BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN XUÂN NGỌC

NGHIÊN CỨU ỔN ĐỊNH LẬT NGANG ĐỘNG CỦA Ô TÔ CHUYÊN DÙNG CHỞ CHẤT LỎNG

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Hà Nội, 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN XUÂN NGỌC

NGHIÊN CỨU ỔN ĐỊNH LẬT NGANG ĐỘNG CỦA Ô TÔ CHUYÊN DÙNG CHỞ CHẤT LỎNG

Ngành: Kỹ thuật cơ khí động lực
Mã số: 9520116

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Người hướng dẫn chính: **PGS.TS. Trần Văn Như**
Người hướng dẫn phụ: **PGS.TS. Vũ Văn Tấn**

Hà Nội, 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của các cán bộ hướng dẫn. Các số liệu, các kết quả trình bày trong luận án hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong các công trình trước đây. Các dữ liệu tham khảo được trích dẫn đầy đủ.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2026

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Xuân Ngọc

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành Luận án, Nghiên cứu sinh đã nhận được sự định hướng, giúp đỡ, các ý kiến đóng góp quý báu và những lời động viên của các nhà khoa học, các thầy cô giáo, đồng nghiệp và gia đình.

Trước hết, Nghiên cứu sinh xin chân thành bày tỏ lòng biết ơn và lời cảm ơn tới Thầy PGS.TS. Trần Văn Như, Thầy PGS.TS. Vũ Văn Tấn đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ trong quá trình nghiên cứu.

Cho phép Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn các thầy cô giáo, các nhà khoa học của bộ môn Cơ khí ô tô - Trường Đại học Giao thông Vận tải, các thầy, cô giáo, các nhà khoa học đến từ các trường trong khối Cơ khí - Động lực, ... đã có các góp ý quý báu cho Nghiên cứu sinh trong quá trình thực hiện Luận án này.

Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, Phòng Đào tạo sau đại học, Khoa Cơ khí - Trường Đại học Giao thông Vận tải đã tạo điều kiện thuận lợi để Nghiên cứu sinh hoàn thành nhiệm vụ nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Ban Giám hiệu, Khoa Công Nghệ Động Lực - Trường Đại học Công Nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện thuận lợi để Nghiên cứu sinh hoàn thành nhiệm vụ nghiên cứu.

Cuối cùng Nghiên cứu sinh bày tỏ lời cảm ơn tới gia đình, các đồng nghiệp, bạn bè đã luôn động viên, chia sẻ, ủng hộ và giúp đỡ Nghiên cứu sinh vượt qua khó khăn để đạt được những kết quả nghiên cứu trong Luận án này.

NCS Nguyễn Xuân Ngọc

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
LỜI CẢM ƠN ii
MỤC LỤC iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU ix
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT xv
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ xvi
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU xx

MỞ ĐẦU **1**

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU **2**
1.1 Tổng quan về ổn định lật ngang ô tô 2
1.2 Đặc điểm động lực học của ô tô chuyên dùng chở chất lỏng 4
1.3 Các tiêu chí đánh giá ổn định lật ngang 5
1.3.1 Các tiêu chí ổn định lật ngang tĩnh 6
1.3.2 Hệ số chuyển tải trọng ngang 6
1.3.3 Phân cấp trạng thái ổn định lật ngang bằng *RI* 7
1.3.4 Gia tốc ngang chuẩn hóa và các đáp ứng bổ trợ 9
1.4 Tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước 10
1.4.1 Các nghiên cứu trong nước 10
1.4.2 Các nghiên cứu ngoài nước 12
1.4.3 Nhận xét và khoảng trống nghiên cứu 17
1.5 Đối tượng, phạm vi, mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu 19
1.6 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn 21
1.7 Bố cục của luận án 22
1.8 Kết luận chương 1 22

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ XE–CHẤT LỎNG **24**

2.1 Cơ sở và trình tự xây dựng mô hình 24
2.1.1 Trình tự phát triển mô hình 24
2.1.2 Phạm vi và các giả thiết mô hình 24
2.1.3 Quan hệ giữa mức chất tải theo chiều cao và theo khối lượng 29
2.1.4 Phương pháp thiết lập phương trình động lực học 30
2.2 Xây dựng mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng 31
2.2.1 Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình tròn 31
2.2.2 Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp 37
2.2.3 Mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp 40
2.2.4 Mô hình tiếp xúc một chiều lốp–mặt đường 44
2.3 Chỉ tiêu đánh giá mất ổn định lật ngang 45
2.3.1 Phản lực pháp tuyến tại bánh xe 45
2.3.2 Hệ số chuyển tải trọng ngang 46
2.3.3 Điều kiện tới hạn nhấc bánh 46
2.3.4 Diễn biến sau khi nhấc bánh 47
2.4 Mô phỏng kiểm tra và đối sánh mô hình 47
2.4.1 Điều kiện mô phỏng và tiêu chí đối sánh 48
2.4.2 Đối sánh C–EC1: kiểm tra tính tương thích khi suy biến hình học 50
2.4.3 Đối sánh C–E1: ảnh hưởng của dạng tiết diện xi téc 51
2.4.4 Đối sánh E1–E2: kiểm tra phép mở rộng mô hình 53
2.5 Kết luận chương 54

CHƯƠNG 3. THÍ NGHIỆM VÀ NHẬN DẠNG THAM SỐ MÔ HÌNH Ô TÔ XI TÉC–CHẤT LỎNG 56

3.1 Đối tượng và phương án thí nghiệm 56
3.1.1 Đối tượng thí nghiệm 56
3.1.2 Phạm vi và chế độ thí nghiệm 56
3.1.3 Điều kiện thí nghiệm, thiết bị đo và bố trí cảm biến 57
3.1.4 Quy trình thí nghiệm 60
3.1.5 Mô tả kích thích mấp mô sử dụng trong mô phỏng 62

3.2 Xác định các tham số đầu vào của mô hình ô tô xi téc–chất lỏng . . 65
3.2.1 Khối lượng, phân bố tải trọng và tọa độ trọng tâm 65
3.2.2 Độ cứng lốp 67
3.2.3 Độ cứng hệ treo và hệ số cản giảm chấn 67
3.2.4 Thông số hình học và tham số quán tính ban đầu 69
3.3 Nhận dạng tham số động lực học của mô hình E2 72
3.3.1 Đối sánh sơ bộ giữa mô phỏng và thí nghiệm 73
3.3.2 Cơ sở và quy trình nhận dạng tham số bằng thuật toán di truyền 74
3.4 Đánh giá mức độ phù hợp của mô hình sau nhận dạng 77
3.4.1 Các tiêu chí đánh giá 77
3.4.2 Đáp ứng đại diện sau nhận dạng 79
3.4.3 Kết quả đối sánh khi chuyển động thẳng qua mấp mô 79
3.4.4 Kết quả đối sánh khi quay vòng ổn định 80
3.4.5 Nhận xét 81
3.5 Kết luận chương 82

CHƯƠNG 4. KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH LẬT NGANG ĐỘNG CỦA Ô TÔ XI TÉC CHỞ CHẤT LỎNG 84

4.1 Mục tiêu và phạm vi khảo sát 84
4.2 Thiết lập mô phỏng khảo sát 85
4.2.1 Mô hình và bộ tham số sử dụng 85
4.2.2 Các mức chất tải khảo sát 85
4.2.3 Các kịch bản vận hành khảo sát 86
4.2.4 Mô tả mặt đường và góc siêu cao đoạn cua 92
4.2.5 Các chỉ tiêu đánh giá ổn định lật ngang 94
4.3 Khảo sát cơ chế tương tác động lực học giữa thân xe và chất lỏng . 96
4.3.1 Đối sánh đáp ứng giữa mô hình có dao động chất lỏng và mô hình chất lỏng quy đổi cứng 97
4.3.2 Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối của chất lỏng 99

4.3.3 Quan hệ pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng 101
4.4 Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn 104
4.4.1 Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở 104
4.4.2 Ảnh hưởng của vận tốc đến đáp ứng ổn định lật ngang . . . 105
4.4.3 Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn 106
4.4.4 Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI trong miền khảo sát 107
4.4.5 Nhận xét kết quả khảo sát J-turn 108
4.5 Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo 109
4.5.1 Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở 109
4.5.2 Ảnh hưởng của siêu cao đến ổn định lật ngang 110
4.5.3 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi 112
4.5.4 Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI trong miền khảo sát 113
4.5.5 Nhận xét kết quả khảo sát cua tay áo 115
4.6 Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép 115
4.6.1 Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc điển hình 115
4.6.2 Ảnh hưởng của vận tốc và mức chất tải đến $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI 118
4.6.3 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi 119
4.6.4 Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định 121
4.6.5 Vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học trên quỹ đạo 122
4.6.6 Nhận xét kết quả khảo sát chuyển làn kép 124
4.7 Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản cua chữ S 127
4.7.1 Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở 127
4.7.2 Ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu đến ổn định lật ngang . . . 129
4.7.3 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi 131
4.7.4 Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI trong miền khảo sát 132
4.7.5 Nhận xét kết quả khảo sát cua chữ S 133
4.8 Đánh giá tổng hợp ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ổn định lật ngang 134
4.9 Kết luận chương 140

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO **142**

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ **146**

TÀI LIỆU THAM KHẢO **147**

PHỤ LỤC A. CÁC PHƯƠNG TRÌNH TRIỂN KHAI CỦA MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ XE–CHẤT LỎNG **155**

A.1 Khai triển hình học của xi téc tiết diện hình tròn 155

A.2 Khai triển phương trình Lagrange của mô hình C 156

A.3 Hệ phương trình khai triển của mô hình C 157

A.4 Các tham số tương đương của mô hình E1 159

A.5 Khai triển phương trình Lagrange của mô hình E1 161

A.6 Khai triển các quan hệ hình học và phương trình động lực học của mô hình E2 163

A.6.1 Các tham số tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp 163

A.6.2 Khai triển tọa độ của khối lượng chất lỏng dao động trong mô hình E2 164

A.6.3 Khai triển phương trình Lagrange theo tọa độ α_{e2} 166

A.6.4 Lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc hệ treo trong mô hình E2 168

A.6.5 Lực và mô men tương đương do dao động chất lỏng tác dụng lên thân xe 168

A.7 Phản lực pháp tuyến tại bánh xe và hệ số chuyển tải trọng ngang . 169

PHỤ LỤC B. DỮ LIỆU THÍ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ ĐỐI SÁNH BỔ SUNG **171**

B.1 Thiết bị đo và chức năng thu thập dữ liệu 171

B.1.1 Bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43 171

B.1.2 Cảm biến đo độ cao HF–750 172

B.1.3 Bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2 172

B.2 Dữ liệu dao động tự do đo bằng cảm biến HF–750 173

B.3 Đối sánh bổ sung sau nhận dạng 174

PHỤ LỤC C. THÔNG SỐ MÔ HÌNH KHẢO SÁT VÀ SỐ LIỆU SỰ KIỆN CHUYỂN LÀN KÉP 177

C.1 Thông số mô hình khảo sát 177

C.2 Bảng số liệu sự kiện trong kịch bản chuyển làn kép 178

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
Ký hiệu danh pháp		
A	Độ dịch chuyển ngang của quỹ đạo chuyển làn kép	m
A_{mm}	Hệ số biên độ dùng để mô tả biên dạng mấp mô mặt đường	m
A_1, A_2	Hai biên độ đặc trưng liên tiếp của dao động tắt dần	m
$2a,\ 2b$	Đường kính trục ngang và trục đứng của tiết diện ê-líp xi téc thí nghiệm	m
a_c	Khoảng cách từ tâm xi téc tròn đến trọng tâm khối chất lỏng tương đương	m
A_{e2}	Diện tích phần chất lỏng trong tiết diện ê-líp của mô hình E2	m^2
$a_{e2},\ b_{e2}$	Bán trục ngang và bán trục đứng của xi téc ê-líp trong mô hình E2	m
$a_e,\ b_e$	Bán trục ngang và bán trục đứng của xi téc ê-líp trong mô hình E1	m
a_{pe2}, b_{pe2}	Bán trục ngang và đứng của quỹ đạo dao động tương đương trong mô hình E2	m
a_{pe}, b_{pe}	Bán trục ngang và đứng của quỹ đạo dao động tương đương trong mô hình E1	m
$a_T,\ b_T$	Khoảng cách từ G_{XT} đến cầu trước và cầu sau	m
a_y	Gia tốc ngang của xe	m/s^2
C	Mô hình ô tô xi téc tiết diện hình tròn	–
C_b	Độ cứng chống lắc ngang tương đương của thanh ổn định	N m/rad
$(\cdot)_c$, $(\cdot)_e$, $(\cdot)_{e2}$	Chỉ số tương ứng với mô hình C, E1 và E2	–
$C_s,\ C_s^{\mathcal{M}}$	Độ cứng tương đương của hệ thống treo	N/m
$C_{s,i}$	Độ cứng hệ thống treo tại mức tải thứ i	N/m
$C_t,\ C_t^{\mathcal{M}}$	Độ cứng thẳng đứng của lốp	N/m
$\mathcal{D}$	Tập dữ liệu thí nghiệm sử dụng trong nhận dạng	–
D	Hàm tiêu tán Rayleigh	W
d_{bx}, B_{bx}	Đường kính vành lốp và bề rộng lốp	in
D_c	Đường kính trong của xi téc hình tròn	m
$d_s^{\mathcal{M}}$	Một nửa khoảng cách giữa hai phần tử hệ thống treo	m
$d_u^{\mathcal{M}}$	Một nửa chiều rộng vết bánh xe	m
e	Độ dốc siêu cao mặt đường	%

Tiếp theo trang sau

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
E1	Mô hình ô tô xi téc tiết diện ê-líp với mô hình cơ học tương đương của chất lỏng	–
E2	Mô hình ô tô xi téc tiết diện ê-líp có xét dao động lắc ngang–thẳng đứng, kích động mặt đường và tiếp xúc lốp–đường	–
EC1	Trường hợp giới hạn của mô hình E1 dùng để đối sánh với mô hình C	–
E_k	Động năng của hệ	J
E_p	Thế năng của hệ	J
$\varepsilon_{\Sigma F}$	Dung sai tổng phản lực pháp tuyến trong mẫu số của LTR	N
ε_F	Dung sai phản lực pháp tuyến dùng để nhận diện nhấc bánh	N
$F_{\Delta AOB}$	Diện tích tam giác AOB	m^2
F_{qu}	Diện tích hình quạt tròn	m^2
F_{vp}	Diện tích hình viên phân chứa chất lỏng	m^2
$F_y^{(l\to t)}$	Phản lực ngang của chất lỏng dao động tác dụng lên xi téc	N
$F_{ys}^{(R)}$	Lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc của hệ thống treo	N
$F_{z0}^{\mathcal{M}}$	Tải trọng tĩnh trung bình trên mỗi phía bánh xe	N
$\widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}}$	Phản lực pháp tuyến giả định tại bánh xe phía i	N
$F_{zi}^{\mathcal{M}}$	Phản lực pháp tuyến thực tế tại bánh xe phía i	N
$F_{zL}^{\mathcal{M}}, F_{zR}^{\mathcal{M}}$	Phản lực pháp tuyến tại phía trái và phía phải	N
$F_{z,\min}^{\mathcal{M}}$	Giá trị nhỏ nhất của phản lực pháp tuyến hai phía bánh xe	N
g	Gia tốc trọng trường	$\mathrm{m/s}^2$
$G_{\max}$	Số thế hệ tối đa trong thuật toán di truyền	–
G_1^*	Tải trọng cầu trước khi cân nghiêng xe	kg
G_1, G_2, G	Tải trọng cầu trước, cầu sau và toàn xe	kgf
$G_{2,i}$	Tải trọng cầu sau tại mức tải thứ i	kgf
G_{XT}	Trọng tâm xi téc	–
h_1, h_2, h_3	Khoảng cách từ đáy xi téc đến trọng tâm của hình quạt, tam giác và hình viên phân	m
h_c	Chiều cao trọng tâm toàn xe	mm
h_l	Chiều cao mực chất lỏng tính từ đáy xi téc	m
h_{mm}	Chiều cao mấp mô mặt đường trong thí nghiệm và mô phỏng	m
h_p	Tỷ lệ khối lượng chất lỏng, $h_p = m_l/m_{l,\max}$	–
h_{s0}	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng được treo khi không tải	m
h_{tc}, h_{te}, h_{te2}	Khoảng cách từ tâm lắc đến tâm xi téc hoặc tâm quỹ đạo chất lỏng tương đương	m

Tiếp theo trang sau

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
h_u	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng không được treo	m
I_s	Mô men quán tính lắc ngang của phần khối lượng được treo	$\mathrm{kg\,m^2}$
$I_{s,0}$	Mô men quán tính lắc ngang sơ bộ trước nhận dạng	$\mathrm{kg\,m^2}$
$I_{s,\mathrm{id}}$	Mô men quán tính lắc ngang tương đương dùng trong nhận dạng	$\mathrm{kg\,m^2}$
$I^*_{s,\mathrm{id}}$	Giá trị tối ưu của $I_{s,\mathrm{id}}$ sau nhận dạng	$\mathrm{kg\,m^2}$
I_u	Mô men quán tính lắc ngang của phần khối lượng không được treo	$\mathrm{kg\,m^2}$
$J(\boldsymbol{\theta})$	Hàm mục tiêu của bài toán nhận dạng	–
$k_{\alpha c}, k_{\alpha e}, k_{\alpha e2}$	Hệ số cản tương đương của dao động tương đối chất lỏng trong các mô hình C, E1 và E2	$\mathrm{N\,m\,s/rad}$
K_{q_i}	Hệ số cản tương đương theo tọa độ tổng quát q_i	–
$K_s,\ K_s^{\mathcal{M}}$	Hệ số cản giảm chấn tương đương của hệ thống treo	$\mathrm{N\,s/m}$
$K_t^{\mathcal{M}}$	Hệ số cản thẳng đứng của lốp	$\mathrm{N\,s/m}$
L_c	Chiều dài xi téc hình tròn	m
L_{CS}	Chiều dài xi téc tương đương phân bổ cho cầu sau	m
L_{DLC}	Tổng chiều dài quỹ đạo chuyển làn kép	m
L_{e2}	Chiều dài xi téc trong mô hình E2	m
$(\cdot)_L,\ (\cdot)_R$	Chỉ số biểu thị phía trái và phía phải của xe	–
L_t	Chiều dài đoạn chuyển tiếp siêu cao	m
l_{mm}	Chiều dài mấp mô theo phương chuyển động của xe	m
$\varepsilon_{\mathrm{LTR}}$	Dung sai của hệ số chuyển tải trọng ngang	–
$\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}}$	Hệ số chuyển tải trọng ngang của mô hình $\mathcal{M}$	–
$\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}}_{\max}$	Giá trị lớn nhất theo thời gian của hệ số chuyển tải trọng ngang	–
L_{Xe}	Chiều dài cơ sở của xe	m
L_{XT}	Chiều dài xi téc	m
$(\cdot)^{\mathcal{M}}$	Đại lượng thuộc mô hình $\mathcal{M}$	–
$\mathcal{M}$	Ký hiệu mô hình tổng quát, $\mathcal{M} \in \{\mathrm{C}, \mathrm{E1}, \mathrm{E2}\}$	–
M_b	Mô men chống lắc ngang của thanh ổn định	$\mathrm{N\,m}$
m_c	Khối lượng chất lỏng trong mô hình xi téc tròn	kg
m_{ce}	Phần khối lượng chất lỏng chuyển động cùng xi téc trong mô hình E1	kg
m_{ce2}	Phần khối lượng chất lỏng chuyển động cùng xi téc trong mô hình E2	kg
m_{cs}	Khối lượng sử dụng khi xác định cản giảm chấn tương đương hệ treo sau	kg
m_e	Phần khối lượng chất lỏng dao động tương đối trong mô hình E1	kg
m_{e2}	Phần khối lượng chất lỏng dao động tương đối trong mô hình E2	kg
$m_{l,\max}$	Khối lượng chất lỏng khi xi téc đầy	kg

Tiếp theo trang sau

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
m_l	Tổng khối lượng chất lỏng trong xi téc	kg
$m_{l,CS}$	Khối lượng chất lỏng quy đổi cho cầu sau	kg
$m_s,\ m_s^{\mathcal{M}}$	Khối lượng được treo	kg
m_{te}	Tổng khối lượng chất lỏng trong mô hình E1	kg
m_{te2}	Tổng khối lượng chất lỏng trong mô hình E2	kg
$m_u,\ m_u^{\mathcal{M}}$	Khối lượng không được treo	kg
$M_{\alpha c,0}, M_{\alpha e,0},$ $M_{\alpha e2,0}$	Hệ số quán tính suy rộng của khối chất lỏng dao động tại vị trí cân bằng ban đầu	$\mathrm{kg\,m^2}$
N_p	Kích thước quần thể trong thuật toán di truyền	–
P_1^*, P_2^*	Tải trọng đo tại hai bánh cầu trước khi cân nghiêng xe	kg
P_1, P_2, P_3, P_4	Tải trọng đo tại các bánh xe	kgf
$\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$	Sai lệch mật độ phổ công suất	–
$\mathrm{PSD}_{\mathrm{exp}}$	Mật độ phổ công suất của tín hiệu thí nghiệm	$\mathrm{rad^2/Hz}$
$\mathrm{PSD}_{\mathrm{sim}}$	Mật độ phổ công suất của tín hiệu mô phỏng	$\mathrm{rad^2/Hz}$
Q_i	Lực hoặc mô men tổng quát ứng với tọa độ q_i	–
$q_i,\ \dot{q}_i$	Tọa độ tổng quát và vận tốc tổng quát thứ i	–
$q_L^{\mathcal{M}}, q_R^{\mathcal{M}}$	Kích động mặt đường tại vệt bánh trái và phải	m
RG	Cấu hình chất lỏng quy đổi cứng	–
$R,\ R_J$	Bán kính quỹ đạo quay vòng và bán kính quỹ đạo J-turn	m
r_t	Bán kính bánh xe tương ứng với mức tải	mm
s	Quãng đường dọc theo quỹ đạo	m
S_{mm}	Khoảng cách giữa tâm hai mấp mô liên tiếp trên cùng một vệt bánh	m
SL	Cấu hình có xét dao động tương đối của chất lỏng	–
$(\cdot)_s,\ (\cdot)_u$	Chỉ số biểu thị phần khối lượng được treo và không được treo	–
t	Thời gian	s
t_{lift}	Thời điểm bắt đầu xuất hiện nhấc bánh	s
t_{nr}	Thời điểm bắt đầu trạng thái không phục hồi	s
T_r	Thời gian tăng gia tốc ngang	s
T_{mm}	Thời gian mô phỏng để xe đi qua toàn bộ dãy mấp mô	s
u_1, u_2	Biến chuẩn hóa của $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}	–
v	Vận tốc chuyển động của xe	km/h
v_m	Vận tốc chuyển động của xe sau khi quy đổi, $v_m = v/3{,}6$	m/s
$V_{l,CS}$	Thể tích chất lỏng quy đổi cho cầu sau	$\mathrm{m^3}$
v_{lift}	Ngưỡng vận tốc bắt đầu xuất hiện nhấc bánh	km/h

Tiếp theo trang sau

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
v_{nr}	Ngưỡng vận tốc xuất hiện trạng thái không phục hồi	km/h
$\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_{e1}, \mathbf{x}_{e2}$	Véc tơ trạng thái của các mô hình C, E1 và E2	–
y_c, z_c	Tọa độ của khối chất lỏng tương đương trong mô hình C	m
y_{e2}, z_{e2}	Tọa độ của khối chất lỏng dao động trong mô hình E2	m
y_e, z_e	Tọa độ của khối chất lỏng dao động trong mô hình E1	m
z_{fe2}	Cao độ mặt thoáng chất lỏng trong tiết diện xi téc E2	m
$Z_s^{\mathcal{M}}$	Chuyển vị thẳng đứng của khối lượng được treo	m
$Z_u^{\mathcal{M}}$	Chuyển vị thẳng đứng của khối lượng không được treo	m
$\widetilde{(\cdot)}$	Đại lượng giả định khi bánh xe vẫn còn tiếp xúc với mặt đường	–
Ký hiệu Hy Lạp		
$\alpha_c, \alpha_e, \alpha_{e2}$	Góc dao động tương đối của chất lỏng trong các mô hình C, E1 và E2	rad
β	Góc nâng xe trong thí nghiệm cân nghiêng	deg
γ_{mm}	Tham số góc xác định khoảng tác dụng của biên dạng mấp mô	rad
ΔG	Độ thay đổi tải trọng cầu trước khi cân nghiêng xe	kg
δ	Logarit suy giảm dao động	–
$\delta_{s,i}$	Biến dạng của hệ thống treo tại mức tải thứ i	mm
$\delta_{sL}^{\mathcal{M}}, \delta_{sR}^{\mathcal{M}}$	Biến dạng hệ thống treo bên trái và bên phải	m
$\delta_{tL}^{\mathcal{M}}, \delta_{tR}^{\mathcal{M}}$	Biến dạng lốp bên trái và bên phải	m
δ_t	Biến dạng hướng kính của lốp trong thí nghiệm	mm
ζ	Tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng dùng trong mô hình	–
ζ_{id}	Tỷ số cản dao động tương đối chất lỏng dùng trong nhận dạng	–
ζ_{id}^*	Giá trị tối ưu của ζ_{id} sau nhận dạng	–
ζ_0	Giá trị ban đầu của tỷ số cản dao động tương đối chất lỏng	–
$\eta_{v,\text{nr}}$	Mức suy giảm ngưỡng vận tốc không phục hồi do dao động tương đối của chất lỏng	%
$\boldsymbol{\theta}$	Véc tơ tham số cần nhận dạng, $\boldsymbol{\theta} = [I_{s,\text{id}}, \zeta_{\text{id}}]^T$	–
$\boldsymbol{\theta}^*$	Véc tơ tham số tối ưu sau nhận dạng	–
θ_{e2}	Tham số góc xác định vị trí mặt thoáng trong tiết diện ê-líp E2	rad
κ	Độ cong của quỹ đạo	m^{-1}
λ_{bx}	Hệ số xác định vị trí trọng tâm khối lượng không được treo theo kích thước lốp	–
λ_h	Tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng, $\lambda_h = h_l/(2b)$	–
$\mu_{y,\text{eff}}$	Gia tốc ngang chuẩn hóa hiệu dụng khi xét siêu cao	–
μ_0	Biên độ gia tốc ngang chuẩn hóa đặt trước trong kịch bản J-turn	–

Tiếp theo trang sau

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
μ_y	Gia tốc ngang chuẩn hóa, $\mu_y = a_y/g$	–
$\rho_{\psi\alpha}(\tau)$	Hệ số tương quan chéo chuẩn hóa giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$	–
ρ_l	Khối lượng riêng của chất lỏng	$\mathrm{kg/m^3}$
τ	Biến thời gian trễ trong hàm tương quan chéo	s
$\tau_{\psi\alpha}$	Độ trễ đặc trưng giữa dao động thân xe và dao động chất lỏng	s
φ_0	Giá trị góc siêu cao trên đoạn cong chính	Độ (°)
φ_r	Góc siêu cao mặt đường	Độ (°)
$\psi_s^{\mathcal{M}}$	Góc lắc ngang của khối lượng được treo	rad
$\psi_u^{\mathcal{M}}$	Góc lắc ngang của khối lượng không được treo	rad
Ω	Miền tìm kiếm của các tham số nhận dạng	–
ω_n	Tần số góc riêng của dao động tương đối chất lỏng	rad/s
ω_{mm}	Tần số góc dùng để tạo chuỗi mấp mô theo thời gian	rad/s

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tên gọi
CC	Hệ số tương quan (Correlation Coefficient)
DLC	Chuyển làn kép (Double Lane Change)
ESC	Hệ thống cân bằng điện tử (Electronic Stability Control)
GA	Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm)
ISO	Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế (International Organization for Standardization)
J-turn	Đổi hướng chuyển động theo hình chữ J (cua chữ J)
LTR	Hệ số chuyển tải trọng ngang (Load Transfer Ratio)
NCSA	Trung tâm Thống kê và Phân tích Quốc gia Hoa Kỳ (National Center for Statistics and Analysis)
NHTSA	Cơ quan Quản lý An toàn Giao thông Đường cao tốc Quốc gia Hoa Kỳ (National Highway Traffic Safety Administration)
NRMSE	Sai số căn phương trung bình chuẩn hóa (Normalized Root Mean Square Error, %)
PSD	Mật độ phổ công suất (Power Spectral Density)
RI	Cấp đánh giá ổn định lật ngang (Rollover Index)
RMSE	Sai lệch căn phương trung bình (Root Mean Square Error, rad)
RSC	Hệ thống kiểm soát ổn định chống lật (Roll Stability Control)
SRT	Ngưỡng lật tĩnh (Static Rollover Threshold)
SSF	Hệ số ổn định tĩnh (Static Stability Factor)
TTR	Hệ số ổn định chống lật trên bàn thử nghiêng ngang (Tilt Table Ratio)

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Một số vụ tai nạn lật xe 2
Hình 1.2 Xe chuyên dùng chở chất lỏng với xi téc hình tròn (a) và ê-líp (b) 3
Hình 1.3 Mô hình thử nghiệm động lực học chất lỏng trong xi téc sử dụng xe kéo 15
Hình 1.4 Mô hình thử nghiệm dao động chất lỏng với kích thích ngang 16
Hình 1.5 Ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 sử dụng xi téc tiết diện hình ê-líp 19

Hình 2.1 Quy trình xây dựng và phát triển mô hình động lực học ô tô chuyên dùng chở chất lỏng 26
Hình 2.2 Minh họa các đại lượng hình học dùng để xác định quan hệ giữa tỷ lệ chiều cao và tỷ lệ khối lượng chất lỏng 29
Hình 2.3 Sơ đồ hình học xác định trọng tâm chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn 32
Hình 2.4 Mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn 33
Hình 2.5 Mô hình cơ học dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình tròn 35
Hình 2.6 Mô hình hình học xác định các tham số tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp 37
Hình 2.7 Mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp 38
Hình 2.8 Mô hình cơ học dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp 39
Hình 2.9 Hình học mặt cắt xi téc tiết diện hình ê-líp và vị trí mặt thoáng chất lỏng trong mô hình E2 41

Hình 2.10 Đối sánh đáp ứng giữa mô hình C và mô hình EC1 tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng 51
Hình 2.11 Đối sánh đáp ứng giữa mô hình C và mô hình E1 tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng 52
Hình 2.12 Đối sánh đáp ứng giữa mô hình E1 và mô hình E2 khi $q_L = q_R = 0$ tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng 53

Hình 3.1 Sơ đồ mô tả vị trí các thiết bị và cảm biến đo trên ô tô xi téc 58
Hình 3.2 Vị trí thực tế sau khi lắp các thiết bị thực nghiệm 58
Hình 3.3 Bàn cân, khối gỗ và thước đo mực chất lỏng sử dụng trong thí nghiệm 59
Hình 3.4 Sơ đồ xác định tọa độ trọng tâm trong mặt phẳng ngang . . . 60
Hình 3.5 Sơ đồ xác định tọa độ trọng tâm ô tô theo chiều cao 60
Hình 3.6 Thí nghiệm xác định đặc tính hệ thống treo 61
Hình 3.7 Khu vực thí nghiệm quay vòng ổn định và bố trí cọc tiêu . . . 62
Hình 3.8 Bố trí mấp mô mặt đường trong thí nghiệm chuyển động thẳng 62
Hình 3.9 Biên dạng kích thích mấp mô tại hai vệt bánh theo quãng đường 63
Hình 3.10 Đáp ứng dao động tắt dần trên cầu sau của ô tô xi téc với hai biên độ đặc trưng A_1 và A_2 68
Hình 3.11 Các thông số kích thước được đo đạc trên ô tô xi téc 70
Hình 3.12 Kích thước xi téc dùng để quy đổi cho cầu sau 71
Hình 3.13 Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm khi ô tô xi téc quay vòng ổn định, $v = 11\,\mathrm{km/h}$, $R = 39\,\mathrm{m}$ 73
Hình 3.14 Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm khi ô tô xi téc chuyển động qua mấp mô, $v = 17\,\mathrm{km/h}$ 74
Hình 3.15 Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm sau khi nhận dạng tham số . . . 80

Hình 4.1 Gia tốc ngang chuẩn hóa của các kịch bản vận hành khảo sát 89
Hình 4.2 Sơ đồ hình học và thông số cơ sở của các cung đường khảo sát 90
Hình 4.3 Đối sánh đáp ứng theo thời gian giữa mô hình SL và mô hình RG tại $h_p = 0{,}50$, $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 98
Hình 4.4 Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến $\mathrm{LTR_{max}}$ và cấp RI theo mức chất tải tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 98
Hình 4.5 Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối của chất lỏng 100
Hình 4.6 Quan hệ giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng tại $h_p = 0{,}50$ 102
Hình 4.7 Quỹ đạo pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng theo mức chất tải 102
Hình 4.8 Độ trễ tương quan và hệ số tương quan giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$ theo mức chất tải 103
Hình 4.9 Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản J-turn tại $h_p = 0{,}50$ . . 105
Hình 4.10 Ảnh hưởng của vận tốc đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn tại $h_p = 0{,}50$ 106
Hình 4.11 Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn theo mức chất tải 107
Hình 4.12 Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn theo mức chất tải và vận tốc 108
Hình 4.13 Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản cua tay áo tại $h_p = 0{,}50$, $v = 20\,\mathrm{km/h}$ 111
Hình 4.14 Ảnh hưởng của siêu cao đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo 112
Hình 4.15 Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua tay áo theo mức chất tải 113
Hình 4.16 Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo theo vận tốc và mức chất tải 114
Hình 4.17 Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản chuyển làn kép tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 117
Hình 4.18 Ảnh hưởng của vận tốc và mức chất tải đến $\mathrm{LTR_{max}}$ và cấp RI trong kịch bản chuyển làn kép 118

Hình 4.19 Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép 119
Hình 4.20 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép theo mức chất tải 120
Hình 4.21 Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định trong kịch bản chuyển làn kép 122
Hình 4.22 Đáp ứng $\psi_s(t)$ và gia tốc ngang chuẩn hóa tại ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép 123
Hình 4.23 Đáp ứng $F_{z,\min}(t)$ và gia tốc ngang chuẩn hóa tại ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép 124
Hình 4.24 Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 0{,}00$ 125
Hình 4.25 Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 0{,}25$ 125
Hình 4.26 Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 0{,}50$ 126
Hình 4.27 Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 0{,}75$ 126
Hình 4.28 Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 1{,}00$ 127
Hình 4.29 Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản cua chữ S tại $h_p = 0{,}50$, $v = 25\,\mathrm{km/h}$ 129
Hình 4.30 Ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua chữ S 130
Hình 4.31 Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải 132
Hình 4.32 Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$ trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc 132
Hình 4.33 Bản đồ cấp RI trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc 133
Hình 4.34 Bản đồ $F_{z,\min}$ trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc 133

Hình 4.35 Ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ngưỡng không phục hồi theo mức chất tải 136
Hình 4.36 Mức suy giảm ngưỡng không phục hồi do dao động tương đối chất lỏng 137
Hình 4.37 Bản đồ tổng hợp các chỉ tiêu ổn định lật ngang theo vận tốc và mức chất tải khi xét dao động tương đối của chất lỏng 138
Hình 4.38 Sai khác $\mathrm{LTR}_{\max}$ và cấp *RI* giữa mô hình có dao động chất lỏng và mô hình chất lỏng quy đổi cứng 139

Hình A.1 Sơ đồ xác định tọa độ khối lượng chất lỏng dao động trong mô hình con lắc tương đương 164

Hình B.1 Bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43 172
Hình B.2 Cảm biến đo độ cao HF–750 172
Hình B.3 Bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2 172
Hình B.4 Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm trong trường hợp quay vòng ổn định 175
Hình B.5 Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm khi quay vòng ở các mức tải còn lại 175
Hình B.6 Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm khi chuyển động qua mấp mô 176
Hình B.7 Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm qua mấp mô ở các mức tải còn lại 176

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Phân cấp mức độ an toàn lật ngang theo $LTR_{\max}$ và RI . . . 8
Bảng 1.2 Tổng hợp các hướng nghiên cứu liên quan đến luận án 17

Bảng 2.1 Tổng hợp các mô hình và cấu hình tính toán sử dụng trong luận án 25
Bảng 2.2 Thông số động lực học của ô tô xi téc dùng trong mô phỏng đối sánh 49
Bảng 2.3 Thông số hình học xi téc và chất lỏng dùng trong mô phỏng đối sánh 49
Bảng 2.4 Sai khác đáp ứng của mô hình EC1 so với mô hình C 50
Bảng 2.5 Sai khác đáp ứng của mô hình E1 so với mô hình C 52
Bảng 2.6 Sai khác đáp ứng của mô hình E2 so với mô hình E1 khi $q_L = q_R = 0$ 54

Bảng 3.1 Bố trí cảm biến và vai trò của các tín hiệu đo trong thí nghiệm 59
Bảng 3.2 Dữ liệu đo tải trọng theo mức chất tải 66
Bảng 3.3 Tọa độ trọng tâm tính toán theo mức chất tải trong mặt phẳng dọc (a, b), ngang (c, d) 66
Bảng 3.4 Dữ liệu thí nghiệm cân nghiêng xe theo phương dọc 67
Bảng 3.5 Số liệu đo ghi và tính toán độ cứng hướng kính của bánh xe C_t 67
Bảng 3.6 Dữ liệu đo và kết quả xác định độ cứng hệ thống treo 68
Bảng 3.7 Thông số kỹ thuật của ô tô xi téc thí nghiệm sử dụng trong mô hình E2 72
Bảng 3.8 Cấu hình thuật toán GA sử dụng trong nhận dạng tham số . 76
Bảng 3.9 Đối sánh mô hình với thực nghiệm trước và sau nhận dạng khi ô tô chuyển động thẳng qua mấp mô 81
Bảng 3.10 Đối sánh mô hình với thực nghiệm trước và sau nhận dạng khi ô tô quay vòng ổn định 81

Bảng 4.1 Các mức chất tải sử dụng trong khảo sát ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 86
Bảng 4.2 Các kịch bản vận hành sử dụng trong khảo sát ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 88
Bảng 4.3 Thông số điển hình và miền quét của các kịch bản khảo sát . 88
Bảng 4.4 Các mức siêu cao sử dụng trong khảo sát cua tay áo và cua chữ S 93
Bảng 4.5 Ma trận khảo sát theo kịch bản vận hành và điều kiện mặt đường 96
Bảng 4.6 Đối sánh ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 99
Bảng 4.7 Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối chất lỏng và đáp ứng lắc ngang tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 100
Bảng 4.8 Đặc trưng quan hệ pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối chất lỏng 103
Bảng 4.9 Đối sánh đáp ứng J-turn tại vận tốc cơ sở $v = 25\,\mathrm{km/h}$ 104
Bảng 4.10 Ảnh hưởng của μ_0 đến đáp ứng J-turn tại $h_p = 0{,}50$ 105
Bảng 4.11 Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn 107
Bảng 4.12 Đáp ứng ổn định lật ngang của mô hình E2 trong kịch bản cua tay áo tại $v = 20\,\mathrm{km/h}$ 110
Bảng 4.13 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua tay áo theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$ 112
Bảng 4.14 Đáp ứng ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$ 116
Bảng 4.15 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép 120
Bảng 4.16 Đối sánh ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép 121
Bảng 4.17 Đáp ứng ổn định lật ngang của mô hình E2 trong kịch bản cua chữ S tại $v = 25\,\mathrm{km/h}$ 128

Bảng 4.18 Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua chữ S 131
Bảng 4.19 Tổng hợp ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến các ngưỡng mất ổn định 135

Bảng B.1 Thiết bị chính sử dụng trong thí nghiệm 171
Bảng B.2 Dữ liệu dao động tự do của thân xe đo bằng cảm biến HF–750 173

Bảng C.1 Thông số kỹ thuật của ô tô xi téc sử dụng trong mô hình khảo sát 177
Bảng C.2 Tổng hợp các sự kiện của mô hình chất lỏng quy đổi cứng (RG) trong kịch bản chuyển làn kép theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$ 178
Bảng C.3 Tổng hợp các sự kiện của mô hình có dao động tương đối chất lỏng (SL) trong kịch bản chuyển làn kép theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$ 180

MỞ ĐẦU

Xe xi téc là phương tiện chuyên dùng quan trọng trong vận chuyển chất lỏng, được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kinh tế–kỹ thuật. Tuy nhiên, do đặc điểm tải trọng là chất lỏng có khả năng dịch chuyển tương đối trong xi téc, loại phương tiện này tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định lật ngang cao hơn so với xe chở tải rắn thông thường, đặc biệt khi quay vòng, chuyển làn hoặc chuyển động trên mặt đường không bằng phẳng.

Dao động chất lỏng trong xi téc làm thay đổi vị trí trọng tâm, phân bố khối lượng và mô men tác dụng lên thân xe. Ở các mức chất tải chưa đầy, sự tồn tại của mặt thoáng cho phép chất lỏng dao động với biên độ đáng kể, có thể làm tăng chuyển tải trọng ngang, giảm phản lực pháp tuyến phía bánh xe giảm tải và làm suy giảm dự trữ ổn định lật ngang. Ảnh hưởng này còn phụ thuộc vào hình dạng xi téc, mức chất tải, đặc tính chất lỏng, điều kiện mặt đường và quan hệ pha giữa dao động thân xe với dao động tương đối của chất lỏng.

Mặc dù ổn định lật ngang của ô tô đã được nghiên cứu rộng rãi, bài toán đối với ô tô xi téc chở chất lỏng vẫn còn nhiều vấn đề cần tiếp tục làm rõ do sự tương tác phức tạp giữa động lực học xe và dao động chất lỏng. Đặc biệt, việc xây dựng mô hình có khả năng mô tả đồng thời dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang, dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp, đồng thời được đánh giá bằng dữ liệu thực nghiệm trên xe thực, vẫn là nội dung có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

Xuất phát từ yêu cầu đó, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài **"NGHIÊN CỨU ỔN ĐỊNH LẬT NGANG ĐỘNG CỦA Ô TÔ CHUYÊN DÙNG CHỞ CHẤT LỎNG"**. Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết về động lực học hệ xe–chất lỏng, đồng thời cung cấp cơ sở định lượng phục vụ đánh giá ổn định lật ngang, nhận diện điều kiện vận hành bất lợi và hỗ trợ thiết kế, khai thác an toàn ô tô xi téc chở chất lỏng.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về ổn định lật ngang ô tô

Ổn định lật ngang là khả năng ô tô duy trì tiếp xúc giữa các bánh xe và mặt đường khi chịu tác động của gia tốc ngang và mô men lật. Trạng thái mất ổn định xuất hiện khi phản lực thẳng đứng tại bánh xe phía trong so với tâm quay vòng giảm về không, bánh xe bắt đầu tách khỏi mặt đường và phương tiện tiến tới lật quanh trục dọc. Tai nạn lật thường xảy ra đột ngột, khó kiểm soát và có nguy cơ gây hậu quả nghiêm trọng (Hình 1.1).

Các thống kê của Cục Quản lý An toàn Giao thông Đường cao tốc Quốc gia Hoa Kỳ (NHTSA) cho thấy tai nạn lật tuy không phải dạng tai nạn phổ biến nhất nhưng chiếm tỷ lệ đáng kể trong các vụ tai nạn gây tử vong và thường để lại hậu quả nghiêm trọng [53, 54, 24, 41, 40]. Nguy cơ này đặc biệt rõ đối với ô tô xi téc: mặc dù xe xi téc chỉ liên quan đến khoảng 15% tổng số vụ tai nạn chết người có xe tải nặng tham gia, các vụ lật xe xi téc lại chiếm khoảng 31% số vụ lật xe tải nặng gây tử vong [43]. Những số liệu trên cho thấy ổn định lật ngang không chỉ là một chỉ tiêu quan trọng trong nghiên cứu động lực học ô tô mà còn là vấn đề an toàn cấp thiết đối với xe xi téc, do đặc điểm trọng tâm cao và chuyển động của chất lỏng làm gia tăng nguy cơ mất ổn định.



Hình 1.1: *Một số vụ tai nạn lật xe*

Khả năng ổn định lật ngang của ô tô phụ thuộc vào các thông số hình học, phân bố khối lượng, đặc tính hệ thống treo, lốp và điều kiện chuyển động. Đối với

phương tiện chở tải rắn, vị trí tương đối của tải trọng ít thay đổi trong quá trình vận hành nên ảnh hưởng của tải có thể được mô tả thông qua khối lượng, tọa độ trọng tâm và mô men quán tính tương ứng. Trong khi đó, đối với ô tô xi téc, chất lỏng có thể chuyển động tương đối so với xi téc dưới tác động của gia tốc ngang và các kích thích từ mặt đường.

Dao động của chất lỏng làm thay đổi vị trí trọng tâm và phân bố khối lượng của hệ xe–chất lỏng, đồng thời phát sinh lực và mô men động bổ sung. Sự tương tác này có thể làm tăng dao động lắc ngang, gia tăng chuyển tải giữa các bánh xe và làm giảm giới hạn ổn định chống lật của phương tiện, đặc biệt khi xi téc chứa không đầy. Mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào mức chất tải, hình dạng xi téc, đặc tính chất lỏng và điều kiện chuyển động của xe.



Hình 1.2: *Xe chuyên dùng chở chất lỏng với xi téc hình tròn (a) và ê-líp (b)*

Trong thực tế, xi téc có nhiều dạng hình học khác nhau, trong đó tiết diện hình tròn và hình ê-líp được sử dụng phổ biến như minh họa trên Hình 1.2. Hình dạng tiết diện ảnh hưởng trực tiếp đến vị trí trọng tâm, chiều rộng mặt thoáng và đặc trưng dao động của chất lỏng, do đó cần được xem xét khi xây dựng mô hình động lực học và đánh giá ổn định lật ngang.

Như vậy, so với ô tô chở tải rắn, ổn định lật ngang của ô tô xi téc là bài toán tương tác động lực học phức tạp hơn do tải trọng thay đổi trạng thái theo thời gian. Điều này đặt ra yêu cầu xây dựng mô hình có xét đến dao động của chất lỏng và lựa chọn các chỉ tiêu phù hợp để đánh giá định lượng nguy cơ lật ngang của phương tiện.

1.2. Đặc điểm động lực học của ô tô chuyên dùng chở chất lỏng

Khác với tải rắn có vị trí tương đối ổn định so với thân xe, chất lỏng trong xi téc có thể chuyển động tương đối dưới tác dụng của gia tốc dọc, gia tốc ngang và kích thích từ mặt đường. Khi xe tăng tốc, phanh, quay vòng hoặc chuyển động trên mặt đường không bằng phẳng, mặt thoáng chất lỏng dao động sóng sánh (*sloshing*). Chuyển động này làm dịch chuyển trọng tâm khối chất lỏng, thay đổi phân bố khối lượng của toàn hệ và phát sinh các lực, mô men thủy động tác dụng lên thành xi téc [8, 17, 26].

Dao động của chất lỏng bao gồm thành phần cưỡng bức trong thời gian xe chịu kích thích và thành phần tự do sau khi kích thích thay đổi hoặc chấm dứt. Đặc tính dao động phụ thuộc vào hình dạng và kích thước xi téc, chiều rộng mặt thoáng, mức chất tải, khối lượng riêng, độ nhớt của chất lỏng và quy luật kích thích. Đối với dao động biên độ nhỏ, chuyển động của chất lỏng có thể được mô tả gần đúng bằng các dạng dao động riêng; khi biên độ tăng, sự biến dạng mặt thoáng và tương tác với thành xi téc làm cho đáp ứng của hệ trở nên phi tuyến hơn [17, 26, 18].

Mức chất tải là một trong những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến đặc tính dao động. Khi xi téc chứa đầy, mặt thoáng tự do hầu như không tồn tại nên chuyển động tương đối của chất lỏng bị hạn chế. Ngược lại, khi xi téc chỉ chứa một phần, mặt thoáng có thể dao động và khối chất lỏng dịch chuyển đáng kể theo phương ngang. Sự thay đổi mức chất tải làm thay đổi khối lượng tham gia dao động, vị trí trọng tâm, chiều rộng mặt thoáng, tần số dao động riêng và mức độ tiêu tán năng lượng của chất lỏng. Vì vậy, các mức chất tải trung gian thường tạo ra trạng thái động lực học bất lợi hơn so với trường hợp xi téc rỗng hoặc chứa đầy [29].

Hình dạng tiết diện xi téc cũng chi phối quỹ đạo chuyển động của trọng tâm chất lỏng và các tham số động lực học tương đương. Đối với xi téc hình tròn, hình học mặt thoáng và vị trí trọng tâm có thể được xác định tương đối thuận lợi từ các quan hệ hình học. Trong khi đó, đối với xi téc hình ê-líp, sự khác nhau giữa bán trục ngang và bán trục đứng làm thay đổi chiều rộng mặt thoáng, vị trí trọng tâm và đặc tính dao động theo mức chất tải. Do đó, mô hình dao động chất lỏng

trong xi téc hình tròn không thể được áp dụng trực tiếp cho xi téc hình ê-líp nếu không có sự tổng quát hóa phù hợp.

Khi tần số kích thích của xe gần với tần số dao động riêng của chất lỏng, hiện tượng cộng hưởng có thể xuất hiện, làm tăng biên độ dao động mặt thoáng và khuếch đại lực, mô men tác dụng lên xi téc [18]. Trong trường hợp đó, chuyển động của chất lỏng có thể lệch pha so với dao động của thân xe, làm cho lực và mô men do chất lỏng gây ra tiếp tục tác động ngay cả khi kích thích của xe đã giảm. Mức độ khuếch đại phụ thuộc đồng thời vào tần số kích thích, mức chất tải và đặc tính cản của chất lỏng.

Về phương diện động lực học phương tiện, sự dịch chuyển của khối chất lỏng làm thay đổi theo thời gian vị trí trọng tâm và mô men quán tính của hệ xe–chất lỏng. Lực và mô men thủy động bổ sung có thể làm tăng góc lắc ngang thân xe, gia tăng chuyển tải trọng từ bánh xe phía trong sang bánh xe phía ngoài và làm giảm gia tốc ngang giới hạn trước khi xe bắt đầu nhấc bánh. Ngoài ra, dao động chất lỏng còn tương tác với dao động lắc ngang của thân xe, dao động thẳng đứng của khối lượng được treo và đặc tính đàn hồi–giảm chấn của hệ thống treo, làm cho đáp ứng của ô tô xi téc phức tạp hơn so với ô tô chở tải rắn.

Như vậy, ô tô xi téc cần được xem xét như một hệ tương tác động lực học giữa xe, xi téc và chất lỏng. Việc đánh giá ổn định lật ngang không thể chỉ dựa trên khối lượng và vị trí trọng tâm tĩnh của tải, mà cần xét đến sự biến thiên của các tham số động lực học chất lỏng theo mức chất tải, lực và mô men phát sinh do dao động, cũng như sự liên kết giữa dao động chất lỏng với dao động lắc ngang và dao động thẳng đứng của xe. Đây là cơ sở để lựa chọn mô hình cơ học tương đương và xây dựng mô hình động lực học tổng thể của ô tô xi téc trong các chương tiếp theo.

1.3. Các tiêu chí đánh giá ổn định lật ngang

Ổn định lật ngang của ô tô có thể được đánh giá bằng các tiêu chí tĩnh và động. Các tiêu chí tĩnh phản ánh dự trữ ổn định theo hình học và vị trí trọng tâm, trong khi các tiêu chí động phản ánh trực tiếp quá trình chuyển tải trọng và trạng thái tiếp xúc bánh xe trong điều kiện vận hành. Trong luận án này, $LTR(t)$, $LTR_{\max}$,

$F_{z,\min}$ và RI được sử dụng làm các tiêu chí đánh giá chính; các đại lượng tĩnh và gia tốc ngang chuẩn hóa được dùng để tham khảo và mô tả điều kiện kích thích.

1.3.1. Các tiêu chí ổn định lật ngang tĩnh

Hệ số ổn định tĩnh (Static Stability Factor–SSF) đặc trưng cho quan hệ giữa chiều rộng vết bánh xe và chiều cao trọng tâm của ô tô [25]:

$$SSF = \frac{B}{2h_g}, \tag{1.1}$$

trong đó B là chiều rộng vết bánh xe và h_g là chiều cao trọng tâm. Giá trị SSF càng lớn thì dự trữ ổn định lật ngang tĩnh càng cao. NHTSA đã sử dụng SSF như một chỉ tiêu tham khảo trong đánh giá nguy cơ lật của phương tiện [9]. Tuy nhiên, SSF không phản ánh ảnh hưởng của hệ thống treo, lốp, tải trọng động và dao động tương đối của chất lỏng; do đó không được sử dụng làm tiêu chí chính của luận án.

Ngưỡng lật ngang tĩnh có thể được xác định bằng bàn thử nghiêng ngang (Tilt Table Test) [14]. Khi một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt bàn ở góc nghiêng β, tỷ số bàn nghiêng được xác định:

$$TTR = \tan\beta. \tag{1.2}$$

Nếu biểu diễn ngưỡng gia tốc ngang tĩnh dưới dạng không thứ nguyên - gia tốc ngang chuẩn hoá, có thể viết:

$$SRT = \frac{a_{y,\mathrm{cr}}}{g}. \tag{1.3}$$

Trong mô hình vật rắn lý tưởng, bỏ qua biến dạng hệ thống treo và lốp, $SRT \approx SSF$. Giá trị xác định trên bàn thử có xét đến biến dạng đàn hồi và sự dịch chuyển trọng tâm của xe nên phản ánh thực tế tốt hơn so với quan hệ hình học đơn giản [10, 11, 45].

1.3.2. Hệ số chuyển tải trọng ngang

Hệ số chuyển tải trọng ngang (Load Transfer Ratio–LTR) phản ánh trực tiếp mức độ chuyển tải giữa hai phía bánh xe [34, 38, 44, 52, 13]:

$$LTR(t) = \begin{cases} \dfrac{|F_{zR}(t) - F_{zL}(t)|}{F_{zR}(t) + F_{zL}(t)}, & F_{zR}(t) + F_{zL}(t) > \varepsilon_{\Sigma F}, \\ 1, & F_{zR}(t) + F_{zL}(t) \leq \varepsilon_{\Sigma F}, \end{cases} \tag{1.4}$$

trong đó F_{zL} và F_{zR} là tổng phản lực pháp tuyến phía trái và phía phải. Khi tải trọng phân bố đều, $LTR = 0$; khi một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc, $LTR = 1$. Khi tổng phản lực bên trái và bên phải nhỏ hơn $\varepsilon_{\Sigma F}$ coi như 2 bánh bị tách khỏi mặt đường, $LTR = 1$. Giá trị đặc trưng của một trường hợp khảo sát là:

$$LTR_{\max} = \max_{t} LTR(t). \tag{1.5}$$

Đồng thời, phản lực pháp tuyến nhỏ nhất được xác định:

$$F_{z,\min} = \min_{t} \left[F_{zL}(t), F_{zR}(t)\right]. \tag{1.6}$$

Trong xử lý số liệu mô phỏng, $\varepsilon_{\Sigma F} = 10^{-9}\,\mathrm{N}$, $\varepsilon_F = 10^{-6}\,\mathrm{N}$ và $\varepsilon_{LTR} = 10^{-6}$. Điều kiện $LTR_{\max} \geq 1 - \varepsilon_{LTR}$ hoặc $F_{z,\min} \leq \varepsilon_F$ được hiểu là ngưỡng khởi phát nhấc bánh, chưa nhất thiết đồng nghĩa với lật hoàn toàn nếu phản lực pháp tuyến phục hồi sau kích động.

1.3.3. Phân cấp trạng thái ổn định lật ngang bằng RI

Trong các nghiên cứu về phòng tránh lật, chỉ số nguy cơ lật thường được chuẩn hóa trong khoảng từ 0 đến 1 và phân chia thành nhiều mức để phục vụ cảnh báo, điều khiển hoặc lập kế hoạch quỹ đạo. Wu và cộng sự đã sử dụng cách phân chia chỉ số nguy cơ lật chuẩn hóa thành năm vùng để đánh giá mức độ nguy hiểm của ô tô tải nặng trong bài toán lập quỹ đạo chống lật [57]. Cách tiếp cận này cho thấy việc phân vùng nhiều mức có ý nghĩa trong nhận diện quá trình chuyển tiếp từ trạng thái ổn định đến trạng thái cận lật, thay vì chỉ sử dụng hai trạng thái an toàn và mất ổn định.

Chỉ số nguy cơ lật và các ranh giới phân vùng có thể khác nhau giữa các nghiên cứu. Các ngưỡng trung gian chưa được quy định thống nhất trong một tiêu chuẩn quốc tế. Trên cơ sở ý nghĩa vật lý của LTR, tham khảo nguyên tắc phân vùng nhiều mức của [57] và nhằm thống nhất việc so sánh các kết quả mô phỏng, luận

án sử dụng RI như một cấp phân loại mức độ an toàn lật ngang. Các ngưỡng 0,30, 0,60 và 0,80 trong luận án được đề xuất như các ranh giới phân vùng phục vụ phân tích và so sánh kết quả mô phỏng; tài liệu [57] được sử dụng để tham khảo cách tiếp cận phân vùng nhiều mức, không được xem là nguồn quy định trực tiếp các giá trị ngưỡng RI sử dụng trong luận án. RI được xác định từ $LTR_{\max}$ và trạng thái tiếp xúc bánh xe như sau:

$$RI = \begin{cases} 0, & 0 \le LTR_{\max} < 0{,}30, \\ 1, & 0{,}30 \le LTR_{\max} < 0{,}60, \\ 2, & 0{,}60 \le LTR_{\max} < 0{,}80, \\ 3, & 0{,}80 \le LTR_{\max} < 1{,}00, \\ 4, & LTR_{\max} \ge 1 - \varepsilon_{LTR} \text{ hoặc } F_{z,\min} \le \varepsilon_F. \end{cases} \tag{1.7}$$

Bảng 1.1: *Phân cấp mức độ an toàn lật ngang theo $LTR_{\max}$ và RI*

RI	$\boldsymbol{LTR_{\max}}$	**Trạng thái đánh giá**	**Ý nghĩa kỹ thuật**
0	$0 \le LTR_{\max} < 0{,}30$	Ổn định cao	Chuyển tải trọng ngang nhỏ, dự trữ ổn định còn lớn.
1	$0{,}30 \le LTR_{\max} < 0{,}60$	Bắt đầu chuyển tải	Sai khác phản lực pháp tuyến giữa hai phía bánh xe bắt đầu thể hiện rõ.
2	$0{,}60 \le LTR_{\max} < 0{,}80$	Chuyển tải nhiều	Một phía bánh xe giảm tải đáng kể, dự trữ ổn định giảm.
3	$0{,}80 \le LTR_{\max} < 1{,}00$	Vùng nguy hiểm	Xe tiệm cận trạng thái nhấc bánh, cần cảnh báo hoặc hạn chế điều kiện vận hành.
4	$LTR_{\max} \ge 1 - \varepsilon_{LTR}$ hoặc $F_{z,\min} \le \varepsilon_F$	Khởi phát nhấc bánh	Một phía bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường.

Các ngưỡng 0,30, 0,60 và 0,80 được sử dụng trong luận án như các ranh giới phân vùng phục vụ phân tích và so sánh kết quả. Trong đó, vùng $LTR_{\max} \ge 0{,}80$, $RI = 3$ được xem là vùng nguy hiểm do xe đã sử dụng phần lớn dự trữ chuyển tải trọng ngang. Cấp $RI = 4$ tương ứng với thời điểm khởi phát nhấc bánh. Nếu phản lực pháp tuyến phục hồi sau kích động và góc lắc ngang không tiếp tục tăng, xe có thể trở lại trạng thái tiếp xúc. Vì vậy, việc xác định phát triển lật không phục

hồi được thực hiện bằng cách quan sát diễn biến phản lực pháp tuyến, khả năng phục hồi tiếp xúc và đáp ứng góc lắc ngang của thân xe.

1.3.4. Gia tốc ngang chuẩn hóa và các đáp ứng bổ trợ

Gia tốc ngang chuẩn hóa được sử dụng để đặc trưng cho mức kích thích ngang tác dụng lên hệ xe–chất lỏng:

$$\mu_y(t) = \frac{a_y(t)}{g}, \tag{1.8}$$

trong đó $a_y(t)$ là gia tốc ngang của xe tại thời điểm t, $\mathrm{m/s^2}$; g là gia tốc trọng trường, $\mathrm{m/s^2}$; $\mu_y(t)$ là đại lượng không thứ nguyên. Dấu của μ_y biểu thị chiều tác dụng của gia tốc ngang theo quy ước của hệ tọa độ khảo sát.

Khi xe chuyển động trên mặt đường có siêu cao, tác dụng tổng hợp gây lắc ngang được biểu diễn bằng gia tốc ngang chuẩn hóa hiệu dụng:

$$\mu_{y,\mathrm{eff}}(t) = \mu_y(t)\cos\varphi_r(t) - \sin\varphi_r(t), \tag{1.9}$$

trong đó $\varphi_r(t)$ là góc nghiêng ngang của mặt đường. Theo quy ước, $\varphi_r > 0$ là siêu cao thuận, khi đó thành phần trọng lực theo phương song song mặt đường làm giảm tác dụng gây lắc ngang. Ngược lại, siêu cao bất lợi làm tăng $\mu_{y,\mathrm{eff}}$ và làm tăng chuyển tải trọng ngang.

Bên cạnh các chỉ tiêu đánh giá chính gồm $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI, các đáp ứng sau được sử dụng để phân tích cơ chế động lực học:

- $\psi_s(t)$: góc lắc ngang của khối lượng được treo;

- $\psi_u(t)$: góc lắc ngang của khối lượng không được treo;

- $\alpha(t)$: góc dao động tương đối của chất lỏng so với xi téc.

Các đại lượng $\psi_s(t)$, $\psi_u(t)$ và $\alpha(t)$ không được sử dụng trực tiếp để phân RI, nhưng là cơ sở làm rõ mối quan hệ giữa dao động thân xe, dao động cầu xe, dao động tương đối của chất lỏng và quá trình chuyển tải trọng ngang.

1.4. Tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước

Các nghiên cứu liên quan đến bài toán ổn định lật ngang của ô tô xi téc có thể được phân thành ba hướng chính: mô hình hóa dao động chất lỏng và xác định các tham số tương đương; xây dựng mô hình tương tác xe–chất lỏng để đánh giá ổn định lật ngang; và thực nghiệm, nhận dạng tham số, đánh giá mức độ phù hợp của mô hình. Cách phân nhóm này cho phép làm rõ mức độ kế thừa của luận án, đồng thời xác định các khoảng trống nghiên cứu cần tiếp tục giải quyết.

1.4.1. Các nghiên cứu trong nước

Ở Việt Nam, ô tô xi téc chở nước và các loại chất lỏng khác được sử dụng rộng rãi trong cấp nước sinh hoạt, tưới tiêu, rửa đường, chữa cháy, xử lý môi trường và vận chuyển chuyên dùng. Tuy nhiên, số lượng công trình nghiên cứu chuyên sâu về động lực học và ổn định lật ngang của ô tô xi téc còn hạn chế, đặc biệt đối với trường hợp xi téc tiết diện ê-líp và có xét đến dao động tương đối của chất lỏng trong dải mức chất tải khác nhau.

Một số nghiên cứu trong nước đã bước đầu tiếp cận bài toán dao động chất lỏng trong xi téc. Phạm Duy Nam và cộng sự [5] xây dựng mô hình đồng mô phỏng giữa phần mềm động lực học đa vật thể và phần mềm mô phỏng dòng chất lỏng nhằm nghiên cứu tương tác giữa dao động chất lỏng và chuyển động của xe. Cách tiếp cận đồng mô phỏng có ưu điểm là mô tả được ảnh hưởng qua lại giữa trường dòng chất lỏng và đáp ứng động lực học của phương tiện ở cấp độ hệ thống. Tuy nhiên, do mô hình chủ yếu dựa trên các khối mô phỏng chức năng có sẵn, hệ phương trình động lực học tường minh chưa được thiết lập đầy đủ; vì vậy khả năng phân tích bản chất cơ học, xây dựng quan hệ tham số và khảo sát hệ thống theo mức chất tải còn hạn chế.

Trần Công Chi [2] nghiên cứu dao động của nước trong xi téc xe chữa cháy rừng khi phanh khẩn cấp bằng phương pháp CFD. Nghiên cứu tập trung vào áp lực va đập lên thành xi téc và hiệu quả của vách ngăn trong việc giảm dao động chất lỏng. Kết quả cho thấy vách ngăn có tác dụng giảm áp lực va đập và biên độ dao động của chất lỏng. Tuy nhiên, nội dung nghiên cứu chủ yếu xem xét dao động

theo phương dọc trong điều kiện phanh, chưa tích hợp với mô hình động lực học ô tô và chưa đánh giá ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ổn định lật ngang.

Nguyễn Thành Công và cộng sự [3] khảo sát ảnh hưởng của mức đổ đầy nước đến ổn định lật ngang của xe chữa cháy. Nghiên cứu sử dụng tính toán mô men lật và mô phỏng động lực học để đánh giá góc nghiêng thân xe và hệ số chuyển tải trọng ngang. Đây là một trong những nghiên cứu trong nước liên quan trực tiếp đến ổn định lật ngang của xe chở chất lỏng. Tuy nhiên, mô hình được đơn giản hóa với xi téc hình tròn và con lắc đơn có tâm lắc cố định; các tham số tương đương của chất lỏng chưa được xây dựng đầy đủ theo mức chất tải và chưa xét đồng thời dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng, hệ thống treo và phản lực tiếp xúc bánh xe.

Ở một hướng tiếp cận khác, Nguyễn Xã Hội [4] nghiên cứu dao động của xe chữa cháy rừng đa năng dưới tác động của độ mấp mô mặt đất và cơ cấu công tác, kết hợp mô phỏng với thực nghiệm để xác định chế độ vận hành phù hợp. Lương Văn Vạn [7] xây dựng mô hình xác định tải trọng động, kết hợp phân tích phần tử hữu hạn và thực nghiệm để đánh giá độ bền khung sát xi của loại xe này. Các công trình đã cung cấp cơ sở về mô hình hóa và kiểm chứng động lực học xe chuyên dùng, nhưng chưa xét tương tác xe–chất lỏng và quá trình chuyển tải trọng ngang gây mất ổn định lật.

Bên cạnh các nghiên cứu trực tiếp về ô tô xi téc, một số công trình trong nước về thực nghiệm và nhận dạng tham số động lực học ô tô cũng có giá trị tham khảo quan trọng. Nguyễn Văn Bang và cộng sự [6] đã thực hiện thí nghiệm xác định các thông số động lực học ô tô trong các điều kiện kích thích đơn giản. Dữ liệu thí nghiệm được sử dụng để hiệu chỉnh các tham số của hệ thống treo, thanh ổn định, khối lượng được treo và mô men quán tính thân xe; sau đó mô hình được dùng để khảo sát ổn định lật ngang động trên tuyến quốc lộ 4D đoạn Sa Pa–Lào Cai. Nghiên cứu này cho thấy vai trò của thực nghiệm trong việc nâng cao độ tin cậy của mô hình động lực học trước khi sử dụng cho khảo sát mô phỏng.

Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã đề cập đến dao động chất lỏng trong xi téc, ổn định lật ngang của một số loại xe chuyên dùng và phương pháp thực nghiệm–nhận dạng tham số đối với ô tô. Tuy nhiên, chưa có nhiều công trình xây

dựng mô hình động lực học tường minh cho ô tô xi téc tiết diện ê-líp có xét đồng thời dao động tương đối của chất lỏng, dao động lắc ngang–thẳng đứng của xe, hệ thống treo, lốp và phản lực tiếp xúc bánh xe. Đồng thời, dữ liệu thực nghiệm trên ô tô xi téc thực phục vụ nhận dạng tham số và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình trong nhiều mức chất tải vẫn còn hạn chế.

1.4.2. Các nghiên cứu ngoài nước

Trên thế giới, bài toán dao động chất lỏng trong xi téc và ảnh hưởng của hiện tượng này đến ổn định lật ngang của phương tiện đã được nghiên cứu tương đối sớm và đa dạng. Các công trình tập trung vào ba nhóm vấn đề: mô hình cơ học tương đương của dao động chất lỏng; mô hình tương tác xe–chất lỏng và ổn định lật ngang; và thực nghiệm, kiểm chứng mô hình.

Mô hình hóa dao động chất lỏng và tham số tương đương

Dao động chất lỏng trong xi téc có thể được mô hình hóa bằng các phương pháp trường dòng như CFD, các phương pháp hạt hoặc mô hình cơ học tương đương. CFD và mô hình hạt cho phép mô tả chi tiết mặt thoáng, phân bố áp suất, vận tốc và va đập chất lỏng, nên phù hợp với các bài toán phân tích trường dòng, thiết kế vách ngăn hoặc đánh giá tải thủy động cục bộ. Tuy nhiên, các phương pháp này có chi phí tính toán lớn và khó tích hợp trực tiếp vào mô hình động lực học xe khi cần khảo sát nhiều mức chất tải, vận tốc và kịch bản vận hành. Ngược lại, mô hình cơ học tương đương quy đổi ảnh hưởng của chất lỏng thành một số hữu hạn tham số và bậc tự do đặc trưng, thuận lợi cho thiết lập phương trình chuyển động, nhận dạng tham số và đánh giá các chỉ tiêu ổn định lật ngang. Vì vậy, luận án lựa chọn mô hình cơ học tương đương, phù hợp với mục tiêu phân tích ảnh hưởng tổng hợp của dao động chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang, phản lực pháp tuyến bánh xe, hệ số chuyển tải trọng ngang và các ngưỡng mất ổn định.

Các mô hình cơ học tương đương được sử dụng rộng rãi để thay thế bài toán chất lỏng liên tục bằng một số hữu hạn bậc tự do, qua đó thuận lợi hơn khi tích hợp vào mô hình động lực học phương tiện. Zheng và cộng sự [63] xây dựng mô hình con lắc tương đương để mô tả dao động chất lỏng trong xi téc chứa một phần

chất lỏng, từ đó xác định lực và mô men quán tính do dao động chất lỏng gây ra. Mô hình làm rõ ảnh hưởng cơ bản của dao động chất lỏng, nhưng chủ yếu mới xét riêng phần chất lỏng, chưa tích hợp đầy đủ vào mô hình động lực học ô tô để đánh giá các chỉ tiêu ổn định lật ngang.

Li và cộng sự [37] xây dựng mô hình động lực học ô tô xi téc có xét dao động chất lỏng thông qua mô hình con lắc tương đương. Các tham số như khối lượng dao động, khối lượng chuyển động cùng xi téc và quỹ đạo dao động được xác định theo mức chất tải trên cơ sở mô phỏng CFD và phương pháp khớp hàm số. Kết quả cho thấy mô hình con lắc tương đương có thể mô tả được ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến đáp ứng động lực học của xe. Tuy nhiên, các tham số tương đương chủ yếu được lượng hóa từ dữ liệu CFD; quan hệ giải tích hoặc bán giải tích liên tục theo mức chất tải, đặc biệt đối với xi téc tiết diện ê-líp, chưa được phát triển đầy đủ để phục vụ phân tích tham số và khảo sát ổn định lật ngang.

Hasheminejad và Aghabeigi [23] phân tích dao động riêng của chất lỏng trong xi téc nằm ngang tiết diện ê-líp nhằm xác định tần số riêng, dạng dao động và phân bố áp suất thủy động. Kết quả khẳng định hình dạng tiết diện ê-líp ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính dao động của chất lỏng. Tuy nhiên, nghiên cứu được xây dựng trên giả thiết chất lỏng lý tưởng, chưa xét đầy đủ cơ chế tiêu tán năng lượng và chưa liên kết với mô hình động lực học ô tô để đánh giá ổn định lật ngang.

Yu và Chu [59] mô phỏng dao động phi tuyến của chất lỏng trong xe xi téc nhằm phân tích chuyển động mặt thoáng, phân bố áp suất và lực thủy động tác dụng lên thành xi téc dưới các điều kiện kích thích ngang. Kết quả cho thấy mức chất tải ảnh hưởng rõ đến đặc tính dao động của chất lỏng, đặc biệt trong trường hợp xi téc chứa một phần chất lỏng. Tuy vậy, trọng tâm của nghiên cứu vẫn là trường dòng và lực thủy động, chưa tích hợp đầy đủ với mô hình động lực học phương tiện để lượng hóa ảnh hưởng đến hệ số chuyển tải trọng ngang, phản lực bánh xe và ngưỡng lật.

Popov [46] nghiên cứu dao động chất lỏng trong xi téc vận tải tiết diện chữ nhật bằng cách giải số phương trình chuyển động của chất lỏng và mặt thoáng tự do. Mô hình cho phép mô tả sự thay đổi biên dạng mặt thoáng, phân bố áp suất và lực thủy động trong quá trình dao động. Tuy nhiên, nghiên cứu giới hạn ở xi

téc tiết diện chữ nhật, chưa xét các dạng tiết diện tròn hoặc ê-líp thường gặp trên ô tô xi téc, đồng thời chưa tích hợp với mô hình động lực học xe để đánh giá ổn định lật ngang trong điều kiện vận hành.

Salem [51] xây dựng mô hình động lực học ô tô xi téc tiết diện ê-líp có xét dao động chất lỏng bằng mô hình con lắc Trammel. Nghiên cứu cho thấy dao động chất lỏng ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng lắc ngang và nguy cơ lật của phương tiện, nhất là khi xi téc chứa một phần chất lỏng. Tuy nhiên, các tham số tương đương của chất lỏng chưa được lượng hóa thành các quan hệ liên tục theo mức chất tải; cơ chế tiêu tán năng lượng và ảnh hưởng của dao động thẳng đứng của hệ xe–chất lỏng cũng chưa được xét đầy đủ.

Kolaei [30] kết hợp thực nghiệm, mô phỏng CFD và mô hình cơ học tương đương để nghiên cứu lực và mô men thủy động do dao động chất lỏng trong xi téc. Công trình này cho thấy sự phù hợp của cách tiếp cận mô hình tương đương trong việc mô tả lực thủy động tổng hợp. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu tập trung vào mô hình chất lỏng và kiểm chứng lực thủy động, chưa tích hợp có hệ thống với mô hình động lực học ô tô để đánh giá ổn định lật ngang theo các chỉ tiêu như LTR, $F_{z,\min}$, cấp nguy cơ lật và ngưỡng vận tốc.

Mô hình tương tác xe–chất lỏng và ổn định lật ngang

Các nghiên cứu về tương tác xe–chất lỏng đã chỉ ra rằng sự dịch chuyển của khối lượng chất lỏng có thể làm tăng mô men lắc ngang và chuyển tải trọng giữa hai bên bánh xe. Ranganathan và cộng sự [50] phân tích ảnh hưởng của sự dịch chuyển khối lượng chất lỏng đến đáp ứng động của đoàn xe xi téc rơ moóc. Kết quả cho thấy tải chất lỏng chứa không đầy có thể làm tăng dao động lắc ngang và chuyển tải trọng ngang. Tuy nhiên, ảnh hưởng của chất lỏng được mô tả chủ yếu thông qua sự dịch chuyển tải tương đương, chưa mô tả trực tiếp dao động mặt thoáng và các hiện tượng phi tuyến của chất lỏng.

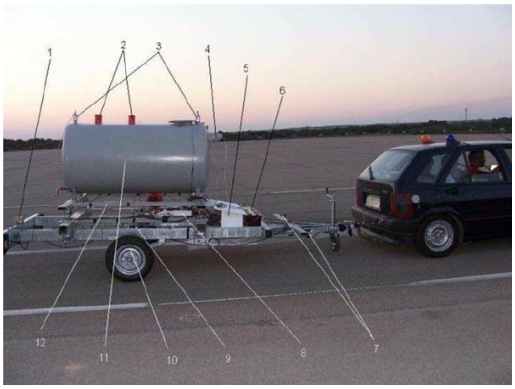
Rakheja và cộng sự [49] nghiên cứu ổn định lật ngang của đoàn xe xi téc rơ moóc trong điều kiện quay vòng ổn định. Ảnh hưởng của chất lỏng được biểu diễn thông qua dịch chuyển tải trọng và vị trí trọng tâm tương đương. Kết quả cho thấy dao động hoặc dịch chuyển khối chất lỏng làm tăng mô men lật và làm giảm

ổn định chuyển động. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu tập trung vào quay vòng ổn định, chưa đánh giá đầy đủ các kích thích quá độ như chuyển làn, quay vòng đổi chiều hoặc điều kiện có kích động mặt đường.

Nhìn chung, nhóm nghiên cứu về mô hình tương tác xe–chất lỏng đã làm rõ được xu hướng ảnh hưởng bất lợi của dao động chất lỏng đối với ổn định lật ngang. Tuy nhiên, phần lớn mô hình mới dừng ở mô tả lắc ngang hoặc dịch chuyển trọng tâm tương đương; sự liên kết đồng thời giữa dao động tương đối của chất lỏng, dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng, hệ thống treo và phản lực tiếp xúc bánh xe vẫn chưa được mô tả đầy đủ trong các kịch bản vận hành quá độ hoặc đổi dấu gia tốc ngang.

Thực nghiệm, nhận dạng và đánh giá mô hình

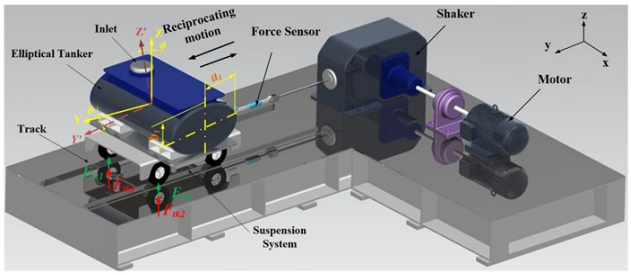
Song song với mô hình hóa, các nghiên cứu thực nghiệm đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm chứng mô hình, xác định tham số và đánh giá độ tin cậy của kết quả mô phỏng. Bottiglione và Mantriota [12] thực hiện thí nghiệm trên xe đầu kéo–sơ mi rơ moóc xi téc nhằm đánh giá ảnh hưởng của dao động chất lỏng và kiểm chứng mô hình động lực học (Hình 1.3). Kết quả cho thấy dao động chất lỏng làm tăng chuyển tải trọng ngang, phụ thuộc vào mức chất tải và điều kiện điều khiển. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu khảo sát các mức chất tải đến khoảng 50% thể tích xi téc, chưa đánh giá đầy đủ vùng tải trung gian cao, nơi dao động chất lỏng có thể gây ảnh hưởng bất lợi mạnh đến ổn định lật ngang.



Hình 1.3: *Mô hình thử nghiệm động lực học chất lỏng trong xi téc sử dụng xe kéo*

Yu và cộng sự [60] xây dựng mô hình thử nghiệm dao động chất lỏng trong phòng thí nghiệm nhằm khảo sát ảnh hưởng của mức chất tải, hình dạng xi téc và

điều kiện kích thích đến lực thủy động tác dụng lên thành xi téc (Hình 1.4). Kết quả cho thấy các yếu tố này ảnh hưởng rõ đến lực thủy động phát sinh. Tuy nhiên, thí nghiệm được thực hiện trên mô hình thử trong phòng, chưa đánh giá trực tiếp trên ô tô xi téc thực và chưa làm rõ ảnh hưởng đến góc lắc ngang thân xe, phản lực bánh xe hoặc ngưỡng lật ngang của phương tiện.



Hình 1.4: *Mô hình thử nghiệm dao động chất lỏng với kích thích ngang*

Das và cộng sự [15] đề xuất phương pháp ước lượng ngưỡng lật động của xe thương mại từ dữ liệu thử nghiệm ở tốc độ thấp. Kết quả cho thấy mô hình có thể phản ánh xu hướng ảnh hưởng của chiều cao trọng tâm và tải trọng đến ổn định lật. Tuy nhiên, nghiên cứu tập trung vào xe thương mại nói chung, chưa xét đến ảnh hưởng của dao động chất lỏng trong xi téc; đồng thời phương pháp dựa trên dữ liệu tốc độ thấp nên còn hạn chế khi áp dụng cho các điều kiện có dao động chất lỏng mạnh hoặc tương tác xe–chất lỏng phức tạp.

Wang và cộng sự [55] đề xuất phương pháp đánh giá ổn định lật của sơ mi rơ moóc chở chất lỏng dựa trên sự thay đổi lực thẳng đứng tại bánh xe và kiểm chứng bằng thực nghiệm. Nghiên cứu cho thấy phản lực thẳng đứng tại bánh xe là đại lượng phản ánh trực tiếp quá trình chuyển tải trọng và có thể sử dụng để đánh giá nguy cơ lật. Tuy nhiên, trọng tâm của công trình là chỉ tiêu giám sát trạng thái lật dựa trên lực bánh xe; cơ chế tương tác giữa dao động chất lỏng, dao động lắc ngang–thẳng đứng của xe và các tham số dao động tương đương của chất lỏng chưa được phân tích sâu.

Bảng 1.2 tổng hợp các hướng nghiên cứu liên quan đến luận án, các kết quả chính đã đạt được và những vấn đề còn lại làm cơ sở xác định khoảng trống nghiên cứu.

Bảng 1.2: *Tổng hợp các hướng nghiên cứu liên quan đến luận án*

Hướng nghiên cứu	**Tài liệu tiêu biểu**	**Kết quả chính**	**Vấn đề còn lại**
Mô hình cơ học tương đương	[63, 37, 51, 30]	Mô tả lực và mô men do dao động chất lỏng bằng số hữu hạn bậc tự do; thuận lợi cho tích hợp với mô hình động lực học phương tiện.	Quan hệ tham số liên tục theo mức chất tải của xi téc tiết diện ê-líp chưa đầy đủ; cơ chế cản tương đương của chất lỏng chưa được xác định rõ từ thực nghiệm trên xe thực.
Mô phỏng chất lỏng	[23, 59, 46, 2]	Làm rõ tần số riêng, dạng dao động, mặt thoáng, áp suất và lực thủy động tác dụng lên thành xi téc.	Khó tích hợp trực tiếp vào mô hình động lực học xe để khảo sát hệ thống theo mức chất tải, vận tốc và kịch bản vận hành.
Tương tác xe–chất lỏng	[50, 49, 3, 5]	Khẳng định ảnh hưởng của chất lỏng đến mô men lắc ngang, chuyển tải trọng và ổn định lật ngang.	Chưa mô tả thống nhất dao động chất lỏng, dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng, hệ thống treo và tiếp xúc bánh xe trong cùng mô hình.
Thực nghiệm và nhận dạng	[12, 60, 55, 6, 1, 4, 7]	Cung cấp phương pháp xác định tham số, hiệu chỉnh mô hình và đánh giá mức độ phù hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm.	Thiếu dữ liệu trên ô tô xi téc thực trong toàn dải mức chất tải; dữ liệu kiểm chứng phản lực bánh xe và trạng thái gần nhấc bánh còn hạn chế.

1.4.3. Nhận xét và khoảng trống nghiên cứu

Từ các nghiên cứu trong và ngoài nước có thể rút ra một số nhận xét chính như sau:

Thứ nhất, các mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc đã được nghiên cứu khá rộng rãi và chứng minh được khả năng thay thế bài toán chất lỏng liên tục trong nhiều điều kiện khảo sát. Tuy nhiên, đối với xi téc tiết diện ê-líp, các tham số động lực học tương đương như khối lượng dao động, khối lượng chuyển động cùng xi téc, vị trí trọng tâm, chiều dài quỹ đạo tương đương và tần số dao động riêng vẫn chưa được xây dựng đầy đủ dưới dạng các quan hệ liên tục theo mức chất tải để tích hợp thuận lợi vào mô hình động lực học ô tô.

Thứ hai, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng dao động hoặc dịch chuyển của chất lỏng làm tăng mô men lắc ngang và chuyển tải trọng ngang. Tuy nhiên, phần lớn mô hình chỉ tập trung vào dao động lắc ngang hoặc quay vòng ổn định; sự liên kết

đồng thời giữa dao động chất lỏng, dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng, hệ thống treo, lốp và phản lực tiếp xúc bánh xe chưa được mô tả đầy đủ, đặc biệt trong các kịch bản có gia tốc ngang quá độ hoặc đổi dấu.

Thứ ba, cơ chế tiêu tán năng lượng của dao động chất lỏng thường được mô tả bằng tham số cản tương đương hoặc bị bỏ qua trong một số mô hình lý tưởng. Việc xác định, nhận dạng và sử dụng tham số cản phù hợp với dữ liệu thực nghiệm vẫn là vấn đề quan trọng khi xây dựng mô hình phục vụ đánh giá ổn định lật ngang của ô tô xi téc thực.

Thứ tư, các nghiên cứu thực nghiệm đã khẳng định vai trò của dữ liệu đo trong kiểm chứng mô hình và đánh giá chuyển tải trọng. Tuy nhiên, dữ liệu thực nghiệm trên ô tô xi téc thực, với nhiều mức chất tải, nhiều dạng kích thích và khả năng phục vụ nhận dạng tham số mô hình còn hạn chế. Đặc biệt, các kết quả thực nghiệm phục vụ đối sánh đáp ứng lắc ngang trong cả miền thời gian và miền tần số chưa được khai thác nhiều đối với ô tô xi téc tiết diện ê-líp.

Thứ năm, các chỉ tiêu đánh giá ổn định lật ngang như LTR, phản lực pháp tuyến nhỏ nhất, gia tốc ngang tới hạn và ngưỡng vận tốc đã được sử dụng trong nhiều nghiên cứu. Tuy vậy, việc phân biệt giữa khởi phát nhấc bánh, nhấc bánh tạm thời có phục hồi và trạng thái phát triển lật không phục hồi vẫn chưa được phân tích có hệ thống đối với ô tô xi téc chở chất lỏng trong các kịch bản vận hành đặc trưng.

Từ các nhận xét trên, khoảng trống nghiên cứu của luận án được xác định ở ba nội dung chính:

- Xây dựng mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng cho ô tô xi téc tiết diện ê-líp, trong đó các tham số tương đương của chất lỏng được xét theo mức chất tải và được tích hợp với dao động lắc ngang–thẳng đứng của xe;

- Xác định và nhận dạng các tham số động lực học của mô hình trên cơ sở dữ liệu thí nghiệm của ô tô xi téc thực;

- Đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp đánh giá ổn định lật ngang RI, ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng phát triển lật không phục hồi trong các kịch bản vận hành đặc trưng.

1.5. Đối tượng, phạm vi, mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là ổn định lật ngang động của hệ ô tô xi téc–chất lỏng, trong đó xét đến tương tác giữa dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng của xe và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp.

Đối tượng khảo sát cụ thể là ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước, sử dụng xi téc tiết diện hình ê-líp được thiết kế và chế tạo tại Việt Nam. Xi téc chỉ bố trí vách ngăn có mặt phẳng vuông góc với trục dọc xe.



Hình 1.5: *Ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 sử dụng xi téc tiết diện hình ê-líp*

Phạm vi nghiên cứu được giới hạn như sau:

- Chất lỏng khảo sát là nước; cơ chế tiêu tán năng lượng của dao động chất lỏng được biểu diễn bằng tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng ζ.

- Các mức chất tải được xét gồm $h_p = 0$; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00.

- Mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng hệ thống xe–chất lỏng xét các bậc tự do Z_s, ψ_s, Z_u, ψ_u và α. Gia tốc ngang hoặc độ cong quỹ đạo được sử dụng làm đầu vào; chuyển động quay vòng trong mặt phẳng đường và hệ thống điều khiển lái không được mô hình hóa chi tiết.

- Thực nghiệm được thực hiện trong hai chế độ: quay vòng bán kính không đổi và chuyển động thẳng qua mấp mô. Dữ liệu đo được sử dụng để xác định

các tham số của xe, nhận dạng $I_{s,\mathrm{id}}$, ζ_{id} và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình.

- Khảo sát ổn định lật ngang được thực hiện trong các kịch bản J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S; cua tay áo và cua chữ S được xét thêm ảnh hưởng của siêu cao.

- Các tiêu chí chính gồm $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI. Điều kiện $LTR_{\max} \geq 1-\varepsilon_{LTR}$ hoặc $F_{z,\min} \leq \varepsilon_F$ được hiểu là khởi phát nhấc bánh; phát triển lật không phục hồi theo tiêu chí mô phỏng được đánh giá bổ sung qua khả năng phục hồi tiếp xúc và diễn biến góc lắc ngang.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là xây dựng và đánh giá mô hình động lực học hệ ô tô xi téc–chất lỏng có xét dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp; qua đó làm rõ và lượng hóa ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ổn định lật ngang động trong các điều kiện vận hành đặc trưng, làm cơ sở đề xuất khuyến nghị kỹ thuật và vận hành.

Các mục tiêu cụ thể gồm:

- Xây dựng mô hình cơ học tương đương của chất lỏng theo mức chất tải và tích hợp với mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng của ô tô xi téc.

- Xác định các tham số của xe khảo sát, nhận dạng $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}, đồng thời đánh giá mức độ phù hợp của mô hình bằng dữ liệu thực nghiệm.

- Đánh giá ảnh hưởng của mức chất tải và dao động tương đối chất lỏng đến $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$, RI và các ngưỡng mất ổn định trong các kịch bản vận hành đặc trưng.

Nội dung nghiên cứu

- Xây dựng mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn và hình ê-líp theo mức chất tải.

- Tích hợp mô hình cơ học tương đương mô tả dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc với mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng của xe, hình thành mô hình động lực học hệ xe xi téc–chất lỏng có xét tương tác thân xe–chất lỏng, ký hiệu E2.

- Xác định các tham số từ đo đạc và tính toán; nhận dạng $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}; đánh giá mức độ phù hợp của mô hình bằng dữ liệu thực nghiệm.

- Phân tích cơ chế tương tác động lực học giữa thân xe và chất lỏng, đồng thời khảo sát ảnh hưởng của mức chất tải đến đáp ứng của hệ xe xi téc–chất lỏng.

- Đánh giá ổn định lật ngang theo $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$, RI và ngưỡng mất ổn định trong 4 kịch bản vận hành; đề xuất khuyến nghị kỹ thuật và vận hành.

Phương pháp nghiên cứu

Luận án kết hợp nghiên cứu tài liệu, phân tích lý thuyết, mô phỏng số, thực nghiệm và nhận dạng tham số. Mô hình cơ học tương đương được xây dựng từ các quan hệ hình học và động lực học của chất lỏng; mô hình hệ xe–chất lỏng được thiết lập bằng phương pháp động lực học đa vật. Các tham số của xe được xác định từ đo đạc, tính toán và nhận dạng; mức độ phù hợp của mô hình được đánh giá bằng đối sánh mô phỏng–thí nghiệm trong miền thời gian và miền tần số. Mô hình sau đánh giá được sử dụng để khảo sát ổn định lật ngang theo mức chất tải, vận tốc và kịch bản vận hành.

1.6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Về khoa học, luận án xây dựng mô hình động lực học liên kết dao động tương đối của chất lỏng với dao động lắc ngang–thẳng đứng của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp. Các quan hệ tham số theo mức chất tải, kết quả nhận dạng và đối sánh thực nghiệm góp phần làm rõ cơ chế tương tác của hệ xe–chất lỏng và cung cấp cơ sở đánh giá ổn định lật ngang bằng $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI.

Về thực tiễn, mô hình và kết quả khảo sát cho phép nhận diện các mức chất tải, vận tốc và kịch bản vận hành bất lợi đối với ô tô xi téc Hyundai MIGHTY

2016. Kết quả là cơ sở tham khảo để đề xuất khuyến nghị kỹ thuật và vận hành, phục vụ đánh giá an toàn và lựa chọn chế độ khai thác phù hợp cho ô tô xi téc chở chất lỏng.

1.7. Bố cục của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và kiến nghị, luận án gồm bốn chương:

Chương 1: ***Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.*** Trình bày đặc điểm động lực học của ô tô xi téc, các tiêu chí đánh giá ổn định lật ngang, tổng hợp nghiên cứu trong và ngoài nước, xác định khoảng trống, mục tiêu, phạm vi và phương pháp nghiên cứu.

Chương 2: ***Xây dựng mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng.*** Xây dựng mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tròn và ê-líp theo mức chất tải; đánh giá tính nhất quán và tích hợp với mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng để hình thành mô hình đầy đủ phục vụ đánh giá ổn định lật ngang và các ngưỡng mất ổn định.

Chương 3: ***Thí nghiệm và nhận dạng tham số mô hình ô tô xi téc–chất lỏng.*** Trình bày đối tượng, thiết bị và chế độ thí nghiệm; xác định các tham số của xe; nhận dạng $I_{s,\mathrm{id}}$, ζ_{id}; đối sánh mô phỏng–thí nghiệm trong quay vòng ổn định và chuyển động qua mấp mô để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình.

Chương 4: ***Khảo sát và đánh giá ổn định lật ngang động của ô tô xi téc chở chất lỏng.*** Phân tích cơ chế tương tác thân xe–chất lỏng; khảo sát các kịch bản J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S; đánh giá ảnh hưởng của mức chất tải, vận tốc và siêu cao bằng $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$, RI và các ngưỡng mất ổn định.

1.8. Kết luận chương 1

Chương 1 đã làm rõ đặc điểm của bài toán ổn định lật ngang ô tô xi téc và hệ thống hóa các tiêu chí đánh giá. Trong luận án, $LTR(t)$ được sử dụng như đại lượng liên tục phản ánh chuyển tải trọng; $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI là các tiêu chí đánh giá chính. Điều kiện $LTR_{\max} \geq 1 - \varepsilon_{LTR}$ hoặc $F_{z,\min} \leq \varepsilon_F$ được hiểu là ngưỡng khởi

phát nhấc bánh, chưa đồng nghĩa với lật hoàn toàn nếu tiếp xúc bánh xe được phục hồi.

Tổng quan nghiên cứu cho thấy mô hình cơ học tương đương là hướng tiếp cận phù hợp để tích hợp dao động chất lỏng với động lực học ô tô. Tuy nhiên, còn thiếu các quan hệ tham số theo mức chất tải cho xi téc ê-líp, mô hình thống nhất dao động chất lỏng–lắc ngang–thẳng đứng–tiếp xúc bánh xe và dữ liệu thực nghiệm trên ô tô xi téc thực để nhận dạng, đánh giá mô hình và lượng hóa nguy cơ mất ổn định.

Từ các khoảng trống trên, luận án tập trung xây dựng mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng cho hệ ô tô xi téc–chất lỏng; xác định và nhận dạng tham số bằng thực nghiệm; đánh giá ảnh hưởng của mức chất tải và dao động tương đối chất lỏng đến $LTR_{\max}$, $F_{z,\min}$, RI và các ngưỡng mất ổn định trong các kịch bản vận hành đặc trưng. Kết quả là cơ sở đề xuất khuyến nghị kỹ thuật và vận hành cho ô tô xi téc chở chất lỏng.

CHƯƠNG 2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ XE–CHẤT LỎNG

2.1. Cơ sở và trình tự xây dựng mô hình

2.1.1. Trình tự phát triển mô hình

Các mô hình động lực học trong mặt phẳng thẳng đứng ngang xe được phát triển theo trình tự từ mô hình cơ sở đến mô hình mở rộng. Mô hình C được xây dựng cho xi téc tiết diện hình tròn với kích thích gia tốc ngang. Trên cơ sở đó, mô hình E1 được phát triển cho xi téc tiết diện hình ê-líp với 1 phần chất lỏng ở đáy chuyển động cùng xi téc, mô hình được kiểm tra tính nhất quán thông qua trường hợp giới hạn khi tiết diện ê-líp quy về tiết diện tròn, mô hình EC1. Cuối cùng, mô hình E2 được thiết lập từ E1 bằng cách bổ sung kích thích mấp mô mặt đường, đồng thời xét liên kết giữa dao động chất lỏng, dao động lắc ngang và dao động thẳng đứng của xe. Các tham số khó xác định trực tiếp được nhận dạng từ dữ liệu thí nghiệm của ô tô xi téc khảo sát.

Trình tự phát triển các mô hình được trình bày trên Hình 2.1. Các mô hình được xây dựng theo hướng tăng dần mức độ mô tả, từ mô hình cơ sở đến mô hình mở rộng. Trình tự này cho phép kiểm tra tính nhất quán của từng bước thiết lập, đồng thời làm rõ ảnh hưởng riêng của hình dạng xi téc, dao động chất lỏng và kích động mặt đường đến ổn định lật ngang.

2.1.2. Phạm vi và các giả thiết mô hình

Hệ xe–chất lỏng được mô tả bằng hai phân hệ: ô tô và chất lỏng trong xi téc. Phân hệ ô tô được mô hình hóa trong mặt phẳng thẳng đứng ngang xe, còn chất lỏng được biểu diễn bằng mô hình cơ học tương đương và liên kết với chuyển động thân xe. Cách tiếp cận này cho phép mô tả các cơ chế chính chi phối ổn định lật ngang, gồm dao động lắc ngang, dao động thẳng đứng, chuyển tải trọng bánh xe

Bảng 2.1: *Tổng hợp các mô hình và cấu hình tính toán sử dụng trong luận án*

Ký hiệu	Tên gọi	Phạm vi mô tả	Vai trò trong luận án
C	Mô hình xi téc tiết diện hình tròn	Dao động lắc ngang của ô tô xi téc với chất lỏng được mô tả bằng mô hình cơ học tương đương trong xi téc tròn	Mô hình cơ sở để thiết lập quan hệ động lực học và đối sánh với mô hình ê-líp suy biến.
$E1$	Mô hình xi téc tiết diện ê-líp	Dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện ê-líp, có tách phần chất lỏng dao động tương đối và phần chuyển động cùng xi téc	Mô hình tổng quát hóa từ xi téc tròn sang xi téc ê-líp.
$EC1$	Trường hợp giới hạn của mô hình $E1$	Mô hình $E1$ khi tiết diện ê-líp quy về tiết diện tròn	Dùng để kiểm tra tính nhất quán hình học và động lực học giữa C và $E1$.
$E2$	Mô hình lắc ngang–thẳng đứng của hệ xe–chất lỏng	Dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang, dao động tương đối của chất lỏng, kích động mặt đường và tiếp xúc một chiều lốp–mặt đường	Mô hình chính dùng cho nhận dạng tham số ở Chương 3 và khảo sát ổn định lật ngang ở Chương 4.
SL	Cấu hình có xét dao động tương đối chất lỏng	Mô hình $E2$ đầy đủ, giữ bậc tự do dao động tương đối của chất lỏng	Cấu hình khảo sát chính để đánh giá ảnh hưởng của dao động chất lỏng.
RG	Cấu hình chất lỏng quy đổi cứng	Mô hình $E2$ trong đó khối lượng và trọng tâm tĩnh của chất lỏng được giữ nguyên nhưng loại bỏ bậc tự do dao động tương đối	Cấu hình đối chứng để lượng hóa riêng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng.

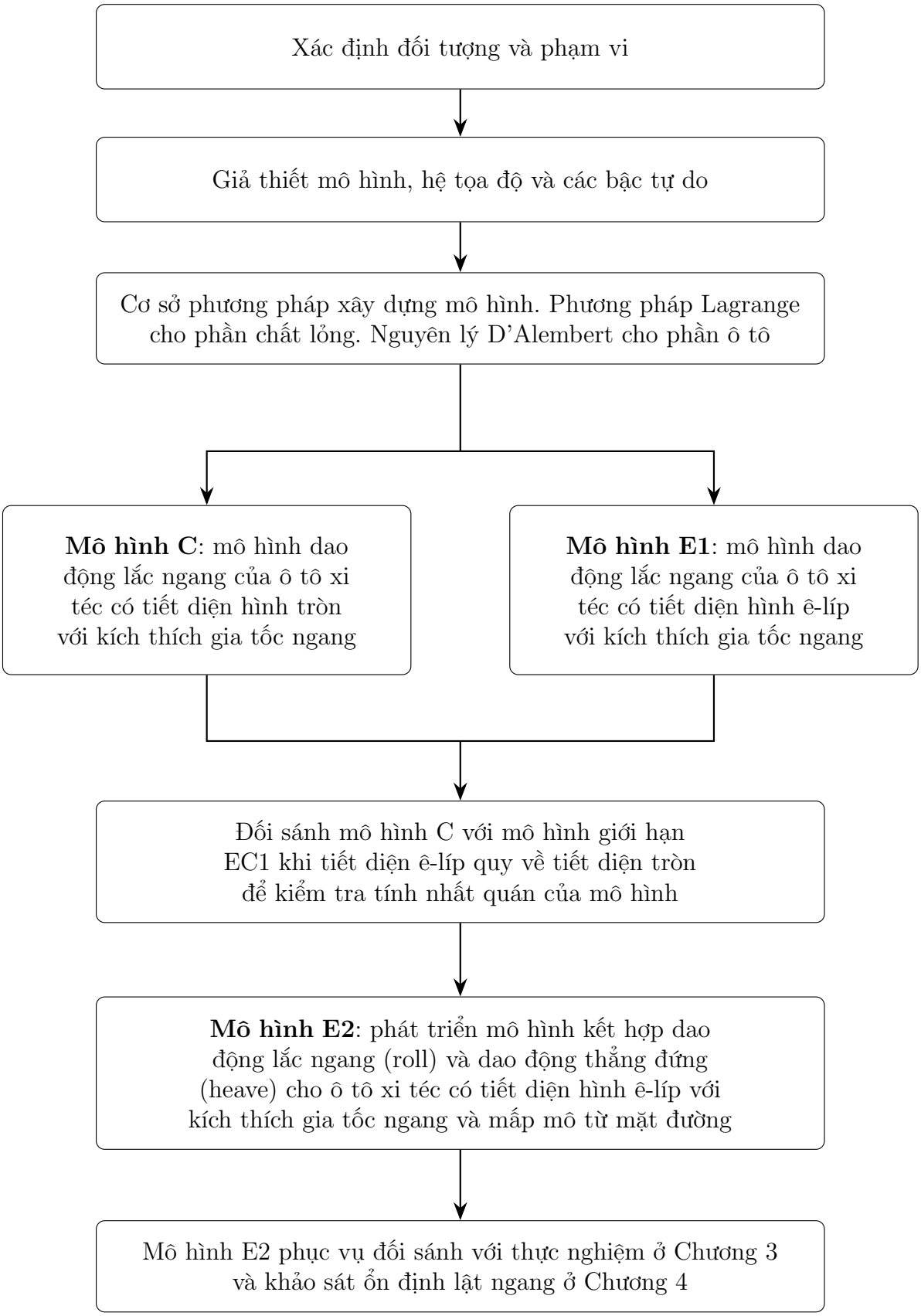
và dao động tương đối của chất lỏng. [8, 26, 19, 48, 62].

Trên cơ sở phạm vi nghiên cứu và các công trình đã công bố [17, 20, 22, 28, 31, 42, 47, 56, 58], mô hình được xây dựng với các giả thiết sau:

- Mô hình được thiết lập trong mặt phẳng thẳng đứng ngang xe tại trục khảo sát. Phần khối lượng được treo và không được treo có các bậc tự do dịch chuyển thẳng đứng và lắc ngang; chuyển động tương đối của phần chất lỏng dao động được mô tả bằng một tọa độ suy rộng.

- Kết cấu xe, xi téc, khối lượng được treo và khối lượng không được treo được giả thiết đối xứng qua mặt phẳng dọc giữa xe. Thân xe, xi téc và các cụm khối lượng quy dẫn được coi là vật rắn tuyệt đối.

- Các thông số khối lượng, mô men quán tính, hệ thống treo và lốp được quy dẫn về mặt phẳng của trục khảo sát. Khối lượng bánh xe được tính vào phần



Hình 2.1: *Quy trình xây dựng và phát triển mô hình động lực học ô tô chuyên dùng chở chất lỏng*

khối lượng không được treo và tập trung tại trục bánh xe.

- Chất lỏng khảo sát là nước, được coi là đồng nhất, không nén được và có khối lượng riêng không đổi. Mức chất tải có thể được mô tả theo tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng hoặc theo tỷ lệ thể tích/khối lượng chất lỏng; quan hệ giữa hai đại lượng này được xác định từ hình học tiết diện xi téc.

- Ảnh hưởng của chất lỏng được biểu diễn bằng mô hình cơ học tương đương, trong đó tổng khối lượng chất lỏng được tách thành phần chuyển động cùng xi téc và phần tham gia dao động tương đối. Chỉ dạng dao động ngang chi phối của mặt thoáng được xét đến; các dạng dao động bậc cao, biến dạng chi tiết của mặt thoáng, vỡ sóng và va đập mạnh của chất lỏng vào thành xi téc không được xét trực tiếp.

- Đối với xi téc tiết diện hình ê-líp, phần chất lỏng dao động không được mô tả như môi trường liên tục nhiều bậc tự do, mà được quy đổi thành mô hình cơ học tương đương một bậc tự do tương đối. Tọa độ suy rộng của phần khối lượng chất lỏng dao động là α_e đối với mô hình E1 và α_{e2} đối với mô hình E2.

- Vị trí tức thời của phần khối lượng chất lỏng dao động có thể được biểu diễn bằng các tọa độ Đề-các y_e, z_e hoặc y_{e2}, z_{e2} trong hệ quy chiếu quán tính. Tuy nhiên, do phần khối lượng này được giả thiết chuyển động trên quỹ đạo ê-líp tương đương nên các tọa độ Đề-các không phải là các bậc tự do độc lập, mà là các tọa độ hình học được xác định từ tọa độ suy rộng α_e hoặc α_{e2}, kết hợp với chuyển động của xi téc.

- Tâm quỹ đạo dao động tương đương của phần khối lượng chất lỏng dao động được gắn với xi téc và chuyển động cùng phần khối lượng được treo. Trong mô hình E1, tọa độ tuyệt đối của phần khối lượng chất lỏng dao động phụ thuộc vào góc lắc ngang của xi téc ψ_{se} và tọa độ suy rộng α_e. Trong mô hình E2, do có xét thêm dao động thẳng đứng, tọa độ tuyệt đối của phần khối lượng chất lỏng dao động phụ thuộc đồng thời vào Z_{se2}, ψ_{se2} và α_{e2}.

- Đặc tính đàn hồi và giảm chấn của hệ thống treo, lốp được coi là tuyến tính trong miền còn tiếp xúc. Các phần tử bên trái và bên phải có đặc tính tương ứng như nhau. Phần tử đàn hồi của lốp được coi là không có khối lượng.

- Gia tốc ngang của xe được xem là đầu vào đặt trước của mô hình. Mô hình không giải bài toán động lực học ngang đầy đủ của xe, không xét chuyển động quay quanh trục đứng, quan hệ lái–quỹ đạo, góc trượt và đặc tính lực ngang của lốp.

- Đối với các mô hình C và E1, mô hình vẫn giữ các bậc tự do dịch chuyển thẳng đứng của khối lượng được treo và không được treo, nhưng không xét kích động mấp mô mặt đường; do đó đặt $q_L = q_R = 0$. Đối với mô hình E2, kích động mặt đường được mô tả bằng các biên dạng mấp mô tại vệt bánh trái và phải, ký hiệu $q_L(t)$ và $q_R(t)$.

- Lốp xe chỉ được mô hình hóa theo phương thẳng đứng thông qua độ cứng và hệ số cản tương đương. Giới hạn bám lốp–đường và hiện tượng trượt ngang không được xét trực tiếp trong mô hình.

- Tiếp xúc lốp–mặt đường được mô tả theo điều kiện tiếp xúc một chiều. Phản lực pháp tuyến thực tế tại bánh xe không nhận giá trị âm. Khi phản lực pháp tuyến giả định tại một bên bánh xe giảm về không, bánh xe phía đó được xem là bắt đầu tách khỏi mặt đường. Điều kiện tiếp xúc một chiều được sử dụng để xác định ngưỡng nhấc bánh và mô phỏng diễn biến sau nhấc bánh theo phạm vi của từng mô hình.

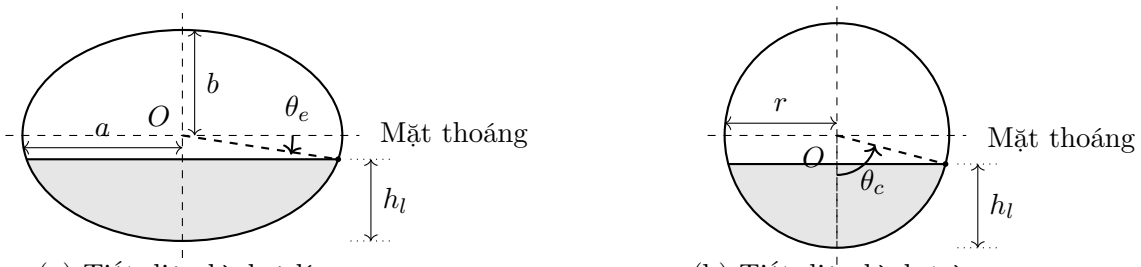
- Khi xét kích thích mặt đường trong mô hình E2, biên dạng mấp mô tại vệt bánh trái và phải được quy đổi thành các hàm theo thời gian $q_L(t)$ và $q_R(t)$ trên cơ sở vận tốc chuyển động của xe. Vận tốc xe trong quá trình quy đổi được coi là đã biết.

- Xi téc được gắn cứng với phần khối lượng được treo. Không xét biến dạng của khung xe, biến dạng liên kết xi téc–sát xi và dao động riêng của kết cấu xi téc.

Các giả thiết trên giới hạn mô hình trong bài toán liên kết dao động chất lỏng–dao động lắc ngang–dao động thẳng đứng. Mô hình phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của mức chất tải và dao động chất lỏng đến ổn định lật ngang của ô tô xi téc với kích thích gia tốc ngang và mấp mô mặt đường.

2.1.3. Quan hệ giữa mức chất tải theo chiều cao và theo khối lượng

Mức chất tải trong luận án được biểu diễn theo hai đại lượng: tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng λ_h và tỷ lệ khối lượng/thể tích chất lỏng h_p. Đối với xi téc có tiết diện cong, hai tỷ lệ này không đồng nhất, do đó cần xác định quan hệ hình học giữa chúng trước khi tính khối lượng, trọng tâm và các tham số tương đương của chất lỏng. Kích thước hình học được minh họa trên Hình 2.2.



(a) Tiết diện hình ê-líp (b) Tiết diện hình tròn

Hình 2.2: *Minh họa các đại lượng hình học dùng để xác định quan hệ giữa tỷ lệ chiều cao và tỷ lệ khối lượng chất lỏng*

Đối với xi téc tiết diện hình ê-líp có bán trục ngang a, bán trục đứng b và chiều cao mực chất lỏng h_l, tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng được xác định:

$$\lambda_h = \frac{h_l}{2b}, \qquad 0 \leq \lambda_h \leq 1. \tag{2.1}$$

Đặt:

$$\theta_e = \arcsin(2\lambda_h - 1). \tag{2.2}$$

Diện tích phần chất lỏng trong mặt cắt ngang là:

$$A_e = ab\left(\theta_e + \frac{1}{2}\sin 2\theta_e + \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.3}$$

Với khối lượng riêng không đổi, tỷ lệ khối lượng bằng tỷ lệ thể tích và được viết:

$$h_p = \frac{V_l}{V_{\max}} = \frac{m_l}{m_{l,\max}} = \frac{A_e}{\pi ab} = \frac{\theta_e + \frac{1}{2}\sin 2\theta_e + \frac{\pi}{2}}{\pi}. \tag{2.4}$$

Đối với xi téc tiết diện hình tròn có bán kính r, tỷ lệ chiều cao được xác định tương tự:

$$\lambda_h = \frac{h_l}{2r}.$$

Đặt:

$$\theta_c = \arccos(1 - 2\lambda_h), \qquad 0 \leq \theta_c \leq \pi. \tag{2.5}$$

Khi đó, tỷ lệ khối lượng/thể tích chất lỏng là:

$$h_p = \frac{\theta_c - \sin\theta_c \cos\theta_c}{\pi}. \tag{2.6}$$

Như vậy, h_l là chiều cao mực chất lỏng, λ_h là tỷ lệ chiều cao và h_p là tỷ lệ khối lượng/thể tích chất lỏng. Với tiết diện cong, λ_h và h_p chỉ trùng nhau tại các trạng thái rỗng, đầy một nửa và đầy hoàn toàn. Trong các mô phỏng ở Chương 4, mức chất tải được biểu diễn bằng h_p, còn h_l được xác định từ quan hệ hình học tương ứng.

2.1.4. Phương pháp thiết lập phương trình động lực học

Trong luận án, phương trình chuyển động của hệ xe–chất lỏng được thiết lập trên cơ sở kết hợp phương pháp Lagrange loại II và nguyên lý D'Alembert. Phương pháp Lagrange loại II được sử dụng để xây dựng phương trình chuyển động của phần chất lỏng tương đương trong xi téc. Đối với hệ có xét đến tiêu tán năng lượng, phương trình Lagrange loại II được viết dưới dạng [21, 32, 33, 35]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \tag{2.7}$$

trong đó q_i và $\dot{q}_i$ lần lượt là tọa độ tổng quát và vận tốc tổng quát; E_k là động năng; E_p là thế năng; D là hàm tiêu tán Rayleigh; Q_i là lực/mô men tổng quát ứng với tọa độ q_i. Với phần tử cản tuyến tính, hàm tiêu tán Rayleigh được biểu diễn:

$$D = \frac{1}{2} K_{q_i} \dot{q}_i^2, \tag{2.8}$$

trong đó K_{q_i} là hệ số cản tương đương theo tọa độ tổng quát q_i. Trên cơ sở đó, mô hình cơ học tương đương của chất lỏng được thiết lập và liên kết với chuyển động lắc ngang của thân xe [8, 26, 48].

Đối với phần ô tô, các phương trình chuyển động được thiết lập theo nguyên lý D'Alembert. Bằng cách bổ sung lực và mô men quán tính vào hệ, đưa bài toán động lực học về dạng cân bằng tương đương [21, 33, 39]. Đối với phần tử thứ i,

quan hệ cân bằng D'Alembert được viết:

$$\sum_{j=1}^{n} F_{ij} - m_i \ddot{x}_i = 0, \qquad \sum_{j=1}^{n} M_{ij} - J_i \dot{\omega}_i = 0, \tag{2.9}$$

trong đó m_i và J_i lần lượt là khối lượng và mô men quán tính khối lượng; x_i là tọa độ tịnh tiến; ω_i là vận tốc góc; F_{ij} và M_{ij} là lực và mô men tác dụng lên phần tử i.

Như vậy, phần chất lỏng trong xi téc được mô tả bằng phương trình Lagrange loại II, thuận tiện cho việc thiết lập phương trình chuyển động của cơ hệ tương đương có liên kết thông qua năng lượng và tọa độ suy rộng. Phần ô tô được mô tả bằng các phương trình cân bằng lực và mô men theo nguyên lý D'Alembert, thuận tiện biểu diễn trực tiếp các lực của hệ treo, lốp và tương tác với chất lỏng. Hai cách tiếp cận có cơ sở cơ học thống nhất; cũng có thể sử dụng phương trình Lagrange loại II cho phần ô tô và thu được hệ phương trình tương đương khi sử dụng cùng các giả thiết và mô tả đầy đủ các lực không bảo toàn. Hai phân hệ được liên kết thông qua lực và mô men tương tác giữa chất lỏng, xi téc và thân xe, tạo thành mô hình động lực học xe–chất lỏng phục vụ đánh giá ổn định lật ngang.

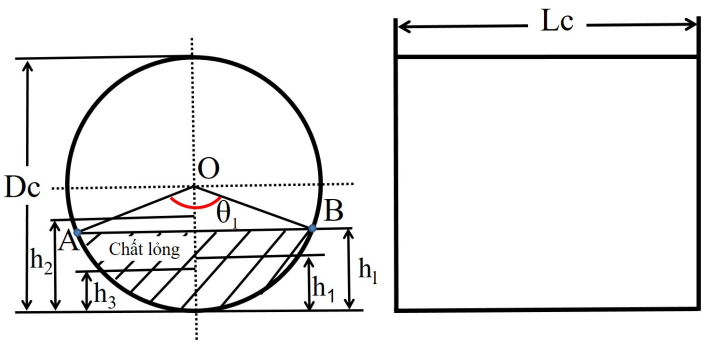
2.2. Xây dựng mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng

2.2.1. Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình tròn

Mô hình xi téc tiết diện hình tròn, ký hiệu C, được xây dựng làm mô hình cơ sở. Mô hình được thiết lập theo trình tự: xác định khối lượng; trọng tâm chất lỏng theo mức chất tải; xây dựng mô hình cơ học tương đương của chất lỏng và liên kết với mô hình dao động lắc ngang của ô tô. Các bậc tự do Z_{sc} và Z_{uc} vẫn được giữ lại để mô tả liên kết với phản lực pháp tuyến và dao động tương đối của chất lỏng.

Xác định khối lượng và vị trí trọng tâm của chất lỏng

Xét xi téc hình trụ có chiều dài L_c, đường kính trong D_c và chiều cao mực chất lỏng h_l. Trong mặt cắt ngang, phần chất lỏng tạo thành hình viên phân tròn giới hạn bởi dây AB và cung tròn. Các đại lượng hình học dùng để xác định diện tích và trọng tâm phần chất lỏng được minh họa trên Hình 2.3.



Hình 2.3: *Sơ đồ hình học xác định trọng tâm chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn*

Gọi F_{qu}, $F_{\Delta AOB}$ và F_{vp} lần lượt là diện tích hình quạt tâm O, tam giác AOB và hình viên phân chứa chất lỏng. Các khoảng h_1, h_2, h_3 là khoảng cách từ đáy xi téc đến trọng tâm tương ứng của các phần diện tích này. Vì $F_{vp} = F_{qu} - F_{\Delta AOB}$, chiều cao trọng tâm của khối chất lỏng được xác định theo quan hệ mô men diện tích:

$$h_3 = \frac{F_{qu}h_1 - F_{\Delta AOB}h_2}{F_{vp}}. \tag{2.10}$$

Thể tích và khối lượng chất lỏng ứng với chiều cao h_l là:

$$V_c = F_{vp}L_c, \qquad m_c = \rho_l F_{vp}L_c, \tag{2.11}$$

trong đó ρ_l là khối lượng riêng của chất lỏng. Tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng trong xi téc tròn được xác định:

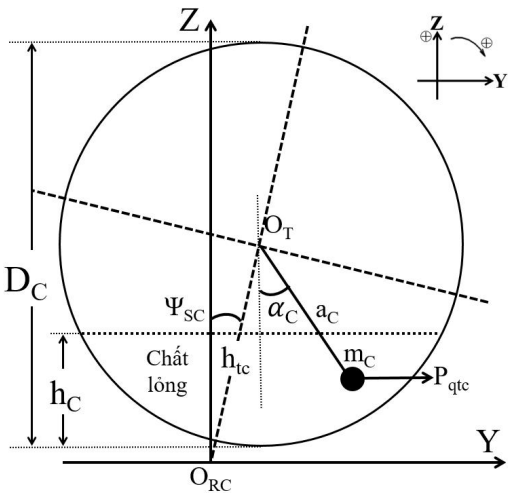
$$\lambda_h = \frac{h_l}{D_c}, \qquad 0 \leq \lambda_h \leq 1. \tag{2.12}$$

Các biểu thức khai triển để xác định F_{qu}, $F_{\Delta AOB}$, F_{vp}, h_1, h_2 và h_3 được trình bày trong Phụ lục A.1.

Mô hình cơ học tương đương của chất lỏng

Khi xe quay vòng hoặc đổi hướng chuyển động, chất lỏng trong xi téc dao động tương đối so với thân xe, làm thay đổi vị trí trọng tâm và phát sinh lực, mô men thủy động bổ sung. Trong mô hình C, ảnh hưởng tổng hợp này được quy đổi thành một khối lượng tương đương m_c chuyển động quanh tâm xi téc O_T, như minh họa trên Hình 2.4. Mô hình không xét trực tiếp biến dạng mặt thoáng, phân bố lại

khối lượng cục bộ và các dạng dao động bậc cao của chất lỏng.



Hình 2.4: *Mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn*

Gọi ψ_{sc} là góc lắc ngang của khối lượng được treo, α_c là tọa độ góc mô tả dao động tương đối của chất lỏng và h_{tc} là khoảng cách từ tâm lắc của khối lượng được treo đến tâm xi téc. Do h_3 là chiều cao trọng tâm phần chất lỏng tính từ đáy xi téc, tham số vị trí của khối lượng chất lỏng tương đương so với tâm xi téc được xác định:

$$a_c = \frac{D_c}{2} - h_3. \tag{2.13}$$

Với hệ tọa độ trên Hình 2.4, tọa độ của khối lượng m_c trong mặt phẳng YZ là:

$$\begin{cases} y_c = h_{tc} \sin \psi_{sc} + a_c \sin \alpha_c \\ z_c = h_{tc} \cos \psi_{sc} - a_c \cos \alpha_c \end{cases} \tag{2.14}$$

Động năng, thế năng và hàm tiêu tán Rayleigh của khối lượng chất lỏng tương đương được viết:

$$E_{kc} = \frac{1}{2} m_c \dot{y}_c^2 + \frac{1}{2} m_c \dot{z}_c^2, \qquad E_{pc} = m_c g a_c (1 - \cos \alpha_c), \qquad D_{nc} = \frac{1}{2} k_{\alpha c} \dot{\alpha}_c^2. \tag{2.15}$$

Trong đó, $k_{\alpha c}$ là hệ số cản tương đương theo tọa độ tổng quát α_c, biểu diễn gần đúng ảnh hưởng tiêu tán năng lượng của chất lỏng. Hệ số này không được gán trực tiếp, mà được xác định thông qua tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng ζ:

$$k_{\alpha c} = 2\zeta M_{\alpha c,0} \omega_{nc}. \tag{2.16}$$

Trong đó, $M_{\alpha c,0}$ là hệ số quán tính suy rộng của khối chất lỏng tương đương theo tọa độ α_c tại vị trí cân bằng ban đầu và ω_{nc} là tần số góc riêng của dao động tương đối chất lỏng trong mô hình C. Với mô hình con lắc tương đương của xi téc tiết diện hình tròn:

$$M_{\alpha c,0} = m_c a_c^2. \tag{2.17}$$

Do đó, tỷ số cản ζ là tham số không thứ nguyên đặc trưng cho mức tiêu tán năng lượng của dao động chất lỏng, còn $k_{\alpha c}$ là hệ số cản nhớt tương đương có thứ nguyên N m s/rad.

$$P_{qtc} = m_c a_{yc} = m_c \mu_c g. \tag{2.18}$$

Lực suy rộng ứng với tọa độ α_c được xác định từ công ảo:

$$Q_c = P_{qtc} \frac{\partial y_c}{\partial \alpha_c} = m_c \mu_c g a_c \cos\alpha_c \approx m_c \mu_c g a_c. \tag{2.19}$$

Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho tọa độ tổng quát α_c:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{kc}}{\partial \dot{\alpha}_c}\right) - \frac{\partial E_{kc}}{\partial \alpha_c} + \frac{\partial D_{nc}}{\partial \dot{\alpha}_c} + \frac{\partial E_{pc}}{\partial \alpha_c} = Q_c. \tag{2.20}$$

Sau khi thay các quan hệ trên vào (2.20), phương trình dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn được viết dưới dạng:

$$\ddot{\alpha}_c = f_c\left(\alpha_c, \dot{\alpha}_c, \psi_{sc}, \dot{\psi}_{sc}, \ddot{\psi}_{sc}, \mu_c\right). \tag{2.21}$$

Trong đó, $f_c(\cdot)$ là hàm phi tuyến phụ thuộc vào dao động tương đối của chất lỏng, dao động lắc ngang của thân xe và gia tốc ngang chuẩn hóa. Biểu thức khai triển chi tiết được trình bày trong Phụ lục A.2.

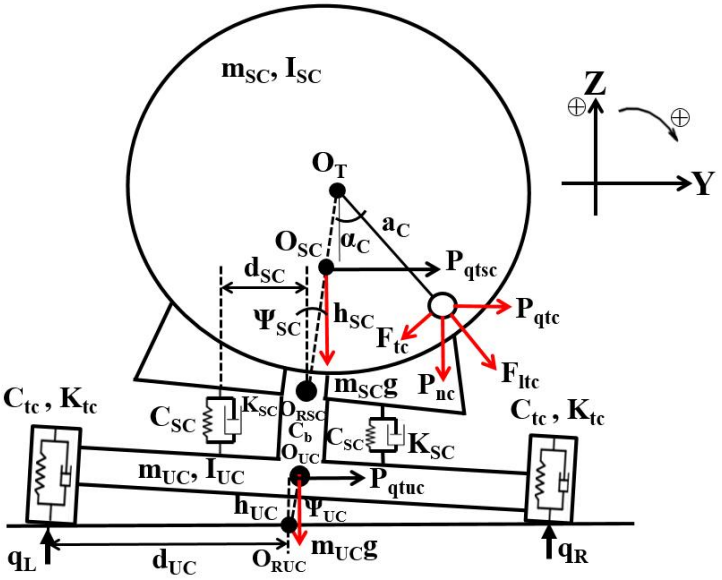
Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình tròn

Mô hình cơ học của ô tô xi téc tiết diện hình tròn được trình bày trên Hình 2.5. Phần ô tô gồm khối lượng được treo, khối lượng không được treo, hệ thống treo, lốp và thanh ổn định ngang. Khi liên kết với mô hình cơ học tương đương của chất

lỏng, hệ xe–chất lỏng có véc tơ tọa độ tổng quát:

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} Z_{sc} & \psi_{sc} & Z_{uc} & \psi_{uc} & \alpha_c \end{bmatrix}^T. \tag{2.22}$$

Trong đó, Z_{sc}, Z_{uc} là chuyển vị thẳng đứng của khối lượng được treo và không được treo; ψ_{sc}, ψ_{uc} là các góc lắc ngang tương ứng; α_c là tọa độ dao động tương đối của chất lỏng.



Hình 2.5: *Mô hình cơ học dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình tròn*

Các lực đàn hồi và lực cản của hệ thống treo, lốp được xác định từ chuyển vị và vận tốc tương đối tại các điểm liên kết. Mô men chống lắc ngang do thanh ổn định ngang được viết:

$$M_{bc} = C_b(\psi_{sc} - \psi_{uc}), \tag{2.23}$$

trong đó C_b là độ cứng chống lắc ngang tương đương của thanh ổn định.

Do mô hình có xét chiều cao tâm lắc hệ treo so với khối lượng không được treo, lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc hệ treo tạo ra mô men trong phương trình lắc ngang của khối lượng không được treo. Với mô hình C, lực ngang liên kết được xác định:

$$F_{ys,c}^{(R)} = m_{sc} g \mu_c + F_{yc}^{(l \to t)}, \tag{2.24}$$

trong đó phản lực ngang của khối chất lỏng dao động tác dụng lên xi téc là:

$$F_{yc}^{(l\to t)} = m_c\left(g\mu_c - \ddot{y}_c\right). \tag{2.25}$$

Mô men tương ứng tác dụng lên khối lượng không được treo là $F_{ys,c}^{(R)} h_{uc}\cos\psi_{uc}$.

Áp dụng nguyên lý D'Alembert cho phần ô tô và phương trình Lagrange cho dao động tương đối của khối chất lỏng tương đương, hệ phương trình động lực học của mô hình C được viết dưới dạng (2.26). Hệ này là hệ vi phân phi tuyến liên kết, trong đó dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang của xe và dao động tương đối của chất lỏng phải được giải đồng thời theo $\mathbf{x}_c$. Đặc biệt, phương trình theo α_c chứa thành phần $\ddot{\psi}_{sc}$, đồng thời các phương trình của xe chứa $\ddot{\alpha}_c$, nên không thể tách riêng từng phương trình độc lập. Quá trình thiết lập và khai triển các thành phần của hệ phương trình được trình bày trong Phụ lục A.3.

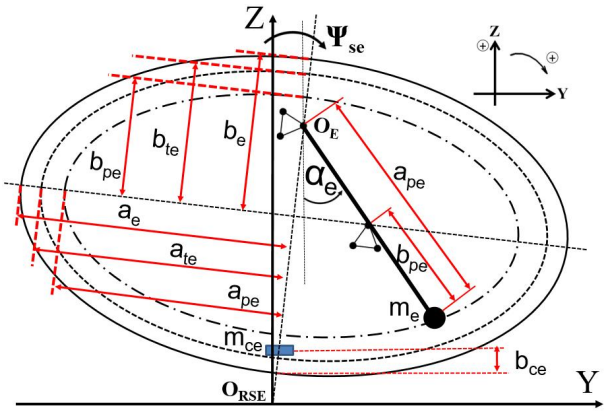
$$\begin{cases}
\ddot{Z}_{sc} = \dfrac{1}{m_{sc}+m_c}\Big[-2C_{sc}(Z_{sc}-Z_{uc}) - 2K_{sc}(\dot{Z}_{sc}-\dot{Z}_{uc}) \\
\qquad - m_c a_c \dot{\alpha}_c^{\,2}\cos\alpha_c - m_c a_c \ddot{\alpha}_c \sin\alpha_c\Big], \\
\ddot{\psi}_{sc} = \dfrac{1}{I_{sc}}\Big[-\left(2d_{sc}^2 C_{sc} + C_b\right)(\psi_{sc}-\psi_{uc}) - 2d_{sc}^2 K_{sc}(\dot{\psi}_{sc}-\dot{\psi}_{uc}) \\
\qquad + m_{sc} g\mu_c h_{sc}\cos\psi_{sc} + m_{sc} g h_{sc}\sin\psi_{sc} \\
\qquad + m_c g\left(h_{tc}\sin\psi_{sc} + a_c\sin\alpha_c\right) + m_c g\mu_c\left(h_{tc}\cos\psi_{sc} - a_c\cos\alpha_c\right) \\
\qquad + m_c a_c h_{tc}\dot{\alpha}_c^{\,2}\sin(\psi_{sc}+\alpha_c) + m_c a_c \ddot{\alpha}_c\left[a_c - h_{tc}\cos(\alpha_c+\psi_{sc})\right]\Big], \\
\ddot{Z}_{uc} = \dfrac{1}{m_{uc}}\Big[2C_{sc}(Z_{sc}-Z_{uc}) + 2K_{sc}(\dot{Z}_{sc}-\dot{Z}_{uc}) - 2C_{tc}Z_{uc} - 2K_{tc}\dot{Z}_{uc}\Big], \\
\ddot{\psi}_{uc} = \dfrac{1}{I_{uc}}\Big[\left(2d_{sc}^2 C_{sc} + C_b\right)(\psi_{sc}-\psi_{uc}) + 2d_{sc}^2 K_{sc}(\dot{\psi}_{sc}-\dot{\psi}_{uc}) \\
\qquad - 2C_{tc}d_{uc}d_{uc}\psi_{uc} - 2K_{tc}d_{uc}d_{uc}\dot{\psi}_{uc} + m_{uc} g\mu_c h_{uc}\cos\psi_{uc} \\
\qquad + m_{uc} g h_{uc}\sin\psi_{uc} + F_{ys,c}^{(R)} h_{uc}\cos\psi_{uc}\Big], \\
\ddot{\alpha}_c = -\dfrac{1}{m_c a_c^2}\Big[k_{\alpha c}\dot{\alpha}_c - m_c a_c g\mu_c\cos\alpha_c + m_c a_c g\sin\alpha_c \\
\qquad + m_c a_c h_{tc}\Big[\ddot{\psi}_{sc}\cos(\alpha_c+\psi_{sc}) - \dot{\psi}_{sc}^{\,2}\sin(\alpha_c+\psi_{sc})\Big]\Big].
\end{cases} \tag{2.26}$$

2.2.2. Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp

Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp, ký hiệu E1, được phát triển từ mô hình C đã trình bày ở Mục 2.2.1. Điểm khác biệt chính là phần chất lỏng trong xi téc ê-líp được tách thành hai thành phần: khối lượng chuyển động cùng xi téc m_{ce} và khối lượng dao động tương đối m_e. Tương tự mô hình C, mô hình E1 vẫn giữ các chuyển vị thẳng đứng Z_{se}, Z_{ue}, nhưng chưa xét kích động mấp mô mặt đường; do đó đặt $q_L = q_R = 0$.

Mô hình tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp

Mô hình hình học xác định các tham số tương đương của chất lỏng được trình bày trên Hình 2.6. Trong đó, a_e, b_e là các bán trục ngang và đứng của xi téc; a_{pe}, b_{pe} là các bán trục của quỹ đạo dao động tương đương; m_e là phần khối lượng dao động tương đối và m_{ce} là phần khối lượng chuyển động cùng xi téc.



Hình 2.6: *Mô hình hình học xác định các tham số tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp*

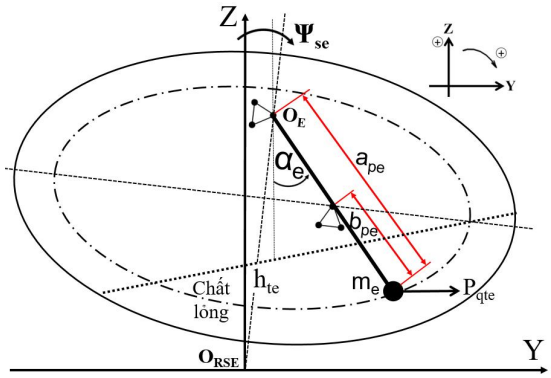
Với chiều cao mực chất lỏng h_l, tỷ lệ chiều cao trong xi téc ê-líp là:

$$\lambda_h = \frac{h_l}{2b_e}, \qquad 0 \le \lambda_h \le 1. \tag{2.27}$$

Quan hệ giữa λ_h và tỷ lệ khối lượng/thể tích h_p đã được xác định từ hình học tiết diện ê-líp ở Mục 2.1.3. Trên cơ sở đó, các tham số m_{te}, m_e, m_{ce}, a_{pe}, b_{pe} và vị trí trọng tâm tương ứng được xác định theo các quan hệ trình bày trong Phụ lục A.4.

Phương trình dao động tương đối của khối chất lỏng

Tương tự mô hình C, dao động tương đối của chất lỏng được mô tả bằng tọa độ góc α_e. Trong mô hình E1, khối lượng dao động m_e chuyển động trên quỹ đạo ê-líp, như minh họa trên Hình 2.7.



Hình 2.7: *Mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp*

Trong mô hình E1, ký hiệu O_E là tâm quỹ đạo dao động tương đương của phần khối lượng chất lỏng dao động m_e. Tâm O_E được gắn với xi téc và chuyển động cùng khối lượng được treo. Khoảng cách từ tâm lắc ngang của khối lượng được treo đến O_E được ký hiệu là h_{te}. Với hệ tọa độ trên Hình 2.7, tọa độ của khối lượng m_e trong mặt phẳng YZ được viết:

$$\begin{cases} y_e = h_{te}\sin\psi_{se} + a_{pe}\sin\alpha_e\sin\psi_{se} - b_{pe}\cos\alpha_e\cos\psi_{se}, \\ z_e = h_{te}\cos\psi_{se} - a_{pe}\sin\alpha_e\cos\psi_{se} - b_{pe}\cos\alpha_e\sin\psi_{se}. \end{cases} \tag{2.28}$$

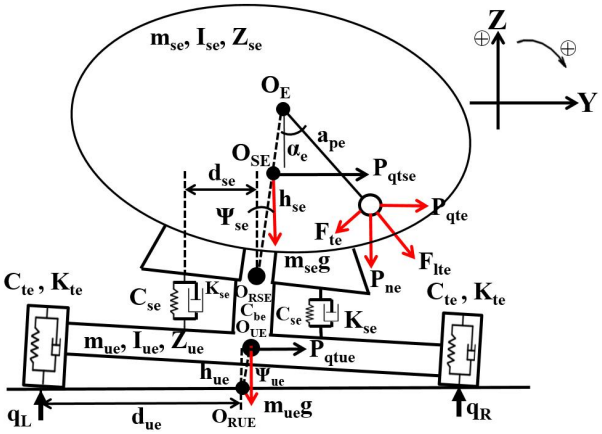
Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho tọa độ α_e, phương trình dao động tương đối của chất lỏng được viết dưới dạng:

$$\ddot{\alpha}_e = -\frac{F_{\alpha_e}\left(\alpha_e, \dot{\alpha}_e, \psi_{se}, \dot{\psi}_{se}, \ddot{\psi}_{se}\right)}{M_{\alpha_e}\left(\alpha_e, \psi_{se}\right)}. \tag{2.29}$$

Trong đó, M_{α_e} là hệ số quán tính suy rộng và F_{α_e} là thành phần lực suy rộng còn lại. Các biểu thức khai triển được trình bày trong Phụ lục A.5.

Mô hình dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp

Mô hình cơ học của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp được trình bày trên Hình 2.8. Cấu trúc phần xe, hệ thống treo, lốp và thanh ổn định được thiết lập tương tự mô hình C. Phần chất lỏng được mô tả bằng mô hình cơ học tương đương trong xi téc ê-líp, trong đó m_{ce} chuyển động cùng xi téc, còn m_e dao động tương đối.



Hình 2.8: *Mô hình cơ học dao động lắc ngang của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp*

Véc tơ tọa độ tổng quát của mô hình E1 là:

$$\mathbf{x}_{e1} = \begin{bmatrix} Z_{se} & \psi_{se} & Z_{ue} & \psi_{ue} & \alpha_e \end{bmatrix}^T . \tag{2.30}$$

Lực ngang liên kết truyền từ khối lượng được treo xuống khối lượng không được treo qua tâm lắc hệ treo được xác định:

$$F_{ys,e1}^{(R)} = (m_{se} + m_{ce})\, g\mu_e + F_{ye}^{(l\to t)}, \tag{2.31}$$

trong đó phản lực ngang của phần khối lượng chất lỏng dao động tác dụng lên xi téc là:

$$F_{ye}^{(l\to t)} = m_e \left(g\mu_e - \ddot{y}_e\right). \tag{2.32}$$

Áp dụng nguyên lý D'Alembert cho phần xe và phương trình Lagrange cho dao động tương đối của chất lỏng, hệ phương trình động lực học của mô hình E1 thu

được dưới dạng:

$$
\begin{cases}
\ddot{Z}_{se} = \dfrac{1}{m_{se}+m_e+m_{ce}}\Big[-2C_{se}(Z_{se}-Z_{ue}) - 2K_{se}(\dot{Z}_{se}-\dot{Z}_{ue}) \\
\qquad\qquad - m_e a_{pe}\dot{\alpha}_e^{\,2}\cos\alpha_e - m_e a_{pe}\ddot{\alpha}_e \sin\alpha_e\Big], \\
\ddot{\psi}_{se} = \dfrac{1}{I_{se}}\Big[-\left(2d_{se}^2 C_{se} + C_{be}\right)(\psi_{se}-\psi_{ue}) - 2d_{se}^2 K_{se}(\dot{\psi}_{se}-\dot{\psi}_{ue}) \\
\qquad\qquad + (m_{se}+m_{ce})g\mu_e h_{se}\cos\psi_{se} + (m_{se}+m_{ce})g h_{se}\sin\psi_{se} \\
\qquad\qquad + m_e g\left(h_{te}\sin\psi_{se} + a_{pe}\sin\alpha_e\right) + m_e g\mu_e\left(h_{te}\cos\psi_{se} - a_{pe}\cos\alpha_e\right) \\
\qquad\qquad + m_e a_{pe}h_{te}\dot{\alpha}_e^{\,2}\sin(\psi_{se}+\alpha_e) + m_e a_{pe}\ddot{\alpha}_e\left[a_{pe} - h_{te}\cos(\alpha_e+\psi_{se})\right]\Big], \\
\ddot{Z}_{ue} = \dfrac{1}{m_{ue}}\Big[2C_{se}(Z_{se}-Z_{ue}) + 2K_{se}(\dot{Z}_{se}-\dot{Z}_{ue}) - 2C_{te}Z_{ue} - 2K_{te}\dot{Z}_{ue}\Big], \\
\ddot{\psi}_{ue} = \dfrac{1}{I_{ue}}\Big[\left(2d_{se}^2 C_{se} + C_{be}\right)(\psi_{se}-\psi_{ue}) + 2d_{se}^2 K_{se}(\dot{\psi}_{se}-\dot{\psi}_{ue}) \\
\qquad\qquad - 2C_{te}d_{ue}^2\psi_{ue} - 2K_{te}d_{ue}^2\dot{\psi}_{ue} \\
\qquad\qquad + m_{ue}g\mu_e h_{ue}\cos\psi_{ue} + m_{ue}g h_{ue}\sin\psi_{ue} + F_{ys,e1}^{(R)}h_{ue}\cos\psi_{ue}\Big], \\
\ddot{\alpha}_e = -\dfrac{F_{\alpha_e}\left(\alpha_e,\dot{\alpha}_e,\psi_{se},\dot{\psi}_{se},\ddot{\psi}_{se}\right)}{M_{\alpha_e}\left(\alpha_e,\psi_{se}\right)}.
\end{cases}
\tag{2.33}
$$

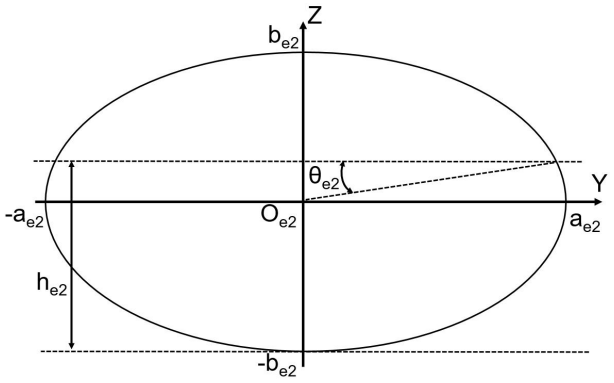
Trong hệ (2.33), M_{α_e} là mô men quán tính khối lượng suy rộng theo tọa độ α_e, F_{α_e} là thành phần lực suy rộng sau khi tách hệ số của $\ddot{\alpha}_e$. Hệ phương trình này là hệ vi phân phi tuyến liên kết, phương trình theo α_e chứa $\ddot{\psi}_{se}$, trong khi các phương trình của phần xe chứa $\ddot{\alpha}_e$. Do đó, hệ phải được giải đồng thời theo véc tơ tọa độ tổng quát $\mathbf{x}_{e1}$.

2.2.3. Mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp

Mô hình dao động lắc ngang–thẳng đứng của ô tô xi téc tiết diện hình ê-líp, ký hiệu E2, là mô hình chính của luận án. Mô hình được phát triển từ E1 bằng cách bổ sung kích động mặt đường tại hai vệt bánh xe, đồng thời mô tả liên kết giữa dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang của xe và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc.

Xét tiết diện ngang của xi téc ê-líp có bán trục ngang a_{e2} và bán trục đứng

b_{e2}. Hệ tọa độ $O_{e2}YZ$ được đặt tại tâm hình học của tiết diện, với Y theo phương ngang và Z theo phương thẳng đứng (Hình 2.9).



Hình 2.9: *Hình học mặt cắt xi téc tiết diện hình ê-líp và vị trí mặt thoáng chất lỏng trong mô hình E2*

Phương trình biên tiết diện xi téc là:

$$\frac{Y^2}{a_{e2}^2} + \frac{Z^2}{b_{e2}^2} = 1. \tag{2.34}$$

Gọi h_{e2} là chiều cao mực chất lỏng tính từ đáy xi téc. Cao độ mặt thoáng trong hệ tọa độ gắn với tiết diện xi téc được xác định:

$$z_{fe2} = -b_{e2} + h_{e2}. \tag{2.35}$$

Đặt:

$$z_{fe2} = b_{e2} \sin\theta_{e2}, \qquad -\frac{\pi}{2} \leq \theta_{e2} \leq \frac{\pi}{2}. \tag{2.36}$$

Khi đó, diện tích phần chất lỏng trong mặt cắt ngang là:

$$A_{e2} = a_{e2} b_{e2} \left(\theta_{e2} + \frac{1}{2}\sin 2\theta_{e2} + \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.37}$$

Khối lượng toàn bộ chất lỏng trong xi téc được xác định:

$$m_{te2} = \rho_l A_{e2} L_{e2}, \tag{2.38}$$

trong đó ρ_l là khối lượng riêng của chất lỏng và L_{e2} là chiều dài xi téc. Khối lượng chất lỏng được tách thành phần dao động tương đối m_{e2} và phần chuyển động cùng

xi téc m_{ce2}:

$$m_{te2} = m_{e2} + m_{ce2}. \tag{2.39}$$

Trọng tâm của phần chất lỏng trong mặt cắt ngang được xác định theo:

$$z_{te2} = -\frac{2a_{e2}b_{e2}^2}{3A_{e2}}\cos^3\theta_{e2}. \tag{2.40}$$

Ngoài ra, phần mô tả bề rộng mặt thoáng và tần số dao động của phần chất lỏng được trình bày trong Phụ lục A.6.1.

Tương tự mô hình E1, phần khối lượng chất lỏng dao động trong mô hình E2 được mô tả bằng tọa độ suy rộng α_{e2}. Tâm quỹ đạo dao động tương đương O_E của phần khối lượng m_{e2} được gắn với xi téc và chuyển động cùng khối lượng được treo. Khác với mô hình E1, mô hình E2 có xét thêm chuyển vị thẳng đứng Z_{se2}, do đó tọa độ tuyệt đối của m_{e2} phụ thuộc đồng thời vào Z_{se2}, ψ_{se2} và α_{e2}. Tọa độ của phần khối lượng chất lỏng dao động m_{e2} trong hệ quy chiếu quán tính là:

$$\begin{cases} y_{e2} = h_{te2}\sin\psi_{se2} + a_{pe2}\sin\alpha_{e2}\sin\psi_{se2} - b_{pe2}\cos\alpha_{e2}\cos\psi_{se2}, \\ z_{e2} = Z_{se2} + h_{te2}\cos\psi_{se2} - a_{pe2}\sin\alpha_{e2}\cos\psi_{se2} - b_{pe2}\cos\alpha_{e2}\sin\psi_{se2}. \end{cases} \tag{2.41}$$

Quan hệ (2.41) là cơ sở để xác định vận tốc, gia tốc, lực quán tính và mô men do dao động chất lỏng tác dụng lên thân xe. Các bước khai triển hình học chi tiết được trình bày trong Phụ lục A.6.2.

Kích động từ mặt đường được đưa vào mô hình thông qua biên dạng tại vệt bánh trái và phải:

$$q_L(t) = q_L(x_L(t)), \qquad q_R(t) = q_R(x_R(t)). \tag{2.42}$$

Khi xe chuyển động với vận tốc không đổi v:

$$x_L(t) = x_R(t) = vt, \qquad \dot{q}_L(t) = v\frac{dq_L}{dx}, \qquad \dot{q}_R(t) = v\frac{dq_R}{dx}. \tag{2.43}$$

Biến dạng tương đối của hệ thống treo và lốp tại hai bên xe được xác định:

$$\begin{cases} \delta_{sL} = Z_{se2} + d_{se2}\psi_{se2} - Z_{ue2} - d_{se2}\psi_{ue2}, \\ \delta_{sR} = Z_{se2} - d_{se2}\psi_{se2} - Z_{ue2} + d_{se2}\psi_{ue2}, \\ \delta_{tL} = Z_{ue2} + d_{ue2}\psi_{ue2} - q_L, \\ \delta_{tR} = Z_{ue2} - d_{ue2}\psi_{ue2} - q_R. \end{cases} \tag{2.44}$$

Véc tơ tọa độ tổng quát của mô hình E2 là:

$$\mathbf{x}_{e2} = \begin{bmatrix} Z_{se2} & \psi_{se2} & Z_{ue2} & \psi_{ue2} & \alpha_{e2} \end{bmatrix}^T. \tag{2.45}$$

Trong đó, Z_{se2}, Z_{ue2} là chuyển vị thẳng đứng của khối lượng được treo và không được treo; ψ_{se2}, ψ_{ue2} là góc lắc ngang tương ứng; α_{e2} là tọa độ dao động tương đối của chất lỏng.

Lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc hệ treo được xác định:

$$F_{ys,e2}^{(R)} = (m_{se2} + m_{ce2})\, g\mu_{e2} + F_{ye2}^{(l\to t)}, \tag{2.46}$$

trong đó phản lực ngang của phần khối lượng chất lỏng dao động tác dụng lên xi téc là:

$$F_{ye2}^{(l\to t)} = m_{e2}\left(g\mu_{e2} - \ddot{y}_{e2}\right). \tag{2.47}$$

Áp dụng nguyên lý D'Alembert cho chuyển động thẳng đứng và lắc ngang của hệ xe, kết hợp với phương trình Lagrange loại II cho dao động tương đối của chất

lỏng, hệ phương trình động lực học của mô hình E2 được viết:

$$\begin{cases}
(m_{se2}+m_{ce2})\ddot{Z}_{se2} = -2C_{se2}(Z_{se2}-Z_{ue2}) - 2K_{se2}(\dot{Z}_{se2}-\dot{Z}_{ue2}) - F_{ze2}, \\
I_{se2}\ddot{\psi}_{se2} = -\left(2d_{se2}^2C_{se2}+C_{be2}\right)(\psi_{se2}-\psi_{ue2}) - 2d_{se2}^2K_{se2}(\dot{\psi}_{se2}-\dot{\psi}_{ue2}) \\
\qquad + (m_{se2}+m_{ce2})g\mu_{e2}h_{se2}\cos\psi_{se2} + (m_{se2}+m_{ce2})gh_{se2}\sin\psi_{se2} + M_{sl,e2}, \\
m_{ue2}\ddot{Z}_{ue2} = 2C_{se2}(Z_{se2}-Z_{ue2}) + 2K_{se2}(\dot{Z}_{se2}-\dot{Z}_{ue2}) \\
\qquad - C_{te2}(2Z_{ue2}-q_L-q_R) - K_{te2}(2\dot{Z}_{ue2}-\dot{q}_L-\dot{q}_R), \\
I_{ue2}\ddot{\psi}_{ue2} = \left(2d_{se2}^2C_{se2}+C_{be2}\right)(\psi_{se2}-\psi_{ue2}) + 2d_{se2}^2K_{se2}(\dot{\psi}_{se2}-\dot{\psi}_{ue2}) \\
\qquad - C_{te2}d_{ue2}(2d_{ue2}\psi_{ue2}-q_L+q_R) - K_{te2}d_{ue2}(2d_{ue2}\dot{\psi}_{ue2}-\dot{q}_L+\dot{q}_R) \\
\qquad + m_{ue2}g\mu_{e2}h_{ue2}\cos\psi_{ue2} + m_{ue2}gh_{ue2}\sin\psi_{ue2} + F_{ys,e2}^{(R)}h_{ue2}\cos\psi_{ue2}, \\
\ddot{\alpha}_{e2} = -\dfrac{F_{\alpha e2}\left(\alpha_{e2},\dot{\alpha}_{e2},\psi_{se2},\dot{\psi}_{se2},\ddot{\psi}_{se2},\ddot{Z}_{se2}\right)}{M_{\alpha e2}\left(\alpha_{e2},\psi_{se2}\right)}.
\end{cases} \tag{2.48}$$

Trong hệ (2.48), F_{ze2} là lực quán tính thẳng đứng tương đương do phần khối lượng chất lỏng dao động tác dụng lên thân xe; $M_{sl,e2}$ là mô men suy rộng do dao động chất lỏng đối với chuyển động lắc ngang của khối lượng được treo; $M_{\alpha e2}$ và $F_{\alpha e2}$ lần lượt là hệ số quán tính suy rộng và thành phần lực suy rộng trong phương trình theo α_{e2}. Các biểu thức khai triển được trình bày trong Phụ lục A.6.

Hệ (2.48) là dạng phương trình khi hai bánh xe còn tiếp xúc với mặt đường. Sau thời điểm nhấc bánh, các lực tiếp xúc lốp–mặt đường được cập nhật theo mô hình tiếp xúc một chiều ở Mục 2.2.4. Do các phương trình chứa đồng thời $\ddot{Z}_{se2}$, $\ddot{\psi}_{se2}$ và $\ddot{\alpha}_{e2}$, hệ phải được giải đồng thời theo véc tơ trạng thái $\mathbf{x}_{e2}$.

2.2.4. Mô hình tiếp xúc một chiều lốp–mặt đường

Trong khảo sát ổn định lật ngang, phản lực pháp tuyến tại một bên bánh xe có thể giảm về không và bánh xe bắt đầu tách khỏi mặt đường. Do tiếp xúc lốp–mặt đường là tiếp xúc một chiều, lốp chỉ truyền lực nén theo phương pháp tuyến và không truyền lực kéo khi đã mất tiếp xúc.

Với mô hình tổng quát $\mathcal{M} \in \{C, E1, E2\}$, gọi $\widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}}$ là phản lực pháp tuyến giả định tại bánh xe phía i, $i = L, R$, được xác định theo giả thiết bánh xe còn tiếp

xúc. Phản lực pháp tuyến thực tế được ràng buộc không âm:

$$F_{zi}^{\mathcal{M}} = \max\left(0, \widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}}\right), \qquad i = L, R. \tag{2.49}$$

Khi $\widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}} \leq 0$, bánh xe phía i được xem là mất tiếp xúc với mặt đường. Giá trị âm của $\widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}}$ chỉ cho biết giả thiết tiếp xúc không còn thỏa mãn, không có nghĩa là mặt đường tác dụng lực kéo lên bánh xe.

Biến dạng lốp tại hai bên xe được viết dưới dạng tổng quát:

$$\begin{cases} \delta_{tL}^{\mathcal{M}} = Z_u^{\mathcal{M}} + d_u^{\mathcal{M}}\psi_u^{\mathcal{M}} - q_L^{\mathcal{M}}, \\ \delta_{tR}^{\mathcal{M}} = Z_u^{\mathcal{M}} - d_u^{\mathcal{M}}\psi_u^{\mathcal{M}} - q_R^{\mathcal{M}}. \end{cases} \tag{2.50}$$

Đối với các mô hình C và E1, kích động mấp mô mặt đường chưa được xét nên:

$$q_L^{\mathcal{M}} = q_R^{\mathcal{M}} = 0, \qquad \mathcal{M} \in \{C, E1\}. \tag{2.51}$$

Đối với mô hình E2, q_L^{E2} và q_R^{E2} là biên dạng mặt đường tại vệt bánh trái và phải. Các vận tốc biến dạng lốp được xác định bằng đạo hàm theo thời gian của $\delta_{tL}^{\mathcal{M}}$ và $\delta_{tR}^{\mathcal{M}}$.

Mô hình tiếp xúc một chiều trong (2.49) được sử dụng thống nhất cho C, E1 và E2. Đối với C và E1, mô hình chủ yếu phục vụ xác định ngưỡng khởi phát nhấc bánh. Đối với E2, do có xét dao động thẳng đứng và kích động mặt đường, mô hình còn được dùng để mô phỏng diễn biến động lực học sau khi một bên bánh xe mất tiếp xúc với mặt đường.

2.3. Chỉ tiêu đánh giá mất ổn định lật ngang

2.3.1. Phản lực pháp tuyến tại bánh xe

Sau khi giải hệ phương trình động lực học, trạng thái ổn định lật ngang được đánh giá thông qua phản lực pháp tuyến tại hai bên bánh xe. Sử dụng biến dạng lốp đã xác định trong (2.50), phản lực pháp tuyến giả định tại bánh trái và bánh phải của mô hình $\mathcal{M}$ được viết:

$$\begin{cases} \widetilde{F}_{zL}^{\mathcal{M}} = F_{z0}^{\mathcal{M}} - C_t^{\mathcal{M}}\delta_{tL}^{\mathcal{M}} - K_t^{\mathcal{M}}\dot{\delta}_{tL}^{\mathcal{M}}, \\ \widetilde{F}_{zR}^{\mathcal{M}} = F_{z0}^{\mathcal{M}} - C_t^{\mathcal{M}}\delta_{tR}^{\mathcal{M}} - K_t^{\mathcal{M}}\dot{\delta}_{tR}^{\mathcal{M}}. \end{cases} \tag{2.52}$$

Trong đó, $F_{z0}^{\mathcal{M}}$ là tải trọng tĩnh trung bình trên mỗi bên bánh xe; $C_t^{\mathcal{M}}$ và $K_t^{\mathcal{M}}$ lần lượt là độ cứng và hệ số cản thẳng đứng của lốp.

Phản lực pháp tuyến thực tế được xác định theo điều kiện tiếp xúc một chiều trong (2.49). Do đó, khi $\widetilde{F}_{zi}^{\mathcal{M}} \leq 0$, phản lực thực tế tại bánh xe phía i bằng không và bánh xe được xem là mất tiếp xúc với mặt đường.

2.3.2. Hệ số chuyển tải trọng ngang

Trên cơ sở phản lực pháp tuyến thực tế tại hai bên bánh xe, hệ số chuyển tải trọng ngang được xác định:

$$\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}}(t) = \begin{cases} \dfrac{\left|F_{zR}^{\mathcal{M}}(t) - F_{zL}^{\mathcal{M}}(t)\right|}{F_{zR}^{\mathcal{M}}(t) + F_{zL}^{\mathcal{M}}(t)}, & F_{zR}^{\mathcal{M}}(t) + F_{zL}^{\mathcal{M}}(t) > \varepsilon_{\Sigma F}, \\ 1, & F_{zR}^{\mathcal{M}}(t) + F_{zL}^{\mathcal{M}}(t) \leq \varepsilon_{\Sigma F}. \end{cases} \tag{2.53}$$

Nhánh thứ hai là quy ước xử lý số nhằm tránh mẫu số gần bằng không. Khi tải trọng phân bố đều giữa hai bên bánh xe, $\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}} = 0$. Khi một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường, $\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}}$ tiến tới 1.

Hai đại lượng đặc trưng của một trường hợp khảo sát là:

$$\mathrm{LTR}_{\max}^{\mathcal{M}} = \max_t \mathrm{LTR}^{\mathcal{M}}(t), \qquad F_{z,\min}^{\mathcal{M}} = \min_t \left[F_{zL}^{\mathcal{M}}(t), F_{zR}^{\mathcal{M}}(t)\right]. \tag{2.54}$$

2.3.3. Điều kiện tới hạn nhấc bánh

Trạng thái khởi phát nhấc bánh xảy ra khi phản lực pháp tuyến tại một bên bánh xe giảm về không. Về lý thuyết, điều kiện này được viết:

$$\widetilde{F}_{zL}^{\mathcal{M}} = 0 \quad \text{hoặc} \quad \widetilde{F}_{zR}^{\mathcal{M}} = 0. \tag{2.55}$$

Tương ứng, điều kiện theo hệ số chuyển tải trọng ngang là:

$$\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}} = 1. \tag{2.56}$$

Trong tính toán số, ngưỡng khởi phát nhấc bánh được xác định bằng:

$$F_{z,\min}^{\mathcal{M}} \leq \varepsilon_F \quad \text{hoặc} \quad \mathrm{LTR}_{\max}^{\mathcal{M}} \geq 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}, \tag{2.57}$$

với:

$$\varepsilon_F = 10^{-6}\,\mathrm{N}, \qquad \varepsilon_{\mathrm{LTR}} = 10^{-6}, \qquad \varepsilon_{\Sigma F} = 10^{-9}\,\mathrm{N}.$$

Điều kiện LTR $= 1$ hoặc $F_{z,\min} = 0$ chỉ biểu thị thời điểm một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường. Đây là ngưỡng khởi phát nhấc bánh, chưa đồng nghĩa với phát triển lật không phục hồi.

2.3.4. Diễn biến sau khi nhấc bánh

Sau thời điểm nhấc bánh, lực tiếp xúc lốp–mặt đường được cập nhật theo điều kiện tiếp xúc một chiều ở Mục 2.2.4. Bánh xe đã tách khỏi mặt đường không còn sinh phản lực pháp tuyến và các thành phần lực tiếp xúc tương ứng không còn tác dụng trong hệ phương trình động lực học.

Trong giai đoạn sau nhấc bánh, LTR không còn phản ánh đầy đủ mức độ phát triển của quá trình lật vì phản lực tại bánh đã tách được ràng buộc bằng không. Do đó, diễn biến sau nhấc bánh được đánh giá bổ sung thông qua góc lắc ngang ψ_s, vận tốc góc lắc ngang $\dot{\psi}_s$, trạng thái tiếp xúc của từng bánh xe và khả năng phục hồi phản lực pháp tuyến.

2.4. Mô phỏng kiểm tra và đối sánh mô hình

Mục này trình bày các mô phỏng kiểm tra nội tại và đối sánh giữa các mô hình được xây dựng trong Chương 2. Mục tiêu của phần này không phải là kiểm chứng mô hình với dữ liệu thực nghiệm, mà là đánh giá tính nhất quán của chuỗi phát triển mô hình từ xi téc tiết diện tròn đến xi téc tiết diện ê-líp và từ mô hình lắc ngang đến mô hình có xét đồng thời dao động thẳng đứng.

Chuỗi kiểm tra gồm ba phép đối sánh có vai trò khác nhau. Thứ nhất, mô hình EC1 được thiết lập như trường hợp giới hạn của mô hình E1, trong đó tiết diện ê-líp được suy biến về tiết diện tròn có cùng diện tích và toàn bộ khối lượng chất lỏng được xem là tham gia dao động như trong mô hình C. Phép đối sánh C–EC1 được dùng để kiểm tra tính tương thích của cách xây dựng mô hình chất lỏng tương đương. Thứ hai, mô hình C và mô hình E1 được đối sánh để làm rõ ảnh

hưởng của dạng tiết diện xi téc và cách tách khối lượng chất lỏng đối với đáp ứng lắc ngang. Phép đối sánh C–E1 không nhằm chứng minh hai mô hình tương đương hoàn toàn về đáp ứng chất lỏng. Thứ ba, mô hình E2 được đối sánh với mô hình E1 khi triệt tiêu kích động mặt đường, nhằm kiểm tra tính kế thừa của mô hình E2 so với mô hình E1 trong điều kiện suy giảm tương ứng.

Trong các phép đối sánh, hai đại lượng được sử dụng để đánh giá gồm góc lắc ngang của khối lượng được treo $\psi_s(t)$ và góc dao động tương đối của khối chất lỏng $\alpha(t)$. Đây là hai đại lượng trực tiếp phản ánh liên kết giữa đáp ứng lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng trong phạm vi mô hình phẳng ngang xe.

2.4.1. Điều kiện mô phỏng và tiêu chí đối sánh

Bộ thông số mô phỏng dùng cho kiểm tra và đối sánh mô hình được trình bày trong Bảng 2.2 và Bảng 2.3.

Đây là bộ số liệu phục vụ kiểm tra tính nhất quán của các mô hình ở Chương 2, không phải bộ tham số nhận dạng cuối cùng của đối tượng ô tô xi téc thực được sử dụng trong Chương 3 và Chương 4.

Trong các phép đối sánh, h_p là tỷ lệ khối lượng chất lỏng. Chiều cao mực chất lỏng h_l được xác định riêng theo hình học tiết diện tương ứng tại cùng giá trị h_p. Đối với mô hình C và mô hình EC1, bán kính xi téc tròn tương đương được xác định theo $r_{eq} = \sqrt{ab}$, bảo đảm diện tích tiết diện tròn bằng diện tích tiết diện ê-líp dùng trong mô hình E1 và E2.

Kích động động lực học được đưa vào mô hình thông qua gia tốc ngang chuẩn hóa $\mu_y(t)$. Trong mô phỏng kiểm tra, $\mu_y(t)$ được chọn dưới dạng hàm tăng tuyến tính và bão hòa:

$$\mu_y(t) = \begin{cases} 0{,}1t, & 0 \le t < 2, \\ 0{,}2, & t \ge 2, \end{cases} \tag{2.58}$$

với thời gian mô phỏng $T = 20\,\mathrm{s}$. Các mô phỏng được thực hiện bằng bộ giải `ode23` dạng bước biến đổi, với bước lớn nhất $0{,}01\,\mathrm{s}$ và sai số tương đối 10^{-5}. Trong phép

Bảng 2.2: *Thông số động lực học của ô tô xi téc dùng trong mô phỏng đối sánh*

Ký hiệu	Mô tả	Giá trị	Đơn vị
m_s	Khối lượng được treo	2305	kg
I_s	Mô men quán tính lắc ngang của khối lượng được treo	17419	$\mathrm{kg\,m^2}$
m_u	Khối lượng không được treo	1073	kg
I_u	Mô men quán tính lắc ngang của khối lượng không được treo	312,15	$\mathrm{kg\,m^2}$
h_{s0}	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng được treo	0,6203	m
h_u	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng không được treo	0,525	m
C_s	Độ cứng thẳng đứng của hệ thống treo mỗi bên	384704,58	N/m
K_s	Hệ số cản giảm chấn của hệ thống treo mỗi bên	13486	$\mathrm{N\,s/m}$
d_s	Một nửa khoảng cách giữa hai phần tử treo	0,62	m
d_u	Một nửa vết bánh xe	1,025	m
C_t	Độ cứng thẳng đứng của lốp mỗi bên	1071000	N/m
K_t	Hệ số cản thẳng đứng của lốp mỗi bên	30000	$\mathrm{N\,s/m}$
C_b	Độ cứng chống lắc ngang tương đương của thanh ổn định ngang	51840	$\mathrm{N\,m/rad}$
g	Gia tốc trọng trường	9,81	$\mathrm{m/s^2}$

Bảng 2.3: *Thông số hình học xi téc và chất lỏng dùng trong mô phỏng đối sánh*

Ký hiệu	Mô tả	Giá trị	Đơn vị
a	Bán trục ngang của xi téc tiết diện hình ê-líp dùng cho E1 và E2	1,02	m
b	Bán trục đứng của xi téc tiết diện hình ê-líp dùng cho E1 và E2	0,71	m
r_{eq}	Bán kính xi téc tròn tương đương diện tích, $r_{eq} = \sqrt{ab}$	0,851	m
L_t	Chiều dài xi téc quy đổi trong mô hình đối sánh	2	m
ρ_l	Khối lượng riêng của chất lỏng	1000	$\mathrm{kg/m^3}$
ζ	Tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng dùng trong mô phỏng đối sánh	0,50	–
h_p	Tỷ lệ khối lượng chất lỏng sử dụng trong mô phỏng	0; 0,25; 0,50 0,75; 1,00	–

đối sánh E1–E2, kích động mặt đường được triệt tiêu bằng cách đặt:

$$q_L = q_R = 0. \tag{2.59}$$

Để lượng hóa sai khác giữa hai mô hình, mô hình tham chiếu được gọi là base,

còn mô hình cần đối sánh được gọi là test. Sai khác cực đại tương đối của đại lượng $x(t)$ được xác định:

$$\varepsilon_{x,\max} = \frac{\max\limits_{t} \left| x^{\text{test}}(t) - x^{\text{base}}(t) \right|}{\max\limits_{t} \left| x^{\text{base}}(t) \right|} \times 100\%. \tag{2.60}$$

Sai khác RMS chuẩn hóa được xác định:

$$\varepsilon_{x,\text{RMS}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[x^{\text{test}}(t) - x^{\text{base}}(t) \right]^2 \mathrm{d}t}}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[x^{\text{base}}(t) \right]^2 \mathrm{d}t}} \times 100\%. \tag{2.61}$$

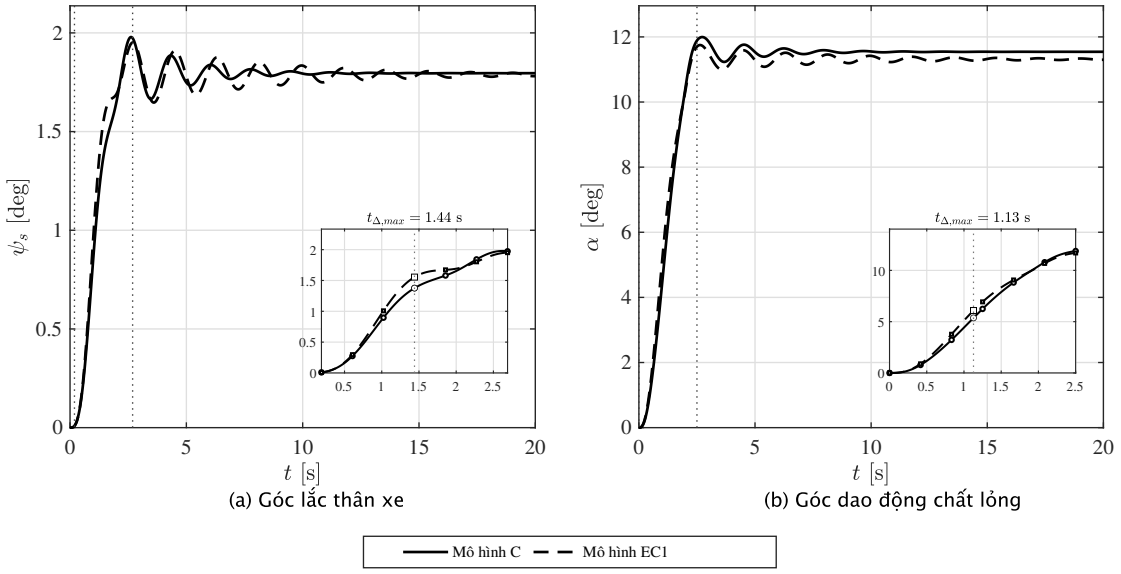
Trong phép đối sánh C–EC1 và C–E1, mô hình C được chọn làm mô hình tham chiếu. Trong phép đối sánh E1–E2, mô hình E1 được chọn làm mô hình tham chiếu. Tại $h_p = 0$ và $h_p = 1$, mô hình không có khối lượng sóng tự do theo nghĩa của dao động tương đối mặt thoáng; vì vậy, đáp ứng $\alpha(t)$ không được dùng để diễn giải chất lượng đối sánh ở hai mức tải biên này.

2.4.2. Đối sánh C–EC1: kiểm tra tính tương thích khi suy biến hình học

Trước khi so sánh ảnh hưởng của dạng tiết diện xi téc, mô hình EC1 được sử dụng như một trường hợp giới hạn của mô hình E1. Trong mô hình EC1, tiết diện ê-líp được suy biến về tiết diện tròn có cùng diện tích với tiết diện ê-líp, đồng thời toàn bộ khối lượng chất lỏng được xem là tham gia dao động như trong mô hình C. Do đó, phép đối sánh C–EC1 có vai trò kiểm tra tính tương thích của quá trình xây dựng mô hình cơ học tương đương, không phải là phép khảo sát ảnh hưởng hình học.

Bảng 2.4: *Sai khác đáp ứng của mô hình EC1 so với mô hình C*

h_p	$\varepsilon_{\psi_s,\max}$	$\varepsilon_{\psi_s,\text{RMS}}$	$\varepsilon_{\alpha,\max}$	$\varepsilon_{\alpha,\text{RMS}}$
		(%)		
0,00	0,000	0,000	–	–
0,25	12,041	3,411	5,128	2,271
0,50	9,018	2,628	6,002	2,337
0,75	6,074	2,058	4,839	2,252
1,00	0,000	0,000	–	–



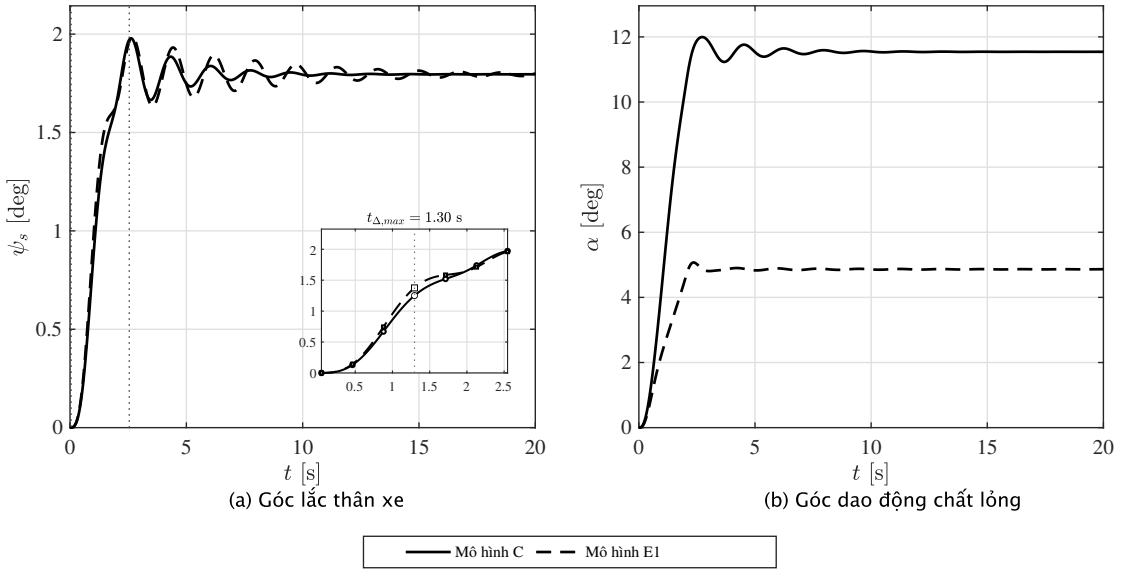
Hình 2.10: *Đối sánh đáp ứng giữa mô hình C và mô hình EC1 tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng*

Hình 2.10 và Bảng 2.4 cho thấy mô hình EC1 tái hiện tốt đáp ứng của mô hình C khi xét trường hợp suy biến hình học. Tại các mức chất tải trung gian, sai khác RMS nằm trong khoảng 2,058%–3,411% đối với $\psi_s(t)$ và 2,252%–2,337% đối với $\alpha(t)$. Tại $h_p = 0{,}50$, giá trị cực đại của $\psi_s(t)$ lần lượt bằng 1,978885° đối với mô hình C và 1,951388° đối với mô hình EC1; giá trị cực đại của $\alpha(t)$ lần lượt bằng 11,995243° và 11,749954°. Các kết quả này xác nhận tính tương thích của mô hình ê-líp khi suy biến về tiết diện tròn trong điều kiện kiểm tra đã thiết lập.

2.4.3. Đối sánh C–E1: ảnh hưởng của dạng tiết diện xi téc

Sau khi kiểm tra trường hợp giới hạn C–EC1, mô hình C và mô hình E1 được đối sánh nhằm đánh giá ảnh hưởng của dạng tiết diện xi téc đến đáp ứng của hệ xe–chất lỏng. Trong phép đối sánh này, mô hình C sử dụng xi téc tiết diện tròn và toàn bộ khối lượng chất lỏng tham gia dao động; mô hình E1 sử dụng xi téc tiết diện ê-líp và mô hình khối lượng chất lỏng tương đương có tách phần khối lượng dao động tương đối và phần khối lượng chuyển động cùng xi téc. Vì vậy, C–E1 được hiểu là phép khảo sát ảnh hưởng hình học và cách mô hình hóa khối lượng chất lỏng, không phải phép kiểm chứng tương thích trực tiếp giữa hai mô hình.

Hình 2.11 và Bảng 2.5 cho thấy hai mô hình cho cùng xu hướng tăng và dao động tắt dần của góc lắc ngang $\psi_s(t)$. Tại $h_p = 0{,}50$, sai khác RMS của $\psi_s(t)$ bằng



Hình 2.11: *Đối sánh đáp ứng giữa mô hình C và mô hình E1 tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng*

Bảng 2.5: *Sai khác đáp ứng của mô hình E1 so với mô hình C*

h_p	$\varepsilon_{\psi_s,\max}$	$\varepsilon_{\psi_s,\mathrm{RMS}}$	$\varepsilon_{\alpha,\max}$	$\varepsilon_{\alpha,\mathrm{RMS}}$
		(%)		
0,00	0,000	0,000	–	–
0,25	12,317	5,672	51,065	49,777
0,50	6,293	2,054	59,545	57,786
0,75	10,234	10,042	66,269	63,706
1,00	11,570	11,824	–	–

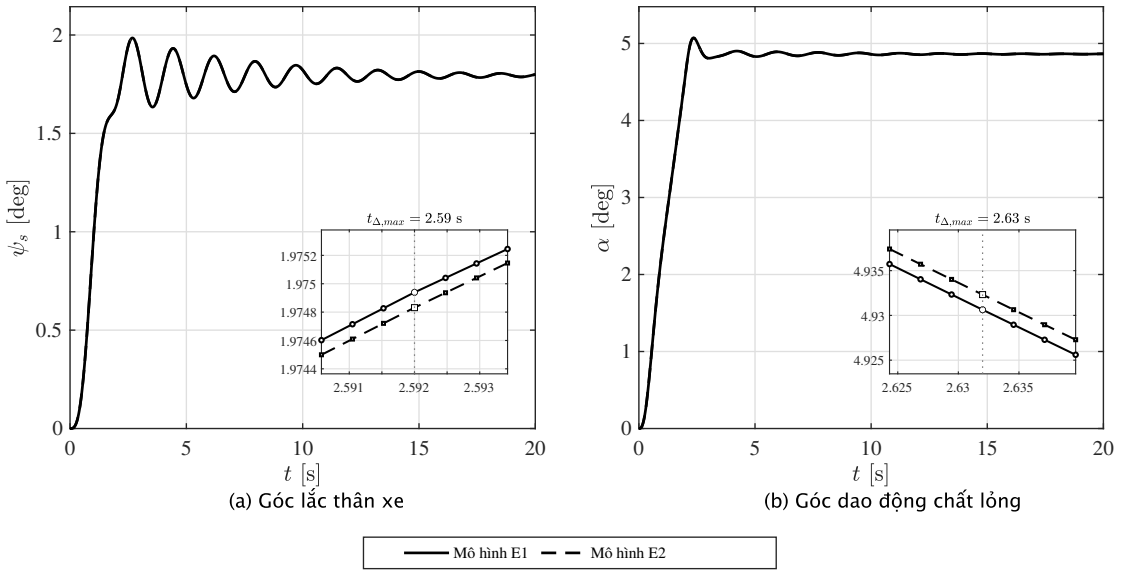
2,054%, trong khi giá trị cực đại của $\psi_s(t)$ lần lượt bằng 1,978885° đối với mô hình C và 1,985052° đối với mô hình E1. Điều này cho thấy đáp ứng cấp xe của hai mô hình có quy luật và độ lớn tương đối gần nhau tại mức chất tải đại diện.

Ngược lại, sai khác của $\alpha(t)$ giữa hai mô hình là đáng kể. Tại $h_p = 0{,}50$, giá trị cực đại của $\alpha(t)$ bằng 11,995243° đối với mô hình C và 5,071603° đối với mô hình E1. Sự khác biệt này phù hợp với bản chất của phép đối sánh C–E1, vì hai mô hình sử dụng dạng tiết diện xi téc khác nhau và cách mô tả khối lượng chất lỏng dao động khác nhau. Do đó, kết quả C–E1 không được dùng để khẳng định tính tương đương về chuyển động chất lỏng, mà dùng để làm rõ ảnh hưởng của hình học xi téc và cách tách khối lượng chất lỏng trong mô hình E1.

2.4.4. Đối sánh E1–E2: kiểm tra phép mở rộng mô hình

Mô hình E2 được phát triển từ E1 bằng cách bổ sung liên kết động lực học giữa chuyển động thẳng đứng của thân xe và dao động tương đối của chất lỏng, đồng thời đưa kích thích mặt đường tại hai vệt bánh vào mô hình và mô hình tiếp xúc lốp–đường. Để kiểm tra tính kế thừa của mô hình E2 đối với mô hình E1, phép đối sánh E1–E2 được thực hiện trong điều kiện triệt tiêu kích động mặt đường, $q_L = q_R = 0$. Khi đó, nếu quá trình mở rộng mô hình được thiết lập nhất quán, đáp ứng lắc ngang của E2 phải gần như trùng với đáp ứng của E1.

Trong quá trình hậu xử lý, các tín hiệu của mô hình E1 dùng trong phép đối sánh C–E1 và phép đối sánh E1–E2 đã được kiểm toán về tính đồng nhất. Kết quả cho thấy sai khác lớn nhất giữa hai nguồn đáp ứng E1 bằng 0 đối với các nhóm tín hiệu được kiểm tra; đồng thời giá trị lớn nhất của $|q_L|$ và $|q_R|$ trong phép đối sánh E1–E2 bằng 0. Điều này bảo đảm rằng sai khác giữa E1 và E2 không phát sinh do dùng hai nguồn dữ liệu E1 khác nhau hoặc do còn tồn tại kích động mặt đường trong mô phỏng E2.



Hình 2.12: *Đối sánh đáp ứng giữa mô hình E1 và mô hình E2 khi $q_L = q_R = 0$ tại $h_p = 0{,}50$: (a) góc lắc ngang của khối lượng được treo; (b) góc dao động của chất lỏng*

Hình 2.12 và Bảng 2.6 cho thấy đáp ứng của hai mô hình gần như trùng nhau khi triệt tiêu kích động mặt đường. Tại $h_p = 0{,}50$, giá trị cực đại của $\psi_s(t)$ bằng 1,985052° đối với mô hình E1 và 1,984974° đối với mô hình E2; giá trị cực đại của

Bảng 2.6: *Sai khác đáp ứng của mô hình E2 so với mô hình E1 khi* $q_L = q_R = 0$

h_p	$\varepsilon_{\psi_s,\max}$	$\varepsilon_{\psi_s,\mathrm{RMS}}$	$\varepsilon_{\alpha,\max}$	$\varepsilon_{\alpha,\mathrm{RMS}}$
		(%)		
0,00	$< 10^{-9}$	$< 10^{-9}$	–	–
0,25	0,004311	0,001815	0,011918	0,002121
0,50	0,005365	0,001295	0,033347	0,004786
0,75	0,002926	0,000520	0,053659	0,009649
1,00	$< 10^{-9}$	$< 10^{-9}$	–	–

$\alpha(t)$ bằng 5,071603° đối với mô hình E1 và 5,070681° đối với mô hình E2. Sai khác RMS lớn nhất trong các mức tải trung gian nhỏ hơn 0,01% đối với cả $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$.

Kết quả trên xác nhận mô hình E2 kế thừa đúng đáp ứng lắc ngang của mô hình E1 trong điều kiện không có kích động mặt đường. Các bậc tự do thẳng đứng và mô hình tiếp xúc lốp–đường được bổ sung trong E2 không làm thay đổi đáng kể đáp ứng khi $q_L = q_R = 0$. Do đó, mô hình E2 có đủ tính nhất quán nội tại để tiếp tục được sử dụng cho nhận dạng tham số ở Chương 3 và khảo sát ổn định lật ngang động ở Chương 4.

2.5. Kết luận chương

Chương này đã trình bày cơ sở và trình tự xây dựng các mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng phục vụ nghiên cứu ổn định lật ngang của ô tô xi téc. Các mô hình được phát triển theo hướng tăng dần mức độ mô tả, gồm mô hình C cho xi téc tiết diện hình tròn, mô hình E1 cho xi téc tiết diện hình ê-líp và mô hình E2 mở rộng mô tả liên kết giữa chuyển động của xe và dao động chất lỏng, có xét kích thích mặt đường.

Các mô hình C, E1 và E2 đều giữ các bậc tự do dịch chuyển thẳng đứng và lắc ngang của khối lượng được treo và không được treo. Trong các mô hình C và E1, kích thích mặt đường được bỏ qua bằng cách đặt $q_L = q_R = 0$. Mô hình E2 phát triển từ E1 bằng cách bổ sung liên kết động lực học giữa chuyển động thẳng đứng của thân xe và dao động tương đối của chất lỏng, đồng thời đưa kích thích mặt đường tại hai vệt bánh vào mô hình. Sự mở rộng này cho phép khảo sát tác động kết hợp của gia tốc ngang và kích thích mặt đường đến đáp ứng của hệ xe–chất

lỏng và ổn định lật ngang.

Chương này cũng thiết lập mô hình tiếp xúc một chiều lốp–mặt đường và các chỉ tiêu đánh giá mất ổn định lật ngang, gồm phản lực pháp tuyến, hệ số chuyển tải trọng ngang LTR, điều kiện khởi phát nhấc bánh và các đại lượng theo dõi sau nhấc bánh. Theo đó, điều kiện $\mathrm{LTR}_{\max} \geq 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}$ hoặc $F_{z,\min} \leq \varepsilon_F$ chỉ biểu thị ngưỡng khởi phát nhấc bánh; trạng thái phát triển lật không phục hồi được đánh giá riêng thông qua khả năng phục hồi tiếp xúc và diễn biến góc lắc ngang.

Các mô phỏng kiểm tra cho thấy mô hình EC1 tương thích với mô hình C khi tiết diện ê-líp quy về tiết diện tròn. Đồng thời, khi tắt kích động mặt đường và sử dụng cùng bộ tham số, mô hình E2 cho đáp ứng gần trùng với mô hình E1 ở các mức chất tải khảo sát. Các kết quả này xác nhận tính nhất quán nội tại của quá trình phát triển mô hình, làm cơ sở cho nhận dạng tham số ở Chương 3 và khảo sát ổn định lật ngang động ở Chương 4.

CHƯƠNG 3. THÍ NGHIỆM VÀ NHẬN DẠNG THAM SỐ MÔ HÌNH Ô TÔ XI TÉC–CHẤT LỎNG

Chương này trình bày quá trình thí nghiệm, xác định tham số đầu vào, nhận dạng tham số và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình E2 đối với ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước.

3.1. Đối tượng và phương án thí nghiệm

3.1.1. Đối tượng thí nghiệm

Đối tượng thí nghiệm là ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước, sử dụng xi téc tiết diện hình ê-líp và chỉ bố trí vách ngăn có mặt phẳng vuông góc với trục dọc xe. Thí nghiệm được thực hiện nhằm thu thập dữ liệu phục vụ xác định tham số đầu vào của mô hình, nhận dạng các tham số khó xác định trực tiếp và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình E2 với đáp ứng thực nghiệm.

Trong Chương này, chiều cao mực chất lỏng được ký hiệu là h_l, còn $\lambda_h = h_l/(2b)$ là tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng dùng để mô tả các mức chất tải thí nghiệm. Đại lượng λ_h khác với $h_p = m_l/m_{l,\max}$, là tỷ lệ khối lượng chất lỏng được sử dụng trong các khảo sát ở Chương 4.

3.1.2. Phạm vi và chế độ thí nghiệm

Thí nghiệm tập trung vào các dữ liệu cần thiết cho mô hình động lực học hệ xe–chất lỏng, gồm dữ liệu khối lượng và phân bố tải trọng, dữ liệu hệ treo–lốp, các thông số hình học và đáp ứng động lực học của xe trong các điều kiện vận hành đặc trưng. Hai chế độ vận hành được sử dụng để đối sánh với mô hình E2 gồm:

- quay vòng ổn định, đại diện cho kích thích do gia tốc ngang;
- chuyển động thẳng qua mấp mô, đại diện cho kích thích thẳng đứng từ mặt đường.

Các thí nghiệm này được thực hiện tại nhiều mức chất tải nhằm đánh giá ảnh hưởng của chiều cao mực chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang của thân xe.

3.1.3. Điều kiện thí nghiệm, thiết bị đo và bố trí cảm biến

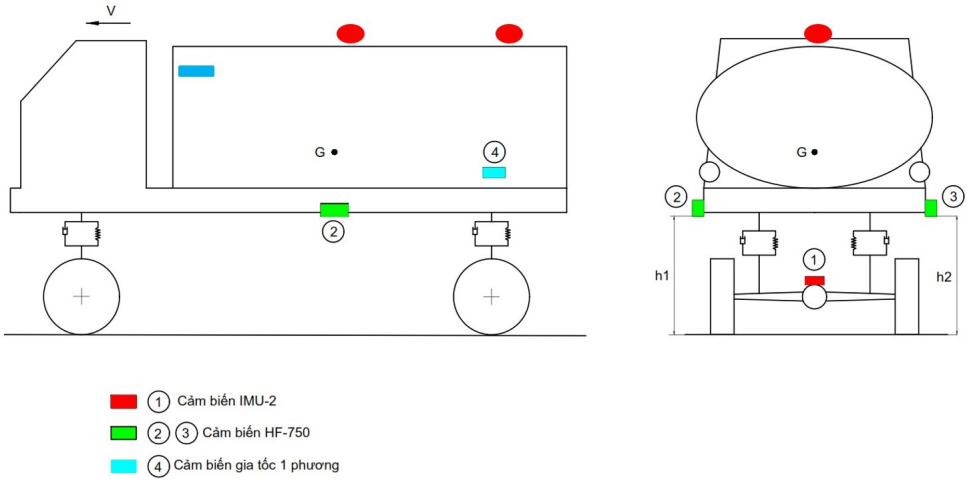
Thí nghiệm được tiến hành ngoài trời trong điều kiện mặt đường khô ráo, nhiệt độ 20 °C, độ ẩm 85% và tốc độ gió trung bình 4 m/s. Mỗi chế độ thí nghiệm được thực hiện lặp lại không nhỏ hơn ba lần; xe thí nghiệm ở trạng thái kỹ thuật tốt, người lái có kinh nghiệm và có bố trí nhân sự bảo vệ an toàn tại khu vực thử nghiệm.

Việc lặp lại không nhỏ hơn ba lần cho mỗi chế độ thí nghiệm nhằm kiểm tra tính lặp lại của dạng tín hiệu, giá trị cực đại và đặc trưng dao động chính. Do thí nghiệm được thực hiện trên xe thật với ràng buộc về an toàn, mặt bằng thử nghiệm và khả năng lặp chính xác quỹ đạo, dữ liệu sử dụng cho nhận dạng và đối sánh được lựa chọn từ các lần đo có dạng đáp ứng ổn định, không xuất hiện nhiễu bất thường và có điều kiện vận hành gần nhau.

Các thiết bị đo ghi và thu thập dữ liệu gồm bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43, cảm biến đo độ cao HF–750 của KISTLER và bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2. Thông tin chi tiết về các thiết bị đo được trình bày trong Phụ lục B.1.

Hai cảm biến IMU–2 được lắp phía trên xi téc và tại khu vực cầu sau xe để xác định đáp ứng lắc ngang. Hai cảm biến HF–750 được lắp ở hai bên hông xe để đo dịch chuyển tương đối của thân xe so với mặt đường. Cảm biến gia tốc một phương được lắp trên thân xi téc để đo gia tốc thân xe. Sơ đồ bố trí cảm biến được trình bày trên Hình 3.1.

Hình 3.2 trình bày vị trí thực tế của các thiết bị đo sau khi lắp đặt trên xe thí nghiệm. Hai bộ đo DS–IMU2 được lắp phía trên xi téc và tại khu vực cầu sau xe để xác định đáp ứng lắc ngang, vận tốc góc và gia tốc ngang của xe. Hai cảm biến HF–750 được lắp ở hai bên hông xe để đo khoảng cách tương đối giữa thân xe và mặt đường. Cảm biến gia tốc một phương được lắp trên thân xi téc để đo gia tốc ngang của thân xe. Các tín hiệu đo được thu thập và đồng bộ thông qua bộ DEWE–43. Bảng 3.1 trình bày mối liên hệ giữa thông số cần đo, thiết bị/cảm



Hình 3.1: *Sơ đồ mô tả vị trí các thiết bị và cảm biến đo trên ô tô xi téc*

biến, vị trí lắp và vai trò của từng tín hiệu; qua đó làm rõ cơ sở lựa chọn thiết bị và quy trình thí nghiệm.



Hình 3.2: *Vị trí thực tế sau khi lắp các thiết bị thực nghiệm*

Ngoài các thiết bị đo, thí nghiệm còn sử dụng bàn cân để xác định phân bố tải trọng, thước đo chiều cao mực chất lỏng và các khối gỗ để tạo kích thích dao động thẳng đứng phục vụ xác định đặc tính hệ treo, như trình bày trên Hình 3.3.

Bảng 3.1: *Bố trí cảm biến và vai trò của các tín hiệu đo trong thí nghiệm*

Thiết bị/cảm biến	Vị trí lắp	Trục đo	Đại lượng sử dụng	Vai trò trong xử lý tín hiệu
DS–IMU2	Phía trên xi téc	Roll, a_y	Góc lắc ngang, vận tốc góc và gia tốc ngang của thân xe	Xác định đáp ứng lắc ngang của phần khối lượng được treo; sử dụng làm tín hiệu chính để đối sánh giữa mô phỏng và thí nghiệm.
DS–IMU2	Khu vực cầu sau xe, gần trục khảo sát	Roll, a_y	Góc lắc ngang, vận tốc góc và gia tốc ngang tại khu vực cầu sau	Theo dõi đáp ứng động tại vùng cầu sau; hỗ trợ kiểm tra sự đồng bộ tín hiệu và đánh giá đáp ứng của xe tại mặt phẳng khảo sát.
HF–750	Bên hông trái thân xe, gần khu vực cầu sau	z	Khoảng cách tương đối từ thân xe đến mặt đường phía trái	Xác định dao động tương đối phía trái thân xe; kết hợp với tín hiệu phía phải để đánh giá dao động thẳng đứng và lắc ngang tương đối của thân xe.
HF–750	Bên hông phải thân xe, gần khu vực cầu sau	z	Khoảng cách tương đối từ thân xe đến mặt đường phía phải	Xác định dao động tương đối phía phải thân xe; kết hợp với tín hiệu phía trái để đánh giá dao động thẳng đứng và lắc ngang tương đối của thân xe.
Cảm biến gia tốc một phương	Trên thân xi téc	y	Gia tốc ngang của thân xi téc	Bổ sung tín hiệu gia tốc ngang tác dụng lên thân xi téc; hỗ trợ kiểm tra quy luật kích thích ngang và đối chiếu với tín hiệu gia tốc từ DS–IMU2.
DEWE–43	Trong cabin hoặc vị trí cố định trên xe thí nghiệm	–	Tín hiệu điện áp từ các cảm biến	Thu thập, đồng bộ và lưu trữ dữ liệu đo từ các cảm biến; làm cơ sở tiền xử lý, lọc tín hiệu và xuất dữ liệu phục vụ nhận dạng tham số mô hình.



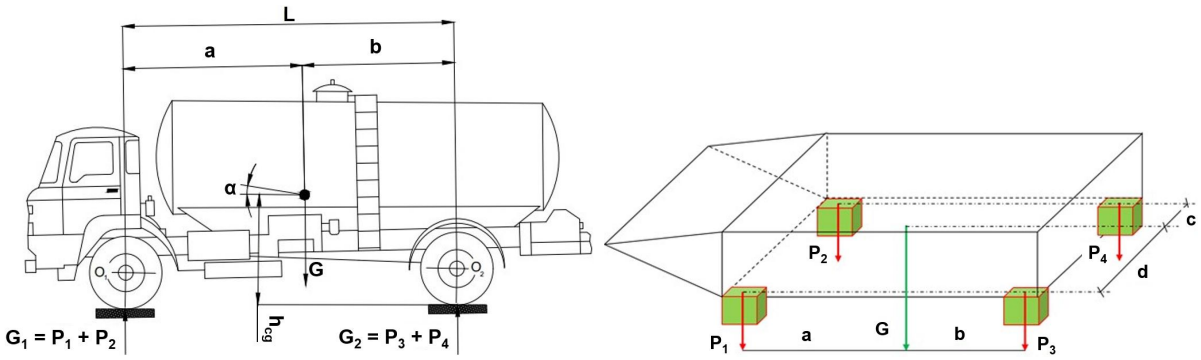
Hình 3.3: *Bàn cân, khối gỗ và thước đo mực chất lỏng sử dụng trong thí nghiệm*

3.1.4. Quy trình thí nghiệm

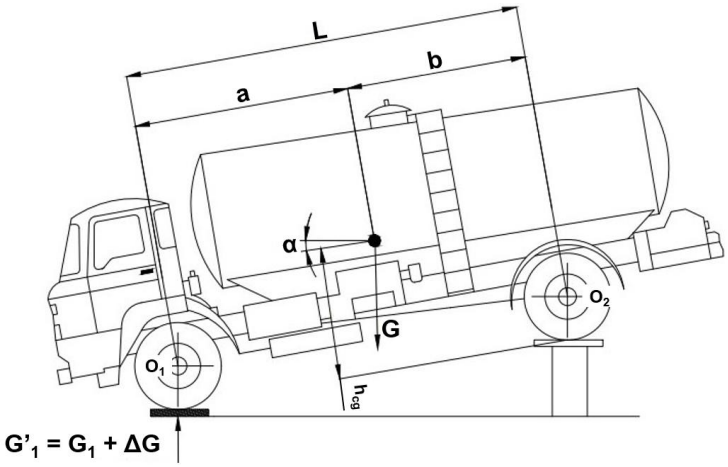
Quy trình thí nghiệm gồm bốn nhóm nội dung chính: xác định tọa độ trọng tâm, xác định đặc tính lốp và hệ treo, thí nghiệm quay vòng ổn định và thí nghiệm chuyển động thẳng qua mấp mô.

Thí nghiệm xác định tọa độ trọng tâm

Tọa độ trọng tâm của xe được xác định trên cơ sở đo tải trọng phân bố lên các bánh xe và các cầu trong trạng thái xe đứng yên. Đối với tọa độ trọng tâm trong mặt phẳng ngang, xe được đặt trên mặt phẳng nằm ngang và đo tải trọng tại từng bánh xe. Đối với tọa độ trọng tâm theo chiều cao, cầu sau được nâng lên một góc xác định, sau đó đo lại phân bố tải trọng cầu trước để tính toán chiều cao trọng tâm.



Hình 3.4: *Sơ đồ xác định tọa độ trọng tâm trong mặt phẳng ngang*



Hình 3.5: *Sơ đồ xác định tọa độ trọng tâm ô tô theo chiều cao*

Thí nghiệm xác định độ cứng lốp, độ cứng hệ treo và hệ số cản giảm chấn

Độ cứng lốp được xác định từ quan hệ giữa tải trọng tác dụng lên bánh xe và độ biến dạng hướng kính của lốp ở các mức chất tải khác nhau. Lốp được bơm đúng áp suất định mức, xe được cân theo từng mức chất tải và bán kính lốp được đo tương ứng để xác định độ biến dạng.

Độ cứng hệ treo và hệ số cản giảm chấn được xác định thông qua thí nghiệm dao động tự do tắt dần của xe. Xe được đưa lên các khối gỗ bố trí dưới bốn bánh, sau đó tạo dao động thẳng đứng khi xe rơi khỏi khối gỗ xuống mặt đường. Tín hiệu dịch chuyển theo phương thẳng đứng được ghi lại bằng các cảm biến HF–750 để xác định đặc tính hệ treo.



Hình 3.6: *Thí nghiệm xác định đặc tính hệ thống treo*

Thí nghiệm quay vòng ổn định

Thí nghiệm quay vòng ổn định được thực hiện trên đường nhựa tại khu vực vòng xuyến có bán kính $R = 39\,\mathrm{m}$. Xe chuyển động theo quỹ đạo tròn với các vận tốc xác định và các mức chất tải khác nhau. Dữ liệu đo được sử dụng để đối sánh đáp ứng lắc ngang của mô hình E2 trong điều kiện có kích thích do gia tốc ngang.

Thí nghiệm chuyển động thẳng qua mấp mô

Thí nghiệm chuyển động thẳng qua mấp mô được thực hiện với các mức chất tải tương tự thí nghiệm quay vòng ổn định. Xe chuyển động thẳng với các vận tốc xác định; bánh xe bên trái đi qua ba mấp mô và bánh xe bên phải đi qua hai mấp mô. Các mấp mô có kích thước dài × rộng × cao là $50\,\mathrm{cm} \times 35\,\mathrm{cm} \times 5\,\mathrm{cm}$, được bố



Hình 3.7: *Khu vực thí nghiệm quay vòng ổn định và bố trí cọc tiêu*

trí xen kẽ như trên Hình 3.8.



Hình 3.8: *Bố trí mấp mô mặt đường trong thí nghiệm chuyển động thẳng*

3.1.5. Mô tả kích thích mấp mô sử dụng trong mô phỏng

Từ bố trí thí nghiệm trên Hình 3.8, biên dạng mấp mô tại hai vệt bánh được quy đổi thành các hàm cao độ mặt đường q_L và q_R để làm đầu vào cho mô hình E2. Trong đó, chỉ số L và R lần lượt tương ứng với vệt bánh trái và vệt bánh phải.

Mỗi khối mấp mô thực tế có kích thước $0{,}50 \times 0{,}35 \times 0{,}05\,\mathrm{m}$. Trong biểu diễn một chiều dọc theo quỹ đạo bánh xe, chiều cao cực đại được lấy bằng $q_0 = 0{,}05\,\mathrm{m}$, chiều rộng tác dụng theo phương chuyển động là $\ell = 0{,}35\,\mathrm{m}$. Khoảng cách giữa tâm hai mấp mô liên tiếp trên cùng một vệt bánh là $S = 10\,\mathrm{m}$.

Lấy s là quãng đường xe đi được kể từ đầu đoạn khảo sát. Biên dạng quy đổi

của một mấp mô có tâm tại $s = s_c$ được mô tả bởi:

$$f(s; s_c) = \begin{cases} q_0 \dfrac{\cos\left[\dfrac{2\pi(s - s_c)}{S}\right] - \cos\left(\dfrac{\pi\ell}{S}\right)}{1 - \cos\left(\dfrac{\pi\ell}{S}\right)}, & |s - s_c| \le \dfrac{\ell}{2}, \\ 0, & |s - s_c| > \dfrac{\ell}{2}. \end{cases} \tag{3.1}$$

Hàm (3.1) thỏa mãn $f(s_c; s_c) = q_0$ và bằng không tại hai mép $s = s_c \pm \ell/2$.

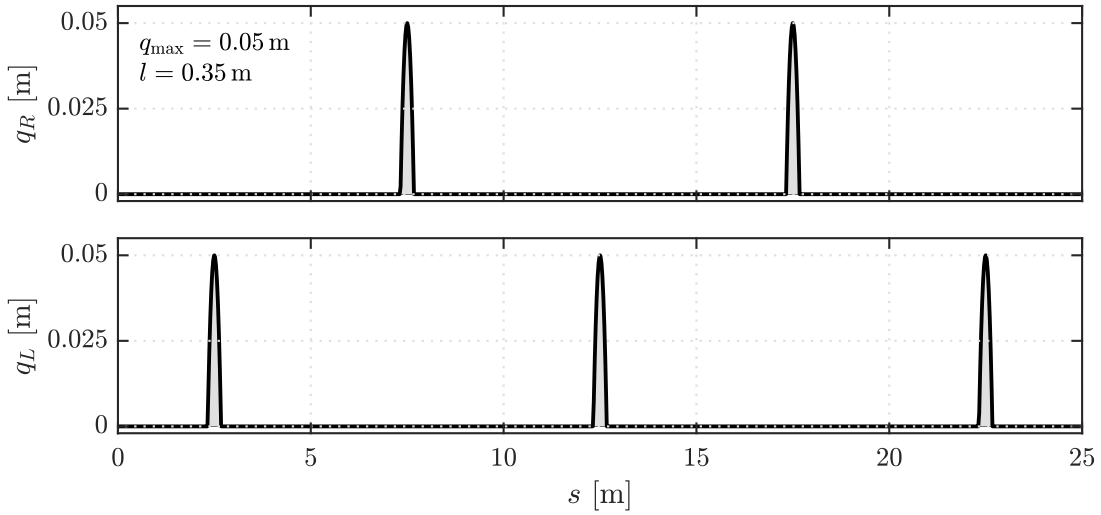
Theo bố trí thí nghiệm, tâm các mấp mô trên hai vệt bánh được xác định bởi:

$$s_{L,k} = \frac{S}{4} + kS, \quad k = 0, 1, 2; \qquad s_{R,k} = \frac{3S}{4} + kS, \quad k = 0, 1. \tag{3.2}$$

Do đó, cao độ kích thích tại hai vệt bánh là:

$$q_L(s) = \sum_{k=0}^{2} f(s; s_{L,k}), \qquad q_R(s) = \sum_{k=0}^{1} f(s; s_{R,k}). \tag{3.3}$$

Với $S = 10\,\text{m}$, các mấp mô trên vệt trái có tâm tại $s_L = 2{,}5;\ 12{,}5;\ 22{,}5\,\text{m}$, còn các mấp mô trên vệt phải có tâm tại $s_R = 7{,}5;\ 17{,}5\,\text{m}$. Biên dạng kích thích tương ứng được trình bày trên Hình 3.9.



Hình 3.9: *Biên dạng kích thích mấp mô tại hai vệt bánh theo quãng đường*

Trên Hình 3.9, đồ thị phía trên biểu diễn $q_R(s)$, gồm hai mấp mô; đồ thị phía dưới biểu diễn $q_L(s)$, gồm ba mấp mô. Các mấp mô xuất hiện xen kẽ theo quãng đường nên hai bánh xe không chịu kích thích đồng thời. Chênh lệch giữa $q_L(s)$ và $q_R(s)$ vừa tạo dao động thẳng đứng, vừa tạo mô men kích thích dao động lắc

ngang.

Khi xe chuyển động thẳng với vận tốc không đổi v, quan hệ giữa quãng đường và thời gian là:

$$s = vt. \tag{3.4}$$

Các kích thích đưa vào mô hình trong miền thời gian được xác định bởi:

$$q_L(t) = \sum_{k=0}^{2} f(vt; s_{L,k}), \qquad q_R(t) = \sum_{k=0}^{1} f(vt; s_{R,k}). \tag{3.5}$$

Khi xét thành phần cản hướng kính của lốp, vận tốc biến thiên cao độ của một mấp mô được xác định theo:

$$\frac{d}{dt} f(vt; s_c) = \begin{cases} -\dfrac{2\pi v q_0}{S\left[1 - \cos\left(\dfrac{\pi \ell}{S}\right)\right]} \sin\left[\dfrac{2\pi(vt - s_c)}{S}\right], & |vt - s_c| \le \dfrac{\ell}{2}, \\ 0, & |vt - s_c| > \dfrac{\ell}{2}. \end{cases} \tag{3.6}$$

Suy ra:

$$\dot{q}_L(t) = \sum_{k=0}^{2} \frac{d}{dt} f(vt; s_{L,k}), \qquad \dot{q}_R(t) = \sum_{k=0}^{1} \frac{d}{dt} f(vt; s_{R,k}). \tag{3.7}$$

Trong các công thức trên, q_L, q_R là cao độ mặt đường tại điểm tiếp xúc của bánh xe trái và phải; $\dot{q}_L, \dot{q}_R$ là tốc độ biến thiên cao độ; q_0 là chiều cao cực đại; ℓ là chiều rộng tác dụng theo phương chuyển động; S là khoảng cách giữa hai mấp mô liên tiếp trên cùng một vệt bánh; s_c là tọa độ tâm mấp mô; k là chỉ số thứ tự; s là quãng đường; t là thời gian và v là vận tốc xe.

Đối với thí nghiệm dùng trong nhận dạng, vận tốc xe bằng $v = 10\,\text{km/h} = 2{,}7778\,\text{m/s}$. Khi đó, thời gian bánh xe đi qua một mấp mô và thời gian đi hết vùng bố trí mấp mô lần lượt là:

$$\Delta t_q = \frac{\ell}{v} = 0{,}126\,\text{s}, \qquad T_q = \frac{2{,}5S}{v} = 9\,\text{s}. \tag{3.8}$$

Các thời điểm đi qua tâm mấp mô trên vệt trái là $0{,}9;\ 4{,}5;\ 8{,}1\,\text{s}$, còn trên vệt phải là $2{,}7;\ 6{,}3\,\text{s}$. Quy luật trên được sử dụng thống nhất để tái hiện bố trí mấp mô thực tế trong mô phỏng E2. Vận tốc 10 km/h chỉ được sử dụng cho ví dụ minh họa này.

Trong từng ca thí nghiệm, bố trí hình học của mấp mô được giữ nguyên, còn các thời điểm và khoảng thời gian kích thích được xác định theo vận tốc tương ứng thông qua quan hệ $s = vt$, bảo đảm mô phỏng và thực nghiệm có cùng điều kiện vận hành.

3.2. Xác định các tham số đầu vào của mô hình ô tô xi téc–chất lỏng

Các tham số đầu vào của mô hình E2 được xác định từ đo đạc trực tiếp, cân đo thực nghiệm và tính toán từ dữ liệu đo. Nhóm tham số này gồm khối lượng và phân bố tải trọng, tọa độ trọng tâm, độ cứng lốp, độ cứng hệ treo, hệ số cản giảm chấn, các thông số hình học của xe–xi téc và các tham số quán tính ban đầu phục vụ bài toán nhận dạng.

3.2.1. Khối lượng, phân bố tải trọng và tọa độ trọng tâm

Tọa độ trọng tâm của xe theo phương dọc và phương ngang được xác định từ điều kiện cân bằng mô men của tải trọng phân bố lên các bánh xe. Gọi G_1, G_2 và G lần lượt là khối lượng phân bố lên cầu trước, cầu sau và toàn xe; P_1, P_2, P_3, P_4 là tải trọng đo tại bốn bánh xe; L là chiều dài cơ sở và B là chiều rộng vết bánh xe. Khi xe đứng trên mặt phẳng ngang, khoảng cách từ trọng tâm đến cầu trước và cầu sau được xác định:

$$a = \frac{G_2}{G_1 + G_2} L = \frac{G_2 L}{G}, \qquad b = \frac{G_1}{G_1 + G_2} L = \frac{G_1 L}{G}. \tag{3.9}$$

Tọa độ trọng tâm theo phương ngang được xác định từ phân bố tải trọng hai bên xe:

$$c = \frac{P_1 + P_3}{G} B, \qquad d = \frac{P_2 + P_4}{G} B. \tag{3.10}$$

Chiều cao trọng tâm được xác định bằng phương pháp cân nghiêng. Khi cầu sau được nâng lên một góc β, gọi G_1^* là khối lượng phân bố lên cầu trước ở trạng thái nghiêng, $\Delta G = G_1^* - G_1$, và r_t là bán kính bánh xe tương ứng với mức tải. Từ

cân bằng mô men, chiều cao trọng tâm được xác định:

$$h_c = r_t + \left(\frac{G_1^* L}{G} - b\right)\cot\beta = r_t + \frac{\Delta G\, L}{G}\cot\beta. \tag{3.11}$$

Kết quả đo tải trọng phân bố trên các bánh xe và các cầu được trình bày trong Bảng 3.2. Từ dữ liệu phân bố tải trọng, tọa độ trọng tâm trong mặt phẳng ngang

Bảng 3.2: *Dữ liệu đo tải trọng theo mức chất tải*

Mức chất tải	**Phân bố lên bánh xe** (kg)				**Phân bố trên trục** (kg)		
	$\boldsymbol{P_1}$	$\boldsymbol{P_2}$	$\boldsymbol{P_3}$	$\boldsymbol{P_4}$	$\boldsymbol{G_1}$	$\boldsymbol{G_2}$	$\boldsymbol{G}$
100% tải	1975	1935	4890	4780	3910	9670	13580
75% tải	1805	1835	3895	3990	3640	7885	11525
50% tải	1470	1520	3065	2990	2990	6055	9045
25% tải	1205	1250	1850	1785	2455	3635	6090
Không tải	990	1035	1235	1220	2025	2455	4480

được xác định và trình bày trong Bảng 3.3. Trong đó, a và b lần lượt là khoảng

Bảng 3.3: *Tọa độ trọng tâm tính toán theo mức chất tải trong mặt phẳng dọc* (a, b)*, ngang* (c, d)

Mức tải	$a\,(mm)$	$b\,(mm)$	$c\,(mm)$	$d\,(mm)$
100% tải	2661	1074	832	818
75% tải	2557	1178	819	831
50% tải	2501	1234	828	822
25% tải	2227	1508	827	823
Không tải	2049	1686	826	824

cách từ trọng tâm đến cầu trước và cầu sau; c và d là khoảng cách từ trọng tâm đến bánh xe bên phải và bên trái.

Tọa độ trọng tâm theo chiều cao được xác định bằng phương pháp cân khi nâng cầu sau xe lên một góc xác định. Kết quả được trình bày trong Bảng 3.4.

Do mô hình động lực học trong luận án được xây dựng cho mặt phẳng ngang đi qua cầu sau, các thông số khối lượng được quy đổi theo cầu sau. Khối lượng không được treo được lấy $m_u = 750\,\text{kg}$, còn khối lượng được treo của xe ở trạng thái không tải là $m_s = 1705\,\text{kg}$. Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo khi không tải được xác định là $h_{s0} = 0{,}86\,\text{m}$.

Bảng 3.4: *Dữ liệu thí nghiệm cân nghiêng xe theo phương dọc*

Mức tải	P_1^* (kg)	P_2^* (kg)	G_1^* (kg)	ΔG (kg)	β (deg)	r_t (mm)	h_c (mm)
100% tải	2365	2495	4860	950	15	376	1352
75% tải	2040	2195	4235	595	15	384	1104
50% tải	1650	1725	3375	385	15	393	987
25% tải	1315	1370	2685	230	15	406	933
Không tải	1050	1120	2170	145	15	412	863

3.2.2. Độ cứng lốp

Độ cứng hướng kính của lốp được xác định từ quan hệ giữa tải trọng tác dụng và biến dạng hướng kính của lốp. Kết quả đo được trình bày trong Bảng 3.5. Độ

Bảng 3.5: *Số liệu đo ghi và tính toán độ cứng hướng kính của bánh xe C_t*

Mức tải	**Bán kính bánh xe** (mm)	**Biến dạng lốp** δ_t (mm)	$\boldsymbol{C_t}$ (N/m)
100% tải	376	49	967987
75% tải	384	41	943315
50% tải	393	32	928118
25% tải	406	19	938404
Không tải	412	13	926290
		Giá trị trung bình	**940823**

cứng lốp tại từng mức tải được xác định theo:

$$C_t = \frac{G_2\, g\, 1000}{2\delta_t}, \tag{3.12}$$

trong đó G_2 là khối lượng phân bố lên cầu sau [kgf], $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$ và δ_t là độ biến dạng hướng kính của lốp [mm], hệ số 10^3 là hệ số quy đổi đơn vị. Giá trị trung bình sử dụng trong mô hình là:

$$C_t = 940823\,\mathrm{N/m}. \tag{3.13}$$

3.2.3. Độ cứng hệ treo và hệ số cản giảm chấn

Độ cứng tương đương của hệ thống treo sau được xác định từ thí nghiệm biến dạng hệ treo và tổng hợp trong Bảng 3.6. Hệ số cản giảm chấn tương đương được

xác định từ đáp ứng dao động tự do tắt dần đo bằng cảm biến HF–750.

$$C_{s,i} = \frac{G_{2,i} g\, 10^3}{2\delta_{s,i}}, \tag{3.14}$$

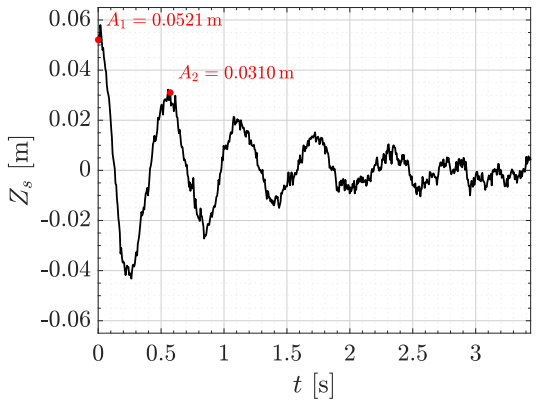
trong đó $G_{2,i}$ là khối lượng phân bố lên cầu sau tại mức tải thứ i, còn $\delta_{s,i}$ là biến dạng của hệ thống treo, tính theo milimét.

Bảng 3.6: *Dữ liệu đo và kết quả xác định độ cứng hệ thống treo*

Mức tải	**Biến dạng của hệ thống treo** $\boldsymbol{\delta_{s,i}}$ (mm)	$\boldsymbol{C_{s,i}}$ (N/m)
100%	78,75	602303
75%	65,00	595014
50%	50,00	593995
25%	31,25	570549
0%	21,25	566672
	Giá trị trung bình	**585706**

Đối với hệ số cản giảm chấn, logarit suy giảm được xác định từ hai biên độ đặc trưng liên tiếp của đáp ứng dao động tắt dần (Hình 3.10):

$$\delta = \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right). \tag{3.15}$$



Hình 3.10: *Đáp ứng dao động tắt dần trên cầu sau của ô tô xi téc với hai biên độ đặc trưng A_1 và A_2*

Trên Hình 3.10, A_1 và A_2 là hai biên độ đặc trưng liên tiếp của đáp ứng dao động tắt dần, được dùng để xác định logarit suy giảm dao động. Từ dữ liệu sau

xử lý, chọn $A_1 = 0{,}0521\,\text{m}$ và $A_2 = 0{,}031077\,\text{m}$. Khi đó:

$$\delta = \ln\left(\frac{0{,}0521}{0{,}0310}\right) = 0{,}5192. \tag{3.16}$$

Xét hàm dập tắt dao động theo hàm mũ $Z_s = A_1 e^{-\psi\omega_n t}\cos(\omega t)$, trong đó $\omega_n = \sqrt{C_s m_{cs}}$ là tần số dao động riêng không có cản giảm chấn, $\omega = \sqrt{1-\psi^2}\omega_n$ là tần số dao động riêng có cản. Biên độ A_1 và A_2 được xác định tương ứng tại thời gian $t = 0$ và $t = T = \frac{2\pi}{\omega}$, với T là chu kỳ dao động. Trên cơ sở đó, xác định được mối quan hệ giữ hệ số logarit suy giảm δ và hệ số dập tắt dao động ψ

$$\delta = \frac{2\pi\psi}{\sqrt{1-\psi^2}} \approx 2\pi\psi \tag{3.17}$$

Hệ số cản giảm chấn tương đương của hệ thống treo sau được xác định theo:

$$K_s = 2\psi\sqrt{C_s m_{cs}} = \frac{\delta}{\pi}\sqrt{C_s m_{cs}}. \tag{3.18}$$

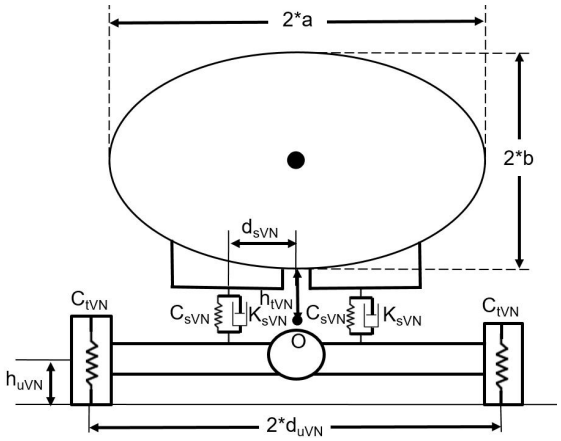
Với $C_s = 585706{,}4\,\text{N/m}$, $m_{cs} = 9670\,\text{kg}$ và $\delta = 0{,}5192$, thu được:

$$K_s = 12378\,\text{N s/m}. \tag{3.19}$$

Các giá trị $C_s = 585706{,}4\,\text{N/m}$ và $K_s = 12378\,\text{N s/m}$ được xác định từ dữ liệu đo và được giữ cố định trong bài toán nhận dạng tham số. Hai tham số được hiệu chỉnh ở Mục 3.3 là mô men quán tính lắc ngang tương đương $I_{s,\text{id}}$ của phần khối lượng được treo khi xe không tải và tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng ζ_{id}.

3.2.4. Thông số hình học và tham số quán tính ban đầu

Các thông số hình học được xác định gồm kích thước xi téc, vệt bánh xe, khoảng cách đặt hệ thống treo, chiều dài cơ sở, chiều dài xi téc và vị trí tâm lắc tương đối giữa khối lượng được treo với khối lượng không được treo. Do kết cấu xe và hệ thống treo đối xứng qua mặt phẳng dọc giữa xe, tâm lắc được xác định trong mặt phẳng đối xứng dọc. Các kích thước đo và vị trí tâm lắc O được trình bày trên Hình 3.11.



Hình 3.11: *Các thông số kích thước được đo đạc trên ô tô xi téc*

Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng không được treo được xác định theo kích thước lốp:

$$h_u = 0{,}0254\lambda_{bx}\left(\frac{d_{bx}}{2} + B_{bx}\right), \tag{3.20}$$

trong đó d_{bx} là đường kính vành lốp, B_{bx} là bề rộng lốp và λ_{bx} là hệ số biến dạng lốp. Với ô tô thí nghiệm sử dụng lốp 7.50–16, giá trị thu được là:

$$h_u = 0{,}37335\,\mathrm{m}. \tag{3.21}$$

Mô men quán tính lắc ngang sơ bộ của phần khối lượng được treo khi không tải đối với tâm lắc được ước lượng với giả thiết đơn giản hóa, trong đó phần khối lượng được treo được quy đổi gần đúng thành khối hộp chữ nhật có kích thước đặc trưng $2a \times 2b$:

$$I_{s,0} \approx \frac{m_s}{12}\left[(2a)^2 + (2b)^2\right] + m_s h_{s0}^2. \tag{3.22}$$

Với giả thiết khối lượng không được treo tập trung tại trọng tâm, mô men quán tính khối lượng không được treo được xác định gần đúng:

$$I_u \approx m_u h_u^2. \tag{3.23}$$

Từ các thông số đo được, giá trị gần đúng (tính toán sơ bộ) của mô men quán tính lắc ngang khối lượng được treo khi không tải là:

$$I_{s,0} \approx 2138{,}809\,\mathrm{kg\,m^2}, \tag{3.24}$$

và mô men quán tính của khối lượng không được treo là:

$$I_u \approx 104{,}5427\,\mathrm{kg\,m^2}. \tag{3.25}$$

Để tính khối lượng và thể tích chất lỏng quy đổi cho cầu sau, xi téc được giả thiết có tiết diện không đổi theo chiều dài và chất lỏng phân bố đều dọc theo xi téc. Khi đó, phần thể tích và khối lượng chất lỏng phân bổ cho cầu sau được xác định theo tỷ lệ tải trọng dọc của trọng tâm xi téc đối với hai cầu xe.

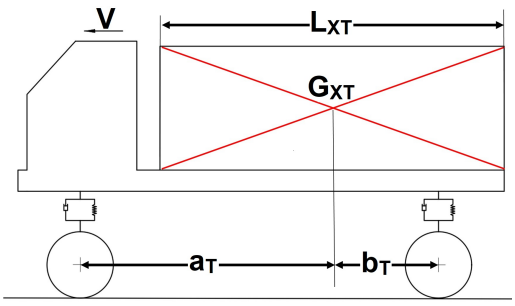
Gọi L_{XT} là chiều dài xi téc, L_{Xe} là chiều dài cơ sở của xe, a_T là khoảng cách từ trọng tâm xi téc G_{XT} đến cầu trước và b_T là khoảng cách từ G_{XT} đến cầu sau. Từ quan hệ đòn bẩy theo phương dọc, tỷ lệ tải trọng của xi téc phân bổ lên cầu sau bằng a_T/L_{Xe}. Do đó, chiều dài xi téc tương đương phân bổ cho cầu sau được xác định:

$$L_{CS} = \frac{a_T}{L_{Xe}} L_{XT} = \frac{(L_{Xe} - b_T) L_{XT}}{L_{Xe}} = 3{,}172\,\mathrm{m}. \tag{3.26}$$

Trên cơ sở đó, thể tích và khối lượng chất lỏng quy đổi cho cầu sau được xác định theo:

$$V_{l,CS} = \frac{L_{CS}}{L_{XT}} V_l = \frac{a_T}{L_{Xe}} V_l, \tag{3.27}$$

$$m_{l,CS} = \rho_l V_{l,CS} = \frac{a_T}{L_{Xe}} m_l. \tag{3.28}$$



Hình 3.12: *Kích thước xi téc dùng để quy đổi cho cầu sau*

Các thông số đầu vào sử dụng cho mô hình E2 được tổng hợp trong Bảng 3.7. Trong đó, $I_{s,0}$ và ζ_0 là giá trị ban đầu trước nhận dạng; giá trị sau nhận dạng được trình bày ở Mục 3.3. Bảng này được sử dụng để trình bày các thông số chính phục vụ xác định, nhận dạng và đánh giá mô hình ở Chương 3; bộ thông số dùng để tái

lập các mô phỏng khảo sát ở Chương 4 được tập hợp lại trong Phụ lục C.1.

Bảng 3.7: *Thông số kỹ thuật của ô tô xi téc thí nghiệm sử dụng trong mô hình E2*

STT	Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
	Các thông số đo đạc hoặc xác định từ thực nghiệm			
1	Đường kính trục ngang của xi téc	$2a$	m	2,04
2	Đường kính trục đứng của xi téc	$2b$	m	1,42
3	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm m_s khi không tải	h_{s0}	m	0,86
4	Chiều rộng vết bánh xe	$2d_u$	m	1,495
5	Khoảng cách đặt hệ thống treo hai bên	$2d_s$	m	0,974
6	Chiều dài cơ sở của xe	L_{Xe}	m	3,735
7	Chiều dài xi téc	L_{XT}	m	4,02
8	Khoảng cách từ G_{XT} đến cầu sau	b_T	m	0,788
9	Chiều dài xi téc tương đương phân bổ cho cầu sau	L_{CS}	m	3,172
10	Độ cứng tương đương của hệ thống treo sau	C_s	N/m	585706,4
11	Hệ số cản giảm chấn tương đương	K_s	N s/m	12378
12	Độ cứng hướng kính của lốp	C_t	N/m	940823
13	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng không được treo	h_u	m	0,37335
	Các thông số tính toán sơ bộ			
14	Khối lượng được treo khi không tải	m_s	kg	1705
15	Khối lượng không được treo	m_u	kg	750
16	Mô men quán tính khối lượng không được treo	I_u	kg m^2	104,5427
	Các thông số lựa chọn trước nhận dạng			
17	Mô men quán tính lắc ngang ban đầu của khối lượng được treo khi không tải	$I_{s,0}$	kg m^2	2138,809
18	Tỷ số cản ban đầu của dao động tương đối chất lỏng	ζ_0	–	0,50

3.3. Nhận dạng tham số động lực học của mô hình E2

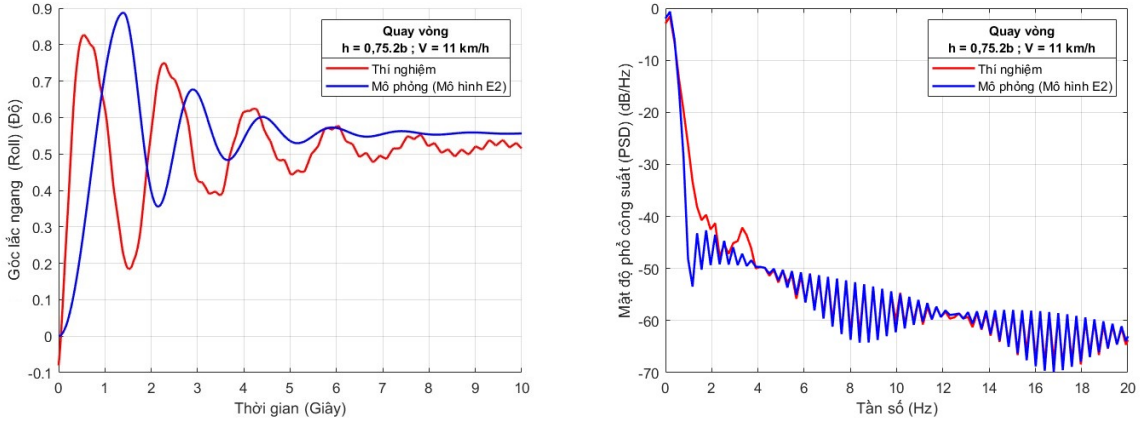
Một số tham số của mô hình E2 đã được xác định từ đo đạc trực tiếp, cân đo thực nghiệm hoặc tính toán theo thông số hình học và kết cấu của xe. Tuy nhiên, mô men quán tính lắc ngang tương đương của phần khối lượng được treo khi xe không tải $I_{s,\mathrm{id}}$ và tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng ζ_{id} là các tham số khó xác định trực tiếp với độ tin cậy cần thiết.

Vì vậy, hai tham số này được nhận dạng trên cơ sở đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe giữa mô phỏng và thí nghiệm. Các tham số đã xác định từ thực nghiệm, gồm $C_s = 585706{,}4\,\mathrm{N/m}$ và $K_s = 12378\,\mathrm{N\,s/m}$, được giữ cố định trong quá trình nhận dạng.

3.3.1. Đối sánh sơ bộ giữa mô phỏng và thí nghiệm

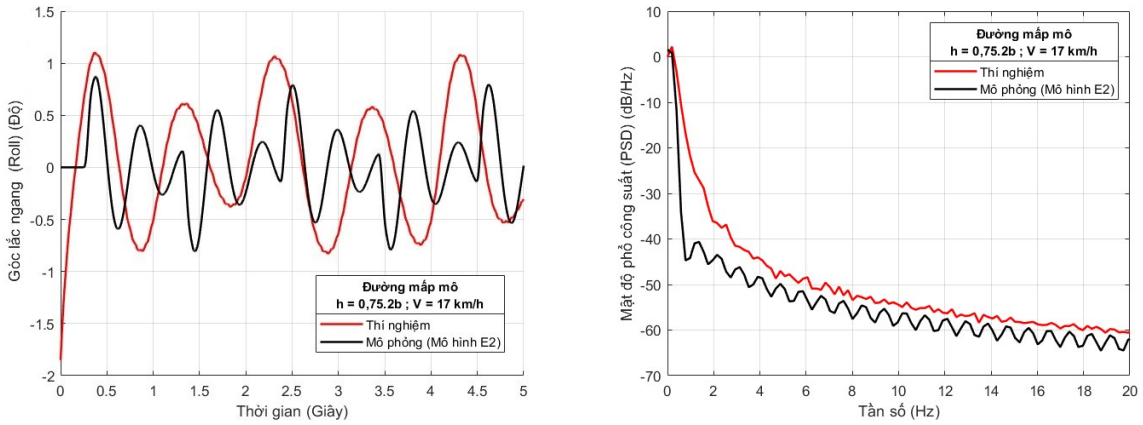
Để đánh giá mức độ phù hợp ban đầu của mô hình E2, đáp ứng mô phỏng được đối sánh với dữ liệu thí nghiệm tại mức $\lambda_h = 0{,}75$. Đây là mức chất tải một phần, tại đó dao động tương đối của chất lỏng thể hiện rõ trong đáp ứng lắc ngang của xe. Hai chế độ thí nghiệm được xét gồm quay vòng ổn định và chuyển động thẳng qua mấp mô.

Đáp ứng góc lắc ngang thân xe trong miền thời gian và đặc tính phổ trong miền tần số được trình bày trên Hình 3.13 và Hình 3.14. Trong các hình này, phổ mật độ công suất PSD được sử dụng để thể hiện sự phân bố năng lượng dao động của tín hiệu góc lắc ngang theo tần số, qua đó có thể đánh giá về vùng tần số chi phối của đáp ứng. Khái niệm PSD, cách xác định PSD từ dữ liệu thí nghiệm và miền tần số dùng để tính sai lệch PSD được trình bày chi tiết trong Mục 3.4. Các chỉ tiêu định lượng CC, NRMSE và $\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$ được trình bày cùng kết quả sau nhận dạng tại Mục 3.4.



Hình 3.13: *Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm khi ô tô xi téc quay vòng ổn định,* $v = 11\,\mathrm{km/h}$, $R = 39\,\mathrm{m}$

Kết quả đối sánh sơ bộ cho thấy mô hình với bộ tham số ban đầu đã mô tả được xu hướng biến thiên và vùng tần số chi phối của góc lắc ngang thân xe. Tuy nhiên, sai khác về biên độ và pha vẫn còn đáng kể. Do đó, bước nhận dạng tham số được thực hiện nhằm hiệu chỉnh $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}, trước khi sử dụng mô hình E2 cho các đánh giá tiếp theo.



Hình 3.14: *Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm khi ô tô xi téc chuyển động qua mấp mô,* $v = 17\,\mathrm{km/h}$

3.3.2. Cơ sở và quy trình nhận dạng tham số bằng thuật toán di truyền

Hai tham số nhận dạng được viết dưới dạng:

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} I_{s,\mathrm{id}} & \zeta_{\mathrm{id}} \end{bmatrix}^T, \tag{3.29}$$

trong đó $I_{s,\mathrm{id}}$ là mô men quán tính lắc ngang tương đương cần nhận dạng của phần khối lượng được treo khi xe không tải, $\mathrm{kg\,m^2}$; ζ_{id} là tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng cần nhận dạng. Ký hiệu $I_{s,0}$ được dùng riêng cho giá trị ban đầu của mô men quán tính lắc ngang trước khi nhận dạng.

Miền tìm kiếm của các tham số được xác định:

$$\Omega = \left\{ \boldsymbol{\theta} \;\middle|\; \begin{array}{l} 800 \le I_{s,\mathrm{id}} \le 4000\ \mathrm{kg\,m^2}, \\ 0{,}001 \le \zeta_{\mathrm{id}} \le 0{,}80 \end{array} \right\}. \tag{3.30}$$

Giá trị ban đầu dùng trong nhận dạng là:

$$I_{s,0} = 2138{,}809\ \mathrm{kg\,m^2}, \qquad \zeta_0 = 0{,}50. \tag{3.31}$$

Tín hiệu dùng trong hàm mục tiêu là góc lắc ngang thân xe $\psi_s(t)$. Bài toán nhận dạng được phát biểu dưới dạng cực tiểu hóa sai khác giữa đáp ứng thí nghiệm và đáp ứng mô phỏng:

$$\min_{\boldsymbol{\theta}\in\Omega} J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{r\in\mathcal{D}} \sum_{k=1}^{N_r} \left[\psi_{s,\mathrm{exp}}^{(r)}(t_k) - \psi_{s,\mathrm{sim}}^{(r)}(t_k, \boldsymbol{\theta}) \right]^2, \tag{3.32}$$

trong đó $\mathcal{D}$ là tập dữ liệu thí nghiệm sử dụng để nhận dạng; r là chỉ số ca thí nghiệm; N_r là số mẫu của ca thí nghiệm thứ r; $\psi^{(r)}_{s,\mathrm{exp}}(t_k)$ và $\psi^{(r)}_{s,\mathrm{sim}}(t_k, \boldsymbol{\theta})$ lần lượt là góc lắc ngang thân xe thu được từ thí nghiệm và mô phỏng tại thời điểm t_k.

Do $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id} có miền giá trị khác nhau, hai tham số được chuẩn hóa về miền $[0, 1]$:

$$u_1 = \frac{I_{s,\mathrm{id}} - I_{s,\mathrm{id,min}}}{I_{s,\mathrm{id,max}} - I_{s,\mathrm{id,min}}}, \qquad u_2 = \frac{\zeta_{\mathrm{id}} - \zeta_{\mathrm{id,min}}}{\zeta_{\mathrm{id,max}} - \zeta_{\mathrm{id,min}}}, \tag{3.33}$$

với:

$$I_{s,\mathrm{id,min}} = 800\ \mathrm{kg\,m^2}, \qquad I_{s,\mathrm{id,max}} = 4000\ \mathrm{kg\,m^2},$$

$$\zeta_{\mathrm{id,min}} = 0{,}001, \qquad \zeta_{\mathrm{id,max}} = 0{,}80.$$

Sau khi thuật toán kết thúc, các biến chuẩn hóa được quy đổi về tham số vật lý:

$$I_{s,\mathrm{id}} = I_{s,\mathrm{id,min}} + u_1 \left(I_{s,\mathrm{id,max}} - I_{s,\mathrm{id,min}}\right), \qquad \zeta_{\mathrm{id}} = \zeta_{\mathrm{id,min}} + u_2 \left(\zeta_{\mathrm{id,max}} - \zeta_{\mathrm{id,min}}\right). \tag{3.34}$$

Thuật toán di truyền được sử dụng để tìm kiếm nghiệm trong miền tham số, sau đó nghiệm tốt nhất được hiệu chỉnh cục bộ bằng `fmincon`. Cấu hình thuật toán được trình bày trong Bảng 3.8.

Quy trình nhận dạng gồm bốn bước chính: chuẩn bị và đồng bộ dữ liệu thí nghiệm; thiết lập miền tìm kiếm và chuẩn hóa tham số; mô phỏng mô hình E2 với từng cá thể $\boldsymbol{\theta} = [I_{s,\mathrm{id}}, \zeta_{\mathrm{id}}]^T$; tính hàm mục tiêu và thực hiện các phép chọn lọc, lai ghép, đột biến cho đến khi đạt điều kiện dừng. Các trường hợp mô phỏng không hội tụ hoặc cho kết quả không có ý nghĩa vật lý được gán giá trị phạt lớn trong hàm mục tiêu.

Thuật toán 3.1 cho thấy quá trình nhận dạng được thực hiện bằng cách cực tiểu hóa sai khác giữa đáp ứng góc lắc ngang thân xe thu được từ thí nghiệm và mô phỏng. Nghiệm tốt nhất của GA được tiếp tục hiệu chỉnh cục bộ bằng `fmincon` nhằm cải thiện độ chính xác của bộ tham số nhận dạng.

Kết quả nhận dạng cho $I^*_{s,\mathrm{id}} = 1261{,}019\,\mathrm{kg\,m^2}$ và $\zeta^*_{\mathrm{id}} = 0{,}02973$. So với giá trị sơ

Bảng 3.8: *Cấu hình thuật toán GA sử dụng trong nhận dạng tham số*

Thông số	**Giá trị lựa chọn**	**Ý nghĩa**
Số biến nhận dạng	2	$I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}
Kích thước quần thể	40	Số cá thể trong mỗi thế hệ
Số thế hệ tối đa	80	Giới hạn số vòng lặp của thuật toán
Số cá thể ưu tú	2	Số nghiệm tốt nhất được chuyển sang thế hệ sau
Tỷ lệ lai ghép	0,80	Tỷ lệ cá thể mới được tạo bởi phép lai ghép
Hàm chọn lọc	`selectionstochunif`	Chọn lọc ngẫu nhiên đều theo bước
Hàm đột biến	`mutationadaptfeasible`	Đột biến thích nghi trong miền ràng buộc
Số thế hệ không cải thiện tối đa	20	Điều kiện dừng khi hàm mục tiêu không tiếp tục cải thiện
Dung sai hàm mục tiêu	10^{-6}	Ngưỡng kiểm tra mức cải thiện của nghiệm
Số lần chạy độc lập	10	Giảm ảnh hưởng của quần thể khởi tạo ngẫu nhiên
Thuật toán hiệu chỉnh cục bộ	`fmincon`	Tinh chỉnh nghiệm tốt nhất sau khi GA kết thúc

bộ $I_{s,0} = 2138{,}809\,\mathrm{kg\,m^2}$, giá trị $I^*_{s,\mathrm{id}}$ giảm khoảng 41%. Sự khác biệt này trước hết xuất phát từ giả thiết quy đổi khi xác định $I_{s,0}$, trong đó phần khối lượng được treo khi xe không tải được coi tương đương như một khối hộp chữ nhật có hai kích thước đặc trưng bằng đường kính trục lớn và trục nhỏ của tiết diện ê-líp xi téc.

Trong thực tế, khi xi téc không chứa chất lỏng, khối lượng được treo gồm cabin, khung xe, vỏ xi téc rỗng, giá đỡ và các cụm phụ trợ; các khối lượng này không phân bố đều trong toàn bộ khối hộp bao hình học nêu trên. Vì vậy, $I_{s,0}$ chỉ được xem là giá trị ước lượng sơ bộ phục vụ khởi tạo và xác định miền tìm kiếm cho bài toán nhận dạng.

Do đó, $I^*_{s,\mathrm{id}}$ không được hiểu là giá trị đo trực tiếp của mô men quán tính hình học của toàn bộ phần khối lượng được treo, mà là tham số quán tính lắc ngang tương đương của mô hình phẳng E2, được hiệu chỉnh theo đáp ứng lắc ngang đo được của xe thực. Trong các mô phỏng khảo sát tiếp theo, tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng được làm tròn thành $\zeta = \zeta^*_{\mathrm{id}} \approx 0{,}03$.

Thuật toán 3.1 Thuật toán nhận dạng tham số mô hình E2 bằng giải thuật di truyền

Đầu vào: Tập dữ liệu thí nghiệm $\mathcal{D}$; miền tìm kiếm Ω của hai tham số $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id}; các tham số đã xác định từ thực nghiệm gồm C_s, K_s, C_t và các thông số hình học của xe.
Đầu ra: Bộ tham số nhận dạng $\boldsymbol{\theta}^* = [I^*_{s,\mathrm{id}}, \zeta^*_{\mathrm{id}}]^T$.

Khởi tạo: thiết lập véc tơ tham số cần nhận dạng $\boldsymbol{\theta} = [I_{s,\mathrm{id}}, \zeta_{\mathrm{id}}]^T$.
Chuẩn hóa các tham số $I_{s,\mathrm{id}}$ và ζ_{id} về miền $[0, 1]$ theo công thức (3.33).
Khởi tạo quần thể ban đầu gồm N_p cá thể trong miền ràng buộc Ω.
for mỗi thế hệ $g = 1, 2, \ldots, G_{\max}$ **do**
    for mỗi cá thể $j = 1, 2, \ldots, N_p$ **do**
        Giải mã cá thể thứ j thành bộ tham số vật lý $\boldsymbol{\theta}_j = [I_{s,\mathrm{id},j}, \zeta_{\mathrm{id},j}]^T$.
        Mô phỏng mô hình E2 với bộ tham số $\boldsymbol{\theta}_j$ và cùng điều kiện kích thích như thí nghiệm.
        Tính hàm mục tiêu $J(\boldsymbol{\theta}_j)$ theo công thức (3.32).
    end for
    Lựa chọn các cá thể tốt theo giá trị hàm mục tiêu J.
    Tạo thế hệ mới bằng chọn lọc, lai ghép, đột biến và bảo toàn cá thể ưu tú.
    if đạt điều kiện dừng **then**
        Dừng vòng lặp tiến hóa.
    end if
end for
Lấy cá thể tốt nhất của GA làm nghiệm ban đầu cho bước hiệu chỉnh cục bộ.
Hiệu chỉnh nghiệm bằng `fmincon` trong miền ràng buộc Ω.
Quy đổi nghiệm tối ưu từ biến chuẩn hóa về tham số vật lý theo công thức (3.34).
Kết quả: $\boldsymbol{\theta}^* = [I^*_{s,\mathrm{id}}, \zeta^*_{\mathrm{id}}]^T$.

3.4. Đánh giá mức độ phù hợp của mô hình sau nhận dạng

Mô hình được đánh giá trong mục này là mô hình E2 với bộ tham số sau nhận dạng. Đáp ứng mô phỏng được đối sánh với góc lắc ngang thân xe đo được trong hai chế độ thí nghiệm: chuyển động thẳng qua mấp mô và quay vòng ổn định. Các chỉ tiêu đánh giá gồm hệ số tương quan CC, sai lệch căn phương trung bình chuẩn hóa NRMSE và sai lệch mật độ phổ công suất $\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$.

3.4.1. Các tiêu chí đánh giá

Hệ số tương quan CC được sử dụng để đánh giá mức độ tương đồng về xu hướng biến thiên và pha giữa tín hiệu thí nghiệm và mô phỏng:

$$\mathrm{CC} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}}. \tag{3.35}$$

Trong đó, x_i và y_i lần lượt là giá trị góc lắc ngang thân xe xác định từ thí nghiệm và mô phỏng tại mẫu thứ i; $\bar{x}$, $\bar{y}$ là giá trị trung bình tương ứng; N là số mẫu trong miền đánh giá.

Sai lệch căn phương trung bình $RMSE$ và sai lệch căn phương trung bình chuẩn hóa NRMSE được xác định:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}, \qquad \text{NRMSE} = \frac{RMSE}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%. \tag{3.36}$$

Trong đó, $x_{\max}$ và $x_{\min}$ lần lượt là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của tín hiệu thí nghiệm trong miền đánh giá.

Mật độ phổ công suất (Power Spectral Density – PSD) được sử dụng để mô tả sự phân bố năng lượng dao động của tín hiệu theo tần số. Đối với tín hiệu góc lắc ngang thân xe, PSD cho biết các thành phần tần số chiếm ưu thế trong đáp ứng dao động và cho phép đánh giá khả năng mô hình tái hiện đặc trưng dao động của xe trong miền tần số. Vì vậy, chỉ tiêu sai lệch PSD được sử dụng bổ sung cho các chỉ tiêu trong miền thời gian như CC và NRMSE.

Trong luận án, PSD được xác định từ tín hiệu góc lắc ngang thân xe sau khi dữ liệu thí nghiệm và mô phỏng đã được đồng bộ theo thời gian, đưa về cùng tần số lấy mẫu, loại bỏ giá trị trung bình và lấy trên cùng khoảng thời gian khảo sát. Với tín hiệu rời rạc $x[n]$, $n = 0, 1, \ldots, N-1$, được lấy mẫu với tần số f_s, mật độ phổ công suất có thể được xác định từ biến đổi Fourier rời rạc:

$$\text{PSD}(f_k) = \frac{1}{N f_s}\left|\sum_{n=0}^{N-1} x[n]\exp\left(-j2\pi\frac{kn}{N}\right)\right|^2, \qquad f_k = \frac{k f_s}{N}. \tag{3.37}$$

Đối với phổ một phía, miền tần số hợp lệ bị giới hạn bởi tần số Nyquist $f_N = f_s/2$. Trong nghiên cứu này, dữ liệu được lấy mẫu với tần số $f_s = 40\,\text{Hz}$, do đó tần số Nyquist là:

$$f_N = \frac{f_s}{2} = 20\,\text{Hz}. \tag{3.38}$$

Vì vậy, phổ một phía của tín hiệu có thể được biểu diễn trong miền $0 \le f \le 20\,\text{Hz}$. Tuy nhiên, miền tần số dùng để tính sai lệch PSD không mặc định lấy toàn bộ miền Nyquist, mà được giới hạn trong dải tần chứa năng lượng đáng kể của đáp

ứng lắc ngang và phù hợp với phạm vi mô tả của mô hình. Các thành phần tần số cao chủ yếu chứa nhiễu đo, dao động cục bộ hoặc thành phần không thuộc phạm vi mô hình động lực học lắc ngang không được đưa vào miền đánh giá.

Gọi $[f_{\min}, f_{\max}]$ là dải tần được lựa chọn để đánh giá sai lệch PSD, trong đó:

$$0 \leq f_{\min} < f_{\max} \leq f_N = 20\,\text{Hz}. \tag{3.39}$$

Gọi $\mathcal{K}_f$ là tập các điểm tần số rời rạc thuộc dải tần $[f_{\min}, f_{\max}]$, sai lệch PSD được xác định:

$$\varepsilon_{\text{PSD}} = \frac{\sum_{k\in\mathcal{K}_f} |\text{PSD}_{\text{exp}}(f_k) - \text{PSD}_{\text{sim}}(f_k)|}{\sum_{k\in\mathcal{K}_f} \text{PSD}_{\text{exp}}(f_k)}. \tag{3.40}$$

Trong đó, $\text{PSD}_{\text{exp}}(f_k)$ và $\text{PSD}_{\text{sim}}(f_k)$ lần lượt là mật độ phổ công suất của tín hiệu thí nghiệm và mô phỏng tại tần số f_k. Chỉ tiêu ε_{PSD} càng nhỏ thì khả năng mô hình tái hiện phân bố năng lượng dao động của tín hiệu thí nghiệm trong dải tần khảo sát càng tốt.

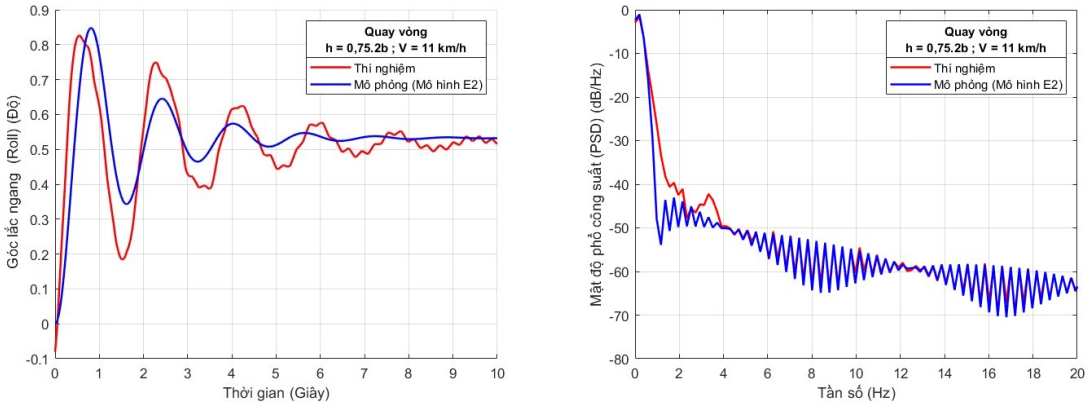
3.4.2. Đáp ứng đại diện sau nhận dạng

Trường hợp $\lambda_h = 0{,}75$, tương ứng $h_l = 0{,}75(2b)$, được sử dụng làm trường hợp đại diện để trình bày đáp ứng theo thời gian và mật độ phổ công suất. Phổ mật độ công suất trong Hình 3.15 được biểu diễn trong miền tần số hợp lệ của dữ liệu đo, với tần số Nyquist $f_N = 20\,\text{Hz}$; việc đánh giá định lượng sai lệch PSD được thực hiện trên dải tần được lựa chọn theo tiêu chí trình bày ở Mục 3.4. Các mức chất lỏng còn lại được tổng hợp định lượng trong Bảng 3.9 và Bảng 3.10; các đồ thị đối sánh bổ sung được trình bày trong Phụ lục B.

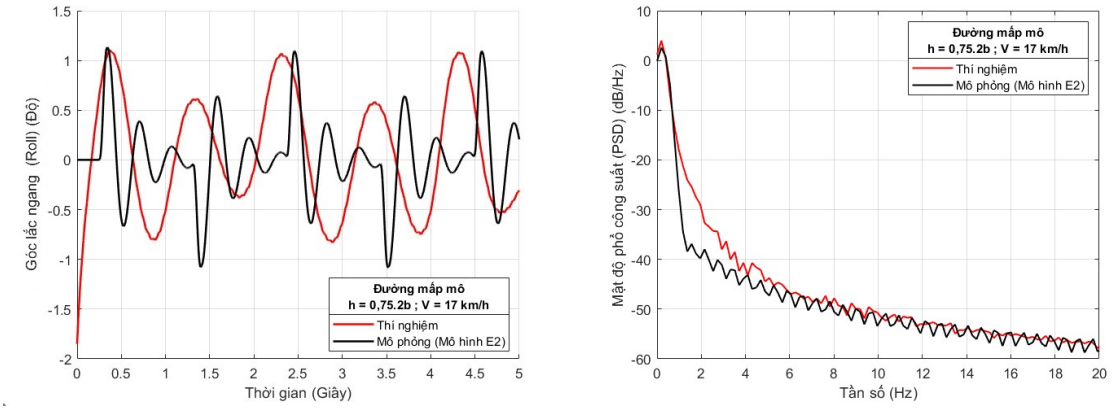
Hình 3.15 cho thấy mô hình sau nhận dạng tái hiện được xu hướng biến thiên và vùng tần số chi phối của góc lắc ngang thân xe trong hai chế độ thử. Mức độ phù hợp định lượng được đánh giá bằng các chỉ tiêu CC, NRMSE và ε_{PSD} trong các bảng dưới đây.

3.4.3. Kết quả đối sánh khi chuyển động thẳng qua mấp mô

Kết quả đối sánh trước và sau nhận dạng khi ô tô chuyển động thẳng qua mấp mô được trình bày trong Bảng 3.9. Chế độ này tạo kích thích thẳng đứng từ mặt



(a) Quay vòng ổn định, $v = 11\,\text{km/h}$, $R = 39\,\text{m}$



(b) Chuyển động thẳng qua mấp mô, $v = 17\,\text{km/h}$

Hình 3.15: *Đối sánh đáp ứng góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất giữa mô phỏng và thí nghiệm sau khi nhận dạng tham số*

đường, đồng thời gây dao động lắc ngang do đáp ứng hai bên bánh xe không hoàn toàn đồng pha. Sau nhận dạng, CC tăng tại cả năm mức chất lỏng; đồng thời NRMSE và ε_{PSD} đều giảm. Kết quả này cho thấy bộ tham số sau nhận dạng cải thiện đồng thời xu hướng biến thiên, sai khác biên độ và đặc tính phổ của đáp ứng lắc ngang khi xe chuyển động qua mấp mô.

3.4.4. Kết quả đối sánh khi quay vòng ổn định

Kết quả đối sánh trước và sau nhận dạng khi ô tô quay vòng ổn định được trình bày trong Bảng 3.10. Trong chế độ này, kích thích chính là gia tốc ngang gần ổn định, làm phát sinh mô men lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc.

Trong trường hợp quay vòng ổn định, CC tăng tại cả năm mức chất lỏng, trong

Bảng 3.9: *Đối sánh mô hình với thực nghiệm trước và sau nhận dạng khi ô tô chuyển động thẳng qua mấp mô*

λ_h	Trạng thái	v	CC	NRMSE	$\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$
		km/h	–	%	–
0,00	Tính sơ bộ	14	0,686	23,15	0,245
	Sau nhận dạng		0,712	20,07	0,172
0,25	Tính sơ bộ	16	0,634	27,68	0,277
	Sau nhận dạng		0,675	24,34	0,238
0,50	Tính sơ bộ	19	0,706	21,13	0,179
	Sau nhận dạng		0,729	18,95	0,159
0,75	Tính sơ bộ	17	0,655	25,64	0,267
	Sau nhận dạng		0,701	21,78	0,183
1,00	Tính sơ bộ	16	0,623	28,51	0,291
	Sau nhận dạng		0,697	22,81	0,221

Bảng 3.10: *Đối sánh mô hình với thực nghiệm trước và sau nhận dạng khi ô tô quay vòng ổn định*

λ_h	Trạng thái	v	CC	NRMSE	$\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$
		km/h	–	%	–
0,00	Tính sơ bộ	29	0,824	17,56	0,187
0,00	Sau nhận dạng	29	0,859	15,31	0,171
0,25	Tính sơ bộ	14	0,703	24,75	0,272
0,25	Sau nhận dạng	14	0,725	22,14	0,248
0,50	Tính sơ bộ	13	0,719	23,15	0,213
0,50	Sau nhận dạng	13	0,729	11,95	0,194
0,75	Tính sơ bộ	11	0,738	20,10	0,236
0,75	Sau nhận dạng	11	0,743	19,96	0,128
1,00	Tính sơ bộ	13	0,723	22,83	0,141
1,00	Sau nhận dạng	13	0,761	19,07	0,127

khi NRMSE và $\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$ đều giảm. Mức cải thiện rõ nhất của NRMSE xuất hiện tại $\lambda_h = 0{,}50$, giảm từ 23,15% xuống 11,95%. Kết quả này cho thấy bộ tham số sau nhận dạng cải thiện mức độ phù hợp tổng thể của mô hình trong chế độ quay vòng ổn định.

3.4.5. Nhận xét

Kết quả đối sánh trong hai chế độ thí nghiệm cho thấy bộ tham số sau nhận dạng cải thiện khả năng mô tả đáp ứng góc lắc ngang thân xe tại các mức chất lỏng khảo sát. Mô hình E2 sau nhận dạng tái hiện được xu hướng chính, biên độ

tương đối và vùng tần số chi phối của đáp ứng $\psi_s(t)$.

Các kết quả trên chủ yếu xác nhận mức độ phù hợp của mô hình đối với đáp ứng góc lắc ngang thân xe. Các đại lượng không đo trực tiếp trong thí nghiệm như phản lực pháp tuyến, LTR và diễn biến sau nhấc bánh sẽ được đánh giá bằng mô phỏng trong phạm vi giả thiết của mô hình ở Chương 4.

3.5. Kết luận chương

Chương này đã trình bày quá trình thí nghiệm, xác định tham số đầu vào, nhận dạng tham số và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình E2 đối với ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước, sử dụng xi téc tiết diện hình ê-líp. Hai chế độ thí nghiệm được sử dụng gồm quay vòng ổn định và chuyển động thẳng qua mấp mô, với các mức chất tải khác nhau.

Từ dữ liệu thí nghiệm, các tham số chính của mô hình đã được xác định, gồm khối lượng và phân bố tải trọng, tọa độ trọng tâm, độ cứng lốp, độ cứng hệ thống treo, hệ số cản giảm chấn và các thông số hình học của xe–xi téc. Các giá trị $C_s = 585706{,}4\,\mathrm{N/m}$, $K_s = 12378\,\mathrm{N\,s/m}$ và $C_t = 940823\,\mathrm{N/m}$ được sử dụng làm tham số cố định trong quá trình nhận dạng.

Đối với các tham số khó xác định trực tiếp, luận án đã nhận dạng mô men quán tính lắc ngang tương đương của phần khối lượng được treo khi xe không tải và tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng. Kết quả nhận dạng thu được:

$$I^*_{s,\mathrm{id}} = 1261{,}019\,\mathrm{kg\,m^2}, \qquad \zeta^*_{\mathrm{id}} = 0{,}02973.$$

Trong các mô phỏng tiếp theo, tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng được lấy $\zeta = \zeta^*_{\mathrm{id}} \approx 0{,}03$.

Bộ tham số nhận dạng gồm $I^*_{s,\mathrm{id}}$, đặc trưng cho mô men quán tính lắc ngang của phần khối lượng được treo khi xe không tải, và ζ^*_{id}, biểu thị tỷ số cản tương đương của dao động chất lỏng. Bộ tham số này được nhận dạng tại mức chất tải $\lambda_h = 0{,}75$ và sử dụng thống nhất cho các mức chất tải khảo sát. Kết quả đối sánh với dữ liệu thực nghiệm tại Bảng 3.9 và Bảng 3.10 cho thấy mức độ phù hợp giữa thí nghiệm và mô phỏng có sự sai lệch nhưng vẫn chấp nhận được, chứng tỏ khả năng áp dụng bộ tham số trong phạm vi nghiên cứu. Tuy nhiên, do giới hạn về dữ

liệu thực nghiệm, nghiên cứu sử dụng bộ tham số nhận dạng thống nhất thay vì nhận dạng riêng cho từng mức chất tải. Đây là một giả thiết của mô hình và cũng là giới hạn cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo.

Kết quả đối sánh cho thấy mô hình E2 sau nhận dạng tái hiện được xu hướng biến thiên, biên độ tương đối và đặc tính phổ chủ đạo của đáp ứng góc lắc ngang thân xe trong phạm vi thí nghiệm. Do đó, mô hình E2 sau nhận dạng có đủ cơ sở để sử dụng cho các khảo sát ổn định lật ngang động ở Chương 4. Các đại lượng không đo trực tiếp trong thí nghiệm như phản lực pháp tuyến, LTR và diễn biến sau nhấc bánh sẽ được đánh giá bằng mô phỏng trong phạm vi giả thiết của mô hình.

CHƯƠNG 4. KHẢO SÁT VÀ ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH LẬT NGANG ĐỘNG CỦA Ô TÔ XI TÉC CHỞ CHẤT LỎNG

4.1. Mục tiêu và phạm vi khảo sát

Chương này sử dụng mô hình E2 đã xây dựng ở Chương 2 và đã nhận dạng tham số ở Chương 3 để khảo sát ổn định lật ngang động của ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016. Mục tiêu chính là làm rõ ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang, phản lực pháp tuyến, hệ số chuyển tải trọng ngang và các ngưỡng mất ổn định của hệ xe–chất lỏng.

Nội dung khảo sát được triển khai theo ba bước. Trước hết, chương thiết lập các mức chất tải, kịch bản vận hành, điều kiện mặt đường và chỉ tiêu đánh giá. Tiếp theo, ảnh hưởng riêng của dao động tương đối chất lỏng được phân tích thông qua đối sánh giữa mô hình E2 đầy đủ và mô hình chất lỏng quy đổi cứng. Cuối cùng, ổn định lật ngang được khảo sát trong bốn kịch bản: J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S; từ đó tổng hợp ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định.

Các chỉ tiêu chính gồm góc lắc ngang của khối lượng được treo $\psi_s(t)$, dao động tương đối của chất lỏng $\alpha(t)$, phản lực pháp tuyến $F_{zL}(t)$, $F_{zR}(t)$, hệ số chuyển tải trọng ngang $\mathrm{LTR}(t)$, giá trị $\mathrm{LTR}_{\max}$, phản lực nhỏ nhất $F_{z,\min}$, cấp đánh giá RI, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

Các quỹ đạo và gia tốc ngang trong chương này được xem là đầu vào đã biết. Mô hình không mô tả chi tiết động lực học quay vòng trong mặt phẳng đường, đặc tính lực ngang lốp và giới hạn bám lốp–mặt đường. Vì vậy, các ngưỡng vận tốc thu được là ngưỡng ổn định lật có điều kiện, với giả thiết xe bám theo quỹ đạo đặt mà chưa xảy ra bão hòa lực ngang hoặc trượt ngang.

Đối sánh thực nghiệm ở Chương 3 chủ yếu đánh giá đáp ứng góc lắc ngang trong miền chưa xảy ra nhấc bánh. Phản lực pháp tuyến, thời điểm khởi phát nhấc

bánh và diễn biến sau nhấc bánh chưa được đo trực tiếp. Do đó, các kết quả $F_{z,\min}$, v_{lift}, v_{nr} và trạng thái không phục hồi trong chương này được hiểu là dự báo mô phỏng trong phạm vi các giả thiết của mô hình.

4.2. Thiết lập mô phỏng khảo sát

4.2.1. Mô hình và bộ tham số sử dụng

Mô hình sử dụng khảo sát là mô hình xét đồng thời dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang của khối lượng được treo và khối lượng không được treo, dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc và phản lực pháp tuyến tại hai bên bánh xe. Bộ tham số hình học, khối lượng, đặc tính hệ treo, lốp và các tham số động lực học được lấy theo kết quả đã xác định và nhận dạng ở Chương 3. Trong bộ tham số này, mô men quán tính lắc ngang của phần khối lượng được treo khi xe không tải được lấy theo giá trị sau nhận dạng $I_s = I^*_{s,\text{id}} = 1261{,}019\,\text{kg}\,\text{m}^2$.

Để đánh giá riêng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng, mỗi kịch bản khảo sát được thực hiện với hai cấu hình mô hình:

- Mô hình có dao động tương đối của chất lỏng, ký hiệu SL;

- Mô hình chất lỏng quy đổi cứng, ký hiệu RG.

Trong mô hình chất lỏng quy đổi cứng, tổng khối lượng chất lỏng và vị trí trọng tâm tĩnh của chất lỏng được giữ nguyên, nhưng bậc tự do dao động tương đối của chất lỏng bị loại bỏ. Khi đó, chất lỏng được xem như một phần khối lượng chuyển động cùng xi téc.

4.2.2. Các mức chất tải khảo sát

Các chương sử dụng cùng một tập giá trị danh định 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00, nhưng đại lượng mô tả mức chất lỏng không hoàn toàn giống nhau. Trong thí nghiệm ở Chương 3, $\lambda_h = h_l/(2b)$ là tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng; trong Chương 4, $h_p = m_l/m_{l,\max}$ là tỷ lệ khối lượng chất lỏng. Đối với tiết diện ê-líp, quan hệ $h_p \leftrightarrow \lambda_h$

là phi tuyến. Các mức tỷ lệ khối lượng sử dụng trong chương này là:

$$h_p = 0;\ 0{,}25;\ 0{,}50;\ 0{,}75;\ 1{,}00. \tag{4.1}$$

Trong đó $h_p = m_l/m_{l,\max}$ là tỷ lệ khối lượng chất lỏng, còn h_l là chiều cao mực chất lỏng tương ứng trong xi téc tiết diện hình ê-líp. Quan hệ $h_p \leftrightarrow h_l$ được xác định từ diện tích phần chất lỏng của tiết diện ê-líp và không phải là quan hệ tuyến tính. Các mức tải trung gian $h_p = 0{,}25$, $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$ được xem là các trạng thái quan trọng khi đánh giá dao động tương đối của chất lỏng, do tại các mức tải này mặt thoáng chất lỏng và chuyển động tương đối của chất lỏng thể hiện rõ hơn so với trạng thái không tải hoặc đầy tải.

Bảng 4.1: *Các mức chất tải sử dụng trong khảo sát ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016*

h_p	h_l (m)	λ_h	Ý nghĩa khảo sát
0,00	0,000	0,000	Không tải, không xét dao động tương đối của chất lỏng.
0,25	0,423	0,298	Mức tải thấp, dao động tương đối của chất lỏng bắt đầu thể hiện rõ.
0,50	0,710	0,500	Mức tải trung gian, được sử dụng làm trường hợp đại diện trong một số khảo sát đối sánh.
0,75	0,997	0,702	Mức tải cao, xét ảnh hưởng của khối lượng chất lỏng và vị trí trọng tâm chất lỏng đến ổn định lật ngang.
1,00	1,420	1,000	Đầy tải, chất lỏng gần như chuyển động cùng xi téc theo quy ước của mô hình.

4.2.3. Các kịch bản vận hành khảo sát

Các kịch bản vận hành được lựa chọn nhằm làm rõ cơ chế tương tác động lực học giữa thân xe và chất lỏng trong xi téc, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ngưỡng ổn định lật ngang. Trong Chương này, bốn kịch bản khảo sát được xét gồm: cua chữ J (J-turn), cua tay áo, chuyển làn kép (DLC–Double Lane Change) và cua chữ S.

Các kịch bản và miền tham số khảo sát không nhằm bao hàm toàn bộ điều kiện khai thác thực tế của ô tô xi téc, mà được lựa chọn để đại diện cho các dạng kích thích ngang đặc trưng trong phạm vi nghiên cứu. J-turn đại diện cho kích thích

ngang tăng nhanh một phía; cua tay áo đại diện cho chuyển động trên cung cong bán kính nhỏ; chuyển làn kép đại diện cho kích thích quá độ có đổi dấu gia tốc ngang; cua chữ S đại diện cho hai pha quay vòng ngược chiều và cho phép đánh giá thêm ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu. Dải vận tốc và các mức chất tải được chọn để quan sát quá trình chuyển tiếp từ vùng an toàn đến vùng tiệm cận hoặc khởi phát nhấc bánh.

Cua chữ J (J-turn) là thao tác xe đang chuyển động thẳng rồi đi vào một đoạn cong có bán kính xác định, làm cho quỹ đạo có dạng gần giống chữ J; dạng quỹ đạo này thường được sử dụng để khảo sát đáp ứng quá độ và nguy cơ mất ổn định ngang của xe khi đánh lái vào cua.

Cua tay áo là đoạn cua rất gấp, có góc đổi hướng lớn, thường gần 180°, khiến xe đổi hướng chuyển động gần như ngược lại so với hướng ban đầu.

Chuyển làn kép (DLC) là thao tác xe lần lượt chuyển từ làn đang chạy sang làn liền kề rồi trở về làn ban đầu trong một khoảng đường giới hạn, qua đó mô phỏng tình huống tránh chướng ngại vật và đánh giá khả năng ổn định khi đổi hướng liên tiếp. Trong luận án, kịch bản chuyển làn kép sử dụng quỹ đạo hình học tham khảo ISO 3888-1, không phải phép thử chứng nhận ISO cho xe tải.

Cua chữ S là quỹ đạo gồm hai đoạn cong liên tiếp theo hai chiều ngược nhau, làm cho gia tốc ngang và tải trọng tác dụng lên các bánh xe lần lượt đổi chiều.

Đối với kịch bản J-turn và chuyển làn kép, mặt đường được giả thiết phẳng, không xét kích động mấp mô và không xét góc nghiêng ngang mặt đường (siêu cao). Hai kịch bản này được sử dụng để đánh giá riêng ảnh hưởng của quy luật gia tốc ngang và dao động tương đối chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang của hệ xe–chất lỏng. Kịch bản J-turn được mô tả bằng gia tốc ngang chuẩn hóa tăng tuyến tính đến giá trị đặt trước, còn kịch bản chuyển làn kép được mô tả bằng quy luật gia tốc ngang đổi chiều trong một chu kỳ thao tác.

Đối với kịch bản cua tay áo và cua chữ S, ngoài trường hợp không xét siêu cao, luận án xét thêm trường hợp có siêu cao tại đoạn cua. Cách bố trí này cho phép đánh giá ảnh hưởng của hình học mặt đường, đặc biệt là góc nghiêng ngang tại đường cong, đến phản lực pháp tuyến, chỉ số LTR, cấp RI và điều kiện khởi phát nhấc bánh. Cua tay áo được dùng để khảo sát trạng thái quay vòng bán kính nhỏ,

còn cua chữ S được dùng để khảo sát trường hợp gia tốc ngang đổi dấu liên tiếp khi xe đi qua hai đoạn cong ngược chiều.

Ký hiệu s là quãng đường xe đi được, với $s = vt$ khi vận tốc được giữ không đổi. Để vẽ đáp ứng theo thời gian, luận án lựa chọn một bộ thông số điển hình cho từng kịch bản (Bảng 4.3). Bộ thông số này được sử dụng thống nhất khi so sánh đáp ứng của các mức chất tải $h_p = 0$; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00. Ngoài bộ thông số điển hình, các miền quét được sử dụng để xác định xu hướng ảnh hưởng của vận tốc, bán kính quay vòng và mức chất tải đến $LTR_{\max}$, cấp RI và điều kiện khởi phát nhấc bánh.

Bảng 4.2: *Các kịch bản vận hành sử dụng trong khảo sát ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016*

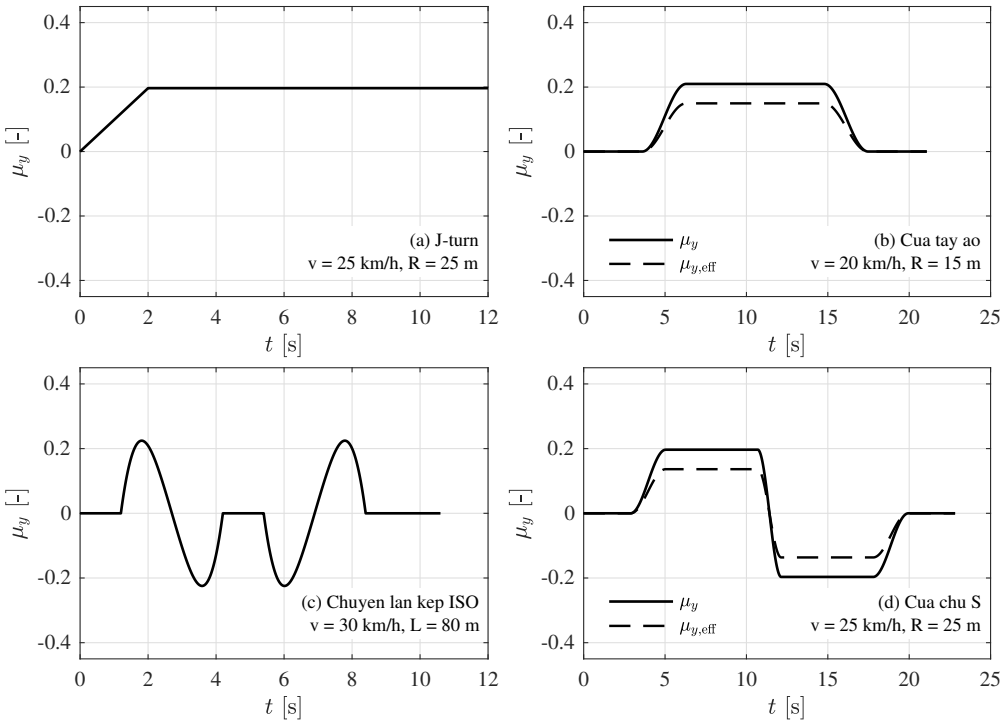
Kịch bản	**Mấp mô mặt đường**	**Siêu cao**	**Mục tiêu khảo sát**
J-turn	Không xét	Không xét	Đáp ứng lắc ngang do gia tốc ngang một phía.
Cua tay áo	Không xét	Không xét / có xét	Đánh giá ảnh hưởng của bán kính nhỏ, vận tốc chuyển động và góc siêu cao đến ngưỡng ổn định lật ngang.
Chuyển làn kép	Không xét	Không xét	Đánh giá đáp ứng quá độ của hệ xe–chất lỏng khi gia tốc ngang đổi chiều.
Cua chữ S	Không xét	Không xét / có xét	Đánh giá ảnh hưởng của quay vòng đổi chiều liên tiếp và siêu cao đến dao động lắc ngang, dao động tương đối của chất lỏng và nguy cơ mất ổn định lật ngang.

Bảng 4.3: *Thông số điển hình và miền quét của các kịch bản khảo sát*

Kịch bản	**Thông số điển hình để vẽ đáp ứng theo thời gian**	**Miền quét**
J-turn	$R_J = 25\,m$, $v = 25\,km/h$, $T_r = 2\,s$, $T_{\text{end}} = 12\,s$; $\mu_0 = v^2/(gR_J) = 0{,}197$.	$\mu_0 = 0{,}10 \div 0{,}65$, bước 0,05, hoặc quét theo v và R_J.
Cua tay áo	$R = 15\,m$, $v = 20\,km/h$, $\varphi_r = 0°$ và 3,43°; $\mu_{y,\max} = v^2/(gR) = 0{,}210$.	$R = 12$; 15; 20; $25\,m$, $v = 10 \div 35\,km/h$.
Chuyển làn kép	$L_{\text{DLC}} = 80\,m$, $A = 3{,}50\,m$, $v = 30\,km/h$; $\max\lvert\mu_y\rvert = 0{,}2245$, $T = L_{\text{DLC}}/v = 9{,}60\,s$.	$v = 20$; 30; 40; 50; $60\,km/h$, hình học quỹ đạo giữ cố định.
Cua chữ S	$R = 25\,m$, $v = 25\,km/h$, $\varphi_0 = 0°$ và 3,43°; $\lvert\mu_{y,\max}\rvert = v^2/(gR) = 0{,}197$.	$R = 20$; 25; 30; $40\,m$, $v = 15 \div 40\,km/h$.

Để minh họa rõ hơn các kịch bản vận hành được sử dụng trong khảo sát, Hình 4.1 trình bày quy luật biến thiên gia tốc ngang chuẩn hóa tương ứng với 4

trường hợp điển hình. Hình 4.2 thể hiện sơ đồ hình học đặc trưng và các thông số cơ sở của từng dạng quỹ đạo.



Hình 4.1: *Gia tốc ngang chuẩn hóa của các kịch bản vận hành khảo sát*

Đối với J-turn, gia tốc ngang chuẩn hóa được mô tả bằng hàm tăng tuyến tính:

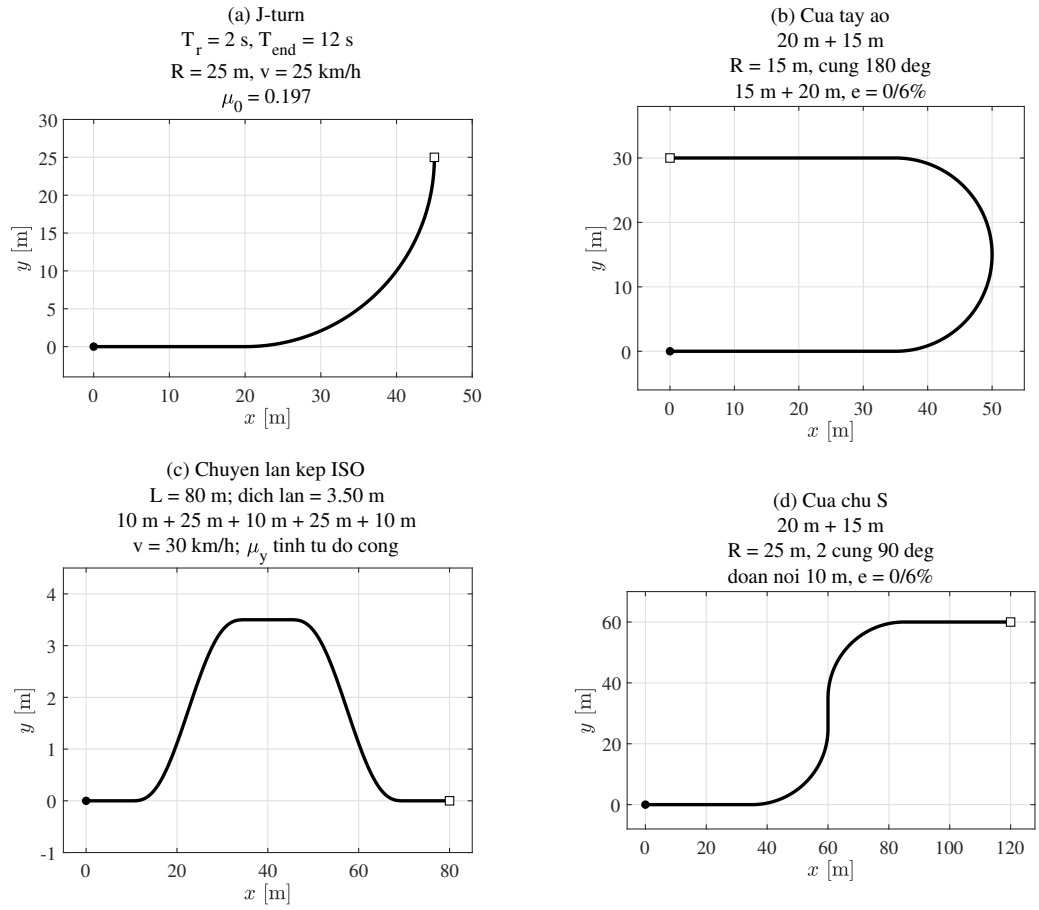
$$\mu_y(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \mu_0 \dfrac{t}{T_r}, & 0 \le t < T_r, \\ \mu_0, & T_r \le t \le T_{\text{end}}. \end{cases} \tag{4.2}$$

Trong đó T_r là thời gian tăng gia tốc ngang, μ_0 là giá trị gia tốc ngang chuẩn hóa đặt trước. Với trường hợp điển hình, $R_J = 25\,m$ và $v = 25\,km/h$, do đó:

$$\mu_0 = \frac{v^2}{gR_J} = 0{,}197. \tag{4.3}$$

Kịch bản này được dùng để xác định quan hệ giữa gia tốc ngang đặt trước, mức chất tải và $LTR_{\max}$.

Đối với cua tay áo, xe đi qua một đoạn cong chính có bán kính nhỏ. Cấu trúc hình học cơ sở gồm đoạn thẳng vào cua, đoạn chuyển tiếp, cung cua chính, đoạn chuyển tiếp ra cua và đoạn thẳng sau cua. Trong trường hợp điển hình, chiều dài



Hình 4.2: *Sơ đồ hình học và thông số cơ sở của các cung đường khảo sát*

đoạn thẳng vào và ra cua lấy bằng $20\,m$, chiều dài mỗi đoạn chuyển tiếp lấy bằng $15\,m$, cung cua chính có góc quay 180°, bán kính $R = 15\,m$ và vận tốc $v = 20\,km/h$. Gia tốc ngang chuẩn hóa trên đoạn cong được xác định theo:

$$\mu_y(s) = \frac{v^2}{gR(s)}. \tag{4.4}$$

Với $R = 15\,m$ và $v = 20\,km/h$, giá trị lớn nhất của gia tốc ngang chuẩn hóa trên cung cua chính là:

$$\mu_{y,\max} = 0{,}210. \tag{4.5}$$

Đối với chuyển làn kép, quỹ đạo tâm tham chiếu được xây dựng theo dạng chuyển làn kép ISO-like [27], gồm đoạn thẳng vào $10\,m$, đoạn chuyển làn thứ nhất $25\,m$, đoạn giữa $10\,m$, đoạn chuyển làn thứ hai $25\,m$ và đoạn thẳng ra $10\,m$. Tổng chiều dài quỹ đạo là $L_{\mathrm{DLC}} = 80\,m$, độ dịch chuyển ngang là $A = 3{,}50\,m$.

Để bảo đảm liên tục đến đạo hàm bậc hai tại các điểm nối, hàm chuyển tiếp

bậc năm được sử dụng:

$$f(u) = 10u^3 - 15u^4 + 6u^5, \qquad 0 \le u \le 1. \tag{4.6}$$

Với s là quãng đường dọc theo quỹ đạo, chuyển vị ngang được xác định:

$$y(s) = \begin{cases} 0, & 0 \le s < 10, \\ Af\left(\dfrac{s-10}{25}\right), & 10 \le s < 35, \\ A, & 35 \le s < 45, \\ A\left[1 - f\left(\dfrac{s-45}{25}\right)\right], & 45 \le s < 70, \\ 0, & 70 \le s \le 80. \end{cases} \tag{4.7}$$

Độ cong quỹ đạo và gia tốc ngang chuẩn hóa được tính từ hình học đường:

$$\kappa(s) = \frac{y''(s)}{[1 + y'^2(s)]^{3/2}}, \qquad \mu_y(s) = \frac{v^2}{g}\kappa(s), \qquad t = \frac{s}{v}. \tag{4.8}$$

Tại trường hợp điển hình $v = 30\,km/h$, thời gian đi hết phần quỹ đạo chuyển làn là:

$$T = \frac{L_{\mathrm{DLC}}}{v} = 9{,}60\,s, \qquad \max_s |\mu_y(s)| = 0{,}224505. \tag{4.9}$$

Quy luật này chính là kích thích được sử dụng trong các mô phỏng chuyển làn kép ở Chương 4; khi thay đổi vận tốc, hình học quỹ đạo được giữ nguyên và $\mu_y(s)$ thay đổi theo v^2.

Đối với cua chữ S, quỹ đạo được mô tả bằng hai cung tròn ngược chiều liên tiếp. Độ cong của quỹ đạo được viết dưới dạng:

$$\kappa(s) = \begin{cases} +1/R, & \text{cung cua thứ nhất}, \\ -1/R, & \text{cung cua thứ hai}. \end{cases} \tag{4.10}$$

Khi xe chuyển động với vận tốc v, gia tốc ngang chuẩn hóa tương ứng là:

$$\mu_y(s) = \frac{v^2}{g}\kappa(s). \tag{4.11}$$

Trường hợp điển hình của cua chữ S lấy $R = 25\,m$, $v = 25\,km/h$, gồm đoạn thẳng

vào $20\,m$, đoạn chuyển tiếp vào cua $10 \div 15\,m$, hai cung cua ngược chiều có góc quay $90°$, đoạn nối giữa hai cua $10\,m$, đoạn chuyển tiếp ra $10 \div 15\,m$ và đoạn thẳng ra $20\,m$. Khi đó giá trị lớn nhất của gia tốc ngang chuẩn hóa theo trị tuyệt đối là:

$$|\mu_{y,\max}| = \frac{v^2}{gR} = 0{,}197. \tag{4.12}$$

4.2.4. Mô tả mặt đường và góc siêu cao đoạn cua

Trong phạm vi khảo sát của Chương này, mấp mô mặt đường không được xét như một kích động riêng. Mặt đường được giả thiết không có mấp mô cục bộ để tập trung đánh giá ảnh hưởng của gia tốc ngang, dao động tương đối chất lỏng và góc siêu cao tại đoạn cua đến ổn định lật ngang động.

Đối với kịch bản J-turn và chuyển làn kép, mặt đường được giả thiết phẳng:

$$q_L(t) = q_R(t) = 0, \qquad \varphi_r(t) = 0. \tag{4.13}$$

Đối với kịch bản cua tay áo và cua chữ S, hai trường hợp mặt đường được xét: không siêu cao và có siêu cao. Khi không xét siêu cao:

$$\varphi_r(s) = 0. \tag{4.14}$$

Khi xét siêu cao, cao độ hai vệt bánh được xác định theo góc nghiêng ngang mặt đường $\varphi_r(s)$:

$$\begin{cases} q_L(s) = -d_t \tan\varphi_r(s), \\ q_R(s) = d_t \tan\varphi_r(s), \end{cases} \tag{4.15}$$

Trong đó d_t là nửa khoảng cách vệt bánh, $q_L(s)$ và $q_R(s)$ là cao độ tại vệt bánh trái và phải. Với quy ước này, chênh cao hai vệt bánh do siêu cao được xác định bởi:

$$q_R(s) - q_L(s) = 2d_t \tan\varphi_r(s). \tag{4.16}$$

Trong khảo sát cơ sở, độ dốc siêu cao được lấy bằng $e = 6\%$, tương ứng:

$$\varphi_0 = \arctan(0{,}06) = 3{,}43°. \tag{4.17}$$

Ngoài trường hợp cơ sở, khi khảo sát độ nhạy có thể xét thêm $e = 4\%$ ($\varphi_0 = 2{,}29°$)

và $e = 8\%$ ($\varphi_0 = 4{,}57°$).

Đối với cua tay áo, $\varphi_r(s)$ được xét trên đoạn cong chính. Trên các đoạn thẳng, $\varphi_r(s) = 0$; trong đoạn chuyển tiếp vào cua, góc siêu cao tăng dần từ 0 đến φ_0; trên cung cua chính, $\varphi_r(s)$ được giữ bằng φ_0; trong đoạn chuyển tiếp ra cua, $\varphi_r(s)$ giảm dần về 0. Quy luật biến thiên liên tục của siêu cao trên đoạn chuyển tiếp có thể được mô tả bởi:

$$\varphi_r(s) = \frac{\varphi_0}{2}\left[1 - \cos\left(\pi\frac{s - s_0}{L_t}\right)\right], \qquad s_0 \le s \le s_0 + L_t, \tag{4.18}$$

trong đó L_t là chiều dài đoạn chuyển tiếp siêu cao.

Đối với cua chữ S, dấu của $\varphi_r(s)$ thay đổi theo chiều cong của từng đoạn cua. Trên cung cua thứ nhất, siêu cao thuận được lấy cùng dấu với độ cong của quỹ đạo; trên cung cua thứ hai, dấu siêu cao đổi theo chiều cong ngược lại:

$$\varphi_r(s) = \varphi_0 \operatorname{sign}\left[\kappa(s)\right], \qquad \varphi_0 = 3{,}43°. \tag{4.19}$$

Trong các đoạn chuyển tiếp giữa hai cung cong ngược chiều, $\varphi_r(s)$ được biến thiên liên tục từ $+\varphi_0$ về 0 và sau đó đến $-\varphi_0$, tránh thay đổi đột ngột cao độ hai vệt bánh.

Bảng 4.4: *Các mức siêu cao sử dụng trong khảo sát cua tay áo và cua chữ S*

Trường hợp	**Độ dốc siêu cao** e	$\boldsymbol{\varphi_0 = \arctan(e)}$	**Mục đích sử dụng**
Không siêu cao	0%	0°	Trường hợp nền để so sánh.
Siêu cao nhẹ	4%	2,29°	Khảo sát độ nhạy của đáp ứng lắc ngang đối với góc nghiêng mặt đường.
Siêu cao cơ sở	6%	3,43°	Trường hợp chính dùng trong khảo sát có siêu cao.
Siêu cao lớn	8%	4,57°	Khảo sát độ nhạy khi tăng mức siêu cao tại đoạn cong.

Ảnh hưởng của siêu cao đến tác dụng gây lắc ngang được mô tả thông qua gia tốc ngang chuẩn hóa hiệu dụng:

$$\mu_{y,\text{eff}} = \mu_y \cos\varphi_r - \sin\varphi_r. \tag{4.20}$$

Với quy ước $\varphi_r > 0$ là siêu cao thuận, thành phần trọng lực theo phương ngang mặt đường làm giảm tác dụng gây lắc ngang của gia tốc ly tâm. Ngược lại, khi siêu

cao bất lợi hoặc khi quy luật chuyển tiếp siêu cao không phù hợp với chiều cong, $\mu_{y,\text{eff}}$ tăng, làm tăng chuyển tải trọng ngang và nguy cơ khởi phát nhấc bánh.

4.2.5. Các chỉ tiêu đánh giá ổn định lật ngang

Ổn định lật ngang động được đánh giá thông qua các đáp ứng động lực học và hai chỉ tiêu chính: hệ số chuyển tải trọng ngang LTR và cấp đánh giá mức độ an toàn lật ngang RI. Các đáp ứng được xét gồm:

$$\psi_s(t), \quad \psi_u(t), \quad \alpha(t), \quad Z_s(t), \quad Z_u(t), \quad F_{zL}(t), \quad F_{zR}(t). \tag{4.21}$$

Hệ số chuyển tải trọng ngang được xác định trực tiếp từ phản lực pháp tuyến hai bên bánh xe. Hệ số này và các dạng chỉ số dự báo phát triển từ LTR được sử dụng rộng rãi để đánh giá nguy cơ lật ngang và xây dựng hệ thống chống lật chủ động [34, 52, 61]:

$$LTR(t) = \begin{cases} \dfrac{|F_{zR}(t) - F_{zL}(t)|}{F_{zR}(t) + F_{zL}(t)}, & F_{zR}(t) + F_{zL}(t) > \varepsilon_{\Sigma F}, \\ 1, & F_{zR}(t) + F_{zL}(t) \le \varepsilon_{\Sigma F}. \end{cases} \tag{4.22}$$

Trong xử lý số liệu mô phỏng, $\varepsilon_F = 10^{-6}\,\text{N}$, $\varepsilon_{LTR} = 10^{-6}$ và $\varepsilon_{\Sigma F} = 10^{-9}\,\text{N}$. Phản lực pháp tuyến thực tế được xác định theo điều kiện tiếp xúc một chiều giữa lốp và mặt đường. Ngưỡng khởi phát nhấc bánh được xác định khi

$$F_{z,\min} \le \varepsilon_F \qquad \text{hoặc} \qquad LTR_{\max} \ge 1 - \varepsilon_{LTR}. \tag{4.23}$$

Chỉ số $LTR_{\max}$ được dùng làm chỉ tiêu định lượng liên tục để đánh giá mức chuyển tải trọng ngang lớn nhất trong mỗi kịch bản khảo sát:

$$LTR_{\max} = \max_t LTR(t). \tag{4.24}$$

Cấp đánh giá RI sử dụng trong Chương 4 được xác định theo phân cấp đã trình bày ở Công thức (1.7) và Bảng 1.1. Do đó, Chương 4 không lặp lại bảng phân cấp RI, mà chỉ sử dụng RI như một chỉ tiêu rời rạc để so sánh mức độ tiệm cận trạng thái khởi phát nhấc bánh giữa các kịch bản khảo sát.

Cấp $RI = 4$ được hiểu là trạng thái khởi phát nhấc bánh. Trạng thái này chưa

đồng nghĩa với quá trình lật không phục hồi nếu phản lực pháp tuyến phục hồi sau kích động. Trong chương này, quá trình mất ổn định lật ngang được phân biệt theo ba mức.

Mức thứ nhất là khởi phát nhấc bánh, được xác định khi một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường:

$$F_{z,\min} \le \varepsilon_F \qquad \text{hoặc} \qquad \mathrm{LTR}_{\max} \ge 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}. \tag{4.25}$$

Mức thứ hai là trạng thái không phục hồi, khi sau nhấc bánh phản lực pháp tuyến không phục hồi trước thời điểm kết thúc mô phỏng hoặc góc lắc ngang tiếp tục phát triển. Vận tốc nhỏ nhất xuất hiện trạng thái này được ký hiệu là v_{nr}.

Mức thứ ba là đạt giới hạn lật hình học, khi:

$$|\psi_s| \ge 90^\circ. \tag{4.26}$$

Khi điều kiện (4.26) xuất hiện, mô phỏng được dừng và trường hợp đó được ghi nhận là đã đạt giới hạn lật hoàn toàn theo tiêu chí góc lắc. Mô hình không mô tả tiếp giai đoạn va chạm, trượt hoặc biến dạng của thân xe sau khi đạt giới hạn này.

Quy ước xác định trạng thái nhấc bánh, phục hồi tiếp xúc và không phục hồi trong mô phỏng khi:

$$F_{zL} > 10^{-3}\,\mathrm{N}, \qquad F_{zR} > 10^{-3}\,\mathrm{N}, \qquad \mathrm{LTR} < 1 - 10^{-6}. \tag{4.27}$$

Trường hợp đã nhấc bánh nhưng không thỏa mãn điều kiện phục hồi trước thời điểm kết thúc mô phỏng, hoặc đạt giới hạn $|\psi_s| = 90^\circ$, được xem là trạng thái không phục hồi theo tiêu chí mô phỏng.

Các đại lượng đặc trưng cần xác định trong các khảo sát gồm:

$$\mathrm{LTR}_{\max}, \quad RI, \quad F_{z,\min}, \quad \psi_{s,\max}, \quad \alpha_{\max}, \quad v_{\mathrm{lift}}, \quad v_{\mathrm{nr}}, \quad \mu_{y,\mathrm{lift}}. \tag{4.28}$$

Các ngưỡng trên lưới thô được hiểu là vận tốc mẫu đầu tiên xuất hiện sự kiện. Nếu sự kiện chưa xuất hiện tại v_{j-1} nhưng xuất hiện tại v_j, kết quả được hiểu trong khoảng $v_{j-1} < v_{\mathrm{lift}} \le v_j$. Giá trị có phần thập phân chỉ được dùng khi đã thực hiện khảo sát cục bộ với bước vận tốc nhỏ; bước quét cụ thể được nêu tại từng kịch bản. Số chữ số của ngưỡng được trình bày theo độ phân giải của lưới mô phỏng

Bảng 4.5: *Ma trận khảo sát theo kịch bản vận hành và điều kiện mặt đường*

Kịch bản	h_p	**Siêu cao**	**Thông số hình học cố định**	**Biến quét**	**Chỉ tiêu đánh giá**
J-turn	0–1	Không xét	$R_J = 25\,m$, $T_r = 2\,s$, $T_{\text{end}} = 12\,s$	v hoặc μ_0	$LTR_{\max}$, RI, $F_{z,\min}$, ψ_s, α
Cua tay áo	0–1	Không xét / có xét	$R = 15\,m$, cung cua 180°, $L_t = 15\,m$	v, φ_r	$LTR_{\max}$, RI, $F_{z,\min}$, ψ_s, α
Chuyển làn kép	0–1	Không xét	$L_{\text{DLC}} = 80\,m$, $A = 3{,}50\,m$, μ_y tính từ độ cong quỹ đạo	v	$LTR_{\max}$, RI, $F_{z,\min}$, ψ_s, α
Cua chữ S	0–1	Không xét / có xét	$R = 25\,m$, hai cung 90°, đoạn nối $10\,m$	v, φ_r	$LTR_{\max}$, RI, $F_{z,\min}$, ψ_s, α

tương ứng.

4.3. Khảo sát cơ chế tương tác động lực học giữa thân xe và chất lỏng

Mục này phân tích cơ chế tương tác giữa dao động lắc ngang của thân xe và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc. Mục tiêu là làm rõ ảnh hưởng riêng của dao động chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang, chuyển tải trọng ngang, phản lực pháp tuyến và cấp đánh giá ổn định lật ngang.

Để tách riêng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng, hai cấu hình mô hình được sử dụng để đối sánh. Cấu hình thứ nhất là mô hình E2 đầy đủ có xét dao động tương đối của chất lỏng, ký hiệu SL. Cấu hình thứ hai là mô hình chất lỏng quy đổi cứng, ký hiệu RG, trong đó khối lượng và vị trí trọng tâm tĩnh của chất lỏng được giữ nguyên nhưng bậc tự do dao động tương đối $\alpha(t)$ bị loại bỏ. Vì vậy, sai khác giữa hai cấu hình phản ánh ảnh hưởng riêng của dao động tương đối chất lỏng.

Kịch bản chuyển làn kép trên mặt đường phẳng được chọn làm trường hợp đại diện cho phân tích cơ chế. Kịch bản này tạo ra gia tốc ngang quá độ và đổi dấu trong thời gian ngắn, phù hợp để quan sát độ lệch pha giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$, cũng như ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến $\mathrm{LTR}(t)$ và phản lực pháp tuyến. Các kết

quả định lượng trong mục này được trình bày tại vận tốc $v = 30\,\mathrm{km/h}$, là trường hợp xe chưa khởi phát nhấc bánh nhưng các chỉ tiêu ổn định đã thể hiện rõ sự khác biệt giữa SL và RG.

4.3.1. Đối sánh đáp ứng giữa mô hình có dao động chất lỏng và mô hình chất lỏng quy đổi cứng

Các đại lượng được sử dụng để đối sánh gồm góc lắc ngang thân xe $\psi_s(t)$, phản lực pháp tuyến $F_{zL}(t)$, $F_{zR}(t)$, hệ số chuyển tải trọng ngang $\mathrm{LTR}(t)$, giá trị cực đại $\mathrm{LTR}_{\max}$, phản lực nhỏ nhất $F_{z,\min}$ và cấp đánh giá RI. Trong đó, RI là cấp phân loại theo $\mathrm{LTR}_{\max}$ và trạng thái tiếp xúc bánh xe, không phải là đáp ứng theo thời gian.

Mức ảnh hưởng của dao động chất lỏng được đánh giá thông qua sai khác cực đại của hệ số chuyển tải trọng ngang:

$$\Delta\mathrm{LTR}_{\max} = \mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{SL}} - \mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{RG}}, \tag{4.29}$$

và sai khác cấp đánh giá ổn định lật ngang:

$$\Delta RI = RI^{\mathrm{SL}} - RI^{\mathrm{RG}}. \tag{4.30}$$

Mức khuếch đại đáp ứng lắc ngang do dao động tương đối chất lỏng được xác định:

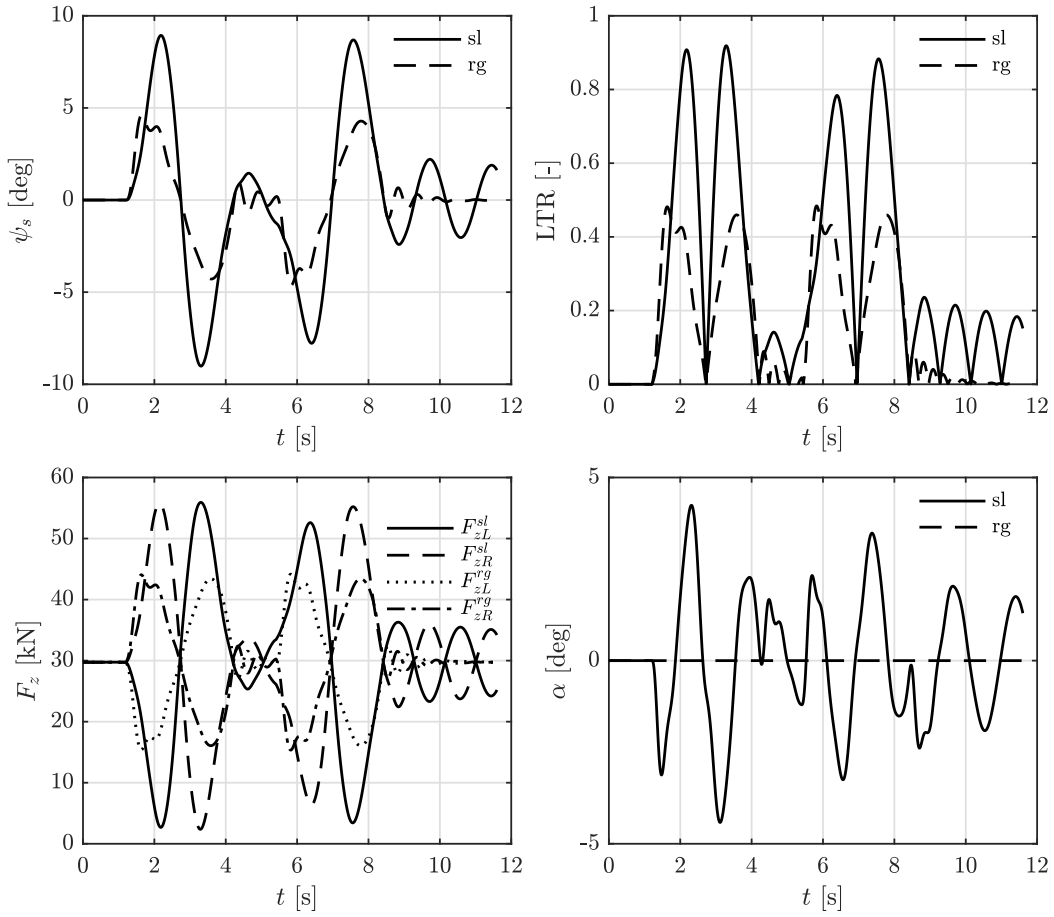
$$K_\psi = \frac{\psi_{s,\max}^{\mathrm{SL}}}{\psi_{s,\max}^{\mathrm{RG}}}. \tag{4.31}$$

Khi $K_\psi > 1$, dao động tương đối của chất lỏng làm tăng biên độ lắc ngang thân xe so với mô hình chất lỏng quy đổi cứng.

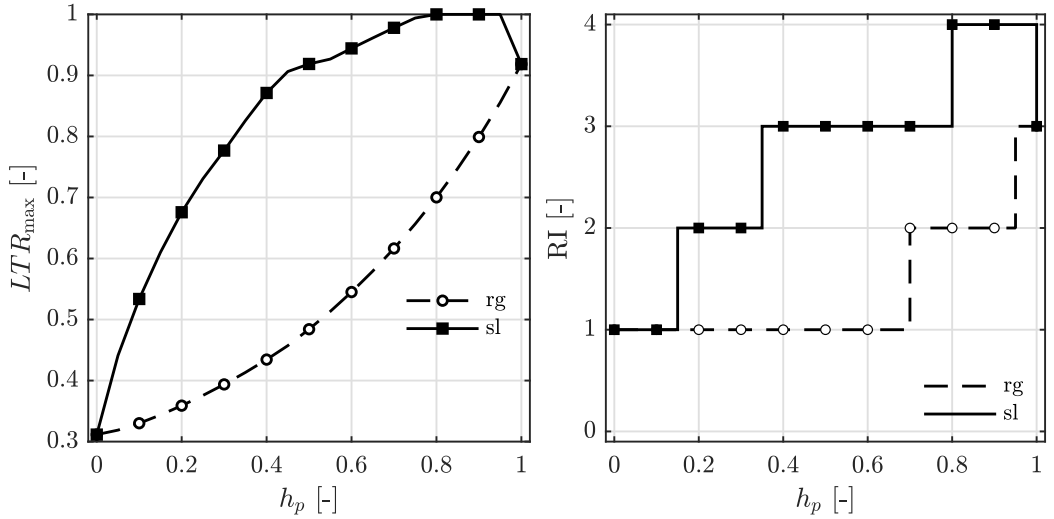
Hình 4.3 trình bày đáp ứng theo thời gian tại $h_p = 0{,}50$, $v = 30\,\mathrm{km/h}$. Đây là mức chất tải đại diện để quan sát sự khác biệt giữa hai cấu hình mô hình thông qua $\psi_s(t)$, $\alpha(t)$, $\mathrm{LTR}(t)$ và phản lực pháp tuyến hai bên bánh xe.

Hình 4.4 tổng hợp sự thay đổi của $\mathrm{LTR}_{\max}$ và cấp RI theo mức chất tải. Kết quả định lượng tương ứng được trình bày trong Bảng 4.6.

Kết quả cho thấy ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng tập trung ở các mức chất tải chưa đầy. Tại $h_p = 0{,}25$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng từ 0,376 lên 0,731, cấp RI tăng từ 1 lên 2 và $K_\psi = 2{,}06$. Tại $h_p = 0{,}50$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng từ 0,484 lên 0,919, cấp RI tăng



Hình 4.3: *Đối sánh đáp ứng theo thời gian giữa mô hình* SL *và mô hình* RG *tại* $h_p = 0{,}50,\ v = 30\,\mathrm{km/h}$



Hình 4.4: *Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến* $\mathrm{LTR}_{\max}$ *và cấp RI theo mức chất tải tại* $v = 30\,\mathrm{km/h}$

từ 1 lên 3 và $K_\psi = 1{,}94$. Đây là mức tải dao động chất lỏng làm thay đổi rõ nhất trạng thái đánh giá ổn định lật ngang.

Bảng 4.6: *Đối sánh ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang tại* $v = 30\,\mathrm{km/h}$

h_p	$\mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{RG}}$	$\mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{SL}}$	$\Delta\mathrm{LTR}_{\max}$	RI^{RG}	RI^{SL}	ΔRI	K_ψ
0,00	0,311	0,311	0,000	1	1	0	1,00
0,25	0,376	0,731	0,355	1	2	1	2,06
0,50	0,484	0,919	0,435	1	3	2	1,94
0,75	0,657	0,994	0,337	2	3	1	1,52
1,00	0,919	0,919	0,000	3	3	0	1,00

Tại $h_p = 0{,}75$, mô hình SL cho $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}994$, tiệm cận ngưỡng khởi phát nhấc bánh. Tuy nhiên, do $\mathrm{LTR}_{\max} < 1$ và phản lực pháp tuyến vẫn còn dương, trạng thái này được xem là vùng nguy hiểm, chưa phải khởi phát nhấc bánh. Ở hai trạng thái biên $h_p = 0$ và $h_p = 1{,}00$, hai mô hình cho kết quả trùng nhau vì không tồn tại dao động tương đối chất lỏng có vai trò chi phối.

4.3.2. Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối của chất lỏng

Mức chất tải ảnh hưởng đồng thời đến khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm hệ xe–chất lỏng, hình học mặt thoáng và đặc trưng dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc. Vì vậy, các mức $h_p = 0$; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 được khảo sát trong cùng điều kiện kích thích nhằm xác định vùng mức tải bất lợi đối với ổn định lật ngang.

Biên độ dao động tương đối của chất lỏng được đánh giá thông qua:

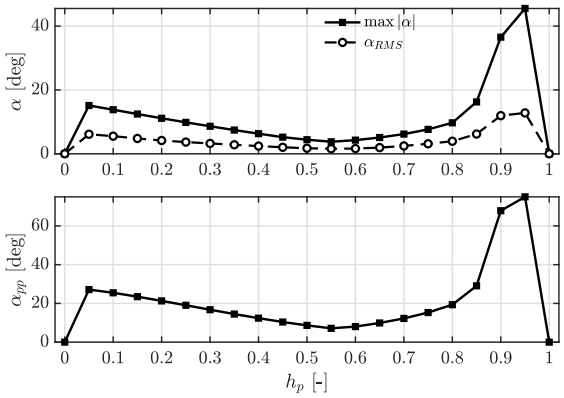
$$\alpha_{\max} = \max_t |\alpha(t)|. \tag{4.32}$$

Ngoài giá trị cực đại, hai chỉ tiêu bổ sung là giá trị hiệu dụng và biên độ đỉnh–đỉnh:

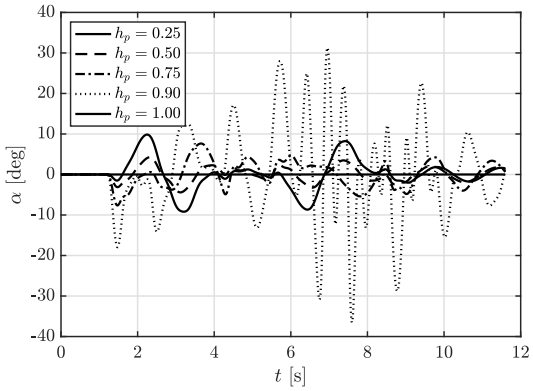
$$\alpha_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \alpha^2(t)\,dt}, \tag{4.33}$$

$$\alpha_{\mathrm{p2p}} = \max_t \alpha(t) - \min_t \alpha(t). \tag{4.34}$$

Hình 4.5 trình bày các chỉ tiêu biên độ dao động chất lỏng và một số đáp ứng $\alpha(t)$ đại diện theo mức chất tải.



(a) Chỉ tiêu biên độ dao động tương đối của chất lỏng



(b) Đáp ứng $\alpha(t)$ tại các mức chất tải đại diện

Hình 4.5: *Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối của chất lỏng*

Kết quả định lượng được tổng hợp trong Bảng 4.7.

Bảng 4.7: *Ảnh hưởng của mức chất tải đến dao động tương đối chất lỏng và đáp ứng lắc ngang tại* $v = 30\,\mathrm{km/h}$

h_p	h_l (m)	$\alpha_{\max}$ (deg)	α_{RMS} (deg)	$\psi_{s,\max}$ (deg)	$\mathrm{LTR}_{\max}$ (-)	$F_{z,\min}$ (N)	RI (-)
0,00	0,000	0,000	0,000	1,081	0,312	8291	1
0,25	0,423	9,851	3,671	4,912	0,731	5487	2
0,50	0,710	4,420	1,742	9,015	0,919	2366	3
0,75	0,997	7,644	3,138	13,034	0,994	228	3
1,00	1,420	0,000	0,000	15,281	0,919	3856	3

Bảng 4.7 cho thấy ảnh hưởng của mức chất tải không biến thiên đơn điệu. Tại $h_p = 0{,}25$, $\alpha_{\max} = 9{,}850°$, lớn hơn so với $h_p = 0{,}50$; tuy nhiên do khối lượng chất lỏng nhỏ hơn và trọng tâm tổng thể thấp hơn, $\mathrm{LTR}_{\max}$ chưa phải lớn nhất. Ngược lại, tại $h_p = 0{,}50$, $\alpha_{\max}$ chỉ đạt $4{,}419°$ nhưng $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}919$, cấp $RI = 3$. Điều này cho thấy ổn định lật ngang không chỉ phụ thuộc vào biên độ dao động tương đối $\alpha(t)$, mà còn phụ thuộc vào khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm và quan hệ pha giữa dao động chất lỏng với dao động lắc ngang thân xe.

Tại $h_p = 0{,}75$, $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}994$ và $F_{z,\min} = 228\,\mathrm{N}$, cho thấy xe đã tiệm cận ngưỡng khởi phát nhấc bánh. Khi đầy tải $h_p = 1{,}00$, dao động tương đối chất lỏng không còn xuất hiện theo quy ước mô hình, nhưng do khối lượng và vị trí trọng tâm hệ xe lớn, $\psi_{s,\max}$ và $\mathrm{LTR}_{\max}$ vẫn ở mức cao. Như vậy, vùng mức tải trung gian và cận đầy cần được khảo sát bằng mô hình có xét dao động tương đối chất lỏng; mô hình

quy đổi cứng có thể đánh giá thấp mức chuyển tải trọng ngang trong vùng này.

4.3.3. Quan hệ pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng

Quan hệ pha giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$ là một yếu tố chi phối cơ chế tương tác động lực học của hệ xe–chất lỏng. Khi dao động chất lỏng cùng pha hoặc gần cùng pha với dao động lắc ngang thân xe, mô men do chất lỏng có thể khuếch đại đáp ứng lắc ngang và làm tăng chuyển tải trọng ngang. Ngược lại, khi dao động chất lỏng lệch pha theo hướng làm giảm mô men lắc ngang tổng hợp, ảnh hưởng bất lợi có thể giảm.

Do chuyển làn kép là kích thích quá độ, quan hệ giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$ không được đặc trưng bằng một góc pha điều hòa không đổi. Trong luận án, độ trễ đặc trưng được đánh giá bằng hệ số tương quan chéo chuẩn hóa:

$$\rho_{\psi\alpha}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left[\psi_s(t) - \bar{\psi}_s\right] \left[\alpha(t+\tau) - \bar{\alpha}\right] \, dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} \left[\psi_s(t) - \bar{\psi}_s\right]^2 \, dt} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} \left[\alpha(t+\tau) - \bar{\alpha}\right]^2 \, dt}}. \tag{4.35}$$

Độ trễ đặc trưng được xác định tại giá trị τ làm cực đại trị tuyệt đối của hệ số tương quan:

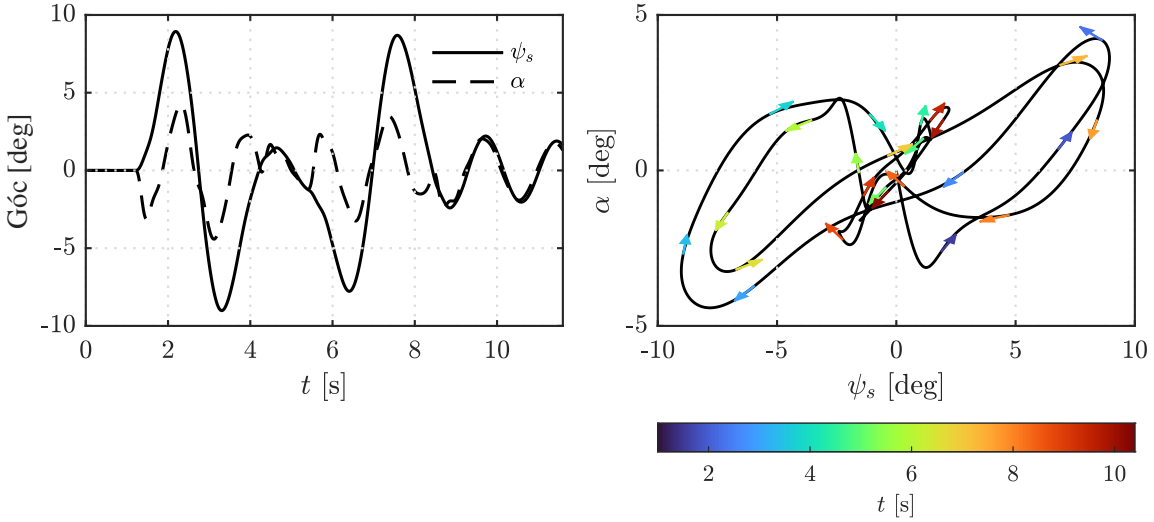
$$\tau_{\psi\alpha} = \arg\max_{\tau} \left|\rho_{\psi\alpha}(\tau)\right|. \tag{4.36}$$

Giá trị $\rho_{\psi\alpha}(\tau_{\psi\alpha}) > 0$ thể hiện xu hướng cùng pha theo nghĩa tương quan; giá trị âm thể hiện xu hướng ngược pha hoặc tác động theo chiều đối nghịch trong khoảng thời gian khảo sát. Theo quy ước hậu xử lý, $\tau_{\psi\alpha} > 0$ được diễn giải là dao động tương đối của chất lỏng trễ so với dao động lắc ngang thân xe.

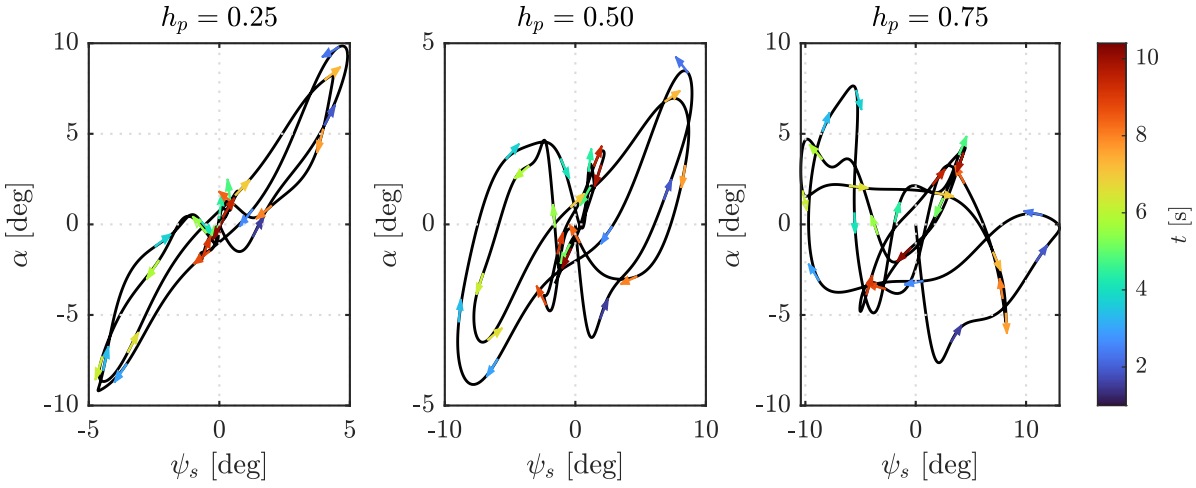
Hình 4.6 trình bày đáp ứng $\psi_s(t)$, $\alpha(t)$ và quỹ đạo pha $\alpha - \psi_s$ tại $h_p = 0{,}50$.

Hình 4.7 biểu diễn quỹ đạo pha $\alpha - \psi_s$ tại các mức chất tải trung gian, còn Hình 4.8 tổng hợp độ trễ tương quan và hệ số tương quan cực trị theo mức chất tải. Kết quả định lượng được trình bày trong Bảng 4.8.

Tại $h_p = 0{,}25$, hệ số tương quan đạt 0,949, cho thấy dao động chất lỏng gần cùng pha với dao động lắc ngang thân xe. Đây là điều kiện thuận lợi để mô men do chất lỏng khuếch đại đáp ứng lắc ngang, phù hợp với kết quả $K_\psi = 2{,}06$ và



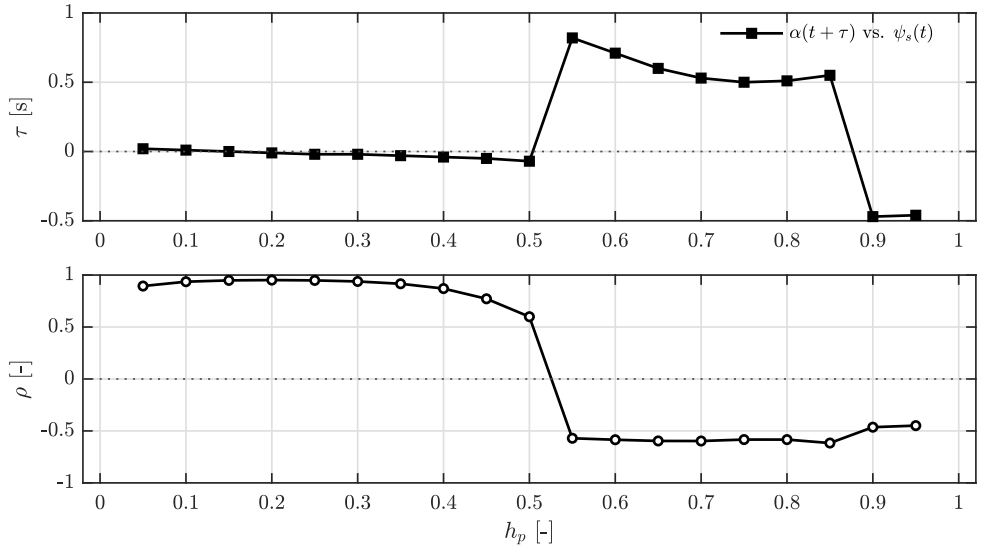
Hình 4.6: *Quan hệ giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng tại $h_p = 0{,}50$*



Hình 4.7: *Quỹ đạo pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối của chất lỏng theo mức chất tải*

$\Delta\text{LTR}_{\max} = 0{,}355$ trong Bảng 4.6. Tại $h_p = 0{,}50$, hệ số tương quan giảm xuống 0,599 nhưng vẫn dương; kết hợp với khối lượng chất lỏng lớn hơn, mức này tạo ra sai khác $\text{LTR}_{\max}$ lớn nhất giữa hai mô hình.

Tại $h_p = 0{,}75$, hệ số tương quan âm $-0{,}583$, cho thấy dao động chất lỏng và dao động thân xe không còn giữ quan hệ gần cùng pha trên toàn miền khảo sát. Tuy nhiên, do khối lượng chất lỏng lớn và trọng tâm hệ xe cao hơn, $\text{LTR}_{\max}$ vẫn đạt 0,994 và $F_{z,\min}$ giảm xuống mức rất thấp. Điều này khẳng định nguy cơ mất ổn định lật ngang không chỉ do pha dao động quyết định, mà còn phụ thuộc mạnh



Hình 4.8: *Độ trễ tương quan và hệ số tương quan giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$ theo mức chất tải*

Bảng 4.8: *Đặc trưng quan hệ pha giữa dao động lắc ngang thân xe và dao động tương đối chất lỏng*

h_p	Kịch bản	$\alpha_{\max}$ (deg)	$\tau_{\psi\alpha}$ (s)	$\rho_{\psi\alpha}$ (-)	Đặc điểm tương quan
0,25	Chuyển làn kép	9,850	-0,02	0,949	Tương quan dương rất cao, dao động chất lỏng gần cùng pha với dao động lắc ngang thân xe.
0,50	Chuyển làn kép	4,419	-0,07	0,599	Tương quan dương trung bình, dao động chất lỏng vẫn có xu hướng làm tăng đáp ứng lắc ngang.
0,75	Chuyển làn kép	7,643	0,50	-0,583	Tương quan âm, thể hiện sự lệch pha đáng kể giữa dao động chất lỏng và dao động thân xe.

vào phân bố khối lượng và vị trí trọng tâm của hệ xe–chất lỏng.

Như vậy, dao động tương đối chất lỏng có thể làm tăng đáp ứng lắc ngang, tăng $\mathrm{LTR}_{\max}$, giảm $F_{z,\min}$ và làm giảm dự trữ ổn định lật ngang trong vùng chất tải chưa đầy. Các kết quả này giải thích cơ sở động lực học cho các khảo sát ngưỡng trong các kịch bản J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S ở các mục tiếp theo.

4.4. Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn

Mục này khảo sát ổn định lật ngang của ô tô xi téc trong kịch bản J-turn bằng mô hình E2 đầy đủ. Kịch bản J-turn tạo gia tốc ngang một phía tăng đến giá trị ổn định, phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của gia tốc ngang, mức chất tải và dao động tương đối chất lỏng đến $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI và ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

4.4.1. Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở

Trước hết, đáp ứng của xe được khảo sát tại vận tốc cơ sở $v = 25\,\mathrm{km/h}$, tương ứng $\mu_0 = 0{,}196637$. Tại vận tốc này, chưa có thời điểm nào khởi phát nhấc bánh, do đó kết quả được dùng để đánh giá dự trữ ổn định và ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng trong miền xe còn duy trì tiếp xúc hai bên bánh xe.

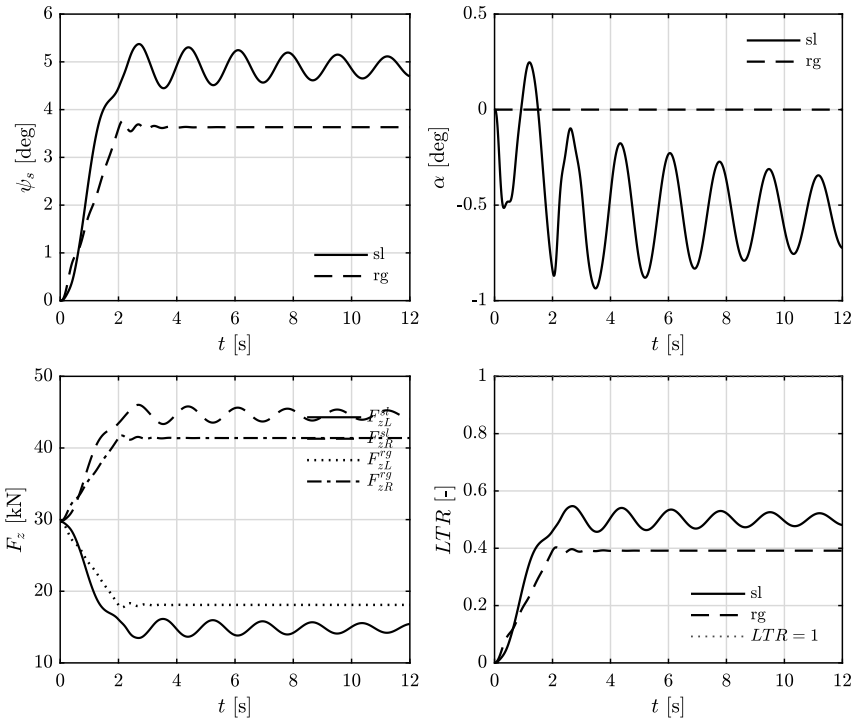
Bảng 4.9: *Đối sánh đáp ứng J-turn tại vận tốc cơ sở* $v = 25\,\mathrm{km/h}$

h_p	$\mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{RG}}$	$\mathrm{LTR}_{\max}^{\mathrm{SL}}$	$\Delta_{\mathrm{rel}}\mathrm{LTR}_{\max}$ (%)	$\psi_{s,\max}^{\mathrm{RG}}$ (deg)	$\psi_{s,\max}^{\mathrm{SL}}$ (deg)	$F_{z,\min}^{\mathrm{RG}}$ (kN)	$F_{z,\min}^{\mathrm{SL}}$ (kN)	$RI^{\mathrm{RG}}/RI^{\mathrm{SL}}$
0,00	0,275	0,275	0,00	0,921	0,921	8,736	8,736	0/0
0,25	0,324	0,464	43,18	1,997	3,093	14,128	11,203	1/1
0,50	0,403	0,547	35,67	3,761	5,373	17,748	13,474	1/1
0,75	0,518	0,629	21,28	6,606	8,149	18,590	14,306	1/2
1,00	0,707	0,707	0,00	11,603	11,603	13,908	13,908	2/2

Kết quả trong Bảng 4.9 cho thấy dao động tương đối chất lỏng làm tăng rõ $\mathrm{LTR}_{\max}$, tăng góc lắc ngang và làm giảm phản lực pháp tuyến nhỏ nhất ở các mức tải chưa đầy. Tại $h_p = 0{,}50$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng từ 0,403 lên 0,547, trong khi $F_{z,\min}$ giảm từ 17,748 kN xuống 13,474 kN. Tại $h_p = 0{,}75$, cấp RI tăng từ 1 lên 2 khi sử dụng mô hình SL. Điều này cho thấy ngay trong miền chưa nhấc bánh, dao động chất lỏng đã làm giảm dự trữ ổn định lật ngang.

Ở hai trạng thái biên $h_p = 0$ và $h_p = 1{,}00$, hai mô hình cho kết quả trùng nhau. Trường hợp không tải không có chất lỏng trong xi téc, còn trường hợp đầy tải tương ứng với chất lỏng chuyển động cùng xi téc theo giả thiết mô hình, nên dao động tương đối chất lỏng không còn là bậc tự do chi phối.

Hình 4.9 minh họa đáp ứng tại mức tải đại diện $h_p = 0{,}50$. Sự sai khác giữa



Hình 4.9: *Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản J-turn tại* $h_p = 0{,}50$

hai mô hình thể hiện đồng thời qua $\psi_s(t)$, phản lực pháp tuyến và LTR(t), qua đó làm rõ vai trò của dao động tương đối chất lỏng trong quá trình chuyển tải trọng ngang.

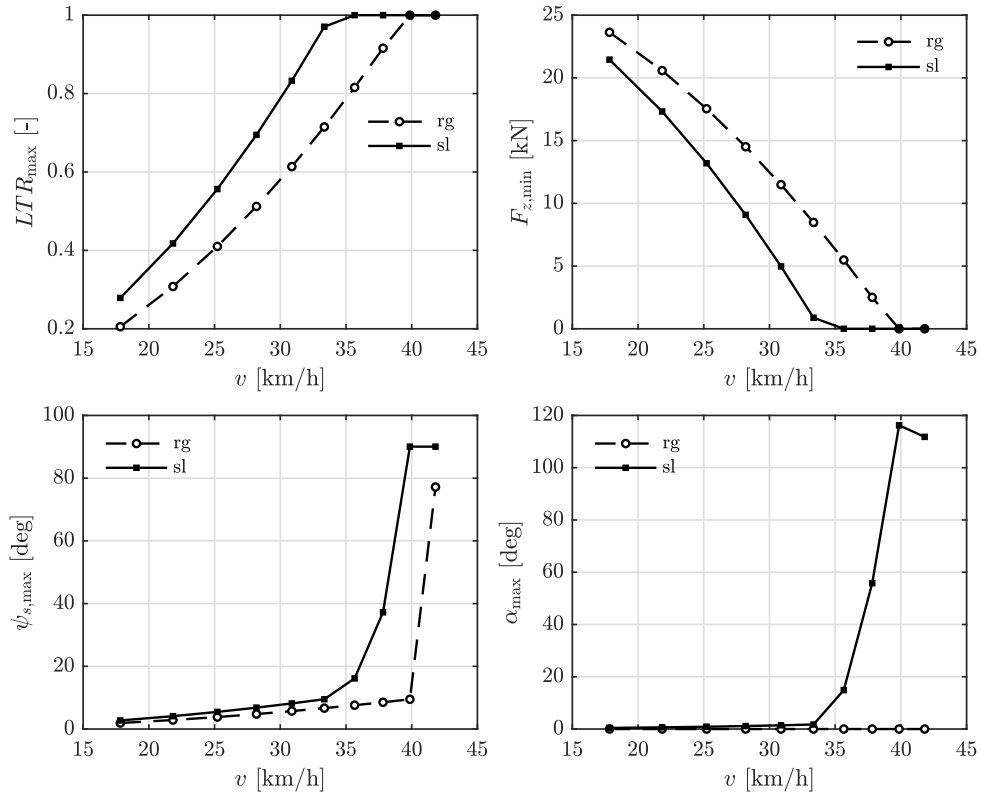
4.4.2. Ảnh hưởng của vận tốc đến đáp ứng ổn định lật ngang

Để đánh giá ảnh hưởng của gia tốc ngang, luận án khảo sát theo μ_0, tương đương với thay đổi vận tốc tại bán kính quay vòng cố định $R_J = 25\,\text{m}$. Với $h_p = 0{,}50$, kết quả được tổng hợp trong Bảng 4.10.

Bảng 4.10: *Ảnh hưởng của* μ_0 *đến đáp ứng J-turn tại* $h_p = 0{,}50$

$\boldsymbol{\mu_0}$	$\boldsymbol{v}$ (km/h)	$\text{LTR}_{\max}^{\text{RG}}$	$\text{LTR}_{\max}^{\text{SL}}$	$F_{z,\min}^{\text{RG}}$ (kN)	$F_{z,\min}^{\text{SL}}$ (kN)	$\psi_{s,\max}^{\text{SL}}$ (deg)	$\alpha_{\max}^{\text{SL}}$ (deg)
0,10	17,83	0,205	0,279	23,634	21,455	2,738	0,422
0,15	21,83	0,308	0,418	20,585	17,322	4,103	0,647
0,20	25,21	0,410	0,556	17,544	13,197	5,464	0,887
0,25	28,19	0,512	0,695	14,511	9,081	6,819	1,146
0,30	30,88	0,614	0,833	11,489	4,974	8,166	1,427
0,35	33,35	0,715	0,970	8,479	0,877	9,503	1,734
0,40	35,66	0,816	1,000	5,484	0,000	16,146	14,902
0,45	37,82	0,916	1,000	2,506	0,000	37,222	55,808

Kết quả cho thấy khi μ_0 tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng nhanh và $F_{z,\min}$ giảm mạnh. Đối với mô hình SL, tại $\mu_0 = 0{,}35$, $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}970$ và $F_{z,\min} = 0{,}877\,\mathrm{kN}$, thể hiện trạng thái tiệm cận khởi phát nhấc bánh. Khi $\mu_0 = 0{,}40$, $\mathrm{LTR}_{\max} = 1$ và $F_{z,\min} = 0$, tức là một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường.



Hình 4.10: *Ảnh hưởng của vận tốc đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn tại* $h_p = 0{,}50$

Hình 4.10 cho thấy cùng một xu hướng trên miền vận tốc: dao động chất lỏng làm tăng đáp ứng lắc ngang và đẩy hệ xe–chất lỏng tiến nhanh hơn đến vùng khởi phát nhấc bánh so với mô hình chất lỏng quy đổi cứng.

4.4.3. Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn

Ngưỡng không phục hồi v_{nr} trong kịch bản J-turn được xác định theo tiêu chí đã nêu ở Mục 4.2.5. Bảng 4.11 trình bày kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc nhỏ theo μ_0 và vận tốc.

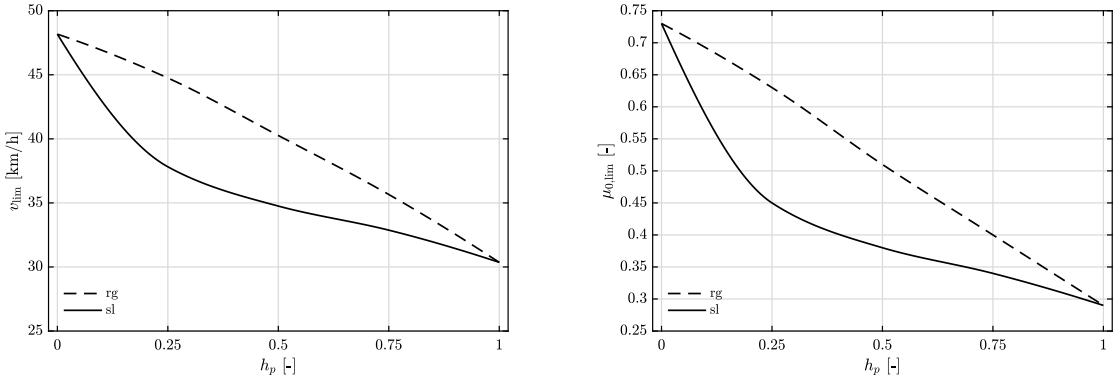
Mức suy giảm vận tốc giới hạn do dao động tương đối chất lỏng được xác định:

$$\eta_{v,\mathrm{nr}} = \frac{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}} - v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}}{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}} \times 100\%. \tag{4.37}$$

Bảng 4.11: *Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn*

h_p	$\mu_{0,\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}$	$v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}$ (km/h)	$\mu_{0,\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}$	$v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}$ (km/h)	$\eta_{v,\mathrm{nr}}$ (%)
0,00	0,73	48,17	0,73	48,17	0,00
0,25	0,63	44,75	0,45	37,82	15,48
0,50	0,51	40,26	0,38	34,75	13,68
0,75	0,40	35,66	0,34	32,87	7,80
1,00	0,29	30,36	0,29	30,36	0,00

Kết quả trong Bảng 4.11 cho thấy dao động tương đối chất lỏng làm giảm rõ ngưỡng không phục hồi ở các mức tải chưa đầy. Tại $h_p = 0{,}25$, v_{nr} giảm từ 44,75 km/h xuống 37,82 km/h, tương ứng 15,48%. Tại $h_p = 0{,}50$, mức suy giảm là 13,68%, còn tại $h_p = 0{,}75$ là 7,80%. Ở hai trạng thái biên $h_p = 0$ và $h_p = 1{,}00$, hai mô hình cho cùng ngưỡng, phù hợp với quy ước mô hình và bản chất vật lý của bài toán.



(a) Vận tốc giới hạn (b) Gia tốc ngang chuẩn hóa giới hạn

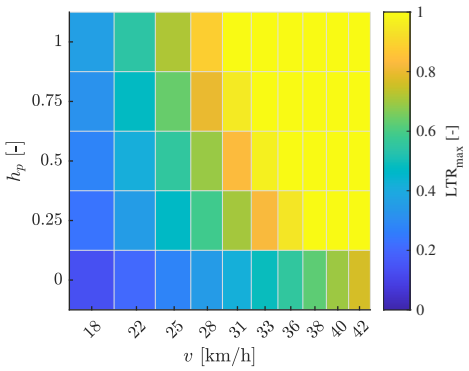
Hình 4.11: *Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản J-turn theo mức chất tải*

Hình 4.11 cho thấy mức tải đầy $h_p = 1{,}00$ có ngưỡng vận tốc nhỏ nhất do khối lượng và trọng tâm hệ xe lớn, trong khi các mức tải chưa đầy thể hiện rõ ảnh hưởng bất lợi của dao động tương đối chất lỏng qua sai khác giữa mô hình SL và RG.

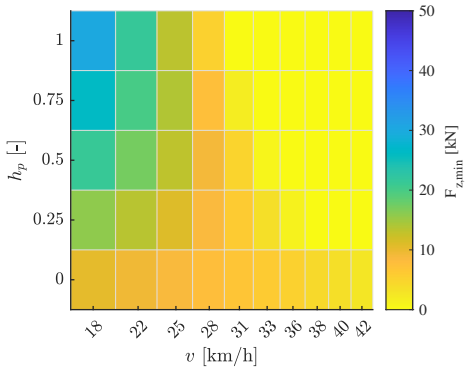
4.4.4. Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$*,* $F_{z,\min}$ *và cấp* RI *trong miền khảo sát*

Để đánh giá tổng quát ảnh hưởng đồng thời của mức chất tải và vận tốc, các bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI được xây dựng trên miền khảo sát (h_p, v). Các bản đồ này cho phép nhận diện vùng còn dự trữ ổn định, vùng tiệm cận nhấc bánh

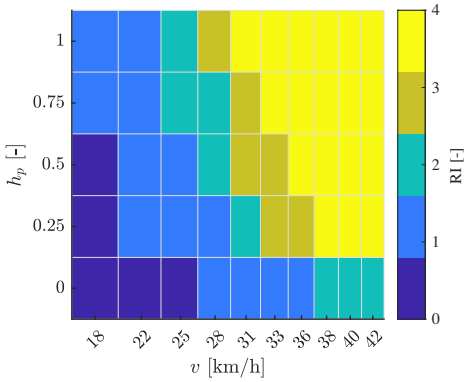
và vùng khởi phát mất ổn định.



(a) Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$



(b) Bản đồ $F_{z,\min}$



(c) Bản đồ cấp RI

Hình 4.12: *Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản J-turn theo mức chất tải và vận tốc*

Hình 4.12 cho thấy khi vận tốc tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng và $F_{z,\min}$ giảm trên toàn miền khảo sát. Vùng $F_{z,\min}$ tiến về không phù hợp với vùng $\mathrm{LTR}_{\max} = 1$ và $RI = 4$, xác nhận tính nhất quán giữa ba chỉ tiêu đánh giá. Ảnh hưởng của mức chất tải thể hiện rõ tại vùng tải trung gian và cận đầy, nơi dao động chất lỏng và sự thay đổi trọng tâm làm giảm dự trữ ổn định của hệ xe–chất lỏng.

4.4.5. Nhận xét kết quả khảo sát J-turn

Kết quả khảo sát J-turn cho thấy mô hình E2 phản ánh đúng xu hướng cơ học của quá trình mất ổn định lật ngang: khi gia tốc ngang chuẩn hóa hoặc vận tốc tăng, $\psi_{s,\max}$ và $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng, còn $F_{z,\min}$ giảm, đưa xe tiến dần đến ngưỡng khởi phát nhấc bánh và sau đó có thể đi vào trạng thái không phục hồi.

Tại vận tốc cơ sở $v = 25\,\mathrm{km/h}$, xe chưa khởi phát nhấc bánh trong toàn bộ các mức chất tải. Tuy nhiên, dao động tương đối chất lỏng đã làm tăng chuyển tải trọng ngang và giảm phản lực pháp tuyến nhỏ nhất ở các mức tải trung gian. Khi vận tốc tăng đến vùng gần ngưỡng, ảnh hưởng này trở nên rõ hơn, làm giảm v_{nr} của mô hình SL so với mô hình RG. Mức suy giảm lớn nhất trong kịch bản này xuất hiện tại $h_p = 0{,}25$, đạt 15,48%, cho thấy trạng thái chưa đầy có thể bất lợi hơn nếu chỉ xét riêng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng.

4.5. Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo

Mục này khảo sát ổn định lật ngang của ô tô xi téc khi chuyển động qua cua tay áo bằng mô hình E2 đầy đủ. Kịch bản cua tay áo đại diện cho trường hợp xe đi qua đường cong bán kính nhỏ, trong đó gia tốc ngang duy trì một phía trong thời gian tương đối dài. Các chỉ tiêu đánh giá gồm $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

Trong kịch bản này, mặt đường không xét mấp mô cục bộ. Hai trường hợp được khảo sát gồm không siêu cao và có siêu cao thuận tại đoạn cong. Miền vận tốc được quét sơ bộ với bước $5\,\mathrm{km/h}$ để khoanh vùng sự kiện; các ngưỡng được xác định bằng khảo sát cục bộ với bước $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$.

4.5.1. Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở

Đáp ứng của ô tô xi téc được khảo sát tại vận tốc cơ sở $v = 20\,\mathrm{km/h}$. Tại vận tốc này, xe chưa khởi phát nhấc bánh trong cả hai trường hợp không siêu cao và có siêu cao. Vì vậy, kết quả được dùng để đánh giá dự trữ ổn định và ảnh hưởng của siêu cao đến các chỉ tiêu ψ_s, α, $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI.

Kết quả trong Bảng 4.12 cho thấy siêu cao thuận làm giảm $\mathrm{LTR}_{\max}$ và tăng $F_{z,\min}$ ở tất cả các mức chất tải. Tại $h_p = 1{,}00$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ giảm từ 0,733 xuống 0,565, trong khi $F_{z,\min}$ tăng từ $12{,}687\,\mathrm{kN}$ lên $20{,}645\,\mathrm{kN}$. Tại $h_p = 0{,}75$, cấp RI giảm từ 2 xuống 1 khi xét siêu cao thuận, thể hiện sự tăng dự trữ ổn định lật ngang.

Đối với các mức tải chưa đầy, siêu cao thuận không làm triệt tiêu dao động tương đối của chất lỏng. Tại $h_p = 0{,}25$ và $h_p = 0{,}50$, $\alpha_{\max}$ trong trường hợp có siêu

Bảng 4.12: *Đáp ứng ổn định lật ngang của mô hình E2 trong kịch bản cua tay áo tại* $v = 20\,\mathrm{km/h}$

h_p	Siêu cao	$\psi_{s,\max}$ (deg)	$\alpha_{\max}$ (deg)	$\mathrm{LTR}_{\max}$ (-)	$F_{z,\min}$ (kN)	RI (-)
0,00	Không	0,957	0,000	0,287	8,583	0
	Có	2,750	0,000	0,227	9,307	0
0,25	Không	3,045	3,486	0,459	11,290	1
	Có	1,062	10,155	0,377	13,015	1
0,50	Không	5,310	0,666	0,543	13,585	1
	Có	0,767	7,157	0,441	16,641	1
0,75	Không	7,989	5,010	0,617	14,770	2
	Có	2,556	4,279	0,481	20,030	1
1,00	Không	11,992	0,000	0,733	12,687	2
	Có	5,488	0,000	0,565	20,645	1

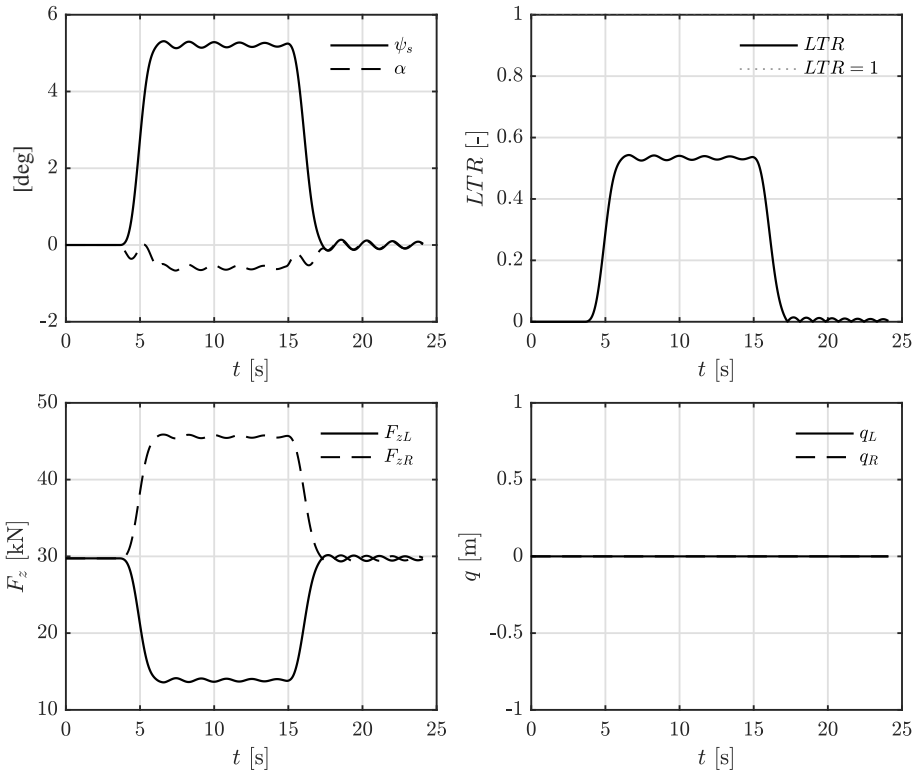
cao lần lượt đạt 10,155° và 7,157°, lớn hơn trường hợp không siêu cao. Tuy nhiên, do siêu cao làm giảm gia tốc ngang hiệu dụng, các chỉ tiêu $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI vẫn được cải thiện. Điều này cho thấy đánh giá ổn định lật ngang cần xét đồng thời dao động chất lỏng, phản lực pháp tuyến và hệ số chuyển tải trọng ngang, không chỉ xét riêng biên độ $\alpha(t)$.

Hình 4.13 minh họa đáp ứng tại mức tải đại diện $h_p = 0{,}50$. Sự khác biệt giữa hai trường hợp mặt đường thể hiện qua dao động lắc ngang, dao động tương đối của chất lỏng, phản lực pháp tuyến và $\mathrm{LTR}(t)$, qua đó làm rõ tác dụng có lợi của siêu cao thuận đối với dự trữ ổn định lật ngang.

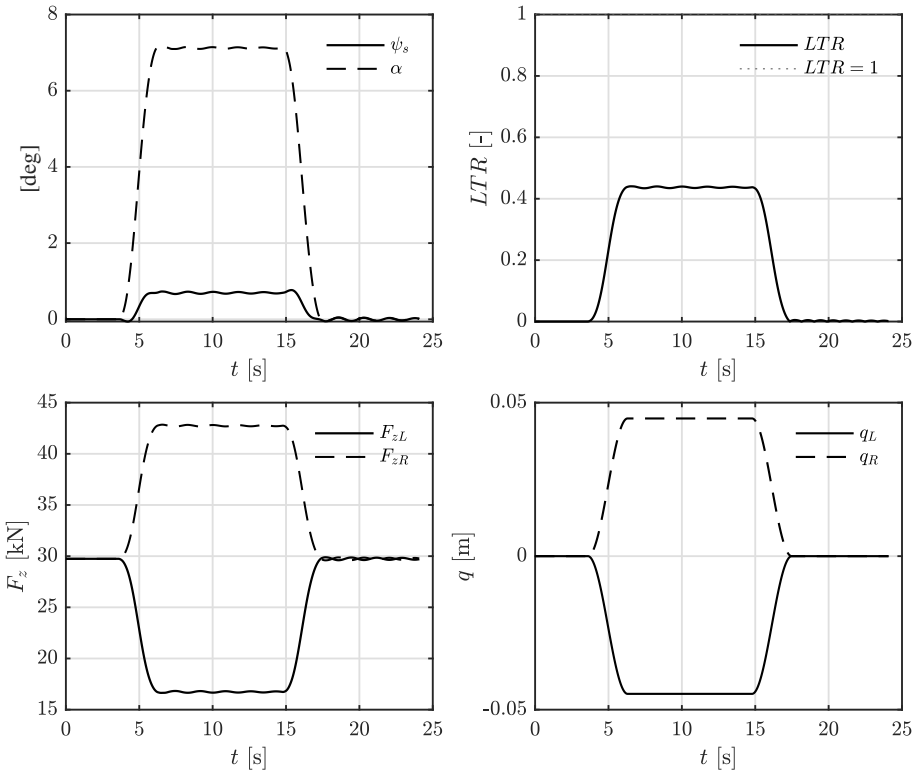
4.5.2. Ảnh hưởng của siêu cao đến ổn định lật ngang

Ảnh hưởng của siêu cao được đánh giá bằng cách so sánh hai trường hợp $\varphi_r = 0$ và $\varphi_r = \varphi_0$. Về cơ học, siêu cao thuận làm giảm gia tốc ngang hiệu dụng tác dụng lên hệ xe–chất lỏng, do đó làm giảm mô men gây lắc ngang, giảm chuyển tải trọng ngang và tăng phản lực pháp tuyến phía giảm tải.

Hình 4.14 cho thấy ảnh hưởng có lợi của siêu cao thể hiện rõ hơn ở các mức tải cao, nơi chuyển tải trọng ngang lớn và phản lực pháp tuyến phía giảm tải dễ tiến gần ngưỡng mất tiếp xúc. Ở vận tốc cơ sở, siêu cao làm giảm cấp RI của $h_p = 0{,}75$ và $h_p = 1{,}00$ từ 2 xuống 1. Tuy nhiên, siêu cao thuận chỉ làm tăng dự trữ ổn định, không loại bỏ nguy cơ mất ổn định khi xe đi qua cua bán kính nhỏ với vận tốc cao.

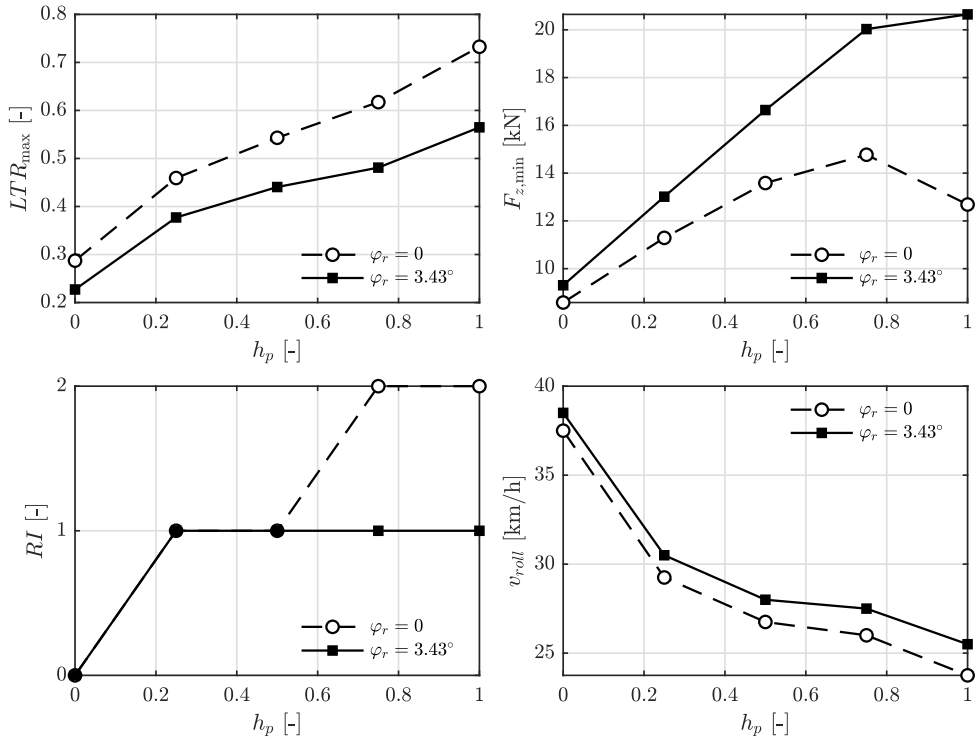


(a) Không siêu cao



(b) Có siêu cao

Hình 4.13: *Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản cua tay áo tại* $h_p = 0{,}50$, $v = 20\,\mathrm{km/h}$



Hình 4.14: *Ảnh hưởng của siêu cao đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo*

4.5.3. Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi

Trong kịch bản cua tay áo, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr} được xác định theo tiêu chí đã nêu ở Mục 4.2.5. Kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc nhỏ được trình bày trong Bảng 4.13.

Bảng 4.13: *Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua tay áo theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc* $\Delta v = 0{,}25\,\text{km/h}$

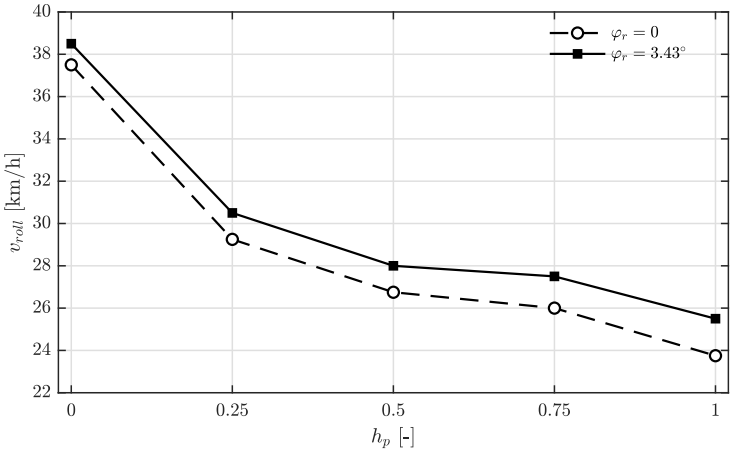
h_p	Siêu cao	v_{lift} (km/h)	v_{nr} (km/h)	s_{lift} (m)	s_{nr} (m)	t_{lift} (s)	t_{nr} (s)
0,00	Không	37,25	37,50	34,45	60,55	3,330	5,813
	Có	38,50	38,50	35,31	73,10	3,302	6,836
0,25	Không	28,25	29,25	33,11	54,08	4,219	6,656
	Có	29,50	30,50	33,76	54,23	4,120	6,401
0,50	Không	26,00	26,75	33,35	52,30	4,618	7,038
	Có	27,50	28,00	33,23	32,40	4,350	4,165
0,75	Không	25,75	26,00	32,84	49,09	4,591	6,797
	Có	27,25	27,50	32,62	32,14	4,309	4,207
1,00	Không	23,75	23,75	33,96	43,52	5,148	6,597
	Có	25,50	25,50	34,08	34,08	4,811	4,811

Các giá trị s_{lift}, s_{nr}, t_{lift} và t_{nr} được xác định từ các ca mô phỏng tại hai vận tốc ngưỡng tương ứng. Vì vậy, chúng biểu thị vị trí sự kiện trên quỹ đạo ở từng ca mô

phỏng, không nhất thiết tạo thành một chuỗi thời gian trong cùng một ca.

Kết quả trong Bảng 4.13 cho thấy khi không xét siêu cao, ngưỡng không phục hồi giảm dần khi mức chất tải tăng. Trạng thái đầy tải $h_p = 1{,}00$ là trường hợp bất lợi nhất, với $v_{\mathrm{nr}} = 23{,}75\,\mathrm{km/h}$. Ở các mức tải trung gian, v_{nr} nằm trong khoảng $26{,}00 \div 29{,}25\,\mathrm{km/h}$, trong khi trạng thái không tải đạt $37{,}50\,\mathrm{km/h}$.

Khi có siêu cao thuận, v_{nr} tăng ở tất cả các mức tải. Tại $h_p = 1{,}00$, ngưỡng không phục hồi tăng từ 23,75 lên $25{,}50\,\mathrm{km/h}$. Tại $h_p = 0{,}25$, xe khởi phát nhấc bánh ở $29{,}50\,\mathrm{km/h}$, nhưng trạng thái không phục hồi chỉ xuất hiện từ $30{,}50\,\mathrm{km/h}$. Điều này cho thấy không nên đồng nhất $\mathrm{LTR}_{\max} = 1$ tại một thời điểm với trạng thái không phục hồi nếu phản lực pháp tuyến có thể phục hồi sau kích động.



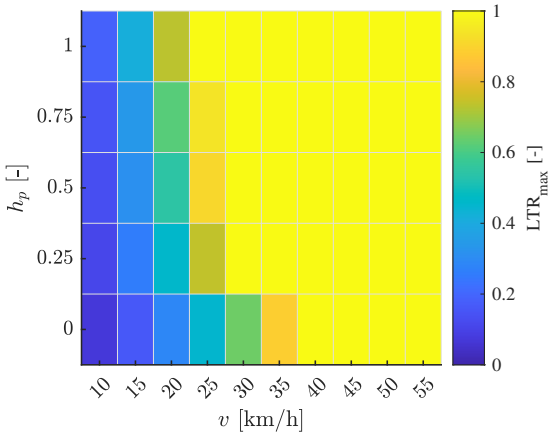
Hình 4.15: *Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua tay áo theo mức chất tải*

Hình 4.15 cho thấy siêu cao thuận làm tăng ngưỡng không phục hồi, đặc biệt ở vùng tải cao. Về mặt kỹ thuật, kết quả này xác nhận vai trò của siêu cao trong việc tăng dự trữ ổn định khi xe đi qua đường cong bán kính nhỏ, nhưng đồng thời cũng cho thấy cần duy trì khoảng dự trữ vận tốc đủ xa so với v_{nr}.

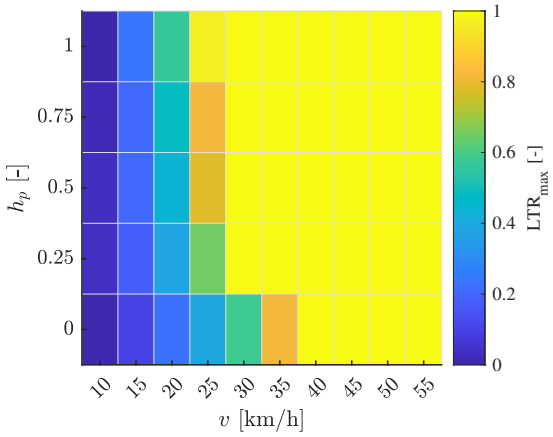
4.5.4. Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$*,* $F_{z,\min}$ *và cấp* RI *trong miền khảo sát*

Để đánh giá tổng quát ảnh hưởng đồng thời của mức chất tải và vận tốc, các bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI được xây dựng trong miền vận tốc $10 \div 55\,\mathrm{km/h}$. Miền này bao phủ các ngưỡng mất ổn định của năm mức chất tải trong cả hai trường hợp không siêu cao và có siêu cao.

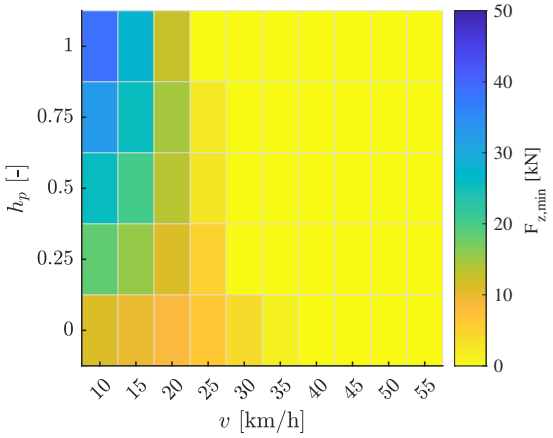
Hình 4.16 cho thấy khi vận tốc tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng và $F_{z,\min}$ giảm, đặc biệt ở



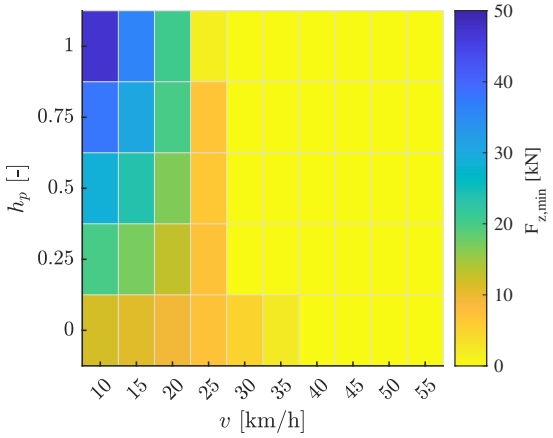
(a) LTR$_{\max}$, không siêu cao



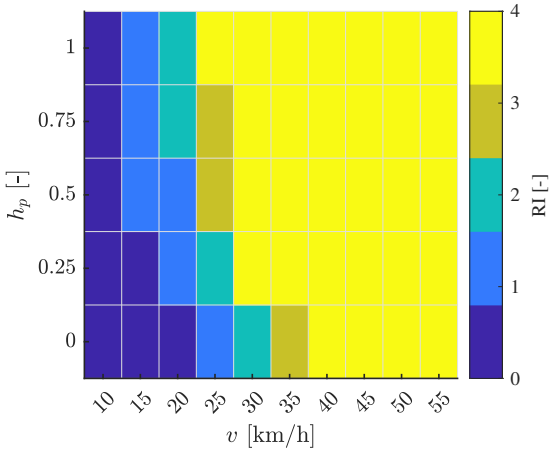
(b) LTR$_{\max}$, có siêu cao



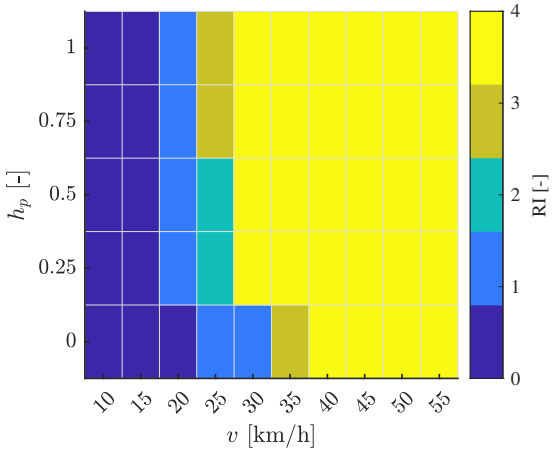
(c) $F_{z,\min}$, không siêu cao



(d) $F_{z,\min}$, có siêu cao



(e) RI, không siêu cao



(f) RI, có siêu cao

Hình 4.16: *Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo theo vận tốc và mức chất tải*

các mức tải cao. Vùng $F_{z,\min}$ tiến về 0 phù hợp với vùng LTR$_{\max} = 1$ và $RI = 4$, cho thấy sự nhất quán giữa các chỉ tiêu đánh giá. Khi có siêu cao thuận, vùng RI cao được thu hẹp và phản lực pháp tuyến nhỏ nhất tăng lên trong phần lớn miền

khảo sát.

4.5.5. Nhận xét kết quả khảo sát cua tay áo

Kết quả khảo sát cua tay áo cho thấy bán kính cong nhỏ tạo điều kiện bất lợi đối với ổn định lật ngang của ô tô xi téc. Khi vận tốc hoặc mức chất tải tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng, $F_{z,\min}$ giảm và cấp RI dịch chuyển sang vùng nguy hiểm. Ở trường hợp không siêu cao, trạng thái đầy tải $h_p = 1{,}00$ là bất lợi nhất trong miền khảo sát, với $v_{\mathrm{nr}} = 23{,}75\,\mathrm{km/h}$.

Siêu cao thuận làm giảm gia tốc ngang hiệu dụng, qua đó giảm chuyển tải trọng ngang và tăng phản lực pháp tuyến nhỏ nhất. Tuy nhiên, siêu cao không loại bỏ hoàn toàn nguy cơ mất ổn định khi xe đi qua cua bán kính nhỏ với vận tốc cao. Vì vậy, đánh giá ổn định lật ngang trong kịch bản cua tay áo cần kết hợp đồng thời $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, ngưỡng nhấc bánh, ngưỡng không phục hồi và khả năng phục hồi tiếp xúc sau kích động.

4.6. Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép

Mục này khảo sát ổn định lật ngang của ô tô xi téc trong kịch bản chuyển làn kép bằng mô hình E2 đầy đủ. Đây là kịch bản có gia tốc ngang quá độ và đổi dấu trong thời gian ngắn, do đó phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến đáp ứng lắc ngang, phản lực pháp tuyến, hệ số chuyển tải trọng ngang, ngưỡng khởi phát nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi.

Các chỉ tiêu đánh giá gồm $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, góc lắc ngang cực đại $\psi_{s,\max}$, biên độ dao động tương đối của chất lỏng $\alpha_{\max}$, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

4.6.1. Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc điển hình

Trước hết, đáp ứng của ô tô xi téc được khảo sát tại vận tốc điển hình $v = 30\,\mathrm{km/h}$. Tại vận tốc này, xe chưa khởi phát nhấc bánh theo tiêu chí $F_{z,\min} \le \varepsilon_F$ hoặc $\mathrm{LTR}_{\max} \ge 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}$, nhưng một số mức chất tải đã tiến gần vùng nguy hiểm.

Vì vậy, kết quả tại vận tốc này được dùng để đánh giá dự trữ ổn định và ảnh hưởng của mức chất tải trong điều kiện chuyển làn kép.

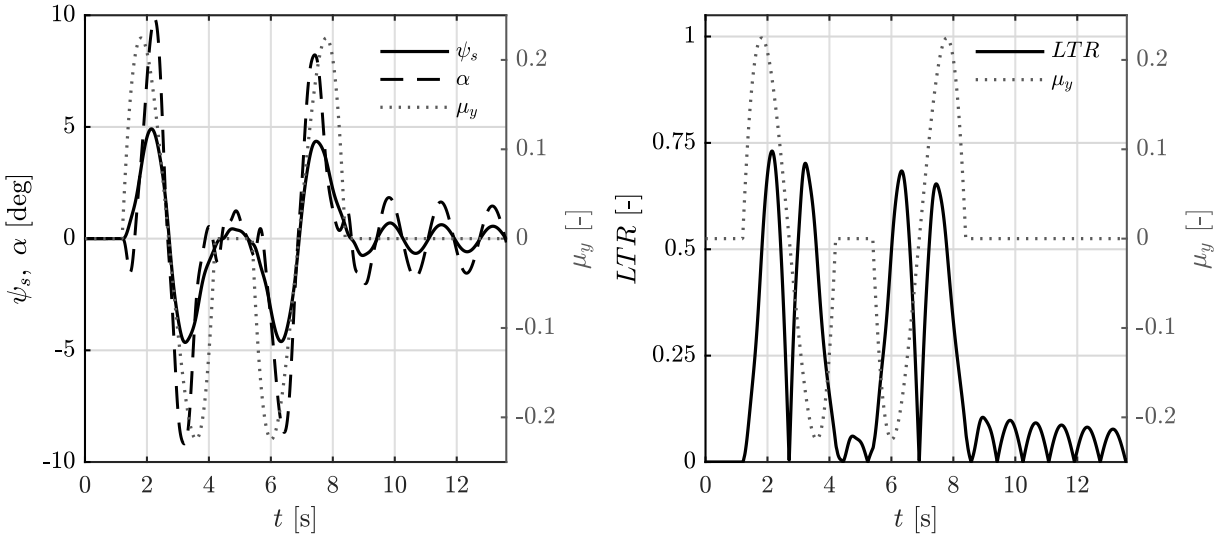
Bảng 4.14: *Đáp ứng ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép tại* $v = 30\,\mathrm{km/h}$

h_p	h_l (m)	$\psi_{s,\max}$ (deg)	$\alpha_{\max}$ (deg)	$\mathrm{LTR}_{\max}$ (-)	$F_{z,\min}$ (kN)	RI (-)
0,00	0,000	1,081	0,000	0,312	8,291	1
0,25	0,423	4,912	9,851	0,731	5,487	2
0,50	0,710	9,015	4,420	0,919	2,366	3
0,75	0,997	13,034	7,644	0,994	0,228	3
1,00	1,420	15,281	0,000	0,919	3,856	3

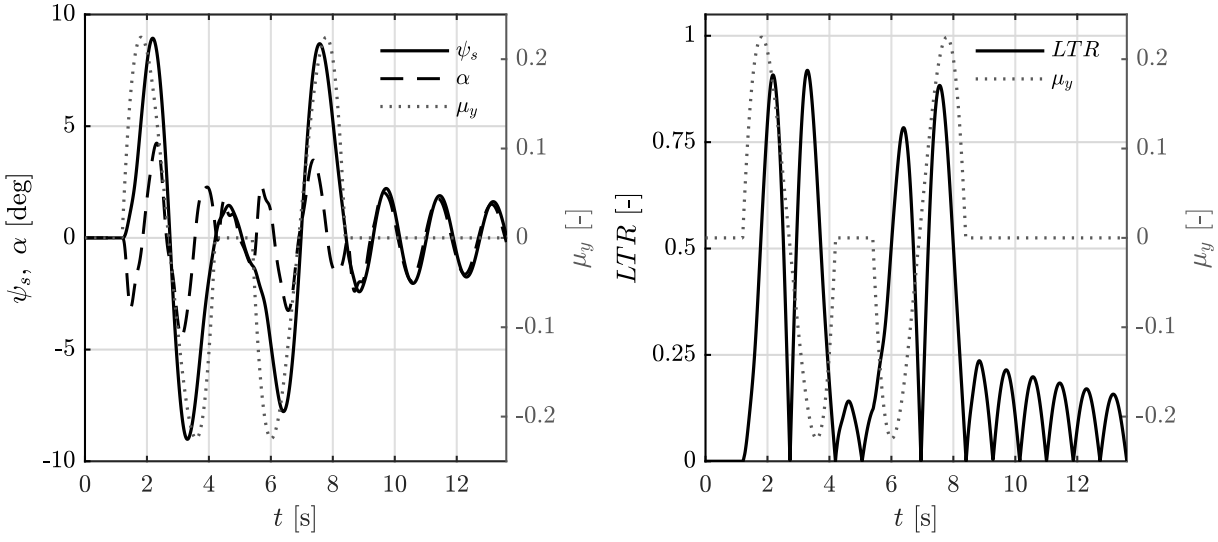
Kết quả trong Bảng 4.14 cho thấy tại $v = 30\,\mathrm{km/h}$, các mức tải $h_p = 0{,}50$, $h_p = 0{,}75$ và $h_p = 1{,}00$ đều đạt cấp $RI = 3$, tương ứng vùng nguy hiểm theo phân cấp ổn định lật ngang. Trong đó, $h_p = 0{,}75$ là trường hợp bất lợi nhất về điều kiện tiếp xúc bánh xe, với $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}994$ và $F_{z,\min} = 0{,}228\,\mathrm{kN}$, tiệm cận ngưỡng khởi phát nhấc bánh.

Đáng chú ý, trạng thái đầy tải $h_p = 1{,}00$ cho $\psi_{s,\max} = 15{,}281°$, lớn nhất trong các mức tải, nhưng không cho $\mathrm{LTR}_{\max}$ lớn nhất. Điều này cho thấy nguy cơ lật ngang trong chuyển làn kép không chỉ phụ thuộc vào biên độ lắc ngang thân xe, mà còn phụ thuộc vào phân bố tải trọng pháp tuyến và tương tác động giữa thân xe với chất lỏng trong xi téc.

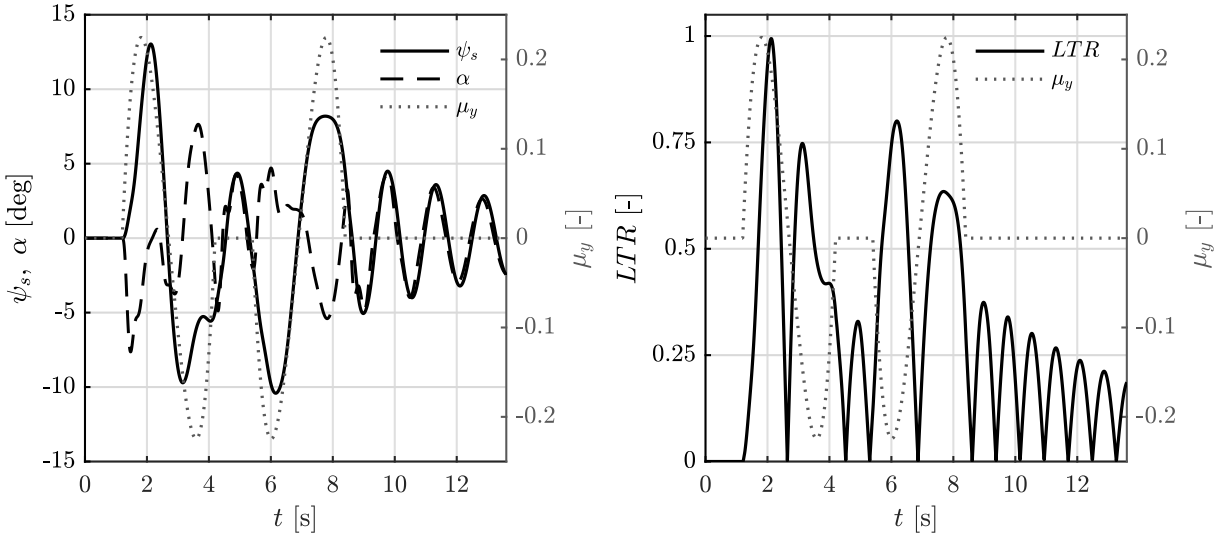
Hình 4.17 minh họa đáp ứng theo thời gian tại các mức chất tải đại diện trong kịch bản chuyển làn kép. Kết quả cho thấy trong các pha $\mu_y(t)$ đổi dấu, đáp ứng của hệ xe–chất lỏng phụ thuộc rõ vào mức chất tải. Ở các mức tải trung gian và cận đầy, dao động tương đối của chất lỏng làm tăng biên độ lắc ngang và làm $\mathrm{LTR}(t)$ tiến gần vùng nguy hiểm hơn so với trường hợp mức tải thấp. Điều này cho thấy ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ổn định lật ngang trong chuyển làn kép không chỉ thể hiện qua giá trị cực đại của LTR, mà còn qua quan hệ thời gian giữa kích thích ngang $\mu_y(t)$, dao động thân xe và dao động chất lỏng.



(a) $h_p = 0{,}25$



(b) $h_p = 0{,}50$



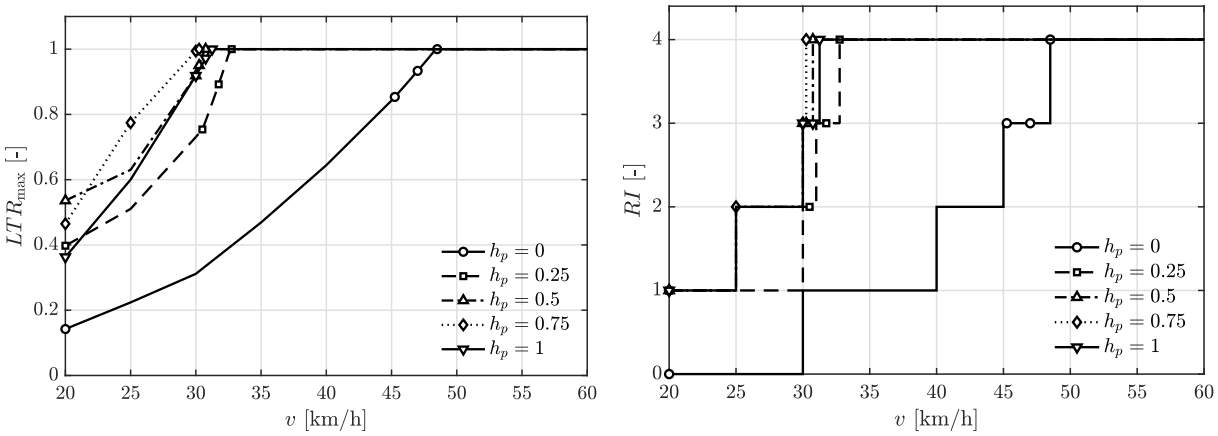
(c) $h_p = 0{,}75$

Hình 4.17: *Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản chuyển làn kép tại* $v = 30\,\mathrm{km/h}$

4.6.2. Ảnh hưởng của vận tốc và mức chất tải đến $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ *và* RI

Để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của vận tốc và mức chất tải, các mô phỏng được thực hiện trên lưới vận tốc kết hợp. Trước hết, miền vận tốc $20 \div 60\,\mathrm{km/h}$ được khảo sát sơ bộ với bước $5\,\mathrm{km/h}$ nhằm nhận diện xu hướng biến thiên của các chỉ tiêu. Sau đó, các vùng lân cận ngưỡng, nơi $\mathrm{LTR}_{\max}$ tiệm cận 1, $F_{z,\min}$ tiến về 0 hoặc cấp RI thay đổi, được khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$.

Với mỗi tổ hợp (h_p, v), các chỉ tiêu $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và cấp RI được xác định từ đáp ứng của mô hình E2 đầy đủ. Cách bố trí lưới vận tốc này cho phép vừa quan sát xu hướng tổng quát trên toàn miền khảo sát, vừa mô tả rõ hơn sự chuyển tiếp của hệ xe–chất lỏng trong vùng gần ngưỡng mất ổn định.



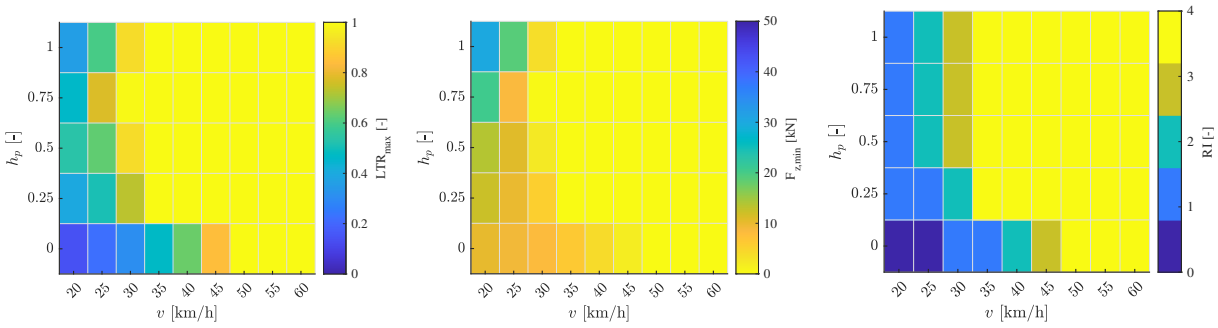
(a) Biến thiên $\mathrm{LTR}_{\max}$ theo vận tốc (b) Biến thiên cấp RI theo vận tốc

Hình 4.18: *Ảnh hưởng của vận tốc và mức chất tải đến* $\mathrm{LTR}_{\max}$ *và cấp RI trong kịch bản chuyển làn kép*

Hình 4.18 cho thấy khi vận tốc tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng rõ rệt và cấp RI dịch chuyển dần sang vùng nguy hiểm. Do RI là chỉ tiêu phân cấp rời rạc, đồ thị RI có dạng bậc; các bước nhảy của RI phản ánh các vùng vận tốc tại đó trạng thái ổn định lật ngang chuyển từ mức an toàn sang chuyển tải nhiều, nguy hiểm và khởi phát nhấc bánh.

Ảnh hưởng của mức chất tải thể hiện không đồng đều trên toàn miền vận tốc. Các mức tải trung gian và cận đầy, đặc biệt là $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$, đạt vùng nguy hiểm ở vận tốc thấp hơn so với trường hợp không tải. Điều này cho thấy trong kịch bản chuyển làn kép, nguy cơ mất ổn định lật ngang không chỉ phụ thuộc vào

vận tốc mà còn phụ thuộc mạnh vào mức chất tải và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc.



(a) Bản đồ $\mathrm{LTR}_{\max}$ (b) Bản đồ $F_{z,\min}$ (c) Bản đồ cấp RI

Hình 4.19: *Bản đồ các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản chuyển làn kép*

Hình 4.19 cho thấy vùng nguy hiểm tập trung ở vận tốc cao và tại các mức chất tải chưa đầy. Vùng $F_{z,\min} = 0$ phù hợp với vùng $\mathrm{LTR}_{\max} = 1$ và $RI = 4$, xác nhận tính nhất quán giữa ba chỉ tiêu đánh giá. Ở các vùng $F_{z,\min} > 0$ nhưng có giá trị nhỏ, xe vẫn còn tiếp xúc hai bên bánh xe nhưng dự trữ ổn định lật ngang đã giảm đáng kể.

4.6.3. Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi

Trong kịch bản chuyển làn kép, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} được xác định là vận tốc nhỏ nhất tại đó một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường:

$$F_{z,\min} \leq \varepsilon_F \qquad \text{hoặc} \qquad \mathrm{LTR}_{\max} \geq 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}. \tag{4.38}$$

Ngưỡng không phục hồi v_{nr} được xác định là vận tốc nhỏ nhất tại đó xe không phục hồi sau nhấc bánh hoặc đạt giới hạn lật hình học $|\psi_s| = 90°$. Miền vận tốc được khảo sát sơ bộ để xác định khoảng xuất hiện sự kiện. Sau đó, vùng lân cận ngưỡng được khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$.

Các giá trị trong Bảng 4.15 được xác định từ khảo sát cục bộ trong vùng lân cận ngưỡng với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$. Các cặp $(s_{\mathrm{lift}}, t_{\mathrm{lift}})$ và $(s_{\mathrm{nr}}, t_{\mathrm{nr}})$ tương ứng với hai ca mô phỏng tại hai vận tốc ngưỡng khác nhau, nên không nhất thiết thuộc cùng một diễn biến thời gian. Một số giá trị $s_{\mathrm{nr}} > 80\,\mathrm{m}$ cho thấy trạng thái không phục hồi xuất hiện sau khi xe đã đi qua đoạn chuyển làn chính và tiếp tục

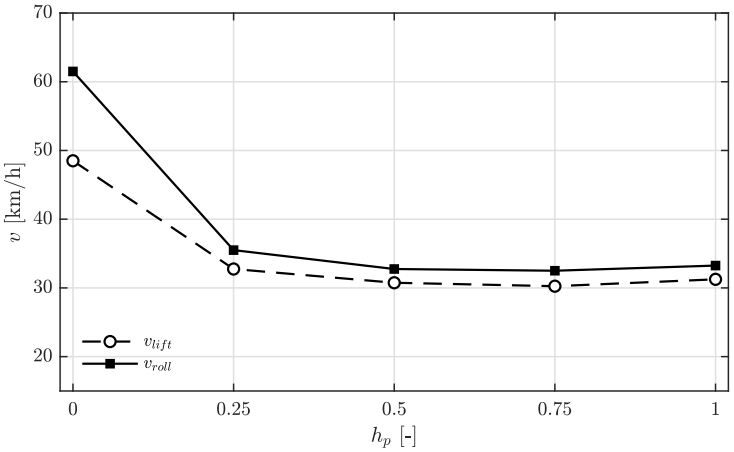
Bảng 4.15: *Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép*

h_p	h_l (m)	v_{lift} (km/h)	v_{nr} (km/h)	s_{lift} (m)	s_{nr} (m)	t_{lift} (s)	t_{nr} (s)
0,00	0,000	48,50	61,50	14,48	112,11	1,075	6,563
0,25	0,423	32,75	35,50	27,55	82,41	3,029	8,357
0,50	0,710	30,75	32,75	27,22	78,85	3,187	8,668
0,75	0,997	30,25	32,50	17,34	60,74	2,064	6,728
1,00	1,420	31,25	33,25	14,01	27,86	1,614	3,017

chuyển động trên đoạn sau thao tác.

Kết quả cho thấy mức tải $h_p = 0{,}75$ là bất lợi nhất trong miền khảo sát, với $v_{\text{lift}} = 30{,}25\,\text{km/h}$ và $v_{\text{nr}} = 32{,}50\,\text{km/h}$. Mức $h_p = 0{,}50$ có ngưỡng nhấc bánh xấp xỉ, $v_{\text{lift}} = 30{,}75\,\text{km/h}$, nhưng ngưỡng không phục hồi cao hơn một chút, $v_{\text{nr}} = 32{,}75\,\text{km/h}$. Điều này cho thấy vùng tải trung gian và cận đầy là vùng đặc biệt bất lợi trong kịch bản chuyển làn kép.

Trường hợp không tải $h_p = 0$ có dự trữ ổn định lớn nhất, với $v_{\text{lift}} = 48{,}50\,\text{km/h}$ và $v_{\text{nr}} = 61{,}50\,\text{km/h}$. Khi đầy tải $h_p = 1{,}00$, ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi giảm mạnh do khối lượng và vị trí trọng tâm của hệ xe tăng, mặc dù không còn dao động tương đối chất lỏng theo quy ước mô hình.



Hình 4.20: *Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép theo mức chất tải*

Hình 4.20 cho thấy khoảng cách giữa v_{lift} và v_{nr} phản ánh vùng vận tốc mà xe có thể xuất hiện nhấc bánh tạm thời nhưng vẫn còn khả năng phục hồi. Khi hai ngưỡng gần nhau, diễn biến từ khởi phát nhấc bánh đến trạng thái không phục hồi xảy ra nhanh hơn.

4.6.4. Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định

Để lượng hóa riêng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng, kết quả của mô hình E2 tải lỏng SL được đối sánh với mô hình chất lỏng quy đổi cứng RG. Mức suy giảm ngưỡng không phục hồi do dao động tương đối chất lỏng được xác định:

$$\eta_{v,\mathrm{nr}} = \frac{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}} - v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}}{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}} \times 100\%. \tag{4.39}$$

Bảng 4.16: *Đối sánh ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép*

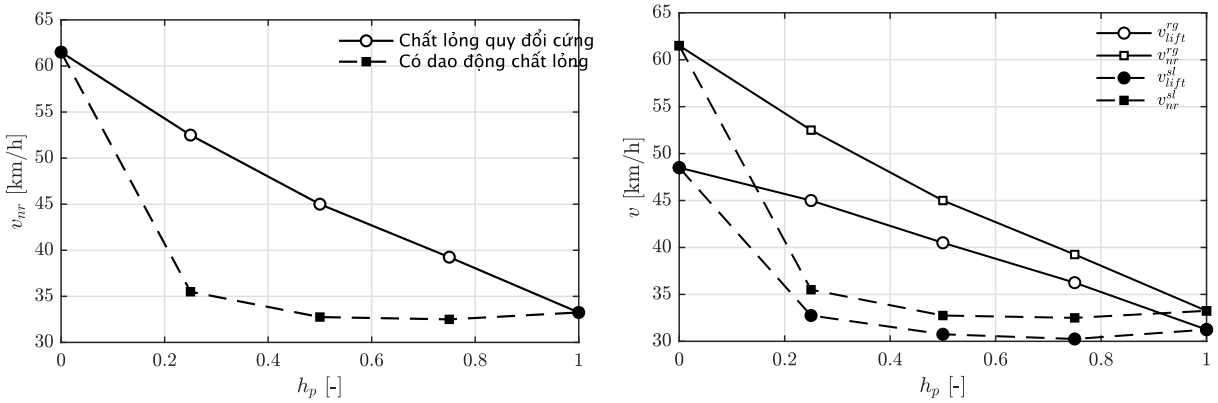
h_p	$v_{\mathrm{lift}}^{\mathrm{RG}}$ (km/h)	$v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}$ (km/h)	$v_{\mathrm{lift}}^{\mathrm{SL}}$ (km/h)	$v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}$ (km/h)	$\eta_{v,\mathrm{nr}}$ (%)
0,00	48,50	61,50	48,50	61,50	0,00
0,25	45,00	52,50	32,75	35,50	32,38
0,50	40,50	45,00	30,75	32,75	27,22
0,75	36,25	39,25	30,25	32,50	17,20
1,00	31,25	33,25	31,25	33,25	0,00

Kết quả trong Bảng 4.16 cho thấy dao động tương đối chất lỏng làm giảm mạnh ngưỡng không phục hồi ở các mức tải chưa đầy. Tại $h_p = 0{,}25$, v_{nr} giảm từ 52,50 km/h xuống 35,50 km/h, tương ứng mức suy giảm 32,38%. Tại $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$, mức suy giảm lần lượt là 27,22% và 17,20%. Ở hai trạng thái biên $h_p = 0$ và $h_p = 1{,}00$, hai mô hình cho cùng ngưỡng, phù hợp với quy ước mô hình chất lỏng.

Hình 4.21 cho thấy mô hình có xét dao động chất lỏng luôn cho ngưỡng vận tốc nhỏ hơn hoặc bằng mô hình chất lỏng quy đổi cứng. Sai khác lớn tập trung ở vùng tải chưa đầy, nơi chất lỏng còn khả năng dao động tương đối và có thể tạo mô men lắc ngang bổ sung.

Hình 4.22 và Hình 4.23 trình bày diễn biến động lực học trong trường hợp mô phỏng khi xuất hiện ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép. Với mỗi mức chất tải, đáp ứng của mô hình SL và mô hình RG được mô phỏng ở ngưỡng vận tốc khác nhau.

Để làm rõ quá trình phát triển mất ổn định, trên các đồ thị $\psi_s(t)$ và $F_{z,\min}(t)$ ký hiệu thời điểm phát triển lật không phục hồi $t_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{sl}}$ và $t_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{rg}}$, sao đỏ cho tải lỏng, sao



(a) Ngưỡng không phục hồi

(b) Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi

Hình 4.21: *Ảnh hưởng của dao động chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định trong kịch bản chuyển làn kép*

đỏ rỗng cho tải lỏng quy đổi cứng. Khi hai ký hiệu trùng nhau, hai mô hình có cùng thời điểm phát triển lật không phục hồi.

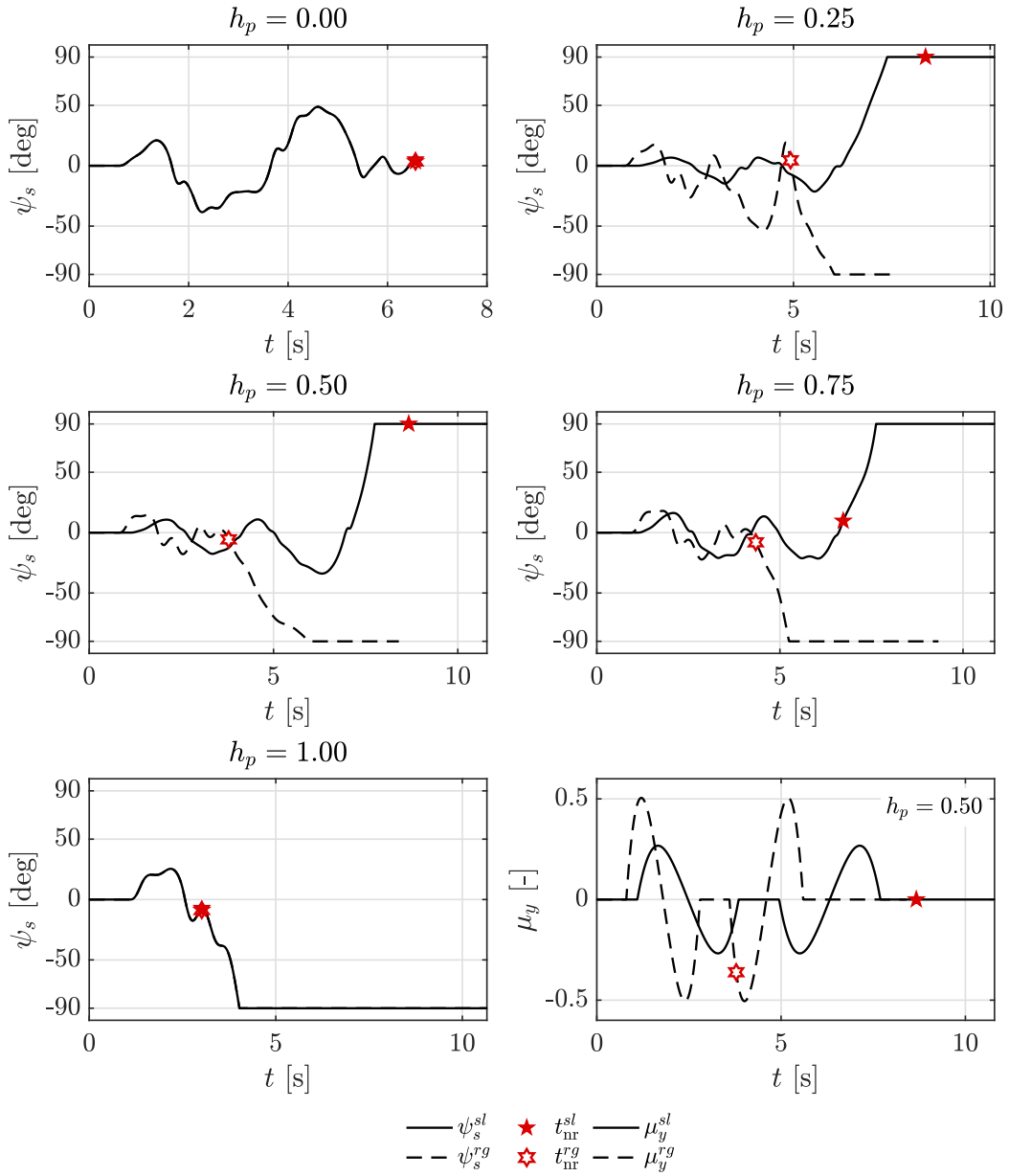
Thời điểm t_{nr} được xác định tại thời điểm bắt đầu của khoảng mất tiếp xúc cuối cùng, khi $F_{z,\min} = 0$, tương ứng với $|\mathrm{LTR}| = 1$, và tiếp xúc bánh xe không được phục hồi đến cuối quá trình mô phỏng. Vì vậy, t_{nr} là mốc khởi đầu của quá trình không phục hồi, không phải thời điểm góc lắc đạt $\pm 90°$.

4.6.5. Vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học trên quỹ đạo

Để làm rõ diễn biến không gian của quá trình mất ổn định, vị trí các sự kiện được biểu diễn trên quỹ đạo chuyển làn kép. Với mỗi mức chất tải, hai ca mô phỏng được xét: ca tại vận tốc khởi phát nhấc bánh nhưng có phục hồi và ca tại ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

Trong các hình, vòng tròn xanh biểu thị vị trí khởi phát nhấc bánh, dấu cộng xanh biểu thị vị trí phục hồi tiếp xúc, tam giác cam biểu thị các lần nhấc bánh trong ca v_{nr}, còn sao đỏ biểu thị vị trí mô phỏng đạt giới hạn lật hình học $|\psi_s| = 90°$. Các ký hiệu xuất hiện trong cùng một ô hình thuộc cùng một ca mô phỏng và cùng một vận tốc.

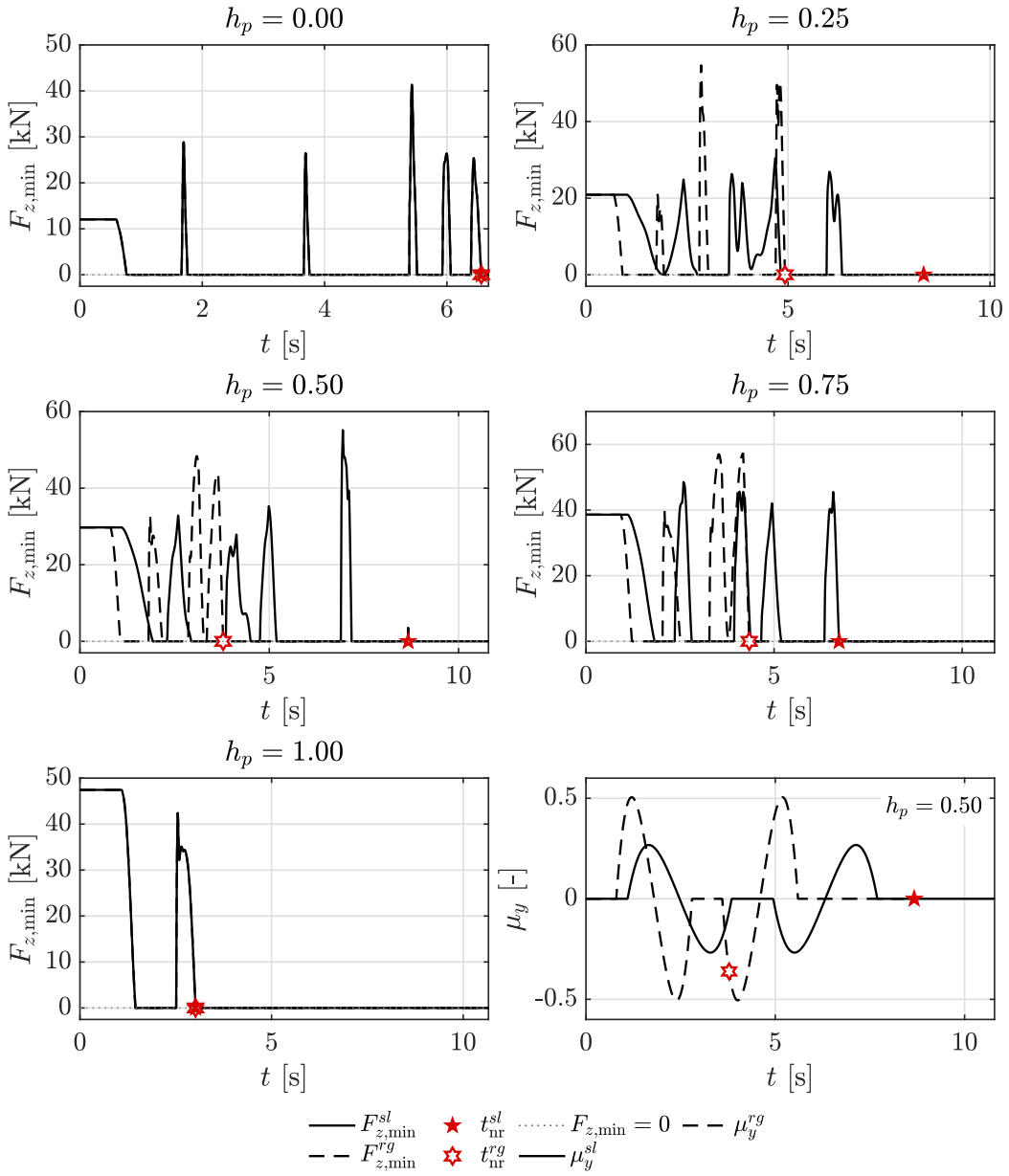
Các hình quỹ đạo cho thấy sự kiện nhấc bánh không nhất thiết xuất hiện tại cùng một vị trí đối với các mức chất tải. Ở các mức tải trung gian và cận đầy, dao



Hình 4.22: *Đáp ứng $\psi_s(t)$ và gia tốc ngang chuẩn hóa tại ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép*

động tương đối của chất lỏng làm thay đổi cả ngưỡng vận tốc lẫn vị trí xuất hiện sự kiện trên quỹ đạo. Điều này cho thấy đánh giá ổn định lật ngang trong chuyển làn kép cần xét đồng thời giá trị cực trị của các chỉ tiêu và diễn biến theo quỹ đạo, thay vì chỉ xét một giá trị ngưỡng duy nhất.

Các bảng số liệu chi tiết về vị trí và thời điểm xuất hiện các sự kiện trong từng ca mô phỏng được trình bày tại Phụ lục C.2.

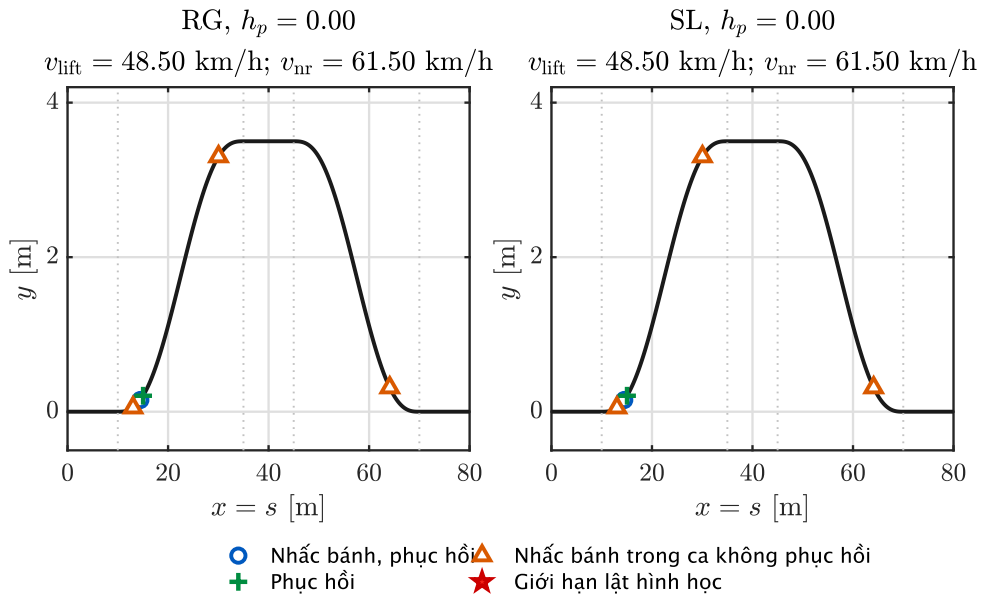


Hình 4.23: *Đáp ứng $F_{z,\min}(t)$ và gia tốc ngang chuẩn hóa tại ngưỡng không phục hồi trong kịch bản chuyển làn kép*

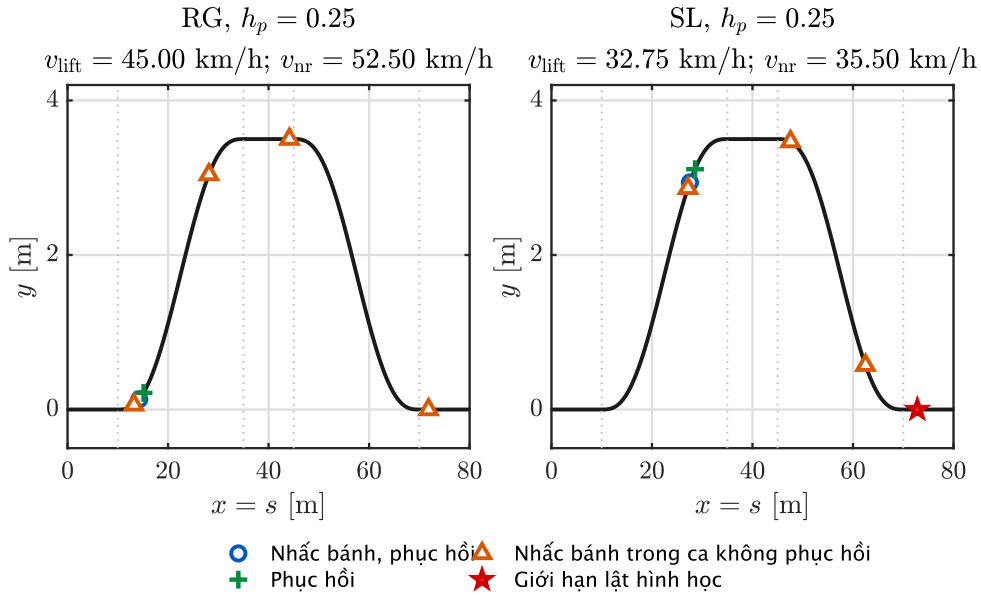
4.6.6. Nhận xét kết quả khảo sát chuyển làn kép

Kết quả khảo sát cho thấy chuyển làn kép là kịch bản bất lợi đối với ô tô xi téc do gia tốc ngang đổi dấu trong thời gian ngắn. Khi vận tốc tăng, $\mathrm{LTR}_{\max}$ tăng, $F_{z,\min}$ giảm và cấp *RI* chuyển dần sang vùng nguy hiểm. Mức chất tải ảnh hưởng rõ đến dự trữ ổn định; trong đó vùng tải trung gian và cận đầy là vùng cần đặc biệt quan tâm.

Tại vận tốc điển hình $v = 30\,\mathrm{km/h}$, mức tải $h_p = 0{,}75$ đã đạt $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}994$ và $F_{z,\min} = 0{,}228\,\mathrm{kN}$, tiệm cận điều kiện khởi phát nhấc bánh. Kết quả khảo sát cục



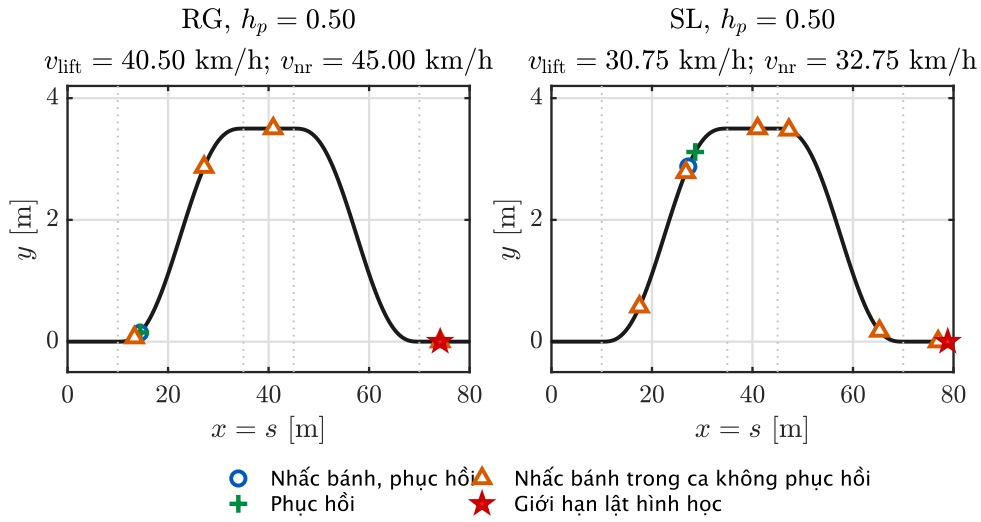
Hình 4.24: *Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại* $h_p = 0{,}00$



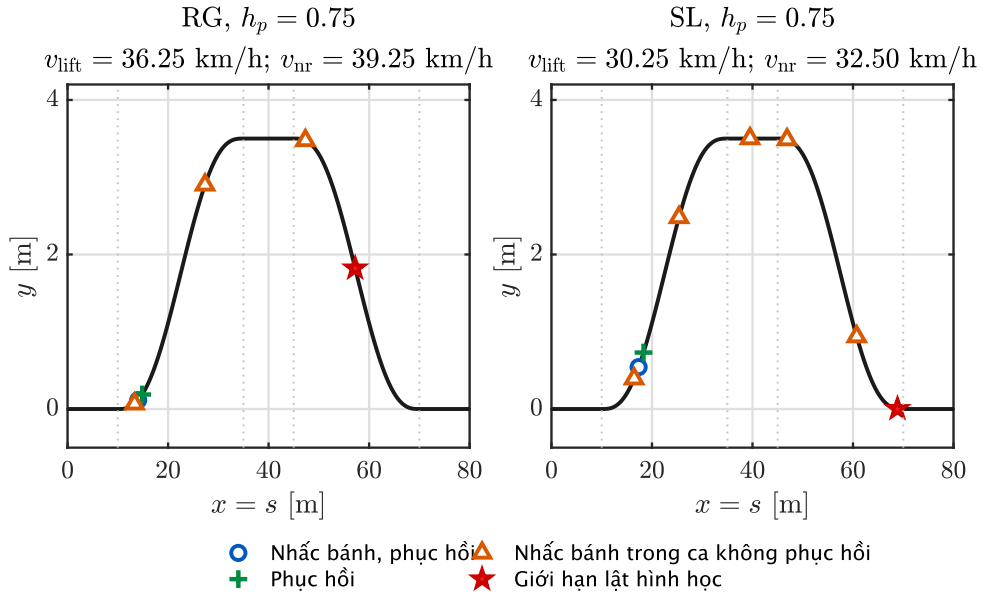
Hình 4.25: *Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại* $h_p = 0{,}25$

bộ vùng lân cận ngưỡng cho thấy mức này có $v_{\text{lift}} = 30{,}25\,\text{km/h}$ và $v_{\text{nr}} = 32{,}50\,\text{km/h}$. Mức $h_p = 0{,}50$ có ngưỡng tương ứng xấp xỉ, với $v_{\text{lift}} = 30{,}75\,\text{km/h}$ và $v_{\text{nr}} = 32{,}75\,\text{km/h}$.

Đối sánh với mô hình chất lỏng quy đổi cứng cho thấy dao động tương đối của chất lỏng làm giảm mạnh ngưỡng không phục hồi trong vùng tải chưa đầy. Mức suy giảm lớn nhất xuất hiện tại $h_p = 0{,}25$, đạt 32,38%; tiếp theo là $h_p = 0{,}50$, đạt 27,22%. Kết quả này cho thấy mức tải bất lợi không nhất thiết là đầy tải, mà phụ thuộc vào sự kết hợp giữa khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm và khả năng dao



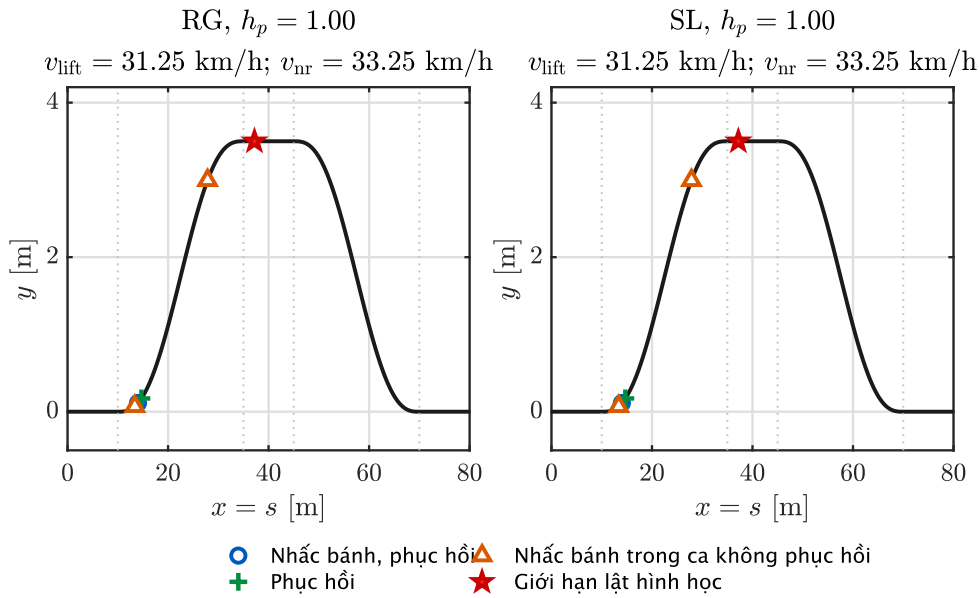
Hình 4.26: *Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại* $h_p = 0{,}50$



Hình 4.27: *Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại* $h_p = 0{,}75$

động tương đối của chất lỏng trong xi téc.

Như vậy, trong kịch bản chuyển làn kép, các mức tải chưa đầy cần được đánh giá bằng mô hình có xét dao động tương đối chất lỏng. Việc chỉ sử dụng mô hình chất lỏng quy đổi cứng có thể đánh giá cao dự trữ ổn định lật ngang và bỏ qua nguy cơ tăng nhanh chuyển tải trọng ngang trong các thao tác đổi hướng đột ngột.



Hình 4.28: *Đối sánh vị trí các sự kiện nhấc bánh, phục hồi và đạt giới hạn lật hình học tại $h_p = 1{,}00$*

4.7. Khảo sát ổn định lật ngang trong kịch bản cua chữ S

Mục này khảo sát ổn định lật ngang của ô tô xi téc trong kịch bản cua chữ S bằng mô hình E2 đầy đủ. Đây là kịch bản có hai cung cong ngược chiều liên tiếp, làm gia tốc ngang đổi dấu theo quãng đường. Vì vậy, đáp ứng lắc ngang của thân xe và dao động tương đối của chất lỏng phụ thuộc mạnh vào lịch sử kích thích.

Các chỉ tiêu đánh giá gồm $\text{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, góc lắc ngang cực đại $\psi_{s,\max}$, biên độ dao động tương đối của chất lỏng $\alpha_{\max}$, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr}. Hai trường hợp mặt đường được xét gồm không siêu cao và có siêu cao thuận đổi dấu theo chiều cong, với độ dốc siêu cao cơ sở $e = 6\%$, tương ứng $\varphi_0 = 3{,}43°$.

4.7.1. Đáp ứng ổn định lật ngang tại vận tốc cơ sở

Trước hết, đáp ứng của ô tô xi téc được khảo sát tại vận tốc cơ sở $v = 25\,\text{km/h}$. Tại vận tốc này, xe chưa xuất hiện trạng thái không phục hồi, nhưng một số mức chất tải đã tiến gần vùng nguy hiểm theo $\text{LTR}_{\max}$ và cấp RI. Do đó, kết quả tại vận tốc cơ sở được dùng để đánh giá dự trữ ổn định và ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu đến đáp ứng động lực học hệ xe–chất lỏng.

Bảng 4.17: *Đáp ứng ổn định lật ngang của mô hình E2 trong kịch bản cua chữ S tại* $v = 25\,\mathrm{km/h}$

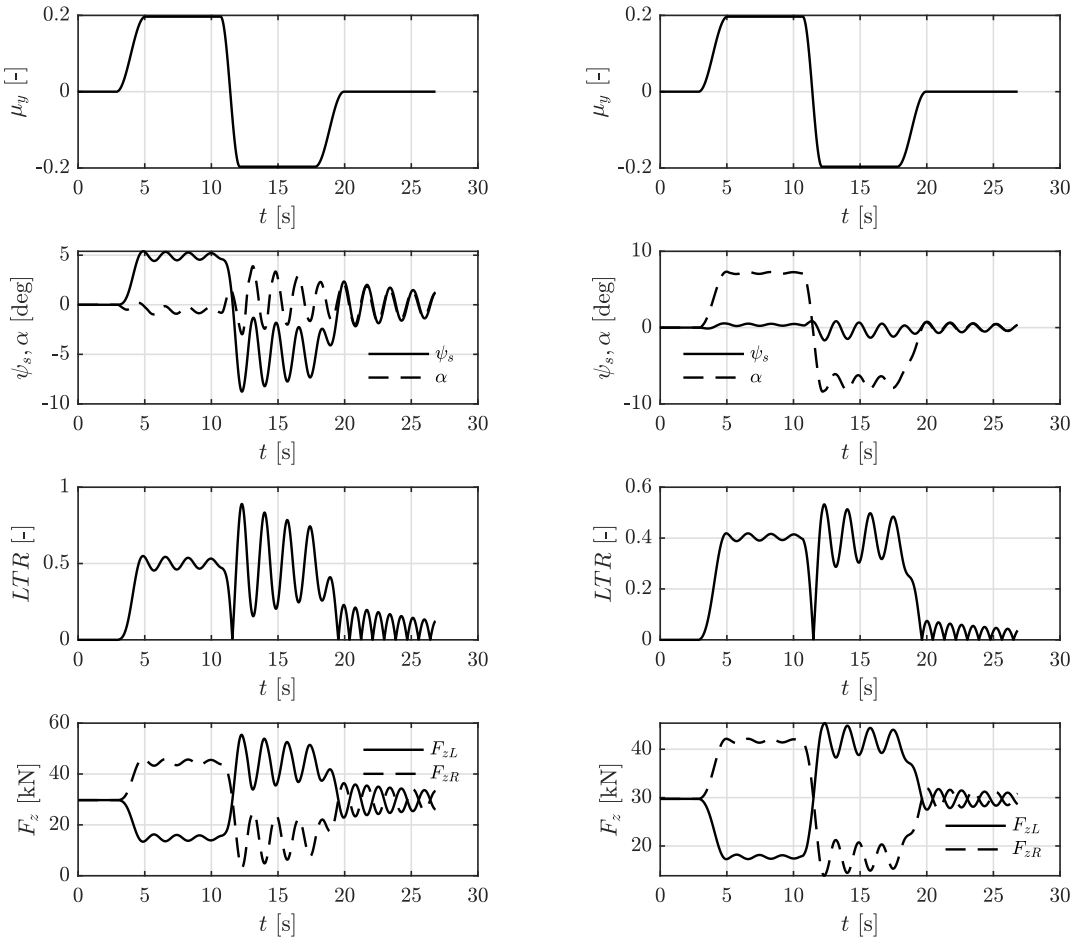
h_p	Siêu cao	$\psi_{s,\max}$ (deg)	$\alpha_{\max}$ (deg)	$\mathrm{LTR}_{\max}$ (-)	$F_{z,\min}$ (kN)	RI (-)
0,00	Không	0,922	0,000	0,2749	8,732	0
	Có	2,894	0,000	0,2225	9,363	0
0,25	Không	4,742	8,666	0,7077	5,979	2
	Có	1,670	11,216	0,4134	12,204	1
0,50	Không	8,760	3,890	0,8901	3,219	3
	Có	1,672	8,387	0,5324	13,843	1
0,75	Không	11,462	7,965	0,8754	4,792	3
	Có	3,557	5,965	0,5551	17,109	1
1,00	Không	11,752	0,000	0,7152	13,511	2
	Có	4,959	0,000	0,5313	22,234	1

Kết quả trong Bảng 4.17 cho thấy, khi không xét siêu cao, các mức tải trung gian và cận đầy là vùng bất lợi rõ rệt. Tại $h_p = 0{,}50$, $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}8901$, $F_{z,\min} = 3{,}219\,\mathrm{kN}$ và cấp $RI = 3$. Tại $h_p = 0{,}75$, $\mathrm{LTR}_{\max} = 0{,}8754$ và cấp $RI = 3$. Như vậy, tại $v = 25\,\mathrm{km/h}$, xe chưa khởi phát nhấc bánh nhưng đã tiến vào vùng nguy hiểm theo phân cấp ổn định lật ngang.

Khi xét siêu cao thuận đổi dấu theo chiều cong, $\mathrm{LTR}_{\max}$ giảm rõ ở tất cả các mức chất tải, đồng thời $F_{z,\min}$ tăng đáng kể. Tại $h_p = 0{,}50$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ giảm từ 0,8901 xuống 0,5324; tại $h_p = 0{,}75$, giảm từ 0,8754 xuống 0,5551. Điều này khẳng định vai trò có lợi của siêu cao thuận khi dấu siêu cao được bố trí phù hợp với chiều cong của từng cung.

Tuy nhiên, biên độ dao động tương đối của chất lỏng không giảm đơn điệu theo siêu cao. Tại $h_p = 0{,}25$ và $h_p = 0{,}50$, $\alpha_{\max}$ trong trường hợp có siêu cao lớn hơn trường hợp không siêu cao. Kết quả này cho thấy khi xe đi qua vùng chuyển tiếp đổi dấu, dao động tương đối của chất lỏng có thể được kích thích mạnh hơn, mặc dù $\mathrm{LTR}_{\max}$ và nguy cơ nhấc bánh giảm.

Hình 4.29 minh họa đáp ứng tại mức tải đại diện $h_p = 0{,}50$. Sự khác biệt giữa hai trường hợp mặt đường cho thấy siêu cao thuận đổi dấu làm giảm chuyển tải trọng ngang, nhưng không triệt tiêu dao động tương đối của chất lỏng trong quá trình xe đi qua hai cung cong ngược chiều.



(a) Không siêu cao (b) Có siêu cao

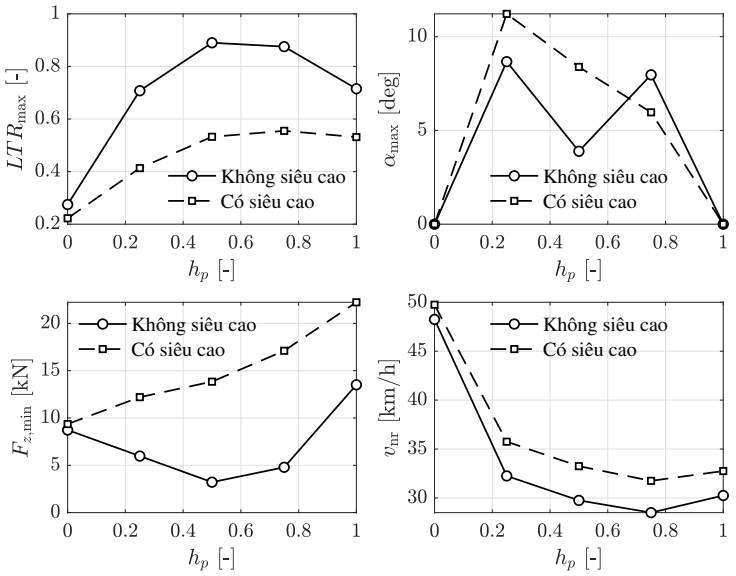
Hình 4.29: *Đáp ứng theo thời gian trong kịch bản cua chữ S tại* $h_p = 0{,}50$, $v = 25\,\mathrm{km/h}$

4.7.2. Ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu đến ổn định lật ngang

Trong kịch bản cua chữ S, siêu cao chỉ có tác dụng có lợi khi dấu của $\varphi_r(s)$ phù hợp với dấu của độ cong $\kappa(s)$. Khi xe chuyển từ cung cua thứ nhất sang cung cua thứ hai, cả $\kappa(s)$ và $\varphi_r(s)$ đều đổi dấu qua đoạn chuyển tiếp. Nếu quy luật đổi dấu không phù hợp, thành phần trọng lực theo phương ngang có thể làm tăng gia tốc ngang hiệu dụng thay vì làm giảm.

Hình 4.30 cho thấy siêu cao đổi dấu đúng chiều cong làm giảm đáng kể $\mathrm{LTR}_{\max}$, tăng $F_{z,\min}$ và giảm cấp RI, đặc biệt tại các mức tải $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$. Tại vận tốc cơ sở, cấp RI của hai mức tải này đều giảm từ 3 xuống 1 khi xét siêu cao, cho thấy tác dụng cải thiện rõ rệt của siêu cao đối với dự trữ ổn định lật ngang.

Tuy nhiên, tác dụng của siêu cao đối với dao động tương đối của chất lỏng không



Hình 4.30: *Ảnh hưởng của siêu cao đổi dấu đến các chỉ tiêu ổn định lật ngang trong kịch bản cua chữ S*

hoàn toàn đồng nhất với tác dụng đối với các chỉ tiêu lật. Cụ thể, tại $h_p = 0{,}50$, cấp RI giảm từ 3 xuống 1; tại $h_p = 0{,}75$, cấp RI cũng giảm từ 3 xuống 1. Điều này cho thấy trong cua chữ S, việc bố trí siêu cao phù hợp với chiều cong có thể làm tăng đáng kể dự trữ ổn định lật ngang. Tuy nhiên, tác dụng của siêu cao đối với dao động tương đối của chất lỏng không biến thiên cùng chiều với các chỉ tiêu ổn định lật ngang ở mọi mức tải. Tại $h_p = 0{,}25$ và $h_p = 0{,}50$, mặc dù siêu cao làm giảm $LTR_{\max}$, tăng $F_{z,\min}$ và giảm cấp RI, $\alpha_{\max}$ lại tăng tương ứng từ 8,666° lên 11,216° và từ 3,890° lên 8,387°. Ngược lại, tại $h_p = 0{,}75$, $\alpha_{\max}$ giảm từ 7,965° xuống 5,965°, đồng thời các chỉ tiêu ổn định lật ngang đều được cải thiện. Kết quả này cho thấy siêu cao đổi dấu làm giảm nguy cơ lật nhưng không nhất thiết làm giảm biên độ dao động tương đối của chất lỏng ở mọi mức tải. Xu hướng trên phù hợp về mặt cơ chế với phân tích tại Mục 4.3.3: đáp ứng của hệ không chỉ phụ thuộc vào biên độ $\alpha(t)$, mà còn phụ thuộc vào khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm và quan hệ pha giữa $\alpha(t)$ với $\psi_s(t)$.

Kết quả này cho thấy trong kịch bản cua chữ S, siêu cao thuận đổi dấu theo chiều cong có thể cải thiện ổn định lật ngang theo các chỉ tiêu $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$ và RI, nhưng không nhất thiết làm giảm biên độ dao động tương đối của chất lỏng. Do đó, mức tải có $\alpha_{\max}$ lớn không nhất thiết là mức tải bất lợi nhất theo nguy cơ lật. Việc đánh giá ổn định lật ngang cần xét đồng thời dao động chất lỏng, chuyển

tải trọng ngang, phản lực pháp tuyến và khả năng phục hồi sau nhấc bánh.

4.7.3. Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi

Trong kịch bản cua chữ S, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr} được xác định theo tiêu chí đã nêu ở Mục 4.2.5. Miền vận tốc được khảo sát sơ bộ để xác định khoảng xuất hiện sự kiện; sau đó, vùng lân cận ngưỡng được khảo sát cục bộ với bước vận tốc $\Delta v = 0{,}25\,\text{km/h}$.

Bảng 4.18: *Ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua chữ S*

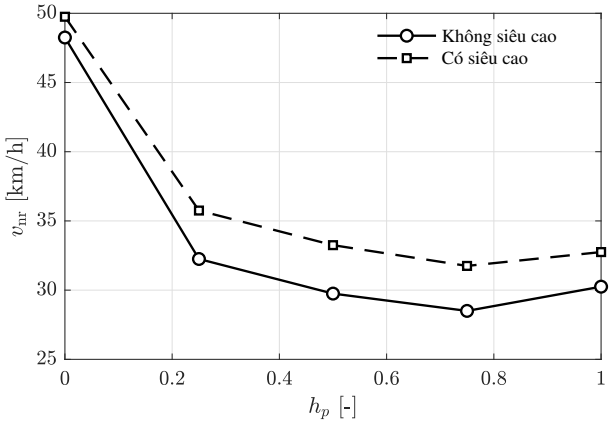
h_p	Siêu cao	v_{lift} (km/h)	v_{nr} (km/h)	s_{lift} (m)	s_{nr} (m)	t_{lift} (s)	t_{nr} (s)
0,00	Không siêu cao	47,00	48,25	84,20	74,64	6,449	5,569
0,25	Không siêu cao	29,25	32,25	85,38	117,81	10,509	13,151
0,50	Không siêu cao	26,75	29,75	85,30	104,12	11,479	12,599
0,75	Không siêu cao	26,25	28,50	84,37	83,57	11,570	10,557
1,00	Không siêu cao	29,75	30,25	84,03	83,44	10,168	9,930
0,00	Có siêu cao	49,50	49,75	85,53	75,21	6,220	5,442
0,25	Có siêu cao	32,25	35,75	85,79	114,22	9,577	11,502
0,50	Có siêu cao	30,00	33,25	85,34	113,89	10,241	12,331
0,75	Có siêu cao	30,00	31,75	85,19	83,84	10,223	9,507
1,00	Có siêu cao	32,25	32,75	84,10	83,41	9,387	9,168

Các giá trị trong Bảng 4.18 được xác định từ khảo sát cục bộ trong vùng lân cận ngưỡng. Các cặp $(s_{\text{lift}}, t_{\text{lift}})$ và $(s_{\text{nr}}, t_{\text{nr}})$ tương ứng với hai ca mô phỏng tại hai vận tốc ngưỡng khác nhau, nên không nhất thiết thuộc cùng một diễn biến thời gian.

Khi không xét siêu cao, $h_p = 0{,}75$ là trường hợp bất lợi nhất, với $v_{\text{nr}} = 28{,}50\,\text{km/h}$; tiếp theo là $h_p = 0{,}50$, với $v_{\text{nr}} = 29{,}75\,\text{km/h}$. Trạng thái không tải có dự trữ ổn định lớn nhất, với $v_{\text{nr}} = 48{,}25\,\text{km/h}$. Khi có siêu cao đổi dấu đúng chiều cong, v_{nr} tại các mức $h_p = 0{,}25$, $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$ lần lượt tăng từ 32,25, 29,75 và 28,50 km/h lên 35,75, 33,25 và 31,75 km/h.

Đặc điểm của kịch bản cua chữ S là vị trí nhấc bánh và vị trí không phục hồi có thể xuất hiện ở các vùng khác nhau trên quỹ đạo. Một số trường hợp nhấc bánh xuất hiện ở pha cong thứ hai, sau khi gia tốc ngang đã đổi dấu. Điều này cho thấy cần xét cả diễn biến theo quãng đường, không chỉ dựa vào giá trị cực đại của LTR.

Hình 4.31 cho thấy siêu cao đổi dấu đúng chiều cong làm tăng ngưỡng không

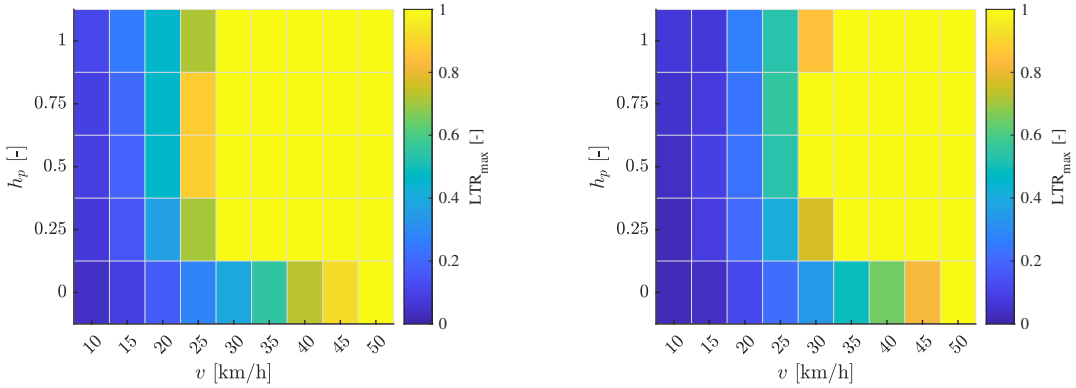


Hình 4.31: *Ngưỡng không phục hồi trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải*

phục hồi trong phần lớn các mức tải khảo sát, đặc biệt ở vùng tải trung gian và cận đầy.

4.7.4. Bản đồ LTR_{max}*,* $F_{z,\text{min}}$ *và cấp* RI *trong miền khảo sát*

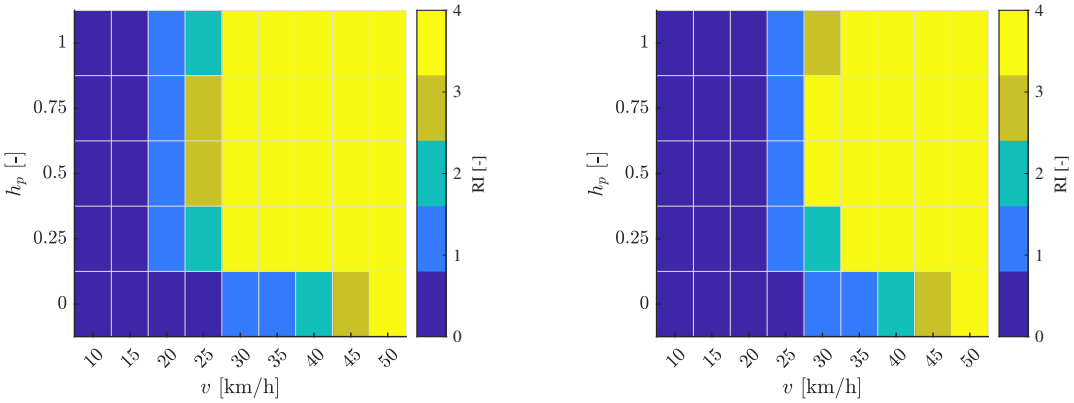
Để đánh giá tổng quát ảnh hưởng đồng thời của vận tốc và mức chất tải, các bản đồ LTR_{max}, $F_{z,\text{min}}$ và cấp RI được xây dựng trên miền vận tốc khảo sát. Các bản đồ được lập cho cả hai trường hợp không siêu cao và có siêu cao đổi dấu theo chiều cong.



(a) Không siêu cao (b) Có siêu cao

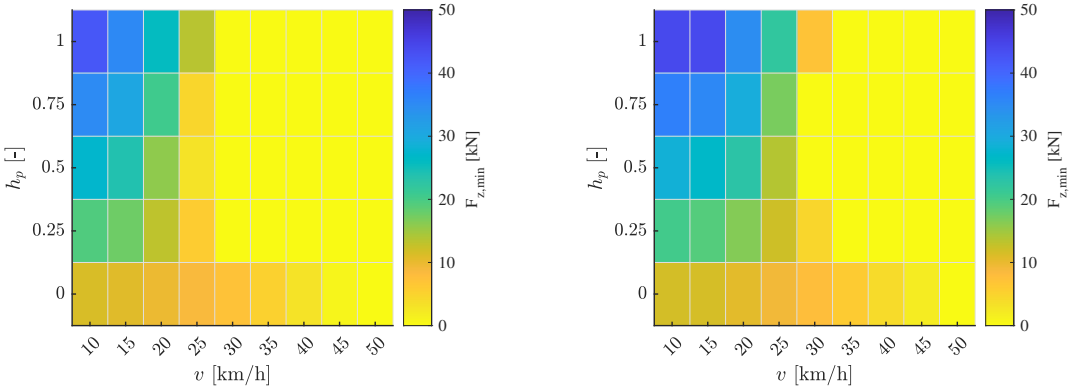
Hình 4.32: *Bản đồ* LTR_{max} *trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc*

Hình 4.32 và Hình 4.33 cho thấy khi vận tốc tăng, LTR_{max} tăng nhanh và cấp RI dịch chuyển dần sang vùng nguy hiểm, đặc biệt ở các mức tải $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$. Khi có siêu cao đổi dấu đúng chiều cong, vùng RI cao được thu hẹp rõ rệt so với trường hợp không siêu cao.



(a) Không siêu cao (b) Có siêu cao

Hình 4.33: *Bản đồ cấp RI trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc*



(a) Không siêu cao (b) Có siêu cao

Hình 4.34: *Bản đồ $F_{z,\min}$ trong kịch bản cua chữ S theo mức chất tải và vận tốc*

Hình 4.34 cho thấy siêu cao đổi dấu phù hợp với chiều cong làm tăng phản lực pháp tuyến nhỏ nhất trong phần lớn miền khảo sát, qua đó mở rộng vùng còn duy trì tiếp xúc hai bên bánh xe. Vùng $F_{z,\min} = 0$ phù hợp với vùng $\mathrm{LTR}_{\max} = 1$ và $RI = 4$, xác nhận tính nhất quán giữa ba chỉ tiêu đánh giá.

4.7.5. Nhận xét kết quả khảo sát cua chữ S

Kết quả khảo sát cua chữ S cho thấy đây là kịch bản bất lợi do gia tốc ngang đổi dấu liên tiếp, làm đáp ứng lắc ngang của thân xe và dao động tương đối của chất lỏng phụ thuộc mạnh vào lịch sử kích thích theo quãng đường. Khi không xét siêu cao, các mức tải $h_p = 0{,}50$ và $h_p = 0{,}75$ là vùng nguy hiểm rõ rệt, với $\mathrm{LTR}_{\max}$ lớn tại vận tốc cơ sở và v_{nr} thấp nhất trong miền khảo sát.

Siêu cao thuận đổi dấu theo chiều cong làm giảm gia tốc ngang hiệu dụng, giảm

$\mathrm{LTR}_{\max}$, tăng $F_{z,\min}$ và thu hẹp vùng RI cao trên các bản đồ khảo sát. Tuy nhiên, siêu cao không làm triệt tiêu dao động tương đối của chất lỏng; trong một số mức tải, $\alpha_{\max}$ còn tăng do tác động của vùng chuyển tiếp đổi dấu. Vì vậy, đánh giá ổn định lật ngang trong cua chữ S cần xét đồng thời dao động chất lỏng, phản lực pháp tuyến, $\mathrm{LTR}_{\max}$, cấp RI và khả năng phục hồi sau nhấc bánh.

Từ các kết quả trên, có thể kết luận rằng trong kịch bản cua chữ S, mức tải trung gian và cận đầy là các trạng thái cần đặc biệt quan tâm. Việc bố trí siêu cao thuận đổi dấu đúng theo chiều cong có tác dụng cải thiện ổn định lật ngang, nhưng vận tốc vẫn cần được duy trì đủ xa so với ngưỡng không phục hồi v_{nr}, đặc biệt khi xe chở chất lỏng ở các mức tải chưa đầy.

4.8. Đánh giá tổng hợp ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ổn định lật ngang

Các kịch bản vận hành riêng biệt đã được khảo sát trong các mục trước. Mục này tổng hợp các kết quả chính nhằm đánh giá định lượng ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ngưỡng mất ổn định lật ngang của ô tô xi téc. Việc đánh giá được thực hiện thông qua đối sánh giữa mô hình E2 đầy đủ có xét dao động tương đối của chất lỏng, ký hiệu SL, và mô hình chất lỏng quy đổi cứng, ký hiệu RG.

Các điều kiện đại diện dùng để tổng hợp gồm: J-turn trên mặt đường phẳng với $R = 25\,\mathrm{m}$; cua tay áo không siêu cao với $R = 15\,\mathrm{m}$; chuyển làn kép theo quỹ đạo ISO-like trên mặt đường phẳng; và cua chữ S không siêu cao với $R = 25\,\mathrm{m}$. Các trường hợp có siêu cao đã được phân tích riêng trong từng kịch bản và không đưa vào bảng tổng hợp chính của mục này.

Mức suy giảm ngưỡng không phục hồi do dao động tương đối chất lỏng được xác định theo:

$$\eta_{v,\mathrm{nr}} = \frac{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}} - v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}}{v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}} \times 100\%. \tag{4.40}$$

Trong đó, $v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{RG}}$ là ngưỡng không phục hồi của mô hình chất lỏng quy đổi cứng, còn $v_{\mathrm{nr}}^{\mathrm{SL}}$ là ngưỡng không phục hồi của mô hình có xét dao động tương đối chất

lỏng.

Bảng 4.19: *Tổng hợp ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến các ngưỡng mất ổn định*

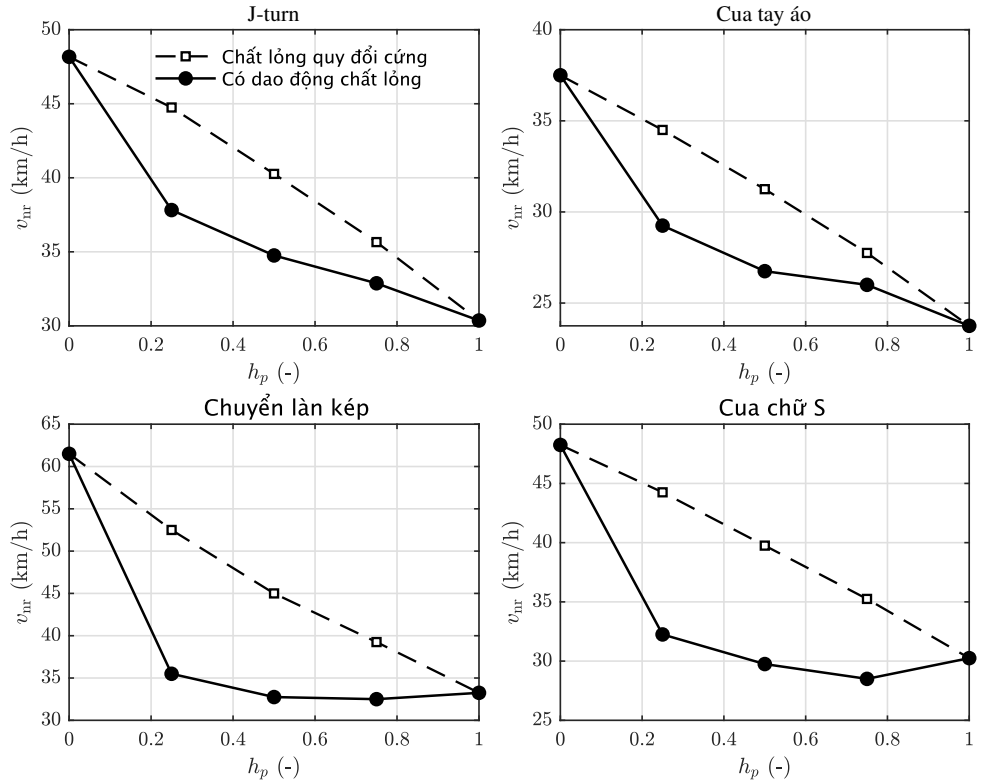
Kịch bản	**Điều kiện**	h_p	$v_{\text{lift}}^{\text{RG}}$ km/h	$v_{\text{nr}}^{\text{RG}}$ km/h	$v_{\text{lift}}^{\text{SL}}$ km/h	$v_{\text{nr}}^{\text{SL}}$ km/h	$\eta_{v,\text{nr}}$ %
J-turn	Mặt đường phẳng	0,00	47,84	48,17	47,84	48,17	0,00
J-turn	Mặt đường phẳng	0,25	44,03	44,75	36,97	37,82	15,48
J-turn	Mặt đường phẳng	0,50	39,87	40,26	34,29	34,75	13,68
J-turn	Mặt đường phẳng	0,75	35,21	35,66	31,89	32,87	7,80
J-turn	Mặt đường phẳng	1,00	30,36	30,36	30,36	30,36	0,00
Cua tay áo	Không siêu cao	0,00	37,25	37,50	37,25	37,50	0,00
Cua tay áo	Không siêu cao	0,25	34,50	34,50	28,25	29,25	15,22
Cua tay áo	Không siêu cao	0,50	31,00	31,25	26,00	26,75	14,40
Cua tay áo	Không siêu cao	0,75	27,50	27,75	25,75	26,00	6,31
Cua tay áo	Không siêu cao	1,00	23,75	23,75	23,75	23,75	0,00
Chuyển làn kép	Mặt đường phẳng	0,00	48,50	61,50	48,50	61,50	0,00
Chuyển làn kép	Mặt đường phẳng	0,25	45,00	52,50	32,75	35,50	32,38
Chuyển làn kép	Mặt đường phẳng	0,50	40,50	45,00	30,75	32,75	27,22
Chuyển làn kép	Mặt đường phẳng	0,75	36,25	39,25	30,25	32,50	17,20
Chuyển làn kép	Mặt đường phẳng	1,00	31,25	33,25	31,25	33,25	0,00
Cua chữ S	Không siêu cao	0,00	47,00	48,25	47,00	48,25	0,00
Cua chữ S	Không siêu cao	0,25	43,50	44,25	29,25	32,25	27,12
Cua chữ S	Không siêu cao	0,50	39,00	39,75	26,75	29,75	25,16
Cua chữ S	Không siêu cao	0,75	34,50	35,25	26,25	28,50	19,15
Cua chữ S	Không siêu cao	1,00	29,75	30,25	29,75	30,25	0,00

Kết quả trong Bảng 4.19 cho thấy dao động tương đối của chất lỏng làm giảm ngưỡng nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi ở các mức chất tải chưa đầy. Ở hai trạng thái biên $h_p = 0$ và $h_p = 1{,}00$, hai mô hình cho cùng ngưỡng vận tốc. Điều này phù hợp với bản chất của mô hình: khi không tải, trong xi téc không có chất lỏng; khi đầy tải, chất lỏng gần như chuyển động cùng xi téc theo quy ước mô hình.

Ảnh hưởng bất lợi của dao động chất lỏng tập trung ở vùng tải chưa đầy, đặc biệt tại $h_p = 0{,}25$ và $h_p = 0{,}50$. Trong kịch bản J-turn, mức suy giảm lớn nhất của v_{nr} là 15,48% tại $h_p = 0{,}25$. Trong kịch bản cua tay áo, mức suy giảm lớn nhất là 15,22%, cũng tại $h_p = 0{,}25$. Đối với chuyển làn kép, mức suy giảm đạt 32,38% tại $h_p = 0{,}25$, lớn nhất trong bốn kịch bản khảo sát. Đối với cua chữ S, mức suy giảm lớn nhất là 27,12%, cũng xuất hiện tại $h_p = 0{,}25$.

Như vậy, các kịch bản có gia tốc ngang đổi dấu như chuyển làn kép và cua chữ S thể hiện ảnh hưởng bất lợi của dao động chất lỏng rõ hơn so với các kịch bản có gia tốc ngang một phía như J-turn và cua tay áo. Nguyên nhân là trong các kịch bản đổi hướng, dao động tương đối của chất lỏng phụ thuộc mạnh vào lịch sử

kích thích, quan hệ pha giữa $\psi_s(t)$ và $\alpha(t)$, cũng như thời điểm xuất hiện chuyển tải trọng ngang cực đại.

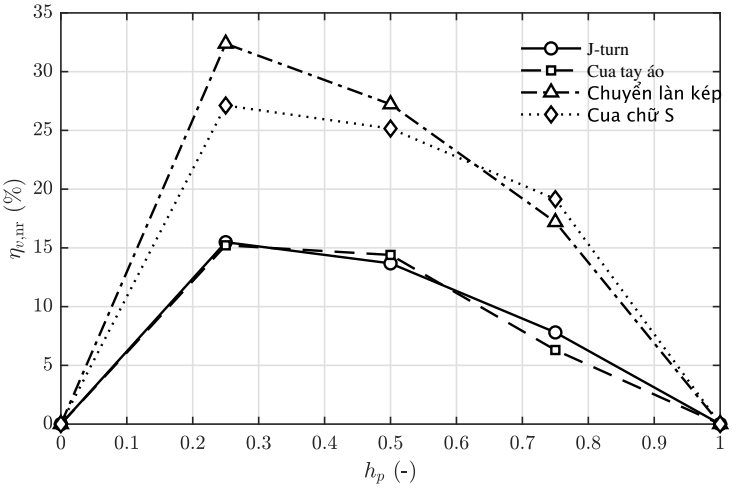


Hình 4.35: *Ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến ngưỡng không phục hồi theo mức chất tải*

Hình 4.35 cho thấy mô hình SL luôn cho ngưỡng không phục hồi nhỏ hơn hoặc bằng mô hình RG. Sai khác giữa hai mô hình tập trung chủ yếu ở vùng chất tải chưa đầy, nơi chất lỏng còn mặt thoáng và có khả năng dao động tương đối đáng kể so với xi téc.

Hình 4.36 cho thấy mức suy giảm $\eta_{v,\mathrm{nr}}$ không biến thiên đơn điệu theo mức chất tải. Trong phần lớn các kịch bản, mức suy giảm lớn nhất xuất hiện tại $h_p = 0{,}25$, sau đó giảm dần khi mức chất tải tăng và triệt tiêu ở trạng thái đầy tải. Điều này cho thấy mức tải gây suy giảm ngưỡng nhiều nhất không nhất thiết là mức tải có khối lượng chất lỏng lớn nhất, mà phụ thuộc vào sự kết hợp giữa khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm, hình học mặt thoáng và khả năng dao động tương đối của chất lỏng.

Để tổng hợp xu hướng ổn định lật ngang trong miền khảo sát, các bản đồ $F_{z,\min}$, $\mathrm{LTR}_{\max}$ và cấp *RI* được trình bày trong Hình 4.37. Các bản đồ này được xây dựng



Hình 4.36: *Mức suy giảm ngưỡng không phục hồi do dao động tương đối chất lỏng*

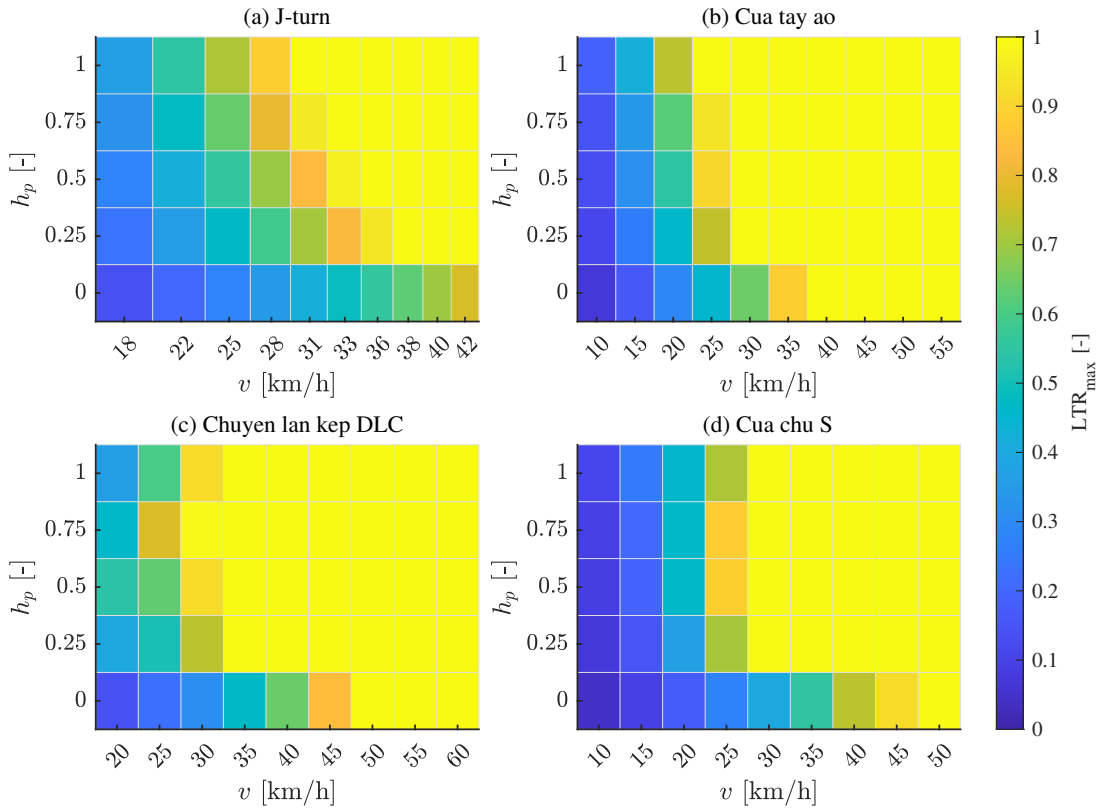
cho mô hình E2 đầy đủ, nhằm nhận diện vùng vận tốc–mức chất tải có nguy cơ mất ổn định cao.

Hình 4.37 cho thấy hai tiêu chí đánh giá $\mathrm{LTR_{max}}$ và RI có sự phù hợp về mặt cơ học. Vùng $\mathrm{LTR_{max}}$ tiệm cận 1 tương ứng với vùng $RI = 4$, biểu thị trạng thái xe tiến gần đến giới hạn lật. Trong khi đó, các vùng có $\mathrm{LTR_{max}}$ ở mức cao nhưng chưa đạt 1 phản ánh trạng thái xe vẫn duy trì tiếp xúc bánh xe với mặt đường, song dự trữ ổn định chống lật đã giảm đáng kể.

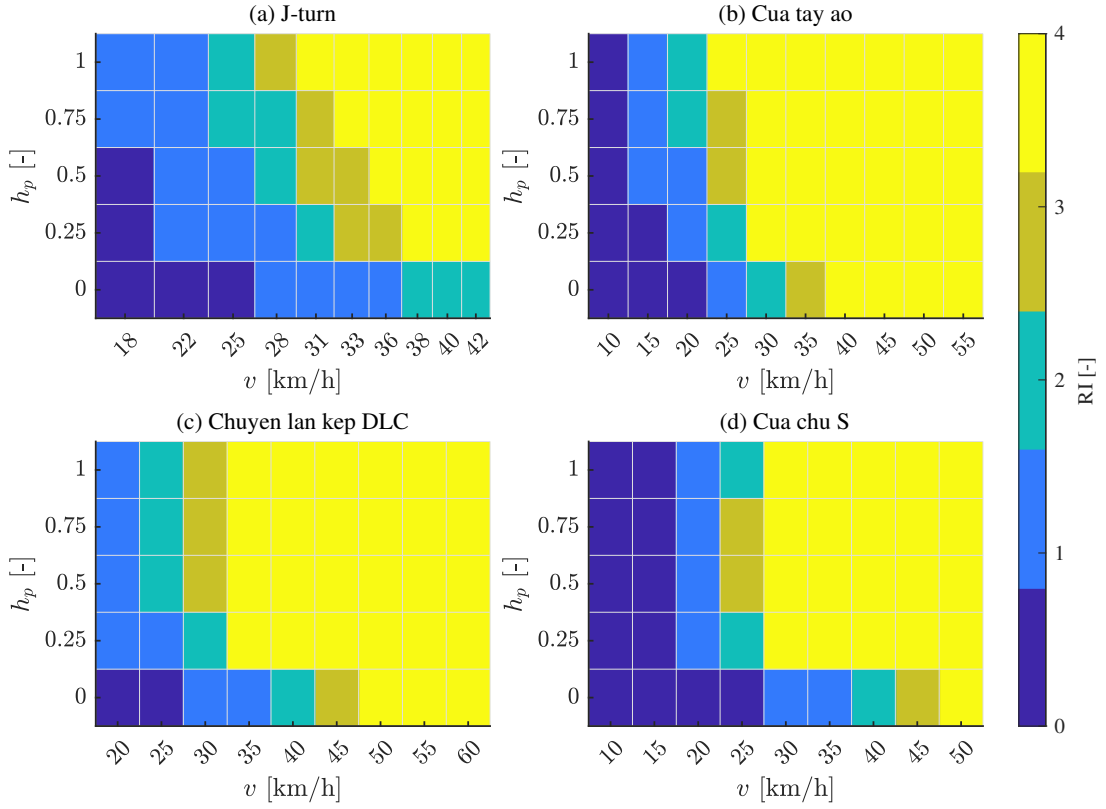
Ngoài các ngưỡng vận tốc, sai khác của $\mathrm{LTR_{max}}$ và cấp RI giữa hai mô hình cũng phản ánh rõ ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng. Hình 4.38 trình bày $\Delta\mathrm{LTR_{max}}$ và ΔRI giữa mô hình SL và mô hình RG tại các điều kiện đại diện của từng kịch bản.

Kết quả cho thấy sai khác lớn của $\mathrm{LTR_{max}}$ thường xuất hiện ở các mức tải trung gian, đặc biệt trong các kịch bản có gia tốc ngang đổi dấu. Đây là các trường hợp chất lỏng vừa có khối lượng đủ lớn để tạo mô men lắc ngang đáng kể, vừa còn khả năng dao động tương đối rõ rệt so với xi téc.

Từ các kết quả tổng hợp có thể rút ra ba nhận xét chính. Thứ nhất, dao động tương đối của chất lỏng làm giảm dự trữ ổn định lật ngang ở vùng mức tải chưa đầy; do đó mô hình chất lỏng quy đổi cứng có xu hướng đánh giá cao ngưỡng vận tốc an toàn. Thứ hai, mức ảnh hưởng không chỉ phụ thuộc vào lượng chất lỏng mà còn phụ thuộc vào dạng kích thích ngang của từng kịch bản. Các kịch bản có

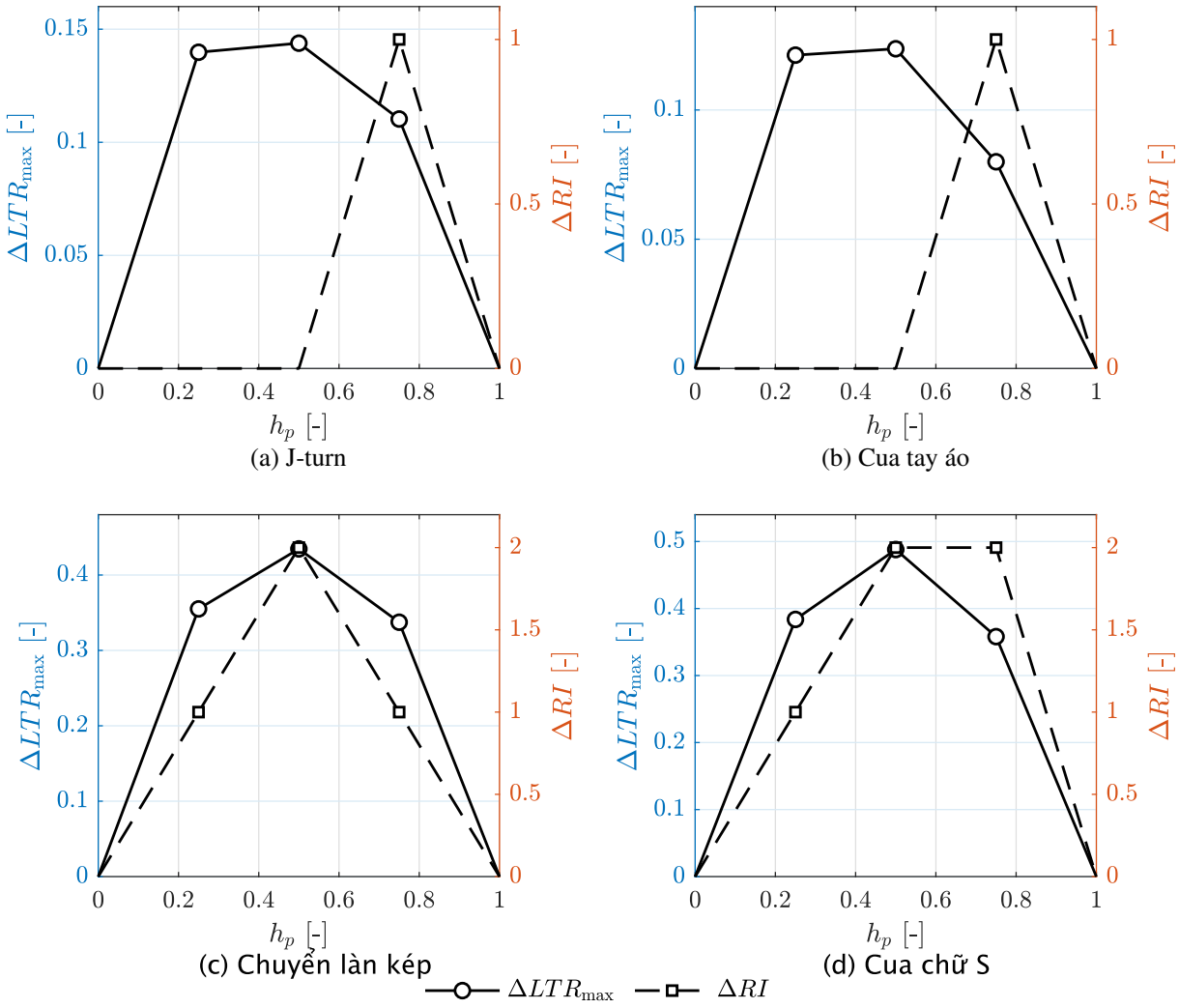


(a) Bản đồ LTR_{max}



(b) Bản đồ cấp *RI*

Hình 4.37: *Bản đồ tổng hợp các chỉ tiêu ổn định lật ngang theo vận tốc và mức chất tải khi xét dao động tương đối của chất lỏng*



Hình 4.38: *Sai khác* $\mathrm{LTR}_{\max}$ *và cấp RI giữa mô hình có dao động chất lỏng và mô hình chất lỏng quy đổi cứng*

gia tốc ngang đổi dấu gây suy giảm ngưỡng mạnh hơn so với kích thích ngang một phía. Thứ ba, mức tải bất lợi không nhất thiết là đầy tải; các mức $h_p = 0{,}25$ và $h_p = 0{,}50$ có thể gây suy giảm lớn về ngưỡng không phục hồi do sự kết hợp giữa khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm và khả năng dao động tương đối trong xi téc.

Như vậy, khi đánh giá ổn định lật ngang của ô tô xi téc chở chất lỏng, không nên chỉ xét trạng thái không tải hoặc đầy tải. Vùng chất tải chưa đầy cần được khảo sát bằng mô hình có xét dao động tương đối chất lỏng, đặc biệt đối với các thao tác vận hành có gia tốc ngang biến thiên nhanh hoặc đổi dấu.

4.9. Kết luận chương

Chương này đã sử dụng mô hình E2 để khảo sát ổn định lật ngang động của ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 trong các kịch bản vận hành đặc trưng gồm J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S. Các kết quả được đánh giá thông qua góc lắc ngang thân xe $\psi_s(t)$, dao động tương đối của chất lỏng $\alpha(t)$, hệ số chuyển tải trọng ngang LTR, phản lực pháp tuyến nhỏ nhất $F_{z,\min}$, cấp đánh giá RI, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr}.

Kết quả khảo sát cho thấy dao động tương đối của chất lỏng làm giảm rõ dự trữ ổn định lật ngang ở các mức chất tải chưa đầy. So với mô hình chất lỏng quy đổi cứng, mô hình có xét dao động tương đối chất lỏng cho $\text{LTR}_{\max}$ lớn hơn, $F_{z,\min}$ nhỏ hơn và ngưỡng không phục hồi thấp hơn trong nhiều trường hợp. Ảnh hưởng bất lợi tập trung ở vùng tải trung gian và cận đầy; mức tải bất lợi không nhất thiết là đầy tải, mà phụ thuộc vào sự kết hợp giữa khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm, hình học mặt thoáng và quan hệ pha giữa $\psi_s(t)$ với $\alpha(t)$.

Trong các kịch bản có gia tốc ngang một phía như J-turn và cua tay áo, nguy cơ mất ổn định tăng chủ yếu theo vận tốc, bán kính cong và mức chất tải. Trong các kịch bản có gia tốc ngang đổi dấu như chuyển làn kép và cua chữ S, ảnh hưởng của dao động chất lỏng thể hiện rõ hơn do đáp ứng của hệ xe–chất lỏng phụ thuộc mạnh vào lịch sử kích thích. Kết quả tổng hợp cho thấy mức suy giảm ngưỡng không phục hồi do dao động chất lỏng có thể đạt 32,38% trong kịch bản chuyển làn kép và 27,12% trong kịch bản cua chữ S, lớn hơn so với các kịch bản kích thích

ngang một phía.

Siêu cao thuận có tác dụng cải thiện ổn định lật ngang trong các kịch bản đường cong, thể hiện qua việc giảm $\mathrm{LTR}_{\max}$, tăng $F_{z,\min}$ và thu hẹp vùng cấp RI cao. Tuy nhiên, siêu cao không nhất thiết làm giảm đồng thời biên độ dao động tương đối của chất lỏng, đặc biệt trong kịch bản cua chữ S khi gia tốc ngang và siêu cao đổi dấu theo quãng đường. Do đó, đánh giá ổn định lật ngang của ô tô xi téc cần kết hợp đồng thời các chỉ tiêu chuyển tải trọng ngang, phản lực pháp tuyến, cấp RI, ngưỡng nhấc bánh, ngưỡng không phục hồi và đặc trưng dao động của chất lỏng.

Các ngưỡng vận tốc thu được trong chương này là kết quả dự báo mô phỏng trong phạm vi giả thiết của mô hình. Mô hình chưa xét đầy đủ giới hạn bám ngang của lốp, trượt ngang, va chạm sau nhấc bánh và biến dạng kết cấu khi đạt giới hạn lật hình học. Tuy vậy, các kết quả đã làm rõ vai trò của dao động tương đối chất lỏng đối với ổn định lật ngang động, đồng thời cung cấp cơ sở định lượng để lựa chọn mức chất tải, kịch bản nguy hiểm và chỉ tiêu đánh giá trong phân tích an toàn của ô tô xi téc chở chất lỏng.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Kết luận

Luận án đã nghiên cứu ổn định lật ngang động của hệ ô tô xi téc–chất lỏng, có xét tương tác giữa dao động lắc ngang thân xe, dao động thẳng đứng của xe và dao động tương đối của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp. Đối tượng khảo sát là ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước, chỉ bố trí vách ngăn có mặt phẳng vuông góc với trục dọc xe. Trên cơ sở mô hình lý thuyết, thí nghiệm trên xe thực và mô phỏng số, luận án đã làm rõ ảnh hưởng của mức chất tải và dao động chất lỏng đến chuyển tải trọng ngang, phản lực pháp tuyến và các ngưỡng mất ổn định lật ngang.

Các kết quả chính của luận án:

1. Đã tổng quan, hệ thống hóa các nghiên cứu về dao động chất lỏng trong xi téc, động lực học ô tô xi téc và đánh giá ổn định lật ngang; từ đó xác định khoảng trống nghiên cứu đối với mô hình tương tác hệ xe–chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp và việc đánh giá mô hình bằng dữ liệu thí nghiệm trên xe thực.

2. Đã xây dựng mô hình cơ học tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn và hình ê-líp, xác định khối lượng dao động, khối lượng chuyển động cùng xi téc, vị trí trọng tâm và các tham số dao động tương đương theo mức chất tải. Các quan hệ này là cơ sở để tích hợp mô hình chất lỏng với mô hình động lực học ô tô.

3. Đã xây dựng mô hình động lực học E2 của hệ ô tô xi téc–chất lỏng, mô tả đồng thời dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang của khối lượng được treo và không được treo, dao động tương đối của chất lỏng, kích động mặt đường, góc siêu cao và phản lực pháp tuyến hai phía bánh xe. Mô hình cho phép

đánh giá ổn định lật ngang thông qua $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, ngưỡng khởi phát nhấc bánh và ngưỡng không phục hồi.

4. Đã xây dựng và thực hiện thí nghiệm trên ô tô xi téc thực trong hai chế độ quay vòng bán kính không đổi và chuyển động thẳng qua mấp mô. Từ dữ liệu đo, các thông số kết cấu và động lực học của xe được xác định; hai tham số khó xác định trực tiếp là mô men quán tính lắc ngang của khối lượng được treo khi không tải I_s và tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng ζ được nhận dạng. Kết quả đối sánh bằng các chỉ tiêu CC, NRMSE và $\varepsilon_{\mathrm{PSD}}$ cho thấy mô hình tái hiện được xu hướng, biên độ và dải tần chi phối của đáp ứng lắc ngang trong phạm vi điều kiện thí nghiệm.

5. Đã làm rõ cơ chế tương tác động lực học giữa thân xe và chất lỏng. So với mô hình chất lỏng quy đổi cứng, mô hình có xét dao động tương đối của chất lỏng cho $\mathrm{LTR}_{\max}$ lớn hơn, $F_{z,\min}$ nhỏ hơn và dự trữ ổn định lật ngang thấp hơn tại các mức chất tải chưa đầy. Ảnh hưởng này phụ thuộc đồng thời vào khối lượng chất lỏng, vị trí trọng tâm, biên độ dao động và quan hệ pha giữa $\alpha(t)$ với $\psi_s(t)$. Do đó, mức chất tải có $\alpha_{\max}$ lớn nhất chưa nhất thiết là mức có nguy cơ lật lớn nhất.

   Đã khảo sát ổn định lật ngang trong bốn kịch bản J-turn, cua tay áo, chuyển làn kép và cua chữ S. Kết quả cho thấy các mức tải trung gian và cận đầy thường là vùng bất lợi; các kịch bản có gia tốc ngang đổi dấu, như chuyển làn kép và cua chữ S, làm ảnh hưởng của dao động chất lỏng thể hiện rõ hơn so với các kịch bản gia tốc ngang một phía. So với mô hình chất lỏng quy đổi cứng, dao động tương đối của chất lỏng làm giảm ngưỡng không phục hồi lớn nhất 15,48% đối với J-turn, 15,22% đối với cua tay áo, 32,38% đối với chuyển làn kép và 27,12% đối với cua chữ S trong các điều kiện đại diện đã khảo sát.

Luận án sử dụng thống nhất hệ tiêu chí gồm $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, ngưỡng khởi phát nhấc bánh v_{lift} và ngưỡng không phục hồi v_{nr} để đánh giá các trường hợp khảo sát. Điều kiện $\mathrm{LTR}_{\max} \geq 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}$ hoặc $F_{z,\min} \leq \varepsilon_F$ được dùng để xác định khởi phát nhấc bánh; trạng thái không phục hồi được xác định khi tiếp xúc bánh xe không phục hồi hoặc góc lắc ngang tiếp tục phát triển theo tiêu chí mô phỏng.

Từ các kết quả trên có thể kết luận rằng mô hình E2 phù hợp để nghiên cứu động lực học và đánh giá ổn định lật ngang của ô tô xi téc chở chất lỏng trong phạm vi khảo sát. Việc bỏ qua dao động tương đối của chất lỏng có thể dẫn đến đánh giá cao dự trữ ổn định, đặc biệt ở các mức chất tải chưa đầy và trong các thao tác có gia tốc ngang biến thiên nhanh hoặc đổi dấu.

Các kết luận định lượng nêu trên giới hạn cho ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 chở nước, xi téc chỉ bố trí vách ngăn có mặt phẳng vuông góc với trục dọc xe, bộ tham số đã nhận dạng và các kịch bản đã khảo sát. Các ngưỡng vận tốc là ngưỡng mô phỏng có điều kiện, với giả thiết xe bám theo quỹ đạo đặt; chưa được xem trực tiếp là giới hạn vận tốc khai thác khi chưa xét đầy đủ khả năng bám ngang, điều khiển quỹ đạo và kiểm chứng thực nghiệm gần ngưỡng nhấc bánh.

Các đóng góp mới của luận án

- Xây dựng các quan hệ xác định tham số của mô hình cơ học tương đương chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp theo mức chất tải, gồm khối lượng dao động, khối lượng chuyển động cùng xi téc, vị trí trọng tâm và các tham số dao động tương đương.

- Xây dựng mô hình động lực học E2 của hệ ô tô xi téc–chất lỏng có xét đồng thời dao động thẳng đứng, dao động lắc ngang, dao động tương đối của chất lỏng, kích động mặt đường, góc siêu cao và phản lực tiếp xúc bánh xe.

- Xây dựng quy trình thí nghiệm, xác định tham số và nhận dạng $I_{s,\mathrm{id}}$, ζ_{id} trên ô tô xi téc thực; đồng thời đánh giá mức độ phù hợp của mô hình bằng các chỉ tiêu trong miền thời gian và miền tần số.

- Lượng hóa ảnh hưởng của dao động tương đối chất lỏng đến $\mathrm{LTR}_{\max}$, $F_{z,\min}$, cấp RI, v_{lift} và v_{nr} trong bốn kịch bản vận hành; qua đó chỉ ra rằng các trạng thái chất tải chưa đầy cần được khảo sát riêng và mức bất lợi phụ thuộc mạnh vào dạng kích thích ngang.

Hướng nghiên cứu tiếp theo

1. Mở rộng mô hình và thực nghiệm đối với các chất lỏng có khối lượng riêng, độ nhớt và đặc tính lưu biến khác nhau, như nhiên liệu, hóa chất và chất lỏng có độ nhớt cao.

2. Phát triển mô hình động lực học không gian, xét đồng thời dao động ngang, dọc, đứng, lắc ngang, lắc dọc và quay vòng của xe; bổ sung dao động chất lỏng theo phương dọc để khảo sát các trường hợp phanh kết hợp quay vòng, tăng tốc và tránh chướng ngại vật khẩn cấp.

3. Mở rộng thí nghiệm cho nhiều loại ô tô xi téc, kích thước xi téc, mức chất tải, vận tốc, bán kính đường cong và điều kiện mặt đường khác nhau; thực hiện thêm các thử nghiệm gần ngưỡng nhấc bánh trong điều kiện kiểm soát.

4. Nghiên cứu và hiệu chỉnh các ranh giới phân cấp RI bằng dữ liệu thực nghiệm trên bãi thử và đường thực tế, làm cơ sở xây dựng tiêu chí cảnh báo và khuyến nghị vận tốc theo loại xe, mức chất tải và điều kiện khai thác.

5. Nghiên cứu ảnh hưởng của các giải pháp kết cấu như vách ngăn chắn sóng, phân khoang xi téc, hình dạng tiết diện và vị trí bố trí xi téc; từ đó tối ưu kết cấu nhằm hạn chế dao động tương đối của chất lỏng và tăng dự trữ ổn định lật ngang.

6. Phát triển mô hình rút gọn có khả năng tính toán thời gian thực và tích hợp với các hệ thống ESC, RSC, cảnh báo vận tốc, hỗ trợ người lái hoặc lập kế hoạch quỹ đạo an toàn cho ô tô xi téc.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

[CT1] Tran, V. N., Nguyen, X. N., Vu, V. T. and Dang, T. P. (2022). Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles. Journal of Applied Engineering Science, 20(4), 1133–1142.

https://doi.org/10.5937/jaes0-36578.

[CT2] Nguyen, X. N., Tran, V. N., Vu, V. T. and Dang, T. P. (2023). Evaluation of Rollover Stability of Liquid Tank Truck in the Lane Change. In: Nguyen, D.C., Vu, N.P., Long, B.T., Puta, H., Sattler, KU. (eds) Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 602. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_59.

[CT3] Nguyen, X. N., Tran, V. N., Vu, V. T. and Dang, T. P. (2024). Active suspension with PID control for enhanced rollover stability in liquid tank trucks. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 57, No. 1, pp. 45-53.

https://doi.org/10.18280/jesa.570105.

[CT4] Nguyen, X. N., Tran, V. N. and Vu, V. T. (2025). Evaluate the rollover stability characteristics of the liquid elliptical tank truck when changing motion direction. Acta Polytechnica Hungarica, 22(5), 245–258.

https://doi.org/10.12700/APH.22.5.2025.5.13.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt:

[1] Trần Thanh An, "Nghiên cứu tối ưu các thông số hệ thống treo ô tô khách sử dụng tại Việt Nam", Luận án tiến sĩ, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2012.

[2] Trần Công Chi (2024), "Phân tích CFD sự va đập trong thùng chứa nước của xe chữa cháy rừng đa năng khi phanh khẩn cấp", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, 229 (14), tr. 339–346, DOI: 10.34238/tnu-jst.11474.

[3] Nguyễn Thành Công, Trần Văn Như và Đặng Xuân Kỳ (2019), "Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của mực chất lỏng đến tính ổn định lật ngang của xe chữa cháy", *Tạp chí Cơ khí*, 5, tr. 33–38.

[4] Nguyễn Xã Hội, "Nghiên cứu động lực học của xe chữa cháy rừng đa năng", Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Lâm nghiệp, 2013.

[5] Phạm Duy Nam và cộng sự (2026), "Nghiên cứu hiện tượng dao động chất lỏng trong xe bồn sử dụng phương pháp đồng mô phỏng", *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, 337+338, tr. 103–108.

[6] Nguyễn Văn Bang, Nguyễn Khắc Trai, Đặng Việt Hà, Nguyên Văn Trà và Trần Văn Như, *Khảo sát ảnh hưởng của yếu tố phương tiện và mặt đường đến ổn định ngang của ô tô khách 2 tầng*, Báo cáo kỹ thuật, Hà Nội: Bộ Giao thông Vận tải, 2014.

[7] Lương Văn Vạn, "Nghiên cứu độ bền khung sát xi xe chữa cháy rừng đa năng", Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Lâm nghiệp, 2020.

Tiếng Anh:

[8] H. N. Abramson (1966), *The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, with Applications to Space Vehicle Technology*, NASA-SP-106, National Aeronautics and Space Administration.

[9] National Highway Traffic Safety Administration, *Light Vehicle Dynamic Rollover Propensity Phases IV, V, and VI*, Technical Report, U.S. Department of Transportation, 2002.

[10] Waka Kotahi NZ Transport Agency, *Method for Estimating the Static Roll Threshold of a Vehicle*, Technical Report, Vehicle Safety Alert No. 2, NZ Transport Agency, 2012.

[11] Waka Kotahi NZ Transport Agency, *Performance Based Standards (PBS) Requirements for Heavy Vehicles in New Zealand*, Technical Report, NZ Transport Agency, 2019.

[12] F. Bottiglione and G. Mantriota (2012), "Field tests and validation of dynamical models of tank vehicles Part II: Experimental tests and results", *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 19 (1), p. 23–39, DOI: 10.1504/IJHVS.2012.045758.

[13] J. Cao et al. (2013), "Study on Integrated Control of Vehicle Yaw and Rollover Stability Using Nonlinear Prediction Model", *Mathematical Problems in Engineering*, 643548, p. 1–15, DOI: 10.1155/2013/643548.

[14] National Research Council (2002), *The National Highway Traffic Safety Administration's Rating System for Rollover Resistance*, National Academies Press.

[15] N. S. Das, B. A. Suresh, and J. C. Wambold (1993), "Estimation of dynamic rollover threshold of commercial vehicles using low speed experimental data", *SAE Transactions. Journal of Commercial Vehicles*, 102 (2), p. 527–537, DOI: 10.4271/932949.

[16] Robert G. Dean and Robert A. Dalrymple (1991), *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, Singapore, DOI: 10.1142/1232.

[17] Franklin T. Dodge (2000), *The New "Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers"*, Southwest Research Institute.

[18] O. M. Faltinsen and A. N. Timokha (2009), *Sloshing*, Cambridge University Press.

[19] Thomas D. Gillespie (1992), *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, Warrendale, Pennsylvania, DOI: 10.4271/R-114.

[20] Thomas D. Gillespie (2021), *Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition*, SAE International, DOI: 10.4271/R-506.

[21] H. Goldstein, C. Poole, and J. Safko (2002), *Classical Mechanics*, 3rd, Addison Wesley, San Francisco.

[22] M. Han, J. Dai, and K. K. Ang (2018), "Hydrodynamic aspects of moving vehicle with sloshing tanks", *MATEC Web of Conferences*, 211, p. 15002, DOI: 10.1051/matecconf/201821115002.

[23] S. M. Hasheminejad and M. Aghabeigi (2009), "Liquid sloshing in half-full horizontal elliptical tanks", *Journal of Sound and Vibration*, 324 (1-2), p. 332–349, DOI: 10.1016/j.jsv.2009.01.040.

[24] Andrew Hurst, *Car accident statistics by vehicle type (2024)*, Technical Report, Policygenius, 2024, URL: https://www.policygenius.com/auto-insurance/car-accident-statistics-by-vehicle-type/.

[25] R. L. Huston and F. A. Kelly (2014), "Another look at the static stability factor (SSF) in predicting vehicle rollover", *International Journal of Crashworthiness*, 19 (6), p. 567–575, DOI: 10.1080/13588265.2014.919730.

[26] R. A. Ibrahim (2005), *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*, Cambridge University Press, DOI: 10.1017/CBO9780511536656.

[27] International Organization for Standardization, *Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre — Part 1: Double lane-change*, Technical Report, ISO 3888-1:2018, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.

[28] M. M. Jalili et al. (2022), "Investigation of sloshing effects on lateral stability of tank vehicles during turning maneuver", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50 (9), p. 3180–3205, DOI: 10.1080/15397734.2020.1800490.

[29] X. Kang, S. Rakheja, and I. Stiharu (2001), "Effects of Tank Shape on the Roll Dynamic Response of a Partly Filled Tank Vehicle", *Vehicle System Dynamics*, 35 (2), p. 75–102, DOI: 10.1076/vesd.35.2.75.2036.

[30] A. Kolaei, "Dynamic Liquid Slosh in Moving Containers", PhD Thesis, Concordia University, 2014.

[31] A. Kolaei, S. Rakheja, and M. J. Richard (2014), "Range of applicability of the linear fluid slosh theory for predicting transient lateral slosh and roll stability of tank vehicles", *Journal of Sound and Vibration*, 333 (1), p. 263–282, DOI: 10.1016/j.jsv.2013.09.002.

[32] C. Lanczos (1986), *The Variational Principles of Mechanics*, Dover Publications, New York.

[33] L.D. Landau and E.M. Lifshitz (1976), *Mechanics*, 3rd, vol. 1, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[34] Chad Larish et al. (2013), "A New Predictive Lateral Load Transfer Ratio for Rollover Prevention System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62 (7), p. 2928–2936, DOI: 10.1109/TVT.2013.2252930.

[35] N.A. Lemos (2018), *Analytical Mechanics*, Cambridge University Press.

[36] Xian-Sheng Li, Yuan-Yuan Ren, and Xue-Lian Zheng (2021), "Model-Free Adaptive Control for Tank Truck Rollover Stabilization", *Mathematical Problems in Engineering*, 2021 (8417071), p. 1–16, DOI: 10.1155/2021/8417071.

[37] Xian-sheng Li et al. (2013), "Study on Driving Stability of Tank Trucks Based on Equivalent Trammel Pendulum for Liquid Sloshing", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, p. 659873, DOI: 10.1155/2013/659873.

[38] P. J. Liu, S. Rakheja, and A. K. W. Ahmed, *Detection of Dynamic Roll Instability of Heavy Vehicles for Open-Loop Rollover Control*, Technical Report, 973263, SAE International, 1997, DOI: 10.4271/973263.

[39] J. L. Meriam and L. G. Kraige (2012), *Engineering Mechanics: Dynamics*, 7th, Wiley.

[40] National Center for Statistics and Analysis, *Conclusions of NHTSA Rollover Accident Characteristics Analysis*, Technical Report, National Highway Traffic Safety Administration, 2003, URL: https://wfca.ca/conclusions-of-nhtsa-rollover-accident-characteristics-analysis/.

[41] National Highway Traffic Safety Administration, *NHTSA Releases Early Estimates Showing Nationwide Decreases in Traffic Fatalities in Priority Safety Areas During First Half of 2024, Including Pedestrian and Speeding-Related Crashes*, Technical Report, U.S. Department of Transportation, 2024, URL: https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-releases-2024-early-estimates-decrease-traffic-fatalities.

[42] Hans B. Pacejka (2006), *Tire and Vehicle Dynamics*, 2nd ed. Elsevier.

[43] Douglas B. Pape et al., *Cargo Tank Roll Stability Study*, Final Report, Washington, DC: Federal Motor Carrier Safety Administration, 2007.

[44] David Parker and David Cebon, "An Alternative Measure for Evaluating the Dynamic Performance of Heavy Vehicles", trong: *Proceedings of the 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*, Delft, Netherlands, 2002.

[45] J. de Pont et al., "Including Performance Measures in Dimensions and Mass Regulations", trong: *Proceedings of the 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology (HVTT12)*, Stockholm, Sweden, 2012.

[46] G. Popov et al. (1992), "Liquid sloshing in rectangular road containers", *Computers & Fluids*, 21 (4), p. 551–569, DOI: 10.1016/0045-7930(92)90006-H.

[47] Rajesh Rajamani (2012), *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed. Springer, New York, DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.

[48] S. Rakheja and R. Ranganathan (1993), "Estimation of the rollover threshold of heavy vehicles carrying liquid cargo: A simplified approach", *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 1 (1), p. 79–98, DOI: 10.1504/IJHVS.1993.054646.

[49] S. Rakheja, S. Sankar, and R. Ranganathan (1988), "Roll Plane Analysis of Articulated Tank Vehicles During Steady Turning", *Vehicle System Dynamics*, 17 (1-2), p. 81–104, DOI: 10.1080/00423118808968896.

[50] R. Ranganathan, S. Rakheja, and S. Sankar (1990), "Influence of Liquid Load Shift on the Dynamic Response of Articulated Tank Vehicles", *Vehicle System Dynamics*, 19 (4), p. 177–200, DOI: 10.1080/00423119008968941.

[51] M. I. Salem, "Rollover stability of partially filled heavy-duty elliptical tankers using trammel pendulums to simulate fluid sloshing", PhD Thesis, West Virginia University, 2000.

[52] Donghoon Shin, Seunghoon Woo, and Manbok Park (2021), "Rollover Index for Rollover Mitigation Function of Intelligent Commercial Vehicle's Electronic Stability Control", *Electronics*, 10 (21), p. 2605, DOI: 10.3390/electronics10212605.

[53] National Center for Statistics and Analysis, *Early Estimates of Motor Vehicle Traffic Fatalities and Fatality Rate by Sub-Categories in 2020*, Technical Report, DOT HS 813 118, National Highway Traffic Safety Administration, 2021, URL: https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813118.

[54] National Center for Statistics and Analysis, *Early Estimates of Motor Vehicle Traffic Fatalities and Fatality Rate by Sub-categories in 2021*, Technical Report, DOT HS 813 298, National Highway Traffic Safety Adminis-

tration, 2022, URL: https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813298.

[55] D. Wang et al. (2022), "The roll stability analysis of semi-trailer based on the wheel force", *Computers, Materials & Continua*, 71 (1), p. 1837–1848, DOI: 10.32604/cmc.2022.023033.

[56] J. Y. Wong (2008), *Theory of Ground Vehicles*, 4th ed. Wiley.

[57] Haixiao Wu et al. (2024), "Anti-Rollover Trajectory Planning Method for Heavy Vehicles in Human–Machine Cooperative Driving", *World Electric Vehicle Journal*, 15 (8), p. 328, DOI: 10.3390/wevj15080328.

[58] Ningbo Xu et al. (2023), "Effect of liquid sloshing in lateral and longitudinal directions on railway tank cars based on an improved equivalent model", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 237, p. 601 –616, DOI: 10.1177/14644193231195146.

[59] D. Yu and J. Chu (2018), "Computational simulation of nonlinear liquid sloshing in a tank truck", *Advances in Mechanical Engineering*, 10 (7), DOI: 10.1177/1687814018781498.

[60] D. Yu et al. (2015), "Theory and experiments on driving stability of tank trucks under dangerous working conditions", *Journal of Vibroengineering*, 17 (5), p. 2183–2200.

[61] X. Zhang et al. (2017), "Contour line of load transfer ratio for vehicle rollover prediction", *Vehicle System Dynamics*, 55 (11), p. 1748–1763, DOI: 10.1080/00423114.2017.1321773.

[62] Xue lian Zheng and Hao Zhang (2017), "Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquid sloshing in partially filled tanks", *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (6), p. 1–26, DOI: 10.1177/1687814017703894.

[63] Xue-lian Zheng, Xian-sheng Li, and Yu-yan Ren (2012), "Equivalent Mechanical Model for Lateral Liquid Sloshing in Partially Filled Tank Vehicles", *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, p. 162825, DOI: 10.1155/2012/162825.

PHỤ LỤC A. CÁC PHƯƠNG TRÌNH TRIỂN KHAI CỦA MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ XE–CHẤT LỎNG

Phụ lục này trình bày các khai triển hình học, phương trình Lagrange và hệ phương trình động lực học chi tiết của các mô hình C, E1 và E2. Các biểu thức được sử dụng để kiểm tra tính nhất quán của quá trình xây dựng mô hình và làm cơ sở tính phản lực pháp tuyến, hệ số chuyển tải trọng ngang và các chỉ tiêu ổn định lật ngang.

A.1. Khai triển hình học của xi téc tiết diện hình tròn

Xét xi téc tiết diện hình tròn có đường kính trong D_c, chiều dài L_c và chiều cao mực chất lỏng h_l. Trong mặt cắt ngang, phần chất lỏng được xem là hình viên phân tròn. Góc ở tâm tương ứng với phần chất lỏng được xác định:

$$\theta_c = 2\arccos\left(1 - \frac{2h_l}{D_c}\right). \tag{A.1}$$

Diện tích hình quạt tròn và chiều cao trọng tâm của hình quạt tính từ đáy xi téc được xác định:

$$F_{qu} = \frac{D_c^2\theta_c}{8}, \tag{A.2}$$

$$h_1 = \frac{D_c}{2} - \frac{2D_c}{3\theta_c}\sin\left(\frac{\theta_c}{2}\right). \tag{A.3}$$

Diện tích tam giác AOB và chiều cao trọng tâm của tam giác tính từ đáy xi téc được xác định:

$$F_{\Delta AOB} = \left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right), \tag{A.4}$$

$$h_2 = \frac{2h_l}{3} + \frac{D_c}{6}. \tag{A.5}$$

Diện tích hình viên phân chứa chất lỏng được xác định:

$$F_{vp} = F_{qu} - F_{\Delta AOB} = \frac{D_c^2\theta_c}{8} - \left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right). \tag{A.6}$$

Từ quan hệ mô men diện tích:

$$F_{qu}h_1 = F_{\Delta AOB}h_2 + F_{vp}h_3, \tag{A.7}$$

suy ra chiều cao trọng tâm của khối chất lỏng:

$$h_3 = \frac{\left(\frac{D_c^2\theta_c}{8}\right)\left[\frac{D_c}{2} - \frac{2D_c}{3\theta_c}\sin\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right] - \left[\left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right]\left(\frac{2h_l}{3} + \frac{D_c}{6}\right)}{\frac{D_c^2\theta_c}{8} - \left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right)}. \tag{A.8}$$

Thể tích và khối lượng chất lỏng trong xi téc được xác định:

$$V_c = F_{vp}L_c = \left[\frac{D_c^2\theta_c}{8} - \left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right] L_c, \tag{A.9}$$

$$m_c = \rho_l L_c \left[\frac{D_c^2\theta_c}{8} - \left(\frac{D_c}{2} - h_l\right)^2 \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right)\right], \tag{A.10}$$

trong đó ρ_l là khối lượng riêng của chất lỏng.

Tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng trong xi téc tiết diện hình tròn được xác định:

$$\lambda_{h,c} = \frac{h_l}{D_c}, \qquad 0 \le \lambda_{h,c} \le 1. \tag{A.11}$$

A.2. Khai triển phương trình Lagrange của mô hình C

Tọa độ của khối lượng chất lỏng tương đương m_c trong mặt phẳng thẳng đứng ngang xe YZ được xác định:

$$\begin{cases} y_c = h_{tc}\sin\psi_{sc} + a_c\sin\alpha_c, \\ z_c = h_{tc}\cos\psi_{sc} - a_c\cos\alpha_c. \end{cases} \tag{A.12}$$

Trong đó, ψ_{sc} là góc lắc ngang của khối lượng được treo; α_c là tọa độ góc mô tả chuyển động tương đối của khối lượng chất lỏng; h_{tc} là khoảng cách từ tâm lắc

của khối lượng được treo đến tâm xi téc; a_c là tham số vị trí của khối lượng chất lỏng tương đương:

$$a_c = \frac{D_c}{2} - h_3. \tag{A.13}$$

Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho tọa độ tổng quát α_c:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{kc}}{\partial \dot{\alpha}_c}\right) - \frac{\partial E_{kc}}{\partial \alpha_c} + \frac{\partial D_{nc}}{\partial \dot{\alpha}_c} + \frac{\partial E_{pc}}{\partial \alpha_c} = Q_c. \tag{A.14}$$

Sau khi khai triển, thu được phương trình:

$$\begin{aligned} &k_{\alpha c}\dot{\alpha}_c - a_c m_c \cos\alpha_c \left(a_c \sin\alpha_c\, \dot{\alpha}_c^2 - a_c \cos\alpha_c\, \ddot{\alpha}_c + h_{tc} \sin\psi_{sc}\, \dot{\psi}_{sc}^2 - h_{tc}\cos\psi_{sc}\, \ddot{\psi}_{sc}\right) \\ &\quad + a_c m_c \sin\alpha_c \left(a_c \cos\alpha_c\, \dot{\alpha}_c^2 + a_c \sin\alpha_c\, \ddot{\alpha}_c - h_{tc}\cos\psi_{sc}\, \dot{\psi}_{sc}^2 - h_{tc}\sin\psi_{sc}\, \ddot{\psi}_{sc}\right) \\ &\quad + a_c g m_c \sin\alpha_c = m_c \mu_c g a_c \cos\alpha_c. \end{aligned} \tag{A.15}$$

Từ (A.15), phương trình gia tốc của khối chất lỏng tương đương trong xi téc tiết diện hình tròn được viết:

$$\ddot{\alpha}_c = \frac{\begin{aligned} &a_c g m_c \mu_c \cos\alpha_c - \dot{\alpha}_c k_{\alpha c} - a_c m_c g \sin\alpha_c \\ &- a_c m_c h_{tc}\left[\ddot{\psi}_{sc}\cos(\alpha_c + \psi_{sc}) - \dot{\psi}_{sc}^2 \sin(\alpha_c + \psi_{sc})\right] \end{aligned}}{m_c a_c^2}. \tag{A.16}$$

A.3. Hệ phương trình khai triển của mô hình C

Lực quán tính ly tâm F_{ltc} và lực quán tính tiếp tuyến F_{tc} do chuyển động tương đối của chất lỏng quanh tâm O_T được xác định:

$$F_{ltc} = m_c \dot{\alpha}_c^2 a_c, \quad F_{tc} = m_c \ddot{\alpha}_c a_c. \tag{A.17}$$

Các lực quán tính theo phương ngang do ô tô đổi hướng chuyển động tác dụng lên khối chất lỏng P_{qtc}, tác dụng lên khối lượng được treo P_{qtsc}, tác dụng lên khối lượng không được treo P_{qtuc}, trọng lượng của chất lỏng P_{nc} và mô men chống lắc

ngang của thanh cân bằng trong mô hình C được xác định:

$$\begin{aligned} &P_{qtc} = m_c g\mu_c, \quad P_{nc} = m_c g, \\ &P_{qtsc} = m_{sc} g\mu_c, \quad P_{qtuc} = m_{uc} g\mu_c, \\ &M_{bc} = C_b(\psi_{sc} - \psi_{uc}). \end{aligned} \tag{A.18}$$

Do mô hình có xét chiều cao tâm lắc hệ treo so với khối lượng không được treo, lực ngang liên kết truyền từ khối lượng được treo xuống khối lượng không được treo tạo thêm mô men đối với phương trình lắc ngang của khối lượng không được treo. Với mô hình C, lực ngang liên kết được viết:

$$F_{ys,c}^{(R)} = m_{sc} g\mu_c + F_{yc}^{(l\to t)}, \tag{A.19}$$

trong đó $F_{yc}^{(l\to t)}$ là phản lực ngang do phần khối lượng chất lỏng dao động tác dụng lên xi téc.

Lực đàn hồi và lực cản của hệ thống treo bên trái được viết:

$$\begin{aligned} F_{SLC} = {} & C_{sc}\left[Z_{sc} + d_{sc}\psi_{sc} - (Z_{uc} + d_{sc}\psi_{uc})\right] \\ & + K_{sc}\left[\dot{Z}_{sc} + d_{sc}\dot{\psi}_{sc} - \left(\dot{Z}_{uc} + d_{sc}\dot{\psi}_{uc}\right)\right]. \end{aligned} \tag{A.20}$$

Lực đàn hồi và lực cản của hệ thống treo bên phải được viết:

$$\begin{aligned} F_{SRC} = {} & C_{sc}\left[Z_{sc} - d_{sc}\psi_{sc} - (Z_{uc} - d_{sc}\psi_{uc})\right] \\ & + K_{sc}\left[\dot{Z}_{sc} - d_{sc}\dot{\psi}_{sc} - \left(\dot{Z}_{uc} - d_{sc}\dot{\psi}_{uc}\right)\right]. \end{aligned} \tag{A.21}$$

Lực đàn hồi và lực cản của lốp bên trái được xác định:

$$F_{ULC} = C_{tc}(Z_{uc} + d_{uc}\psi_{uc} - q_L) + K_{tc}(\dot{Z}_{uc} + d_{uc}\dot{\psi}_{uc} - \dot{q}_L). \tag{A.22}$$

Lực đàn hồi và lực cản của lốp bên phải được xác định:

$$F_{URC} = C_{tc}(Z_{uc} - d_{uc}\psi_{uc} - q_R) + K_{tc}(\dot{Z}_{uc} - d_{uc}\dot{\psi}_{uc} - \dot{q}_R). \tag{A.23}$$

Phương trình cân bằng lực theo phương thẳng đứng của khối lượng được treo:

$$-(m_{sc} + m_c)\ddot{Z}_{sc} - F_{SLC} - F_{SRC} - F_{ltc}\cos\alpha_c - F_{tc}\sin\alpha_c = 0. \tag{A.24}$$

Phương trình cân bằng mô men của khối lượng được treo tại tâm lắc O_{RSC}:

$$\begin{aligned}
&- I_{sc}\ddot{\psi}_{sc} - F_{SLC}d_{sc} + F_{SRC}d_{sc} - M_{bc} \\
&\quad + P_{qtsc}h_{sc}\cos\psi_{sc} + m_{sc}gh_{sc}\sin\psi_{sc} \\
&\quad + P_{nc}\left(h_{tc}\sin\psi_{sc} + a_c\sin\alpha_c\right) + P_{qtc}\left(h_{tc}\cos\psi_{sc} - a_c\cos\alpha_c\right) \\
&\quad + F_{ltc}h_{tc}\sin(\psi_{sc}+\alpha_c) + F_{tc}\left[a_c - h_{tc}\cos(\alpha_c+\psi_{sc})\right] = 0.
\end{aligned} \tag{A.25}$$

Phương trình cân bằng lực theo phương thẳng đứng của khối lượng không được treo:

$$-m_{uc}\ddot{Z}_{uc} + F_{SLC} + F_{SRC} - F_{ULC} - F_{URC} = 0. \tag{A.26}$$

Phương trình cân bằng mô men của khối lượng không được treo tại tâm lắc O_{RUC}:

$$\begin{aligned}
&- I_{uc}\ddot{\psi}_{uc} + F_{SLC}d_{sc} - F_{SRC}d_{sc} - F_{ULC}d_{uc} + F_{URC}d_{uc} + M_{bc} \\
&\quad + P_{qtuc}h_{uc}\cos\psi_{uc} + m_{uc}gh_{uc}\sin\psi_{uc} + F^{(R)}_{ys,c}h_{uc}\cos\psi_{uc} = 0.
\end{aligned} \tag{A.27}$$

A.4. Các tham số tương đương của mô hình E1

Đối với xi téc tiết diện hình ê-líp, chiều cao mực chất lỏng được ký hiệu là $h_{l,e}$. Tỷ lệ chiều cao mực chất lỏng được xác định:

$$\lambda_{h,e} = \frac{h_{l,e}}{2b_e}, \qquad 0 \le \lambda_{h,e} \le 1. \tag{A.28}$$

Cao độ mặt thoáng trong hệ tọa độ gắn với tiết diện xi téc là:

$$z_{fe} = -b_e + h_{l,e}, \qquad \theta_e = \arcsin\left(\frac{z_{fe}}{b_e}\right). \tag{A.29}$$

Diện tích phần chất lỏng trong mặt cắt ê-líp được xác định:

$$A_e = a_e b_e\left[\theta_e + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\sin(2\theta_e)\right]. \tag{A.30}$$

Khối lượng toàn bộ chất lỏng tại mức chất tải $h_{l,e}$ được xác định:

$$m_{te} = \rho_l L_e A_e. \tag{A.31}$$

Tỷ số hình học của xi téc và quỹ đạo tương đương được viết:

$$\varepsilon = \frac{a_e}{b_e} = \frac{a_{te}}{b_{te}} = \frac{a_{pe}}{b_{pe}}. \tag{A.32}$$

Để tránh nhầm lẫn giữa tỷ lệ chiều cao và tỷ lệ khối lượng, ký hiệu η_e được dùng làm biến đầu vào của các công thức hồi quy. Nếu công thức hồi quy sử dụng tỷ lệ chiều cao thì:

$$\eta_e = \lambda_{h,e}. \tag{A.33}$$

Nếu công thức hồi quy sử dụng tỷ lệ thể tích hoặc khối lượng thì:

$$\eta_e = h_p = \frac{A_e}{\pi a_e b_e}. \tag{A.34}$$

Các tham số của phần khối lượng chất lỏng dao động và thông số hình học tọa độ khối tâm của các phần khối lượng này được xây dựng tương tự như trong các nghiên cứu [37, 36, 62, 63] và xác định theo các quan hệ như sau:

$$\begin{aligned}\frac{b_{pe}}{b_e} = {} & 1{,}087 + 0{,}6999\eta_e - 0{,}1407\varepsilon - 0{,}9291\eta_e^2 - 1{,}178\varepsilon\eta_e \\ & + 0{,}05495\varepsilon^2 - 0{,}03353\eta_e^3 + 0{,}5404\varepsilon\eta_e^2 + 0{,}1518\varepsilon^2\eta_e.\end{aligned} \tag{A.35}$$

$$\begin{aligned}\frac{m_e}{m_{te}} = {} & 0{,}7844 - 1{,}729\eta_e + 0{,}3351\varepsilon + 1{,}156\eta_e^2 + 0{,}7256\varepsilon\eta_e \\ & - 0{,}1254\varepsilon^2 - 0{,}3219\eta_e^3 - 0{,}9152\varepsilon\eta_e^2 + 0{,}08043\varepsilon^2\eta_e.\end{aligned} \tag{A.36}$$

Khối lượng chuyển động cùng xi téc được xác định:

$$m_{ce} = m_{te} - m_e. \tag{A.37}$$

Vị trí trọng tâm quy đổi của phần khối lượng chuyển động cùng xi téc được xác định:

$$b_{ce} = \frac{m_{te}(b_e - b_{te}) - m_e(b_e - b_{pe})}{m_{ce}}. \tag{A.38}$$

A.5. Khai triển phương trình Lagrange của mô hình E1

Đối với mô hình E1, phần khối lượng chất lỏng dao động m_e được mô tả bằng một khối lượng tương đương chuyển động trên quỹ đạo ê-líp. Tọa độ của phần khối lượng chất lỏng dao động trong mặt phẳng lắc ngang được xác định:

$$\begin{cases} y_e = h_{te}\sin\psi_{se} + a_{pe}\sin\alpha_e\sin\psi_{se} - b_{pe}\cos\alpha_e\cos\psi_{se}, \\ z_e = h_{te}\cos\psi_{se} - a_{pe}\sin\alpha_e\cos\psi_{se} - b_{pe}\cos\alpha_e\sin\psi_{se}. \end{cases} \tag{A.39}$$

Các đạo hàm riêng theo tọa độ α_e được xác định:

$$Y_{\alpha e} = \frac{\partial y_e}{\partial \alpha_e} = a_{pe}\cos\alpha_e\sin\psi_{se} + b_{pe}\sin\alpha_e\cos\psi_{se}, \tag{A.40}$$

$$Z_{\alpha e} = -\frac{\partial z_e}{\partial \alpha_e} = a_{pe}\cos\alpha_e\cos\psi_{se} - b_{pe}\sin\alpha_e\sin\psi_{se}. \tag{A.41}$$

Dấu âm trong định nghĩa $Z_{\alpha e}$ được sử dụng để đưa phương trình Lagrange về dạng thống nhất với mô hình E2. Khi đó:

$$\frac{\partial z_e}{\partial \alpha_e} = -Z_{\alpha e}. \tag{A.42}$$

Sau khi lấy đạo hàm hai lần theo thời gian, gia tốc của khối lượng chất lỏng dao động được tách theo hệ số của $\ddot{\alpha}_e$:

$$\ddot{y}_e = Y_{\alpha e}\ddot{\alpha}_e + A_{\alpha e}, \tag{A.43}$$

$$\ddot{z}_e = -Z_{\alpha e}\ddot{\alpha}_e + B_{\alpha e}. \tag{A.44}$$

Trong đó:

$$A_{\alpha e} = \ddot{y}_e|_{\ddot{\alpha}_e=0}\,, \qquad B_{\alpha e} = \ddot{z}_e|_{\ddot{\alpha}_e=0}\,. \tag{A.45}$$

Động năng, thế năng và hàm tiêu tán Rayleigh được viết:

$$E_{k,e} = \frac{1}{2}m_e\left(\dot{y}_e^2 + \dot{z}_e^2\right), \tag{A.46}$$

$$E_{p,e} = m_e g z_e, \tag{A.47}$$

$$D_e = \frac{1}{2} k_{\alpha e} \dot{\alpha}_e^2. \tag{A.48}$$

Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho tọa độ tổng quát α_e:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e}}{\partial \dot{\alpha}_e}\right) - \frac{\partial E_{k,e}}{\partial \alpha_e} + \frac{\partial D_e}{\partial \dot{\alpha}_e} + \frac{\partial E_{p,e}}{\partial \alpha_e} = Q_{\alpha e}. \tag{A.49}$$

Với động năng dạng (A.46), thành phần quán tính trong phương trình Lagrange được xác định:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e}}{\partial \dot{\alpha}_e}\right) - \frac{\partial E_{k,e}}{\partial \alpha_e} = m_e \left(\ddot{y}_e \frac{\partial y_e}{\partial \alpha_e} + \ddot{z}_e \frac{\partial z_e}{\partial \alpha_e}\right). \tag{A.50}$$

Thay (A.43)–(A.44) và (A.42) vào (A.50), thu được:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e}}{\partial \dot{\alpha}_e}\right) - \frac{\partial E_{k,e}}{\partial \alpha_e} = m_e \left(Y_{\alpha e}^2 + Z_{\alpha e}^2\right) \ddot{\alpha}_e + m_e \left(Y_{\alpha e} A_{\alpha e} - Z_{\alpha e} B_{\alpha e}\right). \tag{A.51}$$

Thành phần cản nhớt tương đương được xác định:

$$\frac{\partial D_e}{\partial \dot{\alpha}_e} = k_{\alpha e} \dot{\alpha}_e. \tag{A.52}$$

Thành phần trọng lực suy rộng là:

$$\frac{\partial E_{p,e}}{\partial \alpha_e} = m_e g \frac{\partial z_e}{\partial \alpha_e} = -m_e g Z_{\alpha e}. \tag{A.53}$$

Lực suy rộng do gia tốc ngang chuẩn hóa μ_e gây ra được xác định:

$$Q_{\alpha e} = m_e g \mu_e \frac{\partial y_e}{\partial \alpha_e} = m_e g \mu_e Y_{\alpha e}. \tag{A.54}$$

Thay các thành phần trên vào phương trình Lagrange (A.49), ta thu được:

$$M_{\alpha e} \ddot{\alpha}_e + F_{\alpha e} = 0, \tag{A.55}$$

trong đó:

$$M_{\alpha e} = m_e \left(Y_{\alpha e}^2 + Z_{\alpha e}^2\right), \tag{A.56}$$

$$F_{\alpha e} = m_e \left(Y_{\alpha e} A_{\alpha e} - Z_{\alpha e} B_{\alpha e}\right) + k_{\alpha e} \dot{\alpha}_e - m_e g Z_{\alpha e} - m_e g \mu_e Y_{\alpha e}. \tag{A.57}$$

Do đó, phương trình chuyển động của phần khối lượng chất lỏng dao động trong

mô hình E1 được xác định:

$$\ddot{\alpha}_e = -\frac{F_{\alpha e}\left(\alpha_e, \dot{\alpha}_e, \psi_{se}, \dot{\psi}_{se}, \ddot{\psi}_{se}\right)}{M_{\alpha e}\left(\alpha_e, \psi_{se}\right)}. \tag{A.58}$$

A.6. Khai triển các quan hệ hình học và phương trình động lực học của mô hình E2

A.6.1. Các tham số tương đương của chất lỏng trong xi téc tiết diện hình ê-líp

Bề rộng mặt thoáng của chất lỏng trong mặt cắt ngang là:

$$B_{fe2} = 2a_{e2}\cos\theta_{e2}. \tag{A.59}$$

Tần số góc riêng của dao động chất lỏng được xác định trên cơ sở quan hệ tán sắc của sóng trọng lực mặt thoáng tuyến tính [8, 16, 18, 26]:

$$\omega_{ne2} = \sqrt{g\frac{\pi}{B_{fe2}}\tanh\left(\frac{\pi h_{l,e2}}{B_{fe2}}\right)}. \tag{A.60}$$

Hệ số cản nhớt tương đương theo tọa độ dao động tương đối của chất lỏng được xác định từ tỷ số cản ζ:

$$k_{\alpha e2} = 2\zeta M_{\alpha e2,0}\omega_{ne2}. \tag{A.61}$$

Trong đó, ζ là tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng dùng trong mô hình. Sau nhận dạng ở Chương 3, giá trị sử dụng trong mô phỏng được lấy $\zeta = \zeta^*_{\text{id}} \approx 0{,}03$.

Khối lượng chất lỏng được tách thành phần khối lượng dao động và phần khối lượng chuyển động cùng xi téc:

$$m_{te2} = m_{e2} + m_{ce2}. \tag{A.62}$$

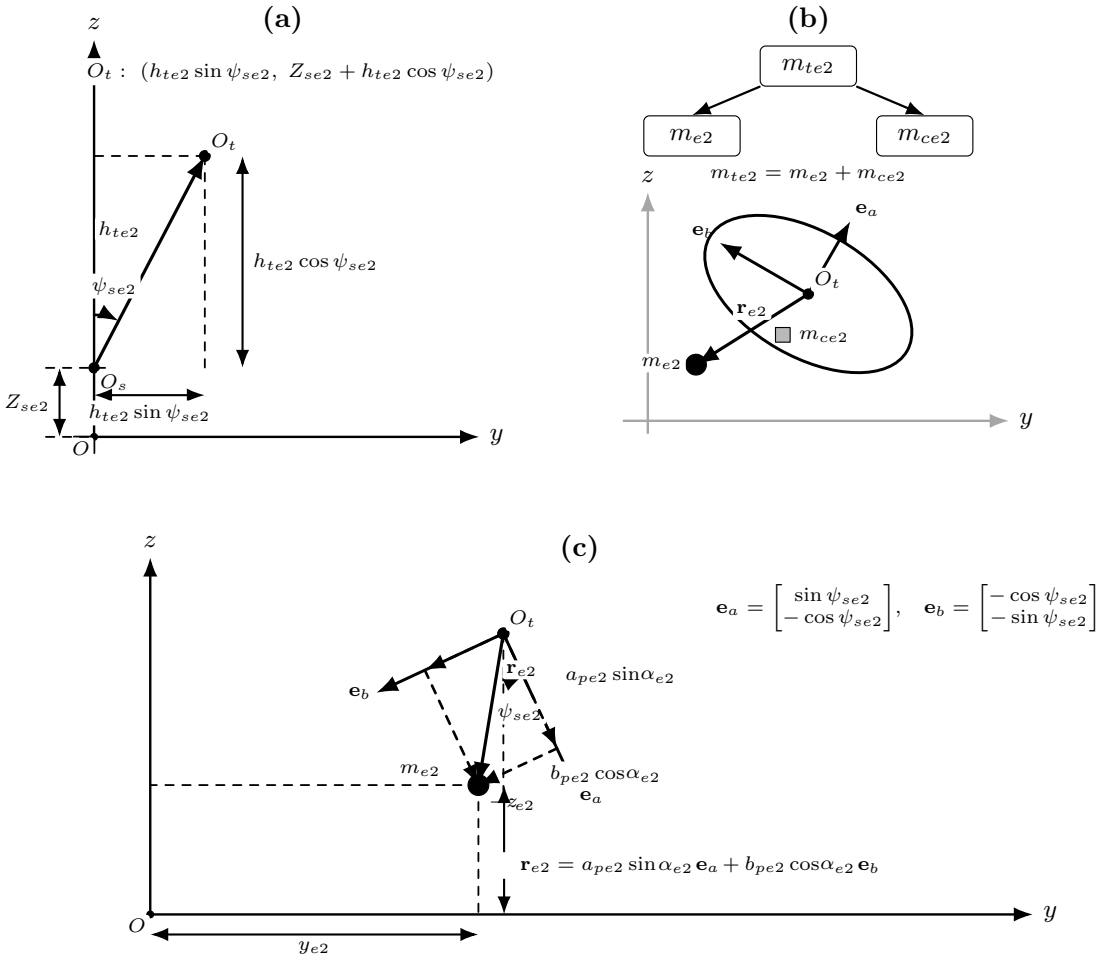
Tọa độ trọng tâm của phần khối lượng chuyển động cùng xi téc được xác định từ điều kiện bảo toàn mô men tĩnh:

$$z_{ce2} = \frac{m_{te2}z_{te2} - m_{e2}z_{e2,0}}{m_{ce2}}. \tag{A.63}$$

trong đó $z_{e2,0}$ là tọa độ trọng tâm ban đầu của phần khối lượng chất lỏng dao động trong hệ tọa độ gắn với xi téc.

A.6.2. Khai triển tọa độ của khối lượng chất lỏng dao động trong mô hình E2

Quan hệ hình học dùng để xác định tọa độ của phần khối lượng chất lỏng dao động m_{e2} trong hệ tọa độ quán tính được minh họa trên Hình A.1. Trong mô hình này, tâm xi téc chuyển động cùng khối lượng được treo theo chuyển vị thẳng đứng Z_{se2} và góc lắc ngang ψ_{se2}. Phần khối lượng chất lỏng dao động được mô tả bằng mô hình con lắc tương đương, trong đó α_{e2} là tọa độ dao động tương đối của chất lỏng so với xi téc.



Hình A.1: *Sơ đồ xác định tọa độ khối lượng chất lỏng dao động trong mô hình con lắc tương đương*

Tọa độ của tâm xi téc O_t trong hệ tọa độ quán tính Oyz được xác định:

$$\begin{cases} y_{O_t} = h_{te2} \sin \psi_{se2}, \\ z_{O_t} = Z_{se2} + h_{te2} \cos \psi_{se2}. \end{cases} \tag{A.64}$$

Để mô tả quỹ đạo dao động tương đương của phần khối lượng chất lỏng m_{e2}, xét hai véc tơ đơn vị gắn với xi téc:

$$\mathbf{e}_a = \begin{bmatrix} \sin \psi_{se2} \\ -\cos \psi_{se2} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{e}_b = \begin{bmatrix} -\cos \psi_{se2} \\ -\sin \psi_{se2} \end{bmatrix}. \tag{A.65}$$

Trong đó, $\mathbf{e}_a$ và $\mathbf{e}_b$ lần lượt là các phương gắn với hai tham số hình học a_{pe2} và b_{pe2} của quỹ đạo dao động tương đương. Véc tơ vị trí tương đối của phần khối lượng chất lỏng dao động so với tâm xi téc được viết:

$$\mathbf{r}_{m/O_t} = a_{pe2} \sin \alpha_{e2}\, \mathbf{e}_a + b_{pe2} \cos \alpha_{e2}\, \mathbf{e}_b. \tag{A.66}$$

Thay (A.65) vào (A.66), ta có:

$$\mathbf{r}_{m/O_t} = \begin{bmatrix} a_{pe2} \sin \alpha_{e2} \sin \psi_{se2} - b_{pe2} \cos \alpha_{e2} \cos \psi_{se2} \\ -a_{pe2} \sin \alpha_{e2} \cos \psi_{se2} - b_{pe2} \cos \alpha_{e2} \sin \psi_{se2} \end{bmatrix}. \tag{A.67}$$

Do đó, tọa độ tuyệt đối của phần khối lượng chất lỏng dao động m_{e2} trong hệ tọa độ quán tính được xác định theo:

$$\begin{bmatrix} y_{e2} \\ z_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{O_t} \\ z_{O_t} \end{bmatrix} + \mathbf{r}_{m/O_t}. \tag{A.68}$$

Từ (A.64) và (A.67), suy ra:

$$\begin{cases} y_{e2} = h_{te2} \sin \psi_{se2} + a_{pe2} \sin \alpha_{e2} \sin \psi_{se2} - b_{pe2} \cos \alpha_{e2} \cos \psi_{se2}, \\ z_{e2} = Z_{se2} + h_{te2} \cos \psi_{se2} - a_{pe2} \sin \alpha_{e2} \cos \psi_{se2} - b_{pe2} \cos \alpha_{e2} \sin \psi_{se2}. \end{cases} \tag{A.69}$$

Lấy đạo hàm theo thời gian thu được vận tốc của phần khối lượng chất lỏng

dao động:

$$\begin{cases} \dot{y}_{e2} = h_{te2}\cos\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2} + a_{pe2}\left(\cos\alpha_{e2}\dot{\alpha}_{e2}\sin\psi_{se2} + \sin\alpha_{e2}\cos\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2}\right) \\ \qquad + b_{pe2}\left(\sin\alpha_{e2}\dot{\alpha}_{e2}\cos\psi_{se2} + \cos\alpha_{e2}\sin\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2}\right), \\ \dot{z}_{e2} = \dot{Z}_{se2} - h_{te2}\sin\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2} - a_{pe2}\left(\cos\alpha_{e2}\dot{\alpha}_{e2}\cos\psi_{se2} - \sin\alpha_{e2}\sin\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2}\right) \\ \qquad + b_{pe2}\left(\sin\alpha_{e2}\dot{\alpha}_{e2}\sin\psi_{se2} - \cos\alpha_{e2}\cos\psi_{se2}\dot{\psi}_{se2}\right). \end{cases} \tag{A.70}$$

Các đạo hàm riêng theo tọa độ tổng quát α_{e2} được xác định:

$$Y_{\alpha e2} = \frac{\partial y_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = a_{pe2}\cos\alpha_{e2}\sin\psi_{se2} + b_{pe2}\sin\alpha_{e2}\cos\psi_{se2}, \tag{A.71}$$

$$Z_{\alpha e2} = -\frac{\partial z_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = a_{pe2}\cos\alpha_{e2}\cos\psi_{se2} - b_{pe2}\sin\alpha_{e2}\sin\psi_{se2}. \tag{A.72}$$

Sau khi lấy đạo hàm hai lần theo thời gian, gia tốc của khối lượng chất lỏng dao động được tách theo hệ số của $\ddot{\alpha}_{e2}$:

$$\ddot{y}_{e2} = Y_{\alpha e2}\ddot{\alpha}_{e2} + A_{\alpha e2}, \tag{A.73}$$

$$\ddot{z}_{e2} = -Z_{\alpha e2}\ddot{\alpha}_{e2} + B_{\alpha e2}. \tag{A.74}$$

Trong đó:

$$A_{\alpha e2} = \ddot{y}_{e2}|_{\ddot{\alpha}_{e2}=0}, \qquad B_{\alpha e2} = \ddot{z}_{e2}|_{\ddot{\alpha}_{e2}=0}. \tag{A.75}$$

A.6.3. Khai triển phương trình Lagrange theo tọa độ α_{e2}

Động năng, thế năng và hàm tiêu tán Rayleigh của phần khối lượng chất lỏng dao động được viết:

$$E_{k,e2} = \frac{1}{2}m_{e2}\left(\dot{y}_{e2}^2 + \dot{z}_{e2}^2\right), \tag{A.76}$$

$$E_{p,e2} = m_{e2}gz_{e2}, \tag{A.77}$$

$$D_{e2} = \frac{1}{2}k_{\alpha e2}\dot{\alpha}_{e2}^2. \tag{A.78}$$

Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho tọa độ tổng quát α_{e2}:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \dot{\alpha}_{e2}}\right) - \frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \alpha_{e2}} + \frac{\partial D_{e2}}{\partial \dot{\alpha}_{e2}} + \frac{\partial E_{p,e2}}{\partial \alpha_{e2}} = Q_{\alpha e2}. \tag{A.79}$$

Với động năng dạng (A.76), thành phần quán tính trong phương trình Lagrange có thể viết:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \dot{\alpha}_{e2}}\right) - \frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \alpha_{e2}} = m_{e2}\left(\ddot{y}_{e2}\frac{\partial y_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} + \ddot{z}_{e2}\frac{\partial z_{e2}}{\partial \alpha_{e2}}\right). \tag{A.80}$$

Từ (A.71) và (A.72), ta có:

$$\frac{\partial y_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = Y_{\alpha e2}, \qquad \frac{\partial z_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = -Z_{\alpha e2}. \tag{A.81}$$

Thay (A.73), (A.74) và (A.81) vào (A.80), thu được:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \dot{\alpha}_{e2}}\right) - \frac{\partial E_{k,e2}}{\partial \alpha_{e2}} = m_{e2}\left(Y_{\alpha e2}^2 + Z_{\alpha e2}^2\right)\ddot{\alpha}_{e2} + m_{e2}\left(Y_{\alpha e2}A_{\alpha e2} - Z_{\alpha e2}B_{\alpha e2}\right). \tag{A.82}$$

Thành phần cản nhớt tương đương được xác định:

$$\frac{\partial D_{e2}}{\partial \dot{\alpha}_{e2}} = k_{\alpha e2}\dot{\alpha}_{e2}. \tag{A.83}$$

Thành phần thế năng trọng trường theo tọa độ α_{e2} là:

$$\frac{\partial E_{p,e2}}{\partial \alpha_{e2}} = m_{e2}g\frac{\partial z_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = -m_{e2}gZ_{\alpha e2}. \tag{A.84}$$

Lực suy rộng do gia tốc ngang chuẩn hóa μ_{e2} gây ra được xác định:

$$Q_{\alpha e2} = m_{e2}g\mu_{e2}\frac{\partial y_{e2}}{\partial \alpha_{e2}} = m_{e2}g\mu_{e2}Y_{\alpha e2}. \tag{A.85}$$

Thay các thành phần trên vào phương trình Lagrange (A.79), ta thu được:

$$M_{\alpha e2}\ddot{\alpha}_{e2} + F_{\alpha e2} = 0, \tag{A.86}$$

trong đó:

$$M_{\alpha e2} = m_{e2}\left(Y_{\alpha e2}^2 + Z_{\alpha e2}^2\right), \tag{A.87}$$

$$F_{\alpha e2} = m_{e2}\left(Y_{\alpha e2}A_{\alpha e2} - Z_{\alpha e2}B_{\alpha e2}\right) + c_{\alpha e2}\dot{\alpha}_{e2} - m_{e2}gZ_{\alpha e2} - m_{e2}g\mu_{e2}Y_{\alpha e2}. \tag{A.88}$$

Do đó:

$$\ddot{\alpha}_{e2} = -\frac{F_{\alpha e2}}{M_{\alpha e2}}. \tag{A.89}$$

A.6.4. Lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc hệ treo trong mô hình E2

Tương tự mô hình E1, chất lỏng trong mô hình E2 được tách thành phần khối lượng m_{ce2} chuyển động cùng xi téc và phần khối lượng m_{e2} dao động tương đối. Lực ngang liên kết truyền qua tâm lắc hệ treo được xác định:

$$F_{ys,e2}^{(R)} = (m_{se2} + m_{ce2})\, g\mu_{e2} + F_{ye2}^{(l\to t)}. \tag{A.90}$$

Trong đó:

$$F_{ye2}^{(l\to t)} = m_{e2}\left(g\mu_{e2} - \ddot{y}_{e2}\right). \tag{A.91}$$

Mô men tương ứng tác dụng lên khối lượng không được treo là:

$$M_{R,e2} = F_{ys,e2}^{(R)} h_{ue2} \cos\psi_{ue2}. \tag{A.92}$$

Nếu m_{se2} đã được định nghĩa bao gồm phần khối lượng m_{ce2}, không cộng thêm m_{ce2} trong (A.90).

A.6.5. Lực và mô men tương đương do dao động chất lỏng tác dụng lên thân xe

Lực quán tính thẳng đứng tương đương do phần khối lượng chất lỏng dao động được xác định:

$$F_{ze2} = m_{e2}\ddot{z}_{e2}. \tag{A.93}$$

Mô men suy rộng do dao động chất lỏng đối với chuyển động lắc ngang của khối lượng được treo được xác định theo nguyên lý công ảo:

$$M_{sl,e2} = Q_{\psi e2} - m_{e2}\left(\ddot{y}_{e2}\frac{\partial y_{e2}}{\partial \psi_{se2}} + \ddot{z}_{e2}\frac{\partial z_{e2}}{\partial \psi_{se2}}\right) - m_{e2}g\frac{\partial z_{e2}}{\partial \psi_{se2}}. \tag{A.94}$$

Trong đó:

$$Q_{\psi e2} = m_{e2} g \mu_{e2} \frac{\partial y_{e2}}{\partial \psi_{se2}}. \tag{A.95}$$

A.7. Phản lực pháp tuyến tại bánh xe và hệ số chuyển tải trọng ngang

Sau khi giải hệ phương trình động lực học của hệ xe–chất lỏng, trạng thái mất ổn định lật ngang được đánh giá thông qua sự thay đổi phản lực pháp tuyến tại bánh xe bên trái và bên phải. Với mô hình tổng quát $\mathcal{M} \in \{\mathrm{C}, \mathrm{E1}, \mathrm{E2}\}$, ký hiệu $\widetilde{F}_{zL}^{\mathcal{M}}$ và $\widetilde{F}_{zR}^{\mathcal{M}}$ là phản lực pháp tuyến giả định tại bánh trái và bánh phải khi hai bánh xe còn tiếp xúc với mặt đường.

Theo cách trình bày trong thân luận án, đối với các mô hình C và E1, phản lực pháp tuyến giả định được xác định theo:

$$\begin{cases} \widetilde{F}_{zL}^{\mathcal{M}} = F_{z0}^{\mathcal{M}} - C_t^{\mathcal{M}} d_u^{\mathcal{M}} \psi_u^{\mathcal{M}} - K_t^{\mathcal{M}} d_u^{\mathcal{M}} \dot{\psi}_u^{\mathcal{M}}, \\ \widetilde{F}_{zR}^{\mathcal{M}} = F_{z0}^{\mathcal{M}} + C_t^{\mathcal{M}} d_u^{\mathcal{M}} \psi_u^{\mathcal{M}} + K_t^{\mathcal{M}} d_u^{\mathcal{M}} \dot{\psi}_u^{\mathcal{M}}, \end{cases} \qquad \mathcal{M} \in \{\mathrm{C}, \mathrm{E1}\}. \tag{A.96}$$

Trong đó, với mô hình C:

$$C_t^{C} = C_{tc}, \quad K_t^{C} = K_{tc}, \quad d_u^{C} = d_{uc}, \quad \psi_u^{C} = \psi_{uc}; \tag{A.97}$$

với mô hình E1:

$$C_t^{E1} = C_{te}, \quad K_t^{E1} = K_{te}, \quad d_u^{E1} = d_{ue}, \quad \psi_u^{E1} = \psi_{ue}. \tag{A.98}$$

Đối với mô hình E2, do có xét chuyển vị thẳng đứng của khối lượng không được treo và kích động mấp mô hai bên mặt đường, biến dạng động của lốp được xác định:

$$\begin{cases} \delta_{tL}^{E2} = Z_{ue2} + d_{ue2}\psi_{ue2} - q_L, \\ \delta_{tR}^{E2} = Z_{ue2} - d_{ue2}\psi_{ue2} - q_R, \\ \dot{\delta}_{tL}^{E2} = \dot{Z}_{ue2} + d_{ue2}\dot{\psi}_{ue2} - \dot{q}_L, \\ \dot{\delta}_{tR}^{E2} = \dot{Z}_{ue2} - d_{ue2}\dot{\psi}_{ue2} - \dot{q}_R. \end{cases} \tag{A.99}$$

Phản lực pháp tuyến giả định tại hai bên bánh xe của mô hình E2 là:

$$\begin{cases} \widetilde{F}_{zL}^{E2} = F_{z0}^{E2} - C_{te2}\delta_{tL}^{E2} - K_{te2}\dot{\delta}_{tL}^{E2}, \\ \widetilde{F}_{zR}^{E2} = F_{z0}^{E2} - C_{te2}\delta_{tR}^{E2} - K_{te2}\dot{\delta}_{tR}^{E2}. \end{cases} \tag{A.100}$$

Phản lực pháp tuyến thực tế được xác định từ phản lực giả định theo điều kiện tiếp xúc một chiều:

$$F_{zL}^{\mathcal{M}} = \max\left(0, \widetilde{F}_{zL}^{\mathcal{M}}\right), \qquad F_{zR}^{\mathcal{M}} = \max\left(0, \widetilde{F}_{zR}^{\mathcal{M}}\right). \tag{A.101}$$

Hệ số chuyển tải trọng ngang của mô hình $\mathcal{M}$ được xác định:

$$\mathrm{LTR}^{\mathcal{M}} = \begin{cases} \dfrac{\left|F_{zR}^{\mathcal{M}} - F_{zL}^{\mathcal{M}}\right|}{F_{zR}^{\mathcal{M}} + F_{zL}^{\mathcal{M}}}, & F_{zR}^{\mathcal{M}} + F_{zL}^{\mathcal{M}} > \varepsilon_{\Sigma F}, \\ 1, & F_{zR}^{\mathcal{M}} + F_{zL}^{\mathcal{M}} \le \varepsilon_{\Sigma F}. \end{cases} \tag{A.102}$$

Trong tính toán số, ngưỡng khởi phát nhấc bánh được nhận diện khi:

$$F_{z,\min}^{\mathcal{M}} \le \varepsilon_F \quad \text{hoc} \quad \mathrm{LTR}_{\max}^{\mathcal{M}} \ge 1 - \varepsilon_{\mathrm{LTR}}. \tag{A.103}$$

Điều kiện này chỉ biểu thị thời điểm một bên bánh xe bắt đầu mất tiếp xúc với mặt đường, chưa đồng nghĩa với trạng thái lật không phục hồi.

PHỤ LỤC B. DỮ LIỆU THÍ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ ĐỐI SÁNH BỔ SUNG

Phụ lục này tổng hợp các nội dung bổ trợ cho Chương 3, gồm trang thiết bị thí nghiệm, dữ liệu dao động tự do dùng để xác định hệ số cản giảm chấn và các đồ thị đối sánh bổ sung giữa mô hình E2 sau nhận dạng với dữ liệu thí nghiệm.

B.1. Thiết bị đo và chức năng thu thập dữ liệu

Các thiết bị chính sử dụng trong thí nghiệm gồm bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43, cảm biến đo độ cao HF–750 của KISTLER và bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2. Chức năng chính của các thiết bị được tổng hợp trong Bảng B.1.

Bảng B.1: *Thiết bị chính sử dụng trong thí nghiệm*

Thiết bị	**Chức năng**	**Đại lượng sử dụng trong nghiên cứu**
DEWE–43	Thu thập và đồng bộ tín hiệu từ các cảm biến	Tín hiệu chuyển vị, gia tốc và góc lắc ngang
HF–750	Đo khoảng cách từ thân xe đến mặt đường	Chuyển vị thẳng đứng tại hai bên thân xe
DS–IMU2	Đo vị trí, vận tốc, gia tốc và định hướng	Vận tốc xe, gia tốc ngang và góc lắc ngang

B.1.1. Bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43

DEWE–43 là bộ thu thập dữ liệu đa kênh, kết nối qua cổng USB, dùng để thu nhận và đồng bộ các tín hiệu đo trong quá trình thí nghiệm. Thiết bị có các kênh đầu vào tương tự, đầu vào số, bộ đếm, bộ mã hóa và cổng CAN tốc độ cao, phù hợp với các bài toán đo động lực học ô tô.



Hình B.1: *Bộ thu thập dữ liệu đa năng DEWE–43*

B.1.2. Cảm biến đo độ cao HF–750

HF–750 là cảm biến đo độ cao theo nguyên lý laser, được sử dụng để đo khoảng cách từ thân xe đến mặt đường. Trong thí nghiệm, hai cảm biến HF–750 được lắp hai bên thân xe để xác định chuyển vị tương đối, phục vụ tính toán đáp ứng dao động thẳng đứng và lắc ngang của thân xe.



Hình B.2: *Cảm biến đo độ cao HF–750*

B.1.3. Bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2

DS–IMU2 là hệ đo GNSS/INS tích hợp cảm biến quán tính, dùng để xác định vị trí, vận tốc, gia tốc và định hướng của xe. Trong nghiên cứu này, dữ liệu từ DS–IMU2 được sử dụng để xác định vận tốc xe, gia tốc ngang và góc lắc ngang phục vụ đối sánh mô hình.



Hình B.3: *Bộ đo vị trí, vận tốc, gia tốc DS–IMU2*

B.2. Dữ liệu dao động tự do đo bằng cảm biến HF–750

Dữ liệu trong Bảng B.2 là tín hiệu dao động tự do tắt dần của thân xe đo bằng cảm biến HF–750. Tín hiệu này được sử dụng để xác định logarit suy giảm dao động và hệ số cản giảm chấn tương đương của hệ thống treo sau. Các giá trị đo trong bảng được trình bày theo đơn vị dm; khi tính toán biên độ dao động trong Chương 3, dữ liệu được quy đổi sang m. Hai biên độ A_1 và A_2 sử dụng trong Mục 3.2.3 được xác định từ hai đỉnh liên tiếp của đáp ứng dao động tắt dần trên Hình 3.10; các giá trị thời gian và chuyển vị tương ứng có thể đối chiếu với dữ liệu đo trong Bảng B.2.

Bảng B.2: *Dữ liệu dao động tự do của thân xe đo bằng cảm biến HF–750*

TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)
1	-0,48786	73	-0,30908	145	-0,37714	217	-0,91083	289	0,07750	361	0,32027	433	0,60109	505	-0,08640
2	-0,33419	74	-0,31318	146	-0,41315	218	-0,91338	290	0,12649	362	0,23040	434	0,52857	506	-0,08835
3	-0,19312	75	-0,31544	147	-0,45537	219	-0,90636	291	0,18542	363	0,11361	435	0,46823	507	-0,07675
4	-0,06467	76	-0,27612	148	-0,49433	220	-0,88626	292	0,21626	364	-0,01250	436	0,41917	508	-0,05651
5	0,05116	77	-0,24598	149	-0,52686	221	-0,85161	293	0,24087	365	-0,10805	437	0,37496	509	-0,01173
6	0,15439	78	-0,22608	150	-0,54727	222	-0,78404	294	0,26510	366	-0,17491	438	0,33866	510	0,02779
7	0,24500	79	-0,22940	151	-0,54755	223	-0,68722	295	0,31320	367	-0,19499	439	0,32534	511	0,05947
8	0,32300	80	-0,23481	152	-0,52103	224	-0,57576	296	0,33806	368	-0,17973	440	0,33576	512	0,06957
9	0,38839	81	-0,24213	153	-0,47710	225	-0,44023	297	0,41080	369	-0,15794	441	0,37607	513	0,05383
10	0,44116	82	-0,26115	154	-0,44399	226	-0,29071	298	0,49816	370	-0,12195	442	0,43780	514	0,05415
11	0,48133	83	-0,29042	155	-0,41019	227	-0,13412	299	0,56996	371	-0,08066	443	0,51232	515	0,06833
12	0,50612	84	-0,33792	156	-0,38768	228	0,00954	300	0,63172	372	-0,03659	444	0,57900	516	0,08911
13	0,52103	85	-0,39442	157	-0,37894	229	0,11479	301	0,65438	373	-0,01032	445	0,65478	517	0,11633
14	0,51940	86	-0,44808	158	-0,36470	230	0,19461	302	0,65111	374	0,02361	446	0,70098	518	0,14205
15	0,50382	87	-0,51172	159	-0,35696	231	0,22547	303	0,62159	375	0,06520	447	0,76027	519	0,16701
16	0,48075	88	-0,57992	160	-0,34694	232	0,21076	304	0,58129	376	0,10394	448	0,79919	520	0,20287
17	0,44203	89	-0,63760	161	-0,34043	233	0,17236	305	0,53117	377	0,13435	449	0,83118	521	0,24130
18	0,40234	90	-0,68633	162	-0,34698	234	0,11919	306	0,46735	378	0,14945	450	0,84363	522	0,28566
19	0,38874	91	-0,71681	163	-0,37508	235	0,04960	307	0,39046	379	0,15651	451	0,83847	523	0,32387
20	0,37790	92	-0,72871	164	-0,42167	236	-0,02952	308	0,29597	380	0,17426	452	0,82719	524	0,36333
21	0,38605	93	-0,72630	165	-0,47419	237	-0,12297	309	0,15334	381	0,20540	453	0,81756	525	0,37416
22	0,40021	94	-0,71011	166	-0,51682	238	-0,21742	310	0,04625	382	0,22413	454	0,81243	526	0,39431
23	0,43367	95	-0,68915	167	-0,53582	239	-0,29887	311	-0,04712	383	0,22573	455	0,80111	527	0,40625
24	0,43579	96	-0,67357	168	-0,53990	240	-0,35504	312	-0,05302	384	0,22138	456	0,79409	528	0,42458
25	0,42185	97	-0,67173	169	-0,53193	241	-0,37103	313	-0,00405	385	0,21525	457	0,78145	529	0,44250
26	0,38691	98	-0,67008	170	-0,50551	242	-0,36899	314	0,08142	386	0,19783	458	0,76852	530	0,43748
27	0,33885	99	-0,65314	171	-0,48413	243	-0,35812	315	0,21712	387	0,17537	459	0,74026	531	0,42603
28	0,28149	100	-0,62615	172	-0,47367	244	-0,34338	316	0,34060	388	0,14062	460	0,71574	532	0,40087
29	0,23149	101	-0,59453	173	-0,47327	245	-0,33014	317	0,52546	389	0,12325	461	0,68671	533	0,36490
30	0,18375	102	-0,55599	174	-0,47229	246	-0,34121	318	0,66733	390	0,14188	462	0,65207	534	0,35632
31	0,13771	103	-0,51857	175	-0,45825	247	-0,36805	319	0,76329	391	0,19919	463	0,62053	535	0,33597
32	0,09634	104	-0,48671	176	-0,44679	248	-0,41511	320	0,84764	392	0,28105	464	0,59916	536	0,31042
33	0,06181	105	-0,45310	177	-0,43634	249	-0,45888	321	0,91291	393	0,35794	465	0,58253	537	0,27755
34	0,01169	106	-0,42807	178	-0,43745	250	-0,49272	322	0,92605	394	0,44269	466	0,57287	538	0,23705
35	-0,04717	107	-0,42342	179	-0,45921	251	-0,53134	323	0,88369	395	0,53144	467	0,58032	539	0,19530

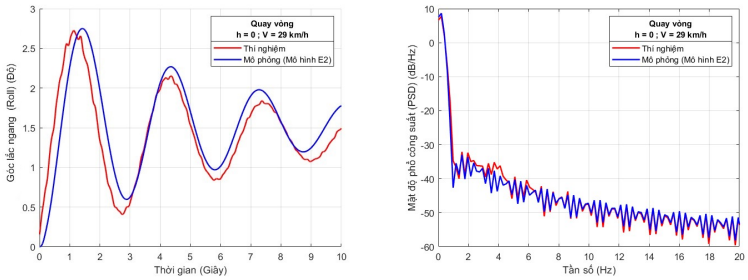
Tiếp theo trang sau

Bảng B.2: *Dữ liệu dao động tự do của thân xe đo bằng cảm biến HF–750 (tiếp)*

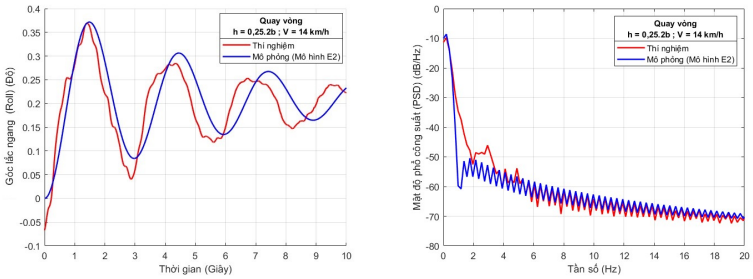
TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)	TT	Giá trị (dm)
36	-0,10183	108	-0,43017	180	-0,48811	252	-0,58361	324	0,75292	396	0,61352	468	0,57583	540	0,14121
37	-0,15408	109	-0,43601	181	-0,51024	253	-0,63963	325	0,55405	397	0,69473	469	0,57497	541	0,07597
38	-0,15017	110	-0,44468	182	-0,52008	254	-0,70072	326	0,31614	398	0,75466	470	0,56226	542	0,02419
39	-0,12447	111	-0,45935	183	-0,51488	255	-0,75848	327	0,04816	399	0,80760	471	0,53910	543	-0,02755
40	-0,10618	112	-0,46855	184	-0,48279	256	-0,78908	328	-0,24171	400	0,85780	472	0,50535	544	-0,07863
41	-0,07039	113	-0,47242	185	-0,43275	257	-0,79445	329	-0,54290	401	0,89133	473	0,47109	545	-0,13782
42	-0,04529	114	-0,47586	186	-0,36504	258	-0,77675	330	-0,75804	402	0,91539	474	0,45086	546	-0,17699
43	-0,01945	115	-0,46916	187	-0,29856	259	-0,74108	331	-0,91926	403	0,92452	475	0,44069	547	-0,21773
44	-0,00819	116	-0,47054	188	-0,23627	260	-0,68222	332	-0,97401	404	0,90605	476	0,45088	548	-0,25613
45	-0,00443	117	-0,47231	189	-0,17907	261	-0,62820	333	-0,97511	405	0,85228	477	0,47703	549	-0,29177
46	0,00319	118	-0,47067	190	-0,13301	262	-0,58087	334	-0,91474	406	0,78510	478	0,50731	550	-0,32157
47	0,01121	119	-0,46279	191	-0,11342	263	-0,53460	335	-0,78647	407	0,72520	479	0,52902	551	-0,35502
48	0,01055	120	-0,45197	192	-0,10963	264	-0,47254	336	-0,63440	408	0,67934	480	0,56723	552	-0,39285
49	0,00367	121	-0,43585	193	-0,11572	265	-0,40898	337	-0,44978	409	0,68193	481	0,60401	553	-0,43269
50	-0,01544	122	-0,40889	194	-0,12237	266	-0,35190	338	-0,26549	410	0,71386	482	0,66318	554	-0,46083
51	-0,04078	123	-0,37770	195	-0,13472	267	-0,30006	339	-0,05555	411	0,75412	483	0,73022	555	-0,49245
52	-0,07449	124	-0,34508	196	-0,15437	268	-0,25251	340	0,16565	412	0,77948	484	0,79163	556	-0,52081
53	-0,12846	125	-0,31037	197	-0,19566	269	-0,22376	341	0,36084	413	0,78320	485	0,81635	557	-0,54526
54	-0,21352	126	-0,27836	198	-0,25593	270	-0,21543	342	0,49971	414	0,77808	486	0,82938	558	-0,57396
55	-0,32717	127	-0,26385	199	-0,33328	271	-0,19099	343	0,55782	415	0,78668	487	0,82642	559	-0,60128
56	-0,41574	128	-0,26213	200	-0,40421	272	-0,17606	344	0,53107	416	0,78751	488	0,81152	560	-0,61991
57	-0,48370	129	-0,26889	201	-0,46417	273	-0,15899	345	0,47689	417	0,78374	489	0,79047	561	-0,62319
58	-0,50008	130	-0,28211	202	-0,50115	274	-0,15026	346	0,41229	418	0,76624	490	0,74899	562	-0,57919
59	-0,51407	131	-0,30348	203	-0,51618	275	-0,14604	347	0,34362	419	0,74695	491	0,69728	563	-0,53028
60	-0,51659	132	-0,31371	204	-0,52686	276	-0,15491	348	0,29711	420	0,73427	492	0,63305	564	-0,48506
61	-0,48605	133	-0,31263	205	-0,54200	277	-0,17554	349	0,27517	421	0,71782	493	0,56261	565	-0,43063
62	-0,45536	134	-0,30282	206	-0,56922	278	-0,20274	350	0,29298	422	0,71712	494	0,49031	566	-0,37827
63	-0,41933	135	-0,28973	207	-0,60925	279	-0,23072	351	0,33489	423	0,71672	495	0,41749	567	-0,33881
64	-0,37628	136	-0,29111	208	-0,63798	280	-0,22821	352	0,39386	424	0,71115	496	0,34362	568	-0,29700
65	-0,35366	137	-0,30325	209	-0,65321	281	-0,22721	353	0,46188	425	0,72596	497	0,27690	569	-0,25286
66	-0,32803	138	-0,31940	210	-0,65271	282	-0,20225	354	0,51286	426	0,74297	498	0,20298	570	-0,20638
67	-0,32387	139	-0,33366	211	-0,65322	283	-0,17373	355	0,54851	427	0,77448	499	0,12150	571	-0,15756
68	-0,32456	140	-0,33943	212	-0,68062	284	-0,13528	356	0,57141	428	0,79175	500	0,06000	572	-0,10640
69	-0,32377	141	-0,34239	213	-0,73555	285	-0,09616	357	0,56646	429	0,80689	501	0,01258	573	-0,05291
70	-0,32731	142	-0,34284	214	-0,79712	286	-0,05525	358	0,54319	430	0,79583	502	-0,01699	574	0,00293
71	-0,32429	143	-0,34689	215	-0,85600	287	-0,01017	359	0,48575	431	0,74725	503	-0,04307	575	0,06110
72	-0,31234	144	-0,35618	216	-0,89052	288	0,03881	360	0,40470	432	0,67892	504	-0,06260	576	0,12161

B.3. Đối sánh bổ sung sau nhận dạng

Các hình dưới đây trình bày kết quả đối sánh góc lắc ngang thân xe và phổ mật độ công suất ở các mức chất tải không trình bày trong nội dung chính của Chương 3.

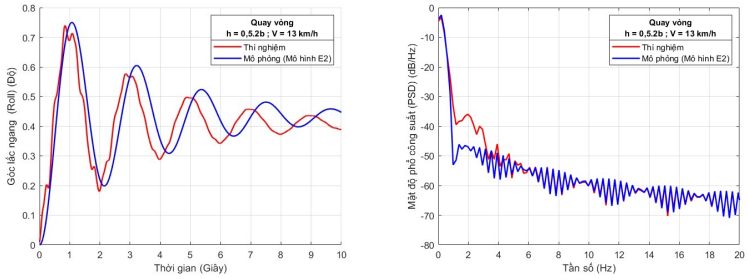


(a) Không tải, $v = 29\,\mathrm{km/h}$

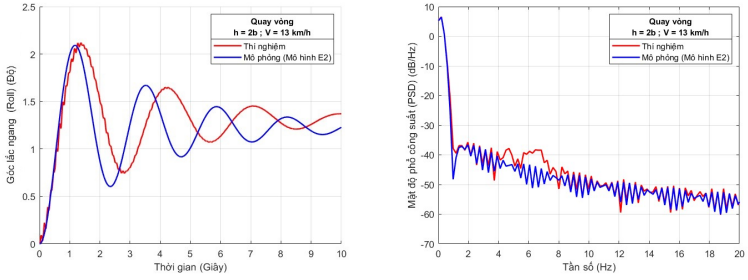


(b) 25% tải, $v = 14\,\mathrm{km/h}$

Hình B.4: *Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm trong trường hợp quay vòng ổn định*

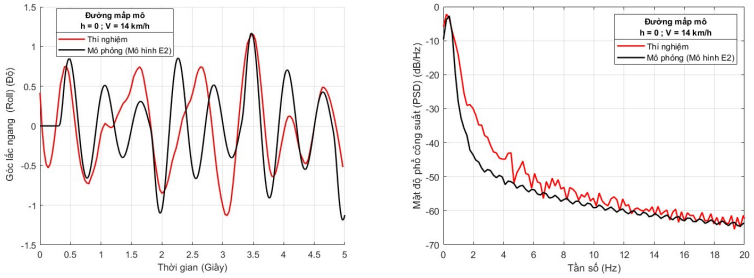


(a) 50% tải, $v = 13\,\mathrm{km/h}$

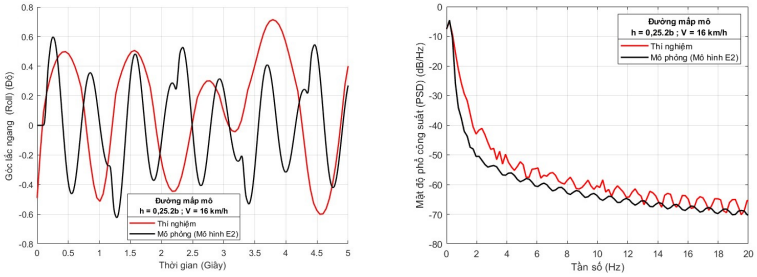


(b) Đầy tải, $v = 13\,\mathrm{km/h}$

Hình B.5: *Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm khi quay vòng ở các mức tải còn lại*

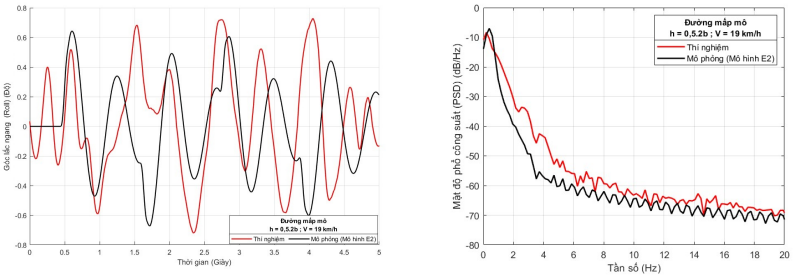


(a) Không tải, $v = 14\,\text{km/h}$

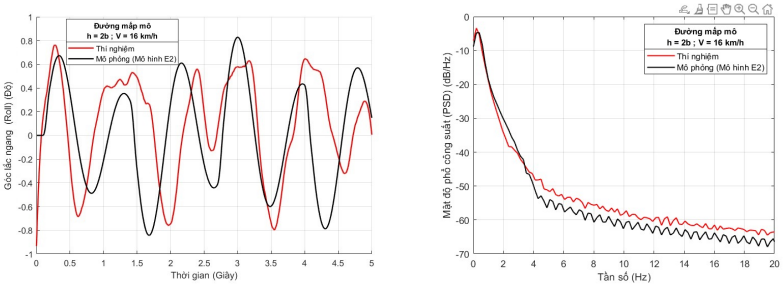


(b) 25% tải, $v = 16\,\text{km/h}$

Hình B.6: *Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm khi chuyển động qua mấp mô*



(a) 50% tải, $v = 19\,\text{km/h}$



(b) Đầy tải, $v = 16\,\text{km/h}$

Hình B.7: *Đối sánh mô hình E2 và thí nghiệm qua mấp mô ở các mức tải còn lại*

PHỤ LỤC C. THÔNG SỐ MÔ HÌNH KHẢO SÁT VÀ SỐ LIỆU SỰ KIỆN CHUYỂN LÀN KÉP

Phụ lục này tổng hợp bộ thông số sử dụng trong các mô phỏng khảo sát ở Chương 4 và các bảng số liệu chi tiết về sự kiện nhấc bánh, phục hồi tiếp xúc, đạt giới hạn lật hình học trong kịch bản chuyển làn kép.

C.1. Thông số mô hình khảo sát

Bảng C.1 trình bày bộ thông số chính của ô tô xi téc Hyundai MIGHTY 2016 sử dụng trong các khảo sát ở Chương 4. Các tham số này được kế thừa từ kết quả đo đạc, tính toán và nhận dạng ở Chương 3. Khác với Bảng 3.7 ở Chương 3, bảng này có vai trò tập hợp lại bộ thông số dùng cho các mô phỏng khảo sát ở Chương 4 và phục vụ tái lập kết quả mô phỏng.

Bảng C.1: *Thông số kỹ thuật của ô tô xi téc sử dụng trong mô hình khảo sát*

STT	Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Đường kính trục ngang của xi téc	$2a$	m	2,04
2	Đường kính trục đứng của xi téc	$2b$	m	1,42
3	Khối lượng được treo khi không tải	m_s	kg	1705
4	Khối lượng không được treo	m_u	kg	750
5	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm m_s khi không tải	h_{s0}	m	0,86
6	Chiều rộng vết bánh xe	$2d_u$	m	1,495
7	Khoảng cách đặt hệ thống treo hai bên	$2d_s$	m	0,974
8	Chiều dài cơ sở của xe	L_{Xe}	m	3,735
9	Chiều dài xi téc	L_{XT}	m	4,02
10	Khoảng cách từ G_{XT} đến cầu sau	b_T	m	0,82
11	Chiều dài xi téc tương đương phân bổ cho cầu sau	L_{CS}	m	3,172
12	Độ cứng tương đương của hệ thống treo sau	C_s	N/m	585706,4
13	Hệ số cản giảm chấn tương đương	K_s	N s/m	12378
14	Độ cứng hướng kính của lốp	C_t	N/m	940823
15	Khoảng cách từ tâm lắc đến trọng tâm khối lượng không được treo	h_u	m	0,37335
16	Mô men quán tính lắc ngang sau nhận dạng của phần khối lượng được treo khi không tải	$I_s = I^*_{s,\mathrm{id}}$	kg m^2	1261,019
17	Mô men quán tính lắc ngang của phần khối lượng không được treo	I_u	kg m^2	104,5427
18	Tỷ số cản dao động tương đối của chất lỏng sử dụng trong mô phỏng	ζ	–	0,03

C.2. Bảng số liệu sự kiện trong kịch bản chuyển làn kép

Các bảng trong mục này trình bày vị trí và thời điểm xuất hiện các sự kiện nhấc bánh, phục hồi tiếp xúc và đạt giới hạn lật hình học trong kịch bản chuyển làn kép. Các số liệu này được sử dụng để xây dựng các hình quỹ đạo sự kiện ở Mục 4.6.5.

Bảng C.2: *Tổng hợp các sự kiện của mô hình chất lỏng quy đổi cứng (RG) trong kịch bản chuyển làn kép theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc* $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$

h_p	v (km/h)	Loại sự kiện	s (m)	t (s)	Vị trí trên quỹ đạo
0,00	48,50	Nhấc bánh tạm thời	14,480	1,075	Chuyển tiếp 1
0,00	48,50	Phục hồi	15,034	1,116	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	13,028	0,763	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Phục hồi	28,348	1,659	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	30,042	1,759	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Phục hồi	62,502	3,659	Chuyển tiếp 2
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	64,108	3,753	Chuyển tiếp 2
0,00	61,50	Phục hồi	91,995	5,385	Đoạn ra
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	94,160	5,512	Đoạn ra
0,00	61,50	Phục hồi	101,256	5,927	Đoạn ra
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	103,577	6,063	Đoạn ra
0,00	61,50	Phục hồi	109,238	6,394	Đoạn ra
0,00	61,50	Phát triển lật không phục hồi	112,111	6,563	Đoạn ra
0,25	45,00	Nhấc bánh tạm thời	14,266	1,141	Chuyển tiếp 1
0,25	45,00	Phục hồi	15,119	1,210	Chuyển tiếp 1
0,25	52,50	Nhấc bánh tạm thời	13,203	0,905	Chuyển tiếp 1
0,25	52,50	Phục hồi	25,222	1,730	Chuyển tiếp 1
0,25	52,50	Nhấc bánh tạm thời	28,136	1,929	Chuyển tiếp 1
0,25	52,50	Phục hồi	40,907	2,805	Đoạn giữa
0,25	52,50	Nhấc bánh tạm thời	44,146	3,027	Đoạn giữa
0,25	52,50	Phục hồi	68,401	4,690	Chuyển tiếp 2

Tiếp tục ở trang sau

Bảng C.2 – tiếp theo

h_p	v (km/h)	Loại sự kiện	s (m)	t (s)	Vị trí trên quỹ đạo
0,25	52,50	Phát triển lật không phục hồi	71,821	4,925	Đoạn ra
0,50	40,50	Nhấc bánh tạm thời	14,410	1,281	Chuyển tiếp 1
0,50	40,50	Phục hồi	14,474	1,287	Chuyển tiếp 1
0,50	45,00	Nhấc bánh tạm thời	13,312	1,065	Chuyển tiếp 1
0,50	45,00	Phục hồi	22,641	1,811	Chuyển tiếp 1
0,50	45,00	Nhấc bánh tạm thời	27,172	2,174	Chuyển tiếp 1
0,50	45,00	Phục hồi	35,757	2,861	Đoạn giữa
0,50	45,00	Nhấc bánh tạm thời	40,925	3,274	Đoạn giữa
0,50	45,00	Phục hồi	41,862	3,349	Đoạn giữa
0,50	45,00	Phát triển lật không phục hồi	74,166	5,933	Đoạn ra
0,75	36,25	Nhấc bánh tạm thời	14,049	1,395	Chuyển tiếp 1
0,75	36,25	Phục hồi	14,858	1,476	Chuyển tiếp 1
0,75	39,25	Nhấc bánh tạm thời	13,335	1,223	Chuyển tiếp 1
0,75	39,25	Phục hồi	22,197	2,036	Chuyển tiếp 1
0,75	39,25	Nhấc bánh tạm thời	27,350	2,509	Chuyển tiếp 1
0,75	39,25	Phục hồi	35,779	3,282	Đoạn giữa
0,75	39,25	Phát triển lật không phục hồi	47,317	4,340	Chuyển tiếp 2
1,00	31,25	Nhấc bánh tạm thời	14,012	1,614	Chuyển tiếp 1
1,00	31,25	Phục hồi	14,698	1,693	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Nhấc bánh tạm thời	13,376	1,448	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Phục hồi	23,195	2,511	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Phát triển lật không phục hồi	27,862	3,017	Chuyển tiếp 1

Bảng C.3: *Tổng hợp các sự kiện của mô hình có dao động tương đối chất lỏng (SL) trong kịch bản chuyển làn kép theo kết quả khảo sát cục bộ với bước vận tốc* $\Delta v = 0{,}25\,\mathrm{km/h}$

h_p	v (km/h)	Loại sự kiện	s (m)	t (s)	Vị trí trên quỹ đạo
0,00	48,50	Nhấc bánh tạm thời	14,480	1,075	Chuyển tiếp 1
0,00	48,50	Phục hồi	15,034	1,116	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	13,028	0,763	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Phục hồi	28,348	1,659	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	30,042	1,759	Chuyển tiếp 1
0,00	61,50	Phục hồi	62,502	3,659	Chuyển tiếp 2
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	64,108	3,753	Chuyển tiếp 2
0,00	61,50	Phục hồi	91,995	5,385	Đoạn ra
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	94,160	5,512	Đoạn ra
0,00	61,50	Phục hồi	101,256	5,927	Đoạn ra
0,00	61,50	Nhấc bánh tạm thời	103,577	6,063	Đoạn ra
0,00	61,50	Phục hồi	109,238	6,394	Đoạn ra
0,00	61,50	Phát triển lật không phục hồi	112,111	6,563	Đoạn ra
0,25	32,75	Nhấc bánh tạm thời	27,553	3,029	Chuyển tiếp 1
0,25	32,75	Phục hồi	28,568	3,140	Chuyển tiếp 1
0,25	35,50	Nhấc bánh tạm thời	27,154	2,754	Chuyển tiếp 1
0,25	35,50	Phục hồi	34,887	3,538	Chuyển tiếp 1
0,25	35,50	Nhấc bánh tạm thời	47,560	4,823	Chuyển tiếp 2
0,25	35,50	Phục hồi	58,718	5,955	Chuyển tiếp 2
0,25	35,50	Nhấc bánh tạm thời	62,484	6,336	Chuyển tiếp 2
0,25	35,50	Phục hồi	80,364	8,150	Đoạn ra
0,25	35,50	Phát triển lật không phục hồi	82,408	8,357	Đoạn ra
0,50	30,75	Nhấc bánh tạm thời	27,224	3,187	Chuyển tiếp 1
0,50	30,75	Phục hồi	28,600	3,348	Chuyển tiếp 1
0,50	32,75	Nhấc bánh tạm thời	17,511	1,925	Chuyển tiếp 1
0,50	32,75	Phục hồi	20,977	2,306	Chuyển tiếp 1
0,50	32,75	Nhấc bánh tạm thời	26,736	2,939	Chuyển tiếp 1

Tiếp tục ở trang sau

Bảng C.3 – tiếp theo

h_p	v (km/h)	Loại sự kiện	s (m)	t (s)	Vị trí trên quỹ đạo
0,50	32,75	Phục hồi	35,063	3,854	Đoạn giữa
0,50	32,75	Nhấc bánh tạm thời	41,013	4,508	Đoạn giữa
0,50	32,75	Phục hồi	43,248	4,754	Đoạn giữa
0,50	32,75	Nhấc bánh tạm thời	47,243	5,193	Chuyển tiếp 2
0,50	32,75	Phục hồi	62,688	6,891	Chuyển tiếp 2
0,50	32,75	Nhấc bánh tạm thời	65,268	7,174	Chuyển tiếp 2
0,50	32,75	Phục hồi	76,939	8,457	Đoạn ra
0,50	32,75	Phát triển lật không phục hồi	78,854	8,668	Đoạn ra
0,75	30,25	Nhấc bánh tạm thời	17,345	2,064	Chuyển tiếp 1
0,75	30,25	Phục hồi	18,314	2,179	Chuyển tiếp 1
0,75	32,50	Nhấc bánh tạm thời	16,445	1,822	Chuyển tiếp 1
0,75	32,50	Phục hồi	21,302	2,360	Chuyển tiếp 1
0,75	32,50	Nhấc bánh tạm thời	25,379	2,811	Chuyển tiếp 1
0,75	32,50	Phục hồi	35,550	3,938	Đoạn giữa
0,75	32,50	Nhấc bánh tạm thời	39,506	4,376	Đoạn giữa
0,75	32,50	Phục hồi	42,049	4,658	Đoạn giữa
0,75	32,50	Nhấc bánh tạm thời	46,872	5,192	Chuyển tiếp 2
0,75	32,50	Phục hồi	57,232	6,340	Chuyển tiếp 2
0,75	32,50	Phát triển lật không phục hồi	60,737	6,728	Chuyển tiếp 2
1,00	31,25	Nhấc bánh tạm thời	14,012	1,614	Chuyển tiếp 1
1,00	31,25	Phục hồi	14,698	1,693	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Nhấc bánh tạm thời	13,376	1,448	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Phục hồi	23,195	2,511	Chuyển tiếp 1
1,00	33,25	Phát triển lật không phục hồi	27,862	3,017	Chuyển tiếp 1