

BỘ XÂY DỰNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM



VŨ SƠN TÙNG

**NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP
CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HẢI PHÒNG - 2025

BỘ XÂY DỰNG

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM

VŨ SƠN TÙNG

**NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP
CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGÀNH: KHOA HỌC HÀNG HẢI;

MÃ SỐ: 9840106

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS. Nguyễn Văn Sương

2. PGS.TS. Nguyễn Thái Dương

HẢI PHÒNG - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tên tôi là Vũ Sơn Tùng, tác giả của luận án tiến sĩ “Nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt”. Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi dưới sự hướng dẫn của giáo viên hướng dẫn. Kết quả nghiên cứu là trung thực và chưa từng được ai công bố trên các công trình nghiên cứu khác.

Hải Phòng, ngày tháng năm 2025

Tác giả

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình làm luận án, tôi đã nhận được sự giúp đỡ, góp ý về chuyên môn cũng như sự ủng hộ của giáo viên hướng dẫn, của nhiều nhà khoa học, của đồng nghiệp. Tôi xin gửi tới họ lời cảm ơn sâu sắc.

Tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới giáo viên hướng dẫn đã trực tiếp hướng dẫn tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn tới các nhà khoa học, Khoa Hàng hải, Viện đào tạo sau đại học, trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu thực hiện luận án.

Cuối cùng là lời cảm ơn sự ủng hộ, động viên khích lệ to lớn từ gia đình của tôi để hoàn thành nhiệm vụ học tập và nghiên cứu.

Hải Phòng, ngày tháng năm 2025

Tác giả luận án

Vũ Sơn Tùng

MỤC LỤC

	Trang
LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	x
DANH MỤC CÁC HÌNH.....	xi
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết của đề tài	1
2. Mục đích nghiên cứu đề tài.....	3
3. Phương pháp nghiên cứu đề tài.....	3
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài	4
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài	4
6. Những điểm đóng góp mới	5
7. Kết cấu của luận án	5
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU.....	7
1.1 Tổng quan bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu	7
1.1.1 Yêu cầu bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu.....	7
1.1.2 Nguyên lý thiết kế quỹ đạo cập cầu.....	9
1.2 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu	11
1.2.1 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu trên thế giới	11
1.2.2 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu trong nước	15
1.3 Đánh giá hướng nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu	16

1.4 Tổng quan về các công trình nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy	18
1.4.1 Điều khiển sửa lỗi tự động trong điều khiển tàu thủy.....	18
1.4.2 Điều khiển sửa lỗi chủ động trong điều khiển tàu thủy.....	20
1.5 Hướng nghiên cứu cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	21
1.6 Kết luận chương 1	23
CHƯƠNG 2 MÔ HÌNH TOÁN CHUYÊN ĐỘNG TÀU THỦY VÀ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU	24
2.1 Mô hình toán học chuyển động của tàu	24
2.1.1 Các bậc tự do và chuyển động của tàu thủy	24
2.1.2 Các hệ tọa độ	27
2.1.3 Mối quan hệ giữa vị trí, hướng và vận tốc của tàu thủy.....	29
2.1.4 Phương trình mô tả động lực học tàu thủy	29
2.1.5 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 6 bậc tự do.....	31
2.1.6 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang	32
2.1.7 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định	35
2.2 Lý thuyết điều khiển trượt.....	37
2.3 Nhận dạng mô hình bằng mạng nơ-ron nhân tạo.....	42
2.3.1 Cơ sở lý thuyết mạng nơ-ron nhân tạo	42
2.3.2 Mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF.....	43
2.4 Tổng quan về điều khiển sửa lỗi	45
2.4.1 Khái niệm lỗi và phân loại.....	45
2.4.2 Khái niệm điều khiển sửa lỗi.....	47
2.5 Cơ cấu chấp hành cho tàu thủy	50
2.5.1 Điều khiển cơ cấu chấp hành cho tàu thủy.....	50

2.5.2 Điều khiển cơ cấu chấp hành cho tàu thủy khi xét đến khả năng xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành	51
2.6 Kết luận chương 2	53
CHƯƠNG 3 TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT	54
3.1 Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động dựa trên bộ điều khiển trượt.....	54
3.1.1 Mục tiêu thiết kế.....	54
3.1.2 Bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động	54
3.2 Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định dựa trên bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo	60
3.2.1 Mục tiêu thiết kế.....	60
3.2.2 Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.....	62
3.3 Tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành dựa trên bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi	67
3.3.1 Mục tiêu thiết kế.....	67
3.3.2 Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.....	68
3.3.3 Phân tích ổn định của hệ thống khi chưa có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	73
3.3.4 Thiết kế tín hiệu điều khiển bão hòa khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	75
3.3.5 Phân tích ổn định của hệ thống khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	78
3.4 Kết luận chương 3	80

CHƯƠNG 4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC ĐỀ XUẤT	81
4.1 Mô hình tàu được sử dụng cho mô phỏng	81
4.2 Điều kiện mô phỏng	81
4.2.1 Các tình huống mô phỏng	81
4.2.2 Các thành phần bất định và nhiễu ngoại cảnh	83
4.3 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động	84
4.4 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.....	93
4.5 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển	105
4.6 Kết luận chương 4	142
KẾT LUẬN	143
1. Những vấn đề đã được giải quyết	143
2. Hướng nghiên cứu tiếp theo của đề tài	144
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN	145
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	147
PHỤ LỤC 1	1/PL
PHỤ LỤC 2.....	2/PL
PHỤ LỤC 3.....	8/PL

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

<i>STT</i>	<i>Chữ viết tắt và ký hiệu</i>	<i>Giải thích</i>
1	MSC	Maritime Safety Committee
2	IMO	International Maritime Organization
3	SMC	Sliding Mode Control
4	DSC	Dynamic Surface Control
5	MPC	Model Predictive Control
6	AMBS-P	Adaptive-mutation Beetle Swarm Prediction
7	IM-PSO	Immune Memory-Particle Swarm Optimization
8	RBF	Radial Basis Function
9	FTC	Fault Tolerant Control
10	LQ	Linear Quadratic
11	FDI	Fault Detection and Identification
12	FDD	Fault Detection and Diagnosis
13	LTI	Linear Time-Invariant
14	LOS	Line Of Sight
15	FXESO	Fixed-timing extended state observer
16	LMI	Linear Matrix Inequality
17	RBF	Radial Basis Function
18	ANNFTSMC	Adaptive neural network fault tolerant sliding mode control
19	ANNSMC	Adaptive neural network sliding mode control
20	ECI	Earth-centered inertial
21	ECEF	Earth-centered Earth fixed
22	NED	North East Down
23	BODY	Body-fixed
24	v	Tốc độ dạt ngang

25	ω	Tốc độ theo trục thẳng đứng
26	p	Tốc độ lắc ngang
27	q	Tốc độ lắc dọc
28	r	Tốc độ quay
29	η	Véc-tơ trạng thái của tàu
30	ψ	Hướng mũi tàu
31	z	Độ chìm
32	θ	Góc lắc ngang
33	Φ	Góc lắc dọc
34	ν	Véc-tơ tốc độ của tàu
35	τ_{RB}	Véc-tơ lực và mômen tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ gắn với thân tàu
36	τ	Véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu
37	τ_H	Véc-tơ lực và mômen động lực học
38	τ_R	Véc-tơ lực và mômen do cảm ứng bức xạ
39	τ_D	Véc-tơ lực và mômen do lực ma sát bề mặt, sự suy giảm do độ trôi của sóng và dòng chảy xoáy
40	$J(\psi)$	Ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ trái đất
41	M	Ma trận quán tính
42	M_{RB}	Ma trận quán tính cố định
43	M_A	Ma trận quán tính của khối lượng tăng thêm
44	$C(\nu)$	Ma trận Coriolis và hướng tâm
45	$C_{RB}(\nu)$	Ma trận Coriolis và hướng tâm cố định
46	$C_A(\nu)$	Ma trận Coriolis và hướng tâm của khối lượng tăng thêm

47	$D_p(v)$	Ma trận giảm chấn thủy động lực học do suy giảm thể năng
48	$D_S(v)$	Ma trận giảm chấn thủy động lực học do lực ma sát bề mặt
49	$D_W(v)$	Ma trận giảm chấn thủy động lực học do độ trôi của sóng
50	$D_M(v)$	Ma trận giảm chấn thủy động lực học do dòng chảy xoáy
51	$D(v)$	Ma trận giảm chấn động lực học toàn phần
52	D	Thành phần ma trận giảm chấn động lực học tuyến tính
53	$D_n(v)$	Thành phần ma trận giảm chấn động lực học phi tuyến
54	$g(\eta)$	Lực và mômen hồi phục
55	d_e	Nhiều do môi trường ngoại cảnh
56	$C_o(v)$	Thành phần xác định của ma trận Coriolis và hướng tâm
57	$\Delta C(v)$	Thành phần bất định của ma trận Coriolis và hướng tâm
58	D_o	Thành phần xác định của ma trận giảm chấn thủy động lực học
59	ΔD	Thành phần bất định của ma trận giảm chấn thủy động lực học
60	d_m	Thành phần bất định trong tham số của mô hình toán chuyển động của tàu
61	F	Lực sinh ra bởi cơ cấu chấp hành
62	τ_c	Tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành
63	u_c	Tín hiệu điều khiển trên 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (<i>Surge</i>); chuyển động dịch chuyển ngang (<i>Sway</i>) và chuyển động xoay (<i>Yaw</i>)

DANH MỤC CÁC BẢNG

<i>Số bảng</i>	<i>Tên bảng</i>	<i>Trang</i>
2.1	Thành phần chuyển động và các tham số động học của tàu thủy	26
4.1	Thông số động học của mô hình tàu “Cybership II”	81
4.2	So sánh sai số bình phương trung bình giữa các bộ điều khiển khác nhau	132
PL1	Bảng quy đổi các thông số theo tỉ lệ tàu mô phỏng	1/PL1
PL2	Bảng quy đổi các thông số theo tỉ lệ mô hình tàu Cyber Ship II	2/PL1

DANH MỤC CÁC HÌNH

<i>Số hình</i>	<i>Tên hình</i>	<i>Trang</i>
1.1	Quá trình điều khiển tàu cập cầu	8
1.2	Thiết kế quỹ đạo cập cầu	10
2.1	Chuyển động của tàu thủy theo 6 bậc tự do	24
2.2	Các hệ tọa độ	28
2.3	Chuyển động của tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang	33
2.4	Các giai đoạn của điều khiển trượt	38
2.5	Hàm sign	40
2.6	Hiện tượng chattering	41
2.7	Kỹ thuật chống chattering	42
2.8	Cấu trúc mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF	44
2.9	Mô tả các loại lỗi: a) Lỗi đột ngột; b) Lỗi tiềm ẩn; c) Lỗi gián đoạn	47
2.10	Cấu trúc của bộ điều khiển sửa lỗi thụ động	48
2.11	Cấu trúc của bộ điều khiển sửa lỗi chủ động	49
3.1	Sơ đồ mô tả thuật toán bộ điều khiển trượt tự động điều khiển tàu cập cầu	59
3.2	Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển	64
3.3	Sơ đồ mô tả thuật toán bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo tự động điều khiển tàu cập cầu	66
3.4	Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF sử dụng trong bộ điều khiển được đề xuất	71
3.5	Sơ đồ khối của bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	77
4.1	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	85
4.2	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	86

<i>Số hình</i>	<i>Tên hình</i>	<i>Trang</i>
4.3	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	86
4.4	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	87
4.5	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	88
4.6	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	89
4.7	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	89
4.8	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	90
4.9	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	91
4.10	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	91
4.11	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	92
4.12	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	92
4.13	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	94
4.14	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	94
4.15	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	95
4.16	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	95
4.17	So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_i và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_i	96
4.18	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	97

Số hình	Tên hình	Trang
4.19	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	98
4.20	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	99
4.21	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u, tốc độ dạt ngang v, tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	99
4.22	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	100
4.23	So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_t	100
4.24	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	101
4.25	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	102
4.26	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	103
4.27	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u, tốc độ dạt ngang v, tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	103
4.28	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	104
4.29	So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_t	104
4.30	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	105
4.31	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	107
4.32	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	108
4.33	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u, tốc độ dạt ngang v, tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	108
4.34	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	109
4.35	So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m	109

<i>Số hình</i>	<i>Tên hình</i>	<i>Trang</i>
4.36	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	110
4.37	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ	110
4.38	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	111
4.39	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	112
4.40	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	112
4.41	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	113
4.42	So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m	113
4.43	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	114
4.44	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ	114
4.45	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	115
4.46	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	116
4.47	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ xoay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	116
4.48	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	117
4.49	So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m	117
4.50	Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF	118
4.51	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ	118
4.52	Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	121
4.53	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	121

<i>Số hình</i>	<i>Tên hình</i>	<i>Trang</i>
4.54	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	122
4.55	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	122
4.56	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	123
4.57	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành	123
4.58	Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	125
4.59	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	125
4.60	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	126
4.61	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	126
4.62	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	127
4.63	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành	127
4.64	Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	129

Số hình	Tên hình	Trang
4.65	Quy đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành	129
4.66	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	130
4.67	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	130
4.68	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành	131
4.69	Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành	131
4.70	Quy đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	133
4.71	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	134
4.72	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	134
4.73	So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)	135
4.74	Quy đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	136
4.75	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp	137

<i>Số hình</i>	<i>Tên hình</i>	<i>Trang</i>
	(Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	
4.76	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	137
4.77	So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)	138
4.78	Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	139
4.79	Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	140
4.80	Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành	140
4.81	So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)	141
PL1	Tốc độ gió V_w , hướng gió β_w và góc hứng gió γ_w với hướng mũi tàu	4/PL
PL2	Lực sinh ra bởi các cơ cấu chấp của tàu “Cyber ship II”	10/PL

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Vào hội nghị lần thứ 99 năm 2018, tiểu ban an toàn hàng hải MSC của tổ chức hàng hải quốc tế IMO đã đưa ra khái niệm ban đầu về tàu thủy tự hành là tàu thủy tùy thuộc mức độ tự động hóa có thể hoạt động không phụ thuộc vào tác động của con người. Tiểu ban cũng chỉ ra tàu thủy tự hành là một trong các giải pháp hữu hiệu để giải quyết các vấn đề của ngành hàng hải đang nhận được nhiều quan tâm bao gồm: nâng cao an toàn hàng hải, phòng tránh các tai nạn hàng hải, giảm định biên thuyền viên, tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu quả kinh tế. Xét về khía cạnh tự động điều khiển, các nghiên cứu về tàu tự hành bao gồm: tự động điều khiển tránh va chạm; tự động điều khiển giữ hướng; tự động điều khiển bám quỹ đạo; tự động điều khiển định vị động; tự động điều khiển tàu cập cầu; tự động điều khiển cân bằng tàu thủy; tự động điều khiển giảm lắc ngang tàu thủy,... Trong đó, tự động cập cầu là một trong những bài toán quan trọng và phức tạp, đặt ra nhiều khó khăn, thách thức cho các nhà nghiên cứu với các lý do chính như sau:

- Thứ nhất, tàu thủy trong quá trình cập cầu cần hành trình ở tốc độ thấp nên chịu ảnh hưởng lớn của nhiễu ngoại cảnh tác động, suy giảm tính năng điều động khi tàu phải hành trình ở trong khu vực nước hạn chế. Tuy nhiên, bộ điều khiển vẫn phải đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến khác nhau đồng thời điều khiển hướng mũi tàu theo hướng cập cầu. Đồng thời, tốc độ tàu cần được giảm dần, đảm bảo tốc độ tàu bằng không tại vị trí cầu tàu;

- Thứ hai, mô hình động học tàu thủy có tính bất định, tính chất phi tuyến cao.

Với những ưu điểm: có khả năng đưa hệ thống bám theo trạng thái đặt trước, bền vững với nhiễu bên ngoài tác động, dễ thiết kế, dễ kết hợp lai ghép

với các phương pháp điều khiển khác, điều khiển trượt SMC (Sliding mode control) là loại điều khiển phi tuyến bền vững được sử dụng phổ biến trong điều khiển yêu cầu độ chính xác và tính ổn định cao như điều khiển cánh tay robot hoặc điều khiển độ cao của máy bay dưới tác dụng điều kiện ngoại cảnh tác động mạnh. Trong các nghiên cứu về tự động điều khiển tàu thủy, nhiều nhà khoa học cũng đã ứng dụng điều khiển trượt để thiết kế các bộ điều khiển bám quỹ đạo [1] [2] [3], bộ điều khiển định vị động [4, 5], bộ điều khiển giữ hướng [6] [7],.... Tuy nhiên, hiện nay rất ít nghiên cứu ứng dụng loại điều khiển này cho bài toán điều khiển tự động cập cầu tàu thủy.

Với ưu điểm của mạng nơ-ron nhân tạo có thể được sử dụng để xấp xỉ các thành phần phi tuyến bất định trong mô hình động lực tàu thủy, nhiều nhà nghiên cứu đã kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo với các kỹ thuật điều khiển phi tuyến thành một bộ điều khiển lai ghép như: bộ điều khiển bề mặt động kết hợp mạng nơ-ron [37]; bộ điều khiển thích nghi PD kết hợp mạng nơ-ron [62]; bộ điều khiển trượt kết hợp mạng nơ-ron [41],... Các bộ điều khiển lai ghép được đề xuất đều có khả năng chứng minh tính ổn định của hệ thống theo lý thuyết ổn định Lyapunov đồng thời giải quyết được tác động của các thành phần phi tuyến bất định trong quá trình điều khiển.

Trên cơ sở những phân tích nêu trên, việc kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo với điều khiển trượt để giải quyết bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu là hướng nghiên cứu triển vọng. Do vậy, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài: ***Nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt*** để xây dựng các bộ điều khiển cập cầu tàu thủy có xét đến các vấn đề phức tạp bao gồm tính bất định trong mô hình toán của tàu thủy, nhiễu ngoại cảnh tác động, lỗi trong cơ cấu chấp hành, và giới hạn tín hiệu điều khiển nằm trong vùng hoạt động của cơ cấu chấp hành trong bài toán điều khiển tàu thủy cập cầu mà các nghiên cứu trước đây chưa đề cập có ý nghĩa nhất định trong lĩnh

vực điều khiển tàu cập cầu nói riêng cũng như tự động điều khiển tàu thủy nói chung.

2. Mục đích nghiên cứu đề tài

Đề tài được thực hiện nhằm mục đích sau đây:

- Nghiên cứu ứng dụng điều khiển trượt kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo, các cơ cấu thích nghi, cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bảo hòa để thiết kế các bộ điều khiển cập cầu tự động xét đến các yếu tố ảnh hưởng trong các điều kiện khác nhau;

- Chứng minh được tính ổn định và tính bền vững của hệ thống với nhiễu ngoại cảnh tác động;

- Kiểm chứng khả năng điều khiển của các bộ điều khiển cập cầu thông qua các mô phỏng số.

3. Phương pháp nghiên cứu đề tài

Đề tài sử dụng các phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp phương pháp mô phỏng để kiểm chứng khả năng điều khiển và tính ổn định của hệ thống tự động điều khiển được thiết kế.

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết về điều khiển trượt, mạng nơ-ron nhân tạo và điều khiển sửa lỗi;

- Nghiên cứu mô hình toán mô tả chuyển động của tàu thủy, điều khiển cơ cấu chấp hành tàu thủy và bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu;

- Nghiên cứu thiết kế các bộ điều khiển trượt giải quyết các bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu trong các điều kiện khác nhau;

- Chứng minh được tính ổn định của hệ thống điều khiển được thiết kế thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

Phương pháp mô phỏng số

- Ứng dụng phần mềm Matlab để xây dựng mô hình tính toán và kiểm chứng tính chính xác, khả thi của các bộ điều khiển cập cầu tự động được thiết kế.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài

Đối tượng nghiên cứu của đề tài

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là hệ thống tự động điều khiển cập cầu cho tàu tự hành có đủ cơ cấu chấp hành.

Phạm vi nghiên cứu của đề tài

- Phạm vi nghiên cứu của đề tài là nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển tự động tàu cập cầu với mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do đủ cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng nằm ngang trong các điều kiện sau: tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động; tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định; và khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành;

- Các bộ điều khiển được đề xuất không xét đến mô hình cơ cấu chấp hành của tàu, đưa ra tín hiệu điều khiển dưới dạng lực và mômen trên 3 trục chuyển động bao gồm chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*), chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), chuyển động xoay (*Yaw*);

- Sử dụng phần mềm Matlab để mô phỏng kiểm chứng các bộ điều khiển được đề xuất.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học của luận án

Luận án nghiên cứu và xây dựng được các bộ điều khiển trượt trên mặt trượt tốc độ cho bài toán tự động tàu cập cầu giải quyết các khía cạnh sau: khi tham số của mô hình tàu xác định; khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định; khi cơ cấu chấp hành bị lỗi; khi tín hiệu điều

khiến cơ cấu chấp hành bị giới hạn. Luận án góp phần bổ sung và phong phú thêm các phương pháp tự động điều khiển tàu cập cầu.

Ý nghĩa thực tiễn của luận án

Từ cơ sở lý thuyết đề xuất của luận án, có thể từng bước xây dựng thực nghiệm trên các tàu mô hình và thực nghiệm trên các tàu thực trong tương lai.

6. Những điểm đóng góp mới

Những điểm đóng góp mới của luận án được tóm tắt như sau:

- Hiện nay, điều khiển trượt mới được áp dụng trong bài toán cập cầu tự động cho tàu thủy trong một số ít nghiên cứu. Luận án đề xuất một bộ điều khiển trượt mới cho bài toán cập cầu tự động cho tàu thủy. Cụ thể là, điều khiển trượt trên mặt trượt tốc độ thực hiện 3 nhiệm vụ điều khiển tàu thủy bám quỹ đạo cập cầu, giảm tốc độ đồng thời dừng tàu ở vị trí cập cầu;

- Luật điều khiển trượt được tích hợp với các cơ cấu thích nghi và mạng nơ-ron để giải quyết các yếu tố bất định của mô hình toán chuyển động của tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định;

- Khi có ảnh hưởng đồng thời của tham số của mô hình bất định, nhiễu ngoại cảnh tác động bất định, cơ cấu chấp hành bị lỗi và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn, bộ điều khiển được tích hợp thêm các cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bão hòa. Bộ điều khiển cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu giải quyết đồng thời vấn đề lỗi cơ cấu chấp hành và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn chưa được đề cập trong các công trình nghiên cứu trước đây.

7. Kết cấu của luận án

Luận án được trình bày bao gồm các phần thứ tự như sau:

Phần mở đầu:

1. Tính cấp thiết của đề tài
2. Mục đích nghiên cứu đề tài

3. Phương pháp nghiên cứu của đề tài
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài
6. Những điểm đóng góp mới
7. Kết cấu của luận án

Phần nội dung gồm 4 chương:

- Chương 1. Tổng quan nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu
- Chương 2. Mô hình toán chuyển động tàu thủy và lý thuyết điều khiển được sử dụng trong nghiên cứu
- Chương 3. Tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt
- Chương 4. Kết quả mô phỏng đánh giá các bộ điều khiển được đề xuất

Phần kết luận:

1. Những vấn đề đã được giải quyết
2. Hướng nghiên cứu tiếp theo của đề tài

Danh mục các công trình khoa học đã công bố liên quan đến kết quả đề tài luận án

Tài liệu tham khảo

Phụ lục

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU

1.1 Tổng quan bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu

1.1.1 Yêu cầu bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu

Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển tự động tàu cập cầu, các nhà nghiên cứu cần phải đảm bảo hệ thống điều khiển thực hiện được các bước cơ bản sau để có thể tự động điều khiển tàu cập cầu an toàn và hiệu quả dựa trên lý thuyết điều động [3] và [11]:

- Giai đoạn 1 - giai đoạn tiếp cận: Tàu lựa chọn và hành trình đến quỹ đạo tiếp cận cập cầu an toàn. Trong giai đoạn này, tốc độ tàu còn đủ lớn đảm bảo hiệu quả của bánh lái trong quá trình điều khiển tàu.

- Giai đoạn 2 - giai đoạn giảm tốc: Tàu hành trình trên quỹ đạo tiếp cận cập cầu đã lựa chọn và giảm tốc độ vòng quay chân vịt tiến tới dừng máy sử dụng trớn tiếp cận khu vực cập cầu. Trong giai đoạn này, hệ thống cần tính toán thời điểm giảm tốc độ và hiệu quả điều khiển của bánh lái và chân vịt để đảm bảo giữ được tàu chuyển động trên quỹ đạo tiếp cận đã lựa chọn và tốc độ tàu khi vào khu vực cập cầu gần như bằng không.

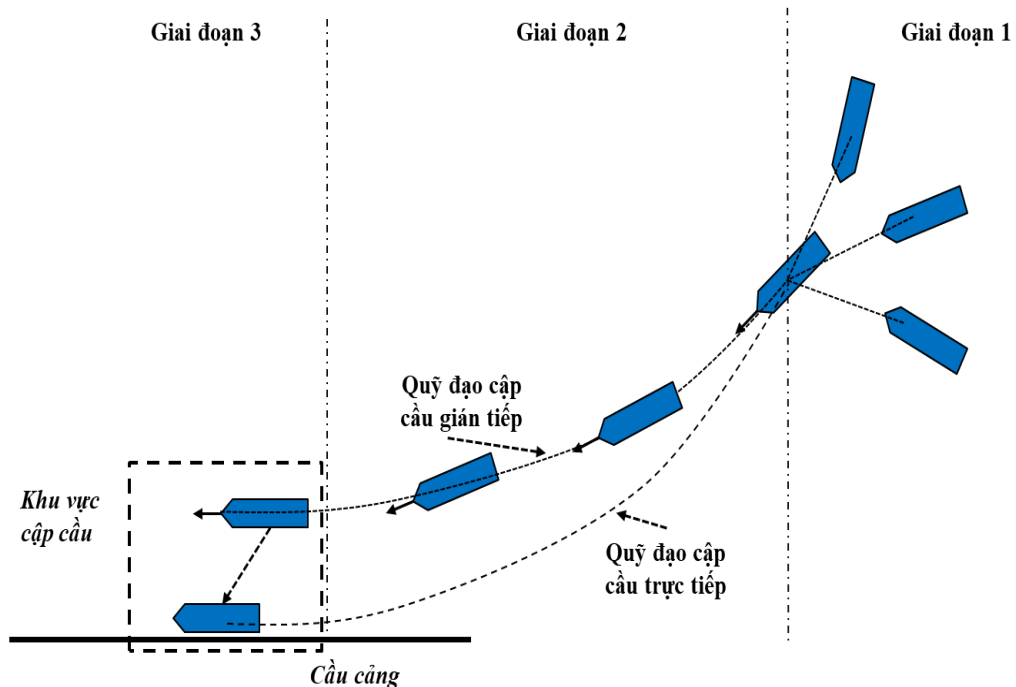
- Giai đoạn 3 - giai đoạn cập cầu: Giai đoạn này tốc độ tàu gần như bằng không, tàu không thể sử dụng được bánh lái và chân vịt hiệu quả để đưa tàu vào cập cầu. Trong giai đoạn này, đối với các tàu cỡ nhỏ hoặc điều kiện cập cầu cho phép, tàu sẽ tiếp cận cầu theo quỹ đạo cập cầu trực tiếp (hình 1.1) với khoảng cách an toàn để gửi dây buộc tàu. Đối với các tàu cỡ vừa và lớn hoặc có đủ cơ cấu chấp hành hoặc có sự hỗ trợ của tàu lai, tàu sẽ dừng ở khoảng cách đủ lớn so với cầu tàu, sử dụng hệ thống chân vịt mạn, hệ thống chân vịt bầu xoay hoặc với sự hỗ trợ kéo đẩy của tàu lai để có thể tiếp cận vào trong khu vực cầu tàu theo hướng mũi tàu gần như song song với cầu tàu (quỹ đạo cập cầu gián tiếp).

Các bài toán bám quỹ đạo hoặc bài toán định vị động đặt ra yêu cầu đối với các bộ điều khiển tự động như sau:

- Đưa được tàu về quỹ đạo hoặc vị trí cho trước;
- Duy trì hướng tàu, vị trí tàu bám theo quỹ đạo cho trước dưới tác dụng của nhiễu ngoại cảnh tác động.

Như vậy, khác với bài toán bám quỹ đạo thông thường hoặc bài toán định vị động, bộ điều khiển tự động cập cầu được thiết kế cần thực hiện đồng thời hai yêu cầu: đảm bảo bám quỹ đạo cập cầu được thiết kế trước và đảm bảo giảm dần tốc độ theo yêu cầu cho phép trong điều kiện ngoại cảnh tác động.

Tuy nhiên, do tàu hành trình trong khu vực hàng hải hạn chế, tiềm ẩn nhiều nguy cơ mất an toàn, công tác điều động tàu cập cầu được thực hiện trong điều kiện sóng, gió không vượt quá giới hạn cho phép. Thông thường, các cảng chỉ cho phép các tàu cập cầu trong điều kiện gió không quá cấp 7, sóng không quá cấp 6.



Hình 1.1. Quá trình điều khiển tàu cập cầu

1.1.2 Nguyên lý thiết kế quỹ đạo cập cầu

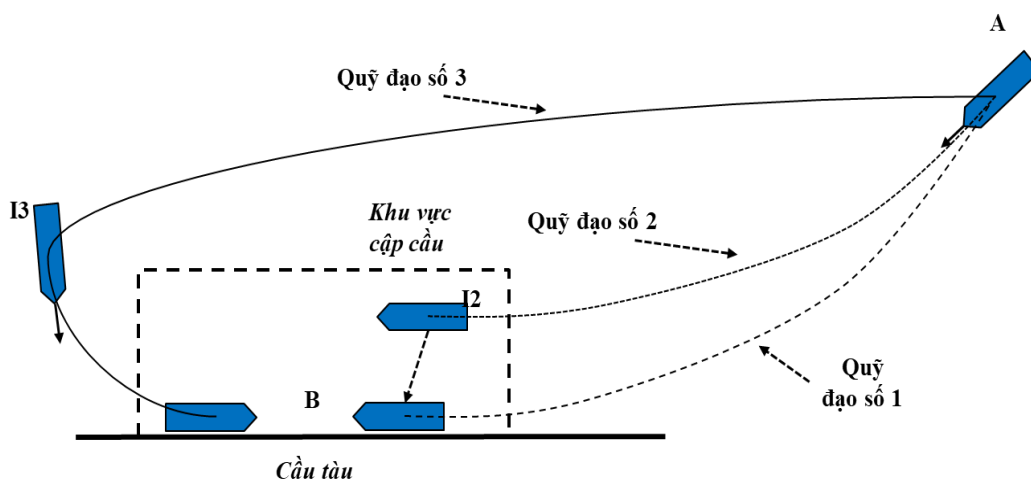
Bộ tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất cần đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời phải giảm dần tốc độ để khi tàu đến vị trí cầu tàu tốc độ và gia tốc của tàu phải bằng 0, tránh hiện tượng quá tốc độ. Quỹ đạo cập cầu dự kiến sẽ được lựa chọn dựa trên các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình cập cầu như cỡ tàu, số lượng cơ cấu chấp hành (tàu lai, chân vịt mạn, bánh lái), điều kiện hàng hải của khu vực cảng (các hạn chế của cảng, mật độ tàu, mạn tàu cập cầu, điều kiện dòng chảy), điều kiện thời tiết (hướng và tốc độ gió). Dựa trên lý thuyết điều động [3] và [11], quỹ đạo cập cầu có thể được chia thành 3 loại quỹ đạo được điều chỉnh phù hợp với điều kiện thực tế:

- Quỹ đạo cập cầu trực tiếp: Tàu sẽ tiến hành tiếp cận và cập cầu trực tiếp vào cầu tàu (quỹ đạo số 1 trong hình 1.2). Quỹ đạo cập cầu này thường được sử dụng khi không có các chướng ngại và cập cầu với mạn cùng hướng tiếp cận cầu, hướng tiếp cận cầu so với cầu tàu từ 10-15 độ. Quỹ đạo cập cầu dự kiến bắt đầu từ vị trí ban đầu A tới vị trí cập cầu B. Tàu cần giảm vòng quay chân vịt sau đó tiến tới dừng máy hoàn toàn để đảm bảo khi đến vị trí cập cầu B, vận tốc và gia tốc của tàu gần như bằng không và hướng mũi tàu song song với hướng cầu.

- Quỹ đạo cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu: Tàu sẽ được điều khiển dừng ở một khoảng cách thích hợp với cầu và hướng tàu gần như song song với cầu tàu (quỹ đạo số 2 trong hình 1.2). Chân vịt mạn, chân vịt bầu xoay hoặc tàu lai hỗ trợ sẽ đưa tàu chuyển động vuông góc với cầu tàu đồng thời giữ hướng mũi tàu vẫn song song với cầu tàu. Quỹ đạo cập cầu này thường được sử dụng để tăng tính an toàn trong quá trình cập cầu đặc biệt với tàu cỡ vừa và lớn hoặc cần quay mũi tàu trong quá trình cập cầu. Ngoài ra, quỹ đạo cập cầu còn được sử dụng trong điều kiện sóng, gió tác động theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu, hướng tiếp cận cầu so với cầu tàu từ 20-30

độ. Quỹ đạo cập cầu dự kiến bắt đầu từ vị trí ban đầu A tới vị trí trung gian I2, sau đó chuyển động vuông góc với cầu đến vị trí cập cầu B. Tàu sẽ đến vị trí trung gian I2 với tốc độ tiến lùi và tốc độ xoay gần như bằng không và hướng mũi tàu song song với hướng cầu tàu. Tàu sẽ đến vị trí cập cầu B theo hướng gần vuông góc với cầu tàu đồng thời đảm bảo tốc độ tiến lùi và tốc độ xoay gần như bằng không.

- Quỹ đạo cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu: Tàu được điều khiển đến điểm quay tàu để quay tàu ngược hướng đến ban đầu của tàu, sau đó tiếp cận cập cầu tàu (quỹ đạo số 3 trong hình 1.2). Quỹ đạo cập cầu này thường được sử dụng khi mạn cần cập cầu không cùng hướng tiếp cận ban đầu của tàu (như hình 1.2 cầu tàu nằm bên mạn trái của tàu nhưng mạn cập cầu là mạn phải) hoặc trong điều kiện cần tiếp cận cầu theo hướng ngược dòng chảy. Quỹ đạo cập cầu dự kiến bắt đầu từ vị trí ban đầu A tới vị trí trung gian I3 và quay mũi tàu về hướng vuông góc với hướng cầu. Sau đó tàu sẽ đến đến vị trí cập cầu B với vận tốc và gia tốc của tàu gần như bằng 0 đồng thời quay hướng mũi tàu song song với hướng cầu.



Hình 1.2. Thiết kế quỹ đạo cập cầu

Bộ điều khiển tự động tàu cập cầu cần thực hiện được việc điều khiển tàu theo các loại quỹ đạo cập cầu nêu trên để đảm bảo phù hợp các khu vực cảng, điều kiện hoàn cảnh cập cầu khác nhau.

1.2 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu

1.2.1 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu trên thế giới

Trong quá trình nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu, các nhà khoa học trên thế giới đã có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau để thiết kế bộ điều khiển bắt đầu ngay từ những năm 1990. Về cơ bản, các bộ điều khiển tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất từ các nghiên cứu đều dựa trên 3 xu hướng chính:

- Xu hướng dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo;
- Xu hướng dựa trên các phương pháp điều khiển phi tuyến sử dụng mô hình toán chuyển động của tàu;
- Xu hướng kết hợp trí tuệ nhân tạo và các phương pháp điều khiển phi tuyến.

1.2.1.1 Xu hướng tiếp cận bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo

Các nghiên cứu theo xu hướng này sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo, logic mờ hay học máy để học các thao tác, hành động của thuyền trưởng trong điều khiển tàu cập cầu thực tế. Các thao tác, hành động này được tập hợp thành một bộ dữ liệu tàu cập cầu và dạy cho trí tuệ nhân tạo trong môi trường mô phỏng. Trên cơ sở học và tích lũy kinh nghiệm trong môi trường mô phỏng, trí tuệ nhân tạo có thể đóng vai trò như một thuyền trưởng ảo chủ động đưa ra các hành động phù hợp trong các điều kiện môi trường thực tế khác nhau.

Các nghiên cứu tiếp cận bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo được phân tích trong nhiều công trình nghiên cứu trên thế giới. Nghiên cứu đầu tiên về tự động điều khiển tàu cập cầu dùng nơ-ron thần kinh nhân tạo được thực hiện bởi H.Yamato và H. Uetsuki vào năm 1990 [63]. Bộ điều khiển tự động cập cầu dưới sự hỗ trợ của tàu lai được nghiên cứu trong các công trình [27] và [40]. Nhóm tác giả Ahmed và Hasegawa đã sử dụng lý thuyết cửa sổ ảo hoặc phương pháp lập trình phi tuyến để thiết kế bộ tự động điều khiển cập cầu mạng nơ-ron trong [62] và [61]. Để giải quyết giới hạn trong việc điều khiển đồng thời bánh lái và chân vịt bằng một bộ điều khiển đơn trong quá trình tự động cập cầu, một bộ điều khiển song song hoặc bộ điều khiển tự chọn được đề xuất trong [31] và [42]. Trong công trình [28] và [29], mạng nơ-ron thần kinh thích nghi được sử dụng để huấn luyện tín hiệu điều khiển của bánh lái và chân vịt trong quá trình cập cầu. Tác giả TS. Nguyễn Văn Sướng đã đề xuất một bộ điều khiển mạng nơ-ron thần kinh sử dụng hệ tọa độ hướng mũi tàu để tự động cập cầu cho các cảng khác nhau không cần huấn luyện lại cấu trúc mạng nơ-ron [54]. Mạng nơ-ron thần kinh nhân tạo được sử dụng để nhận dạng tốc độ dạt ngang và tốc độ quay mũi cần thiết của tàu để có thể tự động cập cầu theo hướng song song với hướng gió [42]. Phụ thuộc vào các nhiệm vụ khác nhau của bộ điều khiển tự động tàu cập cầu trong bước cuối của quá trình cập cầu, 3 loại bộ điều khiển logic mờ được đề xuất [55].

Ưu điểm của các nghiên cứu theo xu hướng tiếp cận dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo là không cần sử dụng mô hình toán mô tả chuyển động chính xác của tàu đặc biệt trong điều kiện tàu hành trình với tốc độ thấp để tiếp cận khu vực cập cầu. Nhược điểm của các phương pháp này là đòi hỏi một bộ dữ liệu đủ lớn để có thể huấn luyện trí tuệ nhân tạo tự đưa ra quyết định phù hợp đảm bảo thực hiện tự động điều khiển cập cầu an toàn. Do lượng thông tin cần xử lý lớn, yêu cầu cần phải có một bộ xử lý thông tin đủ mạnh để đảm bảo độ tin

cậy và chính xác của các bộ điều khiển được đề xuất. Ngoài ra, các bộ điều khiển được đề xuất khó chứng minh được tính ổn định của hệ thống theo các tiêu chuẩn ổn định.

1.2.1.2 Xu hướng tiếp cận bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu dựa trên các phương pháp điều khiển phi tuyến sử dụng mô hình toán chuyển động của tàu

Các phương pháp điều khiển phi tuyến thường được sử dụng điều khiển tự động như: phương pháp Lyapunov trực tiếp, phương pháp cuốn chiếu Backstepping, phương pháp điều khiển bề mặt động DSC (Dynamic surface control), phương pháp điều khiển dự báo MPC (Model predictive control), phương pháp điều khiển trượt SMC (Sliding mode control).

Phương pháp cuốn chiếu Backstepping được sử dụng để giải quyết bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu trong [44] và [64]. Phương pháp Lyapunov trực tiếp được sử dụng cho bộ điều khiển tự động cập cầu trong [37]. Nghiên cứu [13] sử dụng phương pháp điều khiển trượt SMC (Sliding mode control) với bộ điều khiển phản hồi động và phương pháp tích phân lặp để giải quyết nhiễu bất định và các thành phần bất định của mô hình. Bộ điều khiển trượt SMC với sự hỗ trợ của tàu lai được đề xuất trong [46]. Điều khiển dự báo phi tuyến MPC tự động cập cầu cho tàu thiếu cơ cấu chấp hành được đề xuất trong [43] và [50]. Đề tự động cập và rời cầu, thuật toán AMBS-P (Adaptive-mutation beetle swarm prediction) được sử dụng trong [57]. Một hệ thống hướng dẫn vào cầu ảo dựa trên phương pháp lập trình định hướng động được đề xuất để đưa tàu cập cầu [47].

Ưu điểm của các nghiên cứu này là tính ổn định của hệ thống có thể được chứng minh theo lý thuyết ổn định Lyapunov. Nhược điểm của xu hướng tiếp cận này là cần mô hình động lực học mô tả chuyển động của tàu ở tốc độ thấp mô tả chính xác hoàn toàn chuyển động thực tế của tàu có tính đến các yếu tố

bất định của các tham số mô hình và nhiễu ngoại cảnh tác động. Hiện nay, mô hình toán chuyển động tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang do Fossen đề xuất được nhiều nghiên cứu sử dụng cho bộ điều khiển tự động tàu cập cầu [30].

1.2.1.3 Xu hướng tiếp cận bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu kết hợp trí tuệ nhân tạo và các phương pháp điều khiển phi tuyến

Về cơ bản, hai xu hướng nghiên cứu nêu trên đều có ưu và nhược điểm riêng. Do đó, các nhà nghiên cứu đã cố gắng kết hợp các ưu điểm của hai xu hướng trên, chủ yếu tập trung vào giải quyết các vấn đề điều khiển và tính toán quỹ đạo cập cầu. Mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ các thành phần phi tuyến bất định kết hợp sử dụng các kỹ thuật điều khiển phi tuyến thành một bộ điều khiển lai ghép như: bộ điều khiển trượt kết hợp mạng nơ-ron; bộ điều khiển thích nghi trượt cuốn chiếu backstepping kết hợp mạng nơ-ron;...

Các nghiên cứu tiếp cận bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu theo xu hướng này được công bố trong một số nghiên cứu sau. Trong [62], điều khiển PD được sử dụng cho bộ điều khiển tự động cập cầu sử dụng mạng nơ-ron thần kinh nhân tạo để giải quyết vấn đề huấn luyện dữ liệu mạng. Bộ điều khiển dựa trên phương pháp IM-PSO (Immune Memory-Particle Swarm Optimization) được đề xuất để tối ưu các thông số điều khiển PID bám quỹ đạo cập cầu [67]. Phương pháp cửa sổ động mở rộng được sử dụng để lập quỹ đạo điều khiển tàu thiếu cơ cấu chấp tự động cập cầu dưới ảnh hưởng của gió và các vật cản trong [22]. Nhóm tác giả Han sử dụng phương pháp trường nhân tạo phân lớp để thiết kế quỹ đạo cập cầu giải quyết vấn đề đảo mũi trong quá trình cập cầu [21]. Tác giả Yang Liu đề xuất bộ điều khiển thích nghi kết hợp phương pháp hàm chặn Lyapunov, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF, phương pháp điều khiển bề mặt động DSC [37].

1.2.2 Tổng quan về các công trình nghiên cứu về tự động điều khiển tàu cập cầu trong nước

Hiện nay, tình hình nghiên cứu trong nước về tự động điều khiển tàu cập cầu là còn khá mới mẻ và chưa được đề cập đến nhiều trong các bài báo khoa học và tài liệu chuyên ngành, mới chủ yếu tập trung vào bài toán điều khiển tàu bám quỹ đạo, bám đường hoặc giữ hướng như các công trình nghiên cứu [1], [2], [6], [8], [7], [12]. Công trình nghiên cứu [1] và [2] sử dụng mạng nơ-ron để chỉnh tham số của bộ điều khiển PID thích nghi giúp nâng cao khả năng giữ hướng của hệ thống máy lái tự động tàu thủy. Tác giả Nguyễn Hữu Quyền đã thiết kế các bộ điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm đầu vào dựa trên phương pháp mô hình dự báo hệ song tuyến trong [6], [8] và dựa trên nguyên lý RHC trên nền LQR [7]. Trong nghiên cứu [12], tác giả đã đề xuất các bộ điều khiển thích nghi bám quỹ đạo cho tàu thủy dựa trên bộ điều khiển trượt cuốn chiếu thích nghi và bộ điều khiển bề mặt động thích nghi. Trên cơ sở tham khảo các tạp chí chuyên ngành hàng hải gồm: Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, thuộc trường Đại học Hàng hải Việt Nam; Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải, thuộc trường Đại học Giao thông Vận tải Thành Phố Hồ Chí Minh; Tạp chí Giao thông Vận tải, thuộc Bộ Giao thông, và các giáo trình, tài liệu tham khảo đang giảng dạy cho sinh viên chuyên ngành đi biển, chuyên ngành thiết kế tàu đang được giảng dạy tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ chí Minh, chỉ có một số nghiên cứu về về tự động điều khiển tàu cập cầu: bài báo “*Nghiên cứu tự động cập cầu sử dụng mạng nơ-ron với cấu trúc tách kênh*” và “*Tự động điều khiển tàu cập cầu xét đến ảnh hưởng của gió sử dụng mạng nơ-ron tách kênh*” của tác giả TS. Nguyễn Văn Sướng trên Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, thuộc trường Đại học Hàng hải Việt Nam [9, 10]. Trong các bài báo này, tác giả đã đưa ra bộ điều khiển tự động cập cầu sử dụng

mạng nơ-ron tách kênh để tăng hiệu quả điều khiển chân vịt và bánh lái trong điều kiện hàng hải có và không xét đến ảnh hưởng của gió.

1.3 Đánh giá hướng nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu

Với ưu điểm của lý thuyết điều khiển trượt là hệ kín có khả năng kháng nhiễu hoàn toàn và có thể chứng minh được tính ổn định của hệ thống theo tiêu chuẩn ổn định, việc áp dụng lý thuyết điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu là một hướng nghiên cứu triển vọng.

Từ các đánh giá tổng quan về các công trình nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu trong và ngoài nước, hiện mới chỉ có một số ít nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu sử dụng bộ điều khiển trượt như các công trình nghiên cứu [13], [72] và [60]. Trong các nghiên cứu nêu trên, bộ điều khiển được đề xuất đều còn có các hạn chế và các vấn đề cần giải quyết.

Bộ điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu [13] vẫn còn nhiều hạn chế như sau:

- Bộ điều khiển được đề xuất trong nghiên cứu chỉ chứng minh được tính ổn định khi hướng mũi tàu được giới hạn trong khoảng $[-\pi/2 \ \pi/2]$, hay không thể hoạt động hiệu quả trong trường hợp cần quay hướng mũi tàu để cập cầu;
- Khi có ảnh hưởng của nhiễu tác động, bộ điều khiển không thể đảm bảo hướng mũi tàu song song với cầu tàu;
- Khi xét đến ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và các thành phần bất định của mô hình, nghiên cứu không sử dụng phương pháp xấp xỉ nên cần lựa chọn quỹ đạo cập cầu dự kiến và hệ số điều khiển thích hợp mới đảm bảo tính ổn định của hệ thống;
- Chưa xét đến khả năng khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

Nghiên cứu [72] cũng có các hạn chế như sau:

- Bộ điều khiển chỉ có thể điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện giả sử tàu luôn tiến tới cầu tàu và tốc độ theo trục dọc tàu luôn lớn hơn tốc độ dịch chuyển ngang của tàu;

- Chưa xét đến khả năng khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

Nghiên cứu [60] có các vấn đề chưa được giải quyết như sau:

- Trong quá trình mô phỏng kiểm chứng bộ điều khiển được đề xuất, bộ điều khiển chưa đảm bảo đưa vận tốc của tàu về không tại vị trí cập cầu;

- Đã xét đến giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành nhưng chưa xét khả năng khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi.

Từ phân tích nêu trên, hướng nghiên cứu sử dụng các bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu đặc biệt khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển được đề xuất trong luận án hoàn toàn có tính mới và chưa được nghiên cứu trước đây cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu.

Luận án tập trung nghiên cứu giải quyết bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu trong các điều kiện sau:

- Bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động: Với ưu điểm hoàn toàn không chịu ảnh hưởng của thành phần bất định của tham số mô hình và nhiễu tác động khi ở chế độ trượt, đề tài đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt.

- Bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định: Đề tài đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF). Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF) được sử dụng để nhận dạng các tham số bất định của mô hình đối tượng điều khiển và các nhiễu tác động không biết. Bằng phương pháp này ta không biết được mô hình toán thực sự của đối tượng

điều khiển và mô hình của các nhiễu tác động nhưng hoàn toàn có thể sử dụng kết quả xấp xỉ để thay thế đối tượng. Mô hình xấp xỉ các thành phần bất định của tham số mô hình và nhiễu tác động bất định được nhận dạng bằng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF) sẽ được sử dụng cho bộ điều khiển trượt thích nghi.

- Bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành: Trong quá trình điều khiển có thể xảy ra trường hợp cơ cấu chấp hành bị lỗi, đề tài thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo và kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại để khắc phục hiện tượng này. Ngoài ra, vấn đề giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành cũng được giải quyết trong bộ điều khiển được đề xuất.

1.4 Tổng quan về các công trình nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy

Ngay từ những năm 1990 đến nay, các nhà khoa học trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu khác nhau để thiết kế bộ điều khiển sửa lỗi trong điều khiển các phương tiện hàng hải nói chung và tàu thủy nói riêng. Về cơ bản, các nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy có thể được chia theo 2 loại:

- Điều khiển sửa lỗi thụ động;
- Điều khiển sửa lỗi chủ động.

1.4.1 Điều khiển sửa lỗi thụ động trong điều khiển tàu thủy

Trong quá trình thiết kế các bộ điều khiển sửa lỗi thụ động trong điều khiển tàu biển, các nhà nghiên cứu tập trung cho một số loại lỗi nhất định như sau:

- Lỗi cơ cấu chấp hành: Khoảng 80% các nghiên cứu tập trung điều khiển khi xảy ra lỗi trong cơ cấu chấp hành bao gồm lỗi của thiết bị đẩy hoặc lỗi của

chân vịt. Bộ điều khiển sửa lỗi bám quỹ đạo trong thời gian hữu hạn cho tàu đủ thừa cơ cấu chấp hành dựa trên điều khiển trượt thay đổi theo thời gian được đề xuất trong [20]. Nghiên cứu tập trung giải quyết lỗi một phần và bất định gây ra bởi lỗi cơ cấu chấp hành nhưng phải đảm bảo ít nhất 3 cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi. [58] đã sử dụng một bộ ước lượng lỗi trong thời hạn hữu hạn kết hợp điều khiển trượt tích phân để giải quyết ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển trong quá trình điều khiển tàu bám quỹ đạo. Tuy nhiên, lỗi cơ cấu chấp hành trong nghiên cứu này được giả sử có khả năng đạo hàm hai lần. Kỹ thuật cuốn chiếu backstepping và phương pháp tổng hợp Lyapunov được kết hợp để điều chỉnh ma trận cấu hình của các cơ cấu chấp hành đảm bảo điều khiển cho tàu sử dụng chân vịt bầu xoay bám quỹ đạo khi xảy ra lỗi trong cơ cấu chấp hành [15]. Kết hợp bộ điều khiển trượt lượng tử và phương pháp điều chỉnh thông số lượng tự động đã giải quyết được ảnh hưởng của nhiều loại lỗi khác nhau của cơ cấu chấp hành [24]. [71] sử dụng bộ quan sát nhiễu phi tuyến, kỹ thuật cuốn chiếu backstepping và hàm tan chặn Lyapunov để điều khiển tàu bám đường LOS (Line On Sight) trong điều kiện lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển. Trong [68], một bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi bám quỹ đạo sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng trong thời gian xác định FXESO (Fixed-timing extended state observer) để xấp xỉ các trạng thái, thành phần bất định tổng hợp và thông tin lỗi cơ cấu chấp hành. Tuy nhiên, nhược điểm của nghiên cứu này là các thông số thời gian ổn định xác định không thể điều chỉnh được. Lỗi toàn phần và lỗi tăng tải tín hiệu điều khiển của cơ cấu chấp hành được giải quyết bởi bộ điều khiển định vị động sửa lỗi dựa trên hệ thống phi tuyến mô hình mờ Takagi-Sugeno kết hợp điều khiển trượt tích phân và kỹ thuật điều khiển thích nghi [59]. Sử dụng mô hình mờ cần được lựa chọn thích hợp để có thể đảm bảo tính ổn định của hệ thống.

- Lỗi cảm biến: Trong [70], lỗi của cảm biến trong quá trình điều khiển tàu được giải quyết bằng phương pháp điều khiển mô hình dự đoán MPC dựa trên giới hạn lắc, lý thuyết ổn định Lyapunov và các bất đẳng thức ma trận tuyến tính LMI (Linear Matrix Inequality). Nghiên cứu [14] đã thiết kế một bộ ước lượng lặp thích nghi để ước lượng độ chính xác cho lỗi cảm biến và một bộ ước lượng lỗi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để xấp xỉ lỗi cơ cấu chấp hành. Dựa trên lỗi cảm biến và lỗi cơ cấu chấp hành được ước lượng, bộ quan sát mạng nơ-ron nhân tạo được sử dụng để cấu trúc lại các tham số, các lỗi cảm biến và lỗi cơ cấu chấp hành cho tàu thủy. Tuy nhiên, nghiên cứu này không thể chứng minh được tính ổn định của hệ thống theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

1.4.2 Điều khiển sửa lỗi chủ động trong điều khiển tàu thủy

Với điều khiển sửa lỗi chủ động, các nhà nghiên cứu tập trung nghiên cứu thiết kế các Bộ phát hiện và nhận dạng lỗi FDI. Trong nghiên cứu [38], một cơ cấu điều khiển kết hợp một bộ tính toán lỗi và một bộ bù lỗi được sử dụng để đảm bảo ổn định của hệ thống điều khiển tàu thủy trong điều kiện xảy ra lỗi. Bộ phát hiện và nhận dạng lỗi FDD cho lỗi cảm biến và lỗi cơ cấu chấp hành cho tàu thủy dựa trên bộ lọc Kalman được đề xuất trong [33]. Bộ phát hiện và nhận dạng lỗi FDD trong nghiên cứu cần thông tin từ thiết bị đo tốc độ, tốc độ quay mũi và lực chân vịt được sinh ra. Một bộ quan sát bù thông số không xác định với luật bảo vệ thích nghi được thiết kế để phát hiện và nhận dạng lỗi trong trường hợp xảy ra lỗi trong độ lớn và tốc độ của cơ cấu chấp hành và lỗi trong mô hình cơ cấu chấp hành như kẹt, giảm hiệu suất trong quá trình điều khiển bám quỹ đạo trong [34]. Trong [69], dựa trên ưu điểm phương pháp sửa lỗi chủ động trong thời gian hữu hạn, một bộ điều khiển bám quỹ đạo có thể điều khiển tàu bám theo chính xác quỹ đạo dự kiến bằng một bộ ước lượng lỗi trong thời gian hữu hạn có thể xác định được lỗi cơ cấu chấp hành trực tiếp. Tuy nhiên,

lỗi cơ cấu chấp hành trong nghiên cứu này được giả sử có khả năng đạo hàm hai lần. Nghiên cứu [66] đã đưa ra một phương pháp nhận dạng lỗi đa cảm biến dựa trên bộ lọc hạt thích nghi có khả năng phát hiện ra lỗi xảy ra ở chân vịt và cảm biến. Hiệu quả của bộ nhận dạng lỗi đa cảm biến được đưa ra trong nghiên cứu đã được chứng minh qua thực nghiệm nhưng có kết cấu tương đối phức tạp và cần có lượng thông tin cảm biến lớn.

1.5 Hướng nghiên cứu cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Các nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy mới tập trung điều khiển bám đường, bám quỹ đạo hoặc định vị động. Hiện nay chưa có nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi cho bài toán tự động cập cầu cho tàu thủy.

Trong quá trình điều khiển, lỗi có thể xảy ra bao gồm: lỗi của cơ cấu chấp hành; lỗi của các cảm biến và lỗi của hệ thống. Trong quá trình cập cầu, cơ cấu chấp hành của tàu bao gồm máy chính, bánh lái, chân vịt bầu xoay, chân vịt mạn khi xảy lỗi gây ra ảnh hưởng lớn đến khả năng điều khiển tàu, thậm chí có thể gây mất điều khiển, gây ra va chạm với cầu tàu, tàu khác hoặc các chướng ngại vật khác. Lỗi thường xảy ra phổ biến nhất với cơ cấu chấp hành là cơ cấu chấp hành bị mất một phần hiệu năng hay lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Luận án sẽ tập trung giải quyết ảnh hưởng lỗi một phần cơ cấu chấp hành hay hiệu năng của cơ cấu chấp hành trong quá trình điều khiển bị suy giảm một phần. Đồng thời, giả định không có dự phòng của cơ cấu chấp hành trong quá trình điều khiển khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi.

Ngoài ra, do giới hạn về thiết kế, điều kiện vật lý, trong thực tế tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành cần trong một giới hạn hoạt động nhất định để tránh gây quá tải, hư hỏng cơ cấu chấp hành. Do đó, tín hiệu điều khiển từ bộ

điều khiển đến cơ cấu chấp hành cần được đảm bảo nằm trong giới hạn hoạt động nêu trên.

Trên cơ sở nêu trên, luận án đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành thực hiện được các nhiệm vụ sau:

- Với khả năng xấp xỉ được các mô hình phi tuyến bất định, mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ thành phần tham số của mô hình bất định mà không cần xác định biên chặn của các yếu tố bất định và kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại được sử dụng để giải quyết vấn đề về nhiễu ngoại cảnh bất định. Từ đó, tín hiệu điều khiển thích nghi được đưa vào tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển để có thể đảm bảo tự động điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.

- Vấn đề cơ cấu chấp hành bị lỗi được giải quyết bằng một tín hiệu điều khiển trượt thứ 2 mà không cần phải thiết kế bộ phận nhận dạng lỗi trong bộ điều khiển. Ngoài ra, thành phần bất định xảy ra trong cơ cấu chấp hành được gộp vào trong hàm bất định tổng hợp và được giải quyết bởi kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại.

- Do hệ số khuếch đại luôn tăng khi sử dụng luật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại hoặc trong điều kiện bất định của mô hình và nhiễu ngoại cảnh tác động lớn, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành có thể vượt quá giới hạn hoạt động cho phép của cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển giới hạn được đưa vào tín hiệu điều khiển để đảm bảo tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành luôn nằm trong giới hạn hoạt động cho phép.

Bộ điều khiển được đề xuất là một điều khiển sửa lỗi tự động giải quyết lỗi xảy ra với cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển không cần một bộ phát hiện và nhận dạng lỗi, giảm độ phức tạp của hệ thống, có khả năng giải quyết tác động

của lỗi một phần của cơ cấu chấp hành và thành phần bất định sinh ra do lỗi cơ cấu chấp hành.

1.6 Kết luận chương 1

Trong chương 1, luận án đã tập trung giải quyết được các nội dung:

- Phân tích yêu cầu của bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu. Phân tích các yêu cầu về thiết kế quỹ đạo cập cầu dự kiến để đảm bảo các bộ điều khiển tự động tàu cập cầu có thể thực hiện được nhiệm vụ tự động điều khiển tàu cập cầu phù hợp các khu vực cảng, điều kiện hoàn cảnh cập cầu khác nhau;

- Phân tích tổng quan về nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu đã được công bố trong và ngoài nước, phân tích ưu nhược điểm của từng nhóm phương pháp;

- Phân tích đánh giá được tính mới trong nghiên cứu bộ điều khiển tự động tàu cập cầu dựa trên lý thuyết điều khiển trượt được đề xuất trong luận án và hướng nghiên cứu của đề tài;

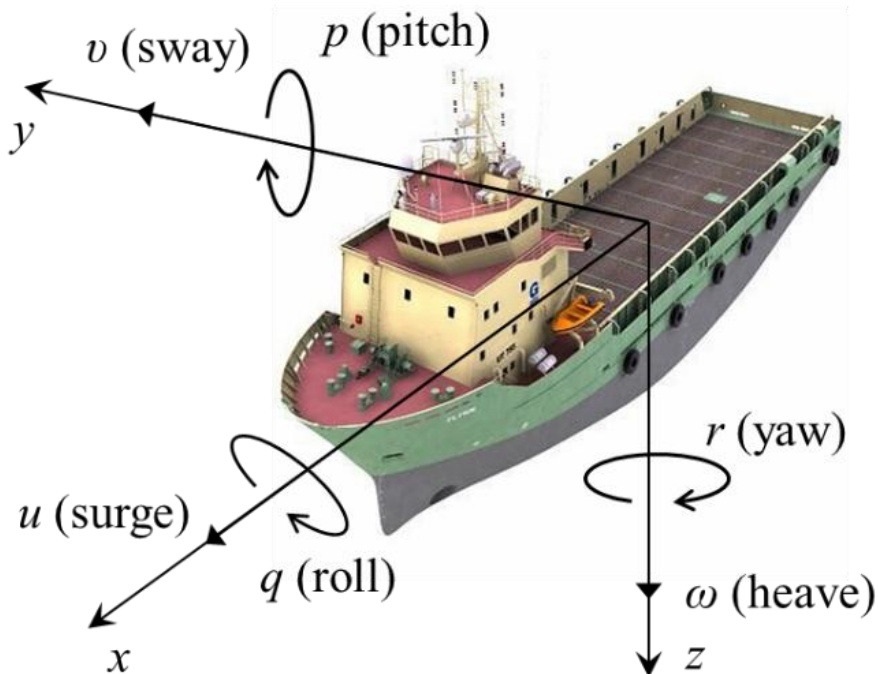
- Phân tích tổng quan về nghiên cứu tự động điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy. Đánh giá được tính mới trong nghiên cứu cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

CHƯƠNG 2 MÔ HÌNH TOÁN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY VÀ LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

2.1 Mô hình toán học chuyển động của tàu

Các bài toán điều khiển tự động nói chung và bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu nói riêng đều cần nghiên cứu, tìm hiểu và nắm rõ đặc tính động học của đối tượng điều khiển và mối quan hệ của nó với môi trường ngoại cảnh, trước khi tiến hành thiết kế bộ điều khiển cho đối tượng điều khiển. Trong điều khiển phi tuyến, mô hình toán học mô tả đặc tính động học của đối tượng điều khiển sẽ được sử dụng làm cơ sở để thiết kế bộ điều khiển đảm bảo yêu cầu chất lượng điều khiển. Do đó, nghiên cứu sẽ trình bày tổng quan về các mô hình toán học chuyển động của tàu và mô hình toán học chuyển động của tàu được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển tự động tàu cập cầu được đề xuất.

2.1.1 Các bậc tự do và chuyển động của tàu thủy



Hình 2.1. Chuyển động của tàu thủy theo 6 bậc tự do

Trong quá trình hàng hải, theo tài liệu [18] tàu thủy chuyển động theo 6 bậc tự do (hình 2.1) bao gồm: chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*); chuyển động theo trục thẳng đứng (*Heave*); chuyển động xoay (*Yaw*); chuyển động lắc ngang (*Roll*) và chuyển động lắc dọc (*Pitch*).

- Chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*): Con tàu chuyển động dọc về phía trước hoặc phía sau bằng lực đẩy máy chính. Đặc trưng cho chuyển động này là theo quãng đường dịch chuyển x và tốc độ của tàu trục dọc u . Tốc độ theo trục dọc u được điều chỉnh thông qua lực đẩy của máy chính.

- Chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*): Chuyển động dịch chuyển ngang là chuyển động tàu thủy bị dạt ngang do ảnh hưởng của yếu tố ngoại cảnh; khi có tàu lai tác dụng hoặc sử dụng chân vịt mạn, chân vịt bầu xoay. Đặc trưng cho chuyển động này độ dạt y và tốc độ dạt ngang v .

- Chuyển động theo trục thẳng đứng (*Heave*): Chuyển động theo trục thẳng đứng là chuyển động tàu thủy bị nâng lên hoặc hạ xuống do ảnh hưởng của sóng. Đặc trưng cho chuyển động này là tốc độ theo trục thẳng đứng ω và độ chìm z .

- Chuyển động lắc ngang (*Roll*): Đây là chuyển động xoay của tàu xung quanh trục dọc tàu khi có ảnh hưởng của ngoại cảnh tác động như sóng, gió. Đặc trưng cho chuyển động này là tốc độ lắc ngang p và góc lắc ngang ϕ .

- Chuyển động lắc dọc (*Pitch*): Đây là chuyển động xoay của tàu xung quanh trục dọc tàu khi có ảnh hưởng của ngoại cảnh tác động như sóng, gió. Đặc trưng cho chuyển động này là tốc độ lắc dọc q và góc lắc ngang θ .

- Chuyển động xoay (*Yaw*): Đây là chuyển động xoay của tàu xung quanh trục thẳng đứng khi tàu thay đổi góc bẻ lái; khi có ảnh hưởng của ngoại cảnh tác động hoặc tác dụng của chân vịt bầu xoay, tàu lai. Đặc trưng cho chuyển động này góc quay ψ và tốc độ quay r .

Bảng 2.1. Thành phần chuyển động và các tham số động học của tàu thủy

Bậc tự do	Loại chuyển động	Lực và mômen	Véc-tơ vận tốc	Vị trí và góc Euler
1	Chuyển động theo trục dọc tàu (<i>Surge</i>)	X	u	x
2	Chuyển động dịch chuyển ngang (<i>Sway</i>)	Y	v	y
3	Chuyển động theo trục thẳng đứng (<i>Heave</i>)	Z	w	z
4	Chuyển động lắc ngang (<i>Roll</i>)	K	p	Φ
5	Chuyển động lắc dọc (<i>Pitch</i>)	M	q	θ
6	Chuyển động xoay (<i>Yaw</i>)	N	r	Ψ

Để thiết kế tín hiệu điều khiển của các bộ điều khiển tàu thủy, các mô hình toán giảm bậc mô tả chuyển động của tàu thủy thường được sử dụng thay thế mô hình toán chuyển động của tàu thủy theo 6 bậc tự do:

- Mô hình chuyển động của tàu thủy theo 1 bậc tự do: được sử dụng cho hệ thống điều khiển tốc độ máy tàu thủy (*Surge*), hệ thống máy lái tự động (*Yaw*), hệ thống giảm lắc ngang (*Roll*).

- Mô hình chuyển động của tàu thủy theo 3 bậc tự do: Mô hình chuyển động của tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang được sử dụng

cho hệ thống định vị động, hệ thống điều khiển bám quỹ đạo, hệ thống điều khiển bám đường, hệ thống điều khiển tự động cập cầu. Mô hình chuyển động của tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng thẳng đứng hoặc trên mặt phẳng trục dọc thường được sử dụng cho các thiết bị lặn.

- Mô hình chuyển động của tàu thủy theo 4 bậc tự do (*Surge, Sway, Yaw, Roll*) thông thường thêm phương trình chuyển động lắc ngang vào phương trình động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu được sử dụng tàu hàng hải ở khu vực cần giảm lắc ngang bằng vây giảm lắc, bánh lái hoặc kết giảm lắc.

2.1.2 Các hệ tọa độ

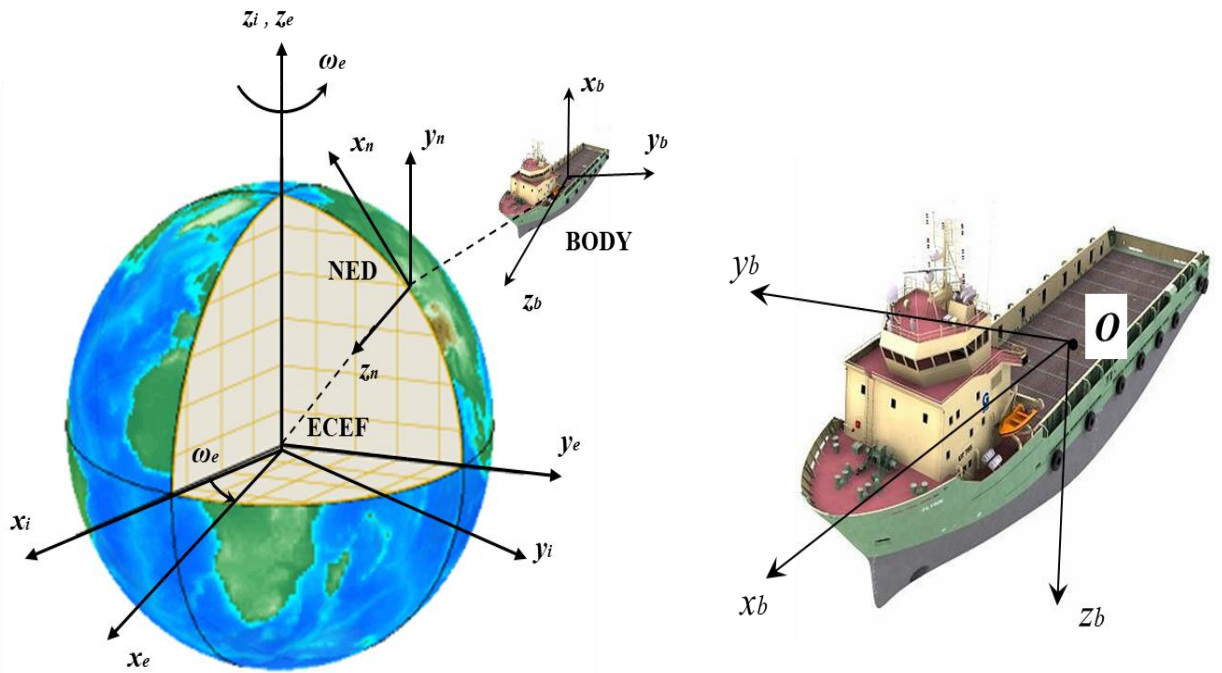
Khi phân tích chuyển động của tàu thủy theo 6 bậc tự do, các hệ tọa độ thường được sử dụng:

- Hệ tọa độ địa tâm quán tính ECI (Earth-centered inertial): có hệ trục tọa độ (Ox_i, Oy_i, Oz_i) với tâm O trùng với tâm của Trái đất.

- Hệ tọa độ địa tâm tĩnh ECEF (Earth-centered Earth fixed): có hệ trục tọa độ (Ox_e, Oy_e, Oz_e) với tâm O trùng với tâm của Trái đất. Hệ tọa độ này có tốc độ quay xung quanh trục Oz_e bằng tốc độ quay của Trái đất. Đối với tàu thủy chuyển động với tốc độ tương đối thấp, ảnh hưởng do tốc độ quay của Trái đất có thể được bỏ qua, khi đó hai hệ tọa độ coi như trùng nhau.

- Hệ tọa độ NED (North East Down): có hệ trục tọa độ (Ox_n, Oy_n, Oz_n) với tâm O trên bề mặt elipsoid của Trái đất. Trục Ox_n chỉ hướng Bắc, trục Oy_n chỉ hướng Đông, trục Oz_n chỉ hướng vào trong bề mặt Trái đất. Hệ quy chiếu NED liên hệ với hệ quy chiếu Trái đất tĩnh ECEF thông qua giá trị vĩ độ và kinh độ.

- Hệ tọa độ tàu BODY (Body-fixed): có hệ trục tọa độ (Ox_b, Oy_b, Oz_b) với tâm O là tâm tàu. Trục Ox_b là trục dọc tàu, trục Oy_b là trục ngang tàu, trục Oz_b là trục thẳng đứng.



Hình 2.2. Các hệ tọa độ

Dựa theo bảng 2.1, chuyển động của tàu thủy được mô tả bằng các véc-tơ sau:

$$\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T = [\boldsymbol{\eta}_e \ \boldsymbol{\eta}_{nb}]^T, \quad \boldsymbol{\eta}_e = [x \ y \ z]^T, \quad \boldsymbol{\eta}_{nb} = [\phi \ \theta \ \psi]^T$$

$$\boldsymbol{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T = [\boldsymbol{v}_e \ \boldsymbol{v}_{nb}]^T, \quad \boldsymbol{v}_e = [u \ v \ \omega]^T, \quad \boldsymbol{v}_{nb} = [p \ q \ r]^T$$

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T = [\boldsymbol{\tau}_e \ \boldsymbol{\tau}_{nb}]^T, \quad \boldsymbol{\tau}_e = [X \ Y \ Z]^T, \quad \boldsymbol{\tau}_{nb} = [K \ M \ N]^T$$

Trong đó:

$\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ là véc-tơ trạng thái của tàu;

$\boldsymbol{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T$ là véc-tơ tốc độ của tàu;

$\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ là véc-tơ lực và mômen tác động lên thân tàu

trong hệ tọa độ gắn với thân tàu.

2.1.3 Mối quan hệ giữa vị trí, hướng và vận tốc của tàu thủy

Mối quan hệ giữa véc-tơ η_e và véc-tơ vận tốc v_e được biểu thị bởi công thức sau theo [18] :

$$\dot{\eta}_e = J_e(\eta_{nb})v_e \quad (2.1)$$

Với $J_e(\eta_{nb})$ là ma trận chuyển đổi, được xác định như sau:

$$J_e(\eta_{nb}) = \begin{pmatrix} c_3c_2 & -s_3c_1 + c_3s_2s_1 & s_3s_1 + c_3c_2c_1 \\ s_3c_2 & -c_3c_1 + s_3s_2s_1 & -c_3s_1 + s_3s_2c_1 \\ -s_2 & c_2s_1 & c_2c_1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Trong đó: $c_1 = \cos(\phi)$; $s_1 = \sin(\phi)$; $c_2 = \cos(\theta)$; $s_2 = \sin(\theta)$; $c_3 = \cos(\psi)$; $s_3 = \sin(\psi)$.

Mối quan hệ giữa véc-tơ η_{nb} và véc-tơ vận tốc v_{nb} được biểu thị bởi công thức sau theo [18] :

$$\dot{\eta}_{nb} = J_{nb}(\eta_{nb})v_{nb} \quad (2.3)$$

Với $J_{nb}(\eta_{nb})$ là ma trận chuyển đổi được xác định như sau:

$$J_{nb}(\eta_{nb}) = \begin{pmatrix} 1 & s_1t_2 & c_1t_2 \\ 1 & c_1 & -s_1 \\ 0 & s_1/c_2 & c_1/c_2 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Trong đó: $t_2 = \tan(\theta)$.

Kết hợp công thức (2.1) và công thức (2.3), ta có công thức tổng hợp mô tả quan hệ giữa vị trí, hướng và tốc độ tàu thủy như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_e \\ \dot{\eta}_{nb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_e(\eta_{nb}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_{nb}(\eta_{nb}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_e \\ v_{nb} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.5)$$

2.1.4 Phương trình mô tả động lực học tàu thủy

Phương trình mô tả chuyển động tàu thủy được thể hiện như sau:

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (2.6)$$

Trong đó:

$\mathbf{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T$ là véc-tơ tốc độ trong hệ tọa độ gắn với thân tàu; tàu;

\mathbf{M}_{RB} là ma trận quán tính cố định;

$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm cố định;

$\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$ là véc-tơ lực và mômen tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ gắn với thân tàu. Véc-tơ $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ bao gồm các thành phần sau:

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_H + \mathbf{d} \quad (2.7)$$

Trong đó:

$\boldsymbol{\tau}$ là véc-tơ lực và mômen gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu;

$\boldsymbol{\tau}_H$ là véc-tơ lực và mômen động lực học;

$\mathbf{d} = \mathbf{d}_{wind} + \mathbf{d}_{wave}$ là véc-tơ lực và mômen gây ra bởi nhiễu ngoại cảnh tác động bao gồm lực và mômen tác động của gió \mathbf{d}_{wind} và của sóng \mathbf{d}_{wave} .

Theo trích dẫn trong tài liệu [18], lực và mômen động lực học $\boldsymbol{\tau}_H$ bao gồm 2 thành phần: lực và mômen do cảm ứng bức xạ $\boldsymbol{\tau}_R$, lực và mômen do lực ma sát bề mặt, sự suy giảm do độ trôi của sóng và dòng chảy xoáy $\boldsymbol{\tau}_D$.

Lực và mômen do cảm ứng bức xạ $\boldsymbol{\tau}_R$ được xác định như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_R = -\mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}_p(\mathbf{v}) - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \quad (2.8)$$

Trong đó:

\mathbf{M}_A là ma trận quán tính do khối lượng tăng thêm;

$C_A(v)$ là ma trận Coriolis và hướng tâm do khối lượng tăng thêm;

$D_p(v)$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học do suy giảm thế năng;

$g(\eta)$ là véc-tơ lực và mômen hồi phục.

Lực và mômen do lực ma sát bề mặt, sự suy giảm do độ trôi của sóng và dòng chảy xoáy τ_D được xác định như sau:

$$\tau_D = -D_S(v)v - D_W(v)v - D_M(v)v \quad (2.9)$$

Trong đó:

$D_S(v)$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học do lực ma sát bề mặt;

$D_W(v)$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học do độ trôi của sóng;

$D_M(v)$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học do dòng chảy xoáy.

Từ (2.8) và (2.9), ma trận giảm chấn thủy động lực học toàn phần được định nghĩa như sau:

$$D(v) = D_p(v) + D_S(v) + D_W(v) + D_M(v) \quad (2.10)$$

Khi đó, lực và mômen động lực học τ_H được viết lại như sau:

$$\tau_H = -M_A \dot{v} - C_A(v)v - D(v)v - g(\eta) \quad (2.11)$$

2.1.5 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 6 bậc tự do

Từ các phân tích nêu trên, mô hình toán động lực học 6 bậc tự do mô tả chuyển động tàu thủy được thể hiện như sau [18]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + d_e \end{cases} \quad (2.12)$$

Trong đó:

$\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ là véc-tơ trạng thái của tàu;

$\boldsymbol{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T$ là véc-tơ tốc độ của tàu;

$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa tâm;

$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_{RB} + \boldsymbol{M}_A$ là ma trận quán tính với \boldsymbol{M}_{RB} là ma trận quán tính cố định và \boldsymbol{M}_A là ma trận quán tính do khối lượng tăng thêm;

$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm với $\boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm cố định và $\boldsymbol{C}_A(\boldsymbol{v})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm do khối lượng tăng thêm;

$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{D} + \boldsymbol{D}_n(\boldsymbol{v})$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học với \boldsymbol{D} là thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học tuyến tính và $\boldsymbol{D}_n(\boldsymbol{v})$ là thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học phi tuyến;

$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{\eta})$ là véc-tơ lực và mômen hồi phục;

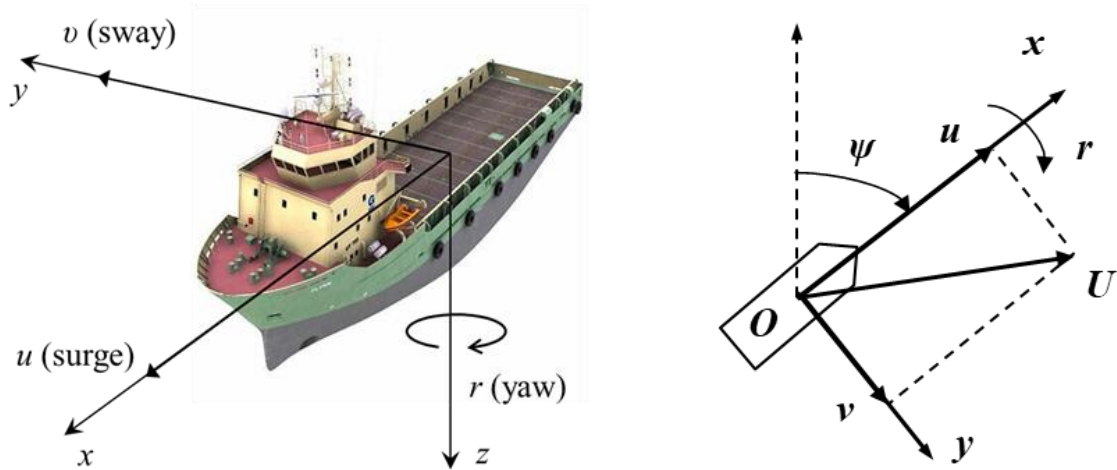
$\boldsymbol{\tau}$ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu;

$\boldsymbol{d}_e = \boldsymbol{d}_{wind} + \boldsymbol{d}_{wave}$ là véc-tơ lực và mômen gây ra bởi nhiễu ngoại cảnh tác động bao gồm lực và mômen tác động của gió \boldsymbol{d}_{wind} và của sóng \boldsymbol{d}_{wave} .

2.1.6 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang

Để giải quyết cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu, mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang được sử dụng bao gồm 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*) và chuyển động xoay (*Yaw*). Các chuyển động theo trục thẳng đứng (*Heave*), chuyển động lắc ngang (*Roll*) và chuyển động lắc dọc (*Pitch*) bỏ qua không xét. Khi đó, véc-tơ trạng thái và véc-tơ vận tốc của tàu

trở thành $\eta = [x \ y \ \psi]^T$, $v = [u \ v \ r]^T$. Các thành phần tốc độ theo trục thẳng đứng ω , tốc độ lắc ngang p , tốc độ lắc dọc q được bỏ qua hay $\omega = p = q = 0$.



Hình 2.3. Chuyển động của tàu thủy theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang

Giả thiết 2.1 với mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang

- (1) Tàu có sự phân bố khối lượng đồng đều và đối xứng qua mặt phẳng xz .
- (2) Góc tọa độ gắn với thân tàu trùng với trọng tâm tàu.

Trong thực tế, hầu hết các tàu đều đối xứng theo trục dọc tàu, đối xứng theo chiều ngang tàu không cần thiết cho chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang. Các thành phần bất đối xứng mũi/lái của tàu là các phần tử không đường chéo trong ma trận quán tính M và ma trận giảm chấn động lực học $D(v)$ khác 0 nhưng thường rất nhỏ so với các phần tử đường chéo nên có thể coi như bằng 0. Khi tàu chuyển động với tốc độ thấp, thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học phi tuyến $D_n(v)$ có thể được bỏ qua. Trong bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu, thành phần $D_n(v)$ có thể được bỏ qua chỉ còn thành phần ma trận giảm chấn động lực học tuyến tính D .

Với giả thuyết 2.1, mô hình toán động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu được thể hiện như sau [18]:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_e \end{cases} \quad (2.13)$$

Trong đó:

$\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ là véc-tơ thể hiện vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ ;

$\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$ là tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r trong hệ tọa độ tàu;

$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa tâm:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ma trận quán tính } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \text{ với}$$

$m_{11} = m - X_{\dot{u}}$; $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$; $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ là hệ số quán tính bao gồm ảnh hưởng tăng khối lượng (có giá trị dương không đổi);

Ma trận Coriolis và hướng tâm

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}}u \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_u & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \text{ là ma trận giảm chấn thủy động lực}$$

học với d_{11} , d_{22} , d_{33} là hệ số giảm chấn thủy động lực lên chuyển động theo trục

dọc tàu (*Surge*), chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), chuyển động xoay (*Yaw*);

$\boldsymbol{\tau}$ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu. Nếu tàu đủ cơ cấu chấp hành, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ với τ_u, τ_v và τ_r là tín hiệu điều khiển từ 3 cơ cấu chấp hành (máy chính, chân vịt mạn, bánh lái, chân vịt bầu xoay) để thực hiện điều khiển trên ba trục tốc độ u, v, r . Nếu tàu thiếu cơ cấu chấp hành, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$ với τ_u và τ_r là tín hiệu điều khiển từ 2 cơ cấu chấp hành để thực hiện điều khiển trên ba trục tốc độ u, v, r ;

$\boldsymbol{d}_e = [d_{eu} \ d_{ev} \ d_{er}]^T$ là véc-tơ lực và mômen do nhiễu ngoại cảnh tác động với d_{eu} là nhiễu lên chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); d_{ev} là nhiễu lên chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), d_{er} là nhiễu lên chuyển động xoay (*Yaw*).

2.1.7 Mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

Giả sử khi tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định, thành phần ma trận Coriolis và hướng tâm $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})$ bao gồm thành phần xác định

$$\boldsymbol{C}_o(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \text{ và thành phần bất định } \boldsymbol{\Delta C}(\boldsymbol{v}).$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{C}_o(\boldsymbol{v}) + \boldsymbol{\Delta C}(\boldsymbol{v}) \quad (2.14)$$

Thành phần ma trận giảm chấn thủy động lực học \boldsymbol{D} bao gồm thành phần

$$\text{xác định } \boldsymbol{D}_o = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \text{ và thành phần bất định } \boldsymbol{\Delta D}.$$

$$D = D_o + \Delta D \quad (2.15)$$

Khi đó, mô hình toán động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + (C_o(v) + \Delta C(v))v + (D_o + \Delta D)v = \tau + d_e \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C_o(v)v + D_o v = \tau + d_m + d_e \end{cases} \quad (2.17)$$

Trong đó:

$d_m = -(\Delta C(v)v + \Delta Dv)$ là thành phần bất định trong tham số của mô hình toán chuyển động của tàu. $d_m = [d_{mu} \quad d_{mv} \quad d_{mr}]^T$ với d_{mu} là thành phần bất định của mô hình trên chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); d_{mv} thành phần bất định của mô hình trên chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), d_{mr} là thành phần bất định của mô hình trên chuyển động xoay (*Yaw*).

$$\text{Thay } \eta = [x \ y \ \psi]^T, \quad J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{và } v = [u \ v \ r]^T \quad \text{vào}$$

công thức $\dot{\eta} = J(\eta)v$ trong phương trình (2.17):

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\text{Thay } \mathbf{v} = [u \ v \ r]^T, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_o(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_o = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T, \quad \mathbf{d}_m = [d_{mu} \ d_{mv} \ d_{mr}]^T,$$

$\mathbf{d}_e = [d_{eu} \ d_{ev} \ d_{er}]^T$ vào công thức $\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_m + \mathbf{d}_e$ trong phương trình (2.17):

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} - m_{22}vr + d_{11}u = \tau_u + d_{mu} + d_{eu} \\ m_{22}\dot{v} + m_{11}ur + d_{22}v = \tau_v + d_{mv} + d_{ev} \\ m_{33}\dot{r} - (m_{11} - m_{22})uv + d_{33}r = \tau_r + d_{mr} + d_{er} \end{cases} \quad (2.19)$$

Từ (2.18) và (2.19), phương trình (2.17) có thể được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \\ \tau_u = m_{11}\dot{u} - m_{22}vr + d_{11}u - d_{mu} - d_{eu} \\ \tau_v = m_{22}\dot{v} + m_{11}ur + d_{22}v - d_{mv} - d_{ev} \\ \tau_r = m_{33}\dot{r} - (m_{11} - m_{22})uv + d_{33}r - d_{mr} - d_{er} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2 Lý thuyết điều khiển trượt

Xét hệ không dừng chứa thành phần bất định $\mathbf{d}(\mathbf{x}, t)$ được điều khiển bởi tín hiệu điều khiển $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$ có dạng như sau theo tài liệu [5, 4]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}, t) \quad (2.21)$$

Trong đó $\mathbf{x}(t)$ là véc-tơ trạng thái, $\mathbf{f}()$ là véc-tơ các hàm liên tục.

Một mặt cong trơn $s(\mathbf{x}, t)$ được gọi là mặt trượt, được mô tả bởi véc-tơ gồm m hàm trơn chứa tất cả các quỹ đạo mong muốn $\mathbf{x}(t)$ như sau:

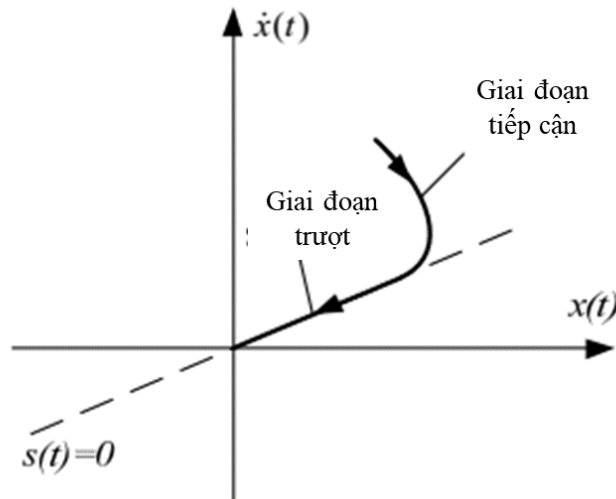
$$\mathbf{s}(\mathbf{x}, t) = [s_1(x, t), s_2(x, t), \dots, s_m(x, t)]^T \quad (2.22)$$

Để đơn giản trong điều khiển và điều kiện cho phép, người ta sử dụng mặt trượt trơn dờng:

$$s(\mathbf{x}) = [s_1(x), s_2(x), \dots, s_m(x)]^T \quad (2.23)$$

Điều khiển trượt thiết kế tín hiệu điều khiển \mathbf{u} để thực hiện được 2 giai đoạn:

- Giai đoạn tiếp cận: đưa hệ (2.21) tiến về mặt trượt (2.23).
- Giai đoạn trượt: duy trì véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ ở trên mặt trượt. Khi ở mặt trượt, hệ thống sẽ không chịu ảnh hưởng các thành phần bất định của mô hình và nhiễu tác động bên ngoài.



Hình 2.4. Các giai đoạn của điều khiển trượt

Do đó, tín hiệu điều khiển \mathbf{u} sẽ bao gồm 2 thành phần:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{sw} \quad (2.24)$$

Trong đó:

- Thành phần \mathbf{u}_n là thành phần tín hiệu tương đương điều khiển giữ véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ duy trì ở trên mặt trượt hay nếu tại $t = t_0$, $s(x_0, t_0) = 0$ thì \mathbf{u}_n cần đảm bảo $\dot{s}(x, t) = 0$ khi $t \geq t_0$;

- Thành phần \mathbf{u}_{sw} là thành phần tín hiệu hiệu chỉnh điều khiển đưa véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ tiến về mặt trượt.

Xét hàm Lyapunov xác định dương $V(s) = \frac{1}{2}ss^T$, điều kiện đủ để véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ tiến về mặt trượt là \mathbf{u}_{sw} phải đảm bảo

$$\dot{V}(s) = s^T \dot{s} < 0 \text{ với } s(x) \neq 0 \quad (2.25)$$

a) *Luật tiếp cận*

Để đảm bảo điều kiện (2.25), luật tiếp cận được thiết kế có dạng sau theo tài liệu [36]:

$$\mathbf{u}_{sw} = -k \operatorname{sgn}(s) - f(s) \quad (2.26)$$

Với k là hằng số dương; $f(0) = 0$ và $sf(s) > 0$ khi $s \neq 0$

Trong thực tế, có 3 luật tiếp cận thường được sử dụng:

- Luật tiếp cận tốc độ hằng

$\mathbf{u}_{sw} = -k \operatorname{sgn}(s)$ với k là hằng số dương và

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{khi } s > 0 \\ 0 & \text{khi } s = 0 \\ -1 & \text{khi } s < 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Khi đó, $\dot{V}(s) = s^T \dot{s} = -k|s| < 0$ với $s \neq 0$

Luật tiếp cận này sẽ đưa véc-tơ trạng thái tiếp cận mặt trượt với tốc độ không đổi k . Ưu điểm của luật tiếp cận này là hoàn toàn đơn giản. Tuy nhiên, nếu hệ số k quá nhỏ, thời gian tiếp cận lâu. Ngược lại, nếu hệ số k quá lớn, hiện tượng chattering lớn.

- Luật tiếp cận tốc độ hàm mũ

$\mathbf{u}_{sw} = -k_1 \operatorname{sgn}(s) - k_2 s$ với k_1 và k_2 là hằng số dương

Khi đó, $\dot{V}(s) = s^T \dot{s} = -(k_1 |s| + k_2) < 0$ với $s \neq 0$

Với thành phần $k_2 s$ trong luật tiếp cận, véc-tơ trạng thái tiếp cận mặt trượt với tốc độ nhanh hơn khi giá trị s lớn.

- Luật tiếp cận tốc độ hàm lũy thừa

$$\mathbf{u}_{sw} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \text{ với } k \text{ và } \alpha \text{ là hằng số dương và } 0 < \alpha < 1$$

Khi đó, $\dot{V}(s) = s^T \dot{s} = -k |s|^{\alpha+1} < 0$ với $s \neq 0$

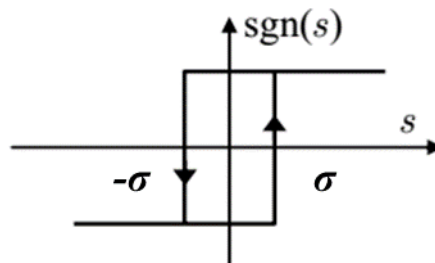
Luật tiếp cận này sẽ tăng tốc độ tiếp cận khi trạng thái ở xa mặt trượt. Tuy nhiên, tốc độ tiếp cận sẽ giảm khi trạng thái ở gần mặt trượt.

b) *Hiện tượng chattering và các kỹ thuật chống chattering*

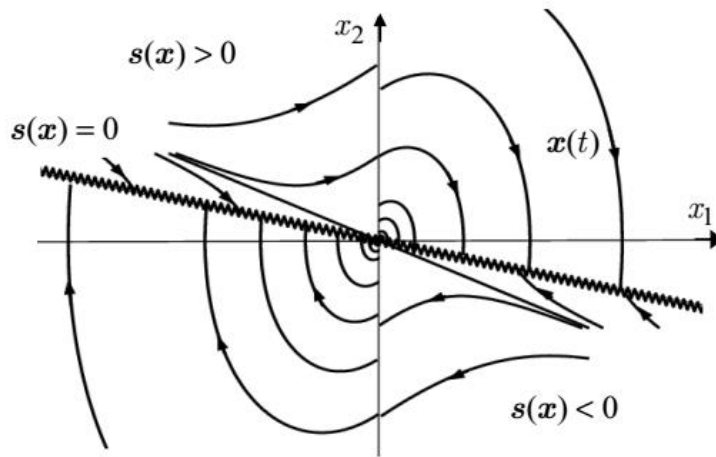
Do trong thực tế không tồn tại thiết bị tạo được hàm $\operatorname{sgn}()$ như công thức (2.27) nên được thay bằng hàm sau:

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{khi } x > \sigma \\ \text{không thay đổi} & \text{khi } x = \sigma \\ -1 & \text{khi } x < \sigma \end{cases} \quad (2.28)$$

Khi đó, không tồn tại thành phần \mathbf{u}_n trong tín hiệu điều khiển \mathbf{u} mà chỉ còn thành phần \mathbf{u}_{sw} nên tín hiệu điều khiển \mathbf{u} phải chuyển đổi dấu liên tục để giữ được véc-tơ trạng thái $\mathbf{x}(t)$ duy trì ở trên mặt trượt $s(\mathbf{x}, t) = 0$ gây ra hiện tượng chattering.



Hình 2.5. Hàm sign



Hình 2.6. Hiện tượng chattering

Có nhiều kỹ thuật khác nhau được sử dụng để làm giảm hoặc triệt tiêu hiện tượng chattering.

Kỹ thuật dùng mặt bao là một trong các phương pháp thường được sử dụng để triệt tiêu hiện tượng chattering bằng cách thay thế hàm $\text{sgn}()$ bằng hàm khuếch đại bão hòa có dạng:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\sigma}\right) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & \text{khi } |s| > \sigma \\ \frac{s}{\sigma} & \text{khi } |s| \leq \sigma \end{cases} \quad (2.29)$$

Hệ số dương $\sigma > 0$ cần được lựa chọn thông qua mô phỏng hoặc thực nghiệm để đảm bảo triệt tiêu hiện tượng chattering hoặc đạt được chất lượng điều khiển cho phép. Tuy nhiên, mặc dù có thể triệt tiêu hiện tượng chattering, kỹ thuật này làm tính ổn định của chế độ trượt bị ảnh hưởng, thậm chí có thể dẫn tới mất tính ổn định của hệ thống.

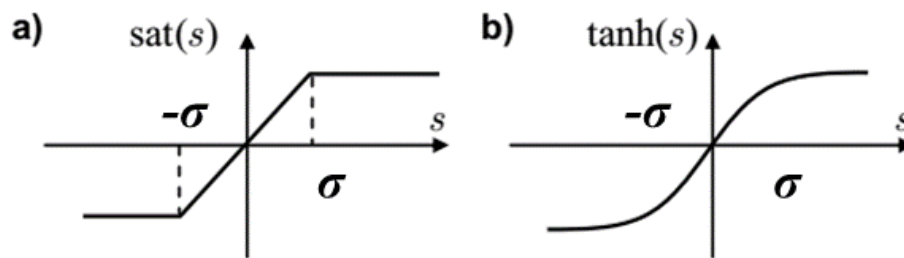
Kỹ thuật khác thường được sử dụng để chống chattering là thay thế hàm $\text{sgn}()$ bằng các hàm xấp xỉ liên tục. Kỹ thuật này chỉ có ý nghĩa giảm tần số thay đổi dấu của tín hiệu điều khiển chứ không làm thay đổi biên độ dao động và cần phải có hệ số khuếch đại lớn khi ở gần mặt trượt.

- Hàm xấp xỉ:

$$\text{sgn}(s) \approx \frac{s}{|s| + \sigma} \text{ với } \sigma > 0 \text{ có giá trị nhỏ} \quad (2.30)$$

- Hàm hyperbolic tangent:

$$\text{sgn}(s) \approx \tanh(s) \quad (2.31)$$



Hình 2.7. Kỹ thuật chống chattering

Ngoài ra, để loại bỏ hiện tượng chattering, ta có thể sử dụng kỹ thuật trượt bậc cao, trượt siêu xoắn. Tuy nhiên, các kỹ thuật này vẫn tồn tại hiện tượng chattering ở gốc tọa độ, chỉ cải thiện hiện tượng chattering bằng cách thu nhỏ biên độ chattering.

2.3 Nhận dạng mô hình bằng mạng nơ-ron nhân tạo

2.3.1 Cơ sở lý thuyết mạng nơ-ron nhân tạo

Mạng nơ-ron là một trong các thành phần được sử dụng rộng rãi của lý thuyết trí tuệ nhân tạo. Cấu trúc mạng nơ-ron bao gồm 1 lớp đầu vào, 1 lớp đầu ra, 1 hoặc nhiều lớp ẩn. Trong mỗi lớp sẽ có 1 hay nhiều nút, các nút ở lớp này sẽ liên kết với các nút ở lớp khác thông qua các giá trị trọng số liên kết.

Trong trường hợp mô hình phi tuyến có tính phức tạp cao và khó khăn trong quá trình nhận dạng mô hình, các nhà khoa học đưa ra giải pháp sử dụng nơ-ron nhân tạo để xấp xỉ mô hình - chính là nhận dạng mô hình. Bằng phương pháp này, ta không cần biết chính xác của mô hình toán của đối tượng mà sử dụng kết quả xấp xỉ bằng mạng nơ-ron nhân tạo thay thế đối tượng. Mô hình

và thông số của đối tượng được mạng nơ-ron nhận dạng trên cơ sở đầu vào và đầu ra của đối tượng.

Nguyên lý làm việc của mạng nơ-ron là mô hình toán để khớp các bộ dữ liệu được tạo ra. Quá trình khởi tạo và huấn luyện mạng được thể hiện qua các bước dưới đây:

Bước thứ nhất: Tạo ra bộ dữ liệu bao gồm m đầu vào ở lớp vào và n đầu ra ở lớp ra theo yêu cầu của bài toán;

Bước thứ hai: Khởi tạo mạng nơ-ron với m đầu vào ở lớp vào và n đầu ra ở lớp ra. Tùy theo kích cỡ bộ dữ liệu mà lựa chọn số lượng lớp vào và số nút trong mỗi lớp ẩn;

Bước thứ ba: Huấn luyện mạng nơ-ron bằng các bộ dữ liệu tạo ra đó theo các phương pháp học để đạt tiêu chí tổng bình phương sai lệch giữa đầu ra của mạng và đầu ra của bộ dữ liệu là nhỏ nhất. Tham số đại diện cho mạng là trọng số, quá trình luyện mạng là để tìm giá trị này;

Bước cuối cùng: Cho các dữ liệu bất kỳ trong bộ dữ liệu huấn luyện mạng vào mạng để kiểm tra. Kết quả đầu ra của mạng sẽ bám theo kết quả ra của bộ dữ liệu. Khi đó, mạng nơ-ron nhân tạo đã được huấn luyện bám theo mô hình đối tượng của bộ dữ liệu hay nhận dạng được mô hình và tham số của đối tượng.

2.3.2 Mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF

Mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm (Radial Basis Function - RBF) là mạng nơ-ron được sử dụng phổ biến. Mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF bao gồm 3 lớp: 1 lớp đầu vào, 1 lớp ẩn và 1 lớp đầu ra (hình 2.8). Tín hiệu ra của mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF được xác định như sau:

$$F(X) = W^{*T} h(X) + \varepsilon \quad (2.32)$$

Trong đó: X và $F(X)$ là tín hiệu vào và tín hiệu ra của mạng RBF, W^* là véc-tơ ma trận trọng số cần xác định của các nút ẩn. ε là sai số xấp xỉ giới hạn

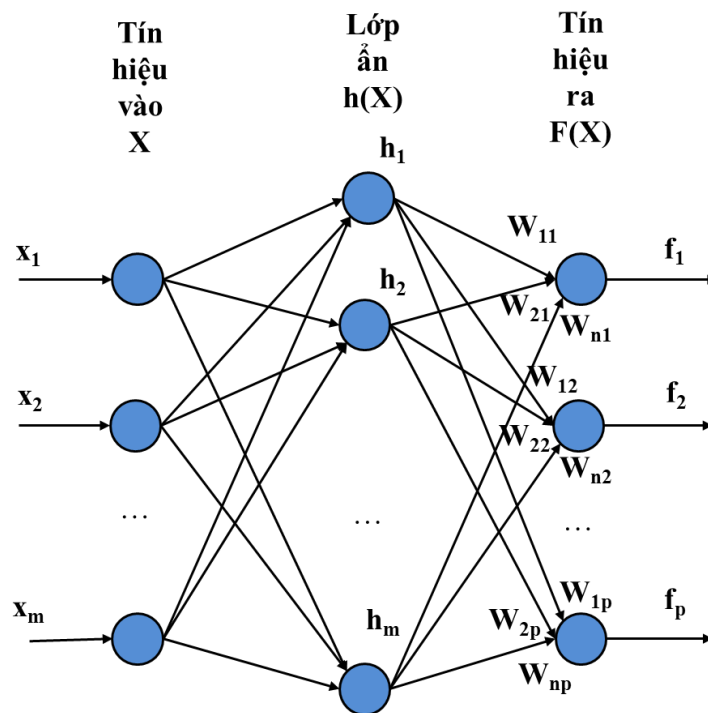
của mạng nơ-ron với $|\varepsilon| \leq \varepsilon_N$ (ε_N là hằng số không biết). $\mathbf{h}(\mathbf{X}) = [h_1(\mathbf{X}), \dots, h_n(\mathbf{X})]$ với n là số nút ẩn ($n > 1$) là hàm Gauss như sau:

$$\mathbf{h}_i = \exp\left[-\frac{\|\mathbf{X} - \mathbf{c}_i\|^2}{2b_i^2}\right], i = 1, 2, \dots, n \quad (2.33)$$

Trong đó: $\|\cdot\|$ thể hiện hàm Euclidean, $\mathbf{c}_i = [c_{i1}, \dots, c_{in}]^T$ là trọng tâm của hàm hướng tâm, b_i là độ rộng của hàm Gaussian.

Đối với hàm liên tục trơn bất kỳ $F(\mathbf{X})$ là một tập compact, hàm $F(\mathbf{X})$ được xấp xỉ bằng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF, luôn tồn tại một véc-tơ trọng số của các nút ẩn \mathbf{W}^* được xác định như sau:

$$\mathbf{W}^* = \arg \min_{\mathbf{W} \in \Omega} \left\{ \sup_{\mathbf{X} \in \Omega} |F(\mathbf{X}) - \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{X})| \right\} \quad (2.34)$$



Hình 2.8. Cấu trúc mạng nơ-ron nhân tạo hàm cơ sở xuyên tâm RBF

Theo tài liệu [35], nếu số lượng nút ẩn đủ lớn, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF có thể xấp xỉ đồng dạng một hàm trơn $F(\mathbf{X})$ với sai số ε nhỏ bao nhiêu tùy ý.

2.4 Tổng quan về điều khiển sửa lỗi

2.4.1 Khái niệm lỗi và phân loại

Lỗi được xác định là một sai lệch không được cho phép ra khỏi điều kiện thông thường của ít nhất một đặc tính đặc trưng hoặc một tham số của hệ thống. Ảnh hưởng của một lỗi gây ra giảm chất lượng điều khiển của hệ thống thậm chí gây hỏng toàn bộ hệ thống. Cần phân biệt giữa lỗi và thành phần bất định trong mô hình hệ thống hoặc nhiễu ngoại cảnh tác động đến hệ thống. Lỗi là một yếu tố có thể phát hiện được và ảnh hưởng của nó có thể được loại bỏ ra khỏi hệ thống. Nhiễu ngoại cảnh và thành phần bất định trong mô hình hệ thống có thể xác định được tồn tại nhưng ảnh hưởng của chúng chỉ có thể được giải quyết bằng các phương pháp thích hợp như bộ lọc hoặc điều khiển bền vững. Về lý thuyết, bộ điều khiển có thể được thiết kế để thích nghi với ảnh hưởng của thành phần bất định trong mô hình hệ thống và nhiễu ngoại cảnh trong phạm vi độ lớn nhất định. Tuy nhiên, lỗi có ảnh hưởng lớn hơn nhiều và bộ điều khiển cố định không thể đảm bảo chất lượng điều khiển khi có lỗi nghiêm trọng.

Về cơ bản, hầu hết các kỹ thuật điều khiển tự động cổ điển đều giả định rằng các thành phần trong hệ thống đều hoạt động tốt và bộ điều khiển hoạt động dựa trên giả định này. Do đó, lỗi xảy ra trong thành phần trong hệ thống gửi thông tin sai lệch tới bộ điều khiển, và kết quả dẫn tới bộ điều khiển hoạt động sai lệch do thông tin sai lệch nhận được.

Lỗi thường được phân loại theo vị trí xảy ra lỗi bao gồm:

- Lỗi cơ cấu chấp hành: Lỗi cơ cấu chấp hành có thể xảy ra lỗi toàn phần hoặc lỗi một phần. Lỗi toàn phần xảy ra với cơ cấu chấp hành là khi cơ cấu chấp hành bị kẹt không thể tạo ra lực đẩy mặc dù có tín hiệu điều khiển. Lỗi một phần của cơ cấu chấp hành là khi lực đẩy tạo ra bị suy giảm so với lực đẩy theo yêu cầu, thường được thể hiện dưới dạng phần trăm %;

- Lỗi cảm biến: Khi xảy ra lỗi với cảm biến, giá trị đo của cảm biến có thể bị sai lệch hoặc thậm chí mất giá trị đo;

- Lỗi trong thành phần của hệ thống: Lỗi trong thành phần của hệ thống xảy ra khi có sự thay đổi của tham số cơ học ảnh hưởng đến hoạt động của hệ thống. Lỗi trong thành phần của hệ thống rất khó để phân loại và đo lường nên bao gồm nhiều loại lỗi khác nhau.

Lỗi xảy ra trong hệ thống có thể từ nhiều nguyên nhân khác nhau:

- Gián đoạn kết nối giữa cảm biến/cơ cấu chấp hành và bộ điều khiển do chattering lác, kết nối kém hoặc ngắn mạch;

- Ảnh hưởng nhiễu lên cảm biến/cơ cấu chấp hành do ảnh hưởng của nhiễu môi trường như nhiễu do từ trường;

- Chậm trễ do tốc độ đường truyền;

- Sụt điện áp cấp cho cảm biến/cơ cấu chấp hành điện;

- Cơ cấu chấp hành bị trôi (bề mặt điều khiển di chuyển tự do nhưng không tạo ra mômen) do mất dòng chảy thủy lực;

- Cơ cấu chấp hành bị kẹt do quá giới hạn tín hiệu điều khiển hoặc không đủ bôi trơn cần thiết.

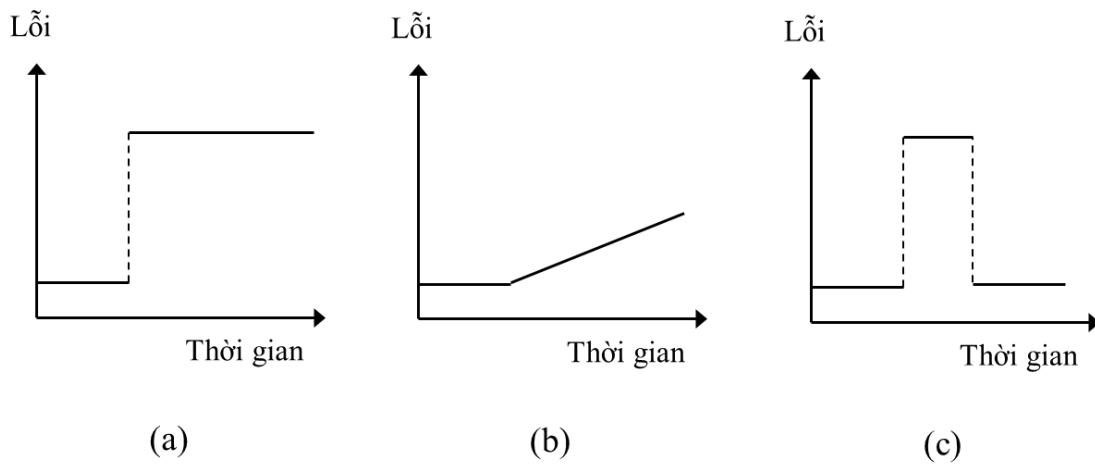
Ngoài ra, lỗi có thể được phân loại theo mức độ nghiêm trọng của lỗi bao gồm:

- Lỗi đột ngột: Lỗi đột ngột xảy ra khi tham số của hệ thống bị thay đổi nhanh và đột ngột hơn quá trình điều khiển thông thường.

- Lỗi tiềm ẩn: Lỗi tiềm ẩn khi mới xuất hiện gây ảnh hưởng nhỏ và ẩn trong hoạt động của hệ thống, sau đó tăng dần trong quá trình điều khiển. Lý do của loại lỗi này có thể do hoạt động không chính xác của cảm biến/cơ cấu chấp hành hoặc lỗi một phần.

- Lỗi gián đoạn: Loại lỗi này chỉ xảy ra trong một khoảng thời gian xác định. Loại lỗi này thường xảy ra do nhiều yếu tố như kết nối giữa cảm biến/cơ

cấu chấp hành và bộ điều khiển không ổn định. Độ phức tạp của hệ thống cũng có thể dẫn tới lỗi gián đoạn.



Hình 2.9. Mô tả các loại lỗi: a) Lỗi đột ngột; b) Lỗi tiềm ẩn; c) Lỗi gián đoạn

2.4.2 Khái niệm điều khiển sửa lỗi

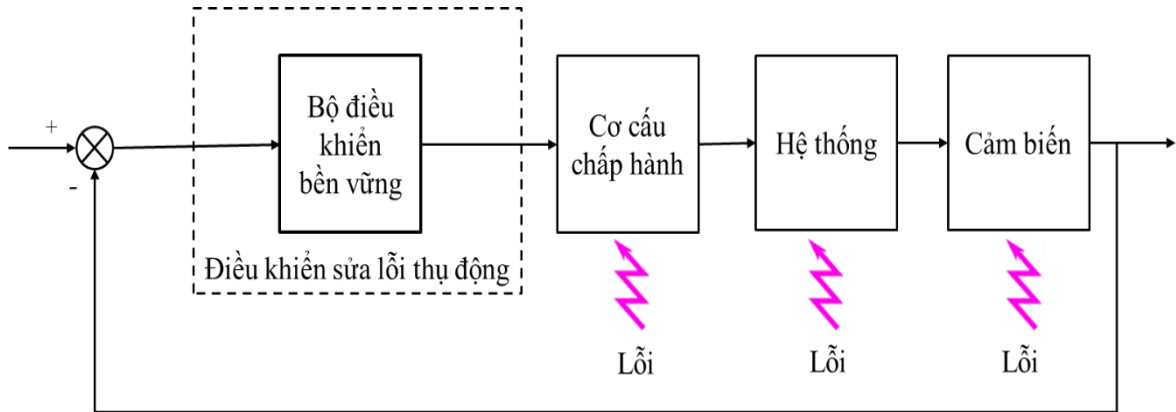
Bộ điều khiển có khả năng tự động bù lỗi xảy ra trong hệ thống đồng thời duy trì ổn định và chất lượng điều khiển trong phạm vi cho phép được gọi là một bộ điều khiển sửa lỗi FTC. Nghiên cứu tổng quan đầu tiên về điều khiển sửa lỗi FTC được đưa ra bởi nhà nghiên cứu Patton vào 1997 trong [45].

Có nhiều kỹ thuật khác nhau được áp dụng cho điều khiển sửa lỗi FTC. Điều khiển sửa lỗi FTC được chia thành 2 loại chính: kỹ thuật sửa lỗi chủ động và kỹ thuật sửa lỗi thụ động.

2.4.2.1 Điều khiển sửa lỗi thụ động

Điều khiển sửa lỗi thụ động được sử dụng khi lỗi trong hệ thống có thể được xác định. Do đó, bộ điều khiển được thiết kế trong điều kiện xảy ra các lỗi đã được xác định trước. Khi đó, bộ điều khiển được thiết kế cố định trong quá trình hoạt động của hệ thống nên bộ điều khiển sửa lỗi thụ động ít phức tạp, dễ thiết kế. Bộ điều khiển sửa lỗi thụ động được thiết kế dựa trên một bộ điều khiển bền vững có khả năng hoạt động ổn định khi không xảy ra lỗi hoặc

ngay cả khi xảy ra lỗi. Cấu trúc bộ điều khiển sửa lỗi thụ động được mô tả trong Hình 2.10.



Hình 2.10. Cấu trúc của bộ điều khiển sửa lỗi thụ động

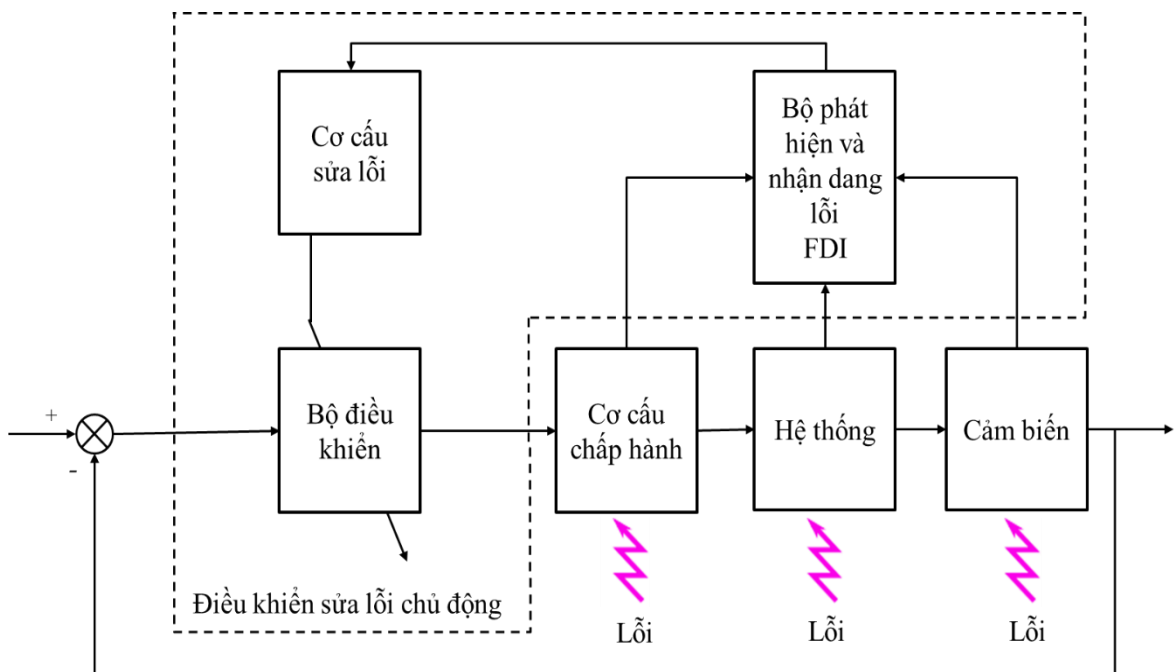
Một số phương pháp tiếp cận được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển thụ động bao gồm điều khiển trượt [25, 32], điều khiển tối ưu H_∞ [48, 49], điều khiển tuyến tính bậc hai LQ [53], điều khiển lô-gic mờ [65], điều khiển mô hình dự đoán MPC [39].

Ưu điểm của điều khiển sửa lỗi thụ động là đơn giản trong thiết kế, hạn chế số lượng phần mềm/phần cứng cần sử dụng hay giảm được khối lượng cần tính toán, ít bị gián đoạn trong quá trình điều khiển khi có lỗi xảy ra.

Nhược điểm của điều khiển sửa lỗi thụ động là chỉ có thể giải quyết được hạn chế trong một số loại lỗi nhất định. Ngoài ra, về khía cạnh chất lượng điều khiển, điều kiện hệ thống hoạt động bình thường và điều kiện hệ thống hoạt động khi có lỗi xảy ra cần được tính toán trong quá trình thiết kế bộ điều khiển sửa lỗi thụ động. Do đó, bộ điều khiển sửa lỗi thụ động có xu hướng tập trung cho tính bền vững của hệ thống trong tất cả các điều kiện hoạt động hơn là tối ưu hóa chất lượng điều khiển trong từng điều kiện khác nhau như đảm bảo ổn định của hệ thống khi có lỗi xảy ra, giảm thời gian ổn định trong điều kiện không có lỗi.

2.4.2.2 Điều khiển sửa lỗi chủ động

Khác với điều khiển sửa lỗi thụ động, điều khiển sửa lỗi chủ động sửa lại tham số điều khiển của hệ thống khi có sự xuất hiện của các lỗi khác nhau. Bộ điều khiển cần có một Bộ phát hiện và nhận dạng lỗi (Fault Detection and Identification - FDI). Bộ phát hiện và nhận dạng lỗi FDI chịu trách nhiệm giám sát liên tục tình trạng hoạt động của hệ thống và các thành phần của hệ thống. Khi bộ phát hiện và nhận dạng lỗi FDI phát hiện ra lỗi trong hệ thống, bộ điều khiển sẽ điều chỉnh tham số điều khiển của hệ thống. Do đó, với điều khiển sửa lỗi chủ động, một số lượng lớn kiểu lỗi khác nhau có thể được giải quyết. Có nhiều kỹ thuật điều khiển được sử dụng với hướng tiếp cận này như: kết hợp kỹ thuật điều khiển tối ưu H_∞ trong hệ thống tuyến tính LTI và phương pháp điều chỉnh tham số tuyến tính [23], phương pháp đảo nghịch động [17], phương pháp thích nghi, mạng nơ-ron và điều khiển mô hình dự đoán MPC. Cấu trúc bộ điều khiển sửa lỗi thụ động được mô tả trong Hình 2.11.



Hình 2.11. Cấu trúc của bộ điều khiển sửa lỗi chủ động

Ưu điểm điều khiển sửa lỗi chủ động là có thể giải quyết nhiều loại lỗi khác nhau, có khả năng tối ưu hóa chất lượng điều khiển trong từng điều kiện khác nhau.

Nhược điểm của điều khiển sửa lỗi chủ động là có ít thời gian để bộ FDI thực hiện việc điều chỉnh hệ thống. Ngoài ra, độ chính xác của bộ FDI ảnh hưởng đến quá trình điều chỉnh. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của kỹ thuật sửa lỗi chủ động là khó chứng minh tính ổn định của toàn bộ hệ thống sửa lỗi khi xét đến cả chất lượng hoạt động của bộ FDI, các thông số điều khiển, cơ cấu điều chỉnh. Giải pháp cho nhược điểm này được đề xuất trong [16]. Tác giả đã đề xuất sử dụng lý thuyết chuyển hệ thống dựa trên lý thuyết thời gian dừng để đảm bảo tính ổn định của hệ thống và khả năng xác định lỗi khi có lỗi xảy ra.

2.5 Cơ cấu chấp hành cho tàu thủy

2.5.1 Điều khiển cơ cấu chấp hành cho tàu thủy

Để điều khiển một tàu thủy có n bậc tự do, cần có lực và mô-men điều khiển τ sinh ra bởi số lượng a cơ cấu chấp hành được điều khiển bởi tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành τ_c từ luật điều khiển.

- Nếu $n < a$, tàu được gọi là tàu thừa cơ cấu chấp hành;
- Nếu $n = a$, tàu được gọi là tàu đủ cơ cấu chấp hành;
- Nếu $n > a$, tàu được gọi là tàu thiếu cơ cấu chấp hành.

Theo [18], mối quan hệ giữa các lực sinh ra bởi cơ cấu chấp hành f và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành τ_c như sau:

$$f = K\tau_c \quad (2.35)$$

Trong đó:

$\tau_c = [\tau_{c1}, \tau_{c2}, \dots, \tau_{ca}]^T$ với τ_{ci} là tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành thứ i ($i=1, 2, \dots, a$);

$f = [f_1, f_2, \dots, f_a]^T$ với $f_i = [F_{xi} \ F_{yi} \ F_{zi}]$ là lực sinh ra bởi cơ cấu chấp hành thứ i ($i=1,2,\dots,a$) trên chuyển động theo hướng trục dọc tàu Ox , hướng dịch chuyển ngang tàu Oy , trục thẳng đứng Oz ;

$K = \text{diag}(K_1, K_2, \dots, K_a)$ là ma trận hệ số của bộ điều khiển.

Phương trình mô tả mối quan hệ giữa các lực và mô-men điều khiển τ và tín hiệu điều khiển τ_c từ luật điều khiển như sau:

$$\tau = Tf = TK\tau_c \quad (2.36)$$

Trong đó:

$\tau = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ với τ_u, τ_v và τ_r là lực và mô-men điều khiển chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*), chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), chuyển động xoay (*Yaw*);

$T = [t_1, t_2, \dots, t_a]$ là ma trận cấu hình của các cơ cấu chấp hành với hệ số cấu hình t_i của cơ cấu chấp hành thứ i được xác định theo loại cơ cấu chấp hành.

2.5.2 Điều khiển cơ cấu chấp hành cho tàu thủy khi xét đến khả năng xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành

Phương trình mô tả mối quan hệ giữa các lực và mô-men điều khiển τ và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành τ_c từ luật điều khiển khi xét đến khả năng xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành theo tài liệu [20] như sau:

$$\tau = TKH\tau_c + d_a \quad (2.37)$$

Trong đó:

$H(t) = \text{diag}(h_1(t), h_2(t), \dots, h_a(t))$ là ma trận sức khỏe của các cơ cấu chấp hành với $0 < h_i(t) \leq 1$ ($i=1,2,\dots,a$);

$d_a = [d_{a1}, d_{a2}, \dots, d_{aa}]^T$ là thành phần bất định sinh ra do lỗi cơ cấu chấp hành.

Nhận xét:

- Đối với bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu, mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang được sử dụng và nghiên cứu chỉ tập trung điều khiển cho tàu đủ cơ cấu chấp hành nên $n=a=3$. Ngoài ra, để tăng tính tổng quát và thuận lợi cho quá trình thiết kế bộ điều khiển, nghiên cứu sẽ thay thế tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành từ luật điều khiển $\tau_c = [\tau_{c1} \ \tau_{c2} \ \tau_{c3}]^T$ bằng tín hiệu điều khiển $u_c = [u_{cu} \ u_{cv} \ u_{cr}]^T$ trên 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*) và chuyển động xoay (*Yaw*):

$$u_c = TK\tau_c \quad (2.38)$$

- Khi đó, phương trình mô tả mối quan hệ giữa các lực và mô-men điều khiển $\tau = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ và tín hiệu điều khiển $u_c = [u_{cu} \ u_{cv} \ u_{cr}]^T$ từ luật điều khiển khi xét đến khả năng xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành được như sau:

$$\tau = Hu_c + d_a \quad (2.39)$$

Trong đó:

$$H(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) & 0 & 0 \\ 0 & h_2(t) & 0 \\ 0 & 0 & h_3(t) \end{bmatrix} \text{ là ma trận sức khỏe của các cơ cấu chấp hành trên}$$

3 chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang với $0 < h_i(t) \leq 1$ ($i=1,2,3$);

$d_a = [d_{au} \ d_{av} \ d_{ar}]^T$ là thành phần bất định sinh ra do lỗi cơ cấu chấp hành trên 3 chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang.

- Khi tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành τ_c bị giới hạn trong khoảng hoạt động nhất định, tín hiệu điều khiển $u_c = [u_{cu} \ u_{cv} \ u_{cr}]^T$ cũng bị giới hạn trong một khoảng hoạt động xác định.

- Khi không xét đến khả năng xảy ra lỗi đối với cơ cấu chấp hành hay $H=I$ và $d_a=0$, lực và mô-men điều khiển $\tau = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ chính là tín hiệu điều khiển $u_c = [u_{cu} \ u_{cv} \ u_{cr}]^T$:

$$\tau = u_c \quad (2.40)$$

2.6 Kết luận chương 2

Trong chương 2, luận án đã phân tích và trình bày các vấn đề sau:

- Phân tích mô hình toán chuyển động tàu thủy bao gồm: mô hình 6 bậc tự do, mô hình 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang dạng đủ cơ cấu chấp hành; mô hình 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang dạng đủ cơ cấu chấp hành khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.

- Trình bày về lý thuyết điều khiển trượt, lý thuyết sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để nhận dạng mô hình, lý thuyết điều khiển sửa lỗi, lý thuyết điều khiển cơ cấu chấp hành tàu thủy khi xét đến khả năng cơ cấu chấp hành bị lỗi làm nền tảng làm nền tảng để thiết kế các bộ tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất chương 3 của luận án.

Dựa trên cơ sở lý thuyết đã được trình bày trong chương 2, luận án đề xuất các bộ tự động điều khiển tàu cập cầu trong các điều kiện sau:

- Bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động;

- Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định;

- Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

CHƯƠNG 3 TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU CẬP CẦU DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

3.1 Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động dựa trên bộ điều khiển trượt

3.1.1 Mục tiêu thiết kế

Luận án đề xuất bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động giải quyết được các vấn đề sau:

- Đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến khác nhau đồng thời điều khiển hướng mũi tàu theo hướng cập cầu;
- Giảm dần tốc độ tàu, đảm bảo tốc độ bằng không tại vị trí cập cầu;
- Đảm bảo khả năng điều khiển dưới ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động.

3.1.2 Bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động

Bộ điều khiển được đề xuất sử dụng mặt trượt tốc độ để đảm bảo đưa tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ để cập cầu tàu. Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển, quá trình thiết kế bộ điều khiển chia thành 2 bước sau:

- Bước thứ nhất thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) từ vị trí và hướng mũi tàu mong muốn (x_d, y_d, ψ_d) dựa trên quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) được thiết kế sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu tiến dần về 0 trong thời gian hữu hạn. Yêu cầu của bước này là tại vị trí cập cầu, tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) bằng 0.

- Bước thứ hai sử dụng lý thuyết điều khiển trượt để thiết kế luật điều khiển để đảm bảo đưa được tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi thực tế của tàu đến giá trị mong muốn.

3.1.2.1 Thiết kế tốc độ mong muốn

Ta có công thức sai số bám vị trí và hướng tàu như sau:

$$\mathbf{e}_\eta = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Đạo hàm theo thời gian sai số bám vị trí và hướng tàu được công thức sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\psi}_d \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Sai số của các thành phần tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay của tàu:

$$\mathbf{e}_v = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d \quad (3.3)$$

Từ công thức (2.18), thành phần véc-tơ tốc độ của tàu \mathbf{v} được xác định như sau:

$$\begin{cases} u = \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi \\ v = -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi \\ r = \dot{\psi} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \mathbf{Q}(\eta) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

Trong đó:

$$\mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Trên cơ sở lý thuyết được sử dụng trong thiết kế bộ điều khiển tàu lặn tự hành của nghiên cứu [56], luận án đã áp dụng cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với các tốc độ mong muốn theo **Định lý 1**.

Định lý 1: Thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay mong muốn (u_d, v_d, r_d) như sau:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \tanh(k_x e_x) \\ \dot{y}_d - \tanh(k_y e_y) \\ \dot{\psi}_d - \tanh(k_\psi e_\psi) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Trong đó, $k_x, k_y, k_\psi > 0$ là hệ số khuếch đại điều khiển có giá trị dương.

Nếu sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) tiến đến 0 thì sẽ đảm bảo sai số bám vị trí và hướng mũi tàu sẽ tiến đến 0 trong thời gian hữu hạn.

Chứng minh:

Thay các công thức (3.2), (3.4) và (3.6) vào công thức (3.3), ta có:

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta}) \begin{bmatrix} \dot{e}_x + \tanh(k_x e_x) \\ \dot{e}_y + \tanh(k_y e_y) \\ \dot{e}_\psi + \tanh(k_\psi e_\psi) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Do trị số của ma trận $\mathbf{Q}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ bằng 1, ma trận $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ là

ma trận không suy biến. Do đó, nếu sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) trong công thức (3.7) tiến tới 0, thành phần $(\dot{e}_x + \tanh(k_x e_x))$, $(\dot{e}_y + \tanh(k_y e_y))$ và $(\dot{e}_\psi + \tanh(k_\psi e_\psi))$ cũng sẽ tiến tới 0 hay:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -\tanh(k_x e_x) \\ \dot{e}_y = -\tanh(k_y e_y) \\ \dot{e}_\psi = -\tanh(k_\psi e_\psi) \end{cases} \quad (3.8)$$

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} e_x^2 + \frac{1}{2} e_y^2 + \frac{1}{2} e_\psi^2 \quad (3.9)$$

Đạo hàm theo thời gian của hàm Lyapunov V :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y + e_\psi \dot{e}_\psi \\ &= -e_x \tanh(k_x e_x) - e_y \tanh(k_y e_y) - e_\psi \tanh(k_\psi e_\psi) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Với $k_x, k_y, k_\psi > 0$, $\dot{V} \leq 0$. Do đó, V sẽ tiến tới 0 và sai số bám vị trí và hướng mũi tàu e_x, e_y, e_ψ cũng đồng thời tiến tới 0.

Tóm lại, nếu tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay mong muốn (u_d, v_d, r_d) được thiết kế như trong công thức (3.6), sai số bám vị trí và hướng mũi tàu (e_x, e_y, e_ψ) sẽ được đảm bảo tiến tới (0, 0, 0).

3.1.2.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động

Đối với bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động, mô hình chuyển động của tàu (2.13) được sử dụng (không xét đến thành phần bất định do tham số của mô hình bất định d_m như trong mô hình chuyển động của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17)).

Chọn mặt trượt như sau:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \mathbf{e}_v \quad (3.11)$$

Đạo hàm theo thời gian các mặt trượt:

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \dot{s}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_u \\ \dot{e}_v \\ \dot{e}_r \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{e}}_v \quad (3.12)$$

Đạo hàm theo thời gian sai số tốc độ của tàu, ta có:

$$\dot{\mathbf{e}}_v = \begin{bmatrix} \dot{e}_u \\ \dot{e}_v \\ \dot{e}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{u}_d \\ \dot{v}_d \\ \dot{r}_d \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_d \quad (3.13)$$

Từ công thức (2.13), ta có thể viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_e) \quad (3.14)$$

Thay công thức (3.12) vào công thức (3.14):

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{e}}_v = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_e) - \dot{\mathbf{v}}_d \quad (3.15)$$

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{u}_c = \mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{sw} \quad (3.16)$$

Trong đó:

- \mathbf{u}_n là thành phần tín hiệu điều khiển tương đương giữ tốc độ trên mặt trượt với $\mathbf{A} = \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_d$:

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_d - \mathbf{d}_e = \mathbf{A} - \mathbf{d}_e \quad (3.17)$$

- \mathbf{u}_{sw} là thành phần tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh đưa tốc độ về mặt trượt theo luật tiếp cận tốc độ hằng trong phần 2.2 như sau:

$$\mathbf{u}_{sw} = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.18)$$

Với tham số khuếch đại $k > 0$.

Từ công thức (3.16), (3.17) và (3.18), tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

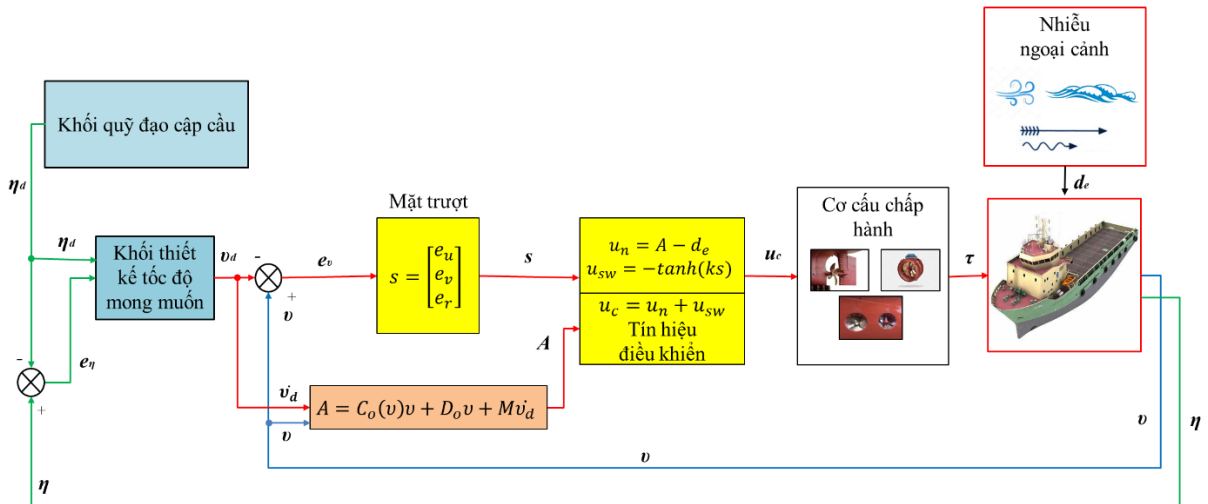
$$u_c = A - d_e - k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.19)$$

Thay vào công thức (3.15), ta được:

$$\dot{s} = M^{-1}(-k \operatorname{sgn}(s)) \quad (3.20)$$

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\operatorname{sgn}()$ bằng hàm liên tục trơn gần đúng $\tanh()$, khi đó công thức (3.19) được viết lại như sau :

$$u_c = A - d_e - \tanh(ks) \quad (3.21)$$



Hình 3.1. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt tự động điều khiển tàu cập cầu

Hình 3.1 là sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt tự động điều khiển tàu cập cầu. Sai số bám vị trí và hướng tàu e_η được xác định từ vị trí tàu, hướng mũi tàu $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ và vị trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$ từ quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ đạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) từ sai số bám vị trí và hướng tàu e_η và vị trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$. Mặt trượt s là mặt trượt sai số tốc độ e_v được xác

định từ tốc độ mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) và tốc độ tàu $v = [u \ v \ r]^T$. Tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành từ bộ điều khiển u_c được xác định theo công thức (3.21). Từ tín hiệu điều khiển u_c , các cơ cấu chấp hành tạo ra lực và mô-men điều khiển τ điều khiển tàu dưới tác dụng của nhiễu ngoại cảnh.

3.1.2.3 Phân tích tính ổn định của hệ thống

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$L_I = \frac{1}{2} s^T s \quad (3.22)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov L_I và thay đạo hàm \dot{s} từ công thức (3.20), ta có:

$$\dot{L}_I = s^T \dot{s} = -M^{-1} k s^T \operatorname{sgn}(s) \quad (3.23)$$

Với $k \geq 0$, $\dot{L}_I \leq 0$. Do đó, hệ thống được điều khiển bởi bộ điều khiển được đề xuất ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

3.2 Tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định dựa trên bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo

3.2.1 Mục tiêu thiết kế

Bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1 không thể đảm bảo điều khiển tàu trong điều kiện tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định do các nguyên nhân sau:

- Bộ điều khiển trượt được đề xuất trong phần 3.1 được xây dựng với điều kiện tham số của mô hình tàu được xác định bằng thực nghiệm và không thay đổi trong quá trình điều khiển. Tuy nhiên, trong thực tế khai thác, tham số của

mô hình tàu sẽ bị thay đổi sai khác với tham số được xác định trước hay tham số của mô hình bất định.

- Mặc dù bộ điều khiển dựa trên lý thuyết điều khiển trượt có khả năng bền vững khi nhiều ngoại cảnh tác động, tuy nhiên biên chặn của hàm bất định của nhiều ngoại cảnh phải biết trước. Ngoài ra, nhiều ngoại cảnh tác động trong thực tế thay đổi nhanh và chứa nhiều yếu tố bất định, khó có thể xác định được chính xác mô hình ngoại cảnh tác động lên tàu kể cả khi có sự hỗ trợ từ các thiết bị, cảm biến đặt trên tàu và khu vực hàng hải.

Trên cơ sở nêu trên, luận án đề xuất một bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiều ngoại cảnh tác động bất định với các ưu điểm sau:

- Với giả thiết ma trận quán tính M coi như không thay đổi trong quá trình điều khiển, nhiều ngoại cảnh bất định d_e và thành phần bất định trong tham số của mô hình tàu d_m trong mô hình tàu (2.17) được thay thế bằng một véc-tơ hàm bất định tổng hợp F . Với khả năng xấp xỉ được các mô hình phi tuyến bất định, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF NN được sử dụng để xấp xỉ hàm bất định tổng hợp mà không cần xác định biên chặn của các yếu tố bất định. Từ đó, tín hiệu điều khiển thích nghi được đưa vào tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển để có thể đảm bảo tự động điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện tham số của mô hình bất định và nhiều ngoại cảnh tác động bất định.

- Phương pháp điều khiển trượt luôn tồn tại hiện tượng chattering đồng biến với biên chặn của hàm bất định của nhiều ngoại cảnh. Để giảm chattering, ta giảm biên chặn bằng cách dùng mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ thành phần bất định. Khi đó, thành phần bất định được thay thế bằng sai lệch ước lượng bất định có biên chặn nhỏ hơn.

3.2.2 Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

Phương trình động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C_o(v)v + D_o v = \tau + F_t \end{cases} \quad (3.24)$$

Trong đó: $F_t = d_m + d_e = [F_{tu} \ F_{tv} \ F_{tr}]^T$ là véc-tơ hàm bất định tổng hợp của nhiễu ngoại cảnh bất định và các thành phần bất định trong các tham số $C(v)$, $D(v)$ của mô hình tàu trên 3 chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*) và chuyển động xoay (*Yaw*).

Từ mô hình tàu (3.24), đạo hàm theo thời gian véc-tơ tốc độ của tàu được xác định như sau:

$$\dot{v} = M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v + \tau + F_t) \quad (3.25)$$

Tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1, mặt trượt sai số

$$\text{tốc độ } s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = e_v \text{ với tốc độ mong muốn được thiết kế trong phần}$$

3.1.2.1 cũng được sử dụng. Từ công thức (3.25), đạo hàm theo thời gian mặt trượt được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e}_v = \dot{v} - \dot{v}_d = M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v + \tau + F_t) - \dot{v}_d \\ &= M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v - M\dot{v}_d + \tau + F_t) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, ta thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$\tau = u_c = u_n + u_{sw} \quad (3.27)$$

Trong đó:

- u_n là thành phần tín hiệu điều khiển tương đương giữ tốc độ trên mặt trượt với $A = C_o(v)v + D_o v + M\dot{v}_d$:

$$u_n = C_o(v)v + D_o v + M\dot{v}_d - F_t = A - F_t \quad (3.28)$$

- u_{sw} là thành phần tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh đưa tốc độ về mặt trượt theo luật tiếp cận tốc độ hằng trong phần 2.2 như sau:

$$u_{sw} = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.29)$$

Với tham số khuếch đại $k > 0$.

Từ công thức (3.27), (3.28) và (3.29), tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

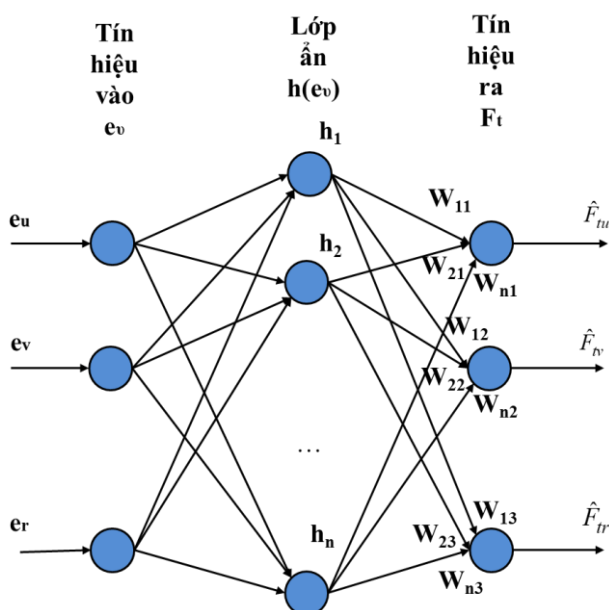
$$u_c = A - F_t - k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.30)$$

3.2.2.1 Thiết kế luật điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron

Trong luật điều khiển, do $F_t = [F_{tu} \ F_{tv} \ F_{tr}]^T$ là véc-tơ bất định tổng hợp của nhiều ngoại cảnh bất định và tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng để thay thế véc-tơ F_t trong tín hiệu điều khiển bằng hàm xấp xỉ \hat{F}_t .

Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển gồm 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r); 1 lớp ẩn gồm n nút; 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{F}_{tu}, \hat{F}_{tv}, \hat{F}_{tr}$) được vào tín hiệu điều khiển (theo Hình 3.2). Mạng nơ-ron được huấn luyện online trong quá trình điều khiển từ 3 tín hiệu

vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) để đưa ra 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{F}_{tu}, \hat{F}_{tv}, \hat{F}_{tr}$).



Hình 3.2. Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển

Từ công thức (2.32), véc-tơ bất định tổng hợp của nhiều ngoại cảnh bất định và tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định $F_t = [F_{tu} \ F_{tv} \ F_{tr}]^T$ có thể được viết như sau:

$$F_t = W^{*T} h(e_v) + \varepsilon \quad (3.31)$$

Trong đó: e_v và F_t là tín hiệu vào và tín hiệu ra của mạng nơ-ron RBF, W^{*} là véc-tơ ma trận trọng số cần xác định của các nút ẩn. ε là sai số xấp xỉ giới hạn của mạng nơ-ron với $|\varepsilon| \leq \varepsilon_N$ (ε_N là hằng số không biết). $h(e_v) = [h_1(e_v), \dots, h_n(e_v)]$ với n là số nút ẩn ($n > 1$) là hàm Gauss như sau:

$$h_i(e_v) = \exp\left[-\frac{\|e_v - c_i\|^2}{2b_i^2}\right], i = 1, 2, \dots, n \quad (3.32)$$

Trong đó: $\|\cdot\|$ thể hiện hàm Euclidean, $c_i = [c_1, \dots, c_n]^T$ là trọng tâm của hàm hướng tâm, b_i là độ rộng của hàm Gaussian.

Khi đó, hàm xấp xỉ \hat{F}_t được xác định như sau:

$$\hat{F}_t = \hat{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) \quad (3.33)$$

Trong đó: \hat{W}^T là véc-tơ ma trận trọng số của mạng RBF NN.

Do đó, tín hiệu điều khiển được thể hiện như sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{u}_c = \mathbf{A} - \hat{F}_t - k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.34)$$

Thay (3.34) vào (3.26), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} = \dot{e}_v &= \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{A} + \mathbf{A} - \hat{F}_t - k \operatorname{sgn}(s) + F_t) \\ &= \mathbf{M}^{-1}(F_t - \hat{F}_t) - \mathbf{M}^{-1}k \operatorname{sgn}(s) = \mathbf{M}^{-1}\tilde{F}_t - \mathbf{M}^{-1}k \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Với \tilde{F}_t là véc-tơ sai số của mạng nơ-ron, \tilde{W}^T là véc-tơ sai số của các trọng số của nút ẩn trong mạng nơ-ron, \hat{W}^T là véc-tơ xấp xỉ của \mathbf{W}^* .

$$\tilde{F}_t = F_t - \hat{F}_t = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) + \varepsilon - \hat{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) = \tilde{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) + \varepsilon \quad (3.36)$$

$$\tilde{W}^T = \mathbf{W}^{*T} - \hat{W}^T \quad (3.37)$$

Luật điều khiển thích nghi được thiết kế như sau:

$$\dot{\hat{W}} = \frac{1}{\gamma} s^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) \quad (3.38)$$

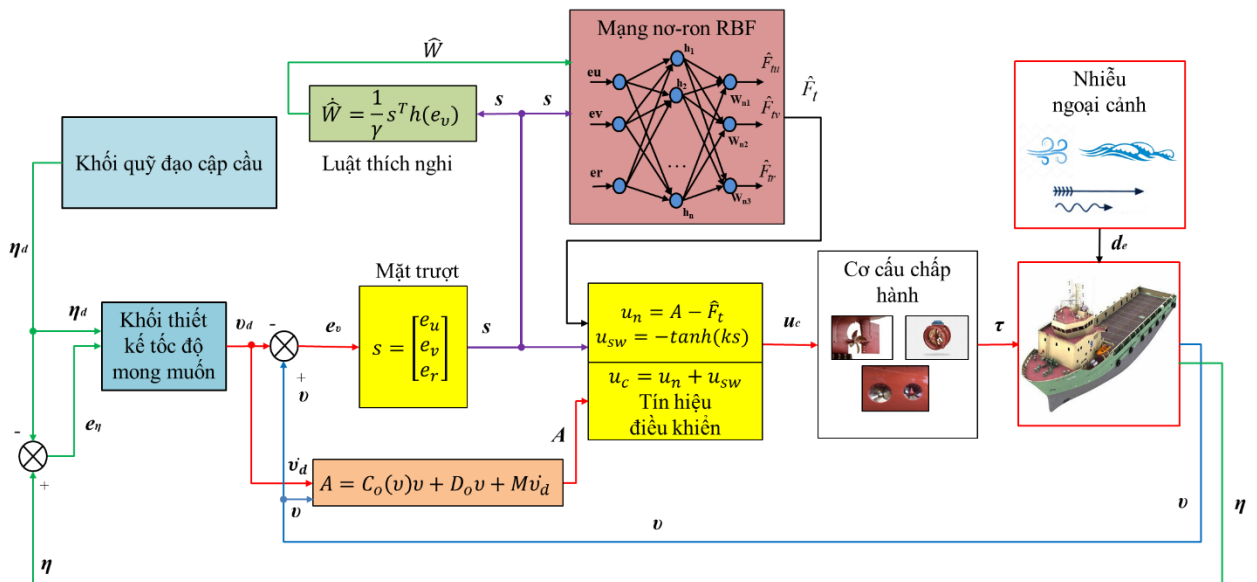
Với γ là một hằng số dương.

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\operatorname{sgn}()$ bằng hàm liên tục trơn gần đúng $\tanh()$, công thức (3.35) được viết lại như sau :

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{A} - \hat{F}_t - \tanh(ks) \quad (3.39)$$

Hình 3.3 là sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo tự động điều khiển tàu cập cầu. Sai số bám vị trí và hướng tàu \mathbf{e}_η được xác định từ vị trí tàu, hướng mũi tàu $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ và vị

trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$ từ quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) từ sai số bám vị trí và hướng tàu e_η và vị trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$. Mặt trượt s là mặt trượt sai số tốc độ e_v được xác định từ tốc độ mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) và tốc độ tàu $v = [u \ v \ r]^T$. Tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành từ bộ điều khiển u_c được xác định theo công thức (3.39). Trong tín hiệu điều khiển, hàm xấp xỉ \hat{F}_t là tín hiệu ra của mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF với tín hiệu đầu vào là sai số tốc độ e_v với các trọng số của mạng được cập nhật theo luật điều khiển thích nghi (3.38). Từ tín hiệu điều khiển u_c , các cơ cấu chấp hành tạo ra lực và mô-men điều khiển τ điều khiển tàu dưới tác động của tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.



Hình 3.3. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo tự động điều khiển tàu cập cầu

3.2.2.2 Phân tích tính ổn định của hệ thống

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$L_2 = \frac{1}{2}s^T s + \frac{1}{2}M^{-1}\gamma\tilde{W}^T\tilde{W} \quad (3.40)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov L_2 và từ công thức (3.35), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}_2 &= s^T \dot{s} - M^{-1}\gamma\tilde{W}^T\dot{\tilde{W}} = s^T (M^{-1}\tilde{F}_t - M^{-1}k \operatorname{sgn}(s)) - M^{-1}\gamma\tilde{W}^T\dot{\tilde{W}} \quad (3.41) \\ &= s^T (M^{-1}(\tilde{W}^T h(e_v) + \varepsilon) - M^{-1}k \operatorname{sgn}(s)) - M^{-1}\gamma\tilde{W}^T\dot{\tilde{W}} \\ &= M^{-1}\tilde{W}^T (s^T h(e_v) - \gamma\dot{\tilde{W}}) - s^T M^{-1}(\varepsilon + k \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned}$$

Với luật điều khiển thích nghi được thiết kế như công thức (3.38), ta có:

$$\dot{L}_2 = -sM^{-1}(\varepsilon + k \operatorname{sgn}(s)) \quad (3.42)$$

Do đó, $\dot{L}_2 \leq 0$ khi sai số xấp xỉ ε đủ nhỏ. Hệ thống được điều khiển bởi bộ điều khiển được đề xuất ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

3.3 Tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành dựa trên bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi

3.3.1 Mục tiêu thiết kế

Trong quá trình điều khiển, lỗi có thể xảy ra bao gồm: lỗi của cơ cấu chấp hành; lỗi của các cảm biến và lỗi của hệ thống. Trong quá trình cập cầu, cơ cấu chấp hành của tàu bao gồm máy chính, bánh lái, chân vịt bầu xoay, chân vịt mạn khi ra lỗi gây ra ảnh hưởng lớn đến khả năng điều khiển tàu, thậm chí có thể gây mất điều khiển, gây ra va chạm với cầu tàu, tàu khác hoặc các chướng ngại vật khác. Lỗi thường xảy ra phổ biến nhất với cơ cấu chấp hành là cơ cấu chấp hành bị mất một phần hiệu năng. Ngoài ra, do giới hạn về thiết kế, điều kiện vật lý, trong thực tế tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành cần trong một giới hạn hoạt động nhất định để tránh gây quá tải, hư hỏng cơ cấu chấp hành.

Do đó, tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển đến cơ cấu chấp hành cần được đảm bảo nằm trong giới hạn hoạt động nêu trên.

Trên cơ sở nêu trên, luận án sẽ đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành thực hiện được các nhiệm vụ sau:

- Với khả năng xấp xỉ được các mô hình phi tuyến bất định, mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ thành phần tham số của mô hình bất định mà không cần xác định biên chặn của các yếu tố bất định và kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại được sử dụng để giải quyết vấn đề về nhiễu ngoại cảnh bất định. Từ đó, tín hiệu điều khiển thích nghi được đưa vào tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển để có thể đảm bảo tự động điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.

- Vấn đề cơ cấu chấp hành bị lỗi được giải quyết bằng một tín hiệu điều khiển trượt thứ 2 mà không cần phải thiết kế bộ phận nhận dạng lỗi trong bộ điều khiển. Ngoài ra, thành phần bất định xảy ra trong cơ cấu chấp hành được gộp vào trong hàm bất định tổng hợp và được giải quyết bởi kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại.

- Do hệ số khuếch đại luôn tăng khi sử dụng luật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành có thể vượt quá giới hạn hoạt động cho phép của cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển giới hạn được đưa vào tín hiệu điều khiển để đảm bảo tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành luôn nằm trong giới hạn hoạt động cho phép.

3.3.2 Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

3.3.2.1 Thiết kế bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi

Bộ điều khiển được đề xuất sẽ sử dụng mặt trượt tốc độ để đảm bảo đưa tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ để cập cầu

tàu. Để đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển và giải quyết tác động khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và vấn đề giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, ta chia thành 3 bước sau:

- Bước thứ nhất sẽ thiết kế tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn (u_d, v_d, r_d) từ vị trí và hướng mũi tàu mong muốn (x_d, y_d, ψ_d) dựa trên quỹ đạo cập cầu dự kiến tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1 và 3.2.

- Bước thứ hai sử dụng lý thuyết điều khiển trượt để thiết kế luật điều khiển để đảm bảo đưa được tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi thực tế của tàu đến giá trị mong muốn. Thành phần bất định do tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định được xấp xỉ mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF NN. Các nhiễu ngoại cảnh bất định và thành phần bất định do lỗi của cơ cấu chấp hành được tập hợp thành một véc-tơ bất định tổng hợp. Kết hợp với kỹ thuật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại, tín hiệu điều khiển được thiết kế bao gồm 2 tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh: tín hiệu hiệu chỉnh thứ nhất được sử dụng để giải quyết tác động của véc-tơ bất định tổng hợp; tín hiệu hiệu chỉnh thứ hai được sử dụng thích nghi khi cơ cấu chấp hành bị lỗi.

- Bước thứ ba: Do hệ số khuếch đại của các tín hiệu hiệu chỉnh luôn tăng trong quá trình điều khiển dưới tác động của luật điều khiển thích nghi hệ số khuếch đại, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành có thể vượt quá giới hạn cho phép của tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Tín hiệu điều khiển bão hòa được thiết kế trong tín hiệu điều khiển để đảm bảo không vượt quá giới hạn cho phép.

Bộ điều khiển sử dụng mô hình tàu 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17) :

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C_o(v)v + D_o v = \tau + d_m + d_e \end{cases} \quad (3.43)$$

Từ mô hình tàu (5.1), đạo hàm theo thời gian véc-tơ tốc độ của tàu được xác định như sau:

$$\dot{v} = M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v + \tau + d_m + d_e) \quad (3.44)$$

Tương tự như bộ điều khiển được đề xuất trong phần 3.1., mặt trượt sai số

tốc độ $s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = e_v$ với tốc độ mong muốn được thiết kế trong phần

3.1.2.1 cũng được sử dụng. Từ công thức (3.44), đạo hàm theo thời gian mặt trượt được viết lại như sau:

$$\dot{s} = \dot{e}_v = \dot{v} - \dot{v}_d = M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v + \tau + d_m + d_e) - \dot{v}_d \quad (3.45)$$

Khi xét đến cơ cấu chấp hành bị lỗi, theo công thức (2.39) tín hiệu điều khiển $\tau = Hu_c + d_a$ được thay vào công thức (3.45) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v + Hu_c + d_a + d_m + d_e) - \dot{v}_d \\ &= M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v - M\dot{v}_d + H(u_c + d_m) + d_a + (1-H)d_m + d_e) \\ &= M^{-1}(-C_o(v)v - D_o v - M\dot{v}_d + H(u_c + d_m) + F) \end{aligned} \quad (3.46)$$

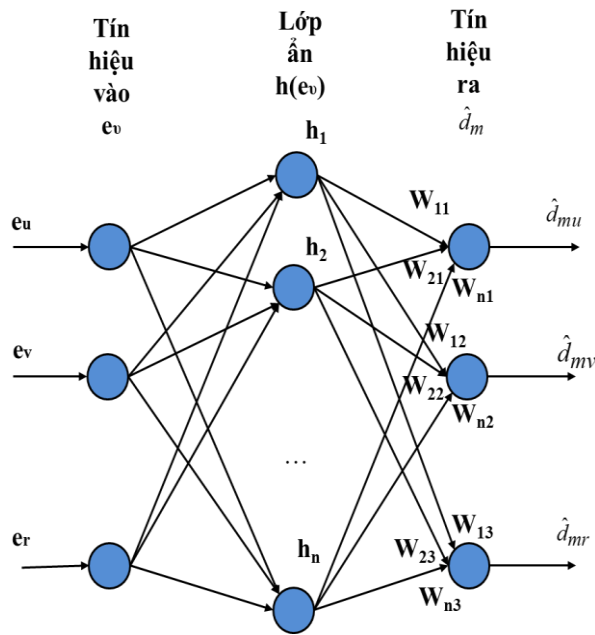
Trong đó, thành phần véc-tơ bất định tổng hợp F :

$$F = d_a + (1-H)d_m + d_e \quad (3.47)$$

Giả thiết 3.1: Thành phần véc-tơ bất định tổng hợp F bao gồm nhiều ngoại cảnh tác động bất định, thành phần bất định gây ra bởi lỗi của cơ cấu chấp hành và hệ số lỗi một phần của cơ cấu chấp hành $(1-H)$ bị chặn và thỏa mãn:

$$\begin{cases} \|F\| < F_b \\ \|1 - H\| < H_b < 1 \end{cases} \quad (3.48)$$

Trong công thức (3.45), do $\mathbf{d}_m = [d_{mu} \ d_{mv} \ d_{mr}]^T$ là véc-tơ bất định do tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng để thay thế véc-tơ \mathbf{d}_m bằng hàm xấp xỉ $\hat{\mathbf{d}}_m$



Hình 3.4. Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF sử dụng trong bộ điều khiển được đề xuất

Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF được sử dụng trong bộ điều khiển gồm 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r); 1 lớp ẩn gồm n nút; 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{d}_{mu}, \hat{d}_{mv}, \hat{d}_{mr}$) được vào tín hiệu điều khiển (hình 3.4). Mạng nơ-ron được huấn luyện online trong quá trình điều khiển từ 3 tín hiệu vào là 3 sai số tốc độ (e_u, e_v, e_r) để đưa ra 3 tín hiệu ra là 3 tín hiệu xấp xỉ ($\hat{d}_{mu}, \hat{d}_{mv}, \hat{d}_{mr}$).

Từ công thức (2.30), véc-tơ bất định do tham số của mô hình toán chuyển động của tàu bất định $\mathbf{d}_m = [d_{mu} \ d_{mv} \ d_{mr}]^T$ có thể được viết như sau:

$$\mathbf{d}_m = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) + \varepsilon \quad (3.49)$$

Trong đó: \mathbf{e}_v và \mathbf{d}_m là tín hiệu vào và tín hiệu ra của mạng nơ-ron RBF, \mathbf{W}^* là véc-tơ ma trận trọng số cần xác định của các nút ẩn. ε là sai số xấp xỉ giới hạn của mạng nơ-ron với $|\varepsilon| \leq \varepsilon_N$ (ε_N là hằng số không biết). $\mathbf{h}(\mathbf{e}_v) = [h_1(\mathbf{e}_v), \dots, h_n(\mathbf{e}_v)]$ với n là số nút ẩn ($n > 1$) là hàm Gauss như sau:

$$h_i(\mathbf{e}_v) = \exp\left[-\frac{\|\mathbf{e}_v - \mathbf{c}_i\|^2}{2\mathbf{b}_i^2}\right], i = 1, 2, \dots, n \quad (3.50)$$

Trong đó: $\|\cdot\|$ thể hiện hàm Euclidean, $\mathbf{c}_i = [c_1, \dots, c_n]^T$ là trọng tâm của hàm hướng tâm, \mathbf{b}_i là độ rộng của hàm Gaussian.

Khi đó, hàm xấp xỉ $\hat{\mathbf{d}}_m$ được xác định như sau:

$$\hat{\mathbf{d}}_m = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{e}_v) \quad (3.51)$$

Trong đó: $\hat{\mathbf{W}}^T$ là véc-tơ ma trận trọng số của mạng RBF NN.

Để đảm bảo các thành phần vận tốc của tàu tiến tới mặt trượt trong thời gian hữu hạn, ta thiết kế tín hiệu điều khiển theo lý thuyết đã được trình bày trong phần 2.2 như sau:

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{sw1} + \mathbf{u}_{sw2} \quad (3.52)$$

Trong đó:

- \mathbf{u}_n là thành phần tín hiệu điều khiển tương đương giữ tốc độ trên mặt trượt với $\mathbf{A} = \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_d$:

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} + \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_d - \hat{\mathbf{d}}_m = \mathbf{A} - \hat{\mathbf{d}}_m \quad (3.53)$$

- \mathbf{u}_{sw1} và \mathbf{u}_{sw2} là hai thành phần tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh đưa tốc độ về mặt trượt:

$$\mathbf{u}_{sw1} = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (3.54)$$

$$\mathbf{u}_{sw2} = -\lambda |A| \operatorname{sgn}(s) \quad (3.55)$$

Với tham số khuếch đại $k > 0$ và $\lambda \geq 0$.

Thành phần tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh u_{sw1} được sử dụng để giải quyết tác động của véc-tơ bất định tổng hợp F và u_{sw2} được sử dụng để chống lại ảnh hưởng khi có lỗi một phần của cơ cấu chấp hành.

Từ công thức (3.52), (3.53), (3.54) và (3.55), tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

$$u_c = A - \hat{d}_m - k \operatorname{sgn}(s) - \lambda |A| \operatorname{sgn}(s) \quad (3.56)$$

Luật thích nghi được thiết kế như sau:

$$\dot{W} = \frac{1}{\gamma} s^T h(e_v) \quad (3.57)$$

$$\dot{k} = a_k |s| \quad (3.58)$$

$$\dot{\lambda} = a_\lambda |A| |s| \quad (3.59)$$

Trong đó: γ là một hằng số dương, a_k và a_λ là các tốc độ thích nghi.

Để giảm hiện tượng chattering, thay thế hàm không liên tục $\operatorname{sgn}()$ bằng hàm liên tục tron gần đúng $\tanh()$, khi đó công thức (3.56) được viết lại như sau :

$$u_c = A - \hat{d}_m - \tanh(ks) - |A| \tanh(\lambda s) \quad (3.60)$$

3.3.3 Phân tích ổn định của hệ thống khi chưa có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Thay công thức tín hiệu điều khiển (3.56) vào công thức đạo hàm mặt trượt (3.46):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= M^{-1} \left(-A + H \left(A - \hat{d}_m - k \operatorname{sgn}(s) - \lambda |A| \operatorname{sgn}(s) + d_m \right) + F \right) \quad (3.61) \\ &= M^{-1} \left((H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sgn}(s) + F - Hk \operatorname{sgn}(s) + H(d_m - \hat{d}_m) \right) \\ &= M^{-1} \left((H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sgn}(s) + F - Hk \operatorname{sgn}(s) + H\tilde{d}_m \right) \end{aligned}$$

Trong đó:

$$\tilde{d}_m = d_m - \hat{d}_m = \left(W^{*T} h(e_v) + \varepsilon \right) - \hat{W}^T h(e_v) = \tilde{W}^T h(e_v) + \varepsilon \quad (3.62)$$

$$\tilde{W}^T = \hat{W}^T - W^{*T} \quad (3.63)$$

Đặt các giá trị giới hạn như sau:

$$\begin{cases} k_b = F_b / (1 - H_b) \\ \lambda_b = H_b / (1 - H_b) \end{cases} \quad (3.64)$$

Sai số của các tham số khuếch đại xác định như sau:

$$\begin{cases} \tilde{k} = k_b - k \\ \tilde{\lambda} = \lambda_b - \lambda \end{cases} \quad (3.65)$$

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$L_3 = \frac{1}{2} s^T s + \frac{H}{2} M^{-1} \gamma \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{(1 - H_b)}{2a_k} M^{-1} \tilde{k}^T \tilde{k} + \frac{(1 - H_b)}{2a_\lambda} M^{-1} \tilde{\lambda}^T \tilde{\lambda} \quad (3.66)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov L_3 và từ công thức (3.56), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}_3 &= s^T \dot{s} - HM^{-1} \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} - \frac{(1 - H_b)}{a_k} M^{-1} \tilde{k}^T \dot{\tilde{k}} - \frac{(1 - H_b)}{a_\lambda} M^{-1} \tilde{\lambda}^T \dot{\tilde{\lambda}} \quad (3.67) \\ &= s^T M^{-1} \left((H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sgn}(s) + F - Hk \operatorname{sgn}(s) + H \left(\tilde{W}^T h(e_v) + \varepsilon \right) \right) \\ &\quad - HM^{-1} \gamma \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} - \frac{(1 - H_b)}{a_k} M^{-1} \tilde{k}^T \dot{\tilde{k}} - \frac{(1 - H_b)}{a_\lambda} M^{-1} \tilde{\lambda}^T \dot{\tilde{\lambda}} \end{aligned}$$

Với luật điều khiển thích nghi được thiết kế như công thức (3.57), (3.58) và (3.59), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{L}_3 &= s^T M^{-1} \left((H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sgn}(s) + F - \operatorname{sgn}(s) + H \left(\tilde{W}^T h(e_v) + \varepsilon \right) \right) \quad (3.68) \\ &\quad - HM^{-1} \tilde{W}^T s^T h(e_v) - (1 - H_b) M^{-1} (k_b - k) |s| - (1 - H_b) M^{-1} (\lambda_b - \lambda) |A| |s| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= s^T HM^{-1}\varepsilon + s^T M^{-1}((H-1)A - H\lambda|A|\operatorname{sgn}(s) + F - Hk\operatorname{sgn}(s)) \\
&\quad - (1-H_b)M^{-1}\left(\frac{F_b}{1-H_b} - k\right)|s| - (1-H_b)M^{-1}\left(\frac{H_b}{1-H_b} - \lambda\right)|A||s| \\
&= s^T HM^{-1}\varepsilon + M^{-1}((H-1)As - H_b|A||s|) + M^{-1}\lambda(-H|A||s| + (1-H_b)|A||s|) \\
&\quad + M^{-1}(Fs - F_b|s|) + M^{-1}(-Hk|s| + (1-H_b)|s|)
\end{aligned}$$

Với *Giả thuyết 3.1*, ta có các đẳng thức sau:

$$(H-1)M^{-1}As < H_bM^{-1}|A||s| \quad (3.69)$$

$$(1-H_b)M^{-1}\lambda|A||s| < HM^{-1}\lambda|A||s|$$

$$M^{-1}Fs < M^{-1}F_b|s|$$

$$(1-H_b)M^{-1}k|s| < HM^{-1}k|s|$$

Do đó từ (3.68) và (3.69), $\dot{L}_3 \leq 0$ khi sai số xấp xỉ ε đủ nhỏ. Hệ thống được điều khiển bởi bộ điều khiển được đề xuất ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

3.3.4 Thiết kế tín hiệu điều khiển bão hòa khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Ta giả sử tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành được giới hạn như sau:

$$u_{cl} \leq u_c \leq u_{cu} \quad (3.70)$$

Trong đó: u_{cl} và u_{cu} là chặn dưới và chặn trên của tín hiệu điều khiển u_c

Trong một số thời điểm trong quá trình điều khiển, tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển đến cơ cấu chấp hành có thể vượt quá giới hạn hoạt động của cơ cấu chấp hành gây ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình cập cầu. Ngoài ra do luật thích nghi (3.58) và (3.59), hệ số khuếch đại trong tín hiệu điều khiển hiệu chỉnh sẽ luôn tăng dần tới trường hợp tín hiệu điều khiển vượt quá giới hạn khi xảy ra lỗi một phần lớn của cơ cấu chấp hành. Về cơ bản, khi lực và mô-men

sinh ra do cơ cấu chấp hành bị mất mát lớn, bộ điều khiển cần tăng tín hiệu điều khiển để bù lại phần mất mát và dẫn tới tín hiệu điều khiển u_c nằm ngoài khoảng giới hạn cho phép $[u_{cl} u_{cu}]$. Do đó, để giải quyết vấn đề này, một tín hiệu điều khiển bão hòa được đưa vào trong tín hiệu điều khiển. Khi đó, tín hiệu điều khiển được điều chỉnh lại khi qua bộ điều khiển bão hòa như sau:

$$u_{cs} = sat(u_c - a_s s) = \begin{cases} u_c - a_s s & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ u_{cu} & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \\ u_{cl} & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases} \quad (3.71)$$

Trong đó: $a_s \geq 0$ là hệ số điều khiển khuếch đại bão hòa.

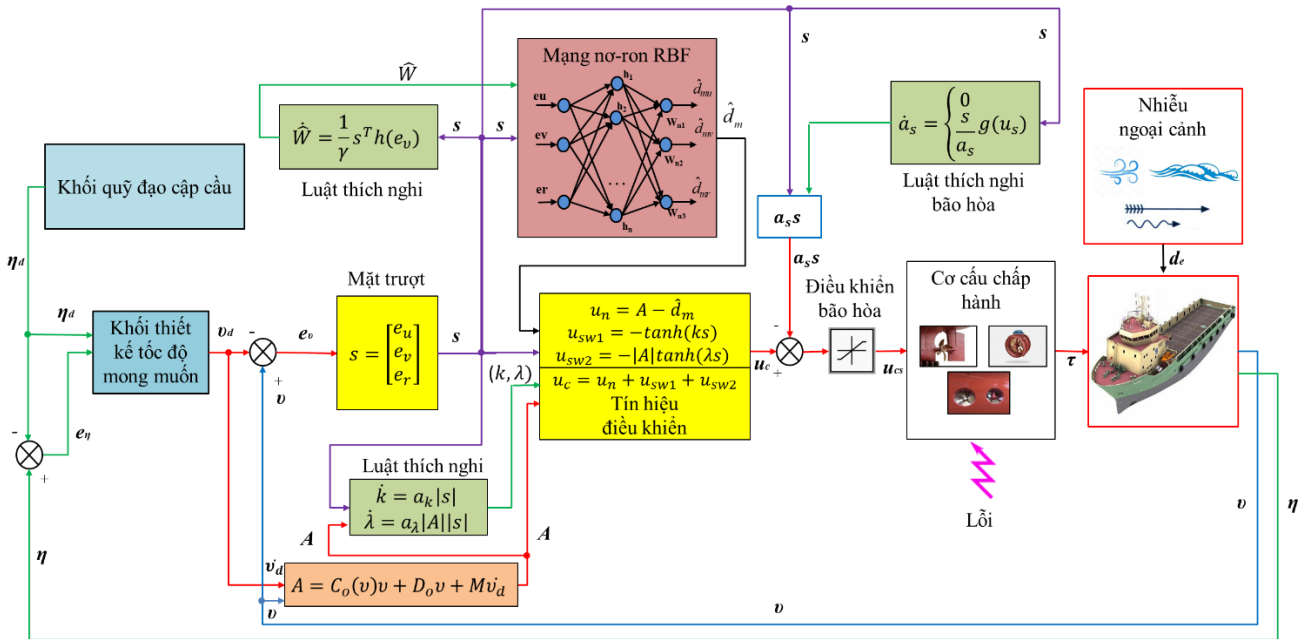
Luật điều khiển thích nghi cho tín hiệu điều khiển bão hòa được thiết kế như sau:

$$\dot{a}_s = \begin{cases} 0 & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ \frac{s}{a_s} g(u_s) & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \text{ hoặc } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases} \quad (3.72)$$

Trong đó:

$$g(u_s) = \begin{cases} (u_c - u_{cu}) & \text{khi } u_c > u_{cu} \text{ và } s < 0 \\ (u_c - u_{cl}) & \text{khi } u_c < u_{cl} \text{ và } s > 0 \\ 0 & \text{trong các điều kiện còn lại} \end{cases} \quad (3.73)$$

Khi $(u_c - a_s s)$ nằm trong giới hạn cho phép $[u_{cl} u_{cu}]$, hệ số khuếch đại bão hòa a_s không đổi. Nếu $(u_c - a_s s)$ vượt quá giới hạn cho phép $[u_{cl} u_{cu}]$, tín hiệu điều khiển bão hòa sẽ được kích hoạt và đưa giá trị $(u_c - a_s s)$ về giới hạn cho phép.



Hình 3.5. Sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Hình 3.5 là sơ đồ mô tả thuật toán của bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Sai số bám vị trí và hướng tàu e_η được xác định từ vị trí tàu, hướng mũi tàu $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ và vị trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$ từ quỹ đạo cập cầu dự kiến. Tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ xoay mũi mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) từ sai số bám vị trí và hướng tàu e_η và vị trí tàu, hướng mũi tàu dự kiến $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$. Mặt trượt s là mặt trượt sai số tốc độ e_v được xác định từ tốc độ mong muốn $v_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ được thiết kế theo công thức (3.6) và tốc độ tàu $v = [u \ v \ r]^T$. Tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành từ bộ điều khiển u_c được xác định theo công thức (3.60). Trong tín hiệu điều khiển, hàm xấp xỉ \hat{d}_m là tín hiệu ra của mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF với tín hiệu vào là sai số tốc độ e_v với các trọng số của mạng được cập nhật theo luật điều khiển thích nghi (3.57). Tín hiệu điều khiển u_c được đưa qua bộ giới hạn tín hiệu

điều khiển bảo hòa. Khi đó, tín hiệu điều khiển được điều chỉnh lại khi qua bộ điều khiển bảo hòa u_{cs} theo công thức (3.71). Từ tín hiệu điều khiển bảo hòa u_{cs} , các cơ cấu chấp hành tạo ra lực và mô-men điều khiển τ điều khiển tàu dưới tác động của tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định.

3.3.5 Phân tích ổn định của hệ thống khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành

Thay công thức tín hiệu điều khiển được điều chỉnh qua bộ điều khiển bảo hòa (3.70) vào công thức đạo hàm mặt trượt (3.45):

$$\dot{s} = M^{-1}(-A + Hsat(u_c - a_s s) + F) \quad (3.74)$$

$$= \begin{cases} M^{-1}(-A + H(u_c - a_s s) + F) & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ M^{-1}(-A + H u_{cu} + F) & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \\ M^{-1}(-A + H u_{cl} + F) & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases}$$

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$L_4 = \frac{1}{2} s^T s + \frac{H}{2} M^{-1} \gamma \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{(1 - H_b)}{2a_k} M^{-1} \tilde{k}^T \tilde{k} + \frac{(1 - H_b)}{2a_\lambda} M^{-1} \tilde{\lambda}^T \tilde{\lambda} + \frac{1}{2} M^{-1} (a_s)^2 \quad (3.75)$$

Như đã chứng minh trong phần 3.3.3 cho tính ổn định của hệ thống khi chưa có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, ta chỉ cần xét đạo hàm của hàm Lyapunov L_s như sau:

$$\dot{L}_s = \begin{cases} -M^{-1}(a_s s^2) + M^{-1} a_s \dot{a}_s & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ M^{-1}(u_{cu} - u_c) s + M^{-1} a_s \dot{a}_s & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \\ M^{-1}(u_{cl} - u_c) s + M^{-1} a_s \dot{a}_s & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases} \quad (3.76)$$

$$= \begin{cases} -HM^{-1}(a_s s^2) & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cu} - u_c)s + M^{-1}sg(u_s) & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cl} - u_c)s + M^{-1}sg(u_s) & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases}$$

Xét khi $s \geq 0$ với luật điều khiển thích nghi (3.72) và (3.73), ta có:

$$\dot{L}_s = \begin{cases} -HM^{-1}(a_s s^2) & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cu} - u_c)s & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cl} - u_c)s + M^{-1}(u_c - u_{cl})s & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \text{ và } u_c < u_{cl} \end{cases} \quad (3.77)$$

Với điều kiện hệ số $0 < H < 1$, ta có $\dot{L}_s < 0$ với $s \geq 0$.

Xét khi $s < 0$ với luật điều khiển thích nghi (3.72) và (3.73), ta có:

$$\dot{L}_s = \begin{cases} -HM^{-1}(a_s s^2) & \text{khi } u_{cl} \leq (u_c - a_s s) \leq u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cu} - u_c)s + M^{-1}(u_c - u_{cu})s & \text{khi } (u_c - a_s s) > u_{cu} \text{ và } u_c > u_{cu} \\ HM^{-1}(u_{cl} - u_c)s & \text{khi } (u_c - a_s s) < u_{cl} \end{cases} \quad (3.78)$$

Với điều kiện hệ số $0 < H < 1$, ta có $\dot{L}_s < 0$ với $s < 0$.

Như vậy, $\dot{L}_s < 0$ cả khi $s \geq 0$ và $s < 0$ hay hệ thống khi có bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành vẫn đảm bảo ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

3.4 Kết luận chương 3

Trong chương 3, luận án đã giải quyết được các vấn đề sau:

- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Xây dựng thuật toán thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

Các bộ tự động điều khiển tàu cập cầu được đề xuất trong chương 3 có các đóng góp sau:

- Các bộ điều khiển được đề xuất sử dụng mặt trượt tốc độ chưa được sử dụng trong các nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu trước đây;

- Cấu trúc điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để xấp xỉ các yếu tố bất định trong mô hình toán chuyển động của tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động;

- Bộ điều khiển giải quyết đồng thời vấn đề cơ cấu chấp hành bị lỗi và vấn đề giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành chưa được đề cập trong các nghiên cứu tự động điều khiển tàu cập cầu trước đây.

Trong chương 4, luận án sử dụng mô phỏng Matlab để kiểm chứng khả năng điều khiển của các bộ điều khiển được đề xuất.

CHƯƠNG 4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ CÁC BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC ĐỀ XUẤT

4.1 Mô hình tàu được sử dụng cho mô phỏng

Bảng 4.1. Thông số động học của mô hình tàu “Cyber ship II”

Thông số	Giá trị
Khối lượng tàu m	23.8kg
Chiều dài tàu L	1.235m
Chiều rộng tàu B	0.29m
Hệ số ma trận quán tính m_{11}	25.8kg
Hệ số ma trận quán tính m_{22}	33.8kg
Hệ số ma trận quán tính m_{33}	2.76kgm ²
Hệ số ma trận giảm chấn động lực học d_{11}	0.722kg/s
Hệ số ma trận giảm chấn động lực học d_{22}	0.890kg/s
Hệ số ma trận giảm chấn động lực học d_{33}	1.9kgm ² /s

Nhằm đánh giá khả năng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả sử dụng mô hình tàu “Cyber ship II”, là bản sao tỉ lệ 1:70 của một tàu dịch vụ được phát triển bởi viện Marine Cybernetics. Đây là tàu đủ cơ cấu chấp hành với 2 chân vịt và 2 bánh lái, và 1 chân vịt mũi. Thông số động học của mô hình tàu “Cyber ship II” được tham khảo trong tài liệu [52].

4.2 Điều kiện mô phỏng

4.2.1 Các tình huống mô phỏng

Để đánh giá khả năng điều khiển của các bộ điều khiển tự động tàu cập cầu được thiết kế trong chương 3, luận án thực hiện mô phỏng quá trình cập cầu theo các phương án cập cầu khác nhau như sau:

- Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1);
- Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu

(Plan 2);

- Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3).

a) *Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)*

Vị trí ban đầu của tàu như sau: $x(0) = 0 L$, $y(0) = 0 L$, $\psi(0) = 30^\circ$, $u(0) = 0.25 m/s$, $v(0) = 0 m/s$, $r(0) = 0 \text{ }^\circ/s$ (vận tốc $u(0) = 0.25 m/s$ tương ứng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1);

Tọa độ và hướng mũi tàu tại vị trí cập cầu: $x(b) = 40 L$, $y(b) = 10 L$, $\psi(b) = 0^\circ$;

Điều kiện dòng chảy: Dòng chảy tác động theo hướng dọc theo cầu tàu và ngược hướng tiếp cận cầu tàu. Tốc độ dòng chảy $V_c = 0.75 m/s$ và hướng dòng chảy $\gamma_c = 180^\circ$;

Điều kiện gió: Gió tác động theo hướng dọc với cầu tàu $\beta_w = 180^\circ$. Vận tốc trung bình của gió $V_w = 7 m/s$ tương ứng cấp gió Beaufort 4 (mô hình gió tác động lên tàu theo Phụ lục 2);

Điều kiện sóng: Sóng tác động theo hướng dọc với cầu tàu $\psi_w = 180^\circ$. Chu kỳ sóng $T_o = 10s$, độ cao sóng $H_s = 1.5m$ tương ứng tình trạng biển *moderate* (mô hình sóng tác động lên tàu theo Phụ lục 2).

b) *Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)*

Vị trí ban đầu của tàu như sau: $x(0) = 0 L$, $y(0) = 0 L$, $\psi(0) = 30^\circ$, $u(0) = 0.25 m/s$, $v(0) = 0 m/s$, $r(0) = 0 \text{ }^\circ/s$ (vận tốc $u(0) = 0.25 m/s$ tương ứng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1);

Tọa độ và hướng mũi tàu tại vị trí cập cầu: $x(b) = 40 L$, $y(b) = 10 L$, $\psi(b) = 0^\circ$. Tọa độ và hướng mũi tàu tại vị trí trung gian: $x(i) = 38 L$, $y(i) = 18 L$, $\psi(i) = 15^\circ$;

Điều kiện dòng chảy: Dòng chảy tác động theo hướng dọc theo cầu tàu và

ngược hướng tiếp cận cầu tàu. Tốc độ dòng chảy $V_c = 0.75 \text{ m/s}$ và hướng dòng chảy $\gamma_c = 180^\circ$;

Điều kiện gió: Gió tác động theo hướng vuông góc với cầu tàu từ ngoài vào trong $\beta_w = 90^\circ$. Vận tốc trung bình của gió $V_w = 7 \text{ m/s}$ tương ứng cấp gió Beaufort 4 (mô hình gió tác động lên tàu theo Phụ lục 2);

Điều kiện sóng: Sóng tác động theo hướng vuông góc với cầu tàu từ ngoài vào trong $\psi_w = 90^\circ$. Chu kỳ sóng $T_o = 10\text{s}$, độ cao sóng $H_s = 1.5\text{m}$ tương ứng tình trạng biển *moderate* (mô hình sóng tác động lên tàu theo Phụ lục 2).

c) *Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)*

Vị trí ban đầu của tàu như sau: $x(0) = 0 \text{ L}$, $y(0) = 0 \text{ L}$, $\psi(0) = 30^\circ$, $u(0) = 0.25 \text{ m/s}$, $v(0) = 0 \text{ m/s}$, $r(0) = 0 \text{ }^\circ/\text{s}$ (vận tốc $u(0) = 0.25 \text{ m/s}$ tương ứng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1);

Tọa độ và hướng mũi tàu tại vị trí cập cầu: $x(b) = 38 \text{ L}$, $y(b) = 20 \text{ L}$, $\psi(b) = 180^\circ$. Tọa độ và hướng mũi tàu tại vị trí trung gian: $x(i) = 40 \text{ L}$, $y(i) = 15 \text{ L}$, $\psi(i) = 90^\circ$.

Điều kiện dòng chảy: Dòng chảy tác động theo hướng dọc theo cầu tàu và cùng hướng tiếp cận cầu tàu. Tốc độ dòng chảy $V_c = 0.75 \text{ m/s}$ và hướng dòng chảy $\gamma_c = 0^\circ$;

Điều kiện gió: Gió tác động theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu $\beta_w = 45^\circ$. Vận tốc trung bình của gió $V_w = 7 \text{ m/s}$ tương ứng cấp gió Beaufort 4 (mô hình gió tác động lên tàu theo Phụ lục 2);

Điều kiện sóng: Sóng tác động theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu $\psi_w = 45^\circ$. T_o là chu kỳ sóng $T_o = 10\text{s}$, độ cao sóng $H_s = 1.5\text{m}$ tương ứng tình trạng biển *moderate* (mô hình sóng tác động lên tàu theo Phụ lục 2).

4.2.2 Các thành phần bất định và nhiễu ngoại cảnh

Trong điều kiện tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động, bộ điều khiển trượt tự động tàu cập cầu (SMC) đề xuất trong phần 3.1

được đánh giá dưới tác động của nhiễu ngoại cảnh d_e (theo mô hình tác động của sóng, gió, dòng chảy lên chuyển động của tàu trong Phụ lục 2).

Trong điều kiện tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định, bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANNSMC) đề xuất trong phần 3.2 và bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi (ANNFTSMC) đề xuất trong phần 3.3 được đánh giá dưới tác động của nhiễu ngoại cảnh d_e và các thành phần bất định bao gồm: thành phần bất định trong tham số của mô hình chuyển động của tàu d_m và thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian d_u như sau:

$$d_m = \begin{bmatrix} -0.2 - 2.5 * u * u - 3.7 * \sin(u * v) - 1.2 * \cos(u * r) \\ 0.4 + 2.6 * u * u + 2.7 * \cos(v) \\ -0.1 - 0.3 * r * r * r \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$d_u = \begin{bmatrix} -0.1 + 0.01 * \cos(0.8t) \\ -0.2 + 0.01 * \sin(0.8t) \\ 0.01 * \cos(0.8t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

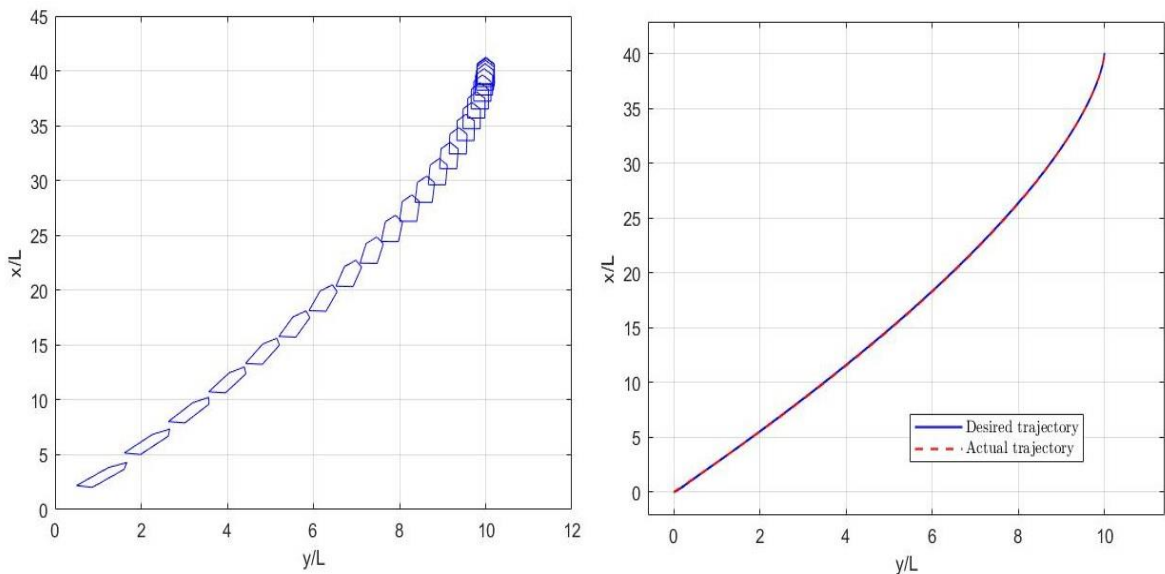
4.3 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động

Các hệ số của bộ điều khiển được lựa chọn như sau: $k_x = 0.8$, $k_y = 0.8$, $k_\psi = 0.6$. Giá trị ban đầu của các hệ số khuếch đại $k = [1 \ 1 \ 1]$. Các hệ số điều khiển k_x , k_y , k_ψ và k được lựa chọn thông qua quá trình mô phỏng dựa trên lý thuyết lựa chọn hệ số khuếch đại theo luật tiếp cận tốc độ hằng được trình bày trong phần 2.2.

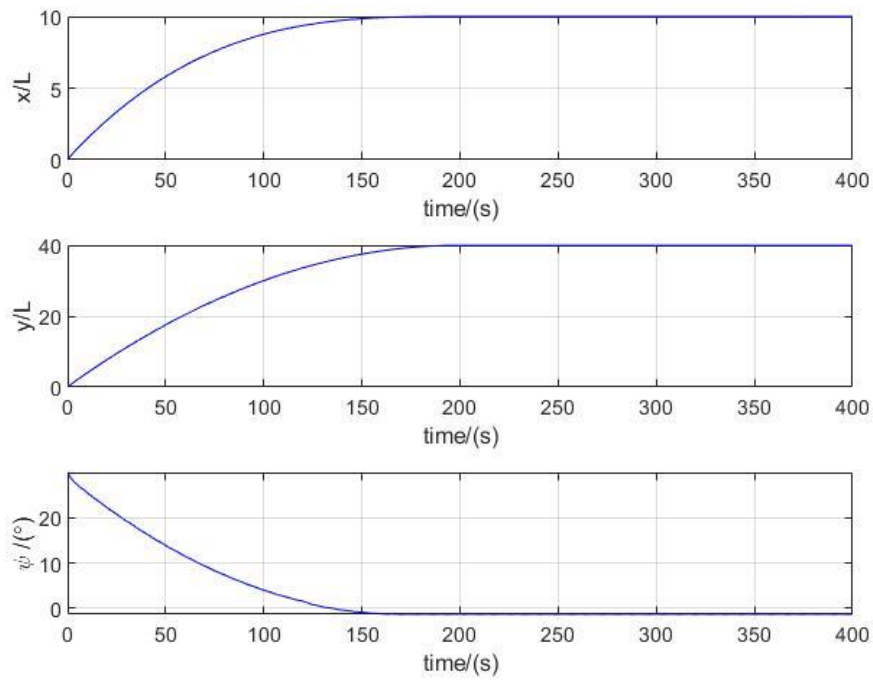
a) Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

Hình 4.1, 4.2 và 4.3 cho thấy bộ điều khiển trượt tự động tàu cập cầu (SMC) đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của nhiễu ngoại cảnh tại thời điểm 250s

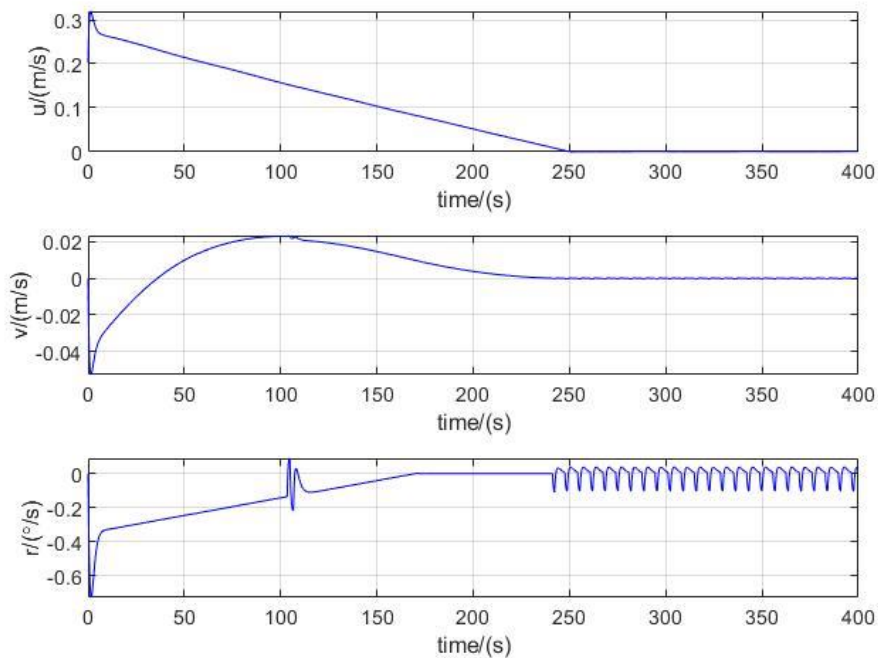
(tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.2, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới và duy trì tại 0 từ 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.3, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.32m/s (tương ứng khoảng 5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc đạt ngang tăng dần lên đến 0.02m/s (tương ứng khoảng 0.3kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 100s (tương ứng khoảng 14 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến $0.65^\circ/\text{s}$ (tương ứng khoảng $4.6^\circ/\text{phút}$ theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 từ thời điểm 170s. Hình 4.4 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .



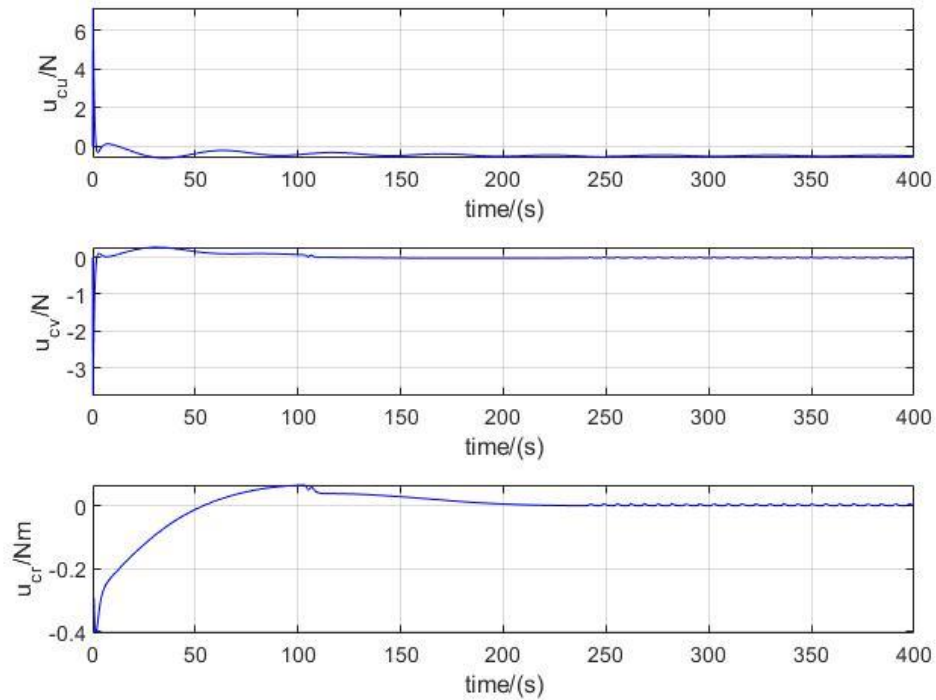
Hình 4.1. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.2. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.3. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

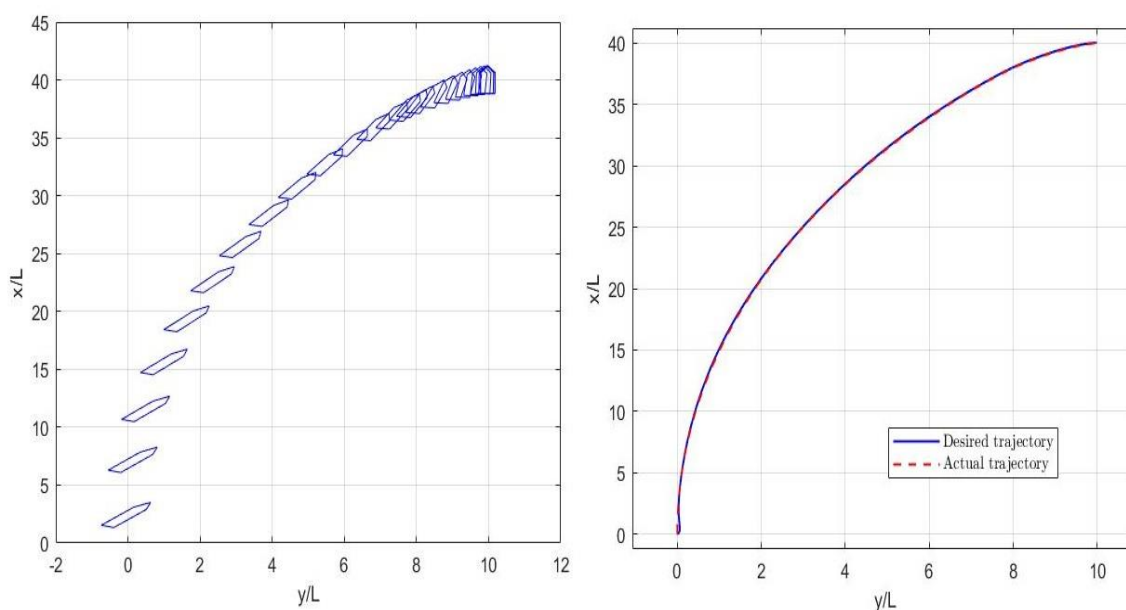


Hình 4.4. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

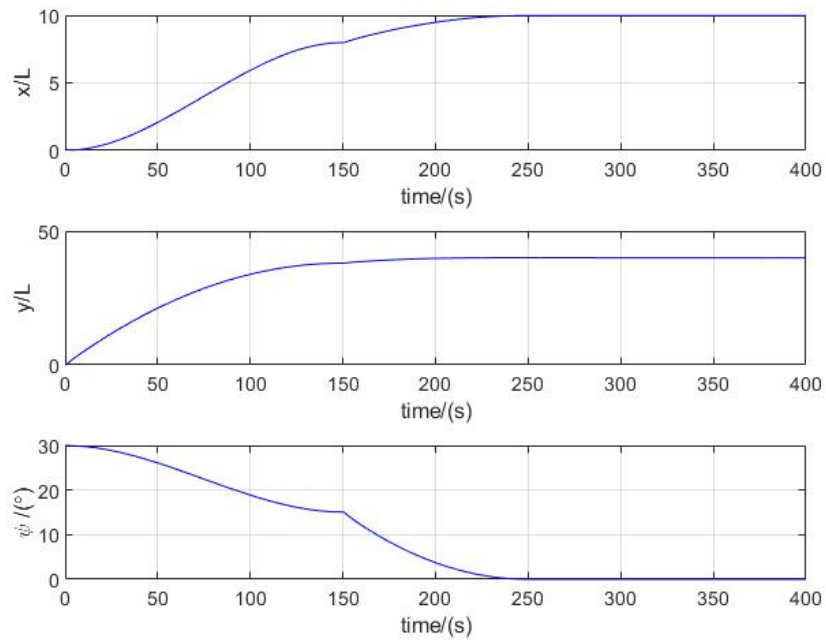
b) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)

Hình 4.5, 4.6 và 4.7 cho thấy bộ điều khiển trượt tự động tàu cập cầu đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian, sau đó tiếp cận cầu tàu với hướng mũi tàu gần song song với hướng cầu tàu hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.5, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 15° tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại 250s. Trên hình 4.6, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1)

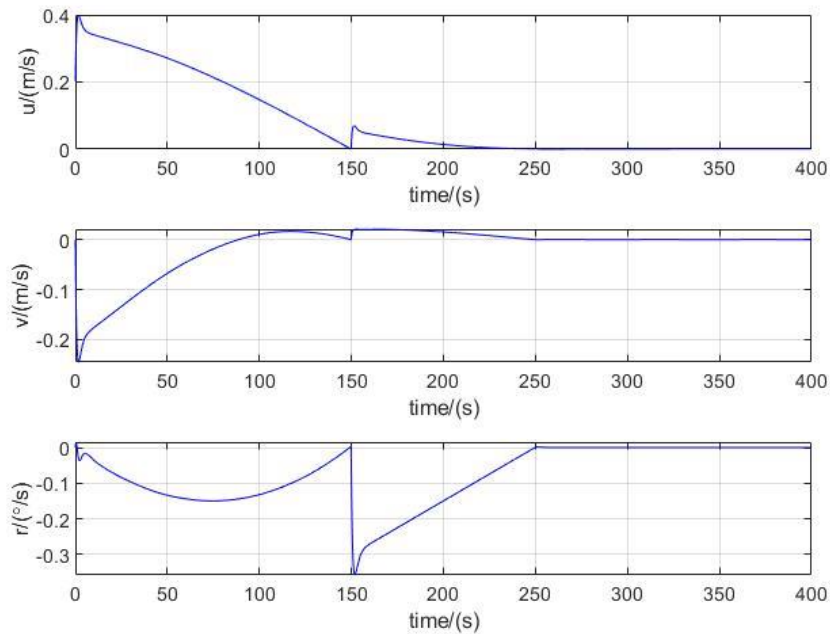
sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.04m/s (tương ứng khoảng 0.6kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Dưới tác động của gió theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu, vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 0.15 °/s (tương ứng khoảng 1 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 50s sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên 0.35 °/s (tương ứng khoảng 2.5 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.8 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .



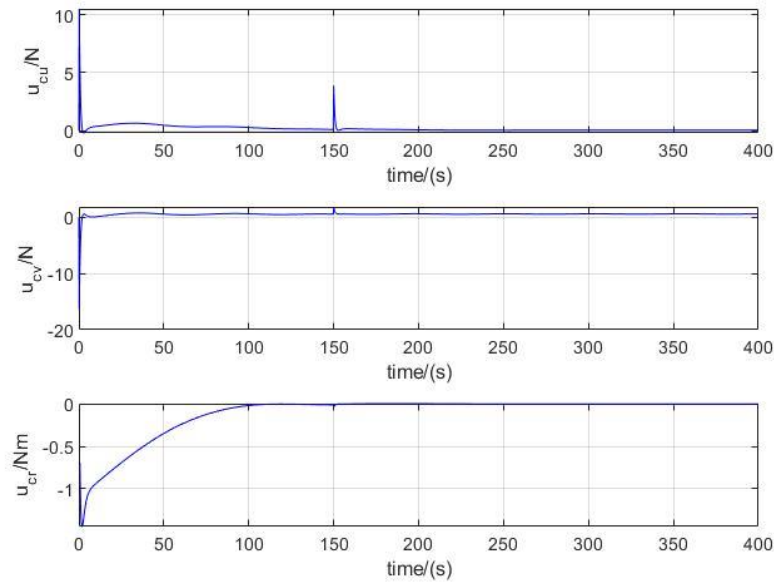
Hình 4.5. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



Hình 4.6. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



Hình 4.7. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)

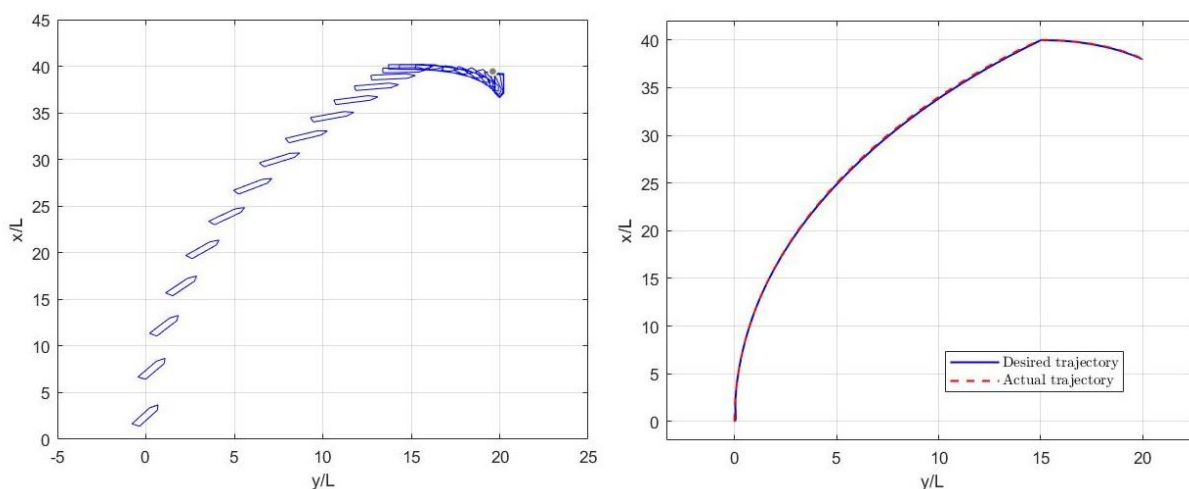


Hình 4.8. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)

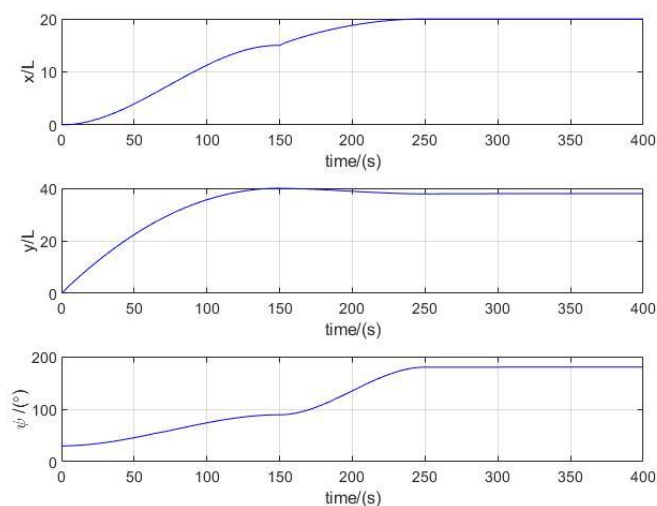
c) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)

Hình 4.9, 4.10 và 4.11 cho thấy bộ điều khiển trượt tự động tàu cập cầu đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian đồng thời quay mũi tàu tới $\psi(i) = 90^\circ$, sau đó đồng thời tiếp cận cầu tàu và quay mũi tàu tới $\psi(b) = 180^\circ$ hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.9, vị trí tàu (x,y) đến vị trí trung gian tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), đến và duy trì vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 180° tại 250s. Trên hình 4.10, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.6m/s (tương ứng khoảng 10kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.1m/s (tương ứng khoảng 1.7kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.35m/s (tương ứng khoảng 5.8kts theo bảng

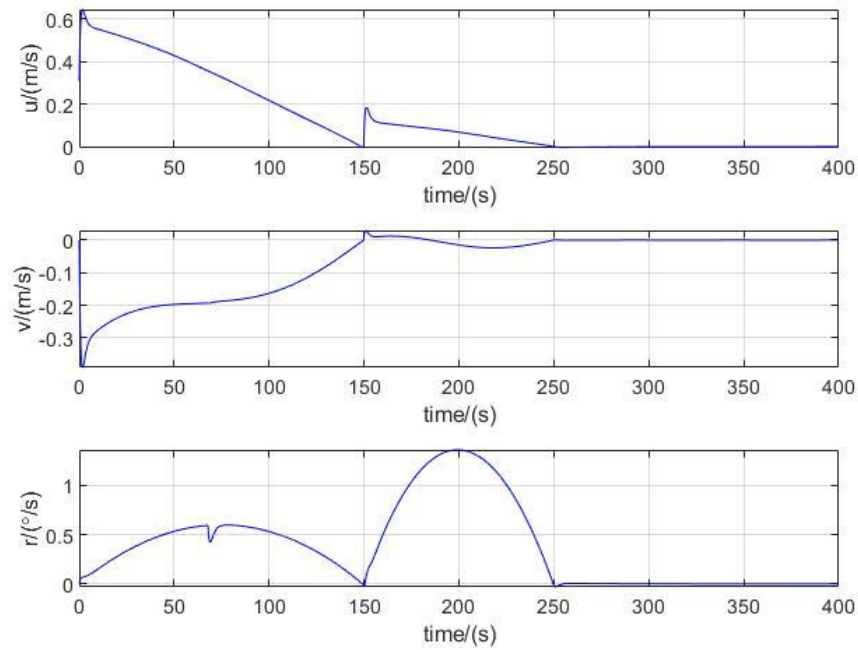
quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 0.5 °/s (tương ứng khoảng 3.5 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 70s sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên 0.9 °/s (tương ứng khoảng 6.5 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.12 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .



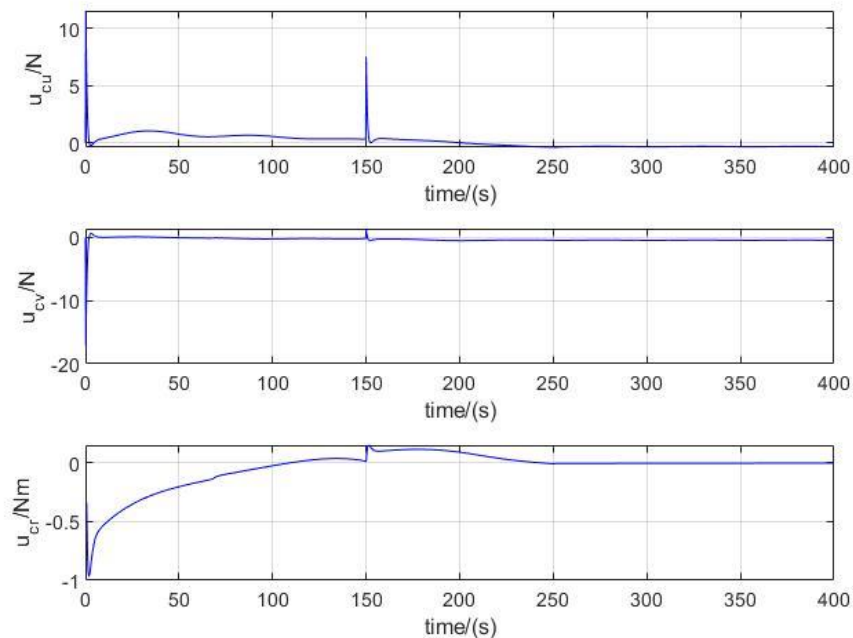
Hình 4.9. Quỹ đạo cập cầu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.10. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.11. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.12. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)

4.4 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định

Các hệ số của bộ điều khiển được lựa chọn như sau: $k_x = 0.8$, $k_y = 0.8$, $k_\psi = 0.6$. Giá trị ban đầu của các hệ số khuếch đại $k = [1 \ 1 \ 1]$. Các hệ số điều khiển k_x , k_y , k_ψ và k được lựa chọn thông qua quá trình mô phỏng dựa trên lý thuyết lựa chọn hệ số khuếch đại theo luật tiếp cận tốc độ hằng được trình bày trong phần 2.2.

Luận án sử dụng mạng nơ-ron RBF với 1125 nút ẩn với trọng tâm của mạng c_i được phân bố đều trên $[-4,4] \times [-4,4] \times [-4,4]$, độ rộng của hàm RBF được chọn bằng nhau cho tất cả các nút với $b_i=0.1$, $i=1, \dots, 1125$. Tín hiệu ra bao gồm 3 tín hiệu F_{tu} , F_{tv} , F_{tr} . Hằng số dương $\gamma=0.015$. Các thông số của mạng nơ-ron được lựa chọn thông qua quá trình mô phỏng và dựa trên các tài liệu [12], [35].

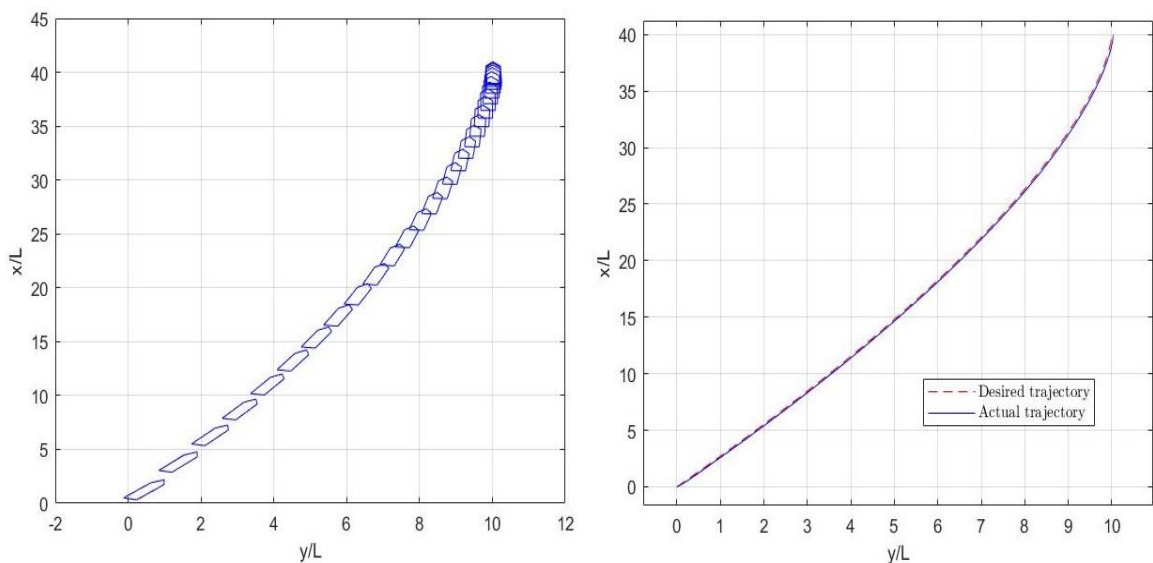
Véc-tơ hàm bất định tổng hợp $\mathbf{F}_t = \mathbf{d}_e + \mathbf{d}_m + \mathbf{d}_u = [F_{tu} \ F_{tv} \ F_{tr}]^T$ bao gồm nhiễu ngoại cảnh tác động \mathbf{d}_e (theo mô hình tác động của sóng, gió, dòng chảy lên chuyển động của tàu trong Phụ lục 2); thành phần bất định trong tham số của mô hình chuyển động của tàu \mathbf{d}_m theo công thức (4.1) và thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian \mathbf{d}_u theo công thức (4.2).

a) Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

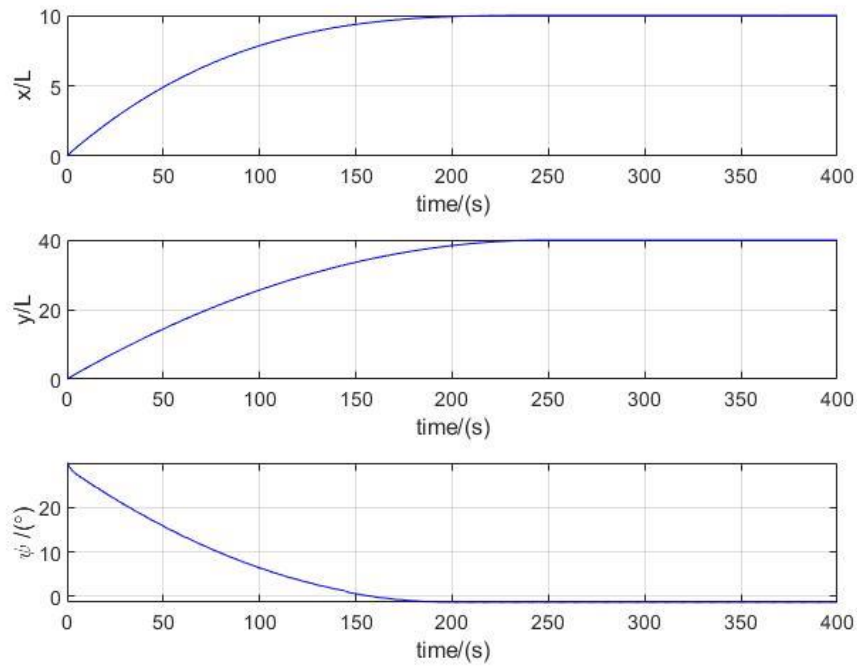
Hình 4.13, 4.14 và 4.15 cho thấy bộ điều khiển ANNSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của véc-tơ bất định tổng hợp tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.14, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới và duy trì tại 0 từ 200s (tương ứng khoảng 28 phút theo

bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.15, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.34m/s (tương ứng khoảng 5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.045m/s (tương ứng khoảng 0.8kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 100s (tương ứng khoảng 14 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1.5 °/s (tương ứng khoảng 10.8 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 200s. Hình 4.16 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

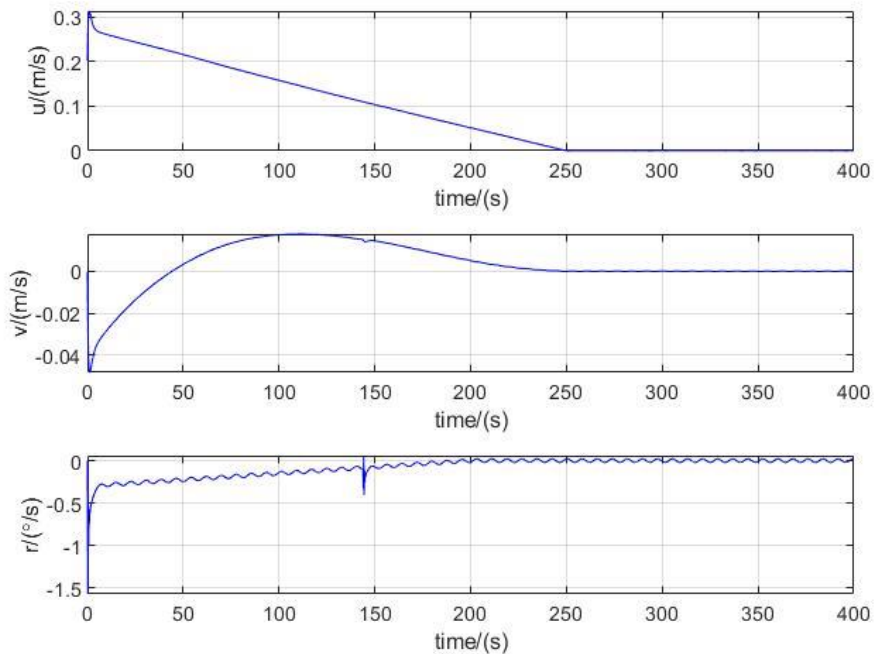
Trên hình 4.17 và 4.18, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t với sai số \tilde{F}_t gần bằng 0 từ thời điểm 120s. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



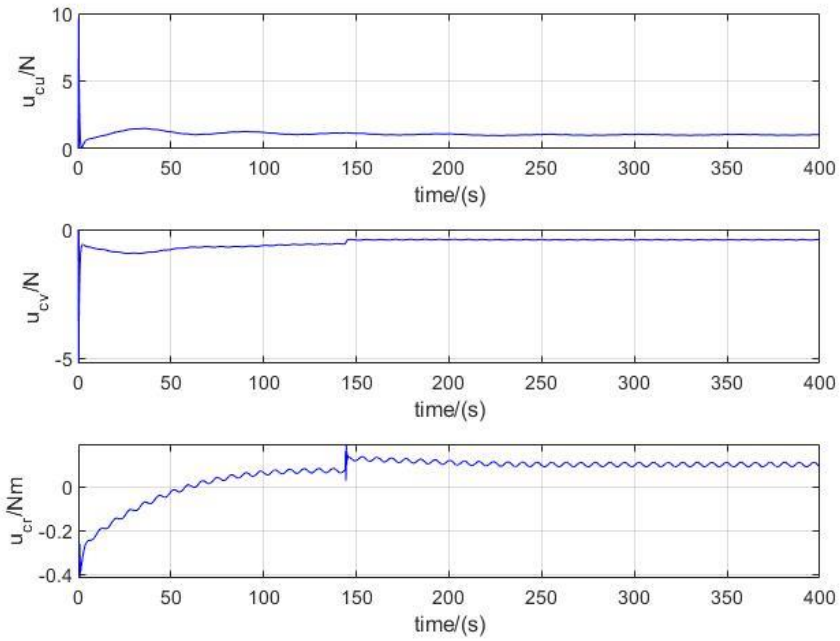
Hình 4.13. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



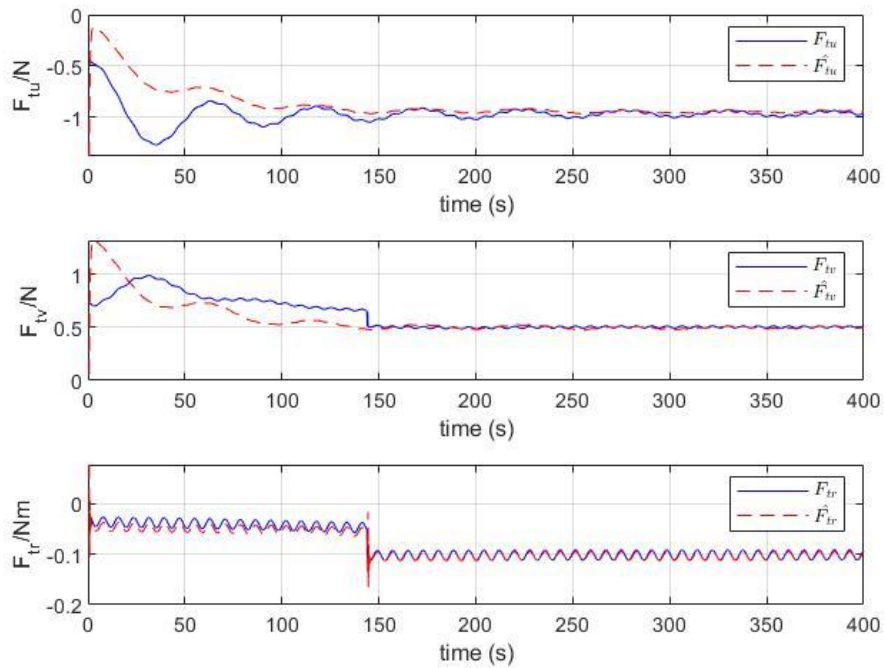
Hình 4.14. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



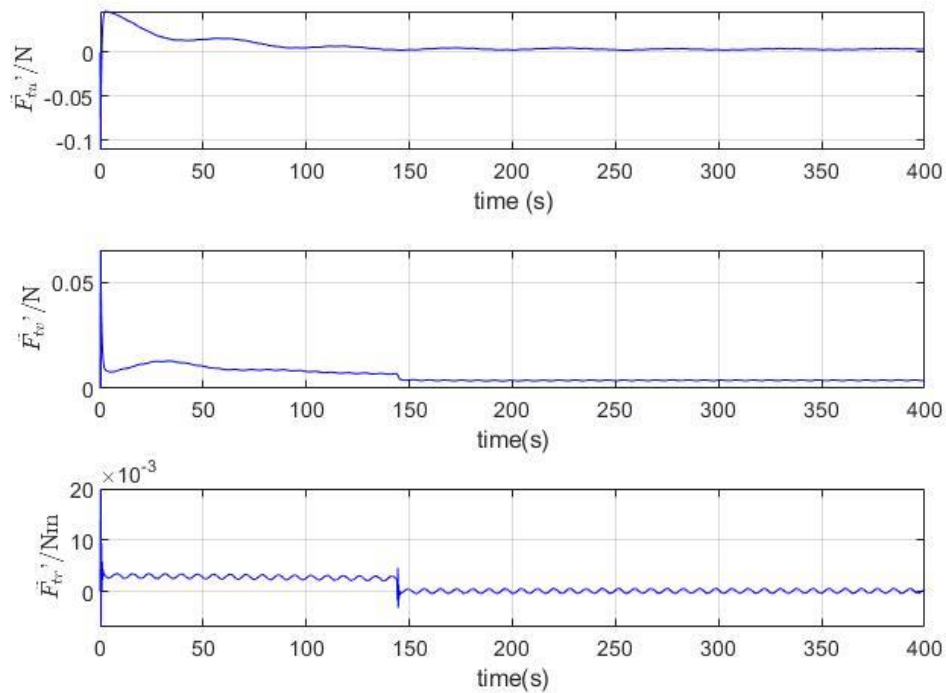
Hình 4.15. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.16. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.17. So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_t



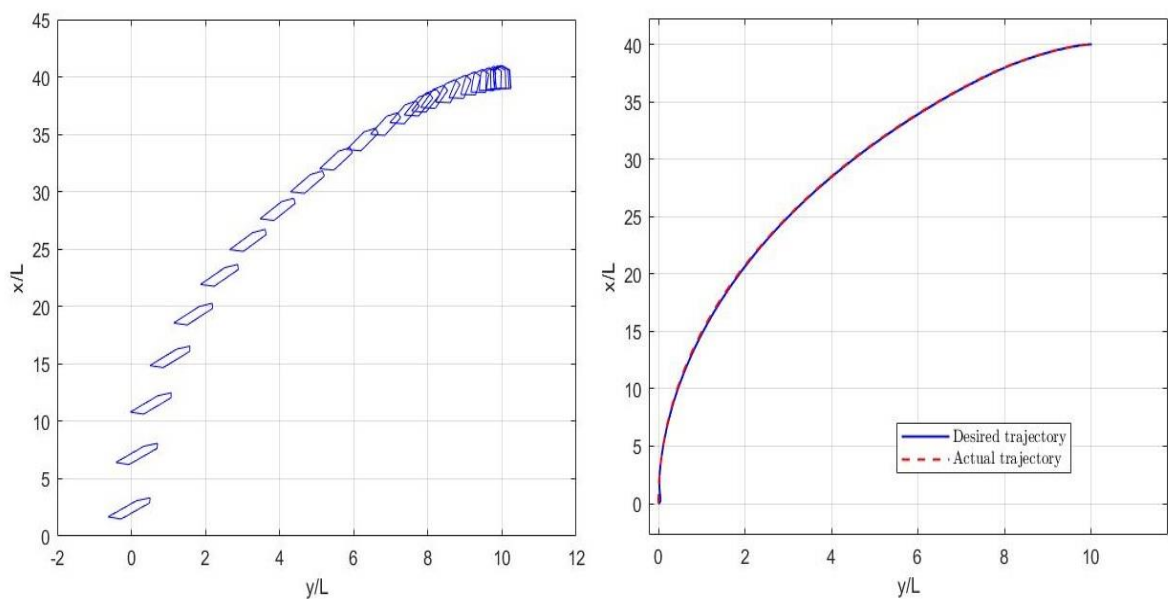
Hình 4.18. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF

b) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)

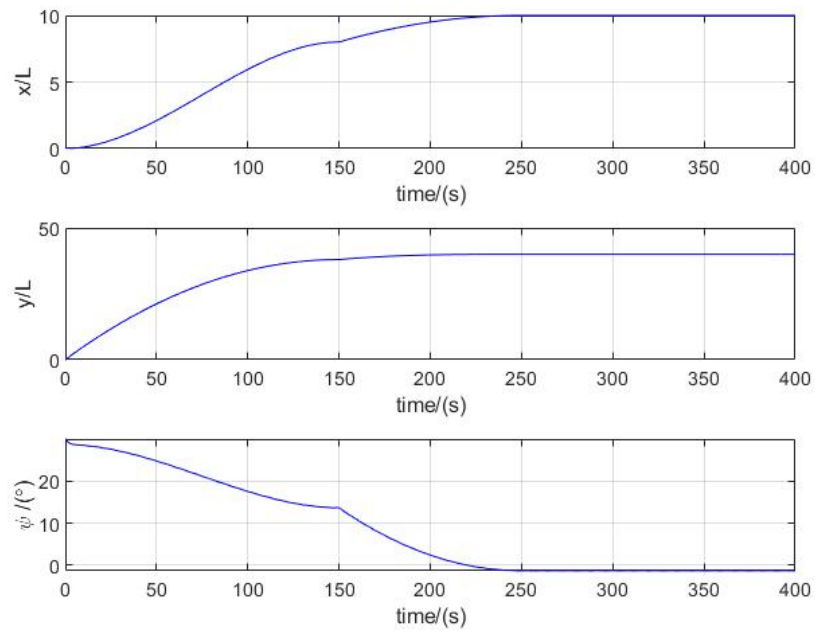
Hình 4.19, 4.20 và 4.21 cho thấy cho thấy bộ điều khiển ANNSMC đã điều khiển đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian, sau đó tiếp cận cầu tàu với hướng mũi tàu gần song song với hướng cầu tàu hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.20, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 15° tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại 250s. Trên hình 4.21, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21

phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.04m/s (tương ứng khoảng 0.6kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Dưới tác động của gió theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu, vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1.5 °/s (tương ứng khoảng 11 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên 0.5 °/s (tương ứng khoảng 3 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.22 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

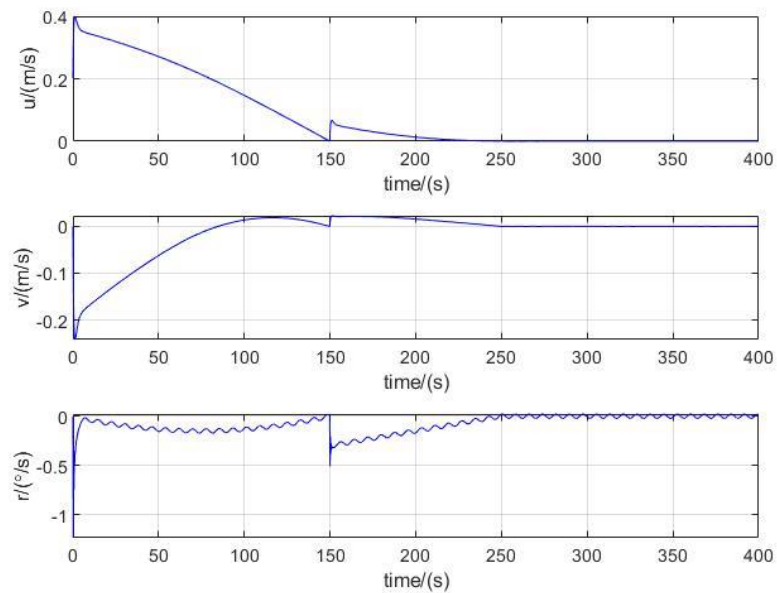
Trên hình 4.23 và 4.24, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t với sai số \tilde{F}_t gần bằng 0. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



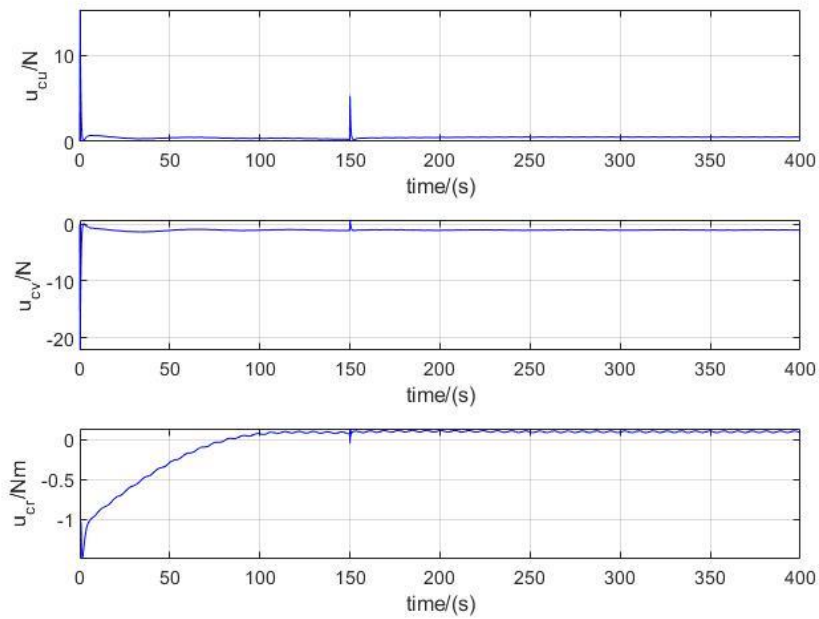
Hình 4.19. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



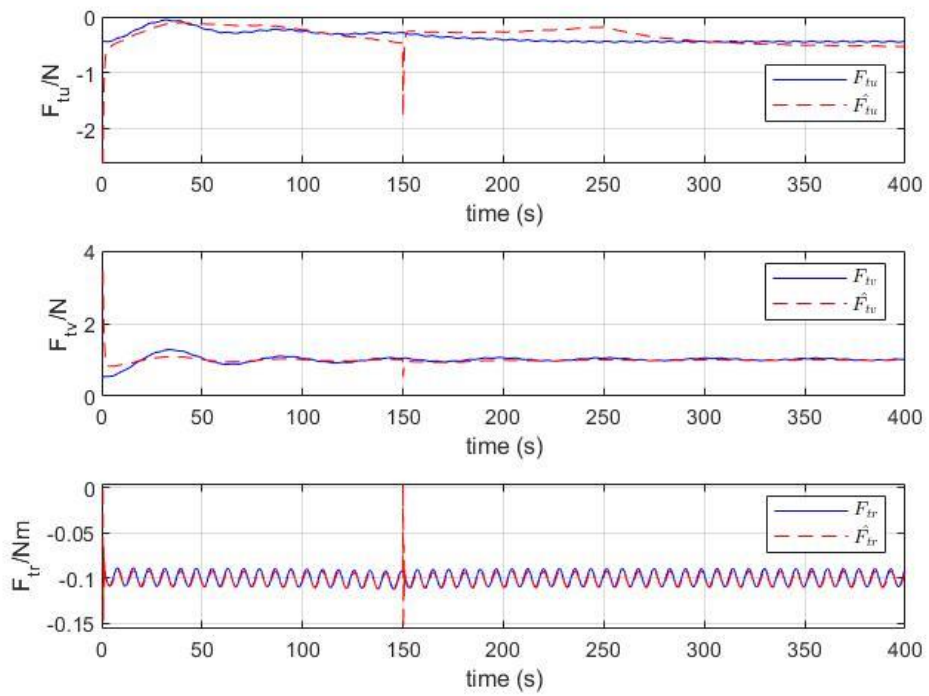
Hình 4.20. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



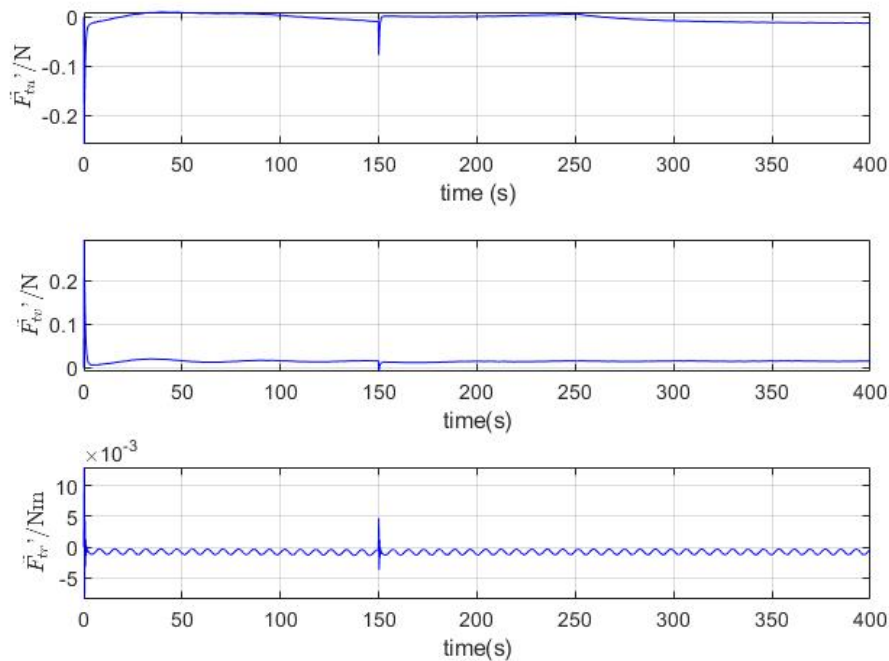
Hình 4.21. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



Hình 4.22. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



Hình 4.23. So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_t



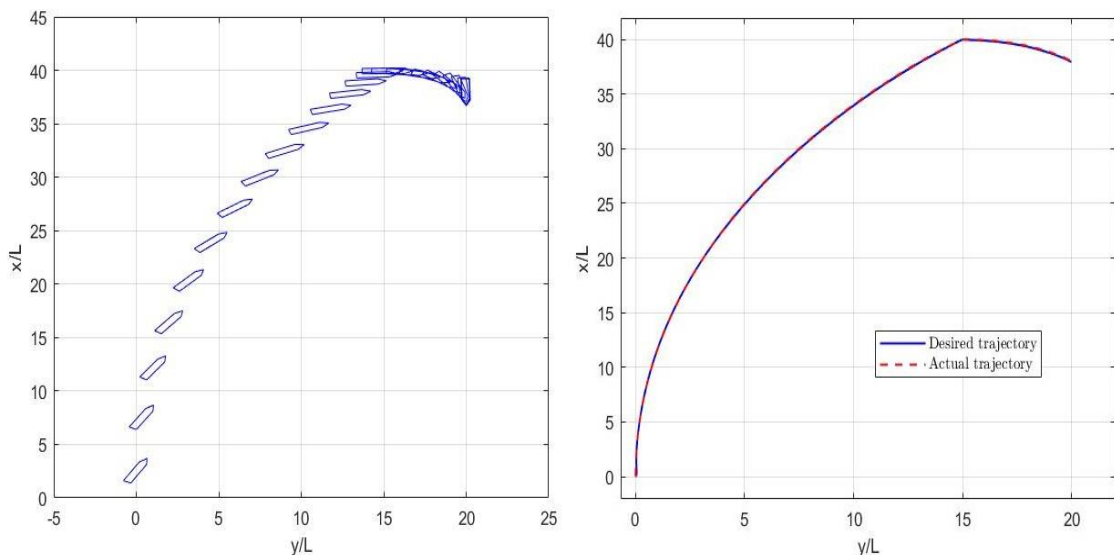
Hình 4.24. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF

c) Phương án cập cầu gián tiếp gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)

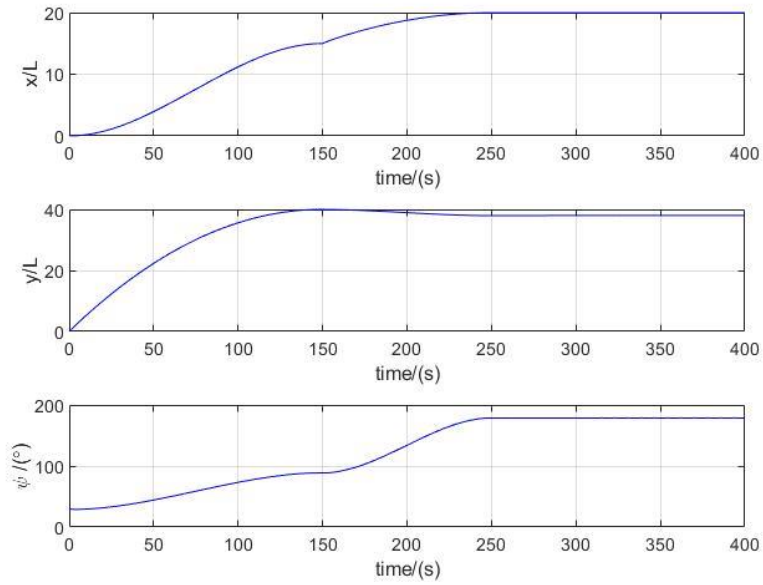
Hình 4.25, 4.26 và 4.27 cho thấy bộ điều khiển ANNSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian đồng thời quay mũi tàu tới $\psi(i) = 90^\circ$, sau đó đồng thời tiếp cận cầu tàu và quay mũi tàu tới $\psi(b) = 180^\circ$ hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.26, vị trí tàu (x,y) đến vị trí trung gian tại 170s (tương ứng khoảng 23 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), đến và duy trì vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 180° tại 250s. Trên hình 4.27, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.7kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo

bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.2m/s (tương ứng khoảng 3 kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1.5 %/s (tương ứng khoảng 11 %/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên 0.5 %/s (tương ứng khoảng 3.5 %/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.28 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

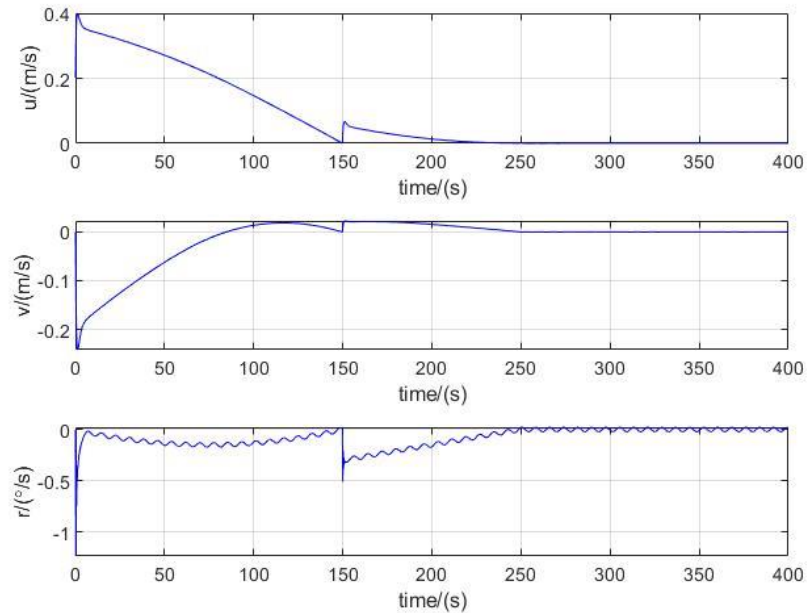
Trên hình 4.29 và 4.30, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t với sai số \tilde{F}_t gần bằng 0. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



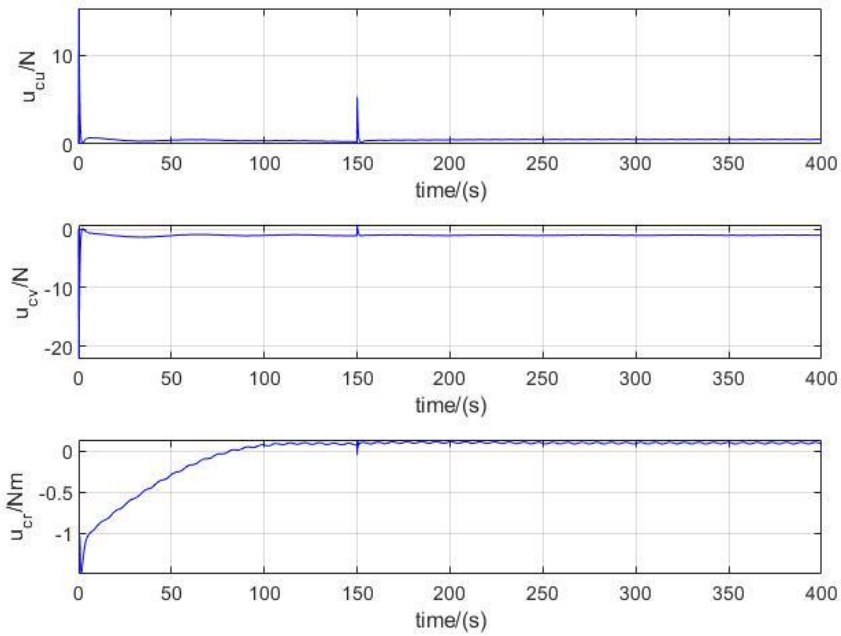
Hình 4.25. Quỹ đạo cập cầu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



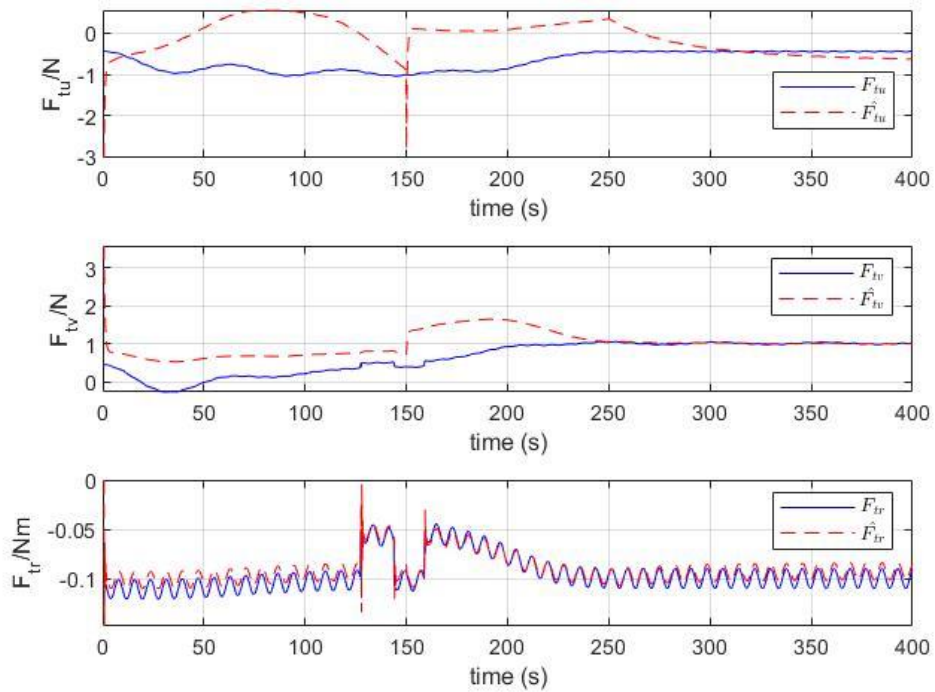
Hình 4.26. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



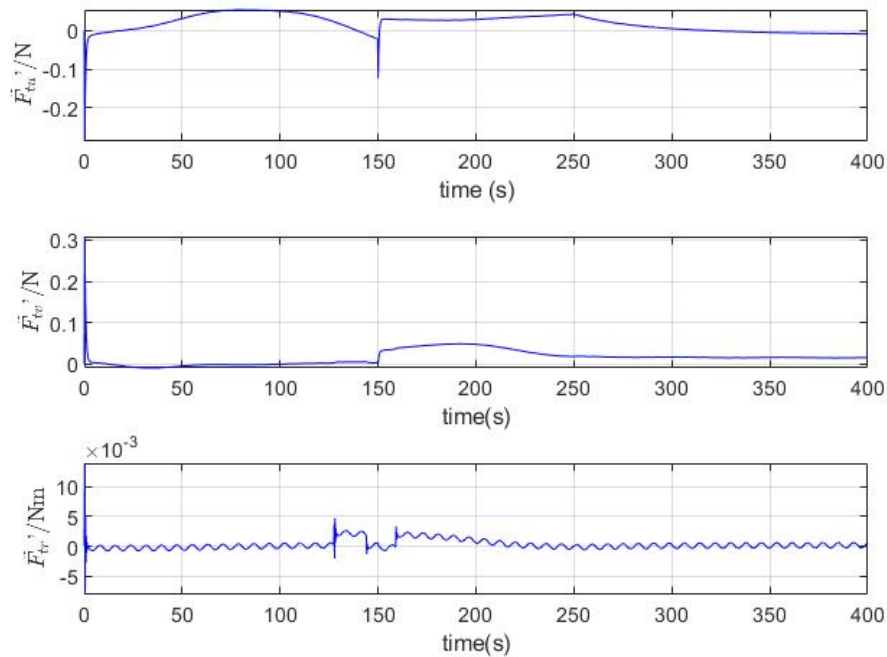
Hình 4.27. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.28. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.29. So sánh véc-tơ hàm bất định tổng hợp F_t và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{F}_t



Hình 4.30. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF

4.5 Kết quả mô phỏng Matlab của bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển

Các hệ số của bộ điều khiển được lựa chọn như sau: $k_x = 0.8$, $k_y = 0.8$, $k_\psi = 0.6$. Giá trị ban đầu của các hệ số khuếch đại $\mathbf{k} = [1 \ 1 \ 1]$. Các hệ số điều khiển k_x , k_y , k_ψ và \mathbf{k} được lựa chọn thông qua quá trình mô phỏng dựa trên lý thuyết lựa chọn hệ số khuếch đại theo luật tiếp cận tốc độ hằng được trình bày trong phần 2.2.

Luận án sử dụng mạng nơ-ron RBF với 1125 nút ẩn với trọng tâm của mạng c_i được phân bố đều trên $[-4,4] \times [-4,4] \times [-4,4]$, độ rộng của hàm RBF được chọn bằng nhau cho tất cả các nút với $b_i=0.1$, $i=1, \dots, 1125$. Tín hiệu ra bao gồm 3 tín hiệu $(\hat{d}_{mu}, \hat{d}_{mv}, \hat{d}_{mr})$. Hằng số dương $\gamma=0.015$. Các thông số của mạng nơ-ron được lựa chọn thông qua quá trình mô phỏng và dựa trên các tài

liệu [12] và [35]. Các tốc độ thích nghi $\mathbf{a}_k = [0.05 \ 0.05 \ 0.05]$ và $\mathbf{a}_\lambda = [0.05 \ 0.05 \ 0.05]$.

Hệ số điều khiển bão hòa cho bộ giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành $\mathbf{a}_s = [1 \ 1 \ 1]$.

Thành phần bất định trong tham số của mô hình chuyển động của tàu \mathbf{d}_m theo công thức (4.1), véc-tơ hàm bất định tổng hợp $\mathbf{F} = \mathbf{d}_e + \mathbf{d}_u$ bao gồm nhiễu ngoại cảnh tác động \mathbf{d}_e (theo mô hình tác động của sóng, gió, dòng chảy lên chuyển động của tàu trong Phụ lục 2) và thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian \mathbf{d}_u theo công thức (4.2).

Khả năng điều khiển của bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANNFTSMC) sẽ được đánh giá trong các trường hợp sau:

- Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi;
- Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi;
- Tự động cập cầu khi có cấu chấp hành xảy ra lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

4.5.1 Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi

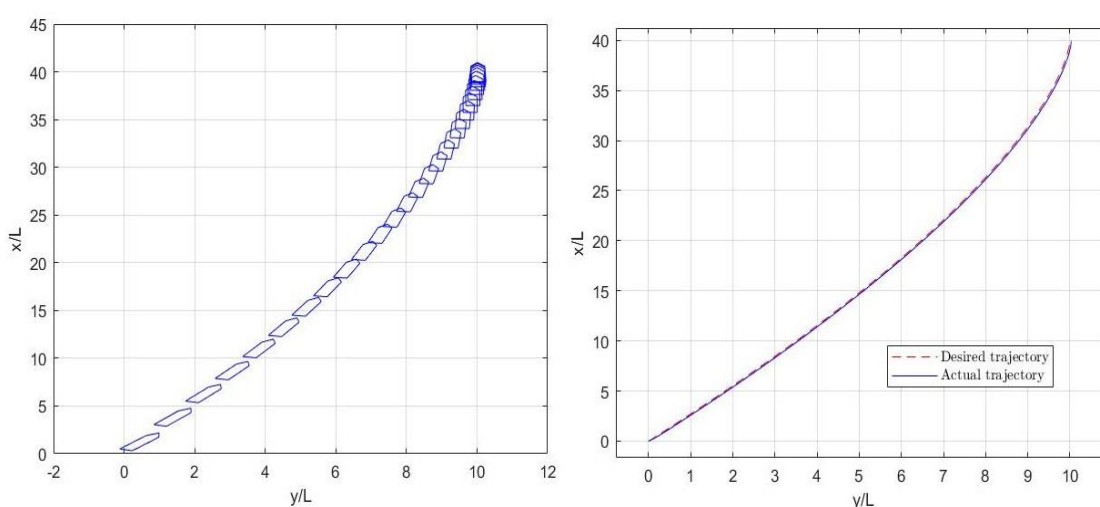
Mô phỏng được thực hiện khi cơ cấu chấp hành không xảy ra lỗi hay hệ số sức khỏe của cơ cấu chấp hành $H=1$.

a) Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

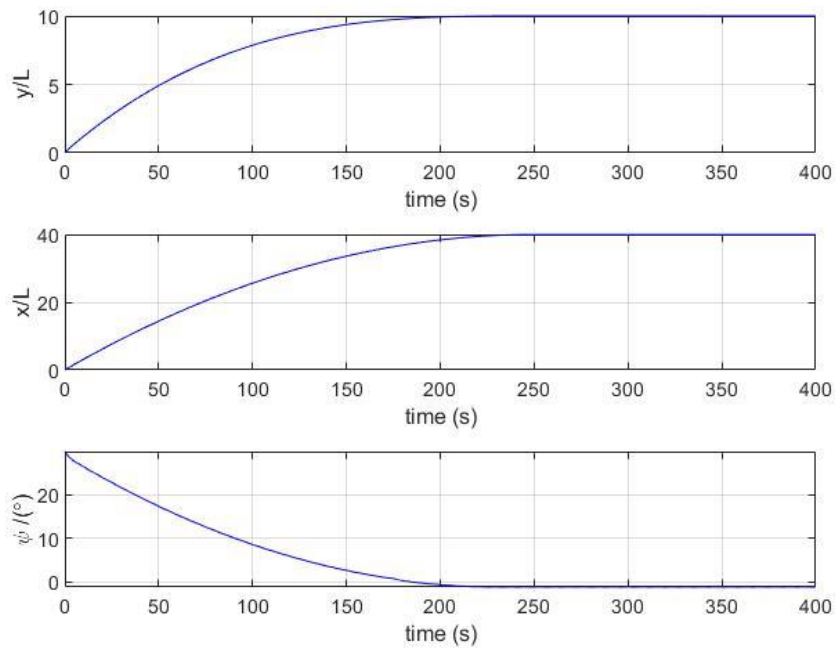
Hình 4.31, 4.32 và 4.33 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí cầu tàu và hoàn thành công việc cập cầu dưới tác động của véc-tơ bất định tổng hợp tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.32, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới và duy trì tại 0 từ 200s (tương ứng khoảng 28 phút theo

bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.33, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.3m/s (tương ứng khoảng 4.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc dạt ngang tăng lên đến -0.04m/s (tương ứng khoảng 0.7kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), giảm dần đến 0.01m/s (tương ứng khoảng 0.1kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 120s (tương ứng khoảng 14 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1.5 °/s (tương ứng khoảng 10.8 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 200s. Hình 4.34 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

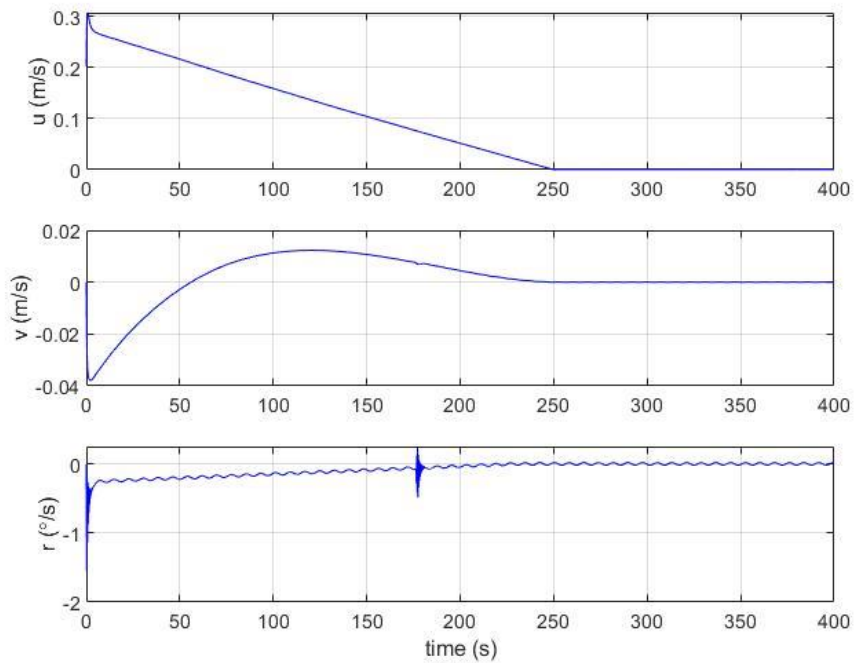
Trên hình 4.35 và 4.36, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định do tham số của mô hình bất định d_m với sai số \tilde{d}_m gần bằng 0 từ thời điểm 170s. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



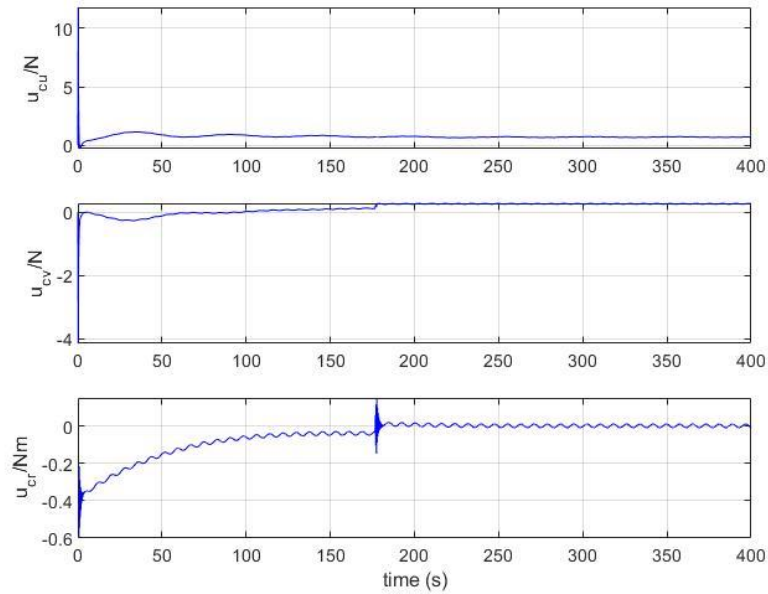
Hình 4.31. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



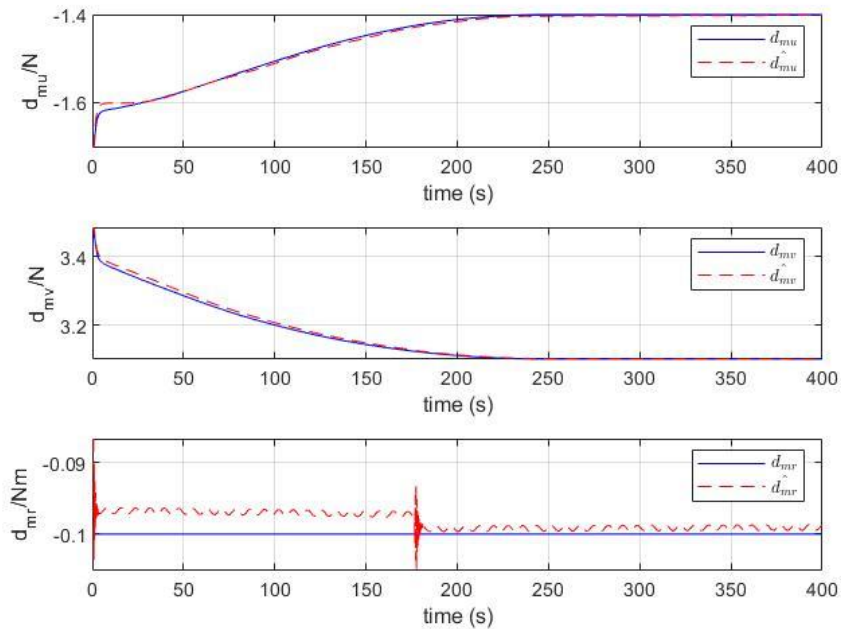
Hình 4.32. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



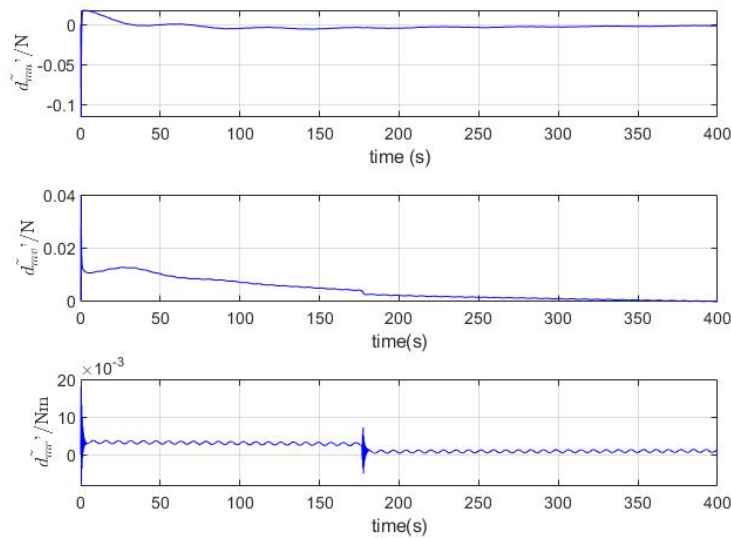
Hình 4.33. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



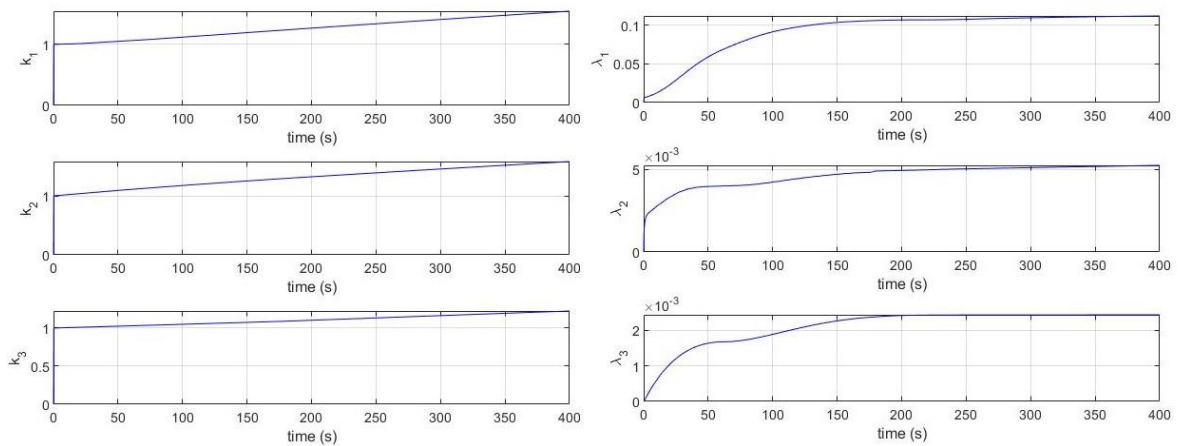
Hình 4.34. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)



Hình 4.35. So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m



Hình 4.36. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF



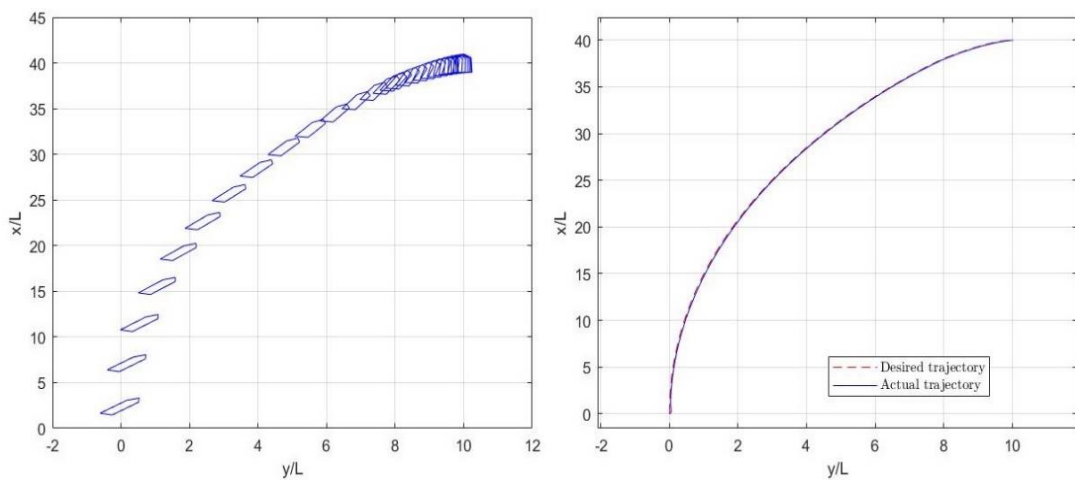
Hình 4.37. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ

b) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)

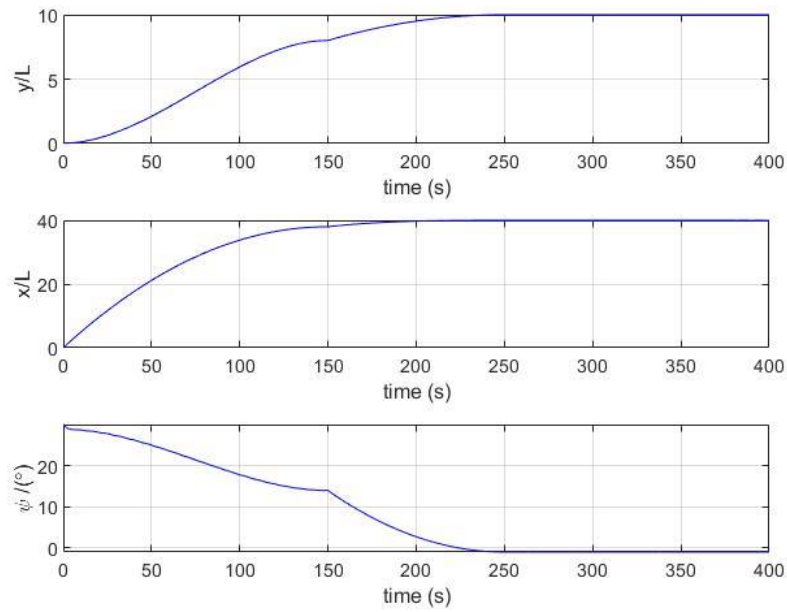
Hình 4.38, 4.39 và 4.39 cho thấy cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC đã điều khiển đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian, sau đó tiếp cận cầu tàu với hướng mũi tàu gần song song với hướng cầu tàu hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.39, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 15°

tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại 250s. Trên hình 4.40, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.04m/s (tương ứng khoảng 0.6kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Dưới tác động của gió theo hướng từ ngoài vào trong cầu tàu, vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.2m/s (tương ứng khoảng 3.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1 °/s (tương ứng khoảng 7 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên 0.5 °/s (tương ứng khoảng 3 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.41 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

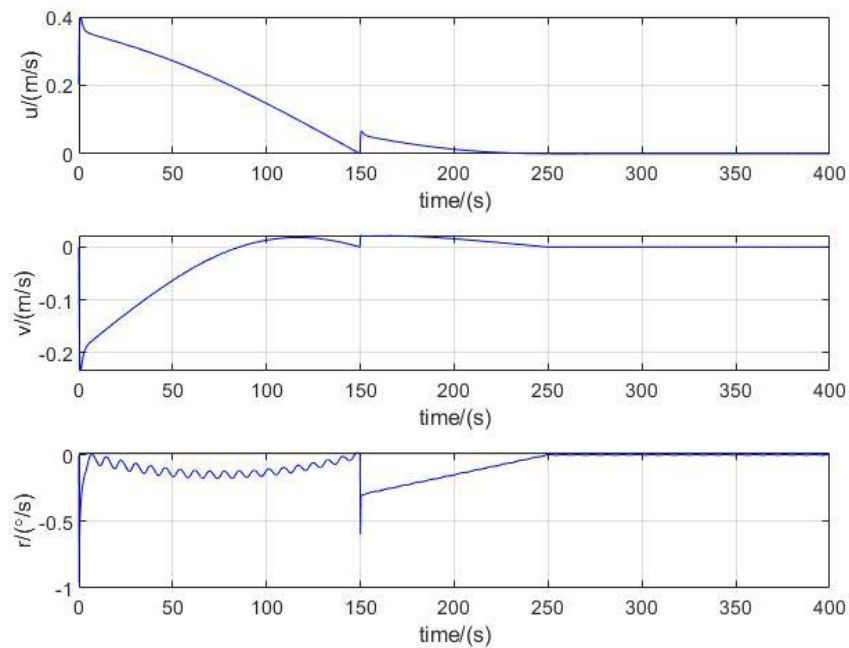
Trên hình 4.42 và 4.43, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định do tham số của mô hình bất định d_m với sai số \tilde{d}_m gần bằng 0 từ thời điểm 150s. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



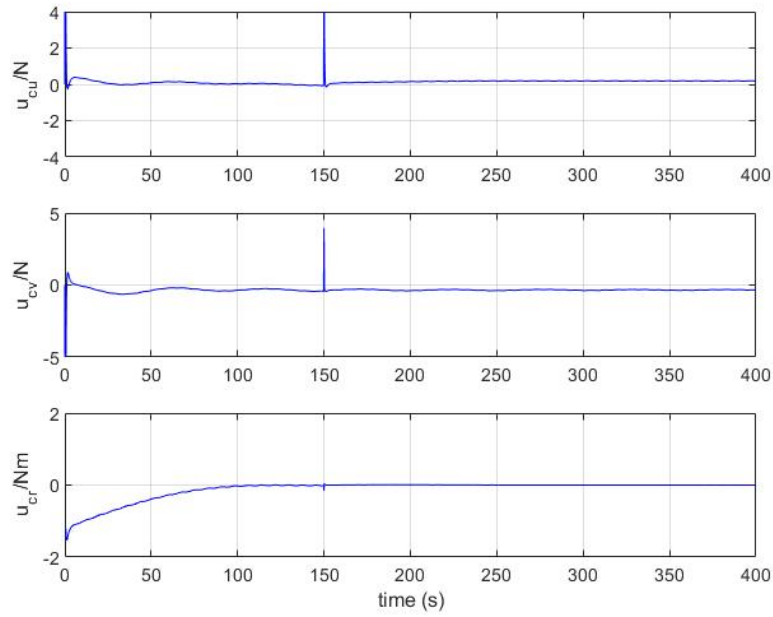
Hình 4.38. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



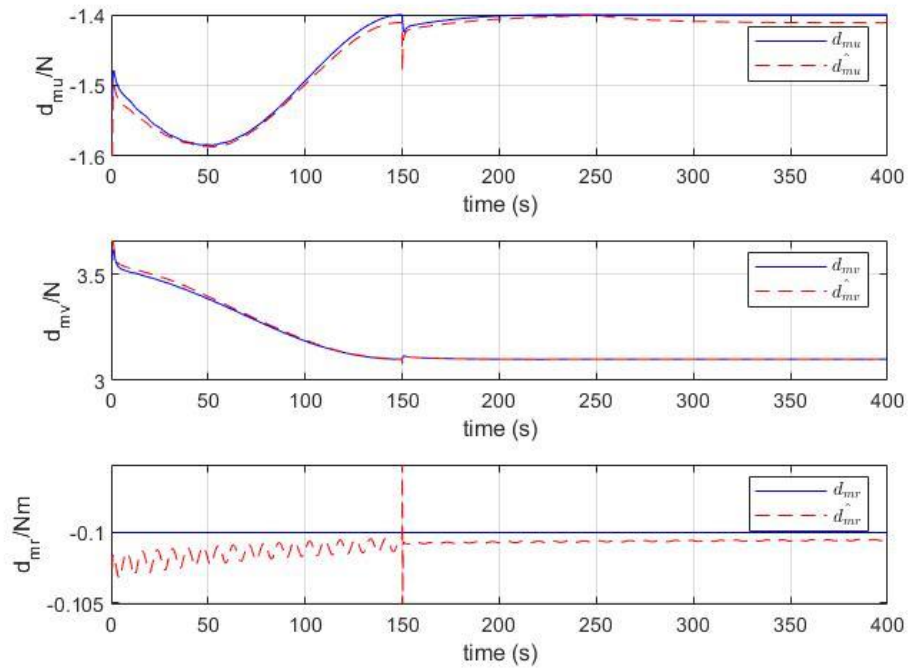
Hình 4.39. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



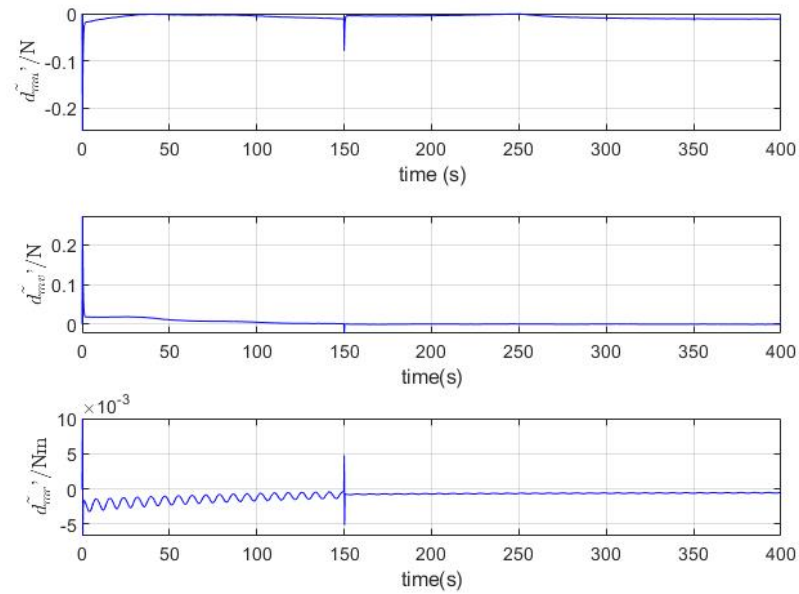
Hình 4.40. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



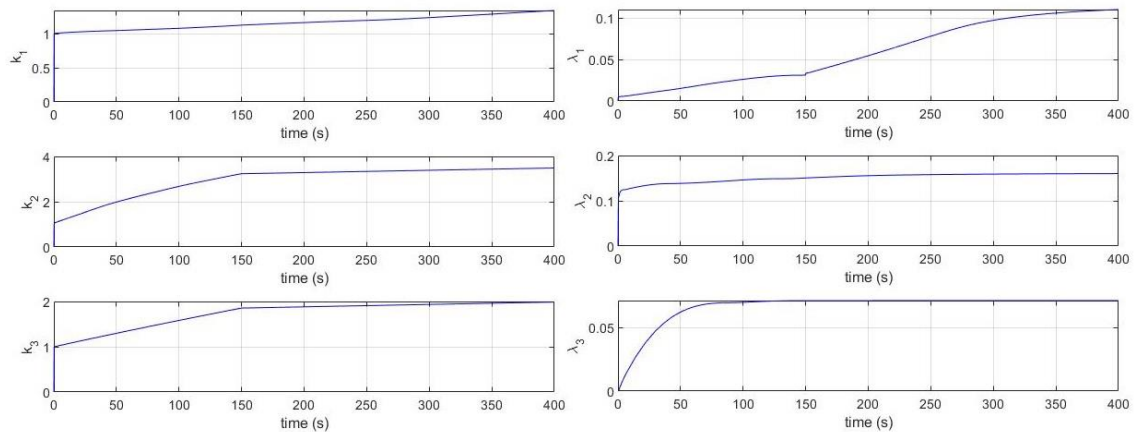
Hình 4.41. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)



Hình 4.42. So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m



Hình 4.43. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF



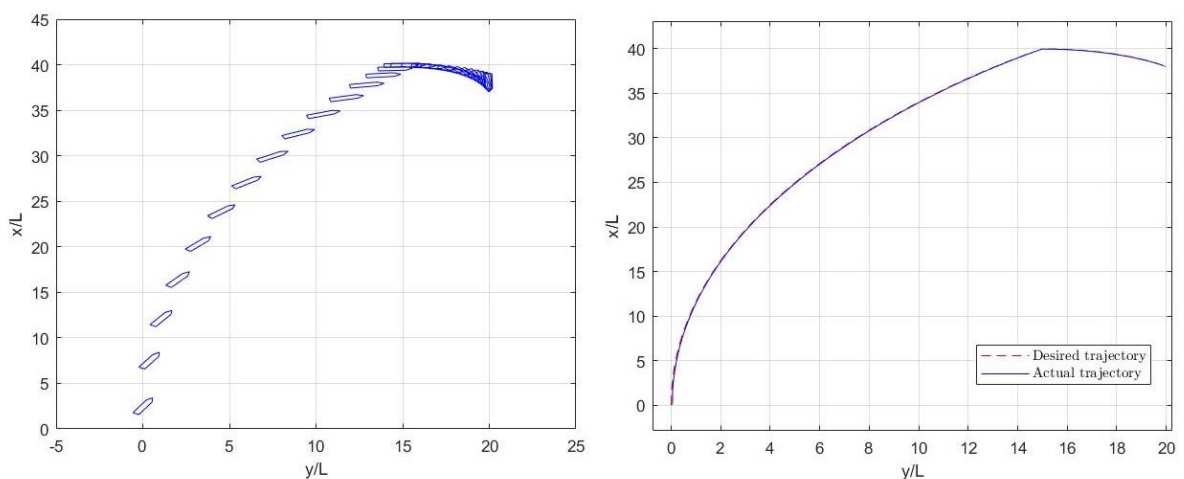
Hình 4.44. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ

c) Phương án cập cầu gián tiếp gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)

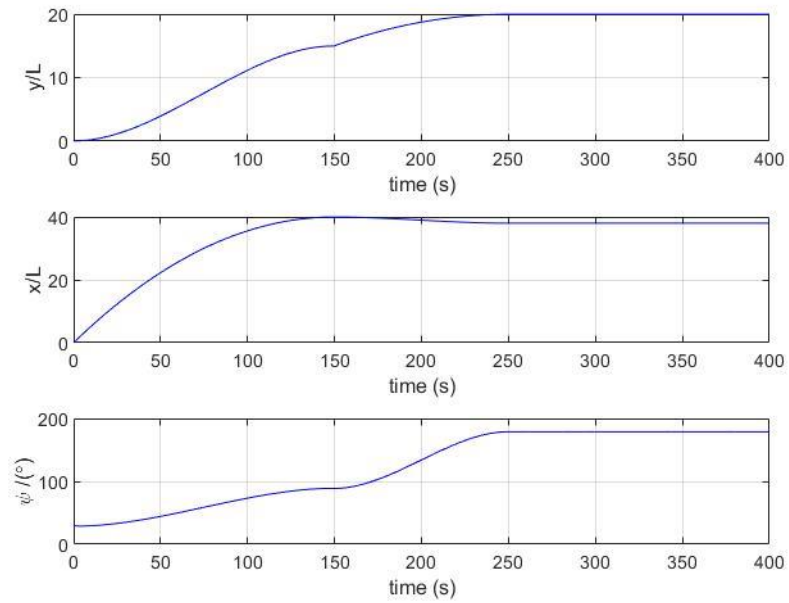
Hình 4.45, 4.46 và 4.47 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC đã điều khiển được tàu từ vị trí ban đầu đến được vị trí trung gian đồng thời quay mũi tàu tới $\psi(i) = 90^\circ$, sau đó đồng thời tiếp cận cầu tàu và quay mũi tàu tới $\psi(b) = 180^\circ$ hoàn thành công tác cập cầu tại thời điểm 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.46, vị trí tàu (x,y) đến vị trí trung

gian tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), đến và duy trì vị trí cập cầu tại thời điểm 250s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 180° tại 250s. Trên hình 4.47, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.7kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần bằng 0 tại thời điểm 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), tăng lên 0.1m/s (tương ứng khoảng 1.5 kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 250s. Vận tốc dạt ngang tăng dần lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến $1^\circ/\text{s}$ (tương ứng khoảng $7^\circ/\text{phút}$ theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần về 0 tại 150s, tăng lên $1.5^\circ/\text{s}$ (tương ứng khoảng $11^\circ/\text{phút}$ theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 250s. Hình 4.47 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

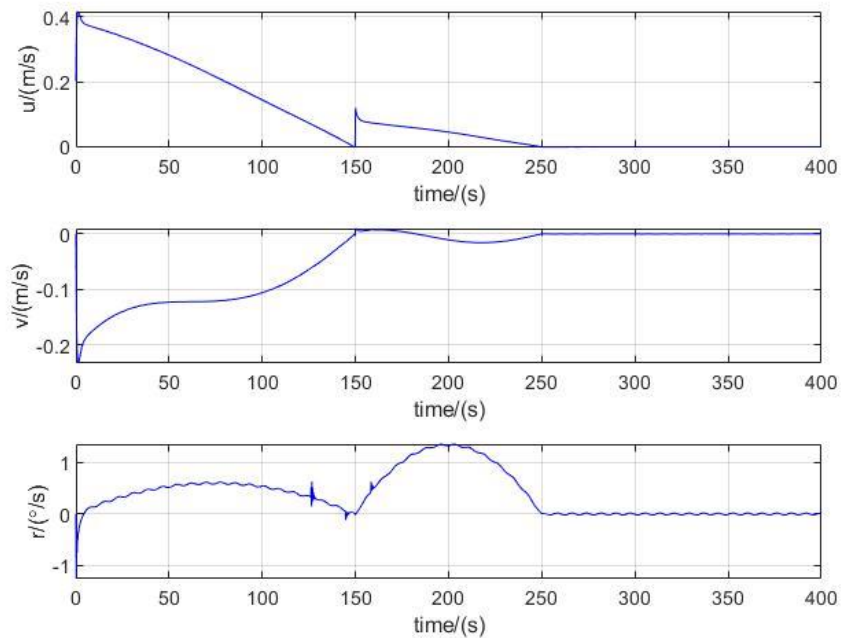
Trên hình 4.49 và 4.50, mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ véc-tơ hàm bất định do tham số của mô hình bất định d_m với sai số \tilde{d}_m gần bằng 0 từ thời điểm 150s. Mặc dù vậy, bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn xảy ra hiện tượng chattering do ảnh hưởng của các thành phần bất định ngẫu nhiên biến đổi nhanh theo thời gian.



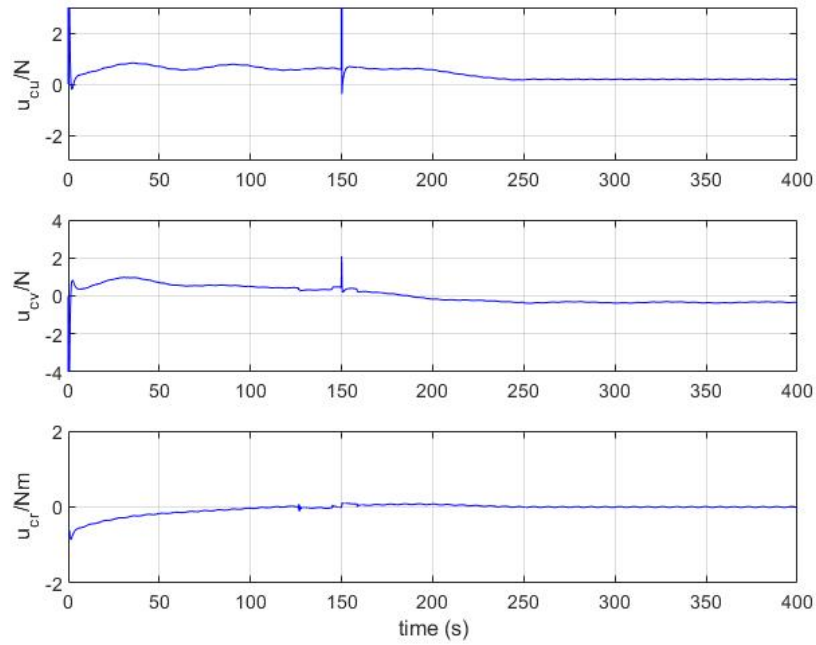
Hình 4.45. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



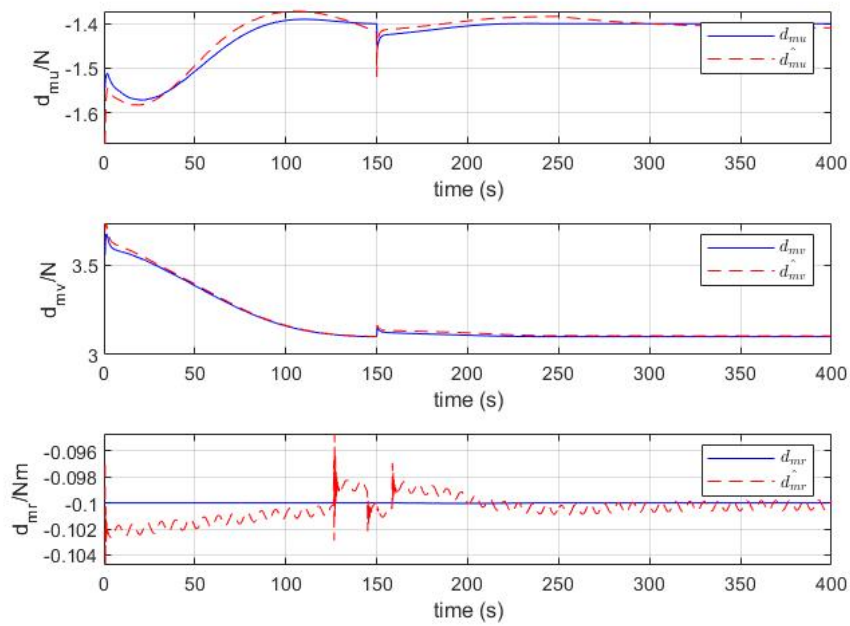
Hình 4.46. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



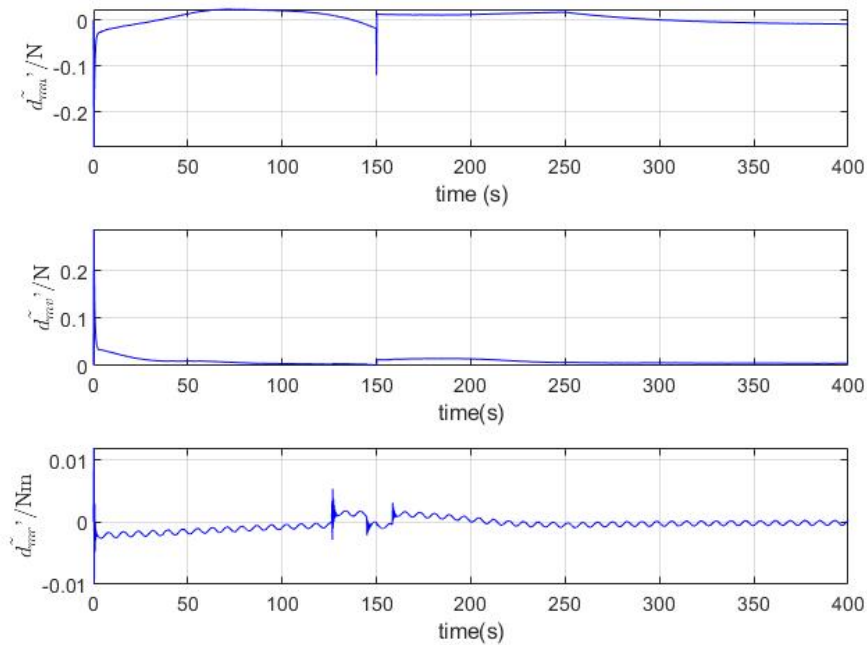
Hình 4.47. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



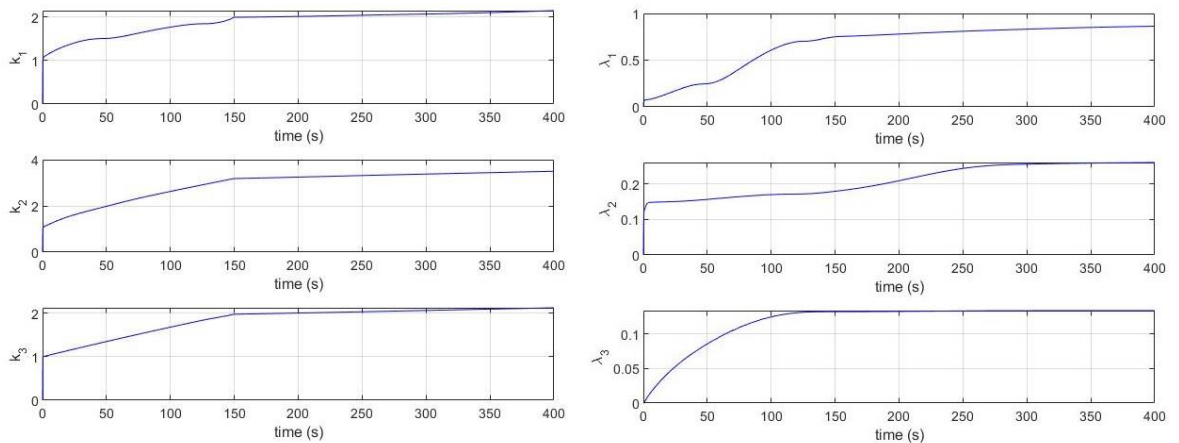
Hình 4.48. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)



Hình 4.49. So sánh véc-tơ bất định do mô hình toán chuyển động của tàu bất định d_m và véc-tơ hàm xấp xỉ \hat{d}_m



Hình 4.50. Véc-tơ sai số của mạng nơ-ron RBF



Hình 4.51. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ

4.5.2 Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi

Mô phỏng được thực hiện khi các cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần (khi lực đẩy tạo ra bị suy giảm so với lực đẩy theo yêu cầu) trên cả 3 chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*); chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*)

và chuyển động xoay (*Yaw*) tại các thời điểm khác nhau. Hệ số sức khỏe của các cơ cấu chấp hành theo 3 chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang như sau:

$$h_1 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 30s \\ 0.4 & \text{khi } t \geq 30s \end{cases} \quad (4.3)$$

$$h_2 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 50s \\ 0.5 & \text{khi } t \geq 50s \end{cases} \quad (4.4)$$

$$h_3 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 80s \\ 0.6 & \text{khi } t \geq 80s \end{cases} \quad (4.5)$$

Để đánh giá khả năng điều khiển của bộ điều khiển trượt sửa lỗi ANNFTSMC trong phần 3.3, mô phỏng sẽ được thực hiện so sánh với các bộ điều khiển trượt SMC được đề xuất trong phần 3.1 và bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANNSMC được đề xuất trong phần 3.2. Sai số bình phương trung bình sau được sử dụng để so sánh chất lượng bám quỹ đạo của các bộ điều khiển:

$$E_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(e_x^2 + e_y^2)} \quad (4.6)$$

$$E_{\psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(e_{\psi}^2)} \quad (4.7)$$

Trong đó N là số bước mô phỏng.

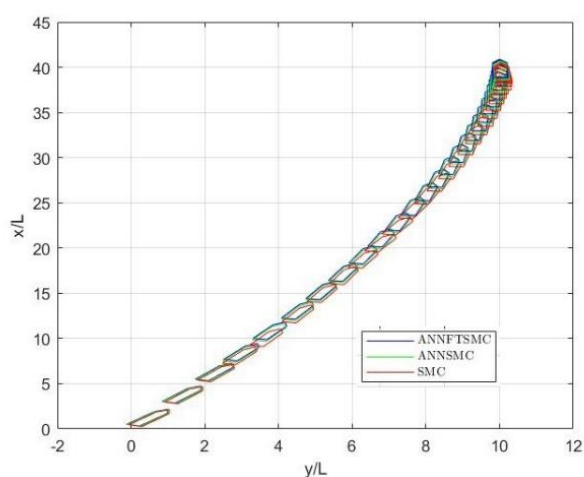
Trong mỗi bước mô phỏng, các sai số bám quỹ đạo dự kiến và hướng mũi tàu dự kiến được xác định như sau: $e_x = x - x_d$; $e_y = y - y_d$; $e_{\psi} = \psi - \psi_d$. Trên cơ sở các sai số bám quỹ đạo dự kiến và hướng mũi tàu dự kiến trong mỗi bước mô phỏng, sai số bình phương trung bình E_{xy} và E_{ψ} của các bộ điều khiển được xác định.

a) *Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)*

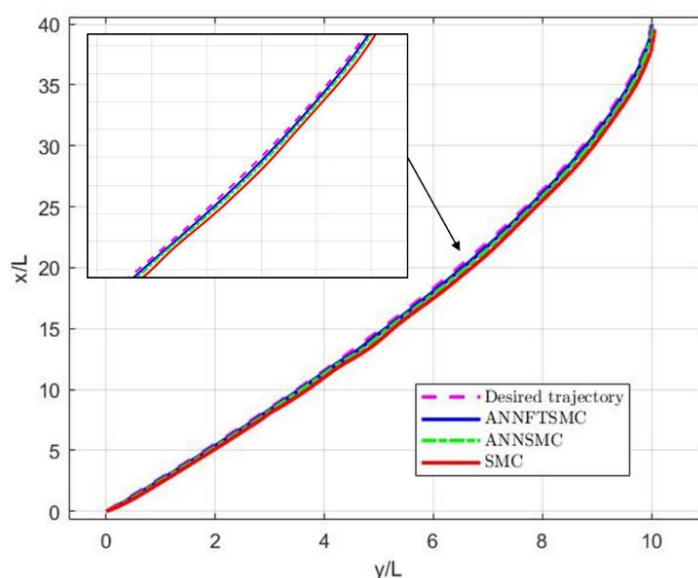
Hình 4.52-4.55 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có thể điều khiển được tàu cập cầu vị trí dự kiến tại thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) mặc dù trong điều kiện xuất hiện lỗi cơ cấu chấp hành lớn từ thời điểm 30s (tương ứng thời gian 4 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.53, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 300s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới và duy trì tại 0 từ 250s (tương ứng khoảng 35 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 5.26, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4 kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 300s mặc dù tại thời điểm 30s vận tốc tiến lùi bị giảm mạnh dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc đạt ngang tăng lên đến 0.03m/s (tương ứng khoảng 0.5kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), giảm dần đến 0.01m/s (tương ứng khoảng 0.1kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) tại 120s (tương ứng khoảng 14 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 300s mặc dù tại thời điểm 50s vận tốc đạt ngang bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1.5 °/s (tương ứng khoảng 10.8 °/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 200s, mặc dù tại thời điểm 80s vận tốc quay bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Hình 4.56 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

Trên hình 4.54 bộ điều khiển SMC không thể giữ hướng mũi tàu bằng 0 tại vị trí cập cầu dự kiến, trong khi đó bộ điều khiển ANNFTSMC và ANNSMC có thể giữ hướng mũi tàu bằng 0 tại vị trí cập cầu dự kiến từ thời điểm 300s. Trên hình 4.54 và 4.55, bộ điều khiển SMC chattering nhiều hơn đặc biệt với tốc độ quay mũi tàu. Từ hình 4.53 và bảng 4.2, bộ điều khiển ANNFTSMC có

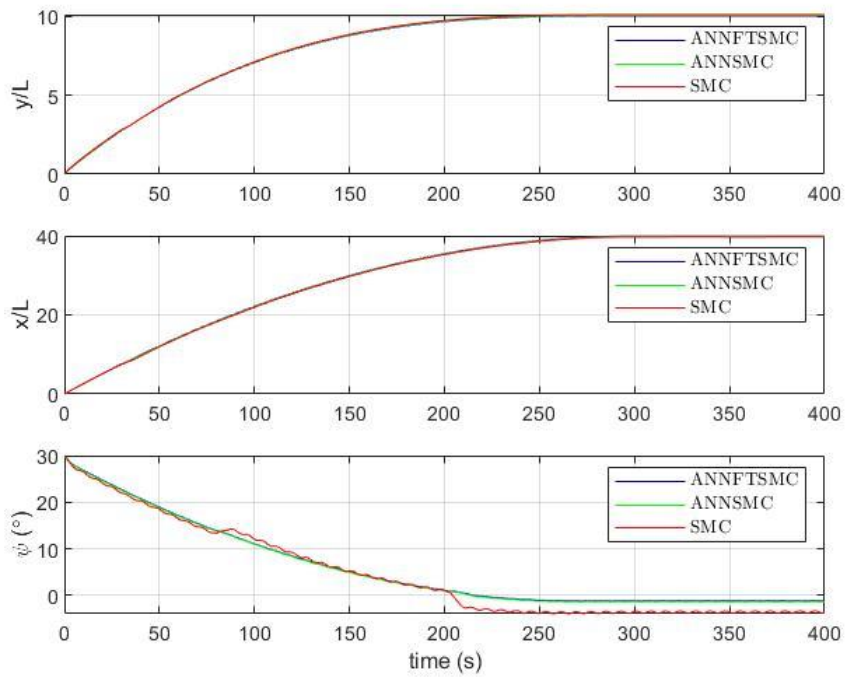
khả năng bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến tốt hơn bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Theo bảng 4.2, sai số bình phương trung bình E_{xy} và E_{ψ} cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC nhỏ hơn so với bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Trên hình 4.57, các hệ số khuếch đại k và λ đều tăng lên để chống lại đồng thời lỗi cơ cấu chấp hành từ thời điểm 30s và ảnh hưởng của các thành phần bất định.



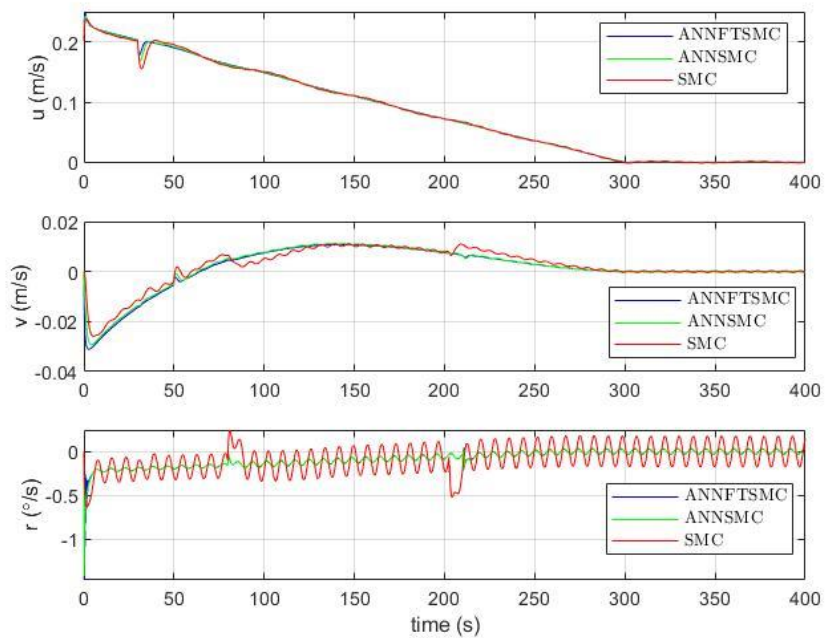
Hình 4.52. Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



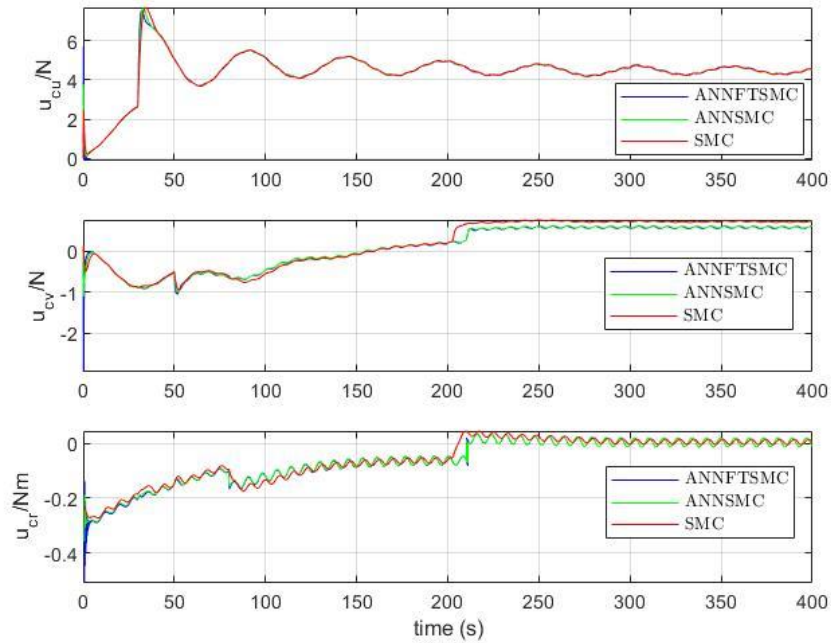
Hình 4.53. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



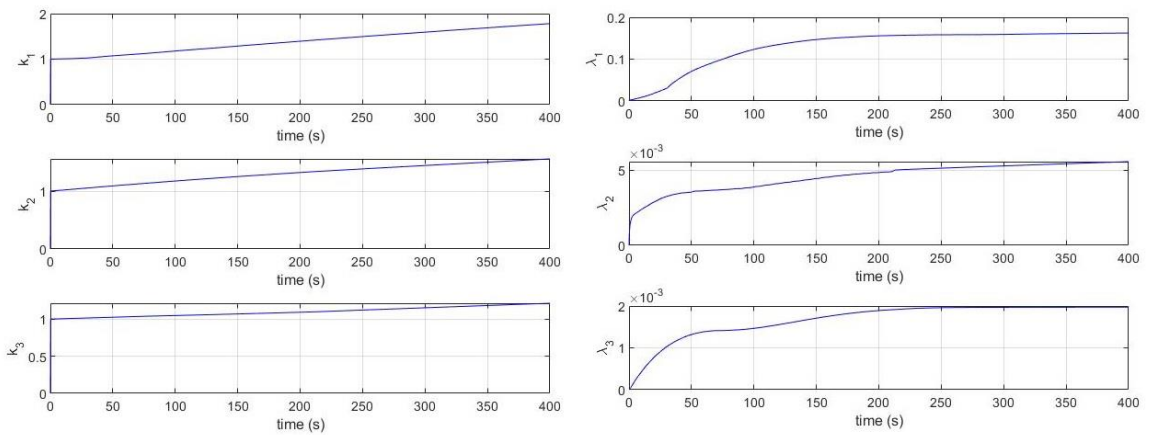
Hình 4.54. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.55. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.56. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.57. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành

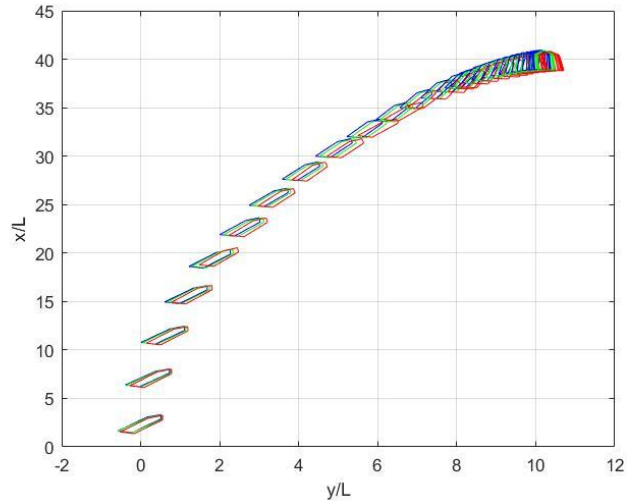
b) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)

Hình 4.58-4.61 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có thể điều khiển được tàu cập cầu vị trí dự kiến tại thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút

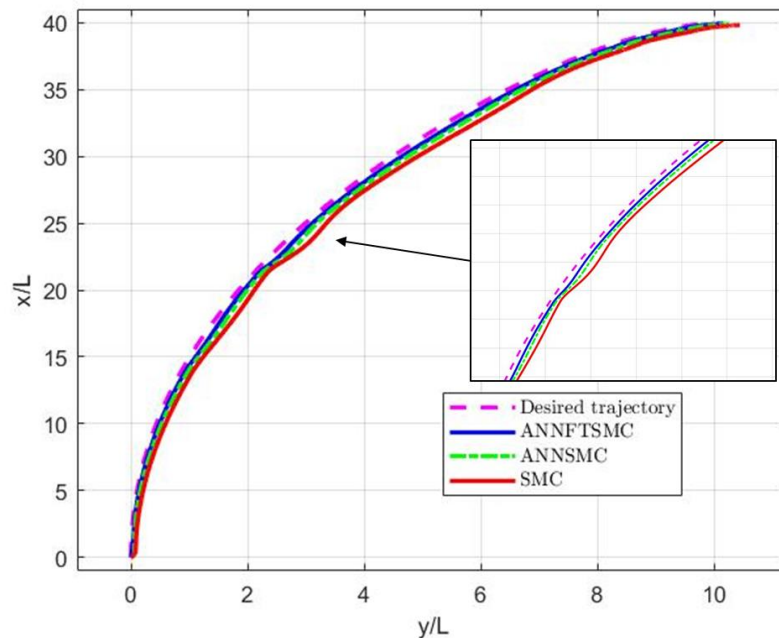
theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) mặc dù trong điều kiện xuất hiện lỗi cơ cấu chấp hành lớn từ thời điểm 30s (tương ứng thời gian 4 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.60, vị trí tàu (x,y) đến và duy trì tại vị trí cập cầu tại thời điểm 300s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 15° tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại 300s. Trên hình 4.61, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.7 kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 từ thời điểm 270s mặc dù tại thời điểm 30s vận tốc tiến lùi bị giảm mạnh dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc dạt ngang tăng lên đến 0.2m/s (tương ứng khoảng 3.3kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 300s mặc dù tại thời điểm 50s vận tốc dạt ngang bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến 1 %/s (tương ứng khoảng 7 %/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 200s, mặc dù tại thời điểm 80s vận tốc quay bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Hình 4.62 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

Trên hình 4.60, bộ điều khiển SMC không thể giữ hướng mũi tàu bằng 0 tại vị trí cập cầu dự kiến, trong khi đó bộ điều khiển ANNFTSMC và ANNSMC có thể giữ hướng mũi tàu bằng 0 tại vị trí cập cầu dự kiến từ thời điểm 300s. Trên hình 4.60 và 4.61, bộ điều khiển SMC chattering nhiều hơn đặc biệt với tốc độ quay mũi tàu. Từ hình 4.59, bộ điều khiển ANNFTSMC có khả năng bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến tốt hơn bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Theo bảng 4.2, sai số bình phương trung bình E_{xy} và E_{ψ} cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC nhỏ hơn so với bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Trên hình 4.63,

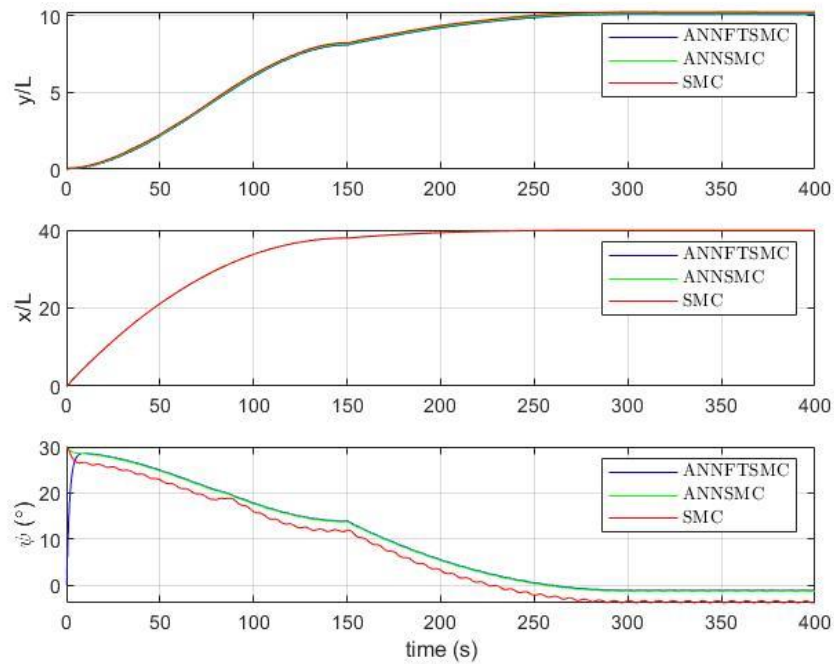
các hệ số khuếch đại k và λ đều tăng lên để chống lại đồng thời lỗi cơ cấu chấp hành từ thời điểm 30s và ảnh hưởng của các thành phần bất định.



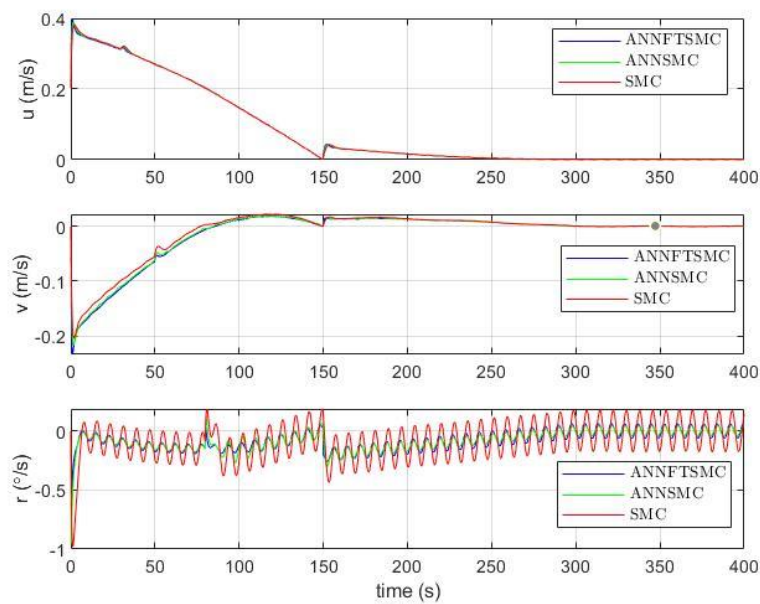
Hình 4.58. Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



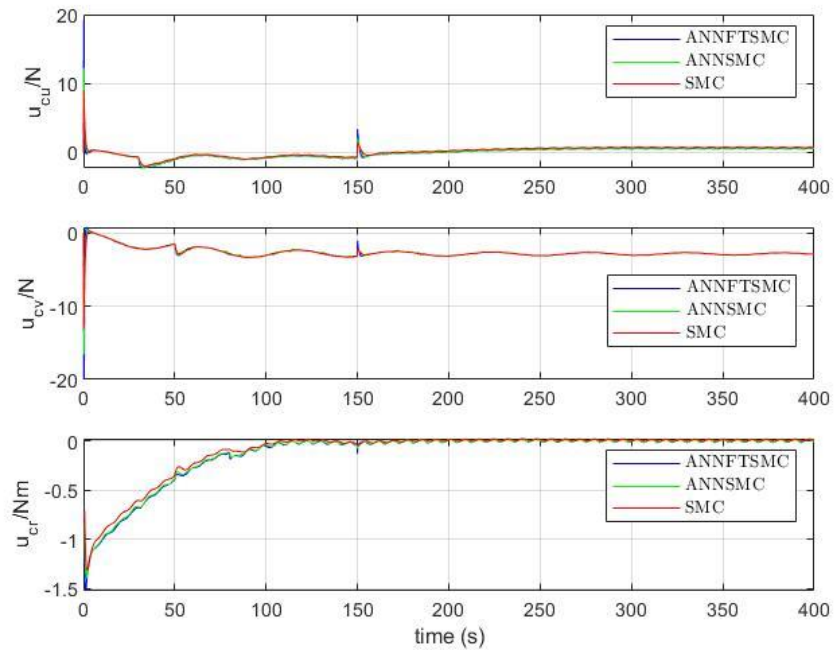
Hình 4.59. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



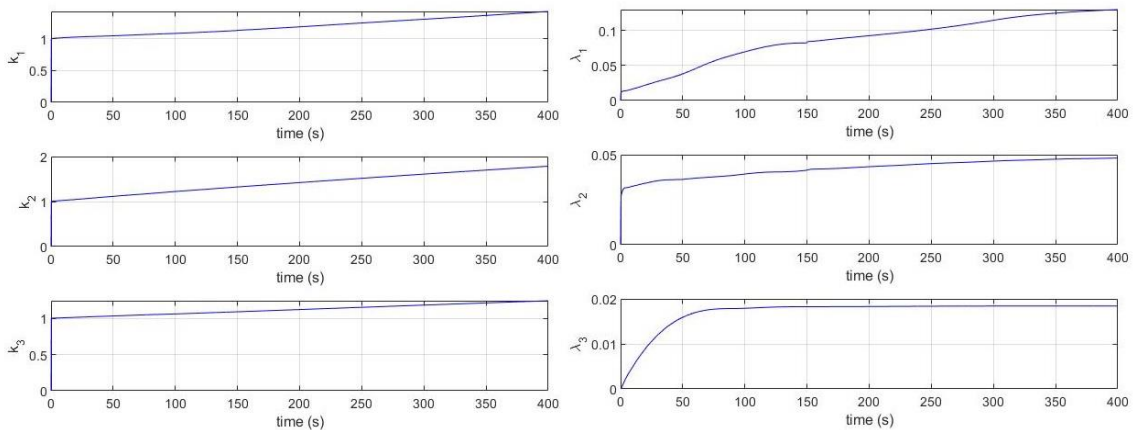
Hình 4.60. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.61. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.62. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



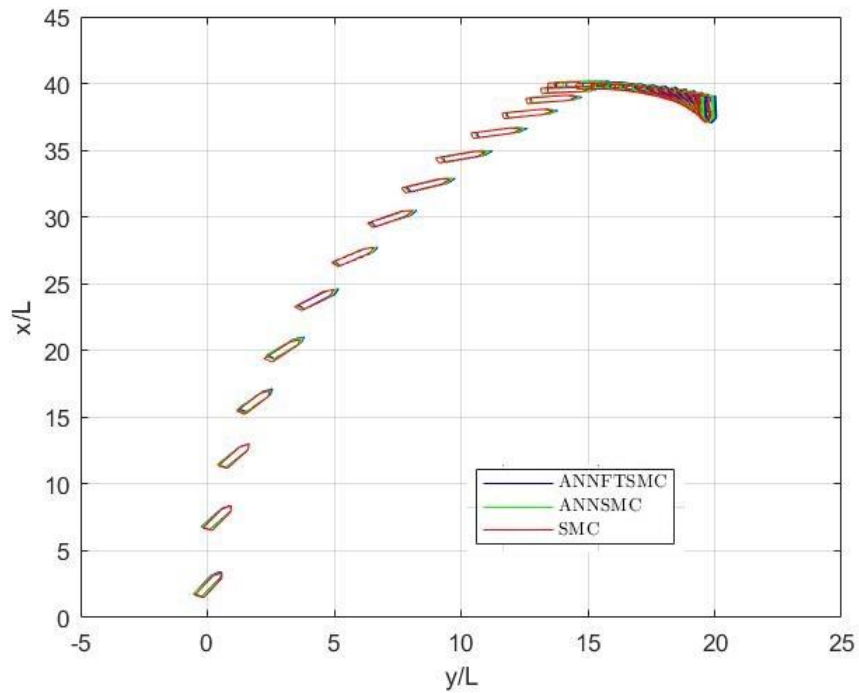
Hình 4.63. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành

c) Phương án cập cầu gián tiếp gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)

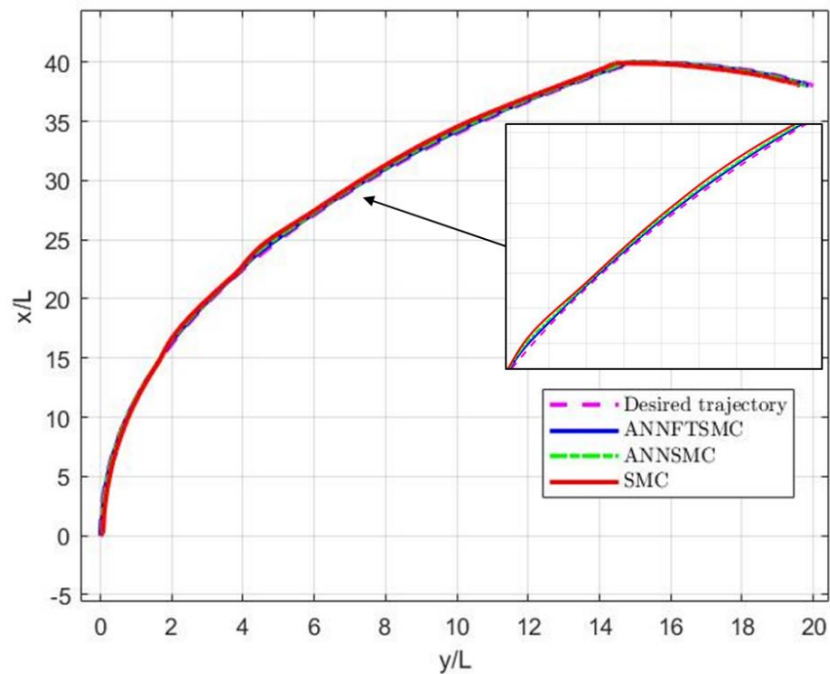
Hình 4.64-4.67 cho thấy bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có thể điều khiển được tàu cập cầu vị trí dự kiến tại thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút

theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) mặc dù trong điều kiện xuất hiện lỗi cơ cấu chấp hành lớn từ thời điểm 30s (tương ứng thời gian 4 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Trên hình 4.66, vị trí tàu (x,y) đến vị trí trung gian tại 150s (tương ứng khoảng 21 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), đến và duy trì vị trí cập cầu tại thời điểm 300s, trong khi đó, mũi tàu được quay từ 30° tới 180° tại 300s. Trên hình 4.67, vận tốc tiến lùi được điều khiển tăng lên đến 0.4m/s (tương ứng khoảng 6.7 kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1) sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 từ thời điểm 270s mặc dù tại thời điểm 30s vận tốc tiến lùi bị giảm mạnh dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc dạt ngang tăng lên đến 0.25m/s (tương ứng khoảng 4kts theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), sau đó giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 300s mặc dù tại thời điểm 50s vận tốc dạt ngang bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Vận tốc quay của tàu được điều khiển tăng lên đến -1 %/s (tương ứng khoảng 7 %/phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1), giảm dần về 0 tại thời điểm 150, tăng dần lên 1 %/s tại thời điểm 230s, giảm dần và duy trì bằng 0 tại thời điểm 300s, mặc dù tại thời điểm 80s vận tốc quay bị giảm dưới tác dụng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Hình 4.68 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} .

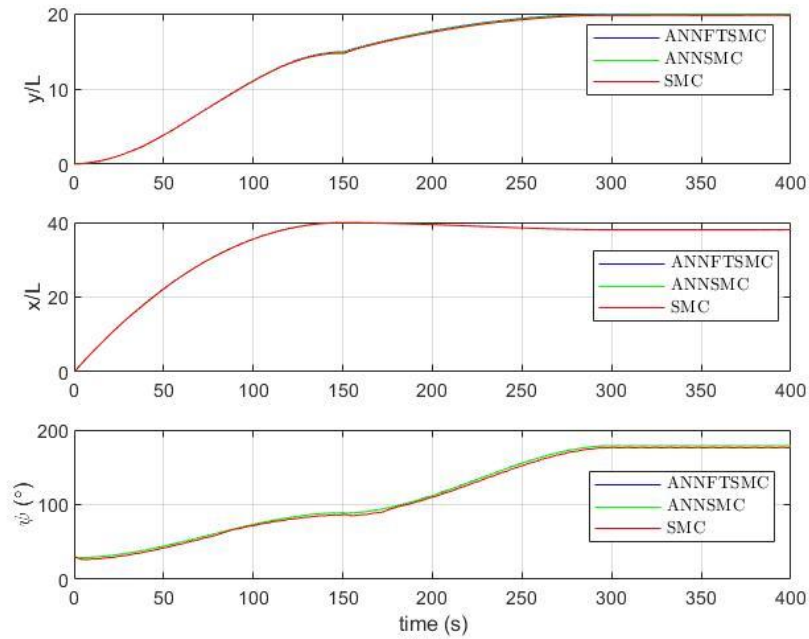
Trên hình 4.67, bộ điều khiển SMC chattering nhiều hơn đặc biệt với tốc độ quay mũi tàu. Từ hình 4.65, bộ điều khiển ANNFTSMC có khả năng bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến tốt hơn bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Theo bảng 4.2, sai số bình phương trung bình E_{xy} và E_{ψ} của bộ điều khiển ANNFTSMC nhỏ hơn so với bộ điều khiển ANNSMC và SMC. Trên hình 4.69, các hệ số khuếch đại k và λ đều tăng lên để chống lại đồng thời lỗi cơ cấu chấp hành từ thời điểm 30s và ảnh hưởng của các thành phần bất định.



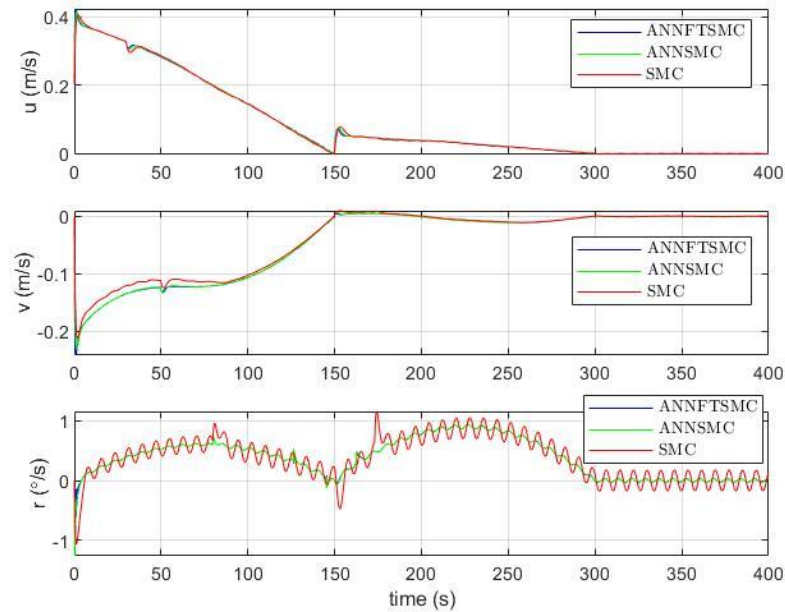
Hình 4.64. Chuyển động cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



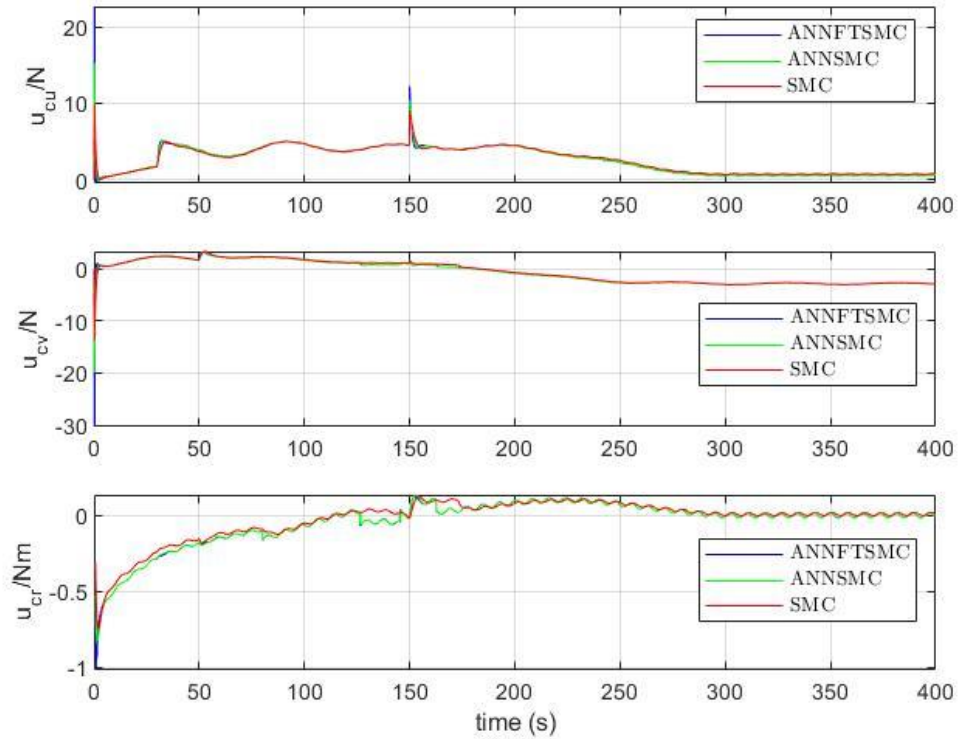
Hình 4.65. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) với các bộ điều khiển khác nhau khi có lỗi cơ cấu chấp hành



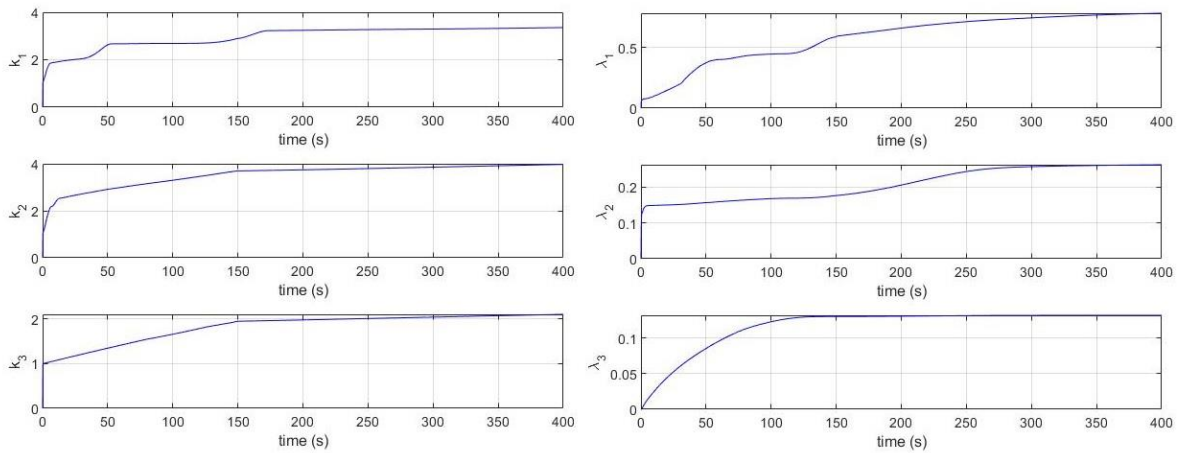
Hình 4.66. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.67. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.68. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 4.69. Hệ số khuếch đại điều khiển k và λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành

Bảng 4.2. So sánh sai số bình phương trung bình giữa các bộ điều khiển khác nhau

Sai số bình phương trung bình	Phương án cập cầu trực tiếp Plan 1		Phương án cập cầu gián tiếp Plan 2		Phương án cập cầu gián tiếp Plan 3	
	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $	$\ E_{xy}\ $	$\ E_{\psi}\ $
ANNFTSMC	0.1345	0.0167	0.0757	0.0198	0.0793	0.0206
ANNSMC	0.2976	0.0191	0.1594	0.0267	0.1277	0.0231
SMC	1.12	1.467	4.64	11.9	4.18	13.16

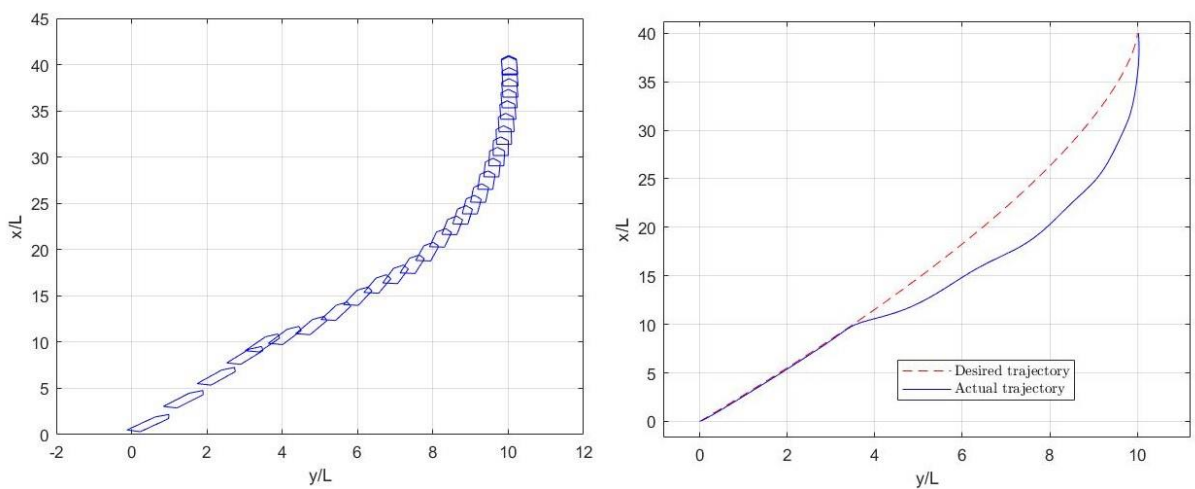
4.5.3 Tự động cập cầu khi cơ cấu chấp hành xảy ra lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành.

Trong mô phỏng này, cơ cấu chấp hành bị lỗi tương tự như trong các trường hợp mô phỏng được trình bày trong phần 4.5.2. Tuy nhiên, giới hạn cho phép tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành theo tài liệu [51] như sau $[-2N \ 2N]$, $[-2N \ 2N]$, $[-1.5Nm \ 1.5Nm]$.

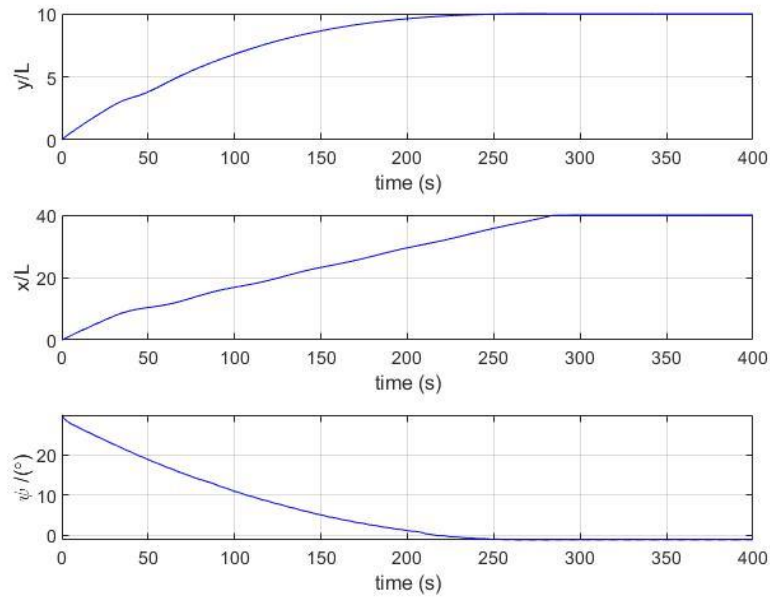
a) Phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

Trong hình 4.70-4.72, dưới tác dụng khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, chất lượng bám quỹ đạo của tàu không tránh khỏi bị ảnh hưởng tuy nhiên bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có khả năng đưa tàu cập cầu đến vị trí, hướng mũi tàu dự kiến đồng thời các vận tốc tàu về không tại vị trí cầu tàu từ thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Hình 4.73 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển

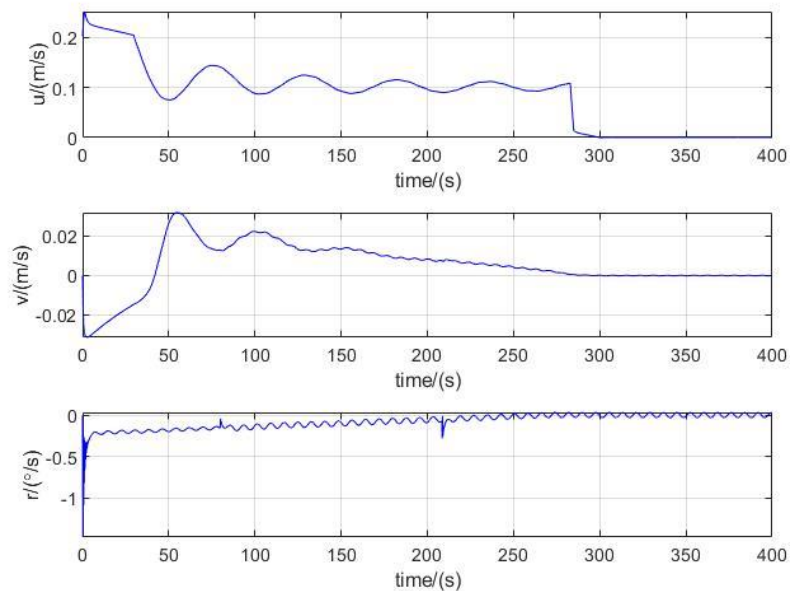
động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} . Trong hình 4.73, khi không có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} vượt quá giới hạn $2N$ từ thời điểm 30s đến 200s. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} được giữ trong giới hạn cho phép $[-2N \ 2N]$ trong suốt quá trình cập cầu.



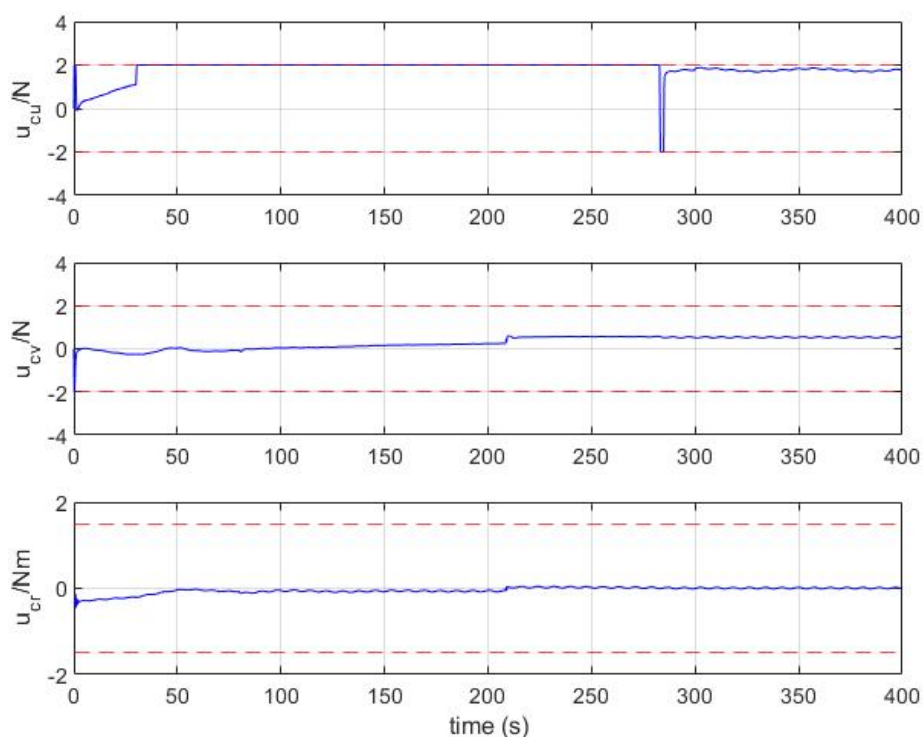
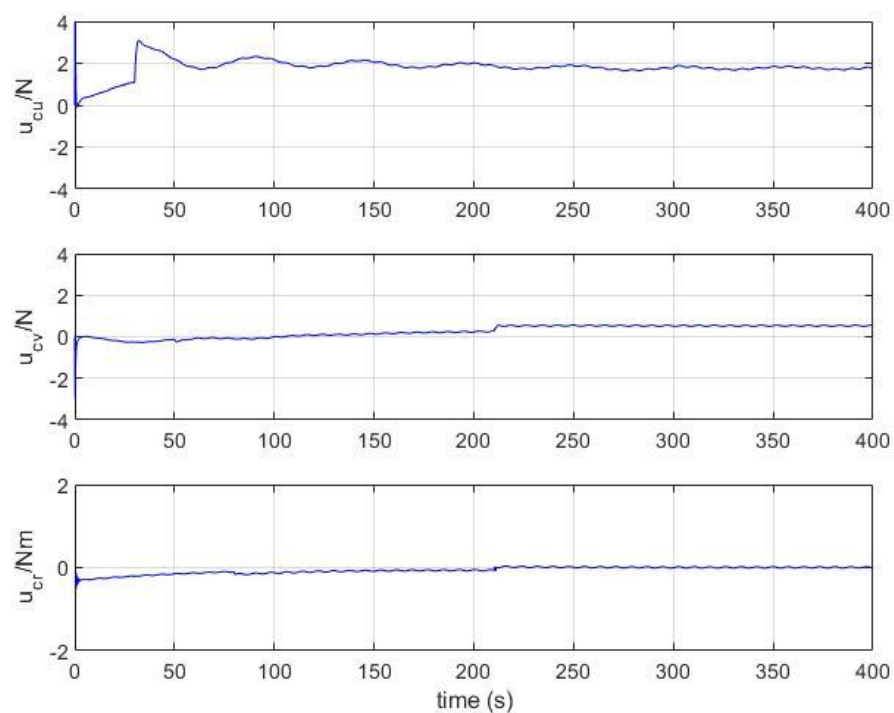
Hình 4.70. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.71. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



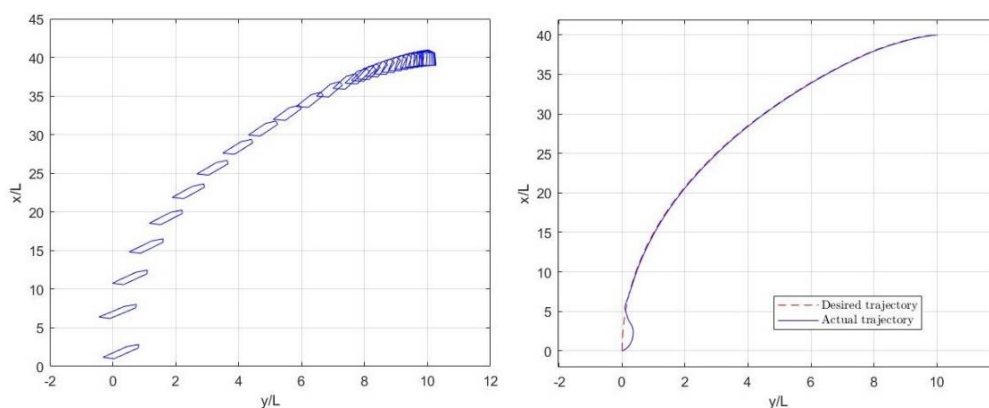
Hình 4.72. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



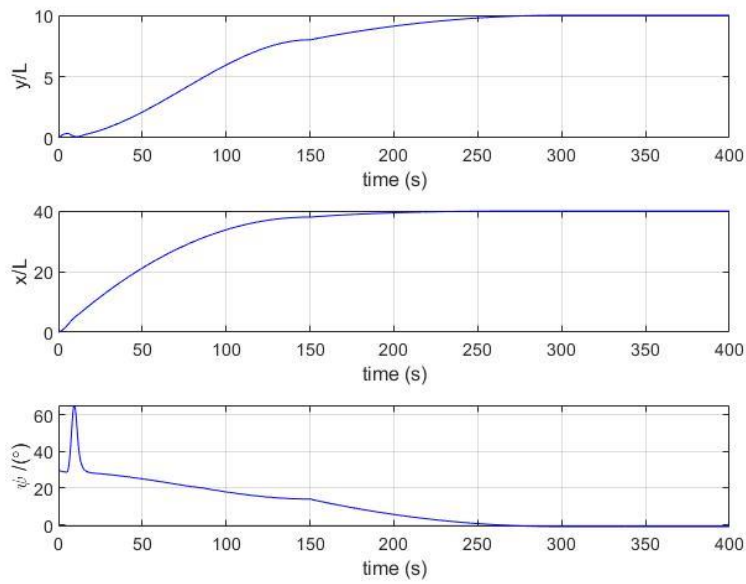
Hình 4.73. So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu trực tiếp (Plan 1)

b) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu vuông góc với cầu tàu (Plan 2)

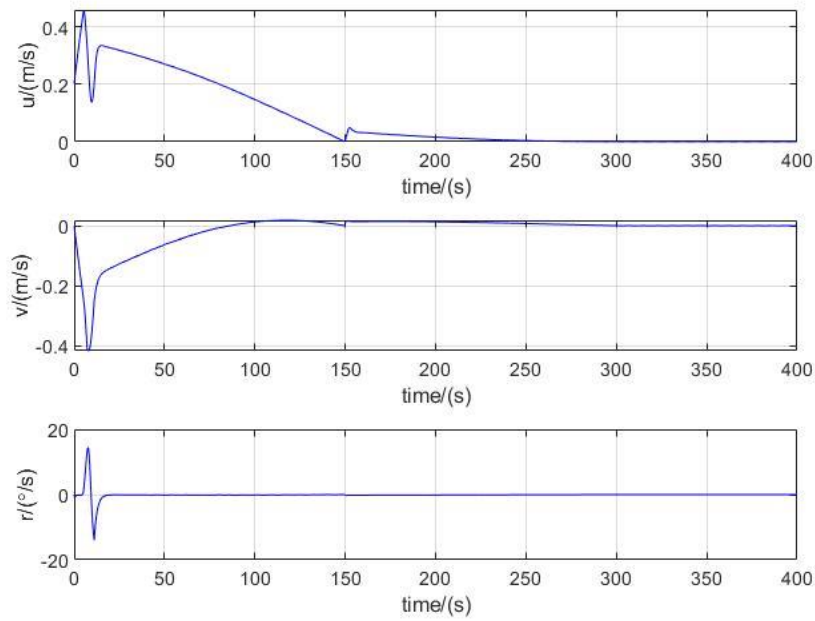
Trong hình 4.74-4.76, dưới tác dụng khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, chất lượng bám quỹ đạo của tàu không tránh khỏi bị ảnh hưởng tuy nhiên bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có khả năng đưa tàu cập cầu đến vị trí, hướng mũi tàu dự kiến đồng thời các vận tốc tàu về không tại vị trí cầu tàu từ thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Hình 4.77 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} . Trong hình 4.77, khi không có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} vượt quá giới hạn $2N$ tại thời điểm 1s đến 150s, trên chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} vượt quá giới hạn $2N$ tại thời điểm 1s, trên chuyển động xoay u_{cr} vượt quá giới hạn $1.5N$ tại thời điểm 1s. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} và chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} được giữ trong giới hạn cho phép $[-2N \ 2N]$ và trên chuyển động xoay u_{cr} được giữ trong giới hạn cho phép $[-1.5N \ 1.5N]$ trong suốt quá trình cập cầu.



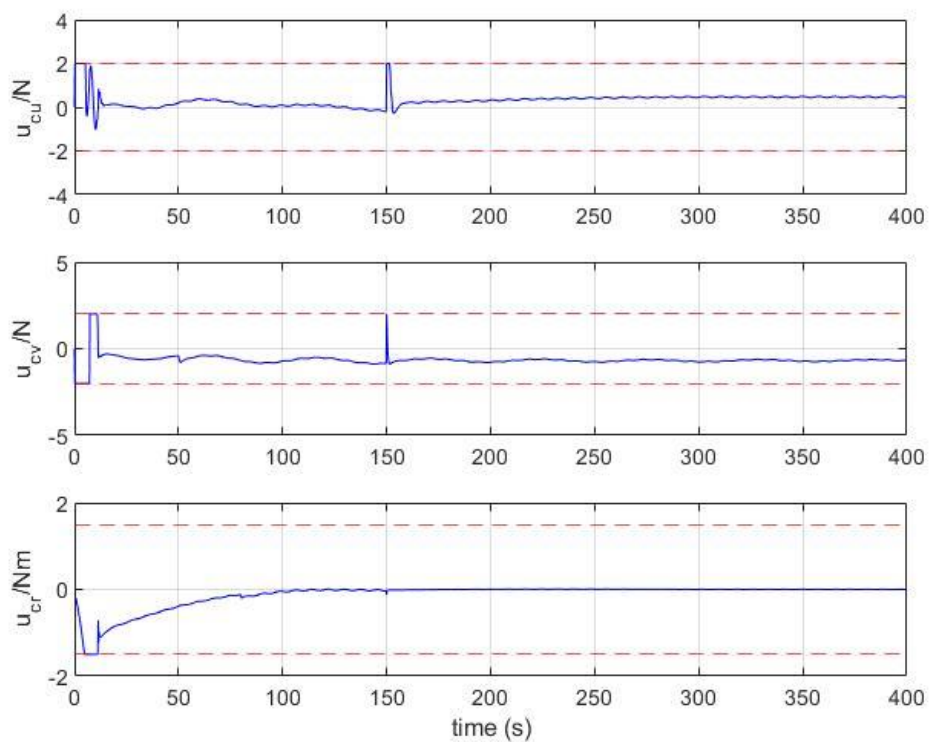
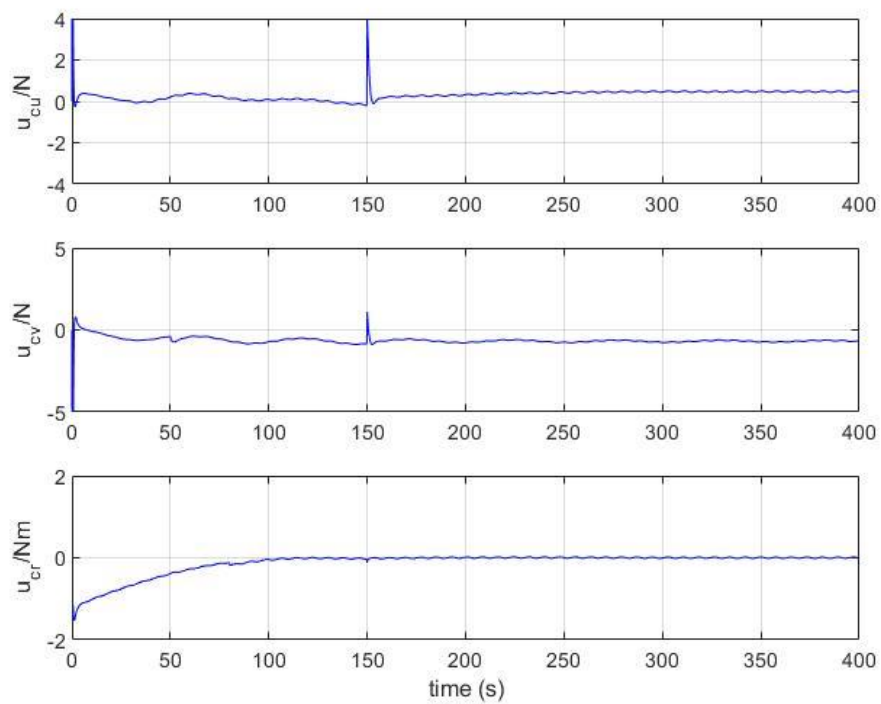
Hình 4.74. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.75. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



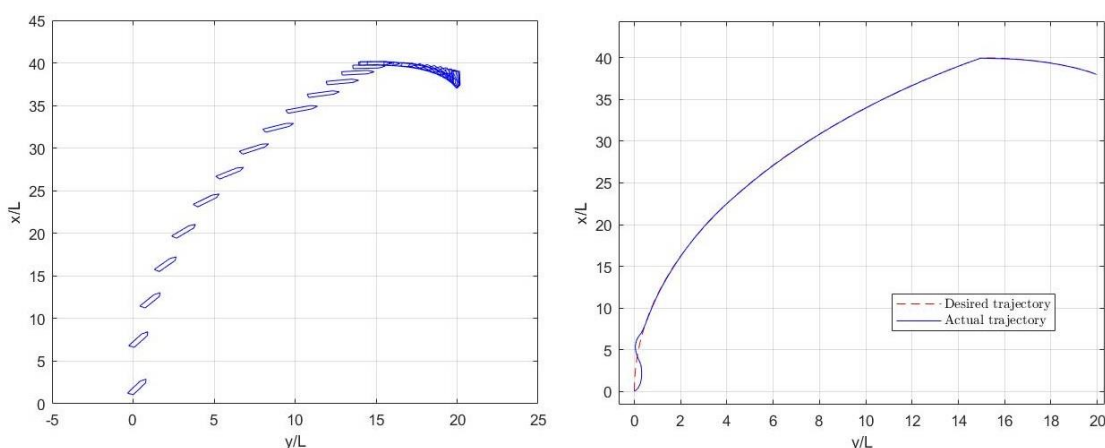
Hình 4.76. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



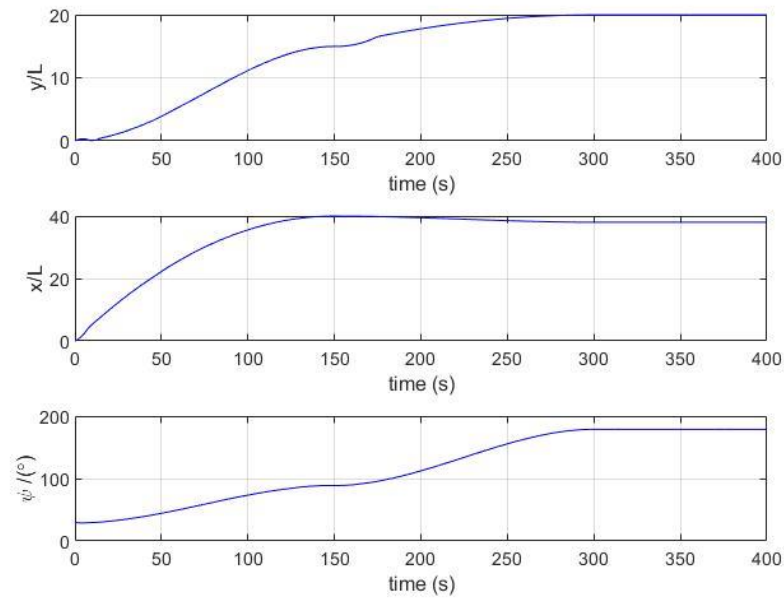
Hình 4.77. So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu gián tiếp (Plan 2)

c) Phương án cập cầu gián tiếp với hướng cập cầu ngược hướng đến cầu (Plan 3)

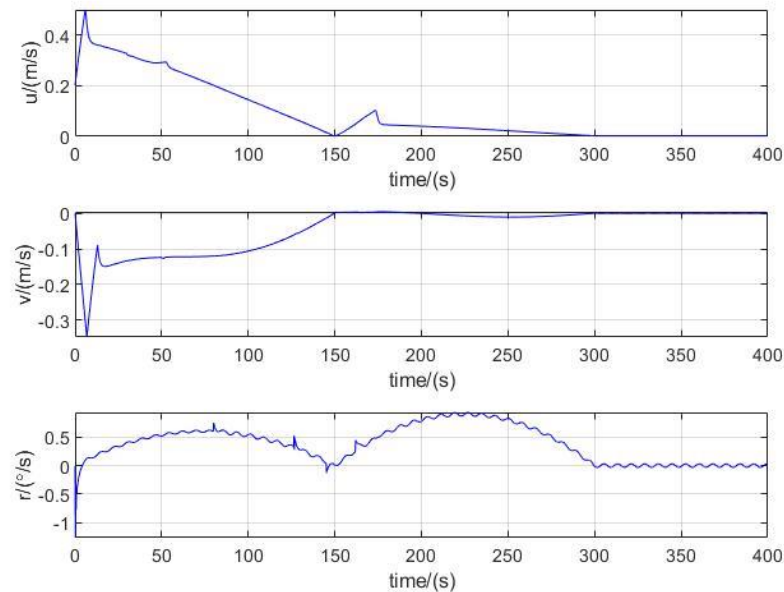
Trong hình 4.78-4.80, dưới tác dụng khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, chất lượng bám quỹ đạo của tàu không tránh khỏi bị ảnh hưởng tuy nhiên bộ điều khiển ANNFTSMC vẫn có khả năng đưa tàu cập cầu đến vị trí, hướng mũi tàu dự kiến đồng thời các vận tốc tàu về không tại vị trí cầu tàu từ thời điểm 300s (tương ứng thời gian 42 phút theo bảng quy đổi trong Phụ lục 1). Hình 4.81 thể hiện đồ thị biến đổi theo thời gian của tín hiệu điều khiển theo chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} , chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} , chuyển động xoay u_{cr} . Trong hình 4.81, khi không có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} vượt quá giới hạn $2N$ tại thời điểm 1s và từ 30s đến 150s, trên chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} vượt quá giới hạn $2N$ tại thời điểm 1s. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành trên chuyển động theo trục dọc tàu u_{cu} và chuyển động dịch chuyển ngang u_{cv} được giữ trong giới hạn cho phép $[-2N \ 2N]$ trong suốt quá trình cập cầu.



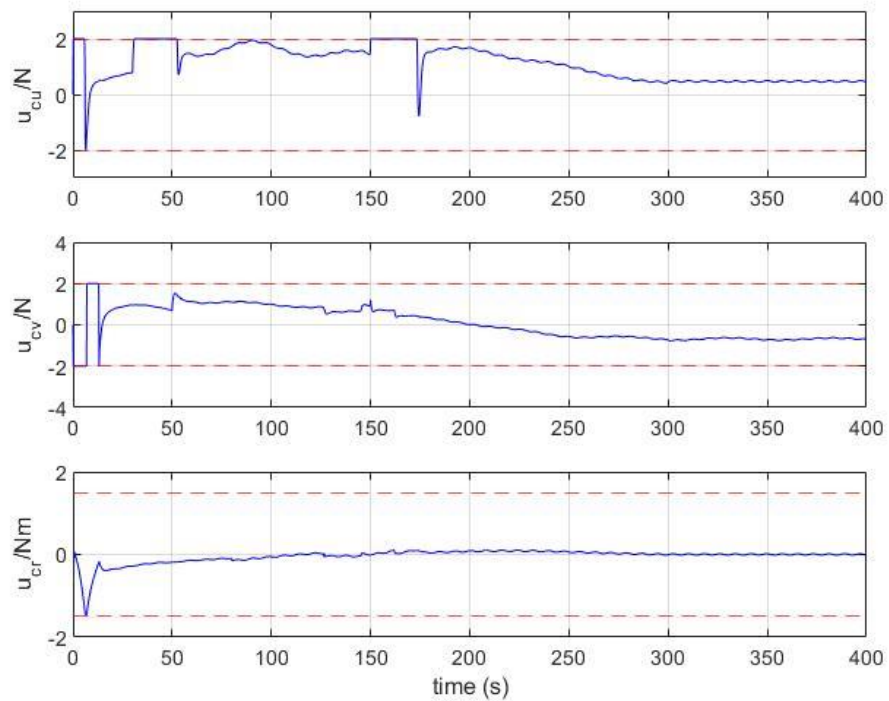
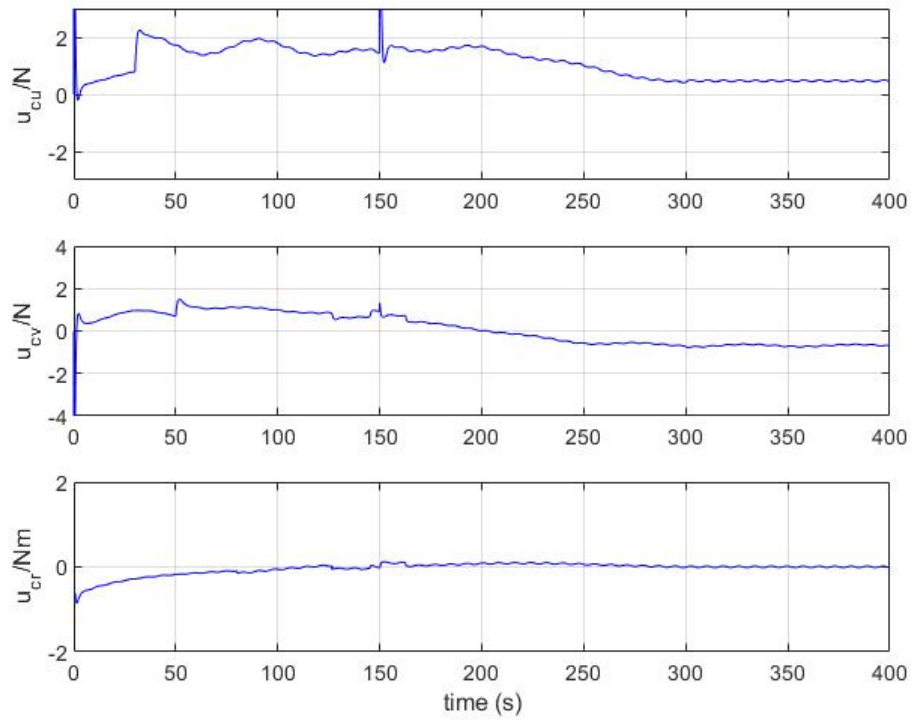
Hình 4.78. Quỹ đạo cập cầu của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.79. Đồ thị biến đổi theo thời gian của vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.80. Đồ thị biến đổi theo thời gian của tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r của tàu theo phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3) khi có lỗi cơ cấu chấp hành và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành



Hình 4.81. So sánh tín hiệu điều khiển khi không có và có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành với phương án cập cầu gián tiếp (Plan 3)

4.6 Kết luận chương 4

Trong chương 4, luận án đã giải quyết được các vấn đề sau:

- Thực hiện mô phỏng Matlab cho thấy các bộ điều khiển được đề xuất có khả năng điều khiển tàu cập cầu theo các phương án cập cầu dự kiến khác nhau;

- Bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo có khả năng giải quyết ảnh hưởng của thành phần bất định của tham số mô hình tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định trong quá trình điều khiển tàu cập cầu. Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm RBF có khả năng xấp xỉ được véc-tơ bất định tổng hợp với sai số nhỏ;

- Bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi có khả năng điều khiển tàu cập cầu trong điều kiện không và có lỗi một phần của các cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển sửa lỗi thụ động nên không cần bộ nhận dạng và phát hiện lỗi, hạn chế các cảm biến cần thiết, đơn giản hóa trong quá trình thiết kế. Tác động của thành phần bất định do tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định đều được bộ điều khiển giải quyết. Khi có giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển vẫn hoạt động ổn định đạt được yêu cầu tự động điều khiển tàu cập cầu;

- Trên cơ sở so sánh các bộ điều khiển được đề xuất trong chương 3 trong điều kiện khi có lỗi một phần các cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển sửa lỗi thích nghi ANNFTSMC đề xuất trong phần 3.3 có khả năng điều khiển bám quỹ đạo cập cầu và hướng cập cầu dự kiến tốt hơn so với các bộ điều khiển trượt SMC đề xuất trong phần 3.1 và bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANNSMC đề xuất trong phần 3.2.

KẾT LUẬN

1. Những vấn đề đã được giải quyết

Trong quá trình thực hiện đề tài, luận án đã đạt được mục đích nghiên cứu đề ra, với các kết quả cụ thể như sau:

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình xác định và nhiễu ngoại cảnh tác động. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Luật điều khiển trượt được tích hợp với các cơ cấu thích nghi và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để giải quyết yếu tố bất định của mô hình toán chuyển động của tàu và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov;

- Đã nghiên cứu thiết kế được bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu với cơ cấu chấp hành bị lỗi và giới hạn tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành. Khi có ảnh hưởng đồng thời của tham số của mô hình bất định, nhiễu ngoại cảnh tác động bất định, cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn, bộ điều khiển được tích hợp thêm các cơ cấu điều khiển lỗi và thành phần tín hiệu điều khiển bão hòa. Luận án đã chứng minh được bộ điều khiển đề xuất ổn định theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Bộ điều khiển cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu giải quyết đồng thời vấn đề lỗi cơ cấu chấp hành và tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành bị giới hạn chưa được đề cập trong các công trình nghiên cứu trước đây;

- Thực hiện mô phỏng kiểm chứng tính ổn định và khả năng điều khiển của các bộ điều khiển được đề xuất.

Như vậy, với các kết quả đã đạt được của luận án, luận án có những đóng góp nhất định về mặt khoa học và thực tiễn.

2. Hướng nghiên cứu tiếp theo của đề tài

Những vấn đề trong quá trình thực hiện đề tài, luận án còn chưa giải quyết được và sẽ được tiếp tục nghiên cứu trong các công trình nghiên cứu tiếp theo bao gồm:

- Bộ điều khiển sửa lỗi mới xét đến trường hợp cơ cấu chấp hành bị lỗi một phần. Trường hợp cơ cấu chấp hành bị kẹt, lỗi toàn phần chưa được xét đến. Ngoài ra, lỗi cảm biến và lỗi thành phần trong hệ thống cũng chưa được xem xét;

- Bộ điều khiển chưa giải quyết được hoàn toàn hiện tượng chattering;

- Bộ điều khiển chưa được kiểm nghiệm trên một mô hình tàu thực tế hoặc trên một con tàu thực.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

I. Công trình công bố trong nước

1. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2024). *Phân tích tổng quan nghiên cứu điều khiển sửa lỗi trong điều khiển tàu thủy*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 12/2024, ISSN 2354-0818, tr 136-139.
2. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2024). *Nghiên cứu tự động điều khiển tàu thủy cập cầu dựa trên bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi khi có cơ cấu chấp hành bị lỗi*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số 79 - 08/2024, ISSN 1859-316X, tr 13-19.
3. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2023). *Nghiên cứu tự động điều khiển cập cầu cho tàu biển với nhiễu ngoại cảnh tác động bất định dựa trên bộ điều khiển trượt tích hợp bộ quan sát nhiễu phi tuyến*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 12/2023, ISSN 2354-0818, tr. 86-88.
4. Vũ Sơn Tùng, Nguyễn Thái Dương, Nguyễn Văn Sướng (2023). *Nghiên cứu tự động điều khiển cập cầu cho tàu biển dựa trên bộ điều khiển trượt với các quỹ đạo cập cầu khác nhau*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 09/2023, ISSN 2354-0818, tr. 135-138.

II. Công trình công bố quốc tế

1. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Dang Hai Van, Nguyen Van Suong (2025). *Adaptive neural network fault-tolerant sliding mode control for ship berthing with actuator faults and input saturation*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 17, 100644, ISSN 2092-6782, (SCIE, Q2). <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100644>
2. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Nguyen Van Suong (2022). *A study on auto-berthing controller based on sliding mode control with different berthing plan*, The 20th Asia Maritime & Fisheries University Forum 2022, pp. 222-238.

3. Vu Son Tung, Nguyen Thai Duong, Nguyen Van Suong (2022). *Adaptive neural network sliding mode auto-berthing controller for full-actuated vessel with uncertain dynamics and unknown disturbances*, The 20th Asia Maritime & Fisheries University Forum 2022, pp. 239-252.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Võ Hồng Hải (2020). *Nghiên cứu ứng dụng bộ điều khiển PID thích nghi dựa trên mạng nơ tron cho hệ thống điều khiển tàu*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Hải Phòng.
2. Nguyễn Phùng Hưng, Phạm Kỳ Quang, Võ Hồng Hải (2015). *Bộ điều khiển PID chỉnh tham số bằng mạng nơ-ron dùng cho máy lái tự động tàu thủy*. Tạp chí Giao thông Vận tải, 9.
3. Tiểu Văn Kinh (2010). *Sổ Tay Hàng Hải*. NXB Giao thông vận tải.
4. Nguyễn Doãn Phước (2012). *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*. NXB Bách Khoa.
5. Nguyễn Doãn Phước (2014). *Điều khiển trượt cơ bản và điều khiển trượt bậc cao*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Thái Nguyên, Số 4, Trang 3-13.
6. Nguyễn Hữu Quyền (2019). *Nghiên cứu giải pháp điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm đầu vào*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Hải Phòng.
7. Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng (2019). *Điều khiển chuyển động theo quỹ đạo tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mô hình dự báo hệ song tuyến*. Tạp chí Giao thông Vận tải, Số 5.
8. Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng (2019). *Thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt dựa theo nguyên lý RHC trên nền LQR*. Tạp chí Khoa học công nghệ, Đại học GTVT Hồ Chính Minh, Trang 32-05.
9. Nguyễn Văn Sướng (2020). *Nghiên cứu tự động cập cầu sử dụng mạng nơ-ron với cấu trúc tách kênh*. Tạp chí Công nghệ Hàng hải, Đại học Hàng hải Việt Nam, Số 64.
10. Nguyễn Văn Sướng (2021). *Tự động điều khiển tàu cập cầu xét đến ảnh hưởng của gió sử dụng mạng nơ-ron tách kênh*. Tạp chí Công nghệ Hàng hải, Đại học Hàng hải Việt Nam, Số 65.
11. Nguyễn Viết Thành (2007). *Điều động tàu*. NXB Khoa học và kỹ thuật.
12. Hoàng Thị Tú Uyên (2018). *Nghiên cứu ứng dụng lý thuyết điều khiển thích nghi để nâng cao chất lượng hệ thống lái tự động tàu nổi có choán nước*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, Hà Nội.

Tiếng Anh

13. R.X. Bui, Z.J. Liu, J.Q. Hui (2007). *Berthing controller of underactuated ship with nonlinear sliding mode*. J. Traffic Transp. Eng, 7(4), p. 27-29.
14. L. Chen, M. Liu, Y. Shi, H. Zhang, E. Zhao (2020). *Adaptive Fault Estimation for Unmanned Surface Vessels With a Neural Network Observer Approach*. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 68(1), p. 416 - 425.
15. M. Chen, B. Jiang, R. Cui (2016). *Actuator fault-tolerant control of ocean surface vessels with input saturation*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 26(3), p. 542-564.
16. J. Cieslak, D. Efimov, D. Henry (2015). *Transient management of a supervisory fault-tolerant control scheme based on dwell-time conditions*. Int. J. Adapt. Control. Signal Process., 29, p. 123-142.
17. Z. Dong, K. Liu, S. Wang (2022). *Sliding Mode Disturbance Observer-Based Adaptive Dynamic Inversion Fault-Tolerant Control for Fixed-Wing UAV*. Drones, 6(10), p. 295.
18. Thor I. Fossen (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons Ltd.
19. Thor I. Fossen (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*. John Wiley & Sons Ltd.
20. M. Fu, M. Li, W. Xie (2018). *Finite-Time Trajectory Tracking Fault-Tolerant Control for Surface Vessel Based on Time-Varying Sliding Mode*. IEEE Access, 6, p. 2425-2433.
21. D.K. Han, D. Panagou (2019). *Robust Multitask Formation Control via Parametric Lyapunov-Like Barrier Functions*. Autom. Control 63, p. 4439–4453.
22. S. Han, Y.T. Wang, L. Wang, H.C. He (2021). *Automatic Berthing for An Underactuated Unmanned Surface Vehicle: A real-time motion planning approach*. Ocean Eng., 235, p. 109352.
23. W. Han, Z. Wang (2019). *H-/L ∞ fault detection observer for linear parameter-varying systems with parametric uncertainty*. International journal of robust and nonlinear control, 29(10), p. 2912-2926.
24. L. Hao, H. Zhang, G. Guo, H. Li (2019). *Quantized Sliding Mode Control of Unmanned Marine Vehicles: Various Thruster Faults Tolerated With a Unified Model*. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst., 51(3), p. 1-15.
25. L.Y. Hao, H. Zhang, H. Li, T.S Li (2020). *Sliding mode fault-tolerant control for unmanned marine vehicles with signal quantization and time-delay*. Ocean Eng., 215, p. 107882.
26. Valentin Heller (2011). *Scale effects in physical hydraulic engineering models*. Journal of Hydraulic Research, 49(3), p. 293-306.

27. S. Hong, J. Kim (2021). *Reinforcement Learning Based Tugboats Control for Autonomous Ship Berthing*. J. KNST, 4, p. 72-77.
28. Nguyen Phung Hung (2007). *A Study on the Automatic Ship Control Based on Adaptive Neural Networks*. Thesis of Doctor, Korea Maritime University.
29. Nguyen Phung Hung, Jung Y. (2007). *Automatic berthing control of ship using adaptive neural networks*. J. Kor. Navig. Port Res., 31(7), p. 563-568.
30. Thor I.Fossen (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons Ltd.
31. N.K. Im, L.S. Keon, B.H. Do (2007). *An application of ANN to automatic ship berthing using selective controller*. Int. J. Mar. Navigat. Saf. Sea Transp., 1, p. 101-105.
32. B. Jia, L. Sun, Y. Wang, X. Liu, W. Dang (2021). *Switched Adaptive Sliding Mode Disturbance Observer for Nonlinear Fault-Tolerant Flight Control*. IEEE Access, 9, p. 92614 - 92628.
33. N.Y Ko, G. Song, H.T Choi, J. Sur (2021). *Fault Detection and Diagnosis of Sensors and Actuators for Unmanned Surface Vehicles*. 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS).
34. C. Liu, X.Zhao, X.Wang, X. Ren (2023). *Adaptive fault identification and reconfigurable fault-tolerant control for unmanned surface vehicle with actuator magnitude and rate faults*. Robust and Nonlinear Control 33(10), p. 5463-5483.
35. Jinkun Liu (2013). *Radial Basis Fuction (RBF) Neural Network Control for Mechanical System: Design, Analysis and Matlab Simulation*. Tsinghua University Press, Springer.
36. Jinkun Liu, Xinhua Wang (2011). *Advanced sliding mode control for mechanical system*. Tsinghua University Press.
37. Yang Liu, N.K. Im, Qiang Zhang, Guibing Zhu (2022). *Adaptive Auto-Berthing Control of Underactuated Vessel Based on Barrier Lyapunov Function*. Journal of Marine Science and Engineering, 10(2), p. 279-297.
38. Z. Liu, Y.Zhang, C. Yuan (2016). *Active fault tolerant control of an unmanned surface vehicle*. IEEE Access, 4.
39. Y. Luo, A. Serrani, S.Yurkovich, M.W. Oppenheimer, D.B. Doman (2007). *Model-predictive dynamic control allocation scheme for reentry vehicles*. J. Guid. Control. Dyn., 30, p. 100-113.
40. Tran Van Luong, Im N. (2012). *A study on ship automatic berthing with assistance of auxiliary devices*. Int. J. Nav. Architect. Ocean Eng., 4(3), p. 199-210.

41. Van M. (2019). *Adaptive neural integral sliding-mode control for tracking control of fully actuated uncertain surface vessels*. International journal of robust and nonlinear control, 29(5), p. 1537-1557.
42. Im N., Hasegawa K. (2002). *A study on automatic ship berthing using parallel neural controller(2nd report) : motion identification considering lateral speed and angular velocity to cope with disturbances*. Kansai Soc. Nav. Archit. Jpn. 237 (237),127–132.
43. Mao Wei Nisson (2018). *Autonomous Docking and Navigation of ships using Model Predictive Control*. KTH Royal Institute of Technology.
44. J.Y. Park, N. Kim (2014). *Design of an adaptive backstepping controller for auto-berthing a cruise ship under wind loads*. Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. Appl. Artif. Intell., 6, p. 347-360.
45. R.J. Patton (1997). *Fault-tolerant control: The 1997 situation*. IFAC Proc., 30, p. 1029-1051.
46. Bui Van Phuoc, Kawai Hideki, Kim Young Bok, Lee Kwon Soon (2011). *A ship berthing system design with four tug boats*. Journal of Mechanical Science and Technology, 25(5), p. 1257-1264.
47. Liu Qi, Li Tieshan, Shan Qihe, Yu Renhai, Gao Xiaoyang (2021). *Virtual guide automatic berthing control of marine ships based on heuristic dynamic programming iteration method*. Neurocomputing, 437, p. 289-299.
48. H. Shen, J.H. Park, Z.G. Wu (2014). *Finite-time reliable \mathcal{L}_2 - $\mathcal{L}_\infty/\mathcal{H}_\infty$ control for Takagi–Sugeno fuzzy systems with actuator faults*. IET Control Theory Appl., 8, p. 688-696.
49. H. Shen, L. Su, J.H. Park (2017). *Reliable mixed H_∞ /passive control for T–S fuzzy delayed systems based on a semi-Markov jump model approach*. Fuzzy Sets Syst., 314, p. 79-98.
50. Li Shijie, Liu Jialun, Negenborn Rudy R., Wu Qing (2020). *Automatic Docking for Underactuated Ships Based on Multi-Objective Nonlinear Model Predictive Control*. IEEE Access, 8, p. 70044 - 70057.
51. Roger Skjetne, Thor I. Fossen, Petar V. Kokotovic (2005). *Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory*. Automatica, 41, p. 289-298.
52. Roger Skjetne, Øyvind Smogeli, Thor I. Fossen (2004). *Modeling, identification, and adaptive maneuvering of Cybership II: A completed design with experiments*. Proc. IFAC Conf. Contr. Appl. Marine Systems.
53. M. Staroswiecki, H. Yang, B. Jiang (2007). *Progressive accommodation of parametric faults in linear quadratic control*. Automatica, 43, p. 2070-2076.

54. Nguyen Van Suong (2016). *A Study on An Automatic Ship Berthing Based on Artificial Neural Network Controller Using Head-up Coordinate System*. Thesis of Doctor, Mokpo National Maritime University.
55. Nguyen Van Suong, Im N. (2019). *Automatic ship berthing based on fuzzy logic*. *Int. J. FUZZY Log. Intell. Syst.*, 19(3), p. 163–171.
56. Elmokadem Taha, Mohamed Zribi, Kamal Youcef-Toumi (2016). *Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs*. *Nonlinear Dynamics*, 84, p. 1079–1091.
57. Le Wang, Shijie Li, Jialun Liu, Qing Wu, Rudy R. Negenborn (2022). *Ship docking and undocking control with adaptive-mutation beetle swarm prediction algorithm*. *Ocean Engineering*, 251, p. 111021.
58. N. Wang, Z. Deng (2020). *Finite-Time Fault Estimator Based Fault-Tolerance Control for a Surface Vehicle With Input Saturations*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), p. 1172 - 1181.
59. Y. Wang, B. Jiang, Z. Wu, S. Xie, Y. Peng (2020). *Adaptive Sliding Mode Fault-Tolerant Fuzzy Tracking Control With Application to Unmanned Marine Vehicles*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(11), p. 6691 - 6700.
60. H. Xue, Y.Ou (2023). *A novel asymmetric barrier Lyapunov function-based fixed-time ship berthing control under multiple state constraints*. *Ocean Eng.*, 281, p. 114756.
61. Ahmed Y.A., Hasegawa K. (2012). *Automatic ship berthing using artificial neural network based on virtual window concept in wind condition*. *Proc. 13th IFAC Symp. Control Transp. Syst.*
62. Ahmed Y.A., Hasegawa K. (2013). *Automatic ship berthing using artificial neural network trained by consistent teaching data using nonlinear programming method*. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 26, p. 2287-2234.
63. H. Yamato, H. Uetsuki, T. Uetsuki (1990). *Automatic berthing by neural controller*. *Proc. 9th Ship Control Syst. Symp.*
64. Z. Yan, Z. Meijuan, Z. Qiang (2020). *Auto-Berthing Control of Marine Surface Vehicle Based on Concise Backstepping*. *IEEE Access*, 8, p. 197059-197067.
65. S. Zeghlache, K. Kara, D. Saigaa (2015). *Fault tolerant control based on interval type-2 fuzzy sliding mode controller for coaxial trirotor aircraft*. *ISA Trans.*, 59, p. 215–231.
66. C. Zhang, C. Cao, C. Guo, T. Li, M. Guo (2021). *Navigation Multisensor Fault Diagnosis Approach for an Unmanned Surface Vessel Adopted Particle-Filter Method*. *IEEE Sensors Journal*, 21(21), p. 27093 - 27105.

67. C.J. Zhang, Y.F. Yang, Z. Su (2019). *A Method of Berthing Path Tracking Control for Semi-submersible Platform*. *Ship Eng*, 41, p. 80-85.
68. J. Zhang, S. Yu, Y. Yan (2020). *Fixed-time velocity-free sliding mode tracking control for marine surface vessels with uncertainties and unknown actuator faults*. *Ocean Eng.*, 201, p. 107107.
69. J. Zhang, S. Yu, Y. Yan, D. Wu (2020). *Fixed-time output feedback sliding mode tracking control of marine surface vessels under actuator faults with disturbance cancellation*. *Appl. Ocean Res.*, 104, p. 102378.
70. Y. Zheng, Z. Liu, L. Liu (2018). *Robust MPC-Based Fault-Tolerant Control for Trajectory Tracking of Surface Vessel*. *IEEE Access*, 6, p. 14755 - 14763.
71. Z. Zheng, L. Sun, L. Xie (2018). *Error-Constrained LOS Path Following of a Surface Vessel With Actuator Saturation and Faults*. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, 48(10), p. 1794 - 1805.
72. Tianyu Zou, Zhipeng Shen, Changsheng Dai (2018). *Adaptive Iterative Sliding Mode Berthing Control for Underactuated Ship Based on Chaotic Particle Swarm*. *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*.

PHỤ LỤC 1
BẢNG QUY ĐỔI CÁC THÔNG SỐ THEO TỈ LỆ TÀU MÔ PHỎNG

Bảng quy đổi được xây dựng dựa trên luật quy đổi tỉ lệ Froude [26].

Bảng PL1. Bảng quy đổi các thông số theo tỉ lệ tàu mô phỏng

Thông số	Hệ số quy đổi theo tỉ lệ mô phỏng (tàu thực/tàu mô phỏng)
Chiều dài, chiều rộng, mớn	$Tỉ\ lệ$
Diện tích mặt hứng gió	$(Tỉ\ lệ)^2$
Thể tích, lượng giãn nước, lực	$(Tỉ\ lệ)^3$
Tốc độ	$(Tỉ\ lệ)^{1/2}$
Góc	1
Tốc độ quay mũi	$1/(Tỉ\ lệ)^{1/2}$
Thời gian	$(Tỉ\ lệ)^{1/2}$
Gia tốc	1

Mô hình tàu “Cyber Ship II” có tỉ lệ mô phỏng (tàu thực/tàu mô phỏng) là 70. Các thông số trong quá trình mô phỏng được quy đổi theo bảng PL2.

Bảng PL2. Bảng quy đổi các thông số theo tỉ lệ mô hình tàu Cyber Ship II

Thông số	Hệ số quy đổi mô hình tàu Cyber Ship II sang tàu thực
Chiều dài, chiều rộng, mớn	70
Diện tích mặt hứng gió	70^2
Thể tích, lượng giãn nước, lực	70^3
Tốc độ	$\sqrt{70}$
Góc	1
Tốc độ quay mũi	$1/\sqrt{70}$
Thời gian	$\sqrt{70}$
Gia tốc	1

PHỤ LỤC 2

MÔ HÌNH NHIỀU NGOẠI CẢNH TÁC ĐỘNG ĐẾN CHUYỂN ĐỘNG CỦA TÀU

Mô hình tác động của nhiễu ngoại cảnh đến chuyển động của tàu được mô tả trong [18] bao gồm:

- Mô hình tác động của dòng chảy
- Mô hình tác động của gió
- Mô hình tác động của sóng

a) Tác động của dòng chảy đến chuyển động của tàu

Khi có tác động của dòng chảy, véc-tơ vận tốc của tàu \mathbf{v} trong công thức $\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_o(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}_o\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_m + \mathbf{d}_e$ của mô hình toán động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định (2.17) được thay thế bằng véc-tơ vận tốc tương đối \mathbf{v}_r :

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c \quad (\text{PL.1})$$

Trong đó, $\mathbf{v}_c = [u_c \ v_c \ r_c]^T$ là vận tốc của dòng chảy.

Luận án sử dụng mô hình dòng chảy biến thiên chậm, $\dot{\mathbf{v}}_c \approx 0$ và thành phần r_c có thể được bỏ qua.

Công thức (2.17) được viết lại như sau:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_o(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}_o\mathbf{v}_r = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_m + \mathbf{d}_e \quad (\text{PL.2})$$

$$\text{Trong đó: } \mathbf{v}_r = [u_r \ v_r \ r_r]^T, \mathbf{C}_o(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_r \\ 0 & 0 & m_{11}u_r \\ m_{22}v_r & -m_{11}u_r & 0 \end{bmatrix}$$

Véc-tơ vận tốc tương đối \mathbf{v}_r :

$$\begin{cases} u_r = u - u_c \\ v_r = v - v_c \\ r_r = r \end{cases} \quad (\text{PL.3})$$

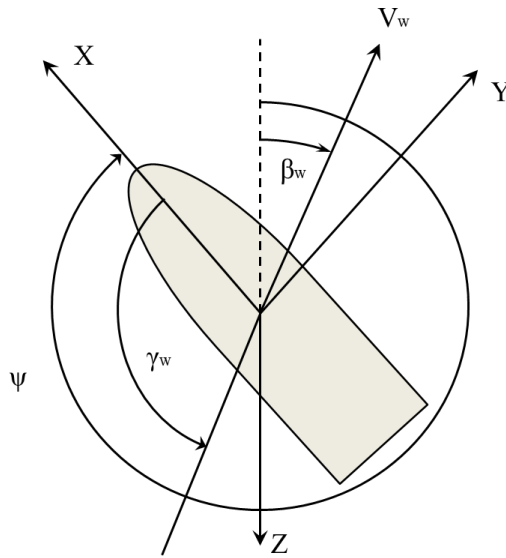
$$\begin{cases} u_c = V_c \cos(\gamma_c - \psi) \\ v_c = V_c \sin(\gamma_c - \psi) \end{cases} \quad (\text{PL.4})$$

Trong đó: V_c và γ_c là tốc độ dòng chảy và hướng dòng chảy.

Khi đó theo tài liệu [18], nhiễu ngoại cảnh tác động đến chuyển động của tàu bao gồm lực và mômen tác động của gió \mathbf{d}_{wind} và của sóng \mathbf{d}_{wave} :

$$\mathbf{d}_e = \mathbf{d}_{wind} + \mathbf{d}_{wave} \quad (\text{PL.5})$$

b) Tác động của gió đến chuyển động của tàu



Hình PL.1. Tốc độ gió V_w , hướng gió β_w và góc hứng gió γ_w với hướng mũi tàu

Đặt V_w và γ_w là tốc độ gió và góc hứng gió. Khi tàu không chuyển động, các lực và mômen tác động của gió lên tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm

ngang $\mathbf{d}_{wind} = [X_{wind}, Y_{wind}, N_{wind}]$ như sau:

$$\begin{cases} X_{wind} = qC_X(\gamma_w)A_{Fw} \\ Y_{wind} = qC_Y(\gamma_w)A_{Lw} \\ N_{wind} = qC_N(\gamma_w)A_{Lw}L \end{cases} \quad (PL.6)$$

Trong đó: A_{Fw} và A_{Lw} là mặt chiếu của tàu trên đường nước lên mặt phẳng ngang tàu và mặt phẳng trục dọc tàu, L là chiều dài toàn bộ của tàu.

$$\gamma_w = \psi - \beta_w - \pi \quad (PL.7)$$

Trong đó: β_w là hướng gió.

Áp lực động của gió biểu kiến q được xác định như sau:

$$q = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 \quad (PL.8)$$

Trong đó: ρ_a là tỉ trọng không khí. V_w là vận tốc trung bình của gió thỏa mãn điều kiện đường bao:

$$V_w(h) = V_{10}(h_s/10)^{1/7} \quad (PL.9)$$

Trong đó: V_{10} là vận tốc gió 10m trên mặt nước biển, h_s là độ cao trên mặt nước biển và. Các hệ số gió C_X , C_Y , C_N được xác định với độ cao $h_s=10m$.

Đối với tàu đang chuyển động, d_{wind} được xác định như sau:

$$\begin{cases} X_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 C_X(\gamma_{rw})A_{Fw} \\ Y_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 C_Y(\gamma_{rw})A_{Lw} \\ N_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 C_N(\gamma_{rw})A_{Lw}L \end{cases} \quad (PL.10)$$

Với:

$$V_{rw} = \sqrt{u_{rw}^2 + v_{rw}^2} \quad (PL.11)$$

$$\gamma_{rw} = \tan^{-1}(u_{rw} / v_{rw}) \quad (\text{PL.12})$$

Tốc độ gió biểu kiến:

$$u_{rw} = u - u_w \quad (\text{PL.13})$$

$$v_{rw} = v - v_w \quad (\text{PL.14})$$

Trong đó:

$$u_w = V_w \cos(\beta_w - \psi) \quad (\text{PL.15})$$

$$v_w = V_w \sin(\beta_w - \psi) \quad (\text{PL.16})$$

Có nhiều nghiên cứu khác nhau được thực hiện để xác định các hệ số gió. Luận án sử dụng hệ số gió theo nghiên cứu của Blendermann (1994) dựa trên lý thuyết mặt Helmholtz-Krichhoff được xác định như sau:

$$\begin{cases} C_X = -CD_{IAF} \frac{\cos(\gamma_{rw})}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_{IAF}}{CD_t}\right) \sin^2(2\gamma_{rw})} \\ C_Y = CD_t \frac{\sin(\gamma_{rw})}{1 - \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{CD_{IAF}}{CD_t}\right) \sin^2(2\gamma_{rw})} \\ C_N = \left[\frac{s_L}{L} - 0.18 \left(\gamma_{rw} - \frac{\pi}{2}\right) \right] C_Y \end{cases} \quad (\text{PL.17})$$

Trong đó: CD_{IAF} và CD_t là hệ số cản mặt phẳng trực dọc và mặt phẳng nằm ngang, δ là hệ số lực dạt; s_L là tọa độ theo trục dọc tàu của tâm mặt phẳng trực dọc tàu;

Đối với tàu “Cyber ship II” là loại tàu dịch vụ, các hệ số CD_t , CD_t và δ được chọn như trong tài liệu [18]: $CD_{IAF}=0.55$ khi $|\gamma_{rw}| \leq \frac{\pi}{2}$ và $CD_{IAF}=0.80$

khi $|\gamma_{rw}| > \frac{\pi}{2}$; $CD_t=0.9$; $\delta=0.55$.

c) Tác động của sóng đến chuyển động của tàu

Luận án sử dụng mô hình sóng bề mặt được tạo bởi gió. Trong thực tế, quá trình phân tích ảnh hưởng của sóng là tương đối phức tạp đặc biệt trong điều kiện biển thay đổi nhanh. Để đơn giản hóa và tăng khả năng ứng dụng trong quá trình thiết kế các bộ điều khiển cho tàu, mô hình sóng được giả định xấp xỉ dưới dạng tuyến tính. Theo tài liệu [19], véc-tơ và mômen sóng tác động lên tàu chuyển động 3 bậc tự do trên mặt phẳng nằm ngang

$\mathbf{d}_{wave} = [X_{wave}, Y_{wave}, N_{wave}]$ được xác định như sau:

$$\begin{cases} X_{wave}(t) = \sum_1^N \rho g B L T \cos(\beta) s_i(t) \\ Y_{wave}(t) = \sum_1^N \rho g B L T \sin(\beta) s_i(t) \\ N_{wave}(t) = \sum_1^N \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin(2\beta) s_i^2(t) \end{cases} \quad (PL.18)$$

Trong đó: ρ là tỉ trọng nước, B và L là chiều rộng và chiều dài của tàu, T là mớn nước trung bình của tàu, $\beta = \psi_w - \psi$ là góc giữa hướng tác động của sóng ψ_w và hướng mũi tàu ψ , $s_i(t)$ là độ dốc sóng được xác định dựa trên hàm phổ sóng $S(\omega_i)$.

$$s_i(t) = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \left(\frac{\omega_i^2}{g}\right) \sin(\omega_i t) \quad (PL.19)$$

Trong đó: $\Delta\omega$ là độ dài tần số sóng ω khi chia phổ sóng $S(\omega)$ thành N khoảng.

Do quá trình cập cầu được thực hiện trong điều kiện độ sâu vùng nước hạn chế, luận án sử dụng phổ sóng JONSWAP (1969) theo tài liệu [18] được xác định như sau:

$$S(\omega) = 155 \frac{H_s^2}{(0.834T_o)^4} \omega^{-5} \exp\left(\frac{-944}{(0.834T_o)^4} \omega^{-4}\right) 3.33^Y \quad (\text{PL.20})$$

Trong đó: T_o là chu kỳ sóng; H_s là độ cao sóng.

Hệ số Y được xác định như sau:

$$Y = \exp\left[-\left(\frac{0.191\omega(0.834T_o)}{\sqrt{2}\sigma_w}\right)^2\right] \quad (\text{PL.21})$$

Trong đó: $\sigma_w=0.07$ khi $\omega \leq 5.24/(0.834T_o)$ và $\sigma_w=0.09$ khi $\omega > 5.24/(0.834T_o)$.

PHỤ LỤC 3

MÔ HÌNH TOÁN ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TÀU CYBER SHIP II

Mô hình toán động lực học 3 bậc tự do mô tả chuyển động trên mặt phẳng ngang của tàu khi tham số của mô hình bất định và nhiễu ngoại cảnh tác động bất định của tàu Cyber Ship II được sử dụng trong luận án dựa trên mô hình trong tài liệu [18] và các hệ số động lực học và động học theo Bảng PL3 trong tài liệu [52] như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C_o(v)v + D_o v = \tau + d_m + d_e \end{cases} \quad (\text{PL22})$$

Trong đó:

$\eta = [x \ y \ \psi]^T$ là véc-tơ thể hiện vị trí tàu (x,y) và hướng mũi tàu ψ ;

$v = [u \ v \ r]^T$ là tốc độ tiến lùi u , tốc độ dạt ngang v , tốc độ quay r trong hệ tọa độ tàu;

$J(\eta)$ là ma trận chuyển đổi giữa hệ tọa độ tàu và hệ tọa độ địa tâm:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Ma trận quán tính } M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \text{ với}$$

$m_{11} = m - X_{\dot{u}}$; $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$; $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ là hệ số quán tính bao gồm ảnh hưởng tăng khối lượng (có giá trị dương không đổi);

$d_m = [d_{mu} \ d_{mv} \ d_{mr}]^T$ là thành phần bất định trong tham số của mô hình toán chuyển động của tàu.

Thành phần xác định của ma trận Coriolis và hướng tâm

$$C_o(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}$$

Thành phần xác định của ma trận giảm chấn thủy động lực học

$$D_o = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$
 là ma trận giảm chấn thủy động lực học

với $d_{11} = -X_u$; $d_{22} = -Y_v$; $d_{33} = -N_r$ là hệ số giảm chấn thủy động lực lên chuyển động theo trục dọc tàu (*Surge*), chuyển động dịch chuyển ngang (*Sway*), chuyển động xoay (*Yaw*);

τ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu.

$d_e = [d_{eu} \quad d_{ev} \quad d_{er}]^T$ là véc-tơ lực và mômen do nhiễu ngoại cảnh tác động.

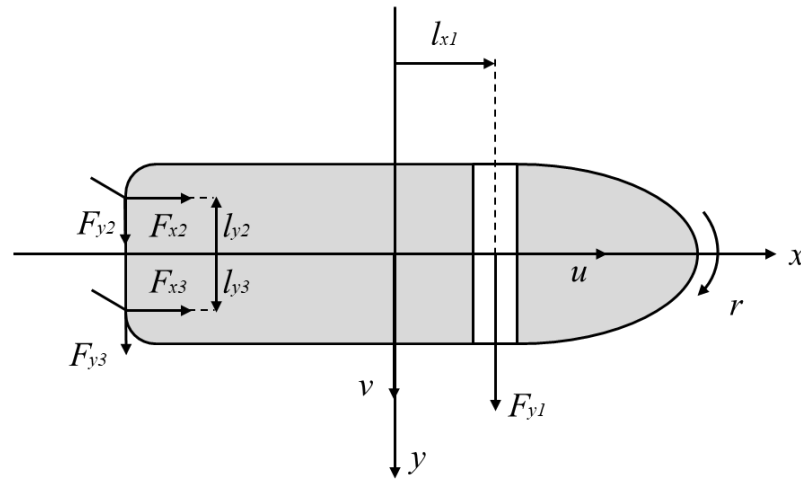
Bảng PL3. Bảng hệ số động lực học và động học của tàu “Cyber ship II”

Hệ số	Giá trị	Hệ số	Giá trị
m	23.8kg	I_z	1.76kgm ²
L	1.255m	X_u	-0.7225kg/s
$X_{\dot{u}}$	-2.0kg	Y_v	-0.8897kg/s
$Y_{\dot{v}}$	-10.0kg	N_r	-1.9 kgm ² /s
$N_{\dot{r}}$	-1.0kgm ²		

Hình PL.2. mô tả lực sinh ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu “Cyber ship II”:

- Lực F_{y1} sinh ra bởi chân vịt mạn gây lực dịch chuyển ngang của tàu;

- Lực F_{x2} và F_{x3} sinh ra bởi 2 chân vịt chính gây ra lực dịch chuyển theo trục dọc của tàu;
- Lực F_{y2} và F_{y3} sinh ra bởi 2 bánh lái gây ra mômen quay mũi của tàu.



Hình PL.2. Lực sinh ra bởi các cơ cấu chấp của tàu “Cyber ship II”