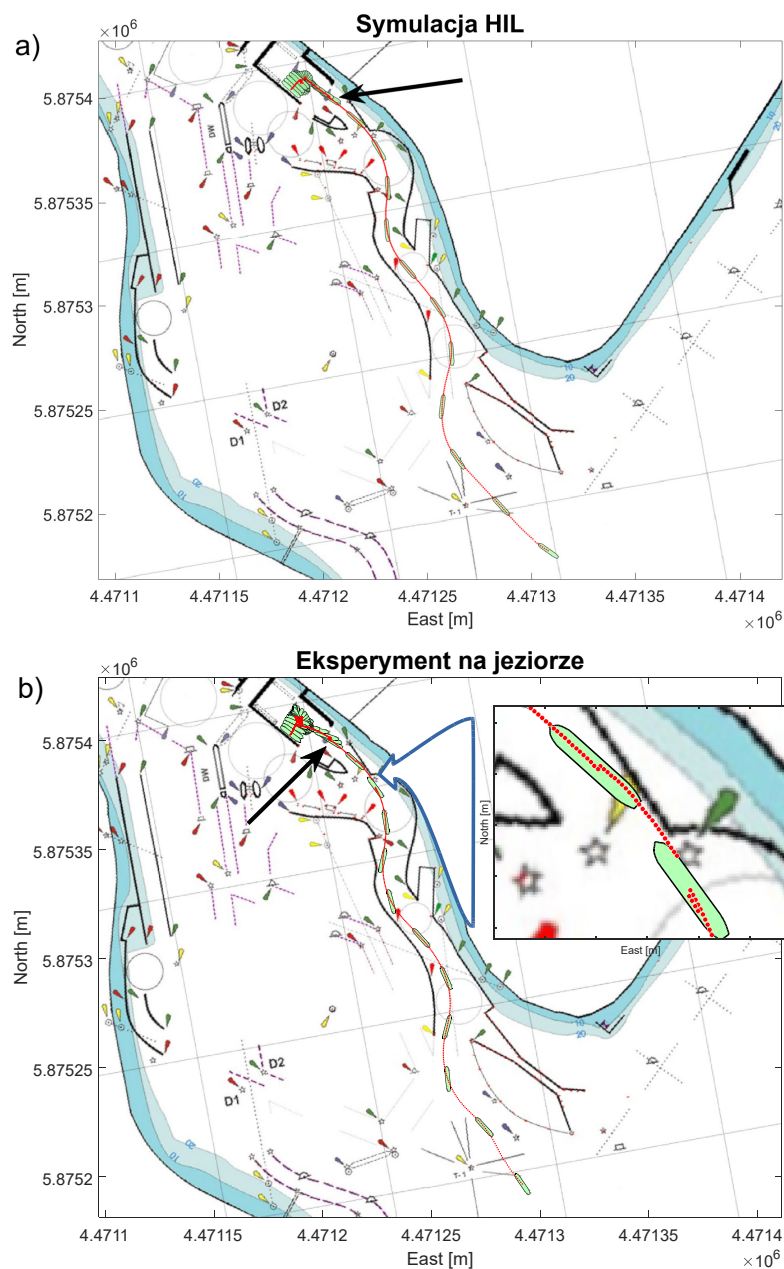


Rysunek 4.27. Widok map z zarejestrowanymi trajektoriami wyjścia *Dorchester Lady* z portu: **a)** dla próby symulacyjnej HIL, **b)** podczas eksperymentu na jeziorze

w której *Dorchester Lady* ponownie pokonała omówione wcześniej trzy etapy, lecz tym razem w odwrotnej kolejności. Próba zakończyła się w docelowym miejscu cumowania modelu.

Rysunki 4.29 i 4.30 dokumentują wyniki prób przeprowadzonych w formie symulacji HIL oraz podczas rzeczywistego eksperymentu na jeziorze. Dla obu z nich ustalono zakres wyświetlania mapy jeziora tak, aby pokazać całość trasy podróży. Doprowadziło to do obniżenia czytelności zarejestrowanej marszruty w obrębie portu i rzeki. Dlatego odcinki trajektorii w tych

obszarach pokazano w powiększeniu na rysunkach 4.27 i 4.28 odpowiednio dla wyjścia i wejścia do portu. Kolorem niebieskim wykreślono trajektorie wyjściowe, a czerwonym wejściowe. Sylwetka *Dorchester Lady* rysowana była co 30 s. Strzałkami zaznaczono miejsca przełączania układu pomiędzy trybem manewrowania w porcie, a pływaniem po wodach ograniczonych.



Rysunek 4.28. Widok map z zarejestrowanymi trajektoriami wejścia *Dorchester Lady* do portu: **a)** dla próby symulacyjnej HIL, **b)** podczas eksperymentu na jeziorze. W powiększeniu pokazano skoki pozycji odczytywanej z odbiornika GPS. Zjawisko to omówiono szerzej w tekście

Podczas próby na jeziorze, w końcowej fazie działania regulatora PID-GS nastąpiła gwałtowna zmiana odczytów odbiornika GPS podobna do skoków

zarejestrowanych podczas próby MPC-2-R (zobacz rysunek 4.18)⁴. Miejsce to pokazano w powiększeniu na dolnej części rysunku 4.28. W pierwszym etapie zaburzenia pozycja „cofnęła się” o $1/4$ długości statku, przez następne 4 sekundy (GPS przesyła pomiar co 1 s.) przemieszczała się zgodnie z kierunkiem wcześniej rejestrowanej trajektorii nieco po lewej burcie. Można to zaobserwować na pozycjach wyświetlanych na tle dolnej sylwetki statku w oknie powiększenia. Następnie nastąpił kolejny przeskok, tym razem do przodu aż o $1/3$ długości *Dorchester Lady*, przy czym tendencja ruchu w przód z niewielką rotacją w lewo została utrzymana. Po upływie kolejnych 24 sekund nastąpił trzeci przeskok, widoczny na tle górnej sylwetki statku w powiększeniu. Tym razem zmiana była niewielka, kilkudziesięciocentymetrowa na lewą burtę.

Skoki te pomimo filtracji spowodowały gwałtowne zmiany wartości sygnałów prędkości u, v, r dostarczanych do układu sterowania. Można to zaobserwować w pobliżu 2530 sekundy na ich przebiegach czasowych zobrazowanych na rysunku 4.30. Na szczęście, podczas pracy regulatora PID-GS prędkość wzdłużna u , której pomiar został zaburzony w największym stopniu, jest sterowana programowo w pętli otwartej. Nie wystąpiła zatem korekcja poprzez sprzężenie zwrotne mogąca doprowadzić do kolizji z konstrukcją kanału na skutek gwałtownej zmiany nastaw pędników. Natomiast reakcja na zmianę prędkości kątowej r była minimalna, gdyż w tej fazie sterowania zadana prędkość obrotowa pędników azipodalnych, a zatem ich napór był w stosunku do inercji kadłuba tak słaby, że nie przyniósł widocznych zmian w torze regulacji kursu ψ .

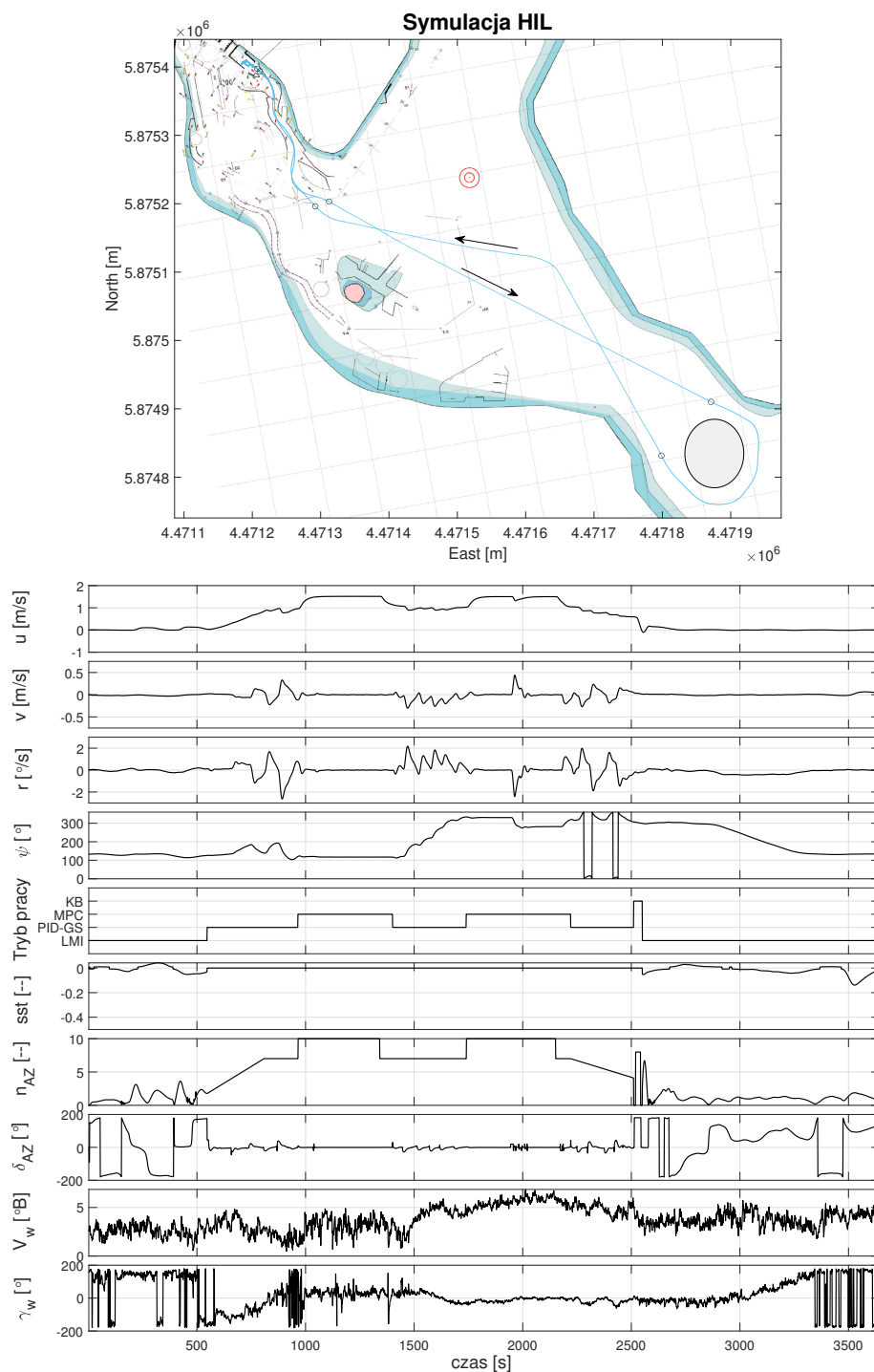
W trakcie pozostałych etapów podróży „od kei do kei” nie zarejestrowano znaczących anomalii w układzie pomiarowo-kontrolnym.

Manewr „kopnięcia wstecz” napędem miał za zadanie zmniejszenie prędkości postępowej statku kończącego manewry na wodach ograniczonych tak, aby dopasować ją do zakresów przewidzianych dla regulatora LMI (patrz: tabela 3.1). Manewr ten wykonano w przybliżeniu w 2500 s dla symulacji HIL i w 2600 s podczas eksperymentu na jeziorze. Polegał on na zatrzymaniu prędkości obrotowej pędników i obróceniu ich w kierunku rufy⁵ do kąta $\delta_{AZ} = 180^\circ$. Następnie na krótki okres podniesiono obroty śrub napędu do wartości $n_{AZ} = 8$. Jak można zauważyć na wykresach prędkości u dla obu eksperymentów, spadła ona praktycznie do zera.

Przebiegi poszczególnych sygnałów na rysunkach 4.29 i 4.30 poniżej mapek oznaczone są następująco: u – prędkość podłużna statku, v – prędkość poprzeczna statku, r – prędkość kątowa statku, ψ – kurs rzeczywisty statku, Tryb pracy – oznaczenie aktywnego regulatora, przy czym KB jest symbolem operacji „kopnięcia wstecz” napędem głównym (ang. *Kick Back*), sst – nastawa względnego naporu tunelowego steru strumieniowego, n_{AZ} – nastawa prędkości obrotowej śrub pędników azymutalnych, δ_{AZ} – nastawa kąta obrotu pędników azymutalnych, V_w, γ_w – odpowiednio prędkość i kierunek wiatru pozornego.

⁴ Zdarzenie to było wyjątkowo zaskakujące, gdyż nie zarejestrowano go wcześniej w tym rejonie jeziora. Próba analizy tego przypadku zostanie podjęta w ostatniej części tego rozdziału.

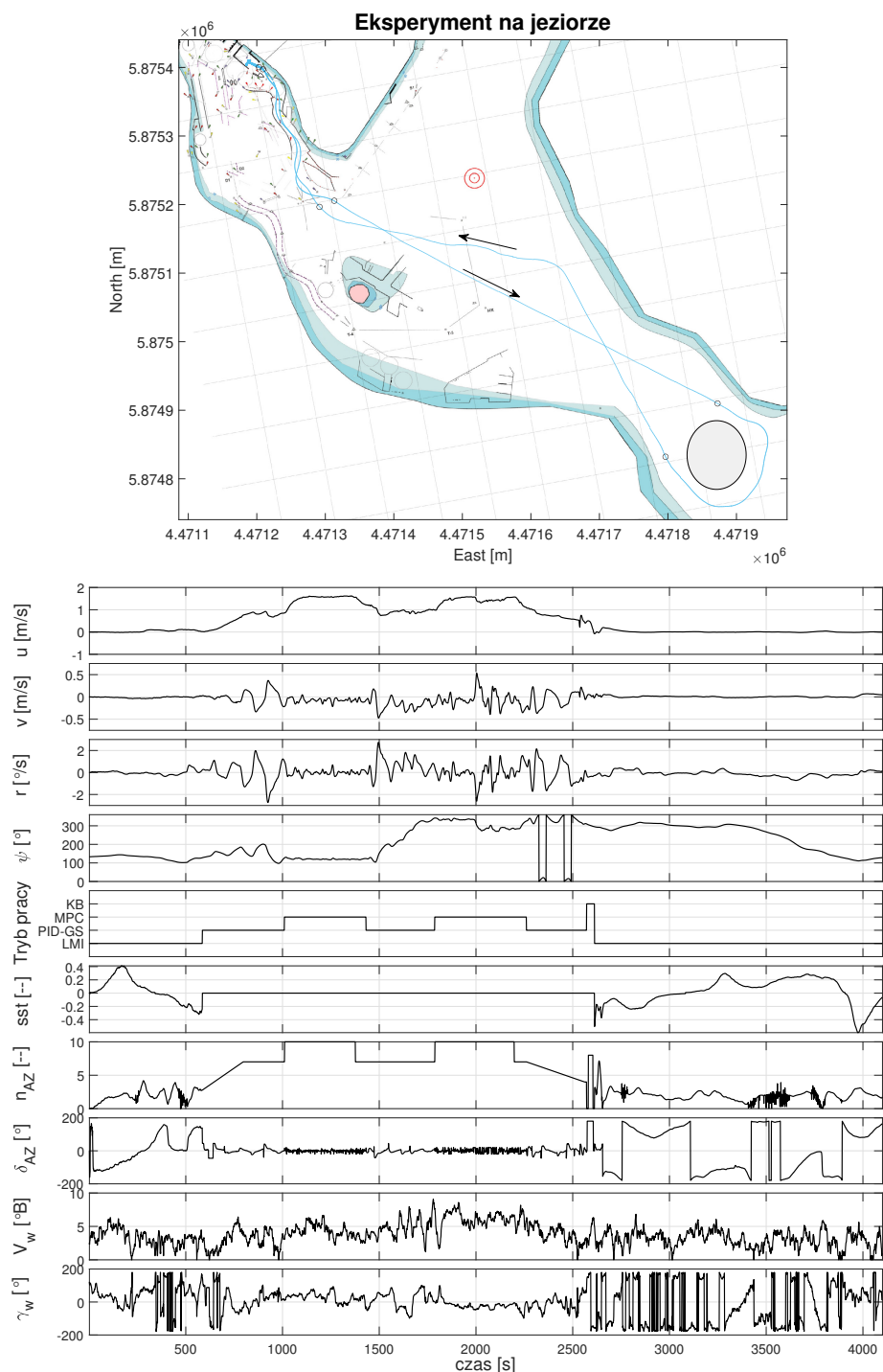
⁵ Taki manewr jest zalecany dla jednostek wyposażonych w azipody zamiast zadawania ujemnych wartości nastaw obrotów – „Wstecz”, ze względu na znacznie większą wydajność pędników azipodalnych podczas pracy „Naprzód” [132].



Rysunek 4.29. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby Q2Q-1-S; symulacja HIL pełnej podróży „od kei do kei”. Miejsca przełączania regulatorów odpowiadających kolejnym etapom podróży oznaczono na mapie kółkami. Strzałki wskazują kierunek poruszania się statku po trajektorii

Komentarz:

Symulację przeprowadzono dla wiatru o umiarkowanej sile, tylko chwilami przekraczającej 5°B . Poszczególne etapy podróży przebiegały zgodnie z oczekiwaniami. Na prostych odcinkach rejsu po wodach otwartych regulator MPC wychylał pędniki w niewielkim stopniu. Było to skutkiem niemal jednostajnego wiatru dziobowego, który, jak już o tym wspomiano, działa stabilizująco na kurs jednostki. Etap manewrów w porcie był, w porównaniu do pozostałych faz podróży, zbyt długotrwały.



Rysunek 4.30. Zarejestrowana trajektoria i przebieg sygnałów dla próby Q2Q-1-R; eksperyment przeprowadzony w formie podróży „od kei do kei” na jeziorze. Miejsca przełączania regulatorów odpowiadających kolejnym etapom podróży oznaczono na mapie kółkami

Komentarz:

Próba na jeziorze przeprowadzona została w warunkach zbliżonych do tych z próby symulacyjnej. Wiatr cechował się jednak wyraźniej większą zmiennością. Regulator MPC stabilizował kurs słabiej, zwłaszcza w części powrotnej, po zwrocie. Manewry portowe były, podobnie jak dla próby symulacyjnej, powolne – szczególnie obrót i cumowanie podczas powrotu. Jedną z przyczyn był z pewnością zmienny wiatr. W przebiegu zadanej prędkości obrotowej pędników n_{AZ} pojawiły się drgania, których źródła nie udało się zidentyfikować.

4.7. Analiza wyników badań eksperymentalnych

Jedną z trudności w ocenie opracowanego układu sterowania jest brak wyników podobnych badań, które mogłyby być bezpośrednim punktem odniesienia w analizie porównawczej. W literaturze przedmiotu przedstawiane są wprawdzie modele badawcze podobnej wielkości i o podobnym do zastosowanego na *Dorchester Lady* układzie pędników, lecz publikacje te albo mają charakter popularyzatorski, albo też prezentowane w nich wyniki są zbyt lakoniczne i nie przystają do rezultatów badań zawartych w niniejszej pracy⁶.

Jednostki najbliższe *Dorchester Lady* to model koncepcyjnego statku *ReVolt* norweskiej firmy DNV zbudowany w skali 1:20 [172] oraz model demonstracyjny pierwszego przeznaczonego do komercyjnej eksploatacji statku autonomicznego *Yara Birkeland* zbudowany w skali około⁷ 1:12 [83], a także badawczy model *Conmar*, który wykorzystują pracownicy Akademii Morskiej w Szczecinie, zbudowany w skali 1:25 [159]. Wszystkie te jednostki są modelami małych kontenerowców dowozowych 1300...3200 DWT o napędzie elektrycznym przeznaczonych do żeglugi o niewielkim zasięgu – poniżej 100 Mm. Spośród wymienionych modeli opublikowano wyniki prób sterowania jedynie dla modelu *ReVolt*, ograniczone do zadania pozycjonowania dynamicznego [2].

4.7.1. Miary jakości działania układu sterowania ruchem modelu izomorficznego

Do oceny wyników badań wybrano powszechnie akceptowane wskaźniki opierające się na idei minimalizacji uchybu sterowania przy jednocześnie możliwym najmniejszym koszcie tego działania. Skoro regulatory dużych i średnich prędkości włączone do układu pracowały w reżymie sterowania wzdłuż zadanej trajektorii, zatem za naturalną dla nich miarę jakości przyjęto:

$$J_{ye} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_e(i)| \quad (4.1)$$

gdzie składniki $y_e(i)$ oznaczają kolejne pomiary odchyłki bocznej od trajektorii, a N jest liczbą kolejnych próbek wziętych do obliczenia wskaźnika. Jak łatwo zauważyć fizyczną jednostką wskaźnika J_{ye} są metry [m]. W układzie wielowymiarowym regulator LMI sterował prędkościami u, v, r modelu. W tym przypadku zastosowano analogiczną do powyższej regułę wyznaczania wskaźników J_u, J_v i J_r , których miarą są odpowiednie jednostki prędkości [m/s] oraz [°/s].

Sygnalem wyjściowym regulatorów MPC i PID-GS jest kąt obrotu pędników δ_{AZ} . Zmieniał się on w zakresie $\pm 180^\circ$. Kosztem w tym wypadku

⁶ Uwaga ta odnosi się do wyników kwerendy, którą autor przeprowadził we wrześniu 2021 roku.

⁷ Niestety dostępne materiały nie podają skali, w jakiej zbudowany jest model, a opublikowane wymiary statku i modelu nie są wystarczająco zgodne, aby ją dokładnie określić.

były opory hydrodynamiczne pędników, które osiągały maksimum dla $\delta_{AZ} = \pm 90^\circ$. Zatem zastosowano wskaźnik mianowany w stopniach $[\circ]$ w postaci:

$$J_{\delta_{AZ}} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta_{AZ}(i)| & \text{jeżeli } |\delta_{AZ}| \leq 90^\circ \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (180 - |\delta_{AZ}(i)|) & \text{jeżeli } |\delta_{AZ}| > 90^\circ \end{cases} \quad (4.2)$$

Wyjście regulatora LMI zawiera dodatkowo sygnały zadanej prędkości obrotowej śrub azipodów n_{AZ} oraz zadanego względnego naporu tunelowego steru strumieniowego sst . Wskaźniki $J_{n_{AZ}}$ oraz J_{sst} dla tych sygnałów były obliczane według reguł analogicznych do zależności 4.1 dla wskaźnika J_{y_e} . Jednakowoż sygnały δ_{AZ} , n_{AZ} i sst mają, w przeciwieństwie do y_e , określone wartości maksymalne. Zdefiniowano zatem zagregowany, niemianowany wskaźnik wydatku na sterowanie dla wielowymiarowego układu z regulatorem LMI:

$$J_{s3} = \lambda_{\delta_{AZ}} J_{\delta_{AZ}} + \lambda_{n_{AZ}} J_{n_{AZ}} + \lambda_{sst} J_{sst}, \quad (4.3)$$

w którym $\lambda_{\delta_{AZ}} = \frac{1}{90}$, $\lambda_{n_{AZ}} = \frac{1}{10}$ i $\lambda_{sst} = 1$ spełniają funkcje współczynników wagowych normalizujących poszczególne składniki sumy do zakresu 0...1.

Głównym celem stosowania układu PBU jest natomiast ograniczenie „uderzeń” w torach sygnałów sterujących. Dlatego do jego oceny użyto dodatkowo miary prędkości zmian wychylenia pędników w postaci:

$$J_{r_{AZ}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |\delta_{AZ}(i+1) - \delta_{AZ}(i)| \quad (4.4)$$

Z uwagi na fakt, iż częstotliwość próbkowania układu pomiarowo-kontrolnego wynosi 1 Hz, jednostką tego wskaźnika jest stopień na sekundę $[\circ/s]$.

4.7.2. Zestawienie i dyskusja wartości wskaźników dla poszczególnych eksperymentów

Posługując się powyższymi definicjami, obliczono odpowiednie parametry dla kolejnych zestawów prób. Są one oznaczone symbolami wprowadzonymi w sekcjach 4.2 – 4.5 tego rozdziału. Pogrubiona litera **S** użyta w symbolu oznacza próbę symulacyjną HIL, a litera **R** rzeczywistą próbę przeprowadzoną na jeziorze.

W tabeli 4.3 zebrano wskaźniki uzyskane podczas eksperymentów z regulatorem LMI. Ich wartości potwierdzają wstępne wnioski, które można

Tabela 4.3. Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora LMI

Symbol próby	J_u [m/s]	J_v [m/s]	J_r [\circ/s]	J_{s3} [—]
LMI-1- S	0,021	0,021	0,12	0,82
LMI-1- R	0,026	0,034	0,21	1,27
LMI-2- S	0,029	0,027	0,29	1,15
LMI-2- R	0,022	0,031	0,21	1,25

wysnuć na podstawie analizy rysunków 4.4 – 4.7. Na przykład wyrównany dla wszystkich eksperymentów poziom wskaźnika dla sterowania prędkością

wzdłużną J_u mieszczący się pomiędzy 2 a 3 cm/s znajduje swoje potwierdzenie w proporcjonalnie niewielkich różnicach pomiędzy przebiegami sygnałów u_z oraz u , przedstawionymi w pierwszym układzie współrzędnych na tych rysunkach. Najśłabsze wyniki obserwujemy w torze sterowania prędkością obrotową, choć oczywiście, wniosek ten nie wynika z bezwzględnych różnic wartości odpowiednich wskaźników, gdyż nie można porównywać prędkości postępowej w m/s i obrotowej w °/s. Wyraźnie większy od pozostałych wskaźnik J_r dla drugiej próby symulacyjnej LMI-2-S jest skutkiem oscylacji prędkości r wyraźnie widocznych w trzecim układzie współrzędnych na rysunku 4.6. Te zaś spowodowane były charakterem zakłóceń wiatrowych, o którym wspomniano w komentarzu pod tym rysunkiem.

Ostatecznie, wyniki prób z regulatorem LMI można uznać za poprawne, a w przypadku eksperymentów w warunkach silnych zakłóceń nawet za dobre. Należy zauważyć, że dla pełnomorskiego gazowca o wyporności powyżej 100 000 DWT wiatr o sile 7...10°B byłby przeciwwskazaniem do prowadzenia manewrów w porcie [131]. Wyraźne odchyłki boczne od trajektorii zadanej występują podczas manewrów „Naprzód” 2 i 5 (patrz: tabela 4.1), ale tylko w nielicznych momentach przekraczają one wielkość równą dwóm szerokościom statku (2B), co jest parametrem akceptowalnym dla tego typu manewru. Są one skutkiem nieco słabszej dynamiki układu sterowania w torze prędkości kątovej r .

W tabeli 4.4 zebrano wskaźniki jakości (średniej odchyłki bocznej) i kosztów sterowania (średniego kąta obrotu pędników) dla prób z regulatorem PID-GS.

Tabela 4.4. Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora PID-GS

Symbol próby	J_{ye} [m]	$J_{\delta_{AZ}}$ [°]
PID-GS-1-S	9,47	8,65
PID-GS-1-R	5,71	8,19
PID-GS-2-S	7,94	12,34
PID-GS-2-R	5,81	12,19
PID-GS-3-S	7,12	9,61
PID-GS-3-R	5,64	14,08

Wartości wskaźnika J_{ye} dla wszystkich prób mieszczą się między 5,6 a 9,5 m, czyli poniżej długości ($L = 11,55$ m) modelu *Dorchester Lady*. Jest to dobry wynik dla trajektorii zadanej w postaci linii łamanej z punktami zwrotu położonymi blisko siebie – w odległości kilku długości statku jak na rysunku 4.8.

Niewielkie różnice pomiędzy wartościami J_{ye} odpowiadających sobie prób wskazują na efektywne działanie mechanizmu adaptacji regulatora do zmian prędkości zadanej modelu. Należy przy tym pamiętać, że symulacje i próby PID-GS-1 dla nastawy prędkości $n_{AZ} = 9$ i PID-GS-3 dla nastawy prędkości malejącej $n_{AZ} = (9 \rightarrow 4)$ przeprowadzane były w warunkach bardzo silnego wiatru. Wartości wskaźników $J_{\delta_{AZ}}$ potwierdzają, że spadek zdolności manewrowej statku wynikający ze zmniejszenia prędkości obrotowej pędników musi być skompensowany większymi kątami ich obrotu. Porównanie wskaźników dla eksperymentów PID-GS-1 i PID-GS-2 kiedy to nastawa prędkości została zmniejszona z 9 do 4, pokazuje wzrost uśrednionych wartości amplitudy kąta obrotu pędników o 48%. Wyjątkowo duża wartość wskaźnika $J_{\delta_{AZ}}$ dla próby

PID-GS-3-**R** wynika z tego, że dla końcowych 150 s tego eksperymentu, kiedy nastawa prędkości obrotowej była obniżona do $n_{AZ} = 4$, wiał niezwykle silny wiatr z lewej burty. Stąd też, aby skompensować jego oddziaływanie, pędnik pracował w tym czasie z kątem obrotu δ_{AZ} zmieniającym się wolno pomiędzy 20° a 30° (patrz: trzeci układ współrzędnych od dołu na rysunku 4.14). Mimo tak silnej akcji pędników model kończył próbę praktycznie ze stałym uchybem kąta kursowego ψ . Odchyłka boczna od trajektorii y_e pozostała jednak niewielka.

Dla eksperymentów przeprowadzanych z regulatorem MPC „na wodach otwartych” obliczono analogiczne wskaźniki jak dla regulatora PID-GS. Ich wartości zebrane są w tabeli 4.5

Tabela 4.5. Wskaźniki oceny jakości sterowania regulatora MPC

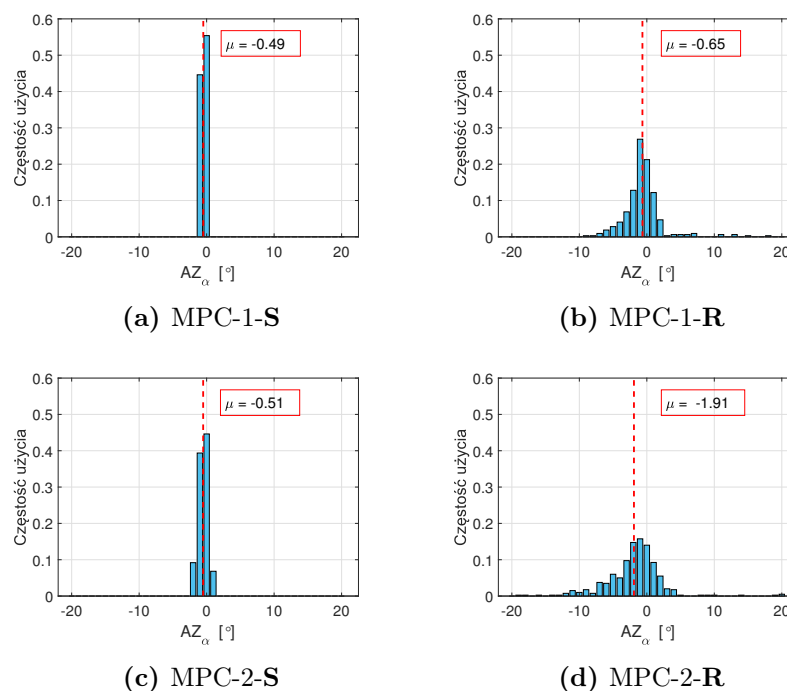
Symbol próby	J_{y_e} [m]	$J_{\delta_{AZ}}$ [°]
MPC-1- S	0,16	0,50
MPC-1- R	0,29	2,03
MPC-2- S	0,30	0,70
MPC-2- R	0,59	3,10

Wartości wskaźników, zarówno uchybu sterowania J_{y_e} (odchyłki bocznej), jak i kosztu sterowania $J_{\delta_{AZ}}$ (kąta obrotu pędników), są zdecydowanie mniejsze niż w przypadku regulatora PID-GS. Wynika to z prostoliniowego charakteru trajektorii zadanej. Największa wartość $J_{y_e} = 0,59$ m dla próby MPC-2-**R**, przeprowadzonej na jeziorze przy silnym wietrze, jest mniejsza od połowy szerokości statku $B = 1,8$ m. Wskaźnik $J_{\delta_{AZ}}$, który odpowiada uśrednionej amplitudzie kąta obrotu pędników podczas całej próby, ma przy tym wartość $3,10^\circ$. Świadczy to o bardzo dobrych właściwościach regulatora MPC w procesie stabilizacji kursu modelu.

Dodatkowo, na rysunku 4.31 przedstawiono diagramy Lystera [101] zmian kąta wychylenia pędników podczas stabilizacji kursu. Pozwalają one na nieco inną ocenę efektów sterowania niż za pomocą wskaźnika $J_{\delta_{AZ}}$. Jak można zauważyć, wszystkie diagramy charakteryzują się średnią wartością kąta wychylenia μ bliską zeru z lekkim odchyleniem na lewą burzę. Odchylenie to jest efektem wiatru, który przez większość czasu trwania każdego eksperymentu wiał z lewej burty. Podstawowa różnica między próbami uwidacznia się jednak w tym, iż dla symulacji (rysunki 4.31a i 4.31c) wyniki charakteryzują się znacznie mniejszą wariancją kąta wychylenia steru niż dla prób przeprowadzonych na jeziorze (rysunki 4.31b i 4.31d). Można to też zaobserwować na zarejestrowanych przebiegach sygnału δ_{AZ} na rysunkach 4.15 – 4.18.

Różnice te spowodowane są głównie dwoma czynnikami:

- ◆ niedoskonałościami modelowania zarówno dynamiki *Dorchester Lady*, szczególnie dla niewielkich kątów obrotu pędników, jak i wpływu zakłóceń wiatrowych na tego typu jednostkę. Współczynniki oporu wiatrowego użyte do modelowania sił i momentu pochodzących od wiatru (patrz: równania A.40 – A.43) określone były nie dla modelu izomorficznego, lecz dla statku o zbliżonej sylwetce [31],
- ◆ losowymi, a stąd niemożliwymi do modelowania, nieliniowościami mechanizmu zmiany kąta obrotu pędników. W trakcie sezonu szkoleniowego modele treningowe często ulegają kolizjom z elementami infrastruktury



Rysunek 4.31. Diagramy zmian kąta obrotu pędników dla prób z regulatorem MPC – po lewej dla symulacji (**S**), po prawej dla eksperymentów rzeczywistych (**R**); czerwoną, przerywaną linią oznaczono wartości średnie

na jeziorze. Nierzadkie są też przypadki wkręcenia linek kotwicznych boi lub cum w śruby napędowe modeli. Powoduje to niewielkie, stałe przesunięcia pozycji neutralnej gondoli i/lub pojawianie się luzów w układzie ich mocowania na osiach obrotu napędów rzędu $0,5...1,5^\circ$. Zjawiska te z punktu widzenia szkolenia manewrowego są niezauważalne, ujawniają się natomiast w procesie długotrwałej stabilizacji kursu [104].

Podsumowując analizę działania układu sterowania z regulatorem MPC należy podkreślić jego bardzo dobre właściwości. Wartość wskaźników odchyłki bocznej od trajektorii J_{ye} jest mniejsza od połowy szerokości modelu nawet przy silnych zakłóceniach wiatrowych. Kąt obrotu azipodów podczas sterowania rzadko wykracza poza zakres $\pm 5^\circ$ dla umiarkowanych zakłóceń, a w warunkach silnego wiatru poza przedział $\pm 10^\circ$. Skutkiem tego opory ruchu modelu pochodzące z układu regulacji kursu są niewielkie i nie mają istotnego wpływu na spadek prędkości postępowej kadłuba u , co można zauważyć na rysunkach 4.15 – 4.18, w pierwszym układzie współrzędnych pod mapką.

Wartości odpowiednich wskaźników jakości i kosztów sterowania dla prób z układem PBU zebrano w tabelach 4.6 i 4.7. Wskaźniki wyliczone dla danych pochodzących z prób z włączonym układem PBU zaznaczono dodatkowym znakiem „+”. W przeciwnym przypadku zastosowano znak „-”. W tabeli 4.7 oznaczenie jednostek przeniesiono do opisu, aby nie przekroczyć dopuszczalnej szerokości tabeli.

Różnice pomiędzy wskaźnikami jakości sterowania (odchyłki bocznej od trajektorii) J_{ye} podczas przełączania regulatorów z użyciem układu PBU i bez niego są, w stosunku do ich średnich wartości, niewielkie. Mieszczą się w zakresie od 0,16 m dla próby PBU-1b-**R** do 0,7 m dla

Tabela 4.6. Wskaźniki oceny jakości sterowania podczas przełączania regulatorów

Symbol próby	$J_{ye} + [m]$	$J_{ye} - [m]$
PBU-1a-S	1,34	2,04
PBU-1a-R	2,26	1,95
PBU-1b-S	2,31	3,07
PBU-1b-R	2,74	2,90

próby PBU-1a-S. Można zatem stwierdzić, że zastosowanie układu PBU nie wpływa w znaczącym stopniu na jakość sterowania podczas przełączania regulatorów. Potwierdzają to przebiegi trajektorii ruchu *Dorchester Lady* zilustrowane na rysunkach 4.22 – 4.25, które się niemal pokrywają.

Tabela 4.7. Wskaźniki oceny kosztów sterowania podczas przełączania regulatorów. Jednostką dla $J_{\delta_{AZ}}$ jest $[\circ]$, a dla $J_{r_{AZ}}$ $[\circ/s]$

Symbol próby	$J_{\delta_{AZ}} +$	$J_{\delta_{AZ}} -$	$J_{r_{AZ}} +$	$J_{r_{AZ}} -$
PBU-1a-S	2,93	5,24	0,91	3,89
PBU-1a-R	5,95	7,61	3,75	4,46
PBU-1b-S	6,60	8,53	4,83	4,81
PBU-1b-R	7,59	8,60	4,31	5,33

Fundamentalną rolą układów PBU jest tłumienie gwałtownych zmian sygnałów podawanych na wejścia urządzeń wykonawczych, które mogą pojawić się podczas przełączania regulatorów. W związku z tym do oceny kosztów sterowania tych układów, oprócz stosowanego do ewaluacji poprzednich eksperymentów wskaźnika $J_{\delta_{AZ}}$ dołączono jeszcze wskaźnik oceny szybkości zmian sygnału wyjściowego z regulatora $J_{r_{AZ}}$ zdefiniowany zależnością 4.4. Wielkości obu wskaźników dla poszczególnych prób zebrano w tabeli 4.7. W przeciwieństwie do poprzedniej tabeli wartości współczynników wyznaczonych dla eksperymentów z załączonym układem PBU są tu wyraźnie mniejsze od wartości dla ich odpowiedników bez tego układu. Wyjątkiem jest wskaźnik prędkości zmian sygnału $J_{r_{AZ}}$ dla próby PBU-1b-S, którego wartość pozostała praktycznie niezmienną. Można zatem stwierdzić, że zastosowanie PBU zmniejszyło zarówno zakres, jak i szybkość zmian kąta obrotu azipodów podczas przełączania regulatorów w układzie sterowania modelem *Dorchester Lady*⁸.

⁸ Eksperymenty z układami PBU przeprowadzane na jeziorze wymagały wykonania licznych prób, aby można było uzyskać możliwe do bezpośredniego porównania wyniki układów PBU+ i PBU-. Powód był oczywisty – niemożność kontrolowania zakłóceń środowiskowych. Dlatego w przyszłych badaniach należałoby zmienić ich metodologię. Wydaje się, że lepiej zebrać wyniki pracy układu sterowania automatycznego z dłuższego czasu eksploatacji modelu w różnych warunkach pogodowych zarówno z załączonym, jak i bez załączonego układu PBU i dokonać analizy statystycznej ewentualnych różnic w działaniu układu sterowania

4.7.3. Uwagi dotyczące wyników badań układu sterowania dla podróży „od kei do kei”

W przypadku badania kompleksowego układu sterowania w podróży „od kei do kei” nie wyznaczano wskaźników jakości, gdyż ze względu na odmienny charakter poszczególnych etapów rejsu ich zdefiniowanie obejmujące całość eksperymentu nie jest możliwe. Natomiast obliczenia dla kolejnych części trasy byłyby powieleniem analiz już przeprowadzonych w tym podrozdziale. Natomiast uważny ogląd i porównanie zapisów sygnałów zarejestrowanych podczas symulacji HIL oraz eksperymentu przeprowadzonego w warunkach rzeczywistych (patrz: rysunki 4.29 i 4.30) pozwoliły na sformułowanie następujących uwag:

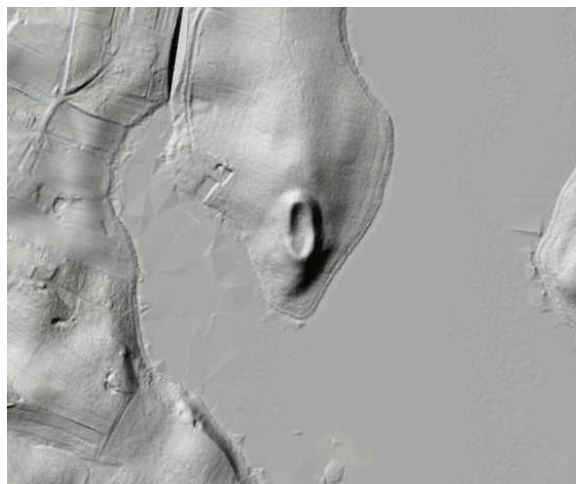
- ◆ Zarówno symulacja HIL, jak i próba przeprowadzona na jeziorze wykazały, że badany układ bezpiecznie sterował modelem *Dorchester Lady* podczas całej podróży bez interwencji operatora.
- ◆ Skuteczna realizacja całości eksperymentu wymagała zastosowania heurystycznej metody zmniejszenia prędkości przed rozpoczęciem manewrów portowych (procedura „kopnięcia wstecz” wykonana w czasie ok. 2500 s podczas symulacji i ok. 2600 s w trakcie eksperymentu na jeziorze). Zabieg ten powszechnie stosowany w praktyce morskiej [131], [132] nie znalazł dotychczas prostych, standardowych rozwiązań na gruncie teorii sterowania. Na przykład w pracy Morawskiego i in. [112] zastosowano tzw. „układ tranzycji”, który wykorzystywał technikę zbiorów rozmytych i wyprowadzone empirycznie zależności opisujące spadek prędkości jednostki. Z kolei M. Tomera w swojej monografii zaproponował osobny tryb operacyjny „Zatrzymanie” (patrz: rysunek 1.5), który realizowany był za pomocą złożonego, wielowymiarowego regulatora, wymagającego znajomości modelu dynamiki statku. Operacja ta, skądinąd stosunkowo łatwa do przeprowadzenia dla oficera na mostku, wymaga z pewnością pogłębionych badań nad jej efektywną realizacją w układzie sterowania automatycznego.
- ◆ Porównanie nastaw obrotów napędu głównego oraz tunelowego steru strumieniowego podczas prób z regulatorem LMI (patrz: rysunki 4.4 – 4.7) oraz tych samych sygnałów dla manewrów w porcie podczas podróży „od kei do kei” wskazało na możliwość wykorzystania sygnałów o większych amplitudach. Mogłoby to doprowadzić do skrócenia manewrów odcumowywania i cumowania.
- ◆ Zastosowanie reguły elipsy do wyznaczania prędkości zadanych regulatora LMI (patrz: rysunek 3.3) skutkowało długotrwałymi manewrami w oczekiwaniu na spełnienie warunków przełączenia punktów zwrotu. Na przykład obrót modelu o 180° podczas cumowania (patrz: przebieg kąta kursowego ψ na rysunku 4.30) trwał około 500 s. W pewnej mierze było to zgodne z założeniami dotyczącymi zachowania bezpieczeństwa, gdyż dawało to czas na ewentualną reakcję operatora, lecz dodatkowo wydłużało czas manewrów.

4.7.4. Próba identyfikacji źródeł zaburzeń pomiaru pozycji modelu izomorficznego za pomocą GPS

Obserwowane podczas prób prowadzonych na jeziorze zaburzenia pomiarów pozycji położenia modelu izomorficznego za pomocą GPS mogły prowadzić do groźnych w skutkach błędów w układzie sterowania

jego ruchem. Skokowe zmiany pozycji podczas próby MPC-2-R pokazane w powiększeniach mapki na rysunku 4.18 nie były jednak bezpośrednio niebezpieczne, gdyż model znajdował się wówczas na otwartym akwenie. Jak można zauważyć w pierwszym układzie współrzędnych poniżej mapki, miały one wyraźny wpływ na pomiar prędkości postępowej u , choć efekt skokowych zmian został mocno zniwelowany przez działanie filtru Kalmana. Natomiast w przypadku próby Q2Q-1-R zarejestrowano kilka następujących po sobie zaburzeń, co uwidoczniło się w powiększeniu na dolnej mapce rysunku 4.28. Te błędy odczytu pozycji mogły potencjalnie doprowadzić nawet do kolizji modelu z konstrukcją nabrzeża *East River*, gdyż model w tym czasie manewrował w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Na szczęście przeskoki pozycji nie miały znaczącej składowej w osi poprzecznej statku i podobnie jak w poprzednim wypadku zarejestrowano tylko wahania prędkości wzdłużnej u , które nie wywołały reakcji pędników modelu (ok. 2550 s na wykresie przebiegu u na rysunku 4.30).

Analiza podobnych zakłóceń zarejestrowanych podczas innych, niezwiązanych z niniejszą pracą, eksperymentów oraz konsultacje z pracownikami technicznymi FBŻiOŚ wskazują, że głównym źródłem błędów pomiaru pozycji w rejonie północnej zatoki jeziora jest ukształtowanie terenu na półwyspie pomiędzy portem, w którym znajduje się antena transmitująca poprawki RTK, a tym akwenem. Na półwyspie znajduje się wzniesienie i zabytkowe grodzisko, pokazane na rysunku 4.32, którego wał ziemny sięga do 25 m nad poziom jeziora [102]. Jest on dodatkowo porośnięty



Rysunek 4.32. Ilustracja ukształtowania terenu na półwyspie nad jeziorem Silm (źródło: <https://mapy.geoportal.gov.pl/>)

lasem. Przeszkoda ta powoduje losowe zaniki transmisji poprawki RTK do odbiorników GPS na modelach i przełączanie ich do pracy w trybie DGPS co skutkuje pogorszeniem dokładności pomiaru pozycji nawet o dwa rzędy wielkości.

Błędy pomiaru pozycji na *East River* są natomiast rzadkością, gdyż akwen ten leży w zakresie bezpośredniej widoczności anteny nadającej poprawkę. Najprawdopodobniej były one spowodowane bliskością brzegu jeziora porośniętego wysokimi drzewami, które „zacięły” widoczność części satelitów na nieboskłonie i w ten sposób zakłócony został sam pomiar GPS, a nie transmisja poprawki RTK.

Zakończenie

Zastosowanie układu trzech przełączanych regulatorów pozwala na bezpieczne sterowanie ruchem statku handlowego we wszystkich fazach podróży morskiej. Struktura ta uzupełniona o mechanizm przełączania bezuderzeniowego i nadrzędny blok decyzyjny tworzy kompleksowy układ, który może spełniać funkcję warstwy sterowania w architekturze autonomicznego statku morskiego na drugim, trzecim lub czwartym poziomie autonomiczności według klasyfikacji IMO (MASS Degree 2 – 4).

Analiza metodyki syntezy kompleksowego układu sterowania oraz wyników jego działania uzyskanych w trybie symulacji *Hardware-In-the-Loop*, a także badań przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych na jeziorze Silm, na modelu izomorficznym *Dorchester Lady*, pozwalają na stwierdzenie, że cele pracy zostały osiągnięte, a teza pracy udowodniona. W szczególności autor doszedł do następujących wniosków:

1. Zastosowanie zmodyfikowanych wersji istniejących regulatorów ruchu statku do sterowania przy niewielkich prędkościach w porcie oraz przy prędkościach eksploatacyjnych na wodach otwartych znacząco uprościło i przyspieszyło syntezę całości układu sterowania. W swojej oryginalnej wersji wielowymiarowy regulator LMI używany do manewrów w porcie realizował to samo zadanie dla innego obiektu – modelu dużego zbiornikowca VLCC *Blue Lady*. Natomiast regulator zastosowany podczas żeglugi na wodach otwartych, w oryginale sterował tym samym obiektem, czyli modelem *Dorchester Lady*, lecz dla innego zadania, jakim jest manewr UNREP⁹.
2. Synteza regulatora sterującego statkiem w strefie pływania na wodach ograniczonych była wymagającym zadaniem, gdyż w tym reżymie statek cechuje duża zmienność właściwości dynamicznych ze względu na duży zakres fluktuacji nastaw prędkości obrotowej śrub napędu głównego. Istotny jest także postulat zachowania niewielkich odchyłek bocznych od trajektorii zadanej, gdyż na takich akwenach wyznacza się często dość wąskie tory wodne i strefy rozgraniczenia ruchu statków. Po analizie wybrano do realizacji regulator PID z adaptacją typu *Gain Scheduling*. Użycie tej techniki pozwoliło na skuteczne rozwiązanie przedstawionego zagadnienia. Potwierdzają to wartości wskaźników w tabeli 4.4 oraz kształt rzeczywistych trajektorii modelu *Dorchester Lady* na etapie pokonywania *East River* podczas pełnej podróży „od kei do kei”.
3. Analiza własności regulatorów składających się na układ kompleksowy wskazała, że najbardziej odpowiednią techniką przełączania bezuderzeniowego w tym układzie będzie metoda śledzenia sygnałów wyjściowych

⁹ Jest to manewr polegający na utrzymywaniu stałej względnej pozycji dwóch lub większej liczby statków płynących równoległymi kursami. Manewr ten stosuje się najczęściej podczas przeładunku towarów na morzu.

regulatora aktywnego. Zarówno badania symulacyjne, jak i przeprowadzone na jeziorze potwierdziły poprawność takiego wyboru. Zastosowanie układów bezuderzeniowego przełączania regulatorów nie ma znaczącego wpływu na trajektorię ruchu statku, powoduje jednakże istotne zmniejszenie akcji pędników gondolowych w chwili przełączenia, zarówno w zakresie amplitudy kąta ich obrotu, jak i szybkości zmian tego kąta. Jest to zjawisko korzystne, gdyż zmniejsza ryzyko awarii urządzeń wykonawczych spowodowanych występowaniem sygnałów sterujących przekraczających wartości dopuszczalne. Można także przyjąć, że na statku rzeczywistym zmalałoby ryzyko powstania istotnych zakłóceń w sieci okrętowej powodowanych gwałtownymi zmianami w obciążaniu jej bardzo dużymi odbiornikami energii.

4. Zaobserwowane zakłócenia w pomiarze pozycji modelu za pomocą odbiornika GPS-RTK nie spowodowały niebezpiecznych zjawisk w układzie sterowania. Ich efekty zostały stłumione głównie dzięki filtracji mierzonych sygnałów prędkości i kąta kursowego za pomocą filtru Kalmana. Jednakże przyszłe wersje systemu pomiarowo-kontrolnego powinny być wyposażone w inne poza GPS źródła pomiaru pozycji modelu, zwłaszcza w obrębie akwenów portowych i wód ograniczonych.
5. Środowisko MATLAB-Simulink wykorzystane do implementacji wszystkich algorytmów układu pomiarowo-kontrolnego i oprogramowania do sterowania w czasie rzeczywistym pozwoliło na stosunkowo szybkie uzyskanie efektywnego kodu wynikowego. Komputer przemysłowy PC o standardowych parametrach wykorzystywany w roli sterownika SLRT (patrz: strona 38) realizuje z dużym zapasem mocy obliczeniowej wszystkie zadania układu sterowania (patrz: rysunek 3.14).
6. Zastosowanie symulacji *Hardware-In-the-Loop* do wstępnej weryfikacji właściwości poszczególnych składników, jak również całości układu sterowania zdecydowanie przyspieszyło badania i zmniejszyło ich koszty poprzez zmniejszenie liczby eksperymentów realizowanych na obiekcie rzeczywistym, niezbędnych do weryfikacji działania układu. Zaproponowana struktura sprzętowa symulatora *Hardware-In-the-Loop* pokrywała się z układem rzeczywistym w stopniu, który pozwalał na przenoszenie układu pomiarowo-kontrolnego na model izomorficzny tylko poprzez przełączenie wtyczek łączy szeregowych.

Jednocześnie ten sam proces analizy wyników, zwłaszcza prób przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych z modelem izomorficznym pływającym po jeziorze, ujawnił kwestie wymagające modyfikacji lub nowych rozwiązań. Problemy te mogą być dobrym punktem odniesienia do określenia kierunków prac rozwojowych w zakresie tematyki niniejszej rozprawy. Przedstawione wyniki analiz otwierają też nowe obszary potencjalnych badań w dziedzinie sterowania ruchem autonomicznego statku. Najistotniejsze zdaniem autora kierunki dalszych prac w omawianym obszarze można nakreślić w postaci następujących propozycji:

1. Wyniki badań regulatora LMI, choć zadowalające, wskazują, że zasadnym byłoby przeprowadzenia jego syntezy dla innych warunków wstępnych tak, aby uzyskać poprawę jakości jego działania, szczególnie w kanale prędkości kątowej r . Jako że struktura całości układu pozwala na łatwą wymianę każdego z modułów składowych, można także zaimplementować

- w układzie regulator wielowymiarowy o innym od LMI paradygmacie działania i przeprowadzić analizę porównawczą różnych rozwiązań.
2. Zaimplementowany w układzie sterowania wielowymiarowego LMI algorytm wyznaczania prędkości zadanych regulatora na podstawie kolejnych punktów zwrotu wymaga rewizji. Jego działanie jest wyraźnie zbyt zachowawcze, co prowadzi do wydłużania czasu manewrów. Algorytm ten dokonuje przełączenia trajektorii zadanej ruchu modelu na kolejny punkt zwrotu po spełnieniu warunków dotyczących statycznych wartości uchybów położenia i orientacji kadłuba, nie bierze natomiast pod uwagę tendencji jego ruchu. Uwzględnienie w przyszłych pracach kinematycznych i dynamicznych aspektów tego procesu mogłoby znacznie przyspieszyć realizację manewrów w porcie.
 3. Model *Dorchester Lady* wyposażony jest w balast stały i nie jest przystosowany do eksploatacji w różnych stanach załadowania. Zatem, przed próbą przeniesienia omawianego układu sterowania w obszar zastosowań przemysłowych konieczne byłoby uzupełnienie go o mechanizm adaptacji do zmiennych stanów załadowania statku.
 4. Podobnie, przed zastosowaniem omawianego układu na statku morskim, należałoby uzupełnić plan badań o testy jego zachowania podczas sterowania na fali. Na jeziorze Silm praktycznie nie występuje falowanie, które miałyby zauważalny wpływ na ruch modeli izomorficznych.
 5. Badania przeprowadzone dla układów przełączania bezuderzeniowego nie pozwalają na przesądzenie czy i dla jakich warunków ich zastosowanie przyniesie wymierne korzyści w eksploatacji statku. Jedną z metod, która mogłaby doprowadzić do poprawnej oceny tej kwestii, byłoby zebranie danych dla licznych prób przełączeń w rzeczywistych, zróżnicowanych warunkach eksploatacji statku dla obu przypadków: z użyciem i bez użycia układu PBU. Na podstawie tak zebranych danych można by ocenić stopień zmniejszenia narażeń układu sterowania na gwałtowne wahania sygnałów wyjściowych z regulatorów. Trzeba przy tym pamiętać, że zmiany reżymów pływania, a zatem także przełączenia regulatorów w przeciętnych warunkach eksploatacji towarowego statku morskiego byłyby stosunkowo rzadkie. Użycie w zamian jako obiektu badań modeli izomorficznych, dla których można by zaplanować trasy z dużą liczbą przełączeń, mogłoby jednak przynieść nieadekwatne wyniki, zwłaszcza dotyczące efektów eksploatacyjnych, gdyż napędy tych modeli są „przewymiarowane”, aby zabezpieczyć je przed nieuchronnymi błędami popełnianymi przez uczestników szkoleń manewrowych. Na modelach nie można także obserwować wpływu „uderzeń” w układzie sterowania napędów na ich system energetyczny. Modele izomorficzne zasilane są z baterii akumulatorów 120 V_{DC} (patrz: sekcja 2.2.2), których cech nie można porównywać z właściwościami miękkiej sieci okrętowej prądu przemiennego.
 6. Dodatkowym obszarem przyszłych prac badawczych może być ocena zasadności stosowania i właściwości układów przełączania bezuderzeniowego, dla procesów przełączania przez operatora układów regulacji pomiędzy trybem sterowania ręcznego a automatycznym w reżymie MASS Degree 1 lub 2.

7. Wymiana informacji pomiędzy układem regulatorów a nadrzędnym blokiem przełączającym została zaimplementowana w postaci łącza Ethernet i komunikacji za pomocą protokołu UDP. Format wymiany danych opiera się na standardzie NMEA 0183. Umożliwia to łatwą współpracę z zewnętrznym urządzeniem, realizującym funkcje wyznaczania trajektorii i systemu antykolizyjnego. Ewentualne rozszerzenie funkcji zbudowanego układu o takie możliwości stanowiłoby istotny krok w kierunku realizacji pełnego systemu sterowania morskim statkiem autonomicznym MASS.

Kompleksowy układ sterowania zaprezentowany w pracy może być zastosowany jako jeden z kluczowych składników planowanej w FBŻiOŚ nowej infrastruktury szkoleń dotyczących zdalnego pilotażu jednostek sklasyfikowanych na drugim i trzecim poziomie autonomii według IMO.

A. Model matematyczny statku treningowego *Dorchester Lady*

Model matematyczny, który był podstawą oprogramowania modelu symulacyjnego statku treningowego *Dorchester Lady* został opracowany przez Gierusza i opublikowany w dwuczęściowej pracy [57] i [58]. Zainteresowany czytelnik odnajdzie w niej szczegółowe rozważania nad modelowaniem pędników gondolowych, a także wyniki weryfikacji modelu matematycznego na podstawie eksperymentów porównawczych z rzeczywistym statkiem treningowym na jeziorze. W niniejszym dodatku przedstawiono tylko te elementy ze wspomnianej publikacji, które były niezbędne do budowy zastosowanego w pracy modelu symulacyjnego.

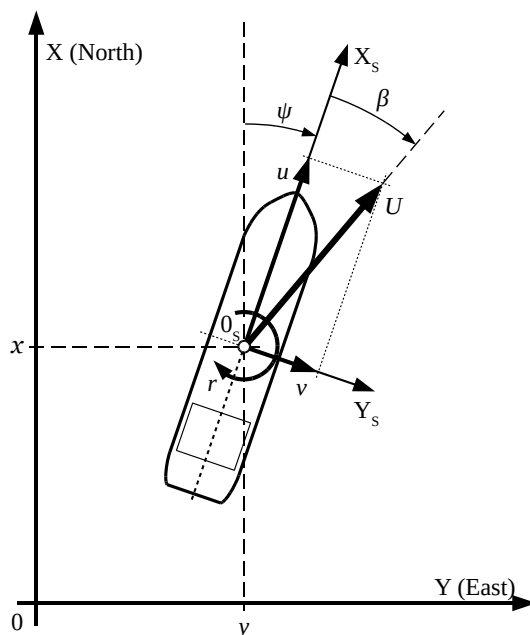
A.1. Układy współrzędnych stosowane w opisie ruchu statku na płaszczyźnie (3DOF)

Statek morski jest obiektem o sześciu stopniach swobody, jednakże w syntezie układów sterowania jego ruchem najczęściej pomija się kiwania, kołysania i nurzania, ze względu na to, iż urządzenia do sterowania kursem i prędkością mają niewielki wpływ na te ruchy¹. Zjawiska związane z falowaniem morskim uwzględnia się w postaci zakłóceń zewnętrznych oddziaływających na obiekt. Dodatkowo specyfika jeziora, nad którym znajduje się ośrodek badawczy, sprawia, że falowanie mogące w odczuwalnym stopniu kołysać modelami występuje niezwykle rzadko. Zatem ruch jednostki jest rozpatrywany na płaszczyźnie $X - Y$ w prawoskrętnym układzie kartezjańskim z osią X skierowaną ku północy, osią Y skierowaną ku wschodowi i osią Z skierowaną ku środkowi Ziemi – NED. Układ ten ilustruje rysunek A.1.

Statek porusza się z prędkością U nazywaną *prędkością nad dnem* z kursem ψ . Jeżeli prędkość poprzeczna kadłuba v w jego własnym, lokalnym układzie współrzędnych ($X_s 0_s Y_s$) jest różna od zera $v \neq 0$, wówczas występuje zjawisko dryfu, którego miarą jest kąt β pomiędzy osią ($0_s X_s$) a wektorem prędkości nad dnem U . Wektor u oznacza prędkość wzdłużną statku w lokalnym układzie, a r prędkość kątową. Współrzędne położenia środka ciężkości statku (x, y) w układzie NED wyznacza się zazwyczaj w formie jego współrzędnych geograficznych². W przypadku modeli pływających po jeziorze Silm jest to lokalny układ współrzędnych przygotowany specjalnie dla tego akwenu.

¹ Wyjątkiem są bardzo rzadko stosowane układy tłumienia kołysań bocznych statku za pomocą sterów płetwowych.

² Przyjmuje się, że środek ciężkości statku pokrywa się z punktem dzielącym na pół odcinek łączący dziób i rufę w osi symetrii statku.



Rysunek A.1. Ilustracja określania parametrów ruchu statku w układach współrzędnych kartezjańskich: X_0Y_0 – NED (ang. *North-East-Down*) oraz $X_s0_sY_s$ związanym z kadłubem statku

A.2. Równania podstawowe

Fundamentalne zależności opisujące ruch statku na wodzie spokojnej wyprowadza się na drodze analizy newtonowskich zależności pomiędzy kadłubem statku a jego otoczeniem [71], [135]. Równania te przekształcone do postaci dogodnej do implementacji programowej mają postać³:

$$\dot{u} \text{ [N]} = \frac{(m + m_y)vr + X_C}{m + m_x}, \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{v} \text{ [N]} = \frac{-(m + m_x)ur + Y_C}{m + m_y}, \quad (\text{A.2})$$

$$\dot{r} \text{ [Nm]} = \frac{N_C}{I_z + I_{zz}}, \quad (\text{A.3})$$

gdzie:

- m – masa statku,
- u, v, r – prędkości statku: podłużna, poprzeczna i kątowa,
- m_x, m_y – masy dodane w osiach X_s i Y_s ,
- I_z – moment bezwładności wokół osi Z_s ,
- I_{zz} – dodany moment bezwładności wokół osi Z_s ,
- X_C – siła całkowita działająca wzdłuż osi X_s ,
- Y_C – siła całkowita działająca wzdłuż osi Y_s ,
- N_C – całkowity moment działający wokół osi Z_s .

³ W niniejszej pracy stosuje się wymiarowe postaci równań dynamiki statku.

Całkowite siły i moment są sumą z szeregu czynników:

$$X_C = X_h + X_{podl} + X_{podp} + X_{opl} + X_{opp} + X_{sst} + X_{sso} + X_w, \quad (A.4)$$

$$Y_C = Y_h + Y_{podl} + Y_{podp} + Y_{opl} + Y_{opp} + Y_{sst} + Y_{sso} + Y_w, \quad (A.5)$$

$$N_C = N_h + N_{podl} + N_{podp} + N_{opl} + N_{opp} + N_{sst} + N_{sso} + N_w, \quad (A.6)$$

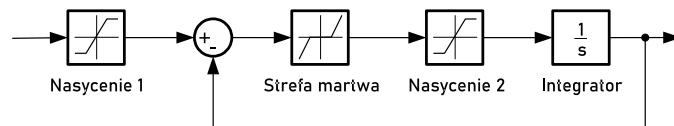
których dolne indeksy oznaczają następujące źródła pochodzenia sił i momentów:

- zjawiska hydrodynamiczne: $X_h, Y_h, N_h,$
- napór lewego (prawego) pędnika: $X_{podl}(X_{podp}), Y_{podl}(Y_{podp}), N_{podl}(N_{podp}),$
- opór lewego (prawego) pędnika: $X_{opl}(X_{opp}), Y_{opl}(Y_{opp}), N_{opl}(N_{opp}),$
- tunelowy ster strumieniowy: $X_{sst}, Y_{sst}, N_{sst},$
- obrotowy ster strumieniowy: $X_{sso}, Y_{sso}, N_{sso},$
- wiatr: $X_w, Y_w, N_w.$

Tabela A.1. Dopuszczalne zakresy sygnałów zadanych pędników *Dorchester Lady*

Sygnal	Symbol	Zakres	Jednostka
Względne obroty lewej śruby	n_{AZ_Lz}	(-10...10)	[-]
Kąt obrotu lewego pędnika	δ_{AZ_Lz}	(-180...180)	[°]
Względne obroty prawej śruby	n_{AZ_Pz}	(-10...10)	[-]
Kąt obrotu prawego pędnika	δ_{AZ_Pz}	(-180...180)	[°]
Względny napór tunelowego steru str.	sst_z	(-1...1)	[-]
Względny napór obrotowego steru str.	sso_z	(0...1)	[-]
Kąt obrotu steru str.	α_z	(-180...180)	[°]

Obliczanie sił i momentów od urządzeń napędowych wymaga uwzględnienia ich dynamiki i ograniczeń konstrukcyjnych. Tabela A.1 zawiera maksymalne wartości nastaw wszystkich pędników.



Rysunek A.2. Schemat blokowy modelowania dynamiki pędników. Blok **Nasylenie 1** dla nastaw kątów obrotu działa w ten sposób, że sygnały większe co do wartości bezwzględnej od wartości granicznych nie są „odcinane”, lecz przeliczane z zachowaniem zasad okresowości

Ich dynamikę modelowano metodą przedstawioną na schemacie A.2. Parametry nieliniowości bloku **Nasylenie 1** odpowiadają wartościom umieszczonym w kolumnie **Zakres** w tabeli A.1. Parametry pozostałych nieliniowości przedstawia tabela A.2

Tabela A.2. Parametry dynamiki poszczególnych urządzeń napędowych

Symbol	Strefa martwa	Jednostka	Nasylenie 2 (Prędkość)	Jednostka
n_{AZ_Lz}	1/60	[-]	2,2	[1/s]
δ_{AZ_Lz}	0,1	[°]	0,635	[°/s]
n_{AZ_Pz}	1/60	[-]	2,2	[1/s]
δ_{AZ_Pz}	0,1	[°]	0,635	[°/s]
sst_z	0,01	[-]	0,15	[1/s]
$ss0_z$	0,01	[-]	3,0	[1/s]
α_z	0,1	[°]	0,108	[°/s]

Wobec tego, biorąc pod uwagę wszystkie powyższe rozważania, bieżące parametry kinematyczne statku, czyli jego chwilowe położenie i kurs można wyznaczyć w procedurze całkowania:

$$\psi(t) = \psi_0(t_0) + \int_{t_0}^t r(\tau) d\tau, \quad (\text{A.7})$$

$$x(t) = x_0(t_0) + \int_{t_0}^t [u(\tau) \cos(\psi(\tau)) - v(\tau) \sin(\psi(\tau))] d\tau, \quad (\text{A.8})$$

$$y(t) = y_0(t_0) + \int_{t_0}^t [u(\tau) \sin(\psi(\tau)) + v(\tau) \cos(\psi(\tau))] d\tau. \quad (\text{A.9})$$

Do uzyskania pełnego modelu symulacyjnego niezbędne jest jeszcze określenie zależności opisujących zjawiska hydrodynamiczne i zakłócenia wiatrowe. Tym zagadnieniom poświęcony jest kolejny podrozdział.

A.3. Siły i momenty hydrodynamiczne

Przeprowadzenie teoretycznej analizy wszystkich oddziaływań hydromechanicznych, które występują podczas ruchu statku na wodzie spokojnej, jest z zasady niemożliwe [41]. Dlatego też współczynniki oddziaływań hydrodynamicznych uzyskuje metodami przybliżonymi. Najczęściej wyznacza się je drodze eksperymentów w basenach holowniczych lub, metodą w ostatnim czasie coraz bardziej rozpowszechnioną, za pomocą narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów – CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Metody te są niezwykle kosztowne i pracochłonne.

W omawianym przypadku zastosowano semi-empiryczną metodę, która została zaproponowana w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w Japonii przez grupę badawczą mającą za zadanie ujednoczenie matematycznych metod modelowania ruchu statku. Zespół ten stworzył „standardowy model MMG” (ang. *Maneuvering Modeling Group*) [71], [135]. Metoda ta polega na analizie podstawowych parametrów fizycznych statku oraz danych z jego standardowych prób [183]. Przyjmując za podstawę zależności zaproponowane w modelu MMG przyjęto dla *Dorchester Lady* następujące równania opisujące zjawiska hydrodynamiczne [58]:

$$X_h = \frac{1}{2}\xi_w L T [X_{uu}u|u| + X_{vv}v^2 + L^2 X_{rr}r^2] + X_{vr}vr, \quad (\text{A.10})$$

$$Y_h = \frac{1}{2}\xi_w L^2 [Y_{vu}v|u| + Y_{vv}v|v| + L Y_{ru}r|u| + L^2 Y_{rr}r|r| + L Y_{vr}v|r| + L Y_{rv}r|v|], \quad (\text{A.11})$$

$$N_h = \frac{1}{2}\xi_w L^3 [N_{vu}v|u| + N_{vv}v|v| + L N_{ru}r|u| + L^2 N_{rr}r|r| + L N_{vr}v|r| + L N_{rv}r|v|]. \quad (\text{A.12})$$

Współczynniki hydrodynamiczne występujące w powyższych równaniach można wyznaczyć, stosując poniższe formuły.

Dla sił działających w osi podłużnej statku X_s :

$$\begin{aligned} X_{vr} &= (1,11C_B - 0,07) m_y, \\ X_{vv} &= 0,4T \left(\frac{B}{L}\right)^2 - 0,006, \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

a współczynnik X_{uu} jest stały i wynosi odpowiednio:

$$X_{uu} = \begin{cases} -0,03 & \text{gd}y \ u \geq 0, \\ -0,07 & \text{gd}y \ u < 0. \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Dla sił działających w osi poprzecznej statku Y_s :

$$\begin{aligned} Y_{vu} &= -\left(\frac{\pi}{2}k + 1,4C_B \frac{B}{L}\right) \frac{T}{L}, \\ Y_{ru} &= 0,25\pi k \frac{T}{L}, \\ Y_{vv} &= -C_D \frac{T}{L}, \\ Y_{rr} &= x_a C_D \frac{T}{L}, \\ Y_{vr} &= -0,32C_D \frac{T}{L}, \\ Y_{rv} &= x_a C_D \frac{T}{L}. \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Dla momentów wokół osi Z_s :

$$\begin{aligned} N_{vu} &= -k \frac{T}{L}, \\ N_{vv} &= x_a Y_{vv}, \\ N_{ru} &= (-0,54k + k^2) \frac{T}{L}, \\ N_{rr} &= -0,05C_D \frac{T}{L}, \\ N_{vr} &= x_a Y_{vr}, \\ N_{rv} &= -0,01C_D \frac{T}{L}, \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
m \text{ [kg]} &= \xi_w C_B L B T = 8,2192 \cdot 10^3, \\
I_z \text{ [kgm}^2] &= 1,4 (0,055 C_B + 0,029) m L^2 = 1,1141 \cdot 10^5, \\
m_x \text{ [kg]} &= \frac{1}{2} \xi_w C_B B T^2 = 1,7775 \cdot 10^2, \\
m_y \text{ [kg]} &= \frac{1}{2} \xi_w \pi L T^2 \left(1 + 0,16 C_B \frac{B}{T} - 5,1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right) \\
&= 6,0440 \cdot 10^3, \\
I_{zz} \text{ [kgm}^2] &= \frac{1}{2} \xi_w \pi L^3 T^2 \left(\frac{1}{12} + 0,017 C_B \frac{B}{T} - 0,33 \frac{B}{L} \right) \quad (\text{A.17}) \\
&= 4,8712 \cdot 10^3, \\
k \text{ [-]} &= \frac{2T}{L} = 8,6505 \cdot 10^{-2}, \\
C_D \text{ [-]} &= 1,1 + 0,045 \frac{L}{T} - 0,27 \frac{B}{T} + 0,016 \left(\frac{B}{T} \right)^2 = 1,3758, \\
x_a \text{ [-]} &= 0,025.
\end{aligned}$$

Wartości parametrów L, B, T, C_B modelu *Dorchester Lady* zebrane są w tabeli 2.1 na stronie 22, a $\xi_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ oznacza gęstość wody.

A.3.1. Siły i moment generowane przez pędniki gondolowe

Siły hydrodynamiczne występujące w przypadku, gdy statek jest napędzany dwoma pędnikami gondolowymi umieszczonymi w części rufowej, symetrycznie po obu burtach pisane są szczegółowo we wspomnianej wcześniej pracy Gierusza [57]. Rozpatruje się w niej cztery rodzaje oddziaływań:

- siły napędowe generowane przez każdy z pędników z osobna,
- siły napędowe będące skutkiem interakcji między pędnikami,
- siły oporu tworzone osobno przez konstrukcje każdego z pędników,
- siły oporu powstałe na skutek interakcji między pędnikami.

Poniżej przedstawiono siły i momenty dla przypadków (a) i (c), gdyż siły i momenty pochodzące z interakcji pomiędzy pędnikami są w przypadku procesów rozpatrywanych w niniejszej pracy znikome i mogą zostać pominięte bez znaczącej utraty dokładności modelowania. Dla średnich i pełnych prędkości spowodowane jest to ograniczeniami narzuconymi na kąt wychylenia pędników, a w przypadku manewrowania w porcie z niewielkimi prędkościami wiąże się to z bardzo małymi nastawami prędkości obrotowej śrub.

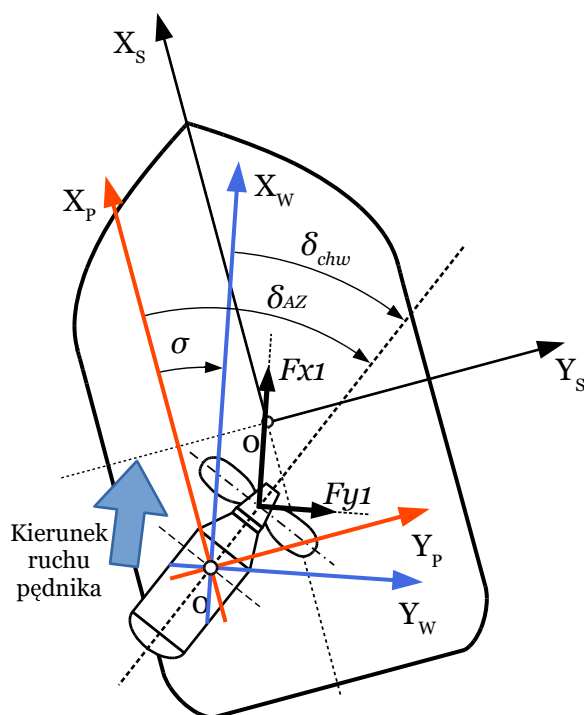
Siły napędowe pochodzące od każdego pędnika gondolowego

Podstawowe równania sił wzdłużnej i poprzecznej działających w miejscu zamontowania pędnika gondolowego mają postać:

$$F x 1 = \xi_w n_{AZ}^2 D_{prop}^4 K T_{tx} (\delta_{chw}, W_p), \quad (\text{A.18})$$

$$F y 1 = \xi_w n_{AZ}^2 D_{prop}^4 K T_{ty} (\delta_{chw}, W_p), \quad (\text{A.19})$$

- gdzie:
- ξ_w – gęstość wody,
 - n_{AZ} – prędkość obrotowa śruby,
 - D_{prop} – średnica śruby,
 - $KT_{tx}(\delta_{chw}, W_p)$ – bezwymiarowy współczynnik naporu wzdłużnego w układzie współrzędnych odniesionym do wody,
 - $KT_{ty}(\delta_{chw}, W_p)$ – bezwymiarowy współczynnik naporu poprzecznego w układzie współrzędnych odniesionym do wody,
 - δ_{chw} – chwilowy kąt napływu wody na śrubę pędnika,
 - W_p – współczynnik posuwu.



Rysunek A.3. Ilustracja rozkładu siły napędowych generowanych przez pędnik gondolowy

Równania (A.18) i (A.19) pozwalają obliczyć siły w prawoskrętnym układzie współrzędnych (X_w, Y_w), którego oś X_w wskazuje kierunek rzeczywistego ruchu pędnika w wodzie, stąd nazywa się go „odniesionym do wody” (ang. *water frame*). Układ ten zaznaczony jest na rysunku A.3 kolorem niebieskim. Bezwymiarowe współczynniki naporu KT_{tx} i KT_{ty} w sposób silnie nieliniowy zależą od chwilowych wartości prędkości ruchu pędnika w wodzie i kąta napływu wody na śrubę. Ich wartości określa się najczęściej eksperymentalnie. Sposób ich wyznaczenia dla modelu *Dorchester Lady* przedstawił Gierusz w publikacji [57].

Siły F_{x1} i F_{y1} dla każdego pędnika transformuje się do układu współrzędnych tego pędnika (X_p, Y_p), zaznaczonego na rysunku A.3 kolorem czerwonym stosując następujące formuły:

$$F_{x2} = F_{x1} \cdot \cos(\sigma) + F_{y1} \cdot \cos(\pi/2 + \sigma), \quad (\text{A.20})$$

$$F_{y2} = F_{x1} \cdot \sin(\sigma) + F_{y1} \cdot \sin(\pi/2 + \sigma), \quad (\text{A.21})$$

gdzie kąt $\sigma = \delta_{AZ} - \delta_{chw}$.

Jak już odnotowano wyżej, kiedy wystąpią zjawiska związane z oddziaływaniem wzajemnym obu pędników, należy rozpatrzyć dodatkowe zależności. Zainteresowany czytelnik znajdzie je we wspomnianym artykule Gierusza [57].

Ostatecznie napędowe siły i moment, których źródłem jest pędnik gondolowy, oblicza się stosując następujące zależności⁴:

$$X_{pod} = Fx_2, \quad (A.22)$$

$$Y_{pod} = Fy_2, \quad (A.23)$$

$$N_{pod} = Y_{pod} \cdot x_{pod} - X_{pod} \cdot y_{pod}, \quad (A.24)$$

gdzie: x_{pod} – współrzędna wzdłużna początku układu współrzędnych (X_p0Y_p) pędnika wyznaczona w układzie współrzędnych związanych z kadłubem ($X_s0_sY_s$),
 $x_{pod} = -5,425$ m,
 y_{pod} – współrzędna poprzeczna początku układu współrzędnych (X_p0Y_p) pędnika wyznaczona w układzie współrzędnych związanych z kadłubem ($X_s0_sY_s$),
 $y_{pod(L)} = -0,33$ m, $y_{pod(P)} = 0,33$ m.

Siły oporu pochodzące od każdego pędnika gondolowego

Opór powodowany przez konstrukcje pędnika może być obliczany jako suma jego oporu czołowego i bocznego, przy czym w przypadku pędników zainstalowanych na modelu *Dorchester Lady* opór czołowy można pominąć. Jest to skutkiem bardzo wąskiej konstrukcji podpory i dolnej płetwy oraz niewielkiej średnicy gondoli (patrz: rysunek 2.12). Natomiast siłę oporu bocznego można rozłożyć w układzie współrzędnych odniesionym do wody na składowe: podłużną i poprzeczną jak na rysunku A.4.

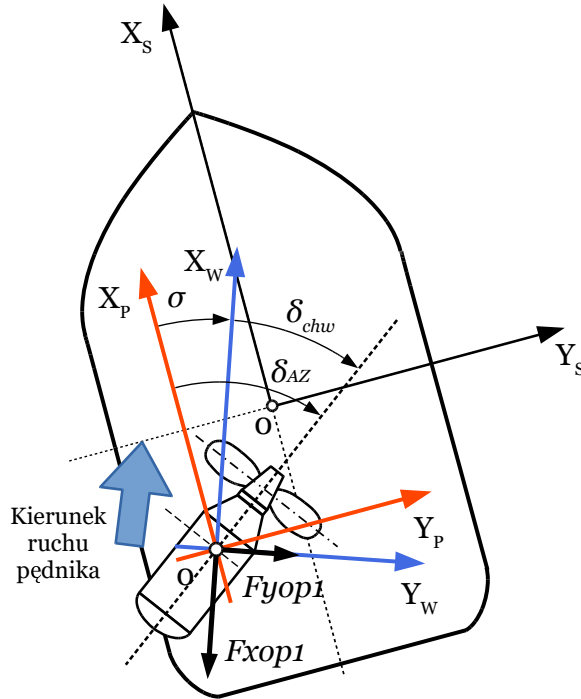
Równania pozwalające wyznaczyć wartości tych składowych mają postać:

$$F_{xop1} = 1/2 \xi_w S_{bp} C_{tx1}(\delta_{chw}) U_w^2, \quad (A.25)$$

$$F_{yop1} = 1/2 \xi_w S_{bp} C_{ty1}(\delta_{chw}) U_w^2, \quad (A.26)$$

gdzie: S_{bp} – powierzchnia boczna konstrukcji pędnika:
 $S_{bp} = 0,05$ m²,
 $C_{tx1}(\delta_{chw})$ – bezwymiarowy współczynnik oporu w osi podłużnej,
 $C_{tx1} = 1,2 \cos(2\delta_{chw}) - 1,27$,
 $C_{ty1}(\delta_{chw})$ – bezwymiarowy współczynnik oporu dla osi poprzecznej,
 $C_{ty1} = 1,3 \sin(2\delta_{chw})$,
 δ_{chw} – chwilowy kąt napływu wody,
 U_w – symulowana, chwilowa prędkość konstrukcji pędnika: $U_w = u_{chw} \cdot \cos(\sigma) + v_{chw} \cdot \sin(\sigma)$,
przy czym: $\sigma = \delta_{AZ} - \delta_{chw}$, a u_{chw} i v_{chw} są chwilowymi wartościami składowych prędkości podłużnej i poprzecznej kadłuba w układzie ($X_s0 Y_s$).

⁴ Naturalnie należy przeprowadzić stosowne obliczenia dla obu pędników osobno, przy czym indeks dolny „(L)” oznacza pędnik lewy, a „(P)” prawy.



Rysunek A.4. Ilustracja rozkładu sił oporu generowanych przez pędnik gondolowy

Kalkulacji ostatecznych wartości sił oporu dla każdego pędnika dokonuje się w ten sam sposób jak sił napędowych, posługując się zależnościami (A.22) – (A.24).

A.3.2. Siły i moment generowane przez tunelowy ster strumieniowy

Kiedy prędkość postępową statku wynosi zero wówczas siła poprzeczna Y_{sst} i moment obrotowy N_{sst} generowane przez tunelowy ster strumieniowy wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} Y_{sst0} &= sst Y_{sst}^0, \\ N_{sst0} &= Y_{sst0} l_{sst}, \end{aligned} \quad (A.27)$$

gdzie: $ssst$ – chwilowa wartość nastawy steru tunelowego,
 Y_{sst}^0 – siła poprzeczna przy pełnej nastawie steru strumieniowego zmierzona na *Dorchester Lady* dla zerowej prędkości postępowej: $Y_{sst}^0 = 132,00$ [N],
 l_{sst} – odległość pomiędzy osią steru strumieniowego a początkiem układu współrzędnych statku: $l_{sst} = 4,44$ [m].

Siły wytwarzane przez ster strumieniowy w osi podłużnej statku są przez wielu autorów pomijane [31], [46]. Jednakże podczas prób na jeziorze zauważono niewielki wpływ steru strumieniowego na ruch podłużny, dlatego wprowadzono do modelu dodatkową niewielką siłę wzdłużną:

$$X_{sst} = -20 u |sst|. \quad (A.28)$$

Równania dla sił i momentu przedstawione wyżej zachowują swoją ważność, jak już zaznaczono, przy zerowej lub bliskiej zeru prędkości

wzdłużnej statku $u \approx 0$. Kiedy prędkość ta odbiega od zera, wówczas oddziaływania steru strumieniowego ulegają zmianom, które modeluje się za pomocą następujących zależności wyznaczonych na podstawie badań *Dorchester Lady* na jeziorze dla $u \geq 0$:

$$Y_{sst} = Y_{sst0} (0,7602u^2 - 1,4635u + 1,0), \quad (\text{A.29})$$

$$N_{sst} = N_{sst0} (0,4879u^4 - 3,1352u^3 + 3,0781u^2 - 1,5239u + 1,0) \quad (\text{A.30})$$

oraz dla $u < 0$:

$$Y_{sst} = Y_{sst0} (0,4409u^2 + 0,7193u + 1,0), \quad (\text{A.31})$$

$$N_{sst} = N_{sst0} (0,1738u^4 + 0,4985u^3 + 0,7667u^2 - 1,2310u + 1,0). \quad (\text{A.32})$$

A.3.3. Siły i moment generowane przez obrotowy ster strumieniowy

Ster strumieniowy obrotowy został zainstalowany na modelu *Dorchester Lady* w roli symulatora holownika dziobowego. Kursanci podczas szkoleń operują nim manualnie. Dla pełnowymiarowych zbiornikowców LNG takich sterów się w zasadzie nie stosuje. W układzie pomiarowo-kontrolnym skonstruowanym dla *Dorchester Lady* może on być sterowany także automatycznie. Opcja ta dla wszystkich układów prezentowanych w niniejszej pracy nie była wykorzystywana (patrz: ostatnia sekcja podrozdziału 2.2.2 na stronie 36). Siłę generowaną przez ten ster oblicza się z pomocą następującej formuły:

$$F_{sso0} = sso F_{sso}^0, \quad (\text{A.33})$$

gdzie: sso – chwilowa wartość zadana naporu steru obrotowego,
 F_{sso}^0 – siła uciągu mierzona na *Dorchester Lady* dla pełnej nastawy przy nieruchomym kadłubie: $F_{sso}^0 = 42,18$ [N].

Chwilowa wartość siły generowanej przez ster podczas ruchu statku zależy od prędkości napływu wody w miejscu jego montażu. Urządzenie zamontowane na *Dorchester Lady*, jak to przedstawiono w podrozdziale 2.2.2, ma dwa wloty wody tworzące kształt litery „T” zlokalizowane po obu stronach gruszki dziobowej. Woda dopływająca do steru jest więc „przyspieszana” przez własny poprzeczny ruch statku. Efekt ten modeluje równanie:

$$u_{sd} = |v + r l_{sso}|, \quad (\text{A.34})$$

gdzie l_{sso} wyraża odległość pomiędzy osią obrotu zespołu łopatek kierujących strumieniem wody, a początkiem układu współrzędnych związanego ze statkiem: $l_{sso} = 4,91$ [m].

Ostatecznie chwilowa wartość siły naporu obrotowego steru strumieniowego może zostać obliczona na podstawie równania:

$$F_{sso} = F_{sso0} (1 + k_{sso} u_{sd}), \quad (\text{A.35})$$

w którym wartość współczynnika $k_{sso} = 1$.

Podczas eksperymentów na jeziorze zauważono, że efektywność tego pędnika wyraźnie wzrastała podczas ruchu prostoliniowego, stąd finalne

równania dla sił i momentu zostały uzupełnione o współczynnik korekcyjny $k_{k_{ss0}}$ do postaci:

$$\begin{aligned} X_{ss0} &= F_{ss0} (\cos(\alpha) + k_{k_{ss0}}), \\ Y_{ss0} &= F_{ss0} (\sin(\alpha) + k_{k_{ss0}}), \\ N_{ss0} &= F_{ss0} l_{ss0} (\sin(\alpha) + k_{k_{ss0}}), \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

gdzie α oznacza chwilową wartość nastawy kąta obrotu pędnika a $k_{k_{ss0}} = -0,8|u|$.

A.3.4. Siły i moment pochodzące od wiatru

Równania opisujące siły i moment działające na kadłub statku, których źródłem jest wiatr, są dobrze znane i prezentowane przez wielu autorów, na przykład [31], [48], [76]:

$$X_w = \frac{1}{2} \xi_p V_w^2 A_x C_x(\gamma_w), \quad (\text{A.37})$$

$$Y_w = \frac{1}{2} \xi_p V_w^2 A_y C_y(\gamma_w), \quad (\text{A.38})$$

$$N_w = \frac{1}{2} \xi_p V_w^2 L A_y C_n(\gamma_w), \quad (\text{A.39})$$

gdzie:

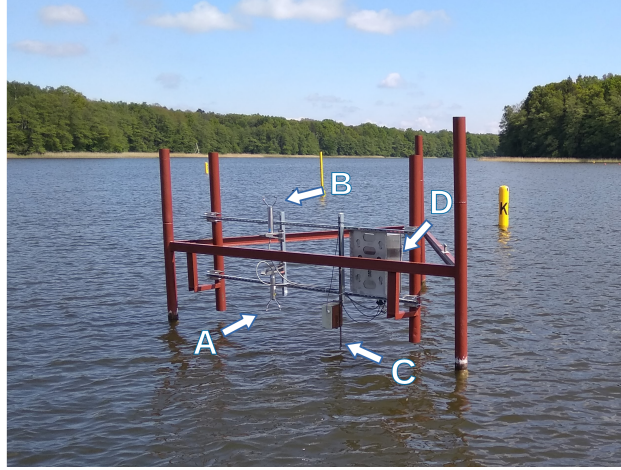
- ξ_p – gęstość powietrza: $\xi_p = 1,23 \text{ kg/m}^3$,
- V_w – prędkość wiatru pozornego,
- A_x (A_y) – powierzchnia rzutu sylwetki statku na płaszczyznę odpowiednio osi ($Y_s0_sZ_s$) oraz ($X_s0_sZ_s$):
 $A_x = 3,02 \text{ m}^2$, $A_y = 10,93 \text{ m}^2$,
- C_x , C_y , C_n – bezwymiarowe współczynniki oporu wiatrowego,
- γ_w – kąt wiatru pozornego.

Obliczanie wartości równań (A.37) – (A.39) niesie z sobą dwa istotne zagadnienia:

- ◆ poprawne zamodelowanie chwilowych wartości prędkości i kierunku wiatru rzeczywistego,
- ◆ określenie właściwych dla sylwetki statku wartości współczynników: C_x , C_y , C_n .

Siła i kierunek wiatru są modelowane jako pewne procesy losowe, których charakter (parametry funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa) są znane. Niestety istniejące modele dotyczą takich akwenów jak środkowy północny Atlantyk lub Morze Północne i są wyznaczone dla wysokości 10 m n.p.m dla statków [67] lub 60 m n.p.m dla turbin wiatrowych [43]. Nie istnieją lub nie są znane autorowi podobne dane dla lokalnych wiatrów wiejących nad jeziorami niżu środkowoeuropejskiego. Dlatego też w modelu symulacyjnym zastosowano rzeczywiste wartości kierunku i prędkości wiatru mierzone nad powierzchnią jeziora Silm [61]. Zdjęcie na rysunku A.5 przedstawia układ pomiarowy parametrów wiatru i falowania na jeziorze przygotowany do rejestracji, który był źródłem danych o kierunku i prędkości wiatru podczas symulacji.

Bezwymiarowe współczynniki wiatrowe można uzyskać w sposób analityczny [76] lub na drodze eksperymentów w tunelach aerodynamicznych. W przypadku *Dorchester Lady* odpowiednie dane nie były dostępne. Mając zatem na uwadze kształt części nadwodnej kadłuba tej jednostki pokazany



Rysunek A.5. Widok układu pomiarowego parametrów wiatru i fali na jeziorze Silm: A – dolny anemometr, B – górny anemometr, C – pojemnościowy czujnik wysokości fali, D – skrzynka układu przetwarzania danych i zasilania

na rysunku 2.3, zaadoptowano prawidła określone dla statków o zbliżonych sylwetkach [31] dla $u \geq 0$:

$$C_x = a_5 \gamma_w^5 + a_4 \gamma_w^4 + a_3 \gamma_w^3 + a_2 \gamma_w^2 + a_1 \gamma_w + a_0 \quad (\text{A.40})$$

i dla $u < 0$:

$$C_x = b_5 \gamma_w^5 + b_4 \gamma_w^4 + b_3 \gamma_w^3 + b_2 \gamma_w^2 + b_1 \gamma_w + b_0 \quad (\text{A.41})$$

oraz

$$C_y = c_7 \gamma_w^7 + c_5 \gamma_w^5 + c_3 \gamma_w^3 + c_1 \gamma_w, \quad (\text{A.42})$$

$$C_n = d_7 \gamma_w^7 + d_5 \gamma_w^5 + d_3 \gamma_w^3 + d_2 \gamma_w^2 + d_1 \gamma_w. \quad (\text{A.43})$$

Parametry powyższych równań zebrano w tabeli A.3.

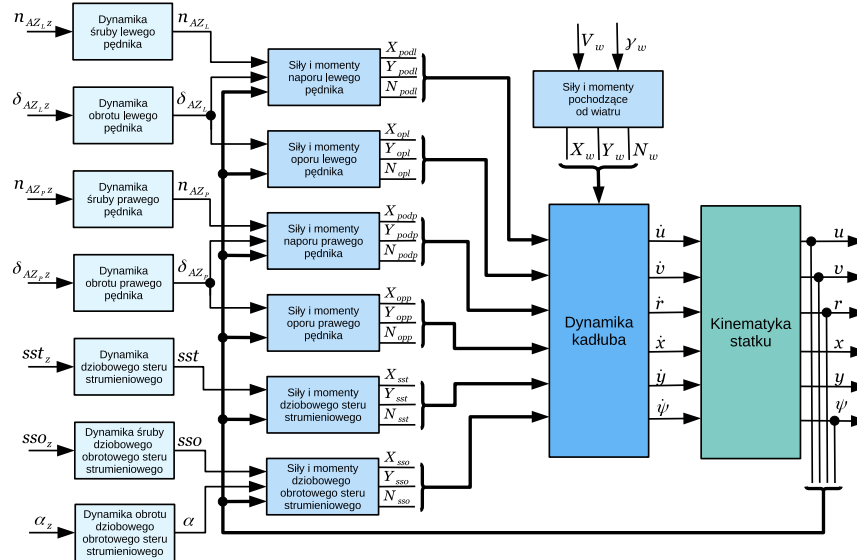
Tabela A.3. Parametry równań współczynników oporu wiatrowego

Indeks	a	b	c	d
7	–	–	-4,6074 e-04	5,618 6e-04
5	-2,0340 e01	2,0340 e-01	-1,0037 e-03	-1,1026 e-02
4	1,5380 e00	1,5380 e00	–	–
3	-4,1095 e00	4,1095 e00	1,6170 e-01	5,2720 e00
2	4,7166 e00	4,7166 e00	–	3,4461 e00
1	-1,7252 e00	1,7252 e00	-1,0531 e00	1,3233 e-02
0	-6,0860 e00	-6,0860 e00	–	–

A.4. Uwagi do implementacji w środowisku MATLAB-Simulink

Wstępna wersja modelu symulacyjnego *Dorchester Lady* została zaprogramowana w języku MATLAB wersji 2016b w postaci S-funkcji i zamknięta

w bloku Simulinka. Forma ta była bardzo dogodna do wprowadzania poprawek podczas weryfikacji modelu na podstawie prób manewrowych na jeziorze. Skorygowany model został następnie zakodowany w języku C do postaci S-funkcji *C MEX Level 2*. Kompilację przeprowadzono w środowisku Microsoft Visual C++ 2013 Professional. Uzyskano dzięki temu blok Simulinka, który w symulacjach czysto programowych skracał wyraźnie czas ich trwania, a poza tym mógł być użyty w symulacjach HIL (*Hardware-In-the-Loop*). Więcej informacji na temat zagadnień implementacji programowej całego układu pomiarowo-kontrolnego można znaleźć w podrozdziale 3.3.



Rysunek A.6. Schemat blokowy elementów składowych modelu symulacyjnego *Dorchester Lady*

Poszczególne grupy obliczeń modelu symulacyjnego *Dorchester Lady* oraz zależności między nimi przedstawiono symbolicznie w postaci schematu blokowego na rysunku A.6. Kolorem bładoniebieskim oznaczone te obliczenia, które modelują dynamikę urządzeń wykonawczych. Kolorem ciemniejszym zaznaczono bloki obliczeń sił generowanych przez te urządzenia oraz sił pochodzących od wiatru. Dwa największe bloki: ciemnoniebieski i zielony odpowiadają głównym równaniom A.1 – A.9 dynamiki i kinematyki modelu *Dorchester Lady*.

Bibliografia

- [1] ALESSANDRI A., DONNARUMMA S., MARTELLI M., VIGNOLO S. (2019). Motion control for autonomous navigation in blue and narrow waters using switched controllers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6).
- [2] ALFHEIM H.L., MUGGERUD K., BREIVIK M., BREKKE E.F., EIDE E., ENGELHARDTSEN Ø. (2018). Development of a dynamic positioning system for the ReVolt model ship. *IFAC-PapersOnLine*, 51(29): 116–121. 11'th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles.
- [3] AMBROSINO G., GAROFALO F., GLIELMO L. (1989). Dynamic mooring-forces allocation in dynamic ship positioning. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 63(3): 309–332.
- [4] VAN AMERONGEN J. (1980). Digital model reference adaptive control with applications to ship's steering. In *6th IFAC/IFIP International Conference on Digital Computer Applications to Process Control*, (pp. 245–250).
- [5] VAN AMERONGEN J. (1982). *Adaptive steering of ships. A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- [6] VAN AMERONGEN J., VAN NAUTA LEMKE H.R. (1978). Optimum steering of ships with an adaptive autopilot. In *5'th Ship Control Systems Symposium*. Annapolis, Md, USA.
- [7] VAN AMERONGEN J., VAN NAUTA LEMKE H.R. (1980). Criteria for optimum steering of ships. In *Proceedings Symposium on Ship Steering Automatic Control*, (pp. 3–22).
- [8] VAN AMERONGEN J., VAN NAUTA LEMKE H.R., VAN DER VEEN J.C.T. (1977). An autopilot for ships designed with fuzzy sets. In *Proceedings 5'th IFAC/IFIP Conference on Digital Computer Applications to Process Control*.
- [9] VAN AMERONGEN J., UDINK TEN CATE A.J. (1975). Model reference adaptive autopilots for ships. *Automatica*, 11(5): 441–449.
- [10] ARIE T., ITOH M., SENOH A., TAKAHASHI N., FUJII S., MIZUNO N. (1986). An adaptive steering system for a ship. *IEEE Control Systems Magazine*, 6(5): 3–8.
- [11] ASADI M., KHAYATIAN A. (2011). Adaptive backstepping autopilot for way-point tracking control of a container ship in the presence of time-varying disturbances. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1): 14760–14765. 18'th IFAC World Congress.
- [12] ASK AN AMERICAN TV (2018). Ask an American (special) - Håwa. URL <https://youtu.be/Us45jFM7PFk> [01.09.2021].
- [13] ÅSTRÖM K.J. (1977). Some aspects on the control of large tankers. In BENSOUSSAN A., LIONS J. (eds.), *New Trends in Systems Analysis, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol. 2, (pp. 379–399). Springer, Berlin-Heidelberg.
- [14] ÅSTRÖM K.J. (1980). Why use adaptive techniques for steering large tankers? *International Journal of Control*, 32(4): 689–708.
- [15] AXIOMTEK CO., LTD. (2019). IPC934-230-FL Datasheet. URL <https://www.axiomtek.com/Default.aspx?MenuId=Products&FunctionId=ProductView&ItemId=6398&upcat=261> [01.10.2019].
- [16] BALCHEN J.G., JENSSEN N.A., MATHISEN E., SÆLID S. (1980). A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control. *Modeling, Identification and Control*, 1(3): 135–163.

- [17] BAŃKA S., BRASEL M., DWORAK P., LATAWIEC K.J. (2010). Switched-structure of linear MIMO controllers for positioning of a drillship on a sea surface. In *15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, (pp. 249–254).
- [18] BELL J. (1957). Ship stabilization: automatic controls, computed and in practice. *Proceedings of the IEE - Part B: Radio and Electronic Engineering*, 104(13): 20–26.
- [19] BENNETT S. (1993). *A History of Control Engineering 1930-1955*. Peter Peregrinus Ltd, London.
- [20] BERGE S.P., OHTSU K., FOSSEN T.I. (1999). Nonlinear control of ships minimizing the position tracking errors. *Modeling, Identification and Control*, 20(3): 177–187.
- [21] BHATT A., DAS S., TALOLE S.E. (2021). Robust backstepping ship autopilot design. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 20(1): 34–41.
- [22] BIBULI M., CAHARIJA W., PETERSEN K.Y., BRUZZONE G., CACCIA M., ZEREIK E. (2014). ILOS Guidance - Experiments and Tuning. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3): 4209–4214. 19th IFAC World Congress.
- [23] BIMCO AND INTERNATIONAL CHAMBER OF SHIPPING (2021). *Seafarer Workforce Report*. Witherbys.
- [24] BORKOWSKI P. (2017). Inference engine in an intelligent ship course-keeping system. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017: 2561383.
- [25] BORKOWSKI P. (2018). Adaptive system for steering a ship along the desired route. *Mathematics*, 6(10).
- [26] BOYD S., EL GHAOU L., FERON E., BALAKRISHNAN V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, Philadelphia, PA.
- [27] BREIVIK M. (2006). Marine craft: 21st century motion control concepts: The introduction of sophisticated control concepts will help push the limits of possibility within marine operations. *Sea Technology*, 47(3): 33–36.
- [28] BREIVIK M., FOSSEN T.I. (2005). A unified concept for controlling a marine surface vessel through the entire speed envelope. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, (pp. 1518–1523).
- [29] BREIVIK M., KVAAL S., ØSTBY P. (2015). From Eureka to κ -Pos: Dynamic positioning as a highly successful and important marine control technology. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16): 313–323. 10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft.
- [30] BREIVIK M., STRAND J.P., FOSSEN T.I. (2006). Guided dynamic positioning for fully actuated marine surface vessels. In *Proceedings of the 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*.
- [31] BRIX J. (ed.) (1993). *Manoeuvring Technical Manual*. Seehafen Verlag, Hamburg.
- [32] BRODTKORB A.H. (2017). *Hybrid Control of Marine Vessels, Dynamic Positioning in Varying Conditions*. Phd dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering.
- [33] BRODTKORB A.H., SØRENSEN A.J., TEEL A.R. (2014). Increasing the operation window of dynamic positioned vessels using the concept of hybrid control. In *ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.
- [34] BRODTKORB A.H., VÆRNØ S.A., TEEL A.R., SØRENSEN A.J., SKJETNE R. (2018). Hybrid controller concept for dynamic positioning of marine vessels with experimental results. *Automatica*, 93: 489 – 497.
- [35] BURNS R.S. (1995). The use of artificial neural networks for the intelligent optimal control of surface ships. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 20(1): 65–72.
- [36] CAHARIJA W., PETERSEN K.Y., BIBULI M., CALADO P., ZEREIK E., BRAGA J., GRAVDAHL J.T., SØRENSEN A.J., MILOVANOVIĆ M., BRUZZONE G. (2016). Integral Line-of-Sight guidance and control of underactuated

- marine vehicles: Theory, simulations, and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(5): 1623–1642.
- [37] CAMPO P.J., MORARI M., NETT C.N. (1989). Multivariable anti-windup and bumpless transfer: A general theory. In *1989 American Control Conference*, (pp. 1706–1711).
- [38] CHOCIANOWICZ W., PEJAŚ J. (1992). Adaptive control system for steering the ship along the desired trajectory - based on the optimal control and filtering theory. *IFAC Proceedings Volumes*, 25(3): 319–335. IFAC Workshop on Artificial Intelligence Control and Advanced Technology in Marine Automation.
- [39] DONHA D.C., DESANJ D.S., KATEBI M.R., GRIMBLE M.J. (1998). H_∞ adaptive controllers for auto-pilot applications. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 12(8): 623–648.
- [40] DUAN G.R., YU H.H. (2013). *LMI in control systems: analysis, design and applications*. CRC Press, Boca Raton.
- [41] DUDZIAK J. (2008). *Teoria okrętu*. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk.
- [42] DYMARSKI C., WIELICZKO L., NALEWAJSKI A. (2003). *Analiza techniczna i statystyczna rozwiązań konstrukcyjnych i układów sterowania oraz określenie założeń projektowych sterów strumieniowych*. Prace badawcze nr 53/spb.eureka/2003, Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [43] EJSING JØRGENSEN H., NIELSEN M., BARTHELMIE R., MORTENSEN N. (2005). Modelling offshore wind resources and wind conditions. In *Proceedings of the Copenhagen Offshore Wind Conference*. Copenhagen Offshore Wind. (CD-ROM).
- [44] ESKE M., SORENSEN N., BREIVIK M. (2015). Comparing nonlinear adaptive motion controllers for marine surface vessels. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16): 291–298. 10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft.
- [45] FORD H.C. (1914). The electrically driven gyroscope in marine work. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XXXIII(1): 857–872.
- [46] FOSSEN T.I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, New York, NY.
- [47] FOSSEN T.I. (2000). A survey on nonlinear ship control: from theory to practice. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(21): 1–16. 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft.
- [48] FOSSEN T.I. (2002). *Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics AS.
- [49] FOSSEN T.I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley.
- [50] FOSSEN T.I. (2012). Nonlinear maneuvering theory and path-following control. In GUEDES SOARES C., GARBATOV Y., FONSECA N., TEXEIRA Â.P. (eds.), *Centre for Marine Technology and Engineering (CENTEC) Anniversary Book*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [51] FOSSEN T.I., BREIVIK M., SKJETNE R. (2003). Line-of-sight path following of underactuated marine craft. In *Proceedings of the 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, (pp. 244–249).
- [52] FOSSEN T.I., PEREZ T. (2009). Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs. *IEEE Control Systems Magazine*, 29(6): 32–46.
- [53] FOSSEN T.I., STRAND J. (1999). Tutorial on nonlinear backstepping: Applications to ship control. *Modeling, Identification and Control*, 20(2): 83–134.
- [54] FOTAKIS J., GRIMBLE M.J., KOUVARITAKIS B. (1982). A comparison of characteristic locus and optimal designs for dynamic ship positioning systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27(6): 1143–1157.

- [55] FREDRIKSEN E., PETTERSEN K.Y. (2006). Global κ -exponential way-point maneuvering of ships: Theory and experiments. *Automatica*, 42(4): 677–687.
- [56] GIERUSZ W. (2004). *Synteza wielowymiarowych układów sterowania precyzyjnego ruchem statku z wykorzystaniem wybranych metod projektowania układów odpornych*. Akademia Morska w Gdyni, Gdynia.
- [57] GIERUSZ W. (2015). Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part I: Forces generated by pods. *Ocean Engineering*, 108: 105–114.
- [58] GIERUSZ W. (2016). Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion. Part II: Full model and experimental results. *Ocean Engineering*, 123: 28–44.
- [59] GIERUSZ W., LISOWSKI J., MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A., ŚMIERZCHALSKI R., TOMERA M., AFELTOWSKA B., PIELECH E. (2000). *Identyfikacja modeli dynamiki statku, algorytmy sterowania ruchem statku*. Projekt badawczy KBN nr 8 T11A 015 15, Wyższa Szkoła Morska w Gdyni.
- [60] GIERUSZ W., NGUYEN CONG V., RAK A. (2007). Maneuvering control and trajectory tracking of very large crude carrier. *Ocean Engineering*, 34(7): 932–945.
- [61] GIERUSZ W., RAK A., SIKORA P. (2017). Stanowisko badawcze do pomiaru parametrów falowania i wiatru na jeziorze. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, (98): 57–63.
- [62] GILL INSTRUMENTS LTD (2019). *Gill WindObserver II User Manual*. Lymington.
- [63] GODHAVN J.M., FOSSEN T.I., BERGE S.P. (1998). Non-linear and adaptive backstepping designs for tracking control of ships. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 12(8): 649–670.
- [64] GRAEBE S.F., AHLÉN A. (1996). Bumpless transfer. In LEVINE W.S. (ed.), *The Control Handbook*, (pp. 381–388). CRC Press.
- [65] GRAEBE S.F., AHLÉN A. (1996). Dynamic transfer among alternative controllers and its relation to antiwindup controller design. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(1): 92–99.
- [66] GUO C., YANG G., SIMAAN M.A. (2003). Hybrid intelligent control for ship steering. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 9(4): 245–258.
- [67] HANSEN A.D. (1996). *Predictive control and identification: Applications to steering dynamics*. Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Lyngby.
- [68] HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H., COLLINS J. (2001). *Global Positioning System, Theory and Practice*. Springer, Vienna, 5 edn.
- [69] HU S.S., YANG P.H., JUANG J.Y., CHANG B.C. (2003). Robust nonlinear ship course-keeping control by H_∞ I/O linearization and μ -synthesis. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 13(1): 55–70.
- [70] HUANG Y., HU Y., WU J., ZENG C. (2021). Observer-based motion control system for the approach ship with propeller and rudder in the process of underway replenishment. *Ocean Engineering*, 222: 108586.
- [71] INOUE S., HIRANO M., KIJIMA K. (1981). Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. *International Shipbuilding Progress*, 28(321): 112–125.
- [72] INTERNATIONAL CHAMBER OF SHIPPING (2021). Shipping and world trade: Predicted increases in world seaborne trade, GDP and population. URL <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-predicted-increases-in-world-seaborne-trade-gdp-and-population/> [01.09.2021].
- [73] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (2021). Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS). URL [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/MSC.1-Circ.1638%20-%20Outcome%20of%20The%20Regulatory%20Scoping%20ExerciseFor%20The%20Use%20of%20Maritime%20Autonomous%20Surface%20Ships...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/MSC.1-Circ.1638%20-%20Outcome%20of%20The%20Regulatory%20Scoping%20ExerciseFor%20The%20Use%20of%20Maritime%20Autonomous%20Surface%20Ships...%20(Secretariat).pdf) [03.06.2021].

- [74] IRIONDO N., MARCOS M., ESTEVEZ E., ORIVE D. (2006). Implementing non-linear strategies for PID in IEC 61131-3 ST language. In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, (pp. 969–972).
- [75] IRIONDO N., MARCOS M., ESTÉVEZ E. (2012). Bumpless transfer multi-controller architecture for switched-mode processes. In *Proceedings of IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA 2012)*, (pp. 1–4).
- [76] ISHERWOOD R.M. (1973). Wind resistance of merchant ships. *Transactions of RINA, Supplementary papers*, 115: 327–328.
- [77] JURDZIŃSKI M. (2016). Planowanie podróży morskiej z uwzględnieniem ryzyka nawigacji morskiej w rejonach ograniczonych. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, (97): 72–86.
- [78] KÄLLSTRÖM C.G., ÅSTRÖM K.J., THORELL N.E., ERIKSSON J., STEN L. (1979). Adaptive autopilots for tankers. *Automatica*, 15(3): 241–254.
- [79] KALMAN R.E. (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana*, 5: 102–119.
- [80] KALMAN R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, 82(Series D): 35–45.
- [81] KATEBI M., GRIMBLE M., BYRNE J. (1985). LQG adaptive autopilot design. *IFAC Proceedings Volumes*, 18(5): 1293–1298. 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation.
- [82] KOBYLIŃSKI L., NOWICKI J. (2019). *Ship Handling Course File*. Ship Handling Research and Training Centre, Hawa.
- [83] KONGSBERG MARITIME (2017). Autonomous ship project, key facts about YARA Birkeland. URL [https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/#\[01.09.2021\]](https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/#[01.09.2021]).
- [84] KOYAMA T. (1976). On the optimum automatic steering system of ships at sea. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 122: 18–35.
- [85] KULA K., TOMERA M. (2017). Control system of training ship keeping the desired path consisting of straight-lines and circular arcs. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(4): 711–719.
- [86] KULA K.S. (2015). An overview of roll stabilizers and systems for their control. *TransNav : International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(3): 405–414.
- [87] KWIESIELEWICZ M., TOMERA M. (1998). Tuning fuzzy logic autopilot using genetic algorithms,. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics*, vol. 2, (pp. 397–402).
- [88] KYRKJEBØ E., PETERSEN K.Y., WONDERGEM M., NIJMEIJER H. (2007). Output synchronization control of ship replenishment operations: Theory and experiments. *Control Engineering Practice*, 15(6): 741–755.
- [89] LAL K., RAK T., ORKISZ K. (2003). *RTLlinux - system czasu rzeczywistego*. Helion, Gliwice.
- [90] LAYNE J.R., PASSINO K.M. (1993). Fuzzy model reference learning control for cargo ship steering. *IEEE Control Systems*, 13(6): 23–34.
- [91] LEE G., SURENDRAN S., KIM S.H. (2009). Algorithms to control the moving ship during harbour entry. *Applied Mathematical Modelling*, 33(5): 2474–2490.
- [92] LEFEBER E., PETERSEN K.Y., NIJMEIJER H. (2003). Tracking control of an underactuated ship. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(1): 52–61.
- [93] LEICA GEOSYSTEMS AG (2005). *Leica System GPS 1200 Dane techniczne*. Heerbrugg.
- [94] LEKKAS A.M. (2014). *Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous Vehicles*. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

- [95] LIBERZON D. (2003). *Switching in Systems and Control*. Systems & Control Series. Birkhauser, Boston, MA.
- [96] LIM C.C., FORSYTHE W. (1983). Autopilot for ship control. part 1: Theoretical design. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, 130(6): 281–287.
- [97] LIM C.C., FORSYTHE W. (1983). Autopilot for ship control. part 2: Simulation studies. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, 130(6): 288–294.
- [98] LISOWSKI J. (1981). *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*. Elektrotechnika i elektronika okrętowa. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk.
- [99] LJUNG L. (2020). *System Identification Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc., Natick, MA.
- [100] LOFBERG J. (2004). YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (pp. 284–289).
- [101] LYSTER C.A. (1976). The Lystergram – a graphical display of ship steering behavior and yaw stability. *The Naval Architect*, (1): 25–26.
- [102] MACKIEWICZ H. (2014). Przykład dwufazowego grodziska cyplowego. URL <https://zabytek.pl/pl/obiekty/kamionka-grodzisko> [30.09.2019].
- [103] MILLER A. (2014). Model predictive control of the ship's motion in presence of wind disturbances. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, (39): 107–115.
- [104] MILLER A. (2018). *Synteza elektronawigacyjnego układu sterowania automatycznego ruchem równoległym statków z wykorzystaniem metod predykcyjnych*. Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni.
- [105] MILLER A., RYBCZAK M. (2015). Methods of controller synthesis using linear matrix inequalities and model predictive control. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, (43): 22–28.
- [106] MILLER A., RYBCZAK M., RAK A. (2021). Towards the autonomy: Control systems for the ship in confined and open waters. *Sensors*, 21(7).
- [107] MINORSKY N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 34(2): 280–309.
- [108] MORAWSKI L. (1994). *Metody syntezy układów sterowania ruchem statku*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia.
- [109] MORAWSKI L. (1995). Sterowanie modelem fizycznym zbiornikowca wzdłuż zadanej trajektorii na jeziorze Silm. In *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. Rzeszów - Jawor. I Krajowa Konferencja Awioniki.
- [110] MORAWSKI L. (2009). Optymalny regulator kursu statku – badania z modelem fizycznym zbiornikowca na jeziorze. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, (62): 84–94.
- [111] MORAWSKI L., NGUYEN CONG V., POMIRSKI J., RAK A. (2007). The ship control system for trajectory tracking experiments with physical model of tanker. *Polish Maritime Research*, 14(S2): 49–53.
- [112] MORAWSKI L., NGUYEN CONG V., RAK A. (2008). *Full-Mission Marine Autopilot Based on Fuzzy Logic Techniques*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- [113] MORAWSKI L., NIEDŹWIECKI A., POMIRSKI J., TOMERA M. (1996). Oprogramowanie do badań algorytmów sterowania w czasie rzeczywistym modelami fizycznymi na jeziorze Silm. *Zeszyty Naukowe WSM w Gdyni*, (29): 41–52.
- [114] MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A. (2002). Non-linear control of course-unstable ship: Experiments with physical tanker model. In *X International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean*.
- [115] MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A. (2004). A cascade control system for trajectory tracking. In *4 International Congress on Maritime Technological Innovations and Research*, (pp. 265–276).

- [116] MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A. (2004). Trajectory tracking control system for ship. In *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*, (pp. 251–255).
- [117] MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A. (2005). Research environment for motion control algorithms testing of scale ship models on a lake. In *Proceedings of the 11'th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean*, vol. 1, (pp. 727–732). Taylor & Francis Group.
- [118] MORAWSKI L., POMIRSKI J., RAK A., TOMERA M. (2000). SILM - software environment for the development of the ship motion control algorithms. *Joint Proceedings*, (13): 51–56. Wyższa Szkoła Morska Gdynia - Hochschule Bremerhaven.
- [119] MORAWSKI L., RAK A. (2002). Neural network application to course control of large tanker. In *IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, (pp. 847–850).
- [120] MORAWSKI L., TOMERA M. (2000). Fuzzy tracking ship controller. In *Proceedings of the IX Congress, International Maritime Association of the Mediterranean*, vol. III, (pp. 83–90).
- [121] MOREIRA L., FOSSEN T.I., GUEDES SOARES C. (2007). Path following control system for a tanker ship model. *Ocean Engineering*, 34(14–15): 2074–2085.
- [122] MOREIRA L., GUEDES SOARES C. (2011). Guidance and control of autonomous vehicles. In GUEDES SOARES C., GARBATOV Y., FONSECA N., TEXEIRA Â.P. (eds.), *Marine Technology and Engineering*, vol. 1, (pp. 503–520). CRC Press.
- [123] NGUYEN D.H., LE M.D., OHTSU K. (2000). Ship's optimal autopilot with a multivariate auto-regressive exogenous model. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(16): 277–282. 11'th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization.
- [124] NGUYEN D.T., SØRENSEN A.J. (2009). Switching control for thruster-assisted position mooring. *Control Engineering Practice*, 17(9): 985–994.
- [125] NGUYEN T.D. (2005). *Design of Hybrid Marine Control Systems for Dynamic Positioning*. Phd thesis, National University of Singapore, Department of Civil Engineering.
- [126] NGUYEN T.D., SØRENSEN A.J., QUEK S.T. (2008). Multi-operational controller structure for station keeping and transit operations of marine vessels. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(3): 491–498.
- [127] NGUYEN T.D., SØRENSEN A.J., QUEK S.T. (2007). Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions. *Automatica*, 43(5): 768–785.
- [128] NGUYEN CONG V. (2007). *The synthesis of trajectory regulator using fuzzy logic theory in a marine vessel autopilot*. Ph.D. thesis, Gdynia Maritime University.
- [129] NIEDERLIŃSKI A., MOŚCIŃSKI J., OGWONOWSKI Z. (1995). *Regulacja adaptacyjna*. PWN, Warszawa.
- [130] NORRBY N.H. (1972). On the added resistance due to steering on a straight course. In *Proceedings of the 13th International Towing Tank Conference*.
- [131] NOWICKI A. (1999). *Wiedza o manewrowaniu statkami morskimi: Podstawy teorii i praktyki*. Trademar, Gdynia.
- [132] NOWICKI J. (2014). Stopping of ships equipped with azipods. *TransNav : International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8(3): 373–376.
- [133] NYK LINE (2019). NYK Conducts World's First Maritime Autonomous Surface Ships Trial. URL https://www.nyk.com/english/news/2019/20190930_01.html [30.09.2019].

- [134] NYK LINE (2020). NYK Successfully Tests Remote Navigation of Tugboat. URL https://www.nyk.com/english/news/2020/20200520_01.html [20.05.2020].
- [135] OGAWA A., KASAI M. (1978). On the mathematical model of manoeuvring motion of ships. *International Shipbuilding Progress*, 25: 306–319.
- [136] PAPOULIAS F.A., HEALEY A.J. (1992). Path control of surface ships using sliding modes. *Journal of Ship Research*, 36: 141–153.
- [137] PARKINSON B.W. (1996). Introduction and heritage of NAVSTAR, the global positioning system. In PARKINSON B.W., SPIKER JR J.J. (eds.), *Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. I. American Institute of Aeronautics and Astronautics,.
- [138] PASSENIER P.O. (1989). *An Adaptive Track Predictor for Ships*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Faculty of Electrical Engineering.
- [139] PEREZ T., BLANKE M. (2012). Ship roll damping control. *Annual Reviews in Control*, 36(1): 129–147.
- [140] PETTERSEN K.Y., FOSSEN T.I. (2000). Underactuated dynamic positioning of a ship—experimental results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(5): 856–863.
- [141] POLKINGHORNE M.N., ROBERTS G.N., BURNS R.S. (1997). Intelligent ship control with online learning ability. *Computing Control Engineering Journal*, 8(5): 196–200.
- [142] POMIRSKI J. (1999). *Synteza układu sterowania ruchem statku z wykorzystaniem regulatora typu robust*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.
- [143] POMIRSKI J., RAK A., GIERUSZ W. (2012). Control system for trials on material ship model. *Polish Maritime Research*, 19(S1 (74)): 25–30.
- [144] QUATECH INC. (2006). *ESC(LP)-100 User's Manual*. Hudson, OH.
- [145] RAYTHON MARINE GMBH (1999). *Gyro Compass STANDARD 20 Service Manual*. Kiel.
- [146] ROBERTS G.N. (2008). Trends in marine control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2): 263–269.
- [147] ROBERTS G.N., SUTTON R., ZIRILLI A., TIANO A. (2003). Intelligent ship autopilots—a historical perspective. *Mechatronics*, 13(10): 1091–1103.
- [148] RODRIGUE J.P. (2020). *The Geography of Transport Systems*. Routledge, London.
- [149] RYBCZAK M. (2012). Linear matrix inequalities in multivariable ship's steering. *Polish Maritime Research*, 19(S1 (74)): 37–44.
- [150] RYBCZAK M. (2016). *Synteza elektronawigacyjnego układu wielowymiarowego sterowania statkiem wykorzystująca liniowe nierówności macierzowe*. Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Gdynia.
- [151] RYBCZAK M. (2018). Improvement of control precision for ship movement using a multidimensional controller. *Automatika*, 59(1): 63–70.
- [152] RYMARZ W. (2015). *Międzynarodowe prawo drogi morskiej w zarysie*. Trademar, Gdynia.
- [153] SALMAN M.A. (1988). *Adaptive control techniques in ship autopilot design*. PhD dissertation, Loughborough University of Technology.
- [154] SALONEN T., WAHLSTRÖM M., KARVONEN H. (2020). Designing a remote pilotage system: work styles to be considered. In *Proceedings of 8th Transport Research Arena*. Helsinki.
- [155] SJURSEN M. (2018). ABB technology driving the world's largest icebreaking Azipod® fleet. URL <https://new.abb.com/marine/media-center/press-releases-and-articles/articles-and-highlights/abb-technology-driving-the-world-s-largest-icebreaking-azipod-fleet> [01.09.2021].
- [156] SKJETNE R., SMOGELI Ø.N., FOSSEN T.I. (2004). A nonlinear ship manoeuvring model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship. *Modeling, Identification and Control*, 25(1): 3–27.

- [157] STEC A., ŚWIDER Z., TRYBUS L. (2014). Problemy projektowania zaawansowanego autopilota okrętowego. In *XVIII Konferencja Automatyków*.
- [158] STRAND J.P., SØRENSEN A.J., FOSSEN T.I. (1998). Design of automatic thruster assisted mooring systems for ships. *Modeling, Identification and Control*, 19(2): 61–75.
- [159] SZELANGIEWICZ T., ŻELAZNY K., ANTOSIK A., SZELANGIEWICZ M. (2021). Application of measurement sensors and navigation devices in experimental research of the computer system for the control of an unmanned ship model. *Sensors*, 21(4).
- [160] TEES WHITE GILL (2019). Vertical shaft thrusters T3S. URL <https://www.teesgillthrusters.com/products/vertical-shaft-units>[01.09.2021].
- [161] THE MATHWORKS, INC. (2016). *Simulink Real-Time User's Guide (ver. 6.5)*. Natick, MA.
- [162] THE MATHWORKS, INC. (2016). System requirements - Release 2016b. URL https://la.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/sysreq/files/SystemRequirements-Release2016b_Windows.pdf[01.09.2021].
- [163] THOMAS B., SCLAVOUNOS P. (2007). Optimal-control theory applied to ship maneuvering in restricted waters. *Journal of Engineering Mathematics*, 58: 301–315.
- [164] TOMERA M. (2012). Nonlinear observers design for multivariable ship motion control. *Polish Maritime Research*, 19(S1-74): 50–56.
- [165] TOMERA M. (2014). Ant colony optimization algorithm applied to ship steering control. *Procedia Computer Science*, 35: 83–92.
- [166] TOMERA M. (2014). Dynamic positioning system for a ship on harbour manoeuvring with different observers. experimental results. *Polish Maritime Research*, 21(3): 13–24.
- [167] TOMERA M. (2016). Real-time way-point hybrid controller for ships. In *21'st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, (pp. 630–635).
- [168] TOMERA M. (2018). *Wieloperacyjne sterowanie ruchem statku w układzie o strukturze przelączalnej*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- [169] TOMERA M., MORAWSKI L. (1996). Neural-network-based fuzzy logic marine autopilot. In *Proceedings of the 3'rd International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics*, vol. 3, (pp. 1207–1212).
- [170] TOMERA M., ŚMIERZCHAŁSKI R. (2006). Sliding controller for ship course steering. In *Proceedings of the 7'th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*.
- [171] TRYBUS L., ŚWIDER Z., STEC A. (2015). Tuning rules of conventional and advanced ship autopilot controllers. In SZEWCZYK R., ZIELIŃSKI C., KALICZYŃSKA M. (eds.), *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, (pp. 303–311). Springer International Publishing.
- [172] TVETE H.A. (2014). The Next ReVolt. *Maritime Impact*, (2): 18–23.
- [173] TZENG C.Y., GOODWIN G.C., CRISAFULLI S. (1999). Feedback linearization design of a ship steering autopilot with saturating and slew rate limiting actuator. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 13(1): 23–30.
- [174] UNAR M.A., MURRAY-SMITH D.J. (1999). Automatic steering of ships using neural networks. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 13(4): 203–218.
- [175] WAHL A., GILLES E.D. (1999). Track-keeping on waterways using model predictive control. In KIJAMA K., FOSSEN T.I. (eds.), *Proceedings of the workshop on control applications in marine systems*, (pp. 149–154). Elsevier, Kidlington.

- [176] WAMEL SILNIKI ELEKTRYCZNE SP. Z O.O. (2021). Silniki serwomechanizmowe prądu stałego. URL <https://www.wamel.com.pl/produkty/silniki-serwomechanizmowe-pradu-stalego/> [01.09.2021].
- [177] WEINTRIT A. (2013). *The Electronic Chart Display and Information System (ECDIS): An Operational Handbook*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [178] WITKOWSKA A. (2013). *Metoda backstepping w zastosowaniach morskich*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [179] WITKOWSKA A., ŚMIERZCHAŁSKI R., TOMERA M. (2005). Zastosowanie metody backstepping do sterowania ruchem statku. In *Materiały XV Krajowej Konferencji Automatyki*, vol. III, (pp. 155–160).
- [180] WITKOWSKA A., TOMERA M., ŚMIERZCHAŁSKI R. (2007). A backstepping approach to ship course control. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 17(1): 73–85.
- [181] WONDERGEM M., LEFEBER E., PETTERSEN K.Y., NIJMEIJER H. (2011). Output feedback tracking of ships. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(2): 442–448.
- [182] WORLD TRADE ORGANIZATION (2021). WTO Data Portal. URL <https://data.wto.org/> [01.09.2021].
- [183] YASUKAWA H., YOSHIMURA Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1): 37–52.
- [184] ZHANG R., CHEN Y., SUN Z., SUN F., XU H.Z. (2000). Path control of a surface ship in restricted waters using sliding mode. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(4): 722–732.
- [185] ZHANG Y., HEARN G.E., SEN P. (1997). A multivariable neural controller for automatic ship berthing. *IEEE Control Systems*, 17(4): 31–45.
- [186] ZIRILLI A., ROBERTS G.N., TIANO A., SUTTON R. (2000). Adaptive steering of a containership based on neural networks. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 14(8): 849–873.
- [187] ZWIERSZEWICZ Z. (2013). On the ship course-keeping control system design by using robust feedback linearization. *Polish Maritime Research*, 20(1): 70–76.
- [188] ZWIERSZEWICZ Z. (2020). Robust and adaptive path-following control of an underactuated ship. *IEEE Access*, 8: 120198–120207.