

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

PHỤ LỤC

NGUYỄN HỒNG QUÂN

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ
THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN TRÊN Ô TÔ CON
RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS AND CONTROL
OF ELECTRIC POWER STEERING SYSTEM IN CARS

Ngành: Kỹ thuật cơ khí động lực

Mã số: 9.52.01.16

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Vũ Văn Tấn

Người đồng hướng dẫn: GS.TS. Olivier Sename

HÀ NỘI - 2026

MỤC LỤC

MỤC LỤC	I
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ	III
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	V
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	VI
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	XII
PHỤ LỤC I: THÔNG SỐ KỸ THUẬT Ô TÔ NGHIÊN CỨU	1
1.1. THÔNG SỐ KỸ THUẬT CỦA “XE THỬ NGHIỆM”	1
1.2. CÀI ĐẶT THÔNG SỐ CÁC HỆ THỐNG CỦA “XE THỬ NGHIỆM”	3
1.3. CÀI ĐẶT ĐẦU VÀO, ĐẦU RA CỦA “XE THỬ NGHIỆM”	6
PHỤ LỤC II: CÁC NỘI DUNG BỔ TRỢ CHO CHƯƠNG 2	12
2.1. MÔ HÌNH HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI	12
2.2. ĐỘNG HỌC HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI	12
2.2.1. Xây dựng mô hình toán học động học hình thang lái	12
2.2.2. Xây dựng đặc tính động học quay vòng bánh xe dẫn hướng	15
2.3. ĐLH HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI	15
2.3.1. Xây dựng phương trình động lực học thanh răng	15
2.3.2. Xây dựng phương trình động lực học thanh bên l_5	16
2.3.3. Xây dựng phương trình động lực học cụm bánh xe bên phải	16
2.3.4. Xây dựng phương trình động lực học thanh bên l_7	17
2.3.5. Xây dựng phương trình động lực học cụm bánh xe bên trái	18
PHỤ LỤC III: XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG	20
3.1. XÂY DỰNG MHMP XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG PHÂN BỐ LÊN BÁNH XE	20
3.2. XÂY DỰNG MHMP ĐLH BÁNH XE ĐÀN HỒI	20
3.3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH XÁC ĐỊNH MÔ MEN CẢN QUAY VÒNG	22
3.4. XÂY DỰNG MHMP ĐẶC TÍNH TRỢ LỰC HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN	22
3.5. XÂY DỰNG MHMP ĐLH HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN	23
3.5.1. Cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng	23
3.5.2. Cụm hình thang lái Ackermann	24
3.6. XÂY DỰNG MHMP ĐLH CHUYỂN ĐỘNG CỦA Ô TÔ	29
3.7. XÂY DỰNG MHMP MÔ MEN NHIỀU NGẪU NHIÊN	31
3.8. XÂY DỰNG MHMP BỘ ĐIỀU KHIỂN PID-FOC	32
3.9. XÂY DỰNG MHMP ĐLH ĐỘNG CƠ PMSM	32
PHỤ LỤC IV: CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG	33
4.1. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ ĐLH HỆ THỐNG LÁI EPS	33
4.1.1. Cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng	33
4.1.2. Cụm hình thang lái Ackermann	39
4.2. MÔ PHỎNG ĐẶC TÍNH TRỢ LỰC LÁI THEO ĐẶC ĐIỂM PHONG CÁCH LÁI	42
4.2.1. Phong cách lái thoải mái/Comfortable driving style	42
4.2.2. Phong cách lái thể thao/Sporty driving style	46
4.2.3. Phong cách đa mức/Multi-level driving style	48
4.3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ BỘ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG LÁI EPS	50
4.3.1. Kịch bản 1 $T_d=3.2\sin(\frac{2\pi}{5}t)Nm$, ($f=0.2Hz$)	50
4.3.2. Kịch bản 2 $T_d=6\sin(\frac{2\pi}{5}t)Nm$, ($f=0.2Hz$)	53
4.3.3. Kịch bản 3 $T_d=3.2\sin(2\pi t)Nm$, ($f=1Hz$)	56
4.4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ CẢM GIÁC LÁI	60
4.4.1. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu xung (Pulse input test)	60
4.4.2. Thử nghiệm khả năng trả lái (Returnability test)	64
4.4.3. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái chuyển trạng thái (Transition test)	65
4.4.4. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ (Steering effort test at standstill)	69

4.4.5. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu bước (Step steering input test) ..	72
PHỤ LỤC V: MÃ CODE CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH	76
5.1. MÃ CHƯƠNG TRÌNH CHẠY MÔ PHỎNG	76
5.1.1. Mã chương trình thiết kế tối ưu động học hình thang lái Ackermann	76
5.1.2. Mã chương trình tối ưu tham số c, k, n	86
5.1.3. Mã chương trình xây dựng và phân tích EPS Map	88
5.2. MÃ CHƯƠNG TRÌNH THỬ NGHIỆM MÔ PHỎNG	103
5.2.1. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái xử lý trung tâm (On-centre handling test). ..	103
5.2.2. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu xung (Pulse input test)	114
5.2.3. Thử nghiệm khả năng trả lái (Returnability test)	117
5.2.4. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái chuyển trạng thái (Transition test)	121
5.2.5. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ (Steering effort test at standstill)	130
5.2.6. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu bước (Step steering input test) ..	138

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình PL1.1. Cài đặt thông số kỹ thuật các hệ thống của “Xe thử nghiệm”	6
Hình PL1.2. Cài đặt tín hiệu đầu vào (Input signal setting)	10
Hình PL1.3. Cài đặt tín hiệu đầu ra (Output signal setting)	11
 Hình PL2.1. Sơ đồ MHDH hình thang lái Ackermann	12
Hình PL2.2. MHDH thanh răng lr	15
Hình PL2.3. MHDH thanh bên l5	16
Hình PL2.4. MHDH cụm bánh xe bên phải	17
Hình PL2.5. MHDH thanh bên l7	17
Hình PL2.6. MHDH cụm bánh xe bên trái	18
 Hình PL3.1. MHMP xác định tải trọng phân bố lên bánh xe	20
Hình PL3.2. MHMP ĐLH bánh xe đàn hồi	21
Hình PL3.3. MHMP xác định mô men cản quay vòng	22
Hình PL3.4. MHMP đặc tính trợ lực hệ thống lái trợ lực điện	23
Hình PL3.5. MHMP ĐLH tổng thể hệ thống lái trợ lực điện	23
Hình PL3.6. MHMP ĐLH Cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng	24
Hình PL3.7. MHMP động học hình thang lái Ackermann	25
Hình PL3.8. MHMP Đặc tính động học quay vòng của bánh xe dẫn hướng	25
Hình PL3.9. MHMP xác định $\delta 1_{tt}$, $\delta 2_{tt}$	26
Hình PL3.10. MHMP xác định sai lệch $\Delta \delta 1$	26
Hình PL3.11. MHMP xác định phân lực tại các khớp	28
Hình PL3.12. MHMP ĐLH chuyển động của ô tô	31
Hình PL3.13. MHMP mô men nhiễu ngẫu nhiên	31
Hình PL3.14. MHMP bộ điều khiển PID-FOC	32
Hình PL3.15. MHMP ĐLH động cơ PMSM	32
 Hình PL4.1. KQMP ĐLH EPS $T_d=3.2\sin(2\pi 5t)Nm$; ($f=0.2$ Hz);	34
Hình PL4.2. KQMP ĐLH EPS $T_d=6\sin(2\pi 5t)Nm$; ($f=0.2$ Hz);	36
Hình PL4.3. KQMP ĐLH EPS $T_d=3.2\sin(2\pi t)Nm$; ($f=1$ Hz);	38
Hình PL4.4. Biến thiên của y_r theo thời gian	39
Hình PL4.5. Biến thiên của y_r theo φ_d	39
Hình PL4.6. Biến thiên φ_5, φ_6 theo thời gian	39
Hình PL4.7. Biến thiên φ_6, φ_6 theo φ_d	39
Hình PL4.8. Biến thiên φ_7, φ_8 theo thời gian	39
Hình PL4.9. Biến thiên của φ_7, φ_8 theo φ_d	39
Hình PL4.10. Biến thiên φ_5, φ_6 theo thời gian	39
Hình PL4.11. Biến thiên φ_5, φ_6 theo φ_d	39
Hình PL4.12. Biến thiên φ_7, φ_8 theo thời gian	40
Hình PL4.13. Biến thiên φ_7, φ_8 theo φ_d	40
Hình PL4.14. Biến thiên φ_5, φ_6 theo thời gian	40
Hình PL4.15. Biến thiên φ_5, φ_6 theo φ_d	40
Hình PL4.16. Biến thiên φ_7, φ_8 theo thời gian	40
Hình PL4.17. Biến thiên φ_7, φ_8 theo φ_d	40
Hình PL4.18. Biến thiên $\delta 2$, $\delta 1_{tt}$ và $\delta 1_{lt}$ theo φ_d	40
Hình PL4.19. Độ lệch $\Delta \delta 1$ theo φ_d	40
Hình PL4.20. Biến thiên $\delta 1_{tt}$ và $\delta 1_{lt}$ theo $\delta 2$	41
Hình PL4.21. Độ lệch $\Delta \delta 1$ theo $\delta 2$	41
Hình PL4.22. Biến thiên $\delta 2, \delta 1_{lt}, \delta 1_{tt}$ theo φ_d	41
Hình PL4.23. Biến thiên $\Delta \delta 1$ theo φ_d	41

Hình PL4.24. Biến thiên $\delta 2, \delta 1t, \delta 1tt$ theo ϕd	41
Hình PL4.25. Biến thiên $\Delta \delta 1$ theo ϕd	41
Hình PL4.26. Góc $\delta 1, \delta 2$	41
Hình PL4.27. Vận tốc góc $\delta 1, \delta 2$	41
Hình PL4.28. Gia tốc góc $\delta 1, \delta 2$	41
Hình PL4.29. Quỹ đạo chuyển động của các khâu, khớp hình thang lái.....	42
Hình PL4.30. Trường hợp 1: Phong cách lái thoải mái.....	44
Hình PL4.31. Trường hợp 2: Phong cách lái thể thao.....	47
Hình PL4.32. Trường hợp 3: Phong cách lái đa mức.....	49
Hình PL4.33. Kịch bản 1: Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ.....	52
Hình PL4.34. Kịch bản 1- Vận tốc góc động cơ trợ lực.....	52
Hình PL4.35. Kịch bản 2- Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ.....	55
Hình PL4.36. Kịch bản 2- Vận tốc góc động cơ trợ lực.....	56
Hình PL4.37. Kịch bản 3- Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ.....	58
Hình PL4.38. Kịch bản 3- Vận tốc góc động cơ trợ lực.....	59
Hình PL4.39. KQMP thử nghiệm phản ứng tức thời tín hiệu xung tại $v = 10\text{km/h}$	60
Hình PL4.40. Đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 10\text{km/h}$	61
Hình PL4.41. KQMP Thử nghiệm phản ứng tức thời tín hiệu xung tại $v = 50\text{km/h}$	62
Hình PL4.42. Đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 50\text{km/h}$	62
Hình PL4.43. KQMP Thử nghiệm khả năng trả lái khi lái sang phải tại $v = 100\text{km/h}$	64
Hình PL4.44. Đặc tính $\zeta - D$, khi lái sang phải tại $v = 100\text{km/h}$	64
Hình PL4.45. KQMP thử nghiệm chuyển trạng thái, (P) sang trái; (N) sang phải.....	66
Hình PL4.46. KQMP Thử nghiệm cảm giác lái chuyển trạng thái.....	67
Hình PL4.47. KQMP Bài thử nghiệm quay vòng tại chỗ.....	70
Hình PL4.48. KQMP Đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ.....	71
Hình PL4.49. KQMP Phản ứng tức thời với kích thích bước (Đánh lái sang trái).....	73

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

<i>Bảng PL1.1. Thông số kỹ thuật xe thử nghiệm.....</i>	<i>1</i>
<i>Bảng PL1.2. Bảng thông số tín hiệu đầu vào cho mô hình Carsim.....</i>	<i>6</i>
<i>Bảng PL1.3. Bảng thông số tín hiệu đầu ra cho mô hình Carsim.....</i>	<i>6</i>
<i>Bảng PL4.1. Xử lý số liệu miền tần số với kích thích lái xung, $v = 10\text{km/h}$.....</i>	<i>60</i>
<i>Bảng PL4.2. Kết quả đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 10\text{km/h}$.....</i>	<i>61</i>
<i>Bảng PL4.3. Xử lý số liệu miền tần số với kích thích lái xung, $v = 50\text{km/h}$.....</i>	<i>63</i>
<i>Bảng PL4.4. Kết quả đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 50\text{km/h}$.....</i>	<i>63</i>
<i>Bảng PL4.5. Bảng so sánh KQMP chuyển trạng thái Simulink và CarSim.....</i>	<i>65</i>
<i>Bảng PL4.6. Bảng so sánh chỉ tiêu cảm giác lái chuyển trạng thái Simulink và CarSim.....</i>	<i>67</i>
<i>Bảng PL4.7. Bảng so sánh KQMP quay vòng tại chỗ Simulink và CarSim.....</i>	<i>70</i>
<i>Bảng PL4.8. Bảng so sánh chỉ tiêu cảm giác lái quay vòng tại chỗ Simulink và CarSim.....</i>	<i>71</i>
<i>Bảng PL4.9. Bảng chỉ tiêu đánh giá cảm giác lái lái phản ứng tức thời.....</i>	<i>73</i>

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu <i>Symbol</i>	Đơn vị <i>Unit</i>	Thông số	Parameter
M_{mm}, M_{mg} M_{md}, M_{mi}	[Nm]	Mô men lực quán tính của l_5, l_6, l_7, l_8	Moment of inertia of l_5, l_6, l_7, l_8
T_d	[Nm]	Mô men lái	Driver torque
T_{di}	[Nm]	Mô men tại điểm chuyển tiếp	Transition point torque
T_{dmin}	[Nm]	Mô men lái tối thiểu để trợ lực kích hoạt	Minimum driver torque to activate the assist motor
T_{dmax}	[Nm]	Mô men lái lớn nhất	Maximum driver torque
$T_{dmax}(v_i)$	[Nm]	Mô men lái lớn nhất tại v_i	Maximum driver torque at v_i
$T_{dmax}(0)$	[Nm]	Mô men lái lớn nhất tại $v = 0$	Maximum driver torque at $v = 0$
T_{dat}	[Nm]	Mô men lái khi trợ lực kích hoạt (đặc tính phi tuyến)	Steering torque when assist motor is activated (nonlinear characteristic)
T_{drq}	[Nm]	Mô men tại thời điểm trợ lực được kích hoạt	The torque when the power steering is activated
T_{int}	[Nm]	Mô men tại điểm chuyển tiếp (đặc tính hỗn hợp)	Transition point torque (mix characteristic)
T_a	[Nm]	Mô men trợ lực lái	Assist torque
T_{aas}	[Nm]	Mô men trợ lực lái thực tế	Actual assist torque
T_{arq}	[Nm]	Mô men trợ lực lái yêu cầu	Required assist torque
T_{amax}	[Nm]	Mô men trợ lực lái lớn nhất	Maximum assist torque
T_m	[Nm]	Mô men trợ lực động cơ điện	Assist motor torque
T_{mas}	[Nm]	Mô men trợ lực động cơ điện thực tế	Actual assist motor torque
T_r	[Nm]	Mô men cản quay của đường	Road reaction torque
T_{rr}	[Nm]	Mô men cản quay bánh xe bên phải	Right wheel road reaction torque
T_{rl}	[Nm]	Mô men cản quay bánh xe bên trái	Left wheel road reaction torque
T_{rd}	[Nm]	Mô men cản ngẫu nhiên	Random resistance torque
T_L	[Nm]	Mô men tải	Load torque
T_s	[Nm]	Mô men cảm biến đo được	Sensing torque
F_{mi}^n, F_{mi}^t ($i = 5 \div 8$)	[N]	Lực cản quán tính pháp tuyến và tiếp tuyến của các khâu l_5, l_6, l_7, l_8	Normal and tangential inertial resistance forces of the links l_5, l_6, l_7, l_8
$F_4, N, F_A^n, F_A^t, F_B^n, F_B^t, F_D^n, F_D^t, F_E^n, F_E^t$	[N]	Các phản lực pháp tuyến và tiếp tuyến của thanh răng và tại các khớp A, B, D, E	Normal and tangential reactions of the rack and at the joints A, B, D, E
$F_{Cx}, F_{Cy}, F_{Fx}, F_{Fy}$	[N]	Các phản lực theo phương OX và OY tại các khớp C, E	Reaction forces in the OX and OY directions at the joints C, E
F_{req}	[N]	Phản lực quy dẫn lên thanh răng	Reaction force applied to the rack
F_{Ti}	[N]	Phản lực tiếp tuyến (lực dọc) ở các bánh xe	Longitudinal force

F_{ni}	[N]	Phản lực pháp tuyến (lực ngang) ở các bánh xe	Lateral force
F_{zi}	[N]	Phản lực thẳng đứng ở các bánh xe	Vertical force
F_{Tf}	[N]	Phản lực tiếp tuyến (lực dọc) ở trục trước	Longitudinal force at the front axle
F_{Tr}	[N]	Phản lực tiếp tuyến (lực dọc) ở trục sau	Longitudinal force at the rear axle
F_{nf}	[N]	Phản lực pháp tuyến (lực ngang) ở trục trước	Lateral force at the front axle
F_{zf}	[N]	Phản lực thẳng đứng ở trục trước	Vertical (normal) force at the front axle
F_{zr}	[N]	Phản lực thẳng đứng ở trục sau	Vertical (normal) force at the rear axle
P_{max}	[N]	Lực lớn nhất tác dụng lên vành tay lái	Maximum force acting on the steering wheel
Z_f	[N]	Trọng lượng phân bố trục trước	Front axle weight distribution
Z_r	[N]	Trọng lượng phân bố trục sau	Rear axle weight distribution
α_f	[Rad]	Góc lệch ngang của lốp trước	Front tire side slip angle
α_{fl}	[Rad]	Góc lệch ngang của lốp trước trái	Left front tire side slip angle
α_{fr}	[Rad]	Góc lệch ngang của lốp trước phải	Right front tire side slip angle
α_r	[Rad]	Góc lệch ngang của lốp sau	Rear tire side slip angle
α_i	[Rad]	Góc lệch ngang của lốp thứ i	The i^{th} tire side slip angle
β	[Rad]	Góc lệch thân xe	Vehicle side slip angle
φ_d	[rad]	Góc quay của trục lái	Steering column angle
φ_m	[rad]	Góc quay của trục động cơ trợ lực	Assist motor shaft angle
φ_p	[rad]	Góc quay của trục răng cơ cầu lái	Pinion angle
φ_{wr}	[rad]	Góc quay của bánh xe bên phải	Right wheel angle
φ_{wl}	[rad]	Góc quay của bánh xe bên trái	Left wheel angle
φ_5	[rad]	Góc quay của thanh đẩy l_5	l_5 link of angle
φ_6	[rad]	Góc quay của đòn quay bên l_6	l_6 link of angle
φ_7	[rad]	Góc quay của thanh đẩy l_7	l_7 link of angle
φ_8	[rad]	Góc quay của đòn quay bên l_8	l_8 link of angle
θ_r	[rad]	Góc quay trục rô to	Rotor angle
ψ	[Rad]	Góc quay thân xe	Vehicle yaw angle
δ_i	[Rad]	Góc quay bánh xe dẫn hướng	Steer angle
γ_p	[Rad]	Góc kingpin	Kingpin angle
γ_c	[Rad]	Góc camber	Camber angle
h	[m]	Khoảng cách giữa thanh răng và trục dẫn hướng	Distance between rack and front axle

h''_r	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng không treo trục sau	Rear axle unsprung mass centre height
h''_f	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng không treo trục trước	Front axle unsprung mass centre height
h'_f	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo trục trước	Front axle sprung mass centre height
h'_r	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo trục sau	Rear axle sprung mass centre height
h'_g	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo	Sprung mass centre height
h'	[m]	Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo đến trục lắc	Sprung mass centre to roll axis height
L	[m]	Chiều dài cơ sở xe	Wheelbase
l_r, l_i	[m]	Chiều dài thanh hình thang lái ($i = 5 \div 8$)	Ackermann links length ($i = 5 \div 8$)
l_p	[m]	Khoảng cách tâm hai trụ đứng	Distance between kingpins
n_k	[m]	Độ lệch sau	Tire pneumatic trail
n_r	[m]	Độ lệch trước	Kingpin forward indicator
n_s	[m]	Độ lệch tổng cộng	Total offset
p_f	[m]	Chiều cao tâm lắc trục trước	Front axle roll centre height
p_r	[m]	Chiều cao tâm lắc trục sau	Rear axle roll centre height
r_b	[m]	Bán kính bánh xe	Wheel radius
r_w	[m]	Bán kính bánh xe	Wheel radius
r_{sw}	[m]	Bán kính vành tay lái	Steering wheel radius
r_p	[m]	Bán kính trục răng	Pinion radius
$t_f = 2x_f$	[m]	Vết bánh xe trước	Front wheel track
$t_r = 2x_r$	[m]	Vết bánh xe sau	Rear wheel track
x_i	[m]	Tọa độ theo trục OX của các tâm bánh xe	Ox-axis distance of the axle number i from the mass centre
x_f	[m]	Tọa độ theo trục OX của bánh xe trục trước	Ox-axis distance of the front axle from the mass centre
x_r	[m]	Tọa độ theo trục OY của bánh xe trục sau	Oy-axis distance of the rear axle from the mass centre
x'_f	[m]	Khoảng cách trọng tâm khối lượng được treo đến trục trước	Distance of sprung mass centre to front axle
x'_r	[m]	Khoảng cách trọng tâm khối lượng được treo đến trục sau	Distance of sprung mass centre to rear axle
y_i	[m]	Tọa độ theo trục OY của các tâm bánh xe	Oy-axis distance of the axle number i from the mass centre
y_r	[m]	Dịch chuyển của thanh răng	Rack position
ρ	[m]	Bán kính quay vòng	Turning radius
m	[kg]	Khối lượng ô tô	Vehicle mass
m_c	[kg]	Khối lượng trục lái	Column mass
m_m	[kg]	Khối lượng trục động cơ trợ lực	Motor mass
m_p	[kg]	Khối lượng của trục răng cơ	Pinion mass

		cầu lái	
m_r	$[kg]$	Khối lượng của thanh răng	Rack mass
m_{req}	$[kg]$	Mô men quán tính từ thanh răng đến bánh xe quy dẫn về thanh răng	Front axle inertia converted to rack mass
m_4, m_5, m_6, m_7, m_8	$[kg]$	Khối lượng của l_4, l_5, l_6, l_7, l_8	l_5, l_6, l_7, l_8 mass
m_f	$[kg]$	Khối lượng phân bố lên trục trước	Front axle mass
m_r	$[kg]$	Khối lượng phân bố lên trục	Axle mass
m'	$[kg]$	Tổng khối lượng được treo	Total sprung mass
m'_f	$[kg]$	Khối lượng được treo trục trước	Front axle mass
m'_r	$[kg]$	Khối lượng được treo trục sau	Rear axle mass
m''	$[kg]$	Tổng khối lượng không được treo	Total unsprung mass
m''_f	$[kg]$	Khối lượng không treo trục trước	Front axle unsprung mass
m''_r	$[kg]$	Khối lượng không treo trục sau	Rear axle unsprung mass
J_d	$[kgm^2]$	Mô men quán tính trục lái	Column inertia
J_m	$[kgm^2]$	Mô men quán tính động cơ điện	Motor inertia
J_p	$[kgm^2]$	Mô men quán tính của trục răng	Pinion inertia
J_5, J_6, J_7, J_8	$[kgm^2]$	Mô men quán tính thanh l_5, l_6, l_7, l_8	Inertia of l_5, l_6, l_7, l_8
J_w	$[kgm^2]$	Mô men quán bánh xe	Wheel inertia
J_r	$[kgm^2]$	Mô men quán vùng biến dạng ngang của lốp bên phải	Inertia of the lateral deformation zone of the right tire
J_l	$[kgm^2]$	Mô men quán vùng biến dạng ngang của lốp bên trái	Inertia of the lateral deformation zone of the left tire
J_z	$[kgm^2]$	Mô men quán tính xe	Vehicle moment of inertia
B_r	$[N/m]$	Ma sát cản nhót của thanh răng	Rack viscous friction
B_{req}	$[N/m]$	Ma sát cản nhót quy dẫn từ bánh xe về thanh răng	Equivalent viscous friction from wheel to rack
C_{spf}	$[N/m]$	Độ cứng hệ treo trục trước	Front axle suspension stiffness
C_{spr}	$[N/m]$	Độ cứng treo trục sau	Rear axle suspension stiffness
K_{req}	$[N/m]$	Độ cứng quy dẫn từ bánh xe về thanh răng	Steer tire stiffness converted to rack stiffness
K_5	$[N/m]$	Độ cứng của thanh đẩy l_5	l_5 link of stiffness
K_6	$[N/m]$	Độ cứng của đòn quay bên l_6	l_6 link of stiffness
K_7	$[N/m]$	Độ cứng của thanh đẩy l_7	l_7 link of stiffness
K_8	$[N/m]$	Độ cứng của đòn quay bên l_8	l_8 link of stiffness

F_r	$[N/m]$	Ma sát khô của thanh răng	Rack dry friction torque
K_r	$[N/m]$	Độ cứng của thanh răng	Rack stiffness
C_{axf}	$[Nm/rad]$	Độ cứng góc nghiêng trục xe trước	Front axle roll angle stiffness
C_{axr}	$[Nm/rad]$	Độ cứng góc nghiêng trục xe sau	Rear axle roll angle stiffness
C_{ax}	$[Nm/rad]$	Độ cứng góc nghiêng trục xe	Axle roll angle stiffness
M_c	$[Nm/rad]$	Ma sát khô của trục lái	Column dry friction torque
M_m	$[Nm/rad]$	Ma sát khô của trục động cơ trợ lực	Assist motor dry friction torque
M_p	$[Nm/rad]$	Ma sát khô của trục răng cơ cấu lái	Pinion dry friction torque
$K_{\alpha i}$	$[Nm/rad]$	Hệ số cứng ngang của lốp	Tire lateral stiffness coefficient
$K_{\alpha f}$	$[Nm/rad]$	Độ cứng ngang của lốp trước	Front tire sideslip coefficient (lateral stiffness)
$K_{\alpha r}$	$[Nm/rad]$	Độ cứng ngang của lốp sau	Rear tire sideslip coefficient (lateral stiffness)
K_s	$[Nm/rad]$	Độ cứng của hệ thống lái	Steering system stiffness
K_c	$[Nm/rad]$	Độ cứng của trục lái	Steering column stiffness
K_m	$[Nm/rad]$	Độ cứng của trục động cơ trợ lực	Assist motor shaft stiffness
K_p	$[Nm/rad]$	Độ cứng của trục răng cơ cấu lái	Pinion stiffness
v	$[m/s]$	Vận tốc ô tô	Vehicle speed
v_{ψ}	$[m/s]$	Vận tốc nhạy cảm của xe	Vehicle characteristic speed
v_f, v_r	$[m/s]$	Vận tốc bánh xe trước và sau	Front and rear wheel longitudinal speeds
a_y	$[m/s^2]$	Gia tốc ngang	Lateral acceleration
B_c	$[(Nm)/(rad/s)]$	Ma sát cản nhớt của trục lái	Steering column viscous friction
B_m	$[(Nm)/(rad/s)]$	Ma sát cản nhớt của trục động cơ trợ lực	Assist motor shaft viscous friction
B_p	$[(Nm)/(rad/s)]$	Ma sát cản nhớt của trục răng cơ cấu lái	Pinion viscous friction
D_c	$[(Nm)/(rad/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của trục lái	Steering column damping
D_m	$[(Nm)/(rad/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của trục động cơ	Assist motor shaft damping
D_p	$[(Nm)/(rad/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của trục răng	Pinion damping
D_r	$[(Nm)/(rad/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của thanh răng	Rack damping
$D_{\alpha f}$	$[(Nm)/(rad/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của lốp	Wheel tire of damping
D_6	$[Nm/(m/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu đòn quay bên l_6	l_6 link of damping
D_7	$[Nm/(m/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu của thanh đẩy l_7	l_7 link of damping
D_8	$[Nm/(m/s)]$	Hệ số nhớt vật liệu đòn quay bên l_8	l_8 link of damping

p	$[kPa]$	Áp suất tiêu chuẩn của lốp	Tire standard pressure
R_s	$[\Omega]$	Điện trở cuộn Stator	Stator resistor
L_s	$[mH]$	Độ từ cảm Stator	Stator coil inductance
L_{sd}, L_{sq}	$[mH]$	Độ từ cảm Stator theo trục $(d - q)$	Stator coil inductance on $(d - q)$
U_s	$[V]$	Điện thế Stator	Voltage of stator
u_{sd}, u_{sq}	$[V]$	Điện áp cuộn dây stato theo trục $(d - q)$	Voltage of stator on $(d - q)$
i_{st}	$[A]$	Dòng điện Stator	Stator current
i_{sd}, i_{sq}	$[A]$	Dòng điện Stator theo trục $(d - q)$	Stator current on $(d - q)$
φ_s	$[Wb]$	Từ thông Stator	Stator magnetic linkage
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	$[Wb]$	Từ thông Stator theo trục $(d - q)$	Stator magnetic linkage on $(d - q)$
φ_f	$[Wb]$	Liên kết từ rô to	Rotor magnetic linkage
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	$[Wb]$	Liên kết từ rô to theo trục $(d - q)$	Magnetic linkage on $(d - q)$
ω_m	$[Rad/s]$	Tần số góc của động cơ	Motor's angular frequency
ω_r	$[Rad/s]$	Vận tốc quay rô to	Rotor rotation speed
p_n		Số cặp cực của động cơ	Number of motor pole-pairs
$Ki(v)$		Hệ số khuếch đại trợ lực	Power assist gain coefficient
$K(0)$		Hệ số khuếch đại trợ lực khi ô tô quay vòng tại chỗ	Power assist gain coefficient when turning in place
$f(v, T_d)$		Hàm số khuếch đại trợ lực	Power assist gain funtion
μ		Hệ số bám (ma sát)	Adhesion coefficient (friction)
η		Hiệu suất hệ thống lái	Steering system efficiency
i_s		Tỉ số truyền cơ cấu lái	Steering gear ratio

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Chú giải	Notes
ABS	Hệ thống phanh chống bó cứng	Anti - Lock Brake System
ACC	Gia tốc	Acceleration
ADAS	Hệ thống hỗ trợ người lái tiên tiến	Advanced driver-assistance system
ADRC	Kiểm soát từ chối nhiễu loạn tích cực	Active Disturbance Rejection Control
AEB	Hệ thống phanh tự động khẩn cấp	Automatic Emergency Braking
AFLS	Chiếu sáng phía trước thích ứng	Adaptive Front-lighting System
ANC	Điều khiển phi tuyến thích nghi	Adaptive nonlinear control
ANFIS	Hệ thống suy luận mờ thần kinh thích ứng	Adaptive neural-fuzzy Inference system
BAS	Hệ thống hỗ trợ phanh khẩn cấp	Brake Assist System
BMS	Hệ thống quản lý pin/ắc quy	Battery management system
BS	Phương pháp backstepping	Backstep
BSM	Hệ thống giám sát và cảnh báo điểm mù	Blind Spot Monitoring
BSPID	Bộ điều khiển Backstepping-PID	Backstep - Proportional integral derivative
CAN	Mạng điều khiển khu vực	Controller area network,
CBMM	Cân bằng mô men	Moment balance
CBMMTTT	Cân bằng mô men tại trọng tâm	Moment balance at the centre of gravity
C-EPS	Hệ thống lái trợ lực điện tác động vào trục lái	Column electric power steering System
CFD	Động lực học chất lưu tính toán	Computational fluid dynamics
ĐLH	Động lực học	Dynamic
DMC	Điều khiển ma trận động	Dynamic matrix control
DOF	Bậc tự do	Degrees of freedom
DP-EPS	Hệ thống trợ lực lái điện hai trục răng	Dual-pinion electric power steering system
EBD	Hệ thống phân bổ lực phanh	Electronic brake force distribution
ECU	Bộ điều khiển điện tử	Electronic Control Unit
EPS	Hệ thống lái trợ lực điện	Power steering system
EPSapa	Hệ thống trợ lực lái điện với bộ servo dẫn động bằng dây đai	Electric power steering system with belt drive servo Unit
ESP	Hệ thống cân bằng điện tử	Electronic Stability Program
ESS	Hệ thống cảnh báo phanh khẩn cấp	Emergency Signal System
FEA	Phân tích phần tử hữu hạn	Finite element analysis
FEM	Phương pháp phần tử hữu hạn	Finite element method
FOC	Điều khiển theo hướng trường	Field-oriented control
FWC	Hệ thống cảnh báo va chạm	Forward-Collision Warning
GT/T	Tiêu chuẩn quốc gia trung quốc	National standard of the People's republic of China
HDC	Hệ thống hỗ trợ xuống dốc hay đổ đèo	Hill Descent Control
HIL	Phần cứng trong vòng lặp	Hardware in the Loop
HSAC	Hệ thống hỗ trợ khởi hành ngang dốc	Hill-start Assist Control
HTL	Hệ thống lái	Steering system
IDE	Tiến hóa vi phân cải tiến	Improved differential evolution
ISO	Tổ chức tiêu chuẩn hóa quốc tế	International organization for standardization

KQMP	Kết quả mô phỏng	Simulation results
LIN	Mạng liên kết cục bộ	Local interconnect network
LPV	Bộ điều khiển thay đổi tham số tuyến tính	Linear parameter-varying
LQR	Bộ điều khiển tối ưu tuyến tính bình phương	Linear quadratic regulator
MHĐH	Mô hình động học	Kenitic model
MHĐLH	Mô hình động lực học	Dynamic model
MHMP	Mô hình mô phỏng	Simulation model
MIL	Mô hình trong vòng lặp	Model in the Loop
MPC	Bộ điều khiển mô hình dự đoán	Model predictive control
MPC	Điều khiển dự báo mô hình	Model predictive control
MRAC	Điều khiển thích nghi bám mô hình chuẩn	Model reference adaptive control
NDO	Bộ quan sát nhiễu phi tuyến	Nonlinear disturbance observer
PAS	Hệ thống hỗ trợ đỗ xe	Parking Assist System
PID	Bộ điều khiển đạo hàm tích phân tỷ lệ	Proportional integral derivative
PMSM	Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu	Permanent magnet synchronous motor
PWM	Điều chế độ rộng xung	Pulse width modulation
R&D	Nghiên cứu và phát triển	Research and development
RD-EPS	Hệ thống trợ lực lái điện dẫn động trực tiếp thanh răng	Rack direct drive electric power steering system
RP-EPS	Hệ thống trợ lực lái điện dẫn động bằng dây đai	Rack parallel electric power steering system
RTC	Trở về trung tâm	Return-to-centre
SAT	mô men lái tự căn chỉnh	Self-aligning torque
SBEM	Thử nghiệm mô phỏng	Simulation based engineering modeling
SBW	Hệ thống lái bằng dây dẫn	Steer by wire
SIL	Phần mềm trong vòng lặp	Software in the Loop
SMC	Bộ điều khiển trượt	Sliding mode controller
SP-EPS	Hệ thống lái trợ lực điện tác động vào trục răng	Single pinion electric power steering system
SRS	Hệ thống túi khí trên ô tô	Supplemental Restraint System
SS	Hệ thống lái	Steering system
STR	Tỷ lệ thời gian trượt	Sliding time ratio
SWA	Góc lái	Steering wheel angle
SWT	Mô men lái	Steering wheel torque
TFC	Hệ thống kiểm soát lực kéo	Traction Control System
VHDM	Mô đun động lực học điều khiển xe	Vehicle handling dynamics module
WFNN-AMF	Mạng nơ-ron mờ wavelet sử dụng hàm thành viên bất đối xứng	A wavelet fuzzy neural network using asymmetric membership function
Yaw	Vận tốc xoay thân	Yaw rate

PHỤ LỤC I: THÔNG SỐ KỸ THUẬT Ô TÔ NGHIÊN CỨU

1.1. THÔNG SỐ KỸ THUẬT CỦA “XE THỬ NGHIỆM”

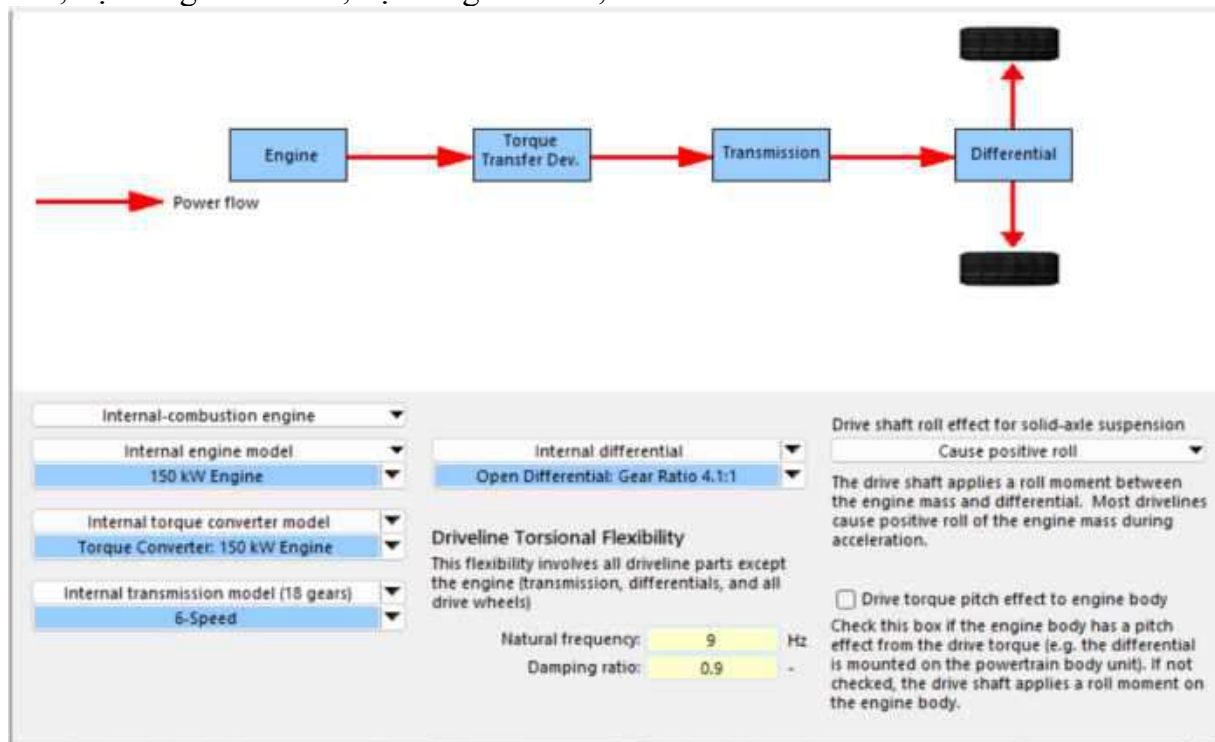
Bảng PL1.1. Thông số kỹ thuật xe thử nghiệm

Thông số Parameter	Ký hiệu Symbol	Đơn vị Unit	Giá trị Value
Chiều dài cơ sở (Wheelbase)	L	[mm]	3050
Chiều rộng cơ sở (Track width)	B	[mm]	1600
Tọa độ trọng tâm khối lượng được treo đến trục trước (Ox-axis distance of the front axle from sprung mass centre)	x'_f	[mm]	1400
Tọa độ trọng tâm khối lượng được treo đến trục sau (Ox-axis distance of the rear axle from sprung mass centre)	x'_r	[mm]	1650
Chiều cao trọng tâm khối lượng được treo (Height of sprung mass)	h'_g	[mm]	530
Chiều cao trọng tâm khối lượng không được treo trục trước (Height of front axle unsprung mass)	h''_f	[mm]	320
Chiều cao trọng tâm khối lượng không được treo trục sau (Height of rear axle unsprung mass)	h''_r	[mm]	300
Khối lượng được treo (Sprung mass)	m'	[kg]	1650
Khối lượng không được treo trục trước (Front axle unsprung mass)	m''_f	[kg]	95,6
Khối lượng không được treo trục sau (Rear axle unsprung mass)	m''_r	[kg]	93,0
Mô men quán tính khối lượng được treo quanh trục OX (Roll inertia)	J_{xx}	[kgm ²]	928,1
Mô men quán tính khối lượng được treo quanh trục OY (Pitch inertia)	J_{yy}	[kgm ²]	2788,5
Mô men quán tính khối lượng được treo quanh trục OZ (Yaw inertia)	J_{zz}	[kgm ²]	3234,0
Bán kính quán tính khối lượng được treo quanh trục OX (OX Radii of gyration)	R_x	[m]	0,750
Bán kính quán tính khối lượng được treo quanh trục OY (OY Radii of gyration)	R_y	[m]	1,300
Bán kính quán tính khối lượng được treo quanh trục OZ (OZ Radii of gyration)	R_z	[m]	1,400
Mô men quán tính trục lái (Column inertia)	J_d	[kgm ²]	0,02
Mô men quán tính trục lái (Column inertia)	J_d	[kgm ²]	0,02
Mô men quán tính cơ cấu lái và dẫn động lái quy đổi (System inertia)	J_s	[kgm ²]	0,000426
Cản nhót của trục lái (Column damping)	B_d	[(Nm)/(Deg/s)]	0,002
Ma sát tĩnh trục lái (Column hysteresis)	M_c	[Nm]	0,5
Biên độ góc để tính vùng ma sát (Hysteresis ref. angle)		[Deg]	0,1
Khoảng cách ngang từ tâm bánh đến trụ đứng (Lateral offset @ centre)		[Deg]	39,5

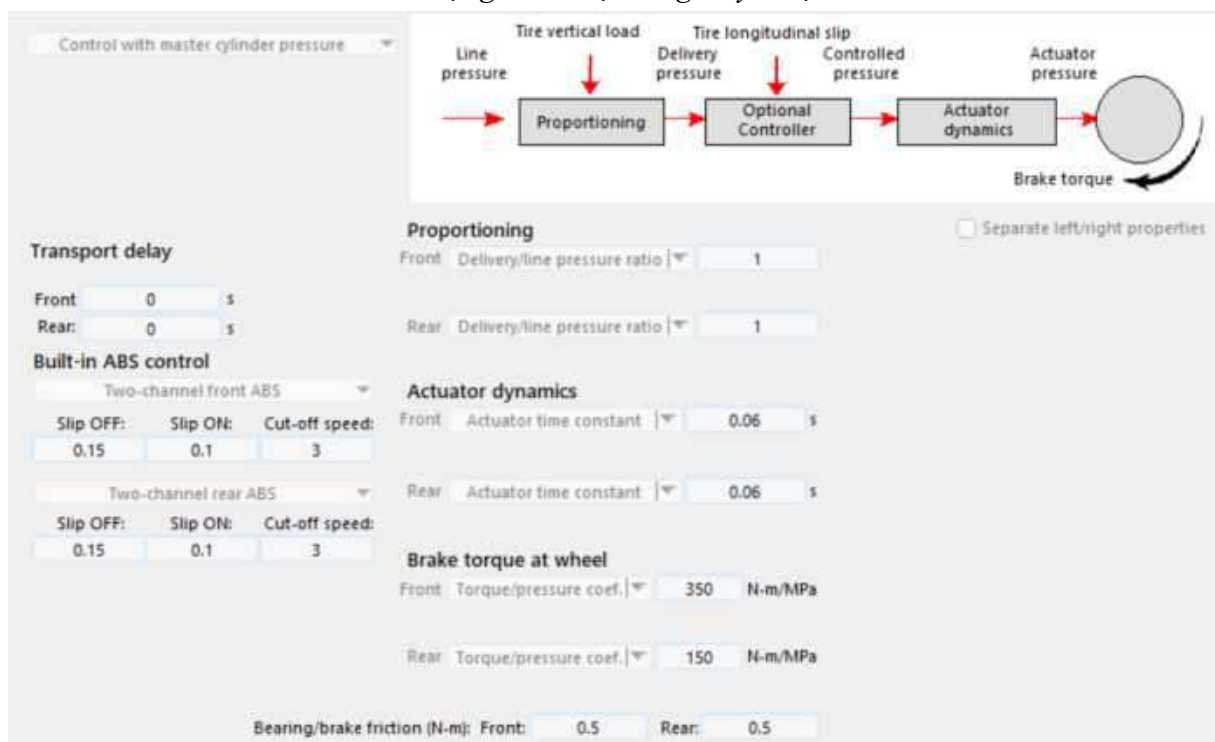
Góc nghiêng ngang trụ đứng (Kingpin angle)	γ_p	[Deg]	8,0
Góc nghiêng dọc trụ đứng (Caster angle)	γ_c	[Deg]	3,5
Góc doãng bánh xe (Camber angle)	γ_{cb}	[Deg]	-0,15
Độ chụm bánh xe (Toe angle)	γ_{toe}	[Deg]	0,2
Độ dịch chuyển thanh răng ứng với 1 vòng quay vành tay lái (Column factor)		[mm/rev]	65,973
Tỉ số truyền cơ cấu lái (Steering gear ratio)	i_{ss}	[–]	16,41
Độ mềm của hệ thống lái (Front steering compliance)		[Deg/(Nm)]	$1,77.10^{-07}$
Ma sát nhớt trong cơ cấu lái (Front steering damping)	B_r	[Ns/mm]	4
Ma sát tĩnh giữa thanh răng, khớp cầu (Front steering hysteresis)		[N]	50
Biên độ dịch chuyển dùng để tính ma sát tĩnh trục lái (Reference length)		[mm]	0,5
Kí hiệu lốp (Tire size)		[–]	225/60 R18
Bán kính động học bánh xe (Effective rolling radius)	r_w	[mm]	353
Bán kính danh nghĩa bánh xe (Unloaded (free) radius)	r_0	[mm]	364
Độ cứng thẳng đứng của bánh xe (Spring rate- Vertical stiffness)	K_{wz}	[N/mm]	278
Độ cứng ngang của bánh xe (Lateral stiffness)	K_{wy}	[Nm/Rad]	61000
Khối lượng bánh xe (Wheel mass)	m_w	[kg]	25
Mô men quán tính quay quanh trục bánh xe (Wheel spin moment of inertia)	J_{wy}	[kgm ²]	2,0
Mô men quán tính quay quanh trục dọc và ngang bánh xe (Wheel yaw/Roll moment of inertia)	J_w	[kgm ²]	1,1
Độ cứng hệ treo trục trước (Front axle suspension stiffness)	C_{spf}	[N/mm]	34
Tỉ lệ hành trình nén và trả giảm chấn trước (Front damper comp./jounce ratio)		[–]	0,8681
Độ cứng thanh ổn định ngang trước (Front anti-roll bar stiffness)	K_{af}	[Nm/Deg]	384
Độ cứng treo trục sau (Rear axle suspension stiffness)	C_{spr}	[N/mm]	46
Tỉ lệ hành trình nén và trả giảm chấn sau (Rear damper comp./jounce ratio)		[–]	0,797
Độ cứng thanh ổn định ngang sau (Rear anti-roll bar stiffness)	K_{ar}	[Nm/Deg]	344

1.2. CÀI ĐẶT THÔNG SỐ CÁC HỆ THỐNG CỦA “XE THỬ NGHIỆM”

Cài đặt thông số kỹ thuật của các hệ thống: hệ thống truyền lực; hệ thống lái; hệ thống phanh; hệ thống treo trước, hệ thống treo sau; bánh xe



a. Động cơ và hệ thống truyền lực



b. Hệ thống phanh

Steering Column Properties

Column inertia: 0.02 kg-m²
System inertia: 0.000426 kg-m²
Column damping: 0.002 Nm-s/deg
Column hysteresis: 0.5 Nm
Hysteresis ref. angle: 0.1 deg

Kingpin Geometry

	Left-Front	Right-Front	
Lateral offset @ center:	39.5	39.5	mm
Kingpin inclination:	8.0	8.0	deg
X coord. of KP @ center:	-1.0	-1.0	mm
Caster angle:	3.5	3.5	deg

Front View **Side View**

Kingpin inclination angle
Kingpin lateral offset
Caster angle
Steering axis

Front system: column assist rack and pinion
Front rack & pinion: constant ratio
C factor: 65.973 mm/rev

Steering Linkage Kinematics

Rack to front wheels: Steer Kinematics
E-Class, Sedan

Compliance

Front Compliance: Steering Compliance
E-Class, Sedan: 1.7738e-07 deg/N-m
Front steering damping: 6 N-s/mm
Front steering hysteresis: 50 N
Front hys reference length: 0.5 mm

Speed-Sensitive Ground-Friction Steer Torque

Front Wheels: Parking Torque
E-Class Sedan

Left-Front **Right-Front**

Steering stop: -45 45 deg
Steering stop stiffness: 0 0 N-m/deg

Power Steering System

Column Assist Torque: Power Assist Torque
D-Class Sedan Column Assist
Torsion bar stiffness: 1 Nm/deg

Miscellaneous:

c. Hệ thống lái

Tire Model Option

Internal Table Model with Simple Camber
Reference vertical force: 8000 N
☐ Use tire force table
Effective rolling radius: 353 mm
Unloaded (free) radius: 364 mm
Spring rate: 278 N/mm
Maximum allowed force: 100000 N

Rolling Resistance Moment

Rr_c: 0.0041 -
Rr_v: 0.00003 h/km
☒ Include rolling resistance due to Fx

Shear Forces and Moments

Longitudinal Force: Tire: Fx
225/60 R18
Lateral Force: Tire: Fy
225/60 R18
Aligning Moment: Tire: Mz
225/60 R18
Camber Thrust
225/60 R18
☒ Include combined slip transition
Transition factor: 1.1 -

Mass and Inertia

Mass: 25 kg
Spin moment of inertia: 2 kg-m²
Yaw/roll moment of inertia: 1.1 kg-m²
☐ Custom settings

Animator Settings

The unloaded radius is used to scale the tire.
Tire width: 225 mm
Animator: Shape Assembly
Euro Sedan Tire

Lag from Relaxation Length

Tire force or moment
Distance rolled
3L
5%

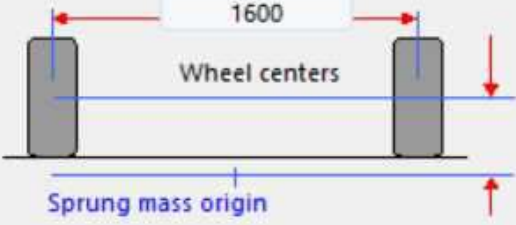
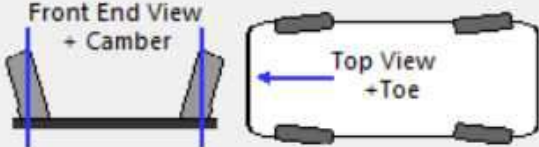
Contact Patch Dimensions

Constant length: 105 mm
Constant width: 225 mm

Diagram:

The X, Y, Z axes define the tire/ground coordinate system
Inclination (gamma)
Wheel plane
Wheel spin axis
Wheel center
Contact center
F_x, M_x slip (alpha)
F_y, M_y
F_z, M_z
Velocity of contact center

d. Bánh xe

Unsprung mass (both sides): 95.6 kg Fraction steered (0-1): 0.708368 -		Mass and Inertia Unsteered unsprung mass: 13.94 kg Steered unsprung mass: 33.86 kg Spin Inertia (spinning part): 0.69 kg-m2 XX/ZZ Inertia (spinning part): 0.35 kg-m2
Geometry  ☐ Set wheel center reference height here Lateral coordinate of suspension center: 0 Dimensions are in millimeters Note: No roll center location is specified because the location and movement of the wheels are defined by kinematical data.		Kinematics Due to Jounce Jounce at design load: 0 mm Dive as nonlinear function of jounce Front SLA - Dive Angle X movement as function of jounce Front SLA - Longitudinal Movement Camber as nonlinear function of jounce Front SLA - Camber Change -Y movement as function of jounce Front SLA - Lateral Movement Toe as nonlinear function of jounce Front SLA - Toe Change
		Static Alignment Camber: -0.15 deg Toe: 0.2 deg ☐ Custom settings

e. Hệ thống treo trước

Unsprung mass (both sides):

93

kg

Fraction steered (0-1):

0

-

Geometry

1600

Wheel centers

Sprung mass origin

☐ Set wheel center reference height here

Lateral coordinate of suspension center:

0

Dimensions are in millimeters

Note:

No roll center location is specified because the location and movement of the wheels are defined by kinematical data.

Front End View + Camber

Top View + Toe

Mass and Inertia

Each Side

Unsteered unsprung mass:

46.5

kg

Steered unsprung mass:

0

kg

Spin Inertia (spinning part):

0.69

kg-m2

XX/ZZ Inertia (spinning part):

0.35

kg-m2

Kinematics Due to Jounce

Jounce at design load:

0

mm

Dive/jounce ratio

0

deg/mm

X movement as function of jounce

Rear 5-Link - Longitudinal Movement

Camber as nonlinear function of jounce

Rear 5-Link - Camber Change

-Y movement as function of jounce

Rear 5-Link - Lateral Movement

Toe as nonlinear function of jounce

Rear 5-Link - Toe Change

Static Alignment

Camber:

0

deg

Toe:

0.1

deg

☐ Custom settings

f. Hệ thống treo sau

Hình PL1.1. Cài đặt thông số kỹ thuật các hệ thống của “Xe thử nghiệm”

1.3. CÀI ĐẶT ĐẦU VÀO, ĐẦU RA CỦA “XE THỬ NGHIỆM”

Bảng PL1.2. Bảng thông số tín hiệu đầu vào cho mô hình Carsim

No	Keyword	Units	Component	Description	Native Value
1	IMP_STEER_T_IN	N-m	Steering	Steering input torque	VARIABLE
2	IMP_SPEED	km/h	Speed controller	Imported target speed for speed controller	VARIABLE
3	IMP_M_BOOST_1	N-m	Steering	Steering gear boost torque	VARIABLE

Bảng PL1.3. Bảng thông số tín hiệu đầu ra cho mô hình Carsim

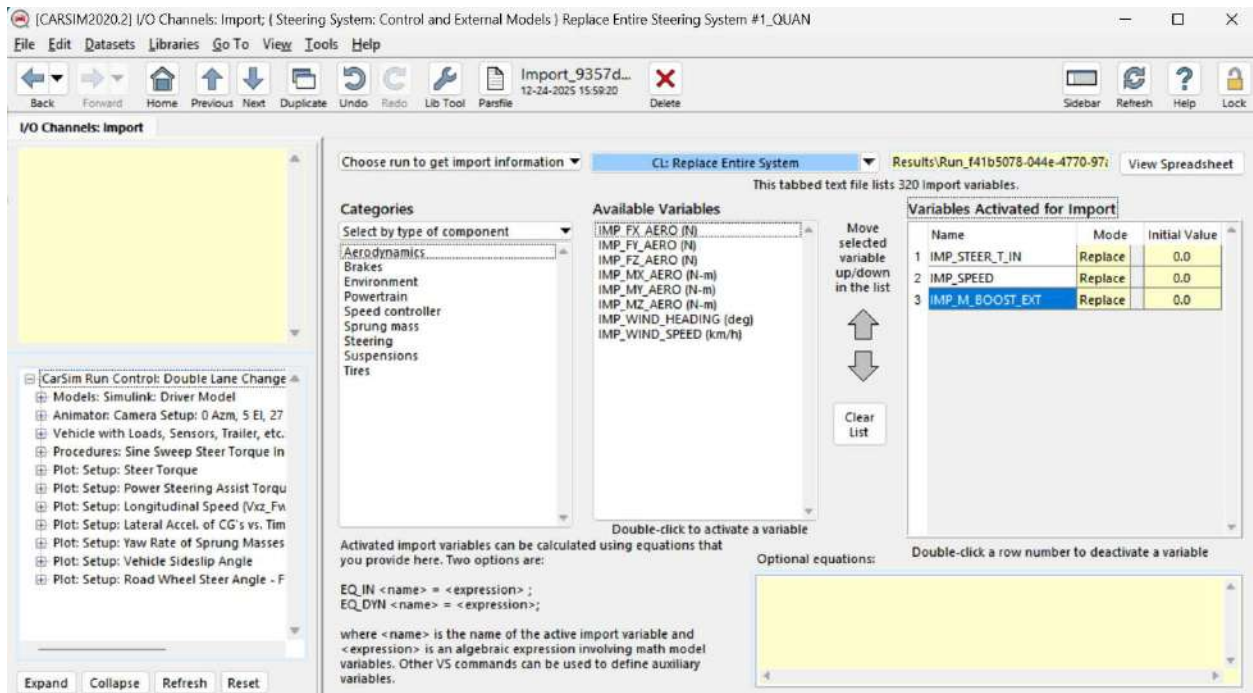
No	Name	Units	Type	Component	Full Name	Legend Label	Description
1	M_SW	N-m	Torque	Steering	Steering wheel torque	Steering wheel	
2	M_TBAR	N-m	Torque	Steering	Steering	Steering	

					torsion bar torque		
3	Mz_KP_L1	N-m	Moment	Steering	Steering moment about kingpin L1	Steering about kingpin L1	
4	Mz_KP_R 1	N-m	Moment	Steering	Steering moment about kingpin R1	Steering about kingpin R1	
5	F_Boost1	N	Force	Steering	Axle 1 steering boost force	Axle 1 power steering	
6	M_Boost1	N-m	Torque	Steering	Axle 1 steering boost torque	Axle 1 power steering	
7	Steer_SW	deg	Angle	Steering	Steering wheel angle	Steering wheel	
8	Y_Rack1	mm	Displace ment	Steering	Axle 1 steering rack disp.	Axle 1 steering	
9	StrK_L1	deg	Angle	Steering	Wheel L1 kinematic steer	Wheel L1 kinematic steer	Steering angle of wheel due to kinematical effects: control divided by gear ratio, subject to nonlinear kinematical shaping, added to toe.
10	StrK_R1	deg	Angle	Steering	Wheel R1 kinematic steer	Wheel R1 kinematic steer	
11	StrC_L1	deg	Angle	Steering	Wheel L1 complian ce steer	Wheel L1 compliance steer	
12	StrC_R1	deg	Angle	Steering	Wheel R1 complian ce steer	Wheel R1 compliance steer	
13	Steer_L1	deg	Angle	Steering	Wheel steer L1	Wheel steer L1	Total road wheel steer due to kinematics and compliance. Defined as rotation with respect to the sprung mass Z axis.
14	Steer_R1	deg	Angle	Steering	Wheel steer R1	Wheel steer R1	

15	StrSWr_1	deg	Angle	Steering	Axle 1 reduced SW angle	Axle 1 reduced SW	Steering wheel angle divided by the constant steering gear ratio for this axle.
16	AStKP_L1	deg	Angle	Steering	Steering angle about kingpin L1	Steering about kingpin L1	Steer angle about the kingpin axis (multibody steer angle)
17	AStKP_R1	deg	Angle	Steering	Steering angle about kingpin R1	Steering about kingpin R1	
18	StrAV_SW	deg/s	Angular rate	Steering	Steering wheel angular rate	Steering wheel	
19	VY_Rack1	mm/s	Speed	Steering	Axle 1 steering rack disp. rate	Axle 1 steering	
20	Alpha_L1	deg	Angle	Tires	Lateral slip angle, tire L1	Tire L1 lateral slip	Arc-tangent of the ratio of lateral to longitudinal velocity at the centre of tire contact: ATAN2(Vy, Vx): instant slip angle.
21	Alpha_R1	deg	Angle	Tires	Lateral slip angle, tire R1	Tire R1 lateral slip	
22	Fx_L1	N	Force	Tires	Tire L1 longitudinal force	Tire L1 longitudinal	
23	Fx_R1	N	Force	Tires	Tire R1 longitudinal force	Tire R1 longitudinal	
24	Fy_L1	N	Force	Tires	Tire L1 lateral force	Tire L1 lateral	
25	Fy_R1	N	Force	Tires	Tire R1 lateral force	Tire R1 lateral	
26	Fz_L1	N	Force	Tires	Tire L1 vertical force	Tire L1 vertical	
27	Fz_R1	N	Force	Tires	Tire R1 vertical force	Tire R1 vertical	
28	Rho_S1	1/m	Curvature	Sensors	Path curv, SM	SM sensor 1 unit 1	The instant curvature of the path of the

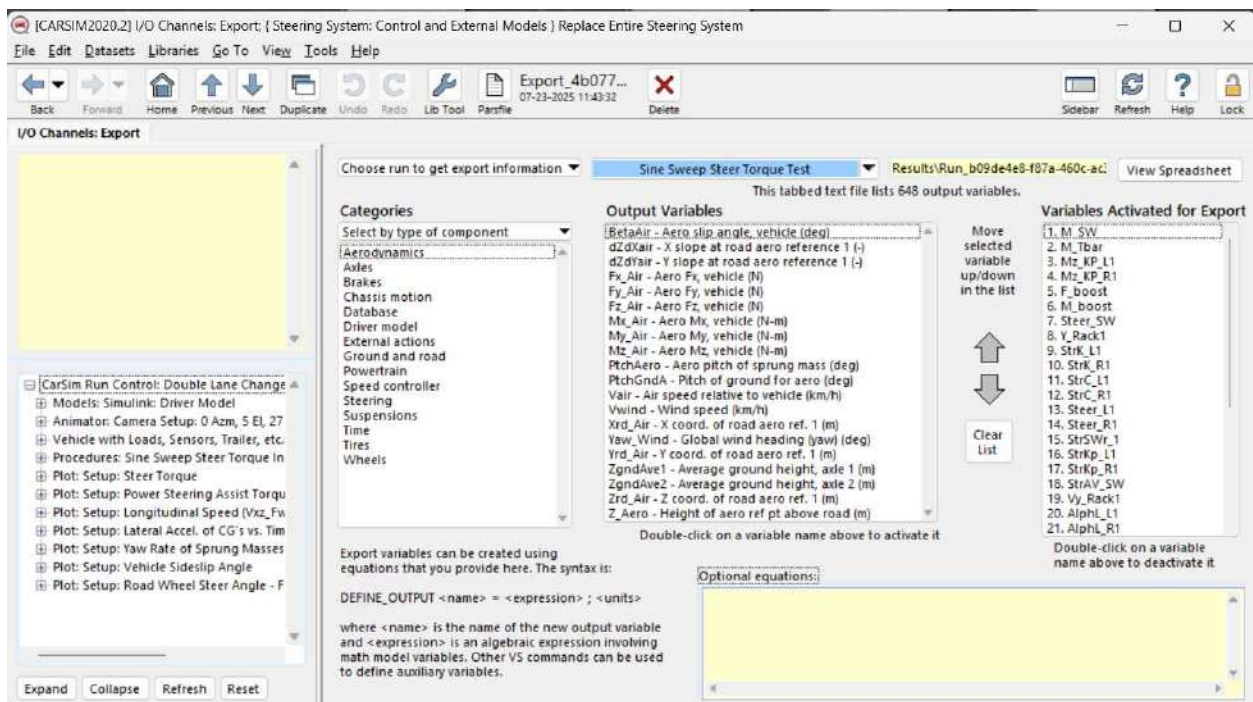
					sensor 1 unit 1	path 1/R	sensor point.
29	Ax	g's	Longitudinal acceleration	Chassis motion	Long. acceleration, unit 1	Unit 1 total CG	The [ex] component of the acceleration of the instant CG of unit 1.
30	Ay	g's	Lateral acceleration	Chassis motion	Lateral acceleration, unit 1	Unit 1 total CG	The [ey] component of the acceleration of the instant CG of unit 1.
31	Vx	km/h	Longitudinal speed	Chassis motion	Longitudinal speed, unit 1	Unit 1 total CG	The [ex] component of the velocity of the instant CG of unit 1.
32	Vy	km/h	Lateral speed	Chassis motion	Lateral speed, unit 1	Unit 1 total CG	The [ey] component of the velocity of the instant CG of unit 1.
33	AVz_S1	deg/s	Angular rate	Sensors	Yaw rate, SM sensor 1 unit 1	SM sensor 1 unit 1 yaw	The [kz] component of the angular velocity of the sprung mass of unit 1
34	Yaw	deg	Angle	Chassis motion	Yaw, unit 1	Unit 1 yaw	The Euler yaw angle of the sprung mass of unit 1. This is also the yaw angle as commonly used in vehicle dynamics.
35	Beta	deg	Angle	Chassis motion	Unit 1 slip angle	Unit 1 slip	The side-slip angle of the vehicle unit. It is calculated as $\text{ATAN2}(V_y, V_x)$, where V_y and V_x are the [ey] and [ex] components of the velocity of the instant centre of gravity of unit 1.

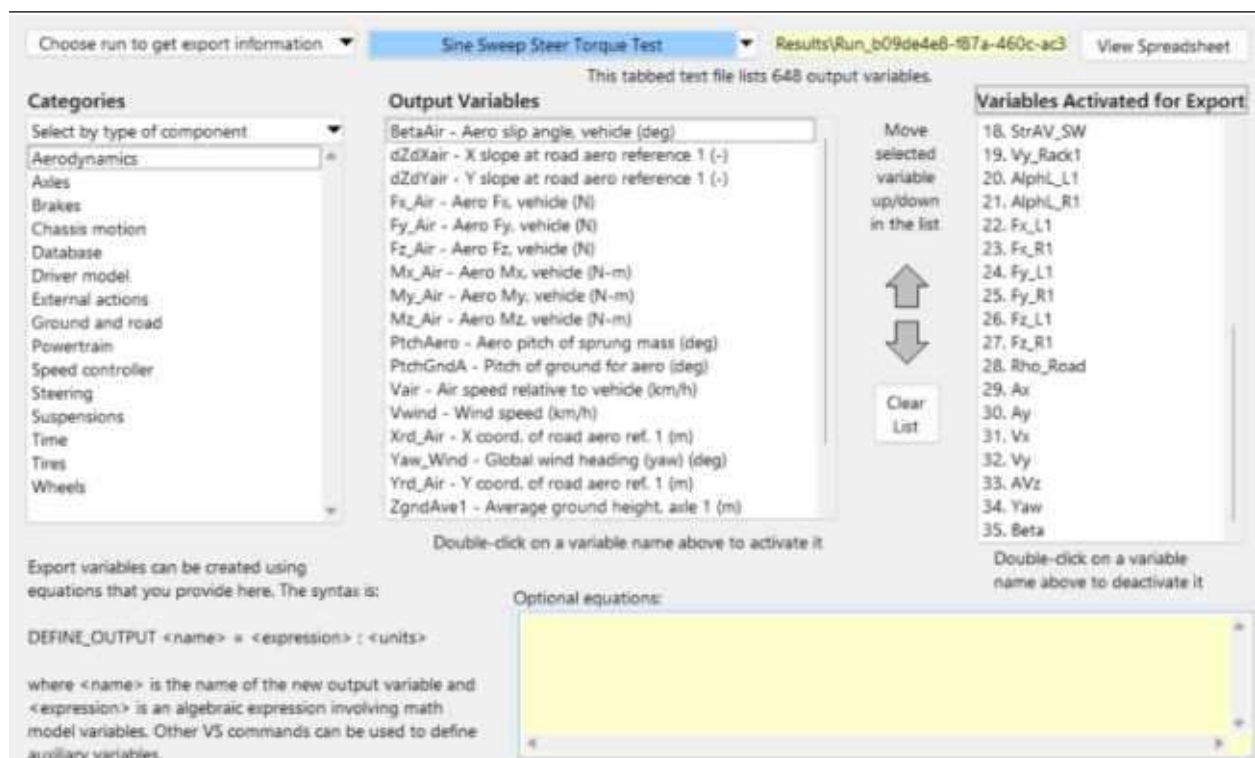
Cài đặt thông số tín hiệu đầu vào cho mô hình Carsim.



Hình PL1.2. Cài đặt tính hiệu đầu vào (Input signal setting)

Cài đặt thông số tín hiệu đầu ra cho mô hình Carsim.



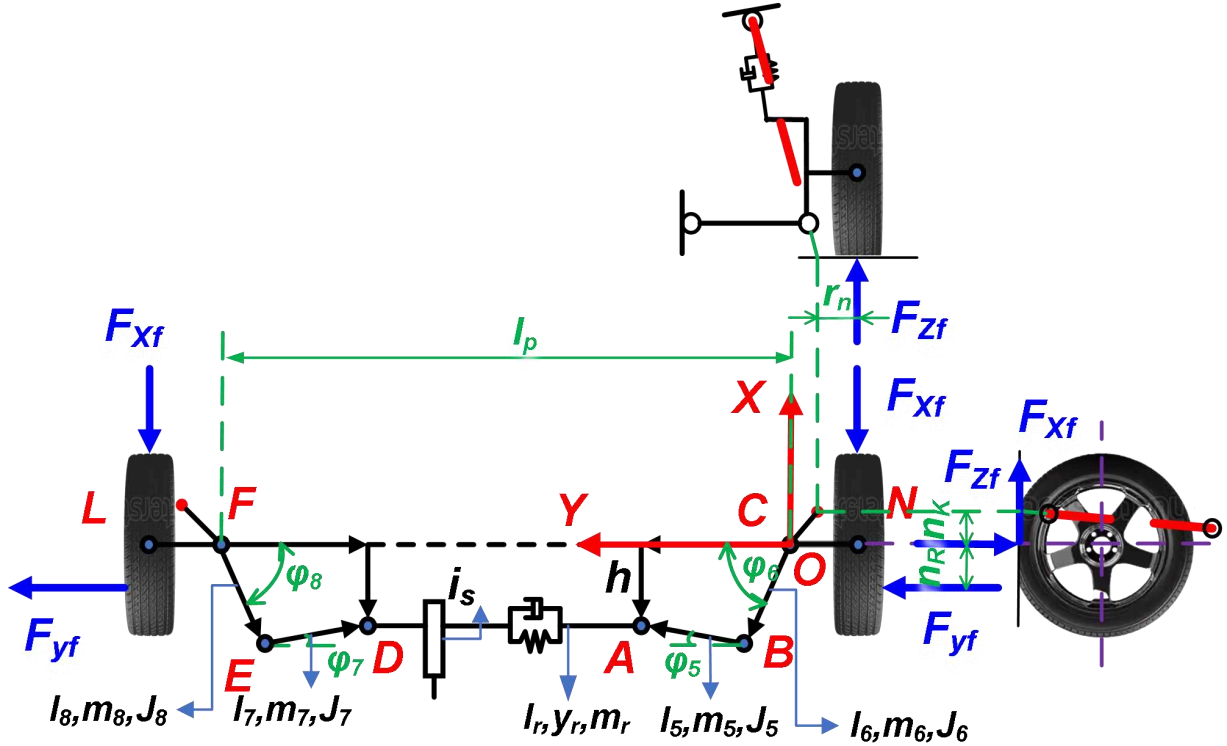


Hình PL1.3. Cài đặt tín hiệu đầu ra (Output signal setting)

PHỤ LỤC II: CÁC NỘI DUNG BỔ TRỢ CHO CHƯƠNG 2

2.1. MÔDLH HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI

Các giả thiết khi xây dựng mô hình: Coi các khâu l_5, l_7, l_6, l_8 là cứng tuyệt đối. Sơ đồ ĐLH hình thang lái, chọn hệ trục tọa độ XOY có gốc tọa độ là điểm C, ký hiệu kích thước, góc quay, góc đặt các khâu và ký hiệu các khớp trong hệ thống lái như Hình PL2.1.



Hình PL2.1. Sơ đồ MÔDLH hình thang lái Ackermann

2.2. ĐỘNG HỌC HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI

2.2.1. Xây dựng mô hình toán học động học hình thang lái

2.2.1.1. Xác định tọa độ và vị trí các khâu, khớp

1) Xác định tọa độ các điểm A, B, C, D, E, F, N, L

$$\begin{cases} x_C = 0 \\ y_C = 0 \end{cases} \begin{cases} x_B = -l_6 \sin \varphi_6 \\ y_B = l_6 \cos \varphi_6 \end{cases} \begin{cases} x_A = x_B - l_5 \sin \varphi_5 \\ y_A = y_B + l_5 \cos \varphi_5 \end{cases} \begin{cases} x_N = x_C + a \sin(\varphi_6 - \varphi_{60}) \\ y_N = y_C - a \cos(\varphi_6 - \varphi_{60}) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} x_F = 0 \\ y_F = m \end{cases} \begin{cases} x_D = x_A \\ y_D = y_A + l_4 \end{cases} \begin{cases} x_E = x_F - l_8 \sin \varphi_8 \\ y_E = y_F + l_8 \cos \varphi_8 \end{cases} \begin{cases} x_L = x_F + a \sin(\varphi_8 - \varphi_{80}) \\ y_L = y_F + a \cos(\varphi_8 - \varphi_{80}) \end{cases}$$

2) Xác định dịch chuyển của thanh răng y_r và n_1, n_2

$$n_1 = \frac{l_p - l_r}{2} \pm \varphi_p r_p; n_2 = \frac{l_p - l_r}{2} \pm \varphi_p r_p; y_r = \varphi_p r_p; \quad (2.2)$$

$$n_1 = \frac{l_p - l_r}{2} \pm y_r; n_2 = \frac{l_p - l_r}{2} \pm y_r \quad (2.3)$$

3) Xác định $\varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8$

Từ sơ đồ động học ta có:

$$\vec{l}_5 + \vec{l}_6 = \vec{h} + \vec{n}_1 \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow l_6^2 &= h^2 + n_1^2 + l_5^2 + 2hn_1\cos 90^\circ - 2hl_5\cos(90^\circ - \varphi_5) - 2n_1l_5\cos\varphi_5 \\ \Rightarrow h^2 + n_1^2 + l_5^2 - l_6^2 - 2hl_5\sin\varphi_5 - 2n_1l_5\cos\varphi_5 &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Đặt: } A &= -2hl_5; B = -2n_1l_5; C = h^2 + n_1^2 + l_5^2 - l_6^2 \\ \Rightarrow \varphi_5 &= 2\arctg \frac{A \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B - C} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow h^2 + n_1^2 + l_5^2 - l_6^2 - 2hl_5\sin\varphi_5 - 2n_1l_5\cos\varphi_5 = 0 \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Đặt: } D &= -2hl_6; E = -2n_1l_6; F = h^2 + n_1^2 + l_6^2 - l_5^2 \\ \Rightarrow \varphi_6 &= 2\arctg \frac{D \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{E - F} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Tương tự ta có:

$$\vec{l}_8 + \vec{l}_7 = \vec{h} + \vec{n}_2 \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \varphi_7 = 2\arctg \frac{G \pm \sqrt{G^2 + H^2 - K^2}}{H - K} \\ \varphi_8 = 2\arctg \frac{L \pm \sqrt{L^2 + M^2 - N^2}}{M - N} \end{cases} \quad (2.10)$$

Với: $G = -2hl_7; H = -2n_2l_7; K = h^2 + n_2^2 + l_7^2 - l_8^2; L = -2hl_8;$

$M = -2n_2l_8; N = h^2 + n_2^2 + l_8^2 - l_7^2$

2.2.1.2. Xác định vận tốc các khâu

1) Xác định vận tốc dịch chuyển ngang của thanh răng

$$\dot{y}_r = \dot{\varphi}_r r_p \quad (2.11)$$

Trong đó: r_p - bán kính trục răng cơ cấu lái.

2) Xác định $\dot{\varphi}_5, \dot{\varphi}_6, \dot{\varphi}_7, \dot{\varphi}_8$

Chiếu phương trình (2.19) lên hệ trục tọa độ XOY ta có hệ phương trình:

$$\begin{aligned} \begin{cases} -l_6\sin\varphi_6 - l_5\sin\varphi_5 = -h \\ l_6\cos\varphi_6 + l_5\cos\varphi_5 = n_1 \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} -l_6\cos\varphi_6\dot{\varphi}_6 - l_5\cos\varphi_5\dot{\varphi}_5 = 0 \\ -l_6\sin\varphi_6\dot{\varphi}_6 - l_5\sin\varphi_5\dot{\varphi}_5 = -\dot{n}_1 \end{cases} \\ \begin{cases} \dot{\varphi}_6 = -\dot{n}_1\cos\varphi_5/(l_6\sin(\varphi_6 - \varphi_5)) \\ \dot{\varphi}_5 = \dot{n}_1\cos\varphi_6/(l_5\sin(\varphi_6 - \varphi_5)) \end{cases} & \end{aligned} \quad (2.12)$$

Tương tự chiếu phương trình (2.23) lên hệ trục tọa độ XOY và đạo hàm ta có:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_7 = \dot{n}_2\cos\varphi_8/(l_7\sin(\varphi_8 - \varphi_7)) \\ \dot{\varphi}_8 = -\dot{n}_2\cos\varphi_7/(l_5\sin(\varphi_8 - \varphi_7)) \end{cases} \quad (2.13)$$

2.2.1.3. Xác định gia tốc các khâu

1) Xác định gia tốc dịch chuyển ngang của thanh răng

Đạo hàm phương trình (2.11) ta có:

$$\ddot{y}_r = \ddot{\varphi}_r r_p \quad (2.14)$$

2) Xác định $\ddot{\varphi}_5, \ddot{\varphi}_6, \ddot{\varphi}_7, \ddot{\varphi}_8$

Đạo hàm hệ phương trình (2.12) ta có:

$$\begin{cases} l_6 \sin \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_6 \cos \varphi_6 \ddot{\varphi}_6 + l_5 \sin \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2 - l_5 \cos \varphi_5 \ddot{\varphi}_5 = 0 \\ -l_6 \cos \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_6 \sin \varphi_6 \ddot{\varphi}_6 - l_5 \cos \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2 - l_5 \sin \varphi_5 \ddot{\varphi}_5 = -\ddot{n}_1 \\ \dot{\varphi}_5 = (l_6 \sin \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_6 \cos \varphi_6 \ddot{\varphi}_6 + l_5 \sin \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2) / (l_5 \cdot \sin \varphi_5) \\ \dot{\varphi}_6 = (\ddot{n}_1 - l_6 \cos \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_5 \cos \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2) \cos \varphi_5 / (l_6 \sin(\varphi_6 + \varphi_5)) \end{cases} \quad (2.15)$$

Đạo hàm hệ phương trình (2.13) ta có:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_7 = (l_8 \sin \varphi_8 \dot{\varphi}_8^2 - l_8 \cos \varphi_8 \ddot{\varphi}_8 + l_7 \sin \varphi_7 \dot{\varphi}_7^2) / (l_7 \cdot \sin \varphi_7) \\ \ddot{\varphi}_8 = (\ddot{n}_2 - l_8 \cos \varphi_8 \dot{\varphi}_8^2 - l_7 \cos \varphi_7 \dot{\varphi}_7^2) \cos \varphi_7 / (l_7 \sin(\varphi_8 + \varphi_7)) \end{cases} \quad (2.16)$$

Tổng hợp các phương trình ta có:

Hệ phương trình xác định vị trí góc quay và dịch chuyển của 5 khâu gồm thanh răng l_r , đòn bên l_5 , đòn bên l_7 , ngồng trục bánh xe bên phải l_6 , ngồng trục bánh xe bên trái l_8 gồm hệ phương trình có 5 phương trình, có 5 ẩn là: $y_r, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8$.

$$\begin{cases} y_r = \varphi_p r_p \\ \varphi_5 = 2 \arctg \frac{A \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B - C} \\ \varphi_6 = 2 \arctg \frac{D \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{E - F} \\ \varphi_7 = 2 \arctg \frac{G \pm \sqrt{G^2 + H^2 - K^2}}{H - K} \\ \varphi_8 = 2 \arctg \frac{L \pm \sqrt{L^2 + M^2 - N^2}}{M - N} \end{cases} \quad (2.17)$$

Hệ phương trình xác định vận tốc góc quay và vận tốc dịch chuyển của khâu gồm 5 phương trình (2.18), có 5 ẩn là: $y_r, \dot{\varphi}_5, \dot{\varphi}_6, \dot{\varphi}_7, \dot{\varphi}_8$.

$$\begin{cases} y_r = \dot{\varphi}_p r_p \\ \dot{\varphi}_5 = \dot{n}_1 \cos \varphi_6 / (l_5 \sin(\varphi_6 - \varphi_5)) \\ \dot{\varphi}_6 = -\dot{n}_1 \cos \varphi_5 / (l_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_5)) \\ \dot{\varphi}_7 = \dot{n}_2 \cos \varphi_8 / (l_7 \sin(\varphi_8 - \varphi_7)) \\ \dot{\varphi}_8 = -\dot{n}_2 \cos \varphi_7 / (l_5 \sin(\varphi_8 - \varphi_7)) \end{cases} \quad (2.18)$$

Hệ phương trình xác định gia tốc các khâu gồm 5 phương trình (2.19), có 5 ẩn là: $\ddot{\varphi}_d, \ddot{y}_r, \ddot{\varphi}_5, \ddot{\varphi}_6, \ddot{\varphi}_7, \ddot{\varphi}_8$.

$$\begin{cases} \ddot{y}_r = \ddot{\varphi}_p r_p \\ \ddot{\varphi}_5 = (l_6 \sin \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_6 \cos \varphi_6 \ddot{\varphi}_6 + l_5 \sin \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2) / (l_5 \cdot \sin \varphi_5) \\ \ddot{\varphi}_6 = (\ddot{n}_1 - l_6 \cos \varphi_6 \dot{\varphi}_6^2 - l_5 \cos \varphi_5 \dot{\varphi}_5^2) \cos \varphi_5 / (l_6 \sin(\varphi_6 + \varphi_5)) \\ \ddot{\varphi}_7 = (l_8 \sin \varphi_8 \dot{\varphi}_8^2 - l_8 \cos \varphi_8 \ddot{\varphi}_8 + l_7 \sin \varphi_7 \dot{\varphi}_7^2) / (l_7 \cdot \sin \varphi_7) \\ \ddot{\varphi}_8 = (\ddot{n}_2 - l_8 \cos \varphi_8 \dot{\varphi}_8^2 - l_7 \cos \varphi_7 \dot{\varphi}_7^2) \cos \varphi_7 / (l_7 \sin(\varphi_8 + \varphi_7)) \end{cases} \quad (2.19)$$

Hệ phương trình xác định vị trí 8 khớp A,B,C,D,E,F,N,L

$$\begin{cases} x_C = 0 \\ y_C = 0 \\ x_B = -l_6 \sin \varphi_6 \\ y_B = l_6 \cos \varphi_6 \end{cases} \quad \begin{cases} x_F = 0 \\ y_F = 0 \\ x_A = x_B - l_5 \sin \varphi_5 \\ y_A = y_B + l_6 \cos \varphi_5 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} x_D = x_A \\ y_D = y_A + l_4 \end{cases} \quad \begin{cases} x_E = x_F - l_8 \sin \varphi_8 \\ y_E = y_F + l_8 \cos \varphi_8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_N = x_C + a \sin(\varphi_6 - \varphi_{60}) \\ y_N = y_C - a \cos(\varphi_6 - \varphi_{60}) \end{cases} \quad \begin{cases} x_N = x_C + a \sin(\varphi_6 - \varphi_{60}) \\ y_N = y_C - a \cos(\varphi_6 - \varphi_{60}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_L = x_F + a \sin(\varphi_8 - \varphi_{80}) \\ y_L = y_F + a \cos(\varphi_8 - \varphi_{80}) \end{cases} \quad \begin{cases} x_L = x_F + a \sin(\varphi_8 - \varphi_{80}) \\ y_L = y_F + a \cos(\varphi_8 - \varphi_{80}) \end{cases}$$

Như vậy từ các hệ phương trình trên ta có thể xác được quỹ đạo, vị trí, vận tốc và gia tốc của các khâu, khớp trong hệ thống lái.

2.2.2. Xây dựng đặc tính động học quay vòng bánh xe dẫn hướng

Đường đặc tính lý thuyết quay vòng đúng của bánh xe dẫn hướng:

$$\cot g \delta_2 - \cot g \delta_{1lt} \beta_{lt} = l_p / L \quad (2.21)$$

Đường đặc tính theo động học của hình thang lái:

$$\delta_2 - \delta_{1lt} = (\varphi_8 - \varphi_6) \quad (2.22)$$

Độ lệch góc quay bánh xe dẫn hướng theo lý thuyết và theo động học của hình thang lái:

$$\Delta \delta = \delta_{1lt} - \delta_{1tt} \quad (2.23)$$

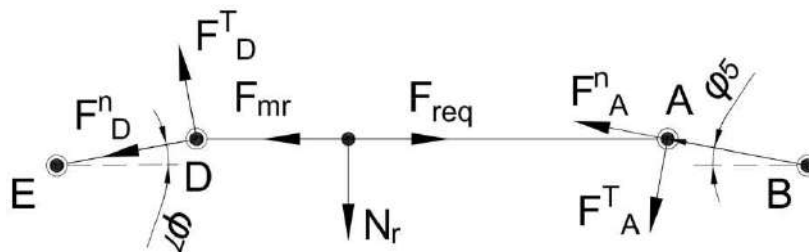
Trong đó: $\delta_2, \delta_{1lt}, \delta_{1tt}$ - góc quay bánh xe dẫn hướng bên ngoài, bên trong theo lý thuyết và theo thực tế.

2.3. ĐLH HÌNH THANG LÁI KHI XEM CÁC KHÂU CỨNG TUYỆT ĐỐI

MHDLH hình thang lái Ackermann khi xem các khâu cứng tuyệt đối như Hình PL2.1. Để xây dựng các phương trình động lực học cho các khâu và xác định lực tác dụng lên các khâu khớp ta cần tách liên kết giữa các khâu, đặt các phản lực, các lực quán tính và mô men quán tính lên từng khâu.

2.3.1. Xây dựng phương trình động lực học thanh răng

Sơ đồ MHDLH thanh răng l_r như hình sau:



Hình PL2.2. MHDLH thanh răng l_r

Từ sơ đồ ta có:

$$\sum F_x: F_D^n \cdot \sin \varphi_7 + F_A^n \cdot \sin \varphi_5 - F_D^t \cdot \cos \varphi_7 + F_A^t \cdot \cos \varphi_5 + N_r = 0 \quad (2.24)$$

$$\sum F_y: F_D^n \cdot \cos \varphi_7 + F_A^n \cdot \cos \varphi_5 + F_D^t \cdot \sin \varphi_7 + F_A^t \cdot \sin \varphi_5 - ([K_{req} y_r + D_{req} \dot{y}_r] - [B_{req} \dot{y}_r + F_{req} \text{sign}(\dot{y}_{req})]) + F_{mr} = 0 \quad (2.25)$$

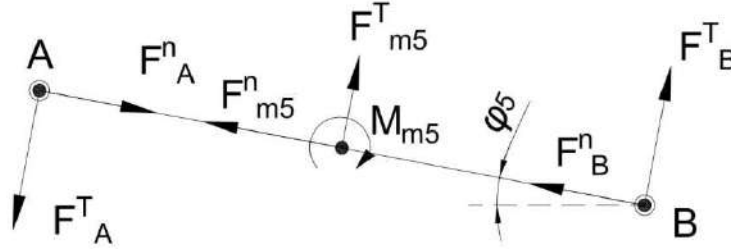
$$F_D^n \cdot \cos\varphi_7 + F_A^n \cdot \cos\varphi_5 + F_D^T \cdot \sin\varphi_7 + F_A^T \cdot \sin\varphi_5 - ([K_{req}y_r + D_{req}\dot{y}_r] - [B_{req}\dot{y}_r + F_{req}\text{sign}(\dot{y}_{req})]) + m_{req}\ddot{y}_r = 0$$

$$\Sigma M_D: N_r l_r / 2 + F_A^T l_4 \cos\varphi_5 - F_A^n l_r \sin\varphi_5 \quad (2.26)$$

$$\text{Với: } F_{mr} = m_{req}\ddot{y}_r; \quad (2.27)$$

2.3.2. Xây dựng phương trình động lực học thanh bên l_5

Sơ đồ MHĐLH thanh bên l_5 như hình sau:



Hình PL2.3. MHĐLH thanh bên l_5

Từ sơ đồ ta có:

$$\text{Theo phương AB: } F_{m5}^n + F_B^n - F_A^n = 0 \quad (2.28)$$

$$\text{Theo phương } \perp AB: F_B^T + F_{m5}^T - F_A^T = 0 \quad (2.29)$$

$$\text{CBMMTTT } F_A^T l_5 / 2 + F_B^T l_5 / 2 - M_{m5} = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{Với: } F_{m5}^n = m_5 a_5^n = m_5 l_5 \ddot{\varphi}_5^2 / 2; \\ M_{m5} = J_5 \ddot{\varphi}_5; F_{m5}^T = m_5 a_5^T = m_5 l_5 \ddot{\varphi}_5 / 2$$

$$\text{Từ đó ta có: } F_B^T + m_5 l_5 \ddot{\varphi}_5 / 2 - F_A^T = 0 \quad (2.31)$$

$$F_A^n - m_5 l_5 \ddot{\varphi}_5^2 / 2 - F_B^n = 0 \quad (2.32)$$

$$F_A^T l_5 / 2 + F_B^T l_5 / 2 - J_5 \ddot{\varphi}_5 = 0 \quad (2.33)$$

2.3.3. Xây dựng phương trình động lực học cụm bánh xe bên phải

Sơ đồ MHĐLH cụm bánh xe bên phải như hình sau:

Từ sơ đồ ta có:

$$\Sigma F_X: F_{Cx} + F_B^n \sin\varphi_5 - F_B^T \cos\varphi_5 - F_{m6}^T - F_{xf} = 0 \quad (2.34)$$

$$F_{Cx} + F_B^n \sin\varphi_5 - F_B^T \cos\varphi_5 - m_6 \ddot{\varphi}_6 - F_{xf} = 0$$

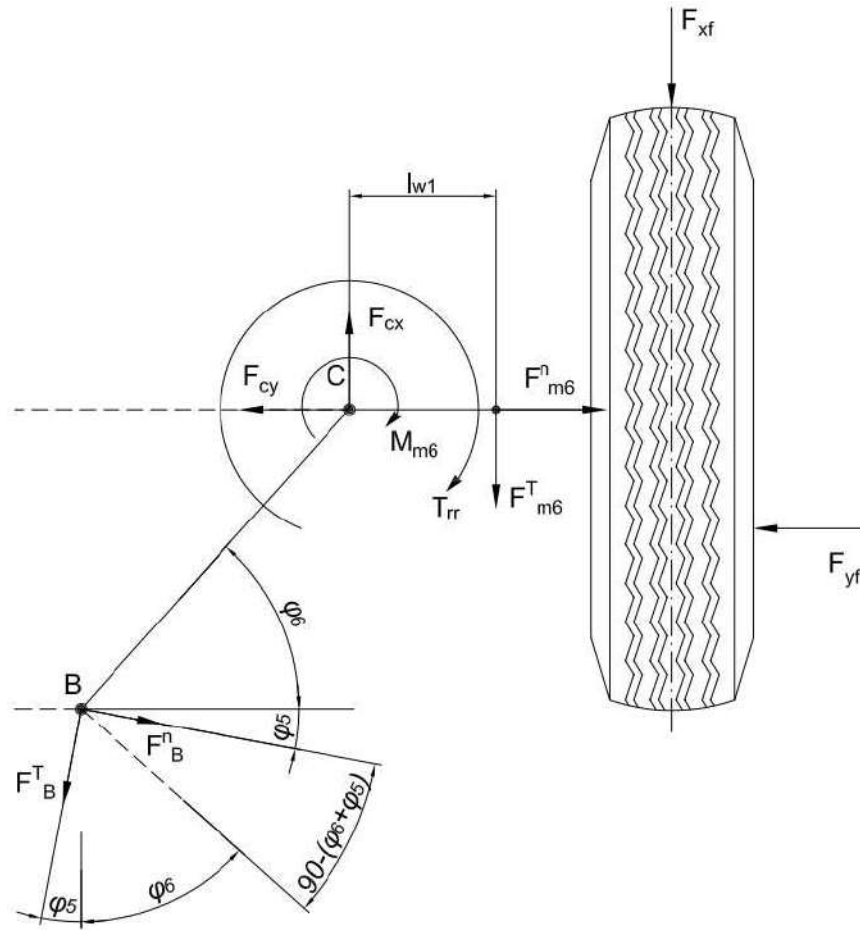
$$\Sigma F_Y: F_{Cy} - F_B^n \cos\varphi_5 - F_B^T \sin\varphi_5 - F_{m6}^n + F_{yf} = 0 \quad (2.35)$$

$$F_{Cy} - F_B^n \cos\varphi_5 - F_B^T \sin\varphi_5 - m_6 l_6 \ddot{\varphi}_6^2 / 2 + F_{yf} = 0$$

$$\Sigma M_C: l_6 F_B^n \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + l_6 F_B^T \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + F_{m6}^T l_{w1} - M_{m6} - T_{rr} = 0 \quad (2.36)$$

$$l_6 F_B^n \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + l_6 F_B^T \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + F_{m6}^T l_{w1} - M_{m6} - T_{rr} = J_6 \ddot{\varphi}_6$$

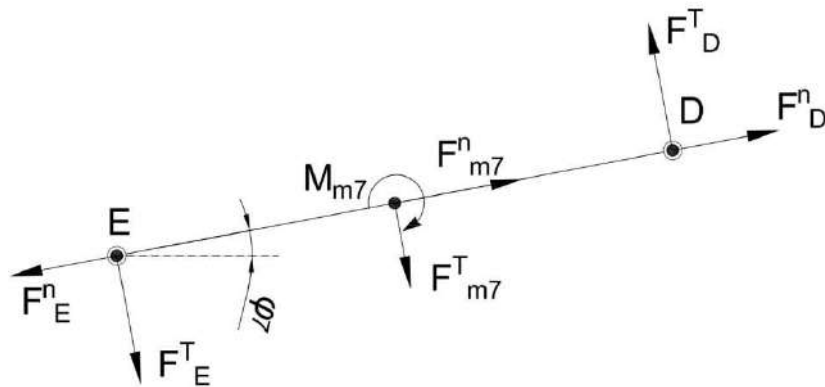
$$\text{Với: } F_{m6}^n = m_6 l_6 \ddot{\varphi}_6^2 / 2; \quad F_{m6}^T = m_6 \ddot{\varphi}_6; \quad M_{m6} = J_6 \ddot{\varphi}_6 \quad (2.37)$$



Hình PL2.4. MHDLH cụm bánh xe bên phải

2.3.4. Xây dựng phương trình động lực học thanh bên l_7

Sơ đồ MHDLH thanh bên l_7 như hình sau:



Hình PL2.5. MHDLH thanh bên l_7

Từ sơ đồ ta có:

Theo phương DE: $F_E^T + F_{qt7}^T - F_D^T = 0$ (2.38)

Theo phương $\perp DE$: $F_E^n + F_{qt7}^n - F_D^n = 0$ (2.39)

CBMMTTT: $F_E^T l_7/2 + F_D^T l_7/2 - M_{m7} = 0$ (2.40)

Với: $F_{m7}^T = m_7 a_7^T = m_7 l_7 \ddot{\phi}_7/2$; (2.41)

$$F_{m7}^n = m_7 \cdot a_7^n = m_7 l_7 \dot{\phi}_7^2/2; M_{m7} = J_7 \ddot{\phi}_7$$

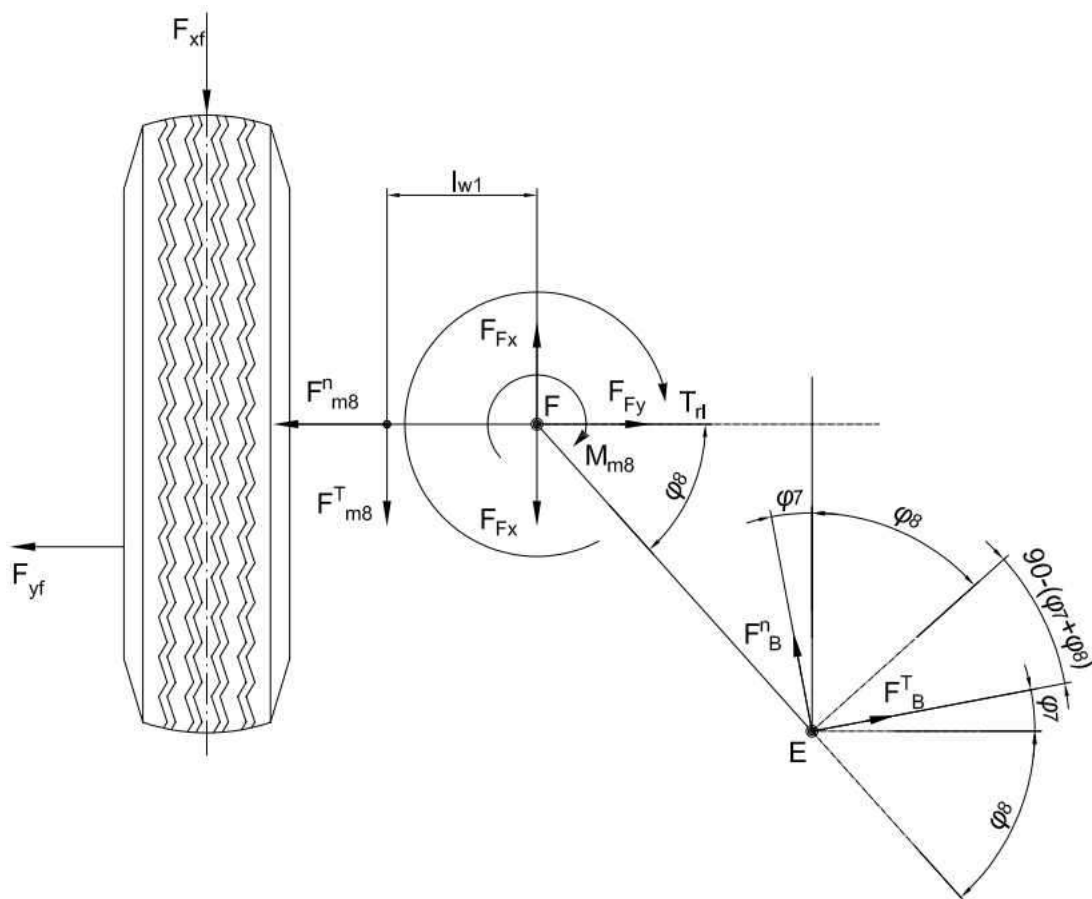
$$F_E^T + m_7 l_7 \ddot{\phi}_7 / 2 - F_D^T = 0 \quad (2.42)$$

$$F_F^n - m_7 l_7 \dot{\phi}_7^2 / 2 - F_D^n = 0 \quad (2.43)$$

$$F_F^T l_7 / 2 + F_D^T l_7 / 2 - J_7 \ddot{\phi}_7 = 0 \quad (2.44)$$

2.3.5. Xây dựng phương trình động lực học cụm bánh xe bên trái

Sơ đồ MHĐLH cụm bánh xe bên trái như hình sau:



Hình PL2.6. MHĐLH cum bánh xe bên trái

Từ sơ đồ ta có:

$$\begin{aligned} \Sigma F_X: \quad & -F_{Fx} + F_E^n \sin \varphi_7 + F_F^T \cos \varphi_7 + F_{m8}^T + F_{xf} = 0 \\ & -F_{Fx} + F_E^n \sin \varphi_7 + F_F^T \cos \varphi_7 + m_8 \ddot{\varphi}_8 + F_{xf} = 0 \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_Y: \quad & -F_{Fy} - F_E^n \cos \phi_7 - F_E^T \sin \phi_7 + F_{m8} + F_{yf} = 0 \\ & -F_{Fy} - F_E^n \cos \phi_7 - F_E^T \sin \phi_7 + m_8 l_8 \dot{\phi}_8^2 / 2 + F_{yf} = 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_F: \quad & l_7 F_E^n \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + l_8 F_E^T \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + F_{m8}^T l_{w1} - M_{m8} - T_{rl} = 0 \\ & l_7 F_E^n \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + l_8 F_E^T \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + F_{m8}^T l_{w1} - T_{rl} - J_8 \ddot{\varphi}_8 = 0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\text{Với: } F_{m8}^n = m_8 l_8 \dot{\phi}_8^2 / 2; F_{m8}^T = m_8 \ddot{\phi}_8; M_{m8} = J_8 \ddot{\phi}_8 \quad (2.48)$$

Tổng hợp ta có hệ phương trình ĐLH của hình thang lái Ackermann như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l}
F_D^n \cdot \sin\varphi_7 + F_A^n \cdot \sin\varphi_5 - F_D^T \cdot \cos\varphi_7 + F_A^T \cdot \cos\varphi_5 + N_r = 0 \\
F_D^n \cdot \cos\varphi_7 + F_A^n \cdot \cos\varphi_5 + F_D^T \cdot \sin\varphi_7 + F_A^T \cdot \sin\varphi_5 + m_{req}\ddot{y}_r \\
= [K_{req}y_r + D_{req}\dot{y}_r] - [B_{req}\dot{y}_r + F_{req}\text{sign}(\dot{y}_{req})] \\
N_r l_4/2 + F_A^T l_r \cos\varphi_5 - F_A^n l_r \sin\varphi_5 = 0 \\
F_B^T + m_5 l_5 \ddot{\varphi}_5/2 - F_A^T = 0 \\
F_A^n - m_5 l_5 \dot{\varphi}_5^2/2 - F_B^n = 0 \\
F_A^T l_5/2 + F_B^T l_5/2 - J_5 \ddot{\varphi}_5 = 0 \\
F_{Cx} + F_B^n \sin\varphi_5 - F_B^T \cos\varphi_5 - m_6 \ddot{\varphi}_6 - F_{xr} = 0 \\
F_{Cy} - F_B^n \cos\varphi_5 - F_B^T \sin\varphi_5 - m_6 l_6 \dot{\varphi}_6^2/2 + F_{xr} = 0 \\
l_6 F_B^n \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + l_6 F_B^T \sin(\varphi_6 - \varphi_5) + m_6 l_{w1} \ddot{\varphi}_6 - T_{rr} = J_6 \ddot{\varphi}_6 \\
F_E^T + m_7 l_7 \ddot{\varphi}_7/2 - F_D^T = 0 \\
F_E^n - m_7 l_7 \dot{\varphi}_7^2/2 - F_D^n = 0 \\
F_E^T l_7/2 + F_D^T l_7/2 - J_7 \ddot{\varphi}_7 = 0 \\
-F_{Fx} + F_E^n \sin\varphi_7 + F_E^T \cos\varphi_7 + m_8 \ddot{\varphi}_8 + F_{xl} = 0 \\
-F_{Fy} - F_E^n \cos\varphi_7 - F_E^T \sin\varphi_7 + m_8 l_8 \dot{\varphi}_8^2/2 + F_{yl} = 0 \\
l_8 F_E^n \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + l_8 F_E^T \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + m_8 l_{w1} \ddot{\varphi}_8 - T_{rl} = J_8 \ddot{\varphi}_8
\end{array} \right. \quad (2.49)$$

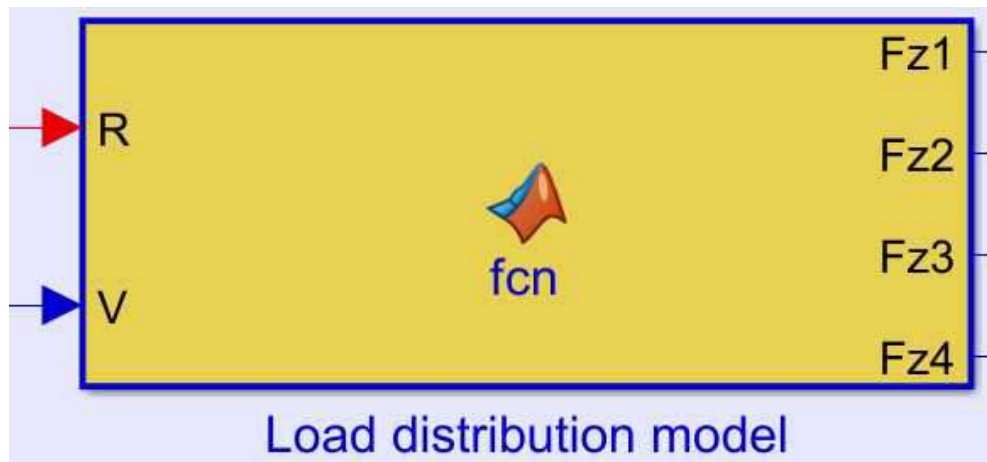
Như vậy đã xây dựng được 15 phương trình vi phân động lực học của hình thang lái Ackermann, trong đó có 15 ẩn: $F_{req}, N_r, F_A^n, F_A^T, F_B^n, F_B^T, F_D^n, F_D^T, F_E^n, F_E^T, F_{Cx}, F_{Cy}, F_{Fx}, F_{Fy}, \ddot{y}_r$. Các ẩn $\varphi_i, \dot{\varphi}_i, \ddot{\varphi}_i$ ($i = 5 \div 8$) đã được xác định trong phần động học.

Từ các hệ phương trình (2.17), (2.18), (2.19), (2.20) và (2.48) khi tác động mô men lái vào vành tay lái và mô men trợ lực tác dụng lên trục lái ta có thể xác định được dịch chuyển thanh răng, góc quay, vận tốc, gia tốc của các khâu trong hệ thống lái, góc quay của bánh xe dẫn hướng và toàn bộ lực và phản lực tác dụng lên các khâu và các khớp trong hệ thống lái.

PHỤ LỤC III: XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

3.1. XÂY DỰNG MHMP XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG PHÂN BỐ LÊN BÁNH XE

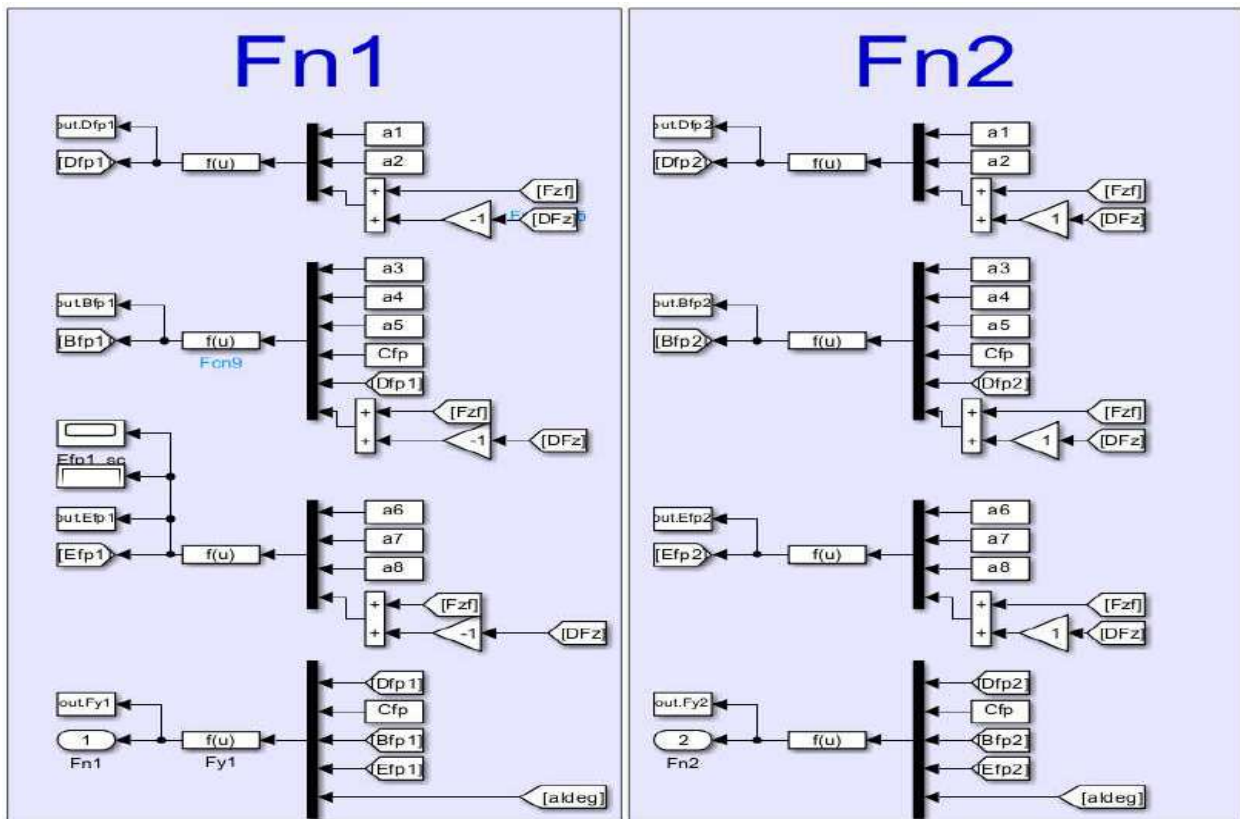
MHMP xác định tải trọng phân bố lên bánh xe như hình sau:

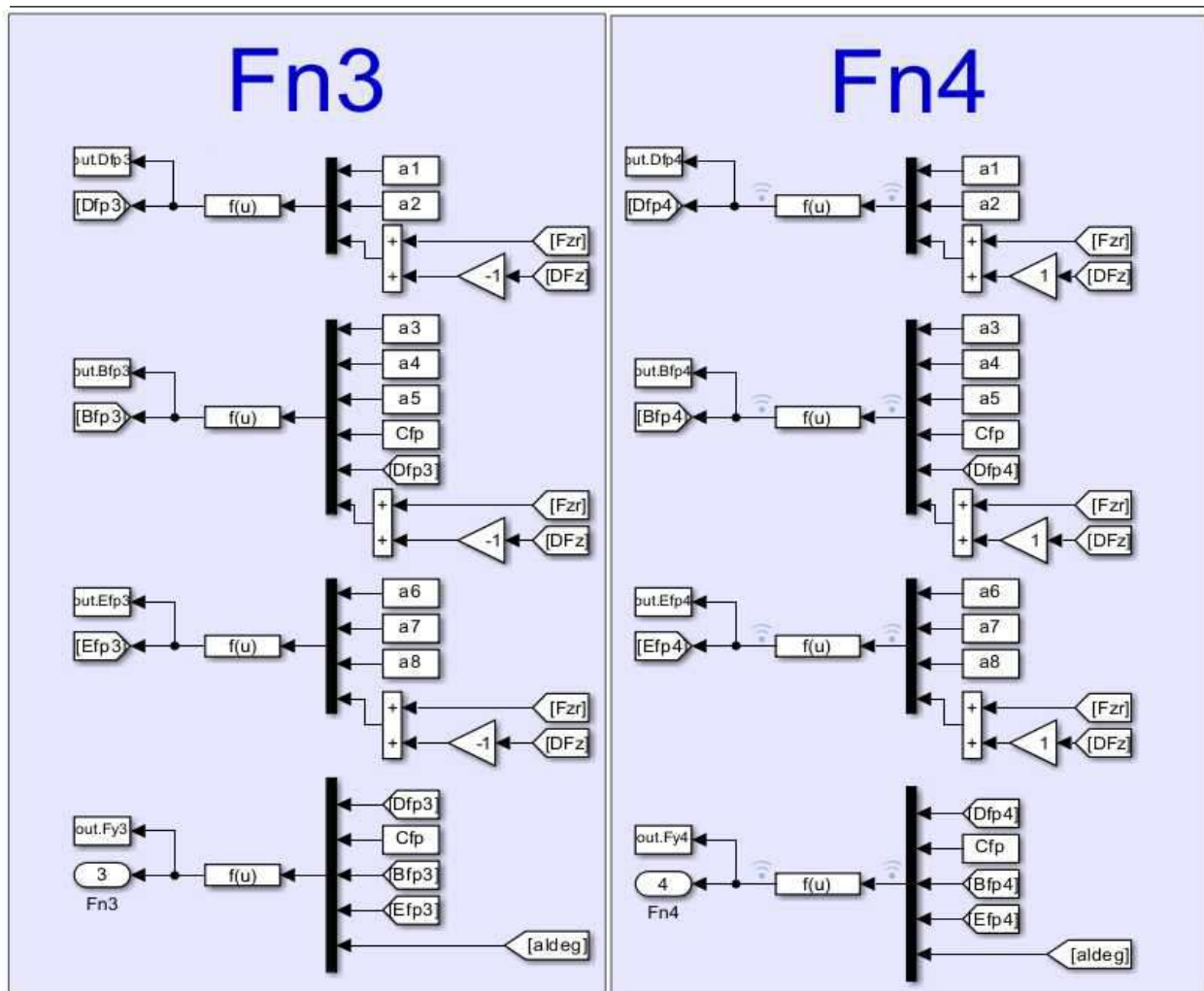


Hình PL3.1. MHMP xác định tải trọng phân bố lên bánh xe

3.2. XÂY DỰNG MHMP ĐLH BÁNH XE ĐÀN HỒI

MHMP ĐLH bánh xe đàn hồi như hình sau:

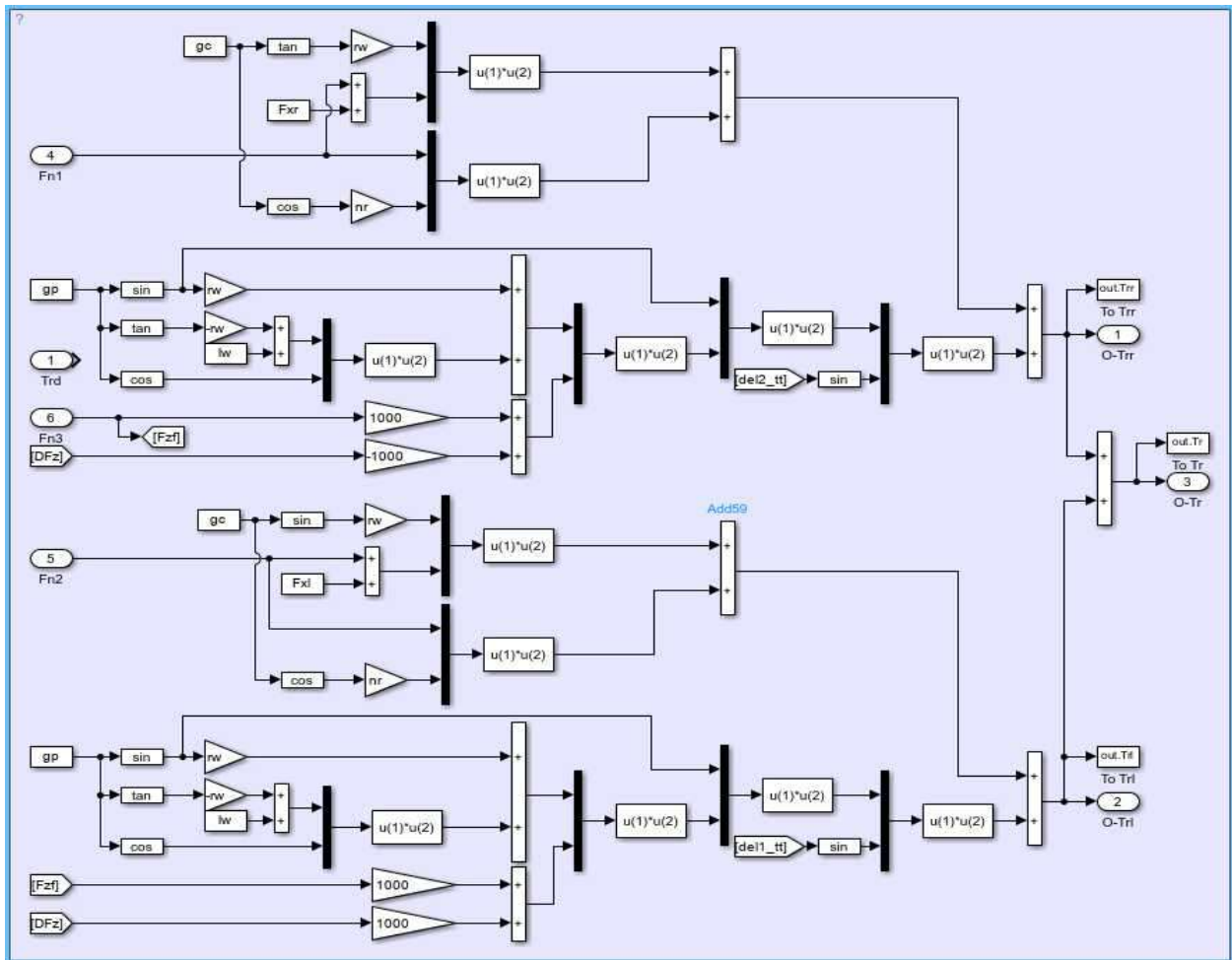




Hình PL3.2. MHMP ĐLH bánh xe đàn hồi

3.3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH XÁC ĐỊNH MÔ MEN CẢN QUAY VÒNG

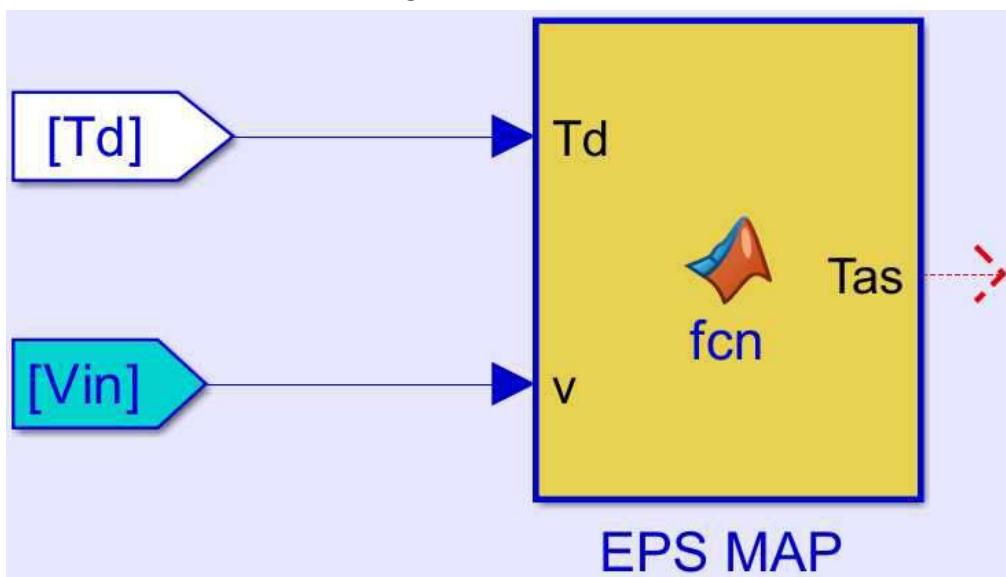
MHMP xác định mô men cản quay vòng như hình sau:



Hình PL3.3. MHMP xác định mô men cản quay vòng

3.4. XÂY DỰNG MHMP ĐẶC TÍNH TRỢ LỰC HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN

MHMP đặc tính trợ lực hệ thống lái trợ lực điện như hình sau:



```

%XÉT LẠI TRƯỜNG HỢP CASE 3 (PHƯƠNG CÁCH LÁI HỖN HỢP)
function [Tas] = calculate_Tas(M, xp, ns, ls, L, Kd, Kdt, Kda, Td, n, Kv, Kv1, Kv2, Vin)
    Tdmin = 1;
    Tdmax = 4.0;
    Tdrq = 3.5;
    KT = (M*xp^ns) / (ls * L);
    Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1) * (Td-Tdmin*sign(Td)));
    i = 0;
    q = 0;
    j = 1;
    k = 1;

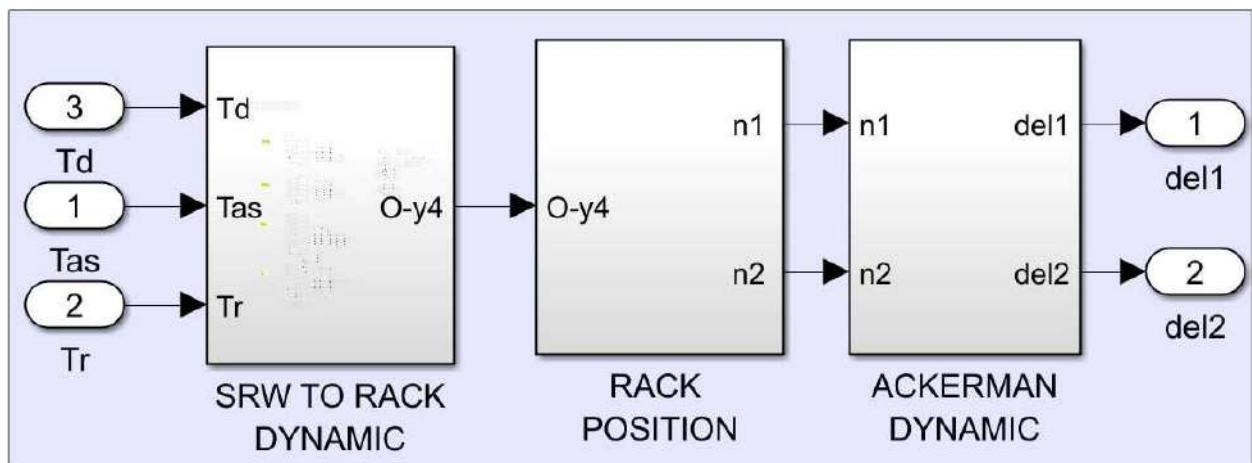
    if (Vin > 200/3.6)
        if (abs((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*Tdrq) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
            Tas = (KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*Tdrq;
        elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*Tdrq > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
            Tas = Kv1*(Tdmax-Tdmin);
        elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*Tdrq < -Kv1*(Tdmax-Tdmin))
            Tas = -Kv1*(Tdmax-Tdmin);
        end
    elseif abs(Td) < Tdmin
        Tas = 0;
    elseif (abs(Td) >= Tdmin)
        if (Vin <= 20/3.6)
            if (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) <= 0)
                Tas = 0;
            elseif (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq);
            elseif (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = Kv1*(Tdmax-Tdmin);
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) >= 0)
                Tas = 0;
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) >= (-Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < (-Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
            end
        elseif (Vin > 20/3.6) && (Vin <= 100/3.6)
            if (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) <= 0)
                Tas = 0;
            elseif (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq);
            elseif (Td==0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = Kv1*(Tdmax-Tdmin);
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) >= 0)
                Tas = 0;
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) >= (-Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
            elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td))^(n-1) - 1)*Tdrq) < (-Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
                Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
            end
        elseif (Vin > 100/3.6) && (Vin <= 200/3.6)
            if (abs(Td)<=Tdrq)
                Tas = 0;
            else
                Tas = 0;
            end
        end
    end
end

```

Hình PL3.4. MHMP đặc tính trợ lực hệ thống lái trợ lực điện

3.5. XÂY DỰNG MHMP ĐLH HỆ THỐNG LÁI TRỢ LỰC ĐIỆN

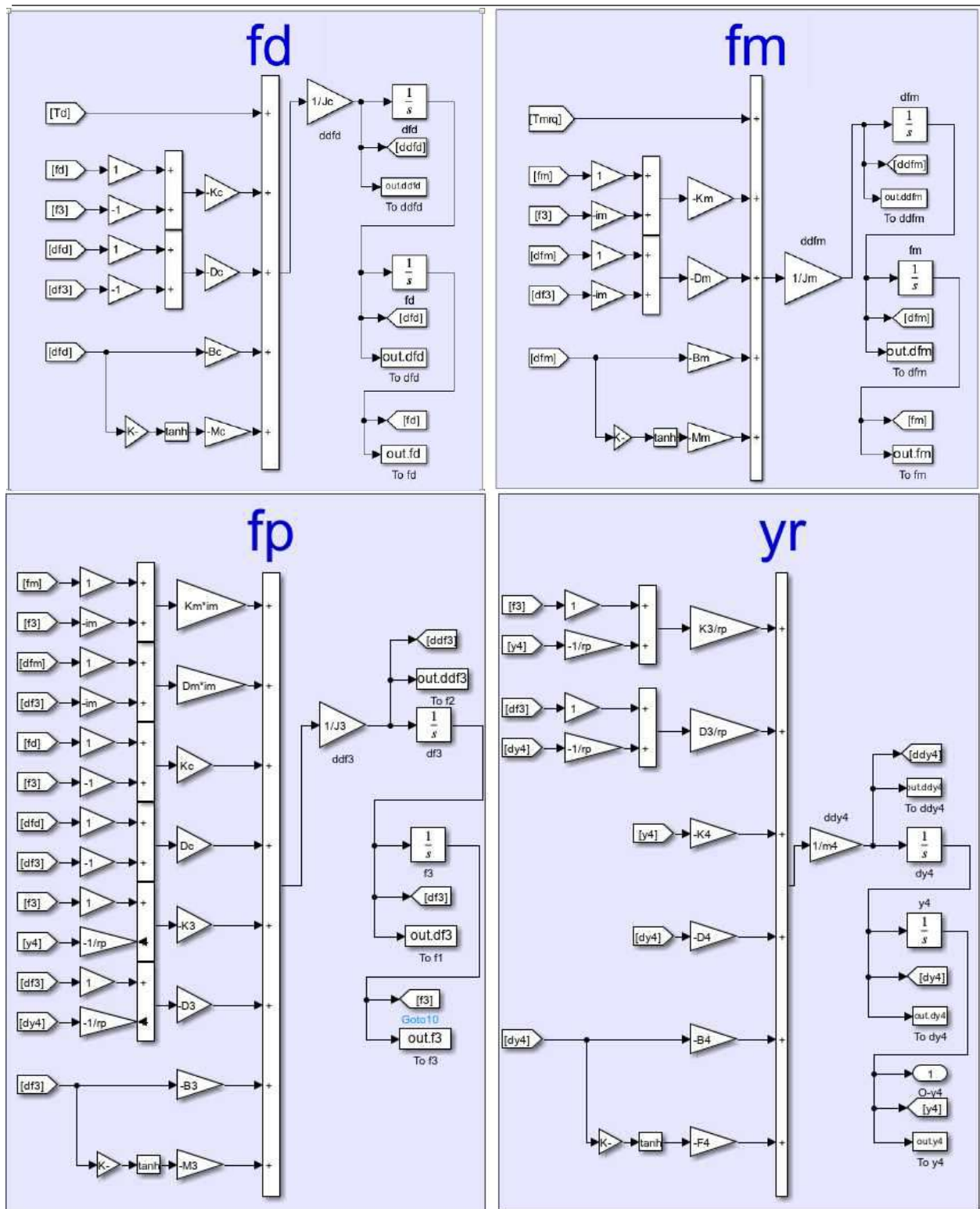
MHMP ĐLH tổng thể hệ thống lái trợ lực điện như hình sau:



Hình PL3.5. MHMP ĐLH tổng thể hệ thống lái trợ lực điện

3.5.1. Cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng

MHMP động học cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng như sau:

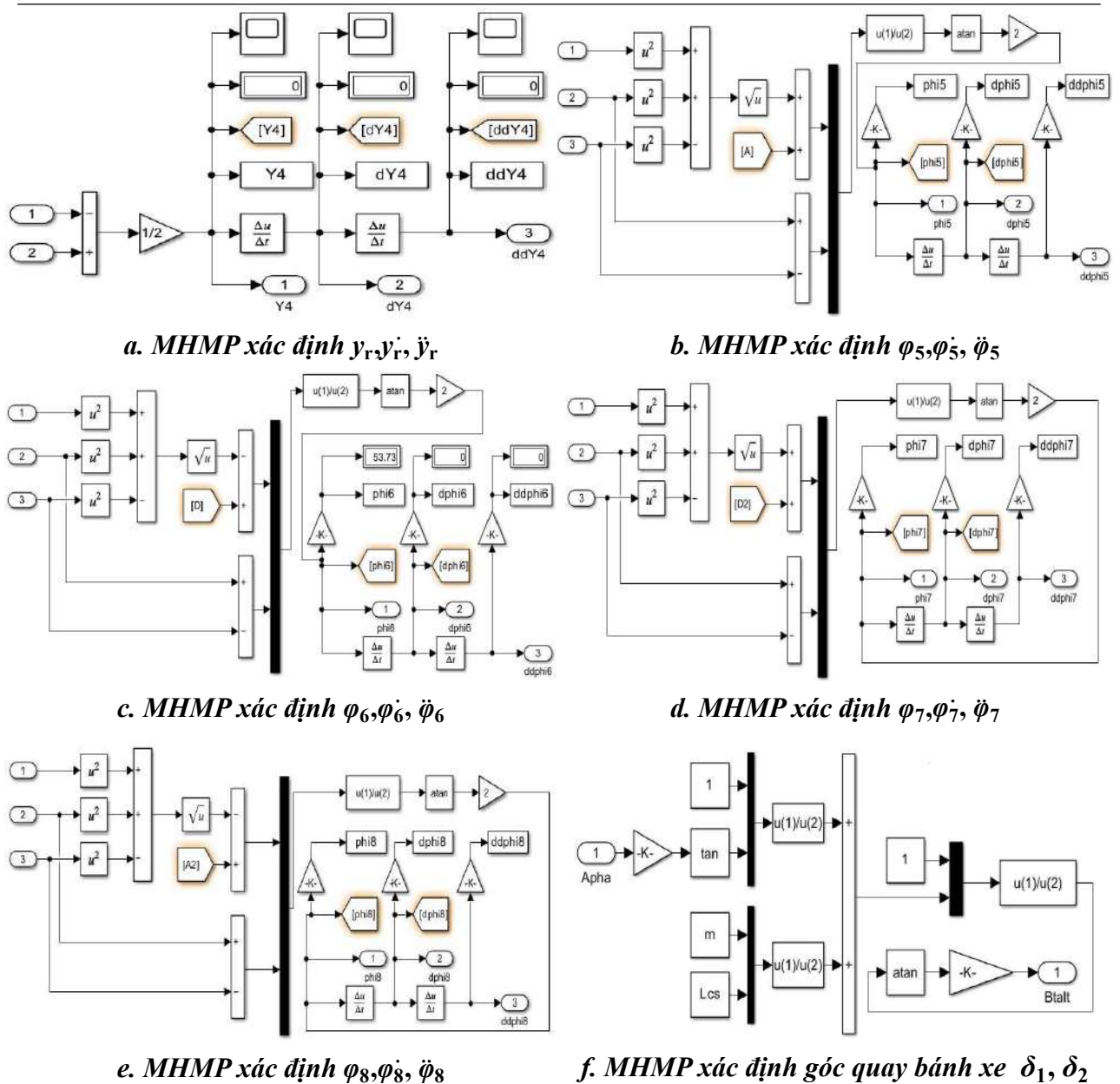


Hình PL3.6. MHMP ĐLH Cụm trục lái, động cơ trợ lực đến thanh răng

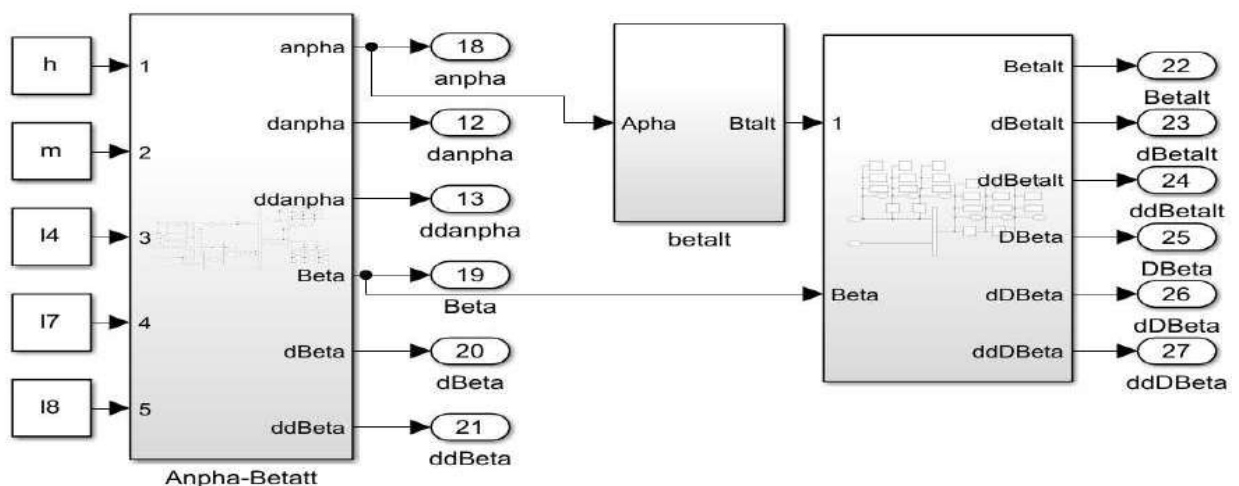
3.5.2. Cụm hình thang lái Ackermann

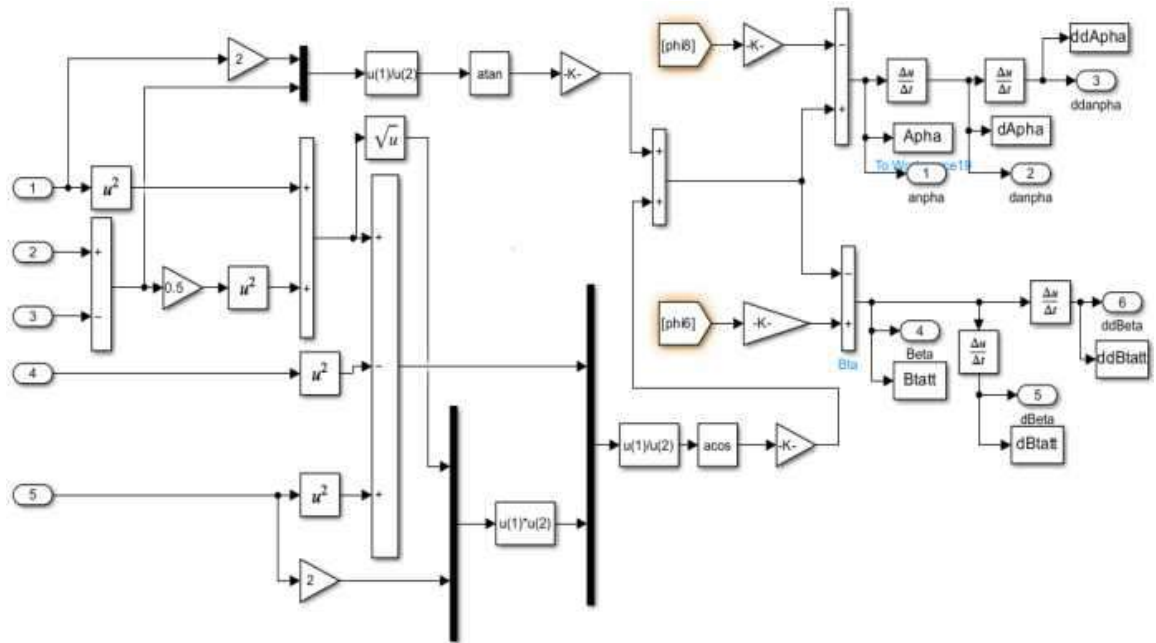
3.5.2.1. Động học cụm hình thang lái Ackermann

MHMP động học cụm hình thang lái Ackermann như sau:

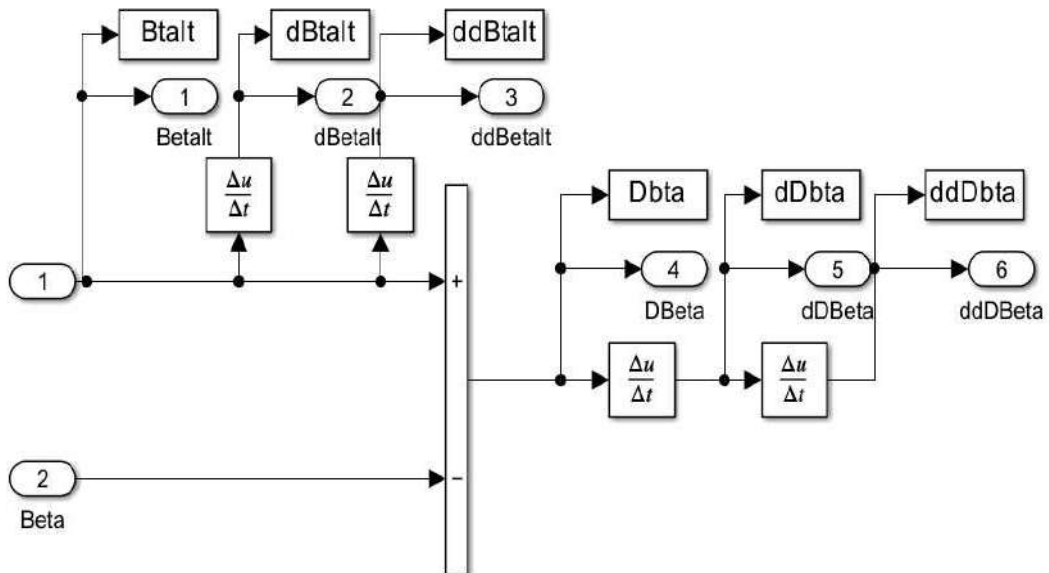


Hình PL3.7. MHMP động học hình thang lái Ackermann





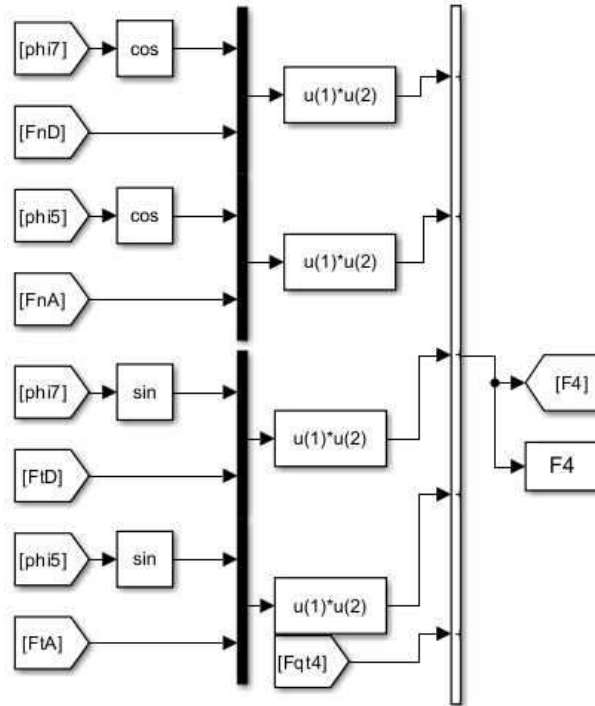
Hình PL3.9. MHMP xác định δ_{1u}, δ_{2u}



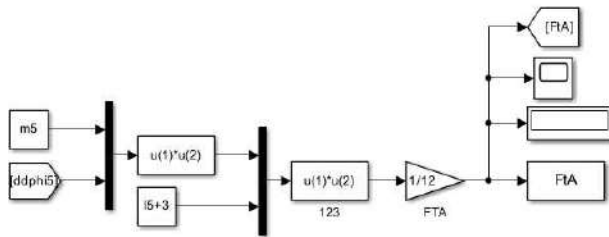
Hình PL3.10. MHMP xác định sai lệch $\Delta\delta_1$

3.5.2.2. Xác định phản lực cụm hình thang lái Ackermann

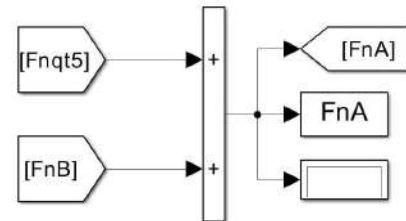
MHMP xác định phản lực tại các khâu khớp cụm hình thang lái Ackermann như sau:



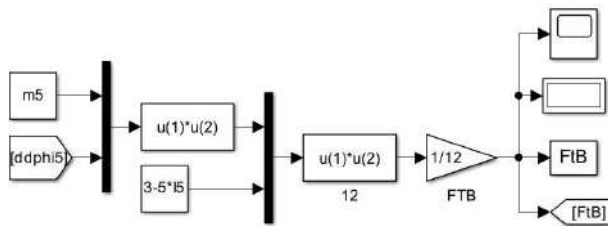
a. MHMP xác định F_{req}



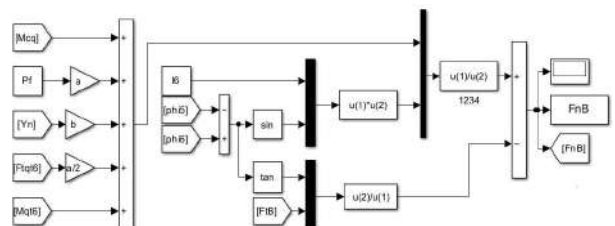
b. MHMP xác định F_A^T



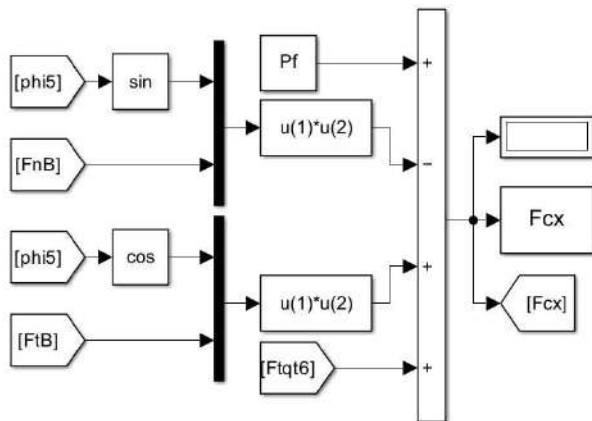
b. MHMP xác định F_A^n



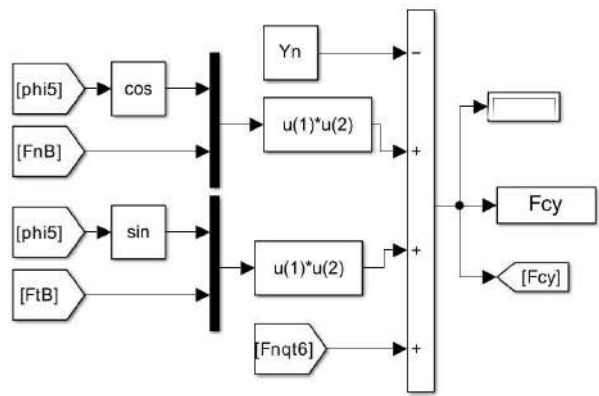
d. MHMP xác định F_B^T



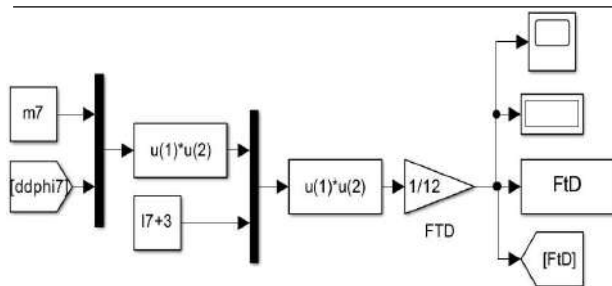
e. MHMP xác định F_B^n



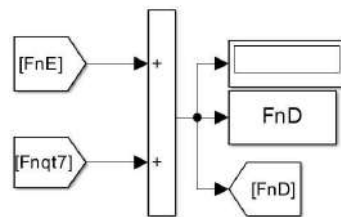
f. MHMP xác định F_{Cx}



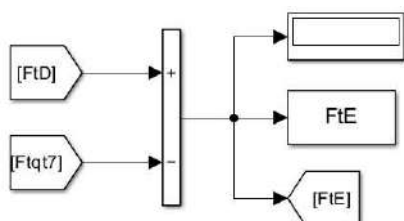
g. MHMP xác định F_{Cy}



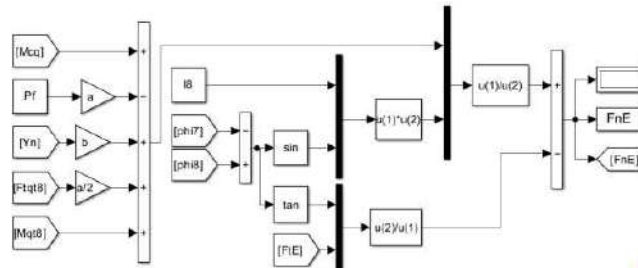
h. MHMP xác định F_D^T



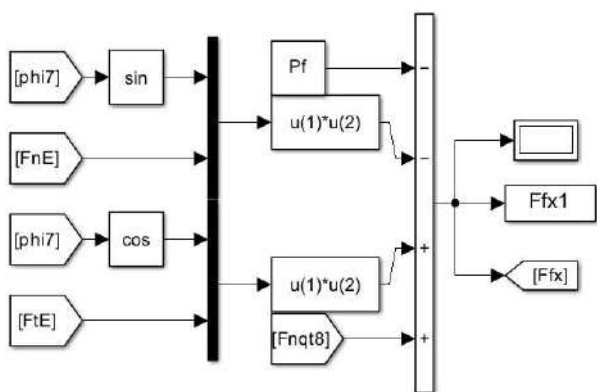
i. MHMP xác định F_D^n



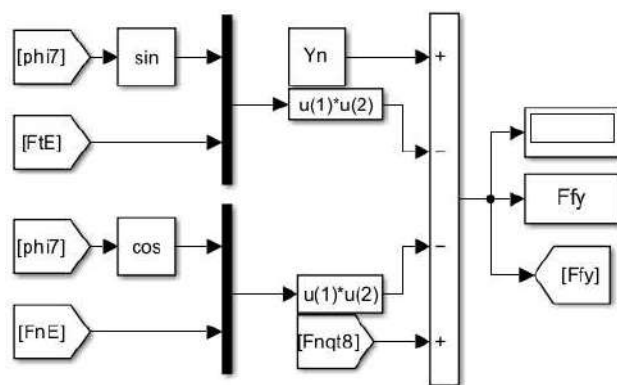
j. MHMP xác định F_E^T



k. MHMP xác định F_E^n



l. MHMP xác định F_{Fx}

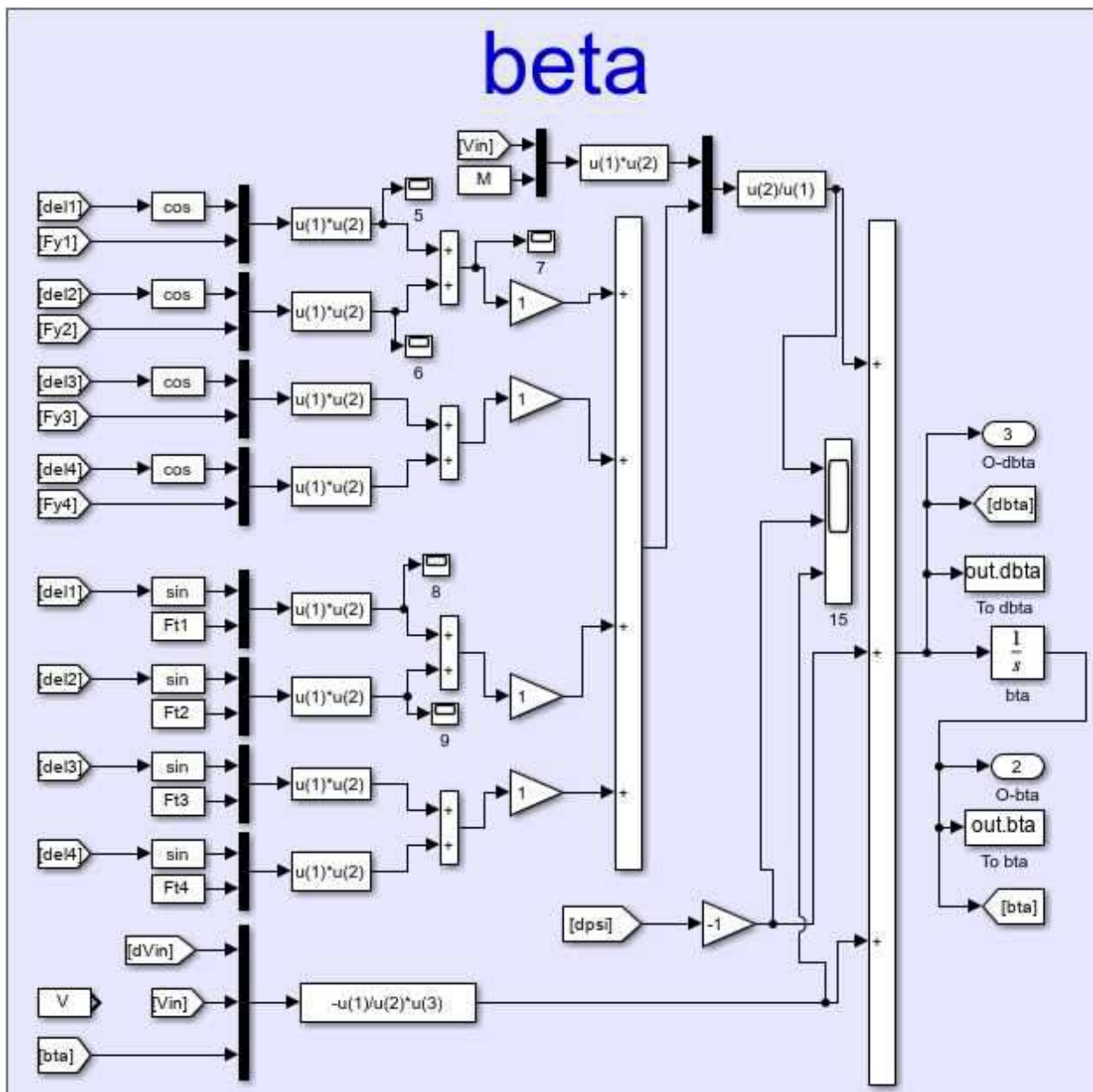


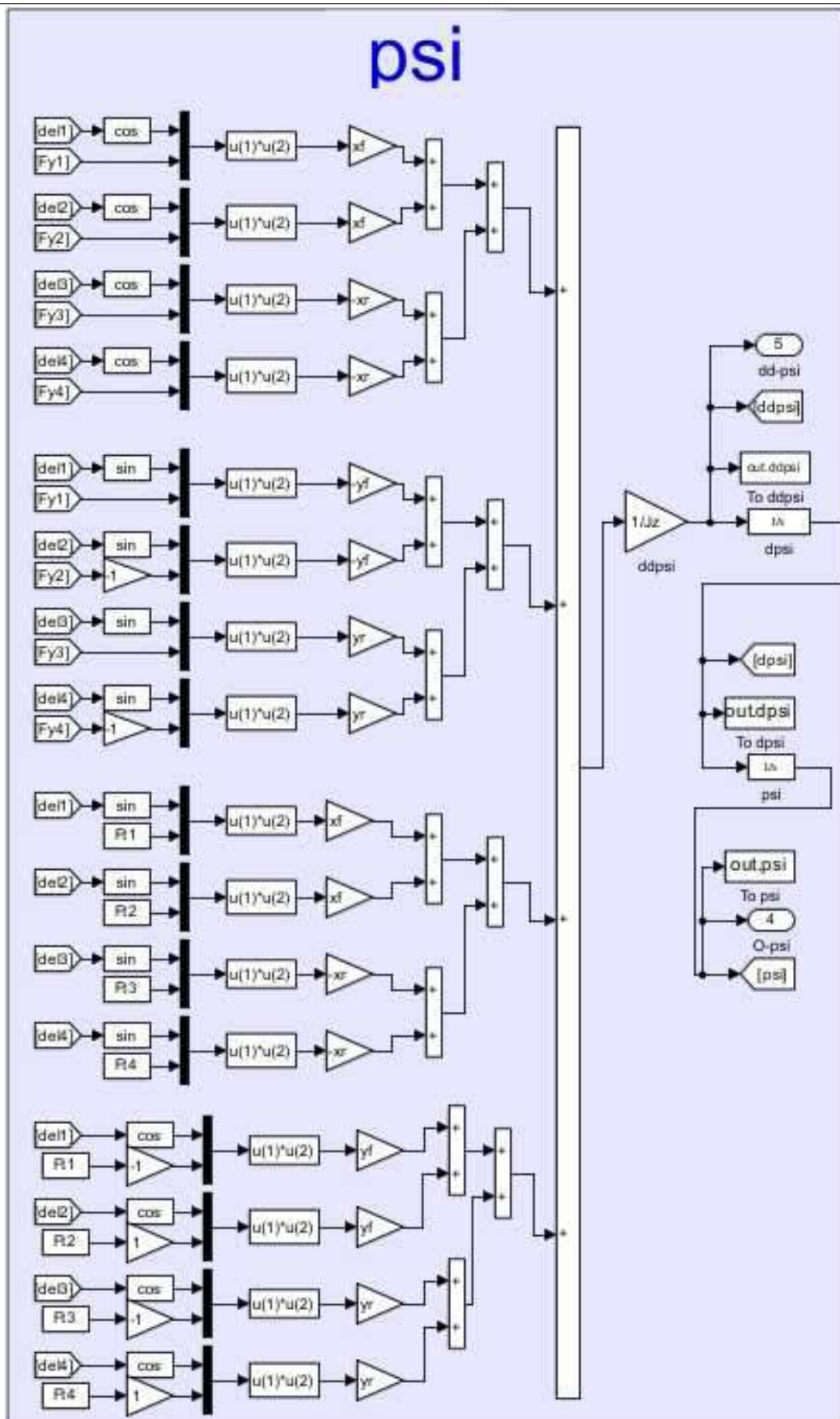
m. MHMP xác định F_{Fy}

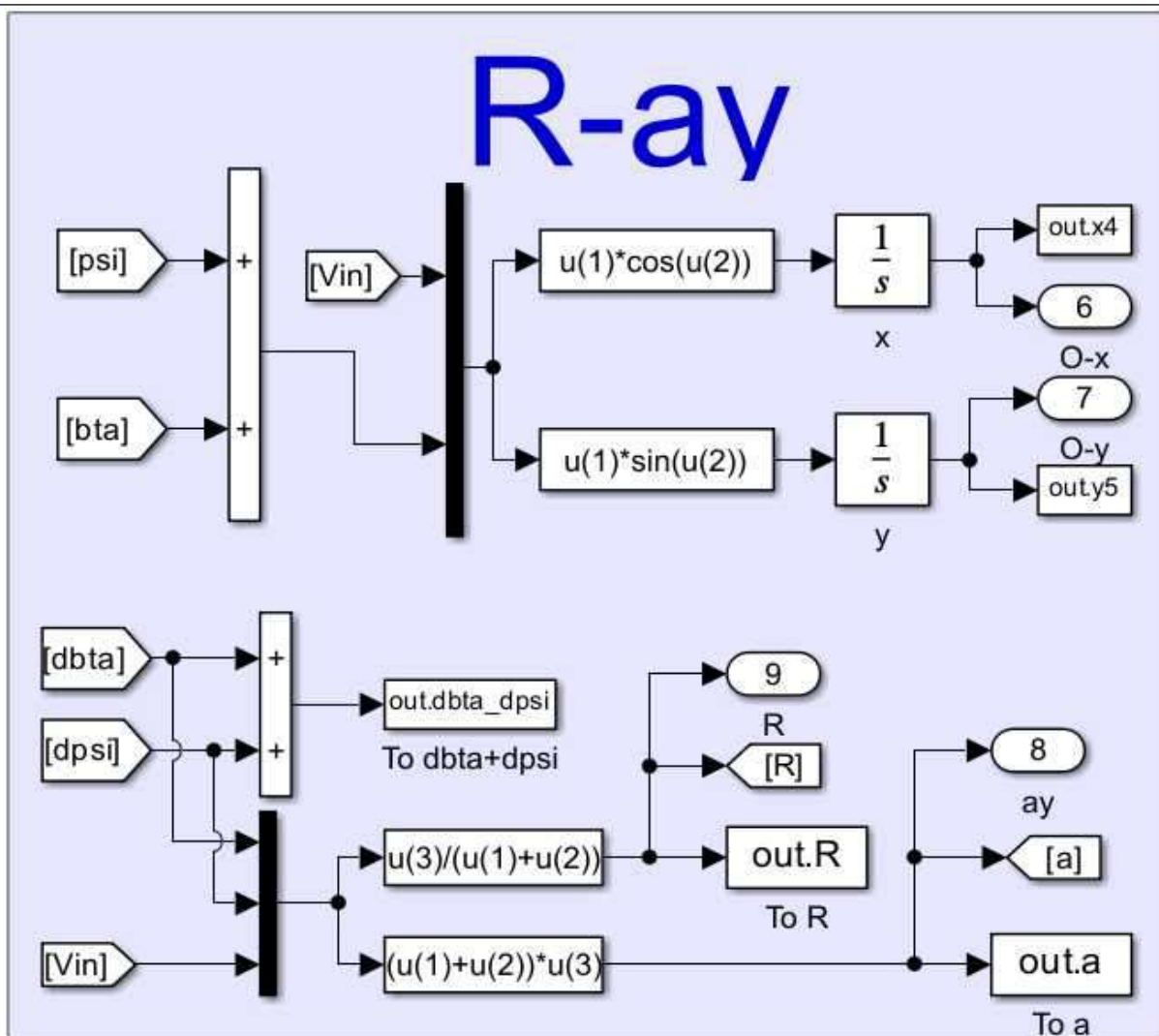
Hình PL3.11. MHMP xác định phản lực tại các khớp

3.6. XÂY DỰNG MHMP ĐLH CHUYỂN ĐỘNG CỦA Ô TÔ

MHMP ĐLH chuyển động của ô tô thể hiện như hình sau:



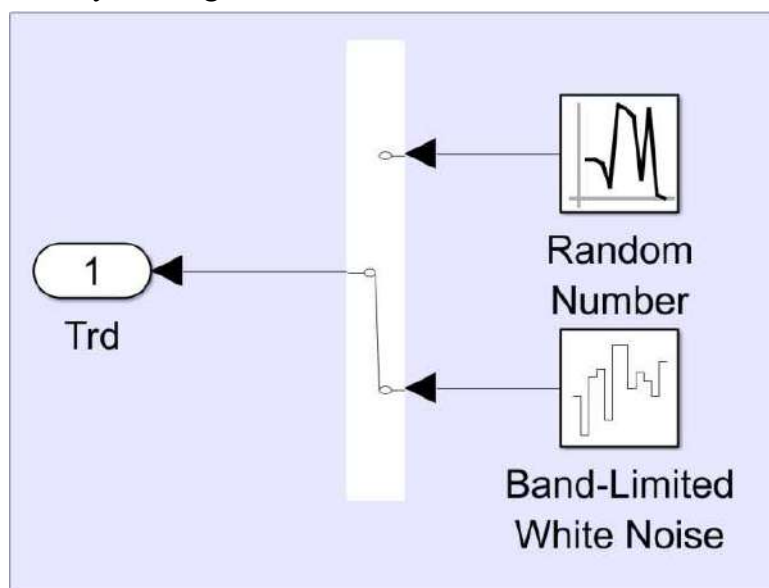




Hình PL3.12. MHMP ĐLH chuyển động của ô tô

3.7. XÂY DỰNG MHMP MÔ MEN NHIỀU NGẪU NHIÊN

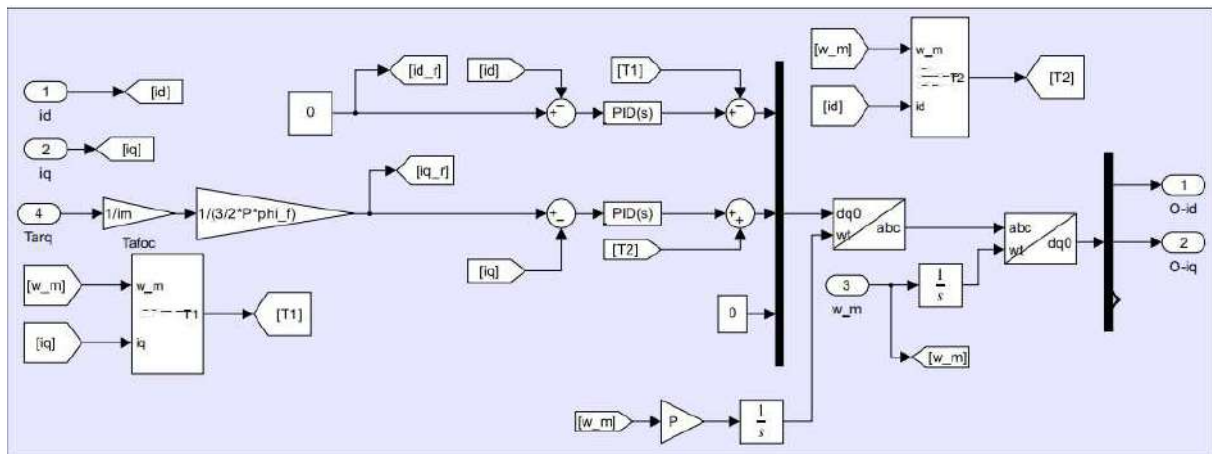
MHMP ĐLH chuyển động của ô tô như hình sau:



Hình PL3.13. MHMP mô men nhiều ngẫu nhiên

3.8. XÂY DỰNG MHMP BỘ ĐIỀU KHIỂN PID-FOC

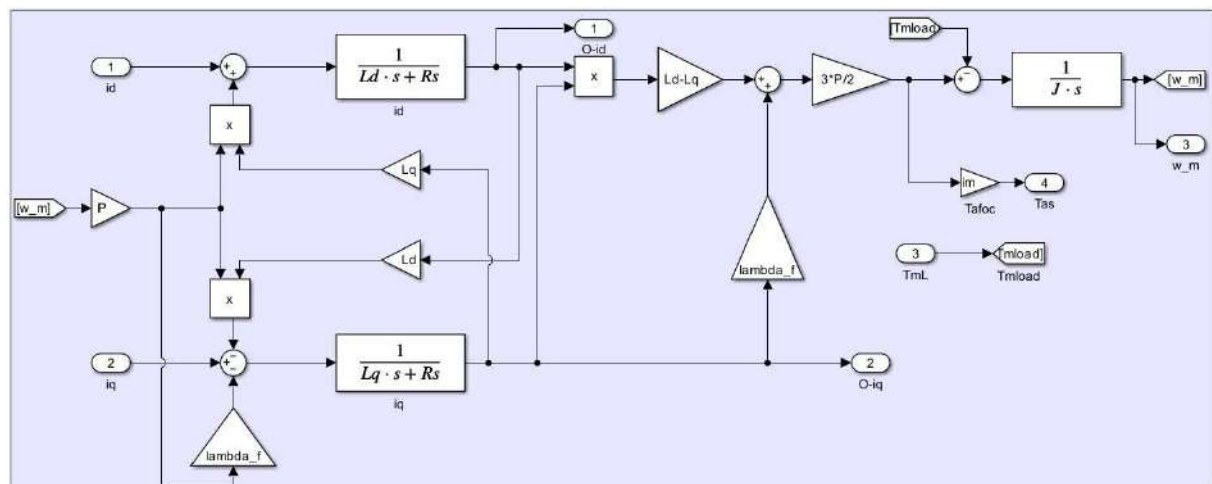
MHMP bộ điều khiển PID-FC như hình sau:



Hình PL3.14. MHMP bộ điều khiển PID-FOC

3.9. XÂY DỰNG MHMP ĐLH ĐỘNG CƠ PMSM

MHMP ĐLH động cơ PMSM như hình sau:



Hình PL3.15. MHMP ĐLH động cơ PMSM

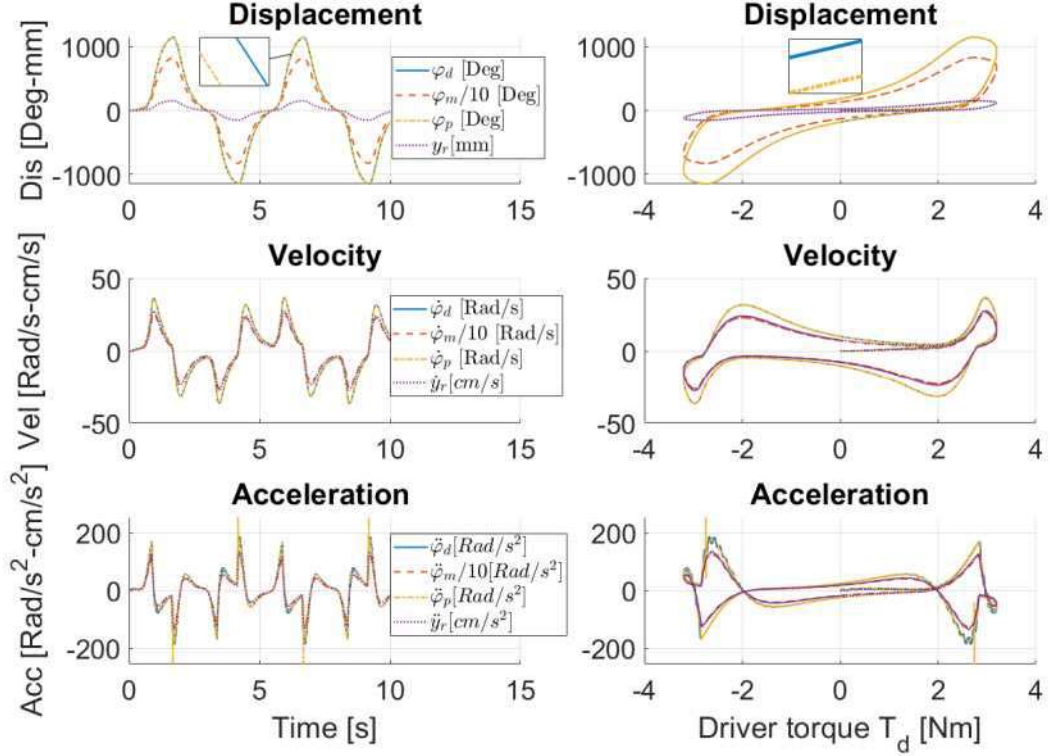
PHỤ LỤC IV: CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ ĐLH HỆ THỐNG LÁI EPS

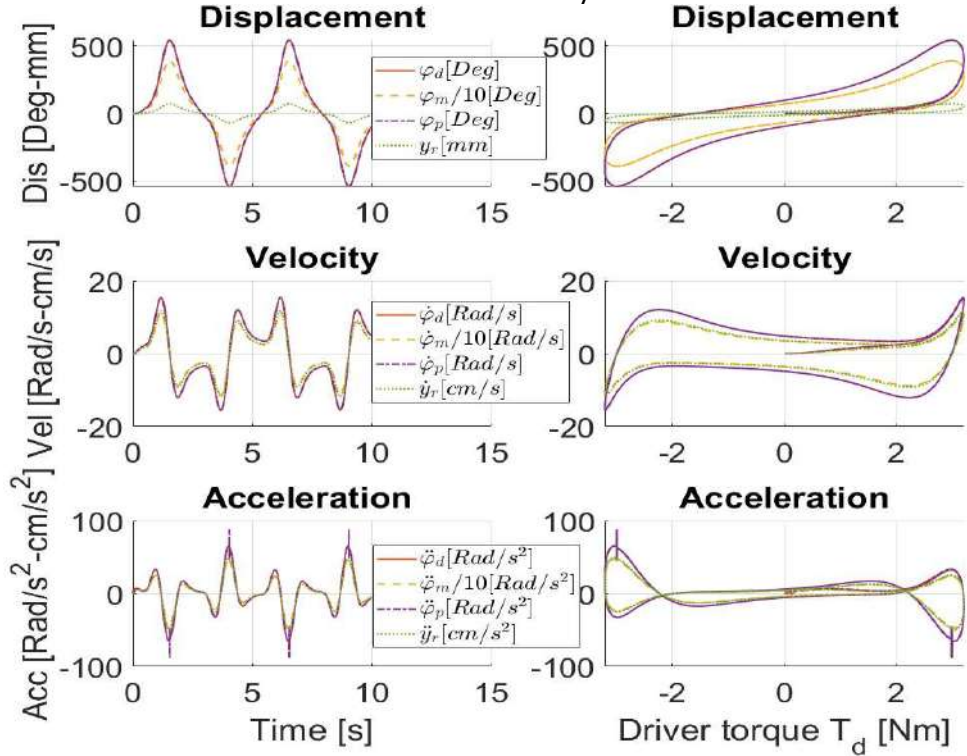
4.1.1. Cụm trực lái, động cơ trợ lực đến thanh răng

4.1.1.1. Kích bản 1 $T_d = 3.2 \sin(\frac{2\pi}{5}t) Nm$; ($f = 0.2 Hz$)

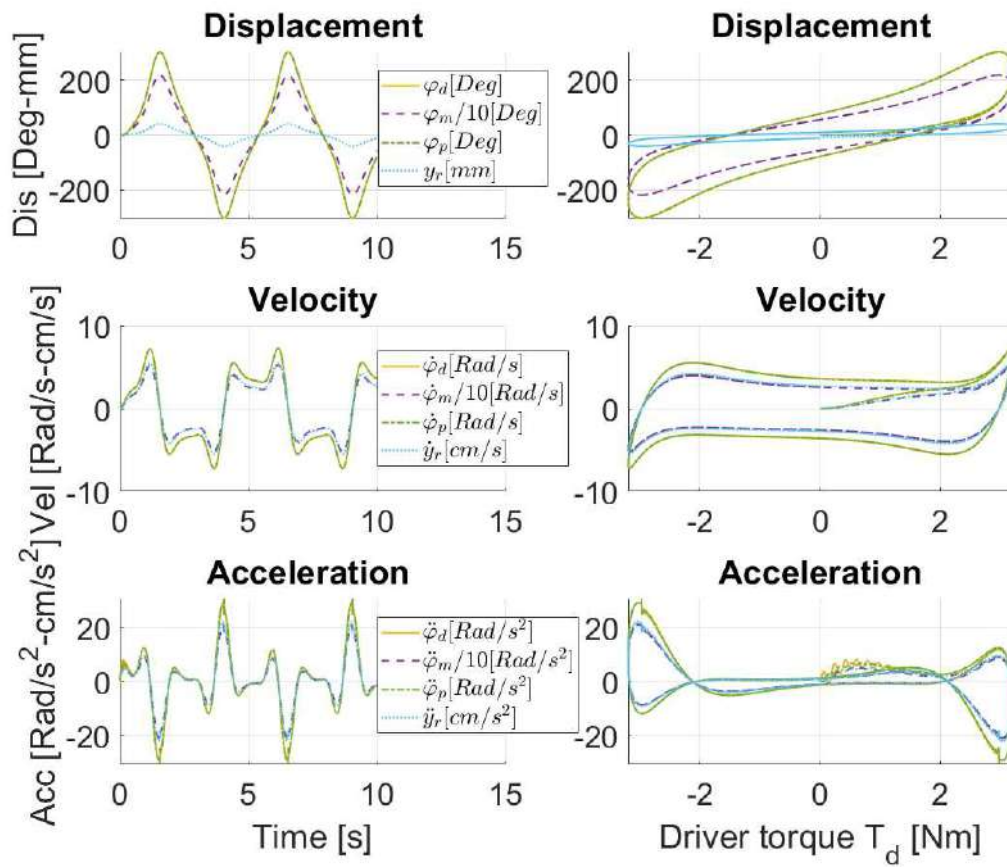
Kết quả mô phỏng tại các vận tốc $v = [0; 10; 100; 150] km/h$.



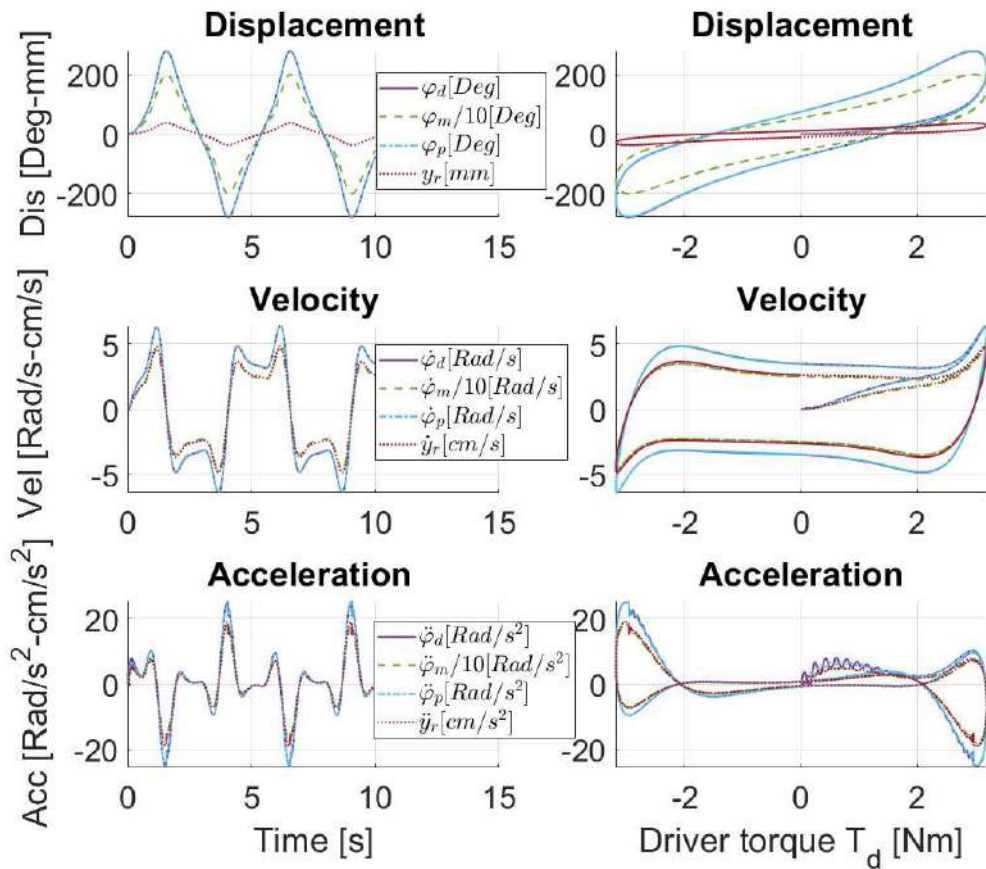
$v = 0 km/h$



$v = 10 km/h$



$v = 100\text{km/h}$

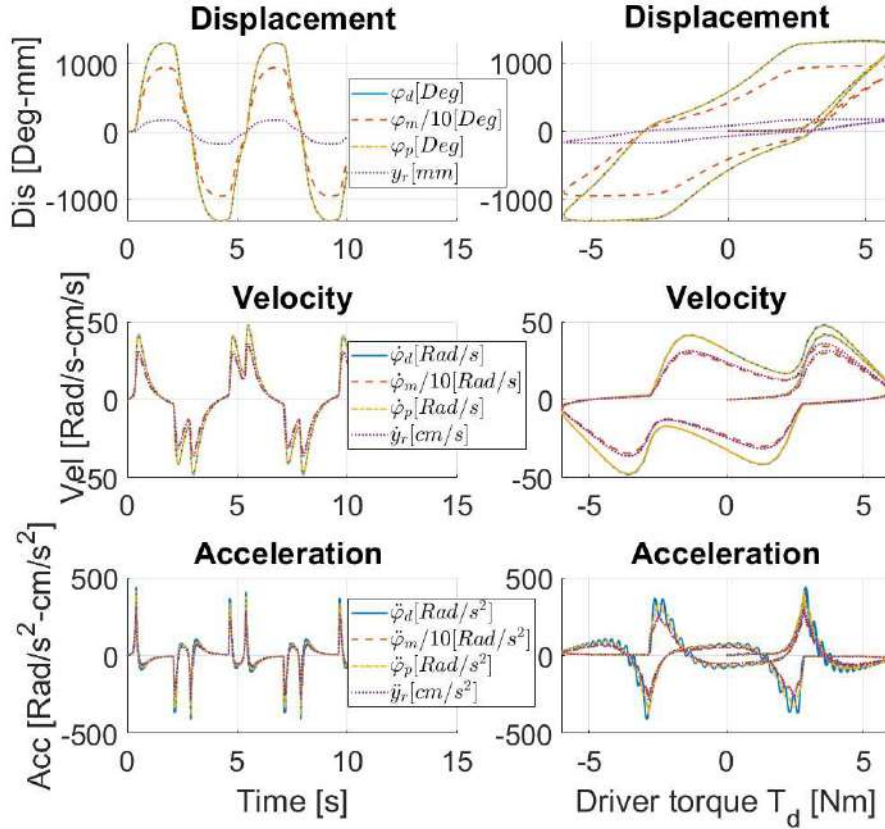
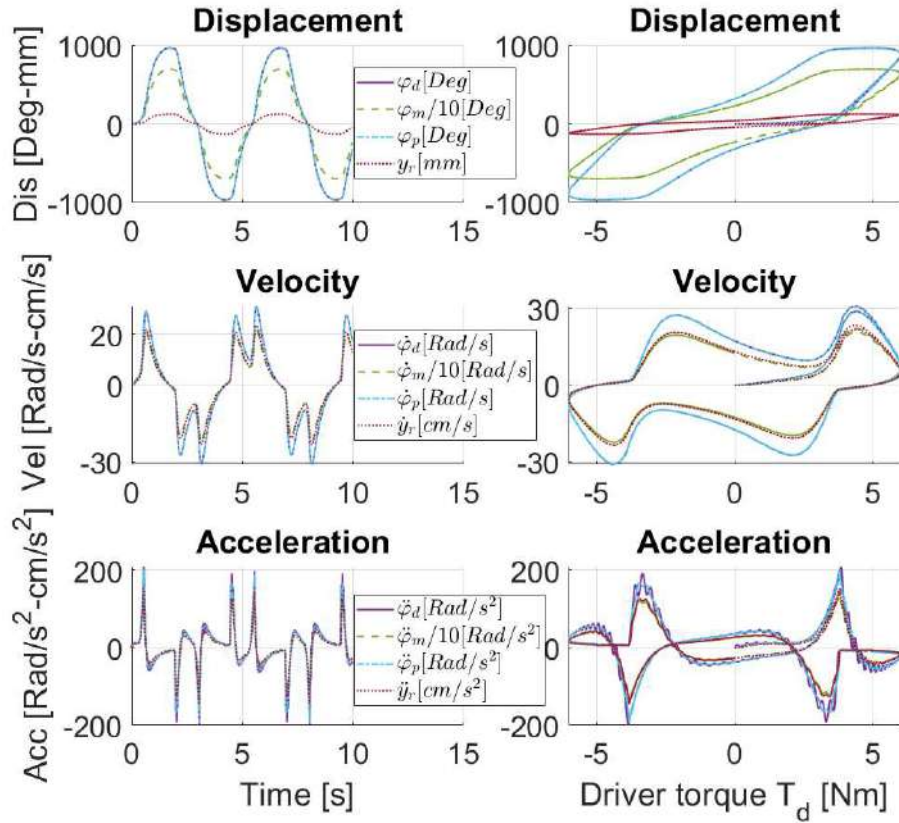


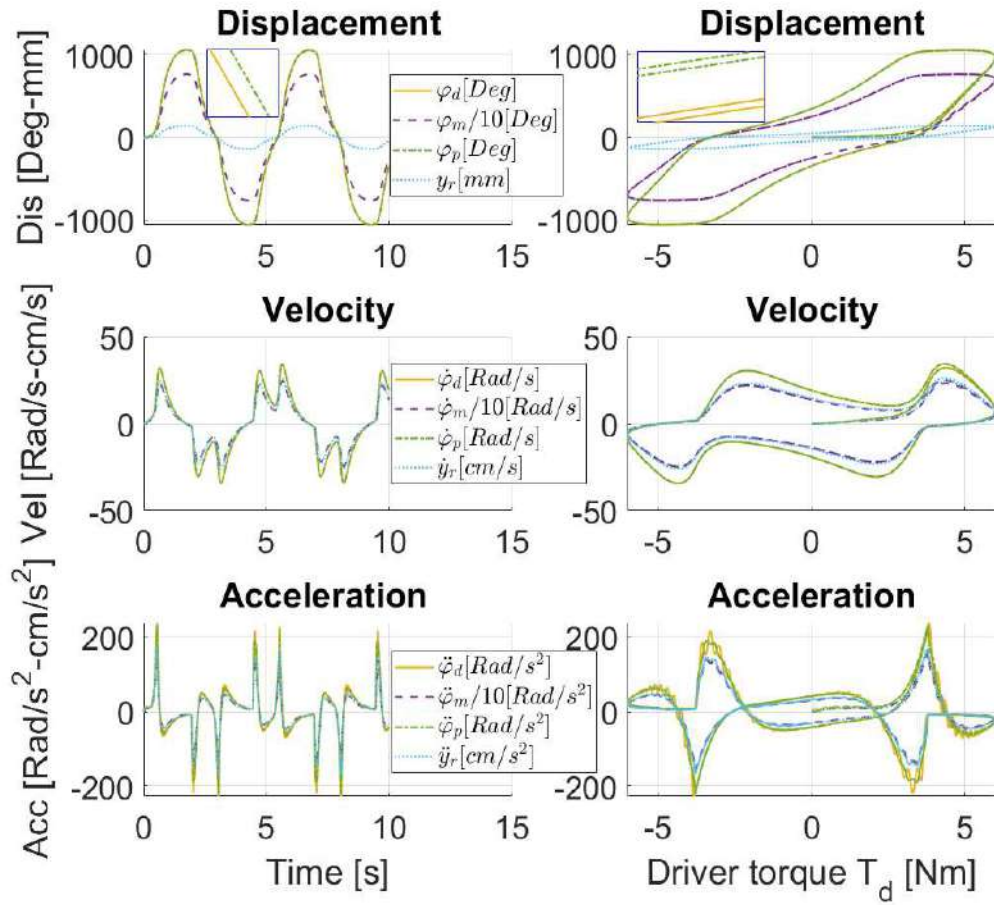
$v = 150\text{km/h}$

Hình PL4.1. KQMP ĐLH EPS $T_d = 3.2\sin(\frac{2\pi}{5}t)\text{Nm}$; ($f = 0.2\text{Hz}$);

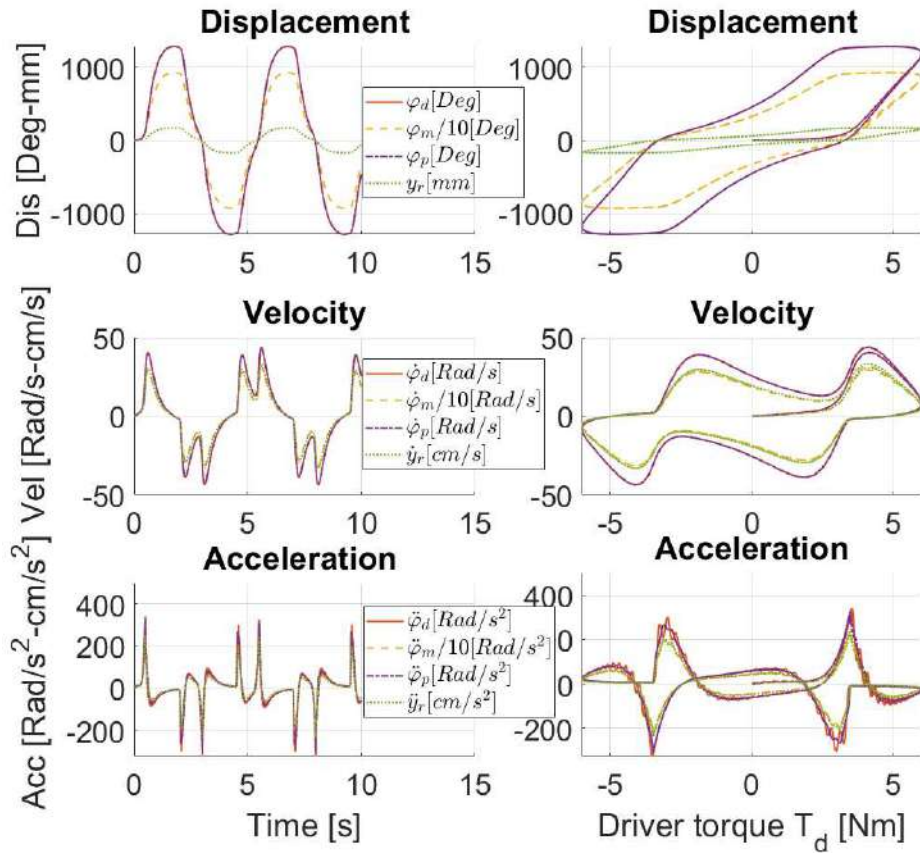
4.1.1.2. Kích bản $2 T_d = 6 \sin(\frac{2\pi}{5}t) Nm$; ($f = 0.2 Hz$)²

Kết quả mô phỏng tại các vận tốc $v = [0; 10; 100; 150] km/h$.





$v = 100 \text{ km/h}$

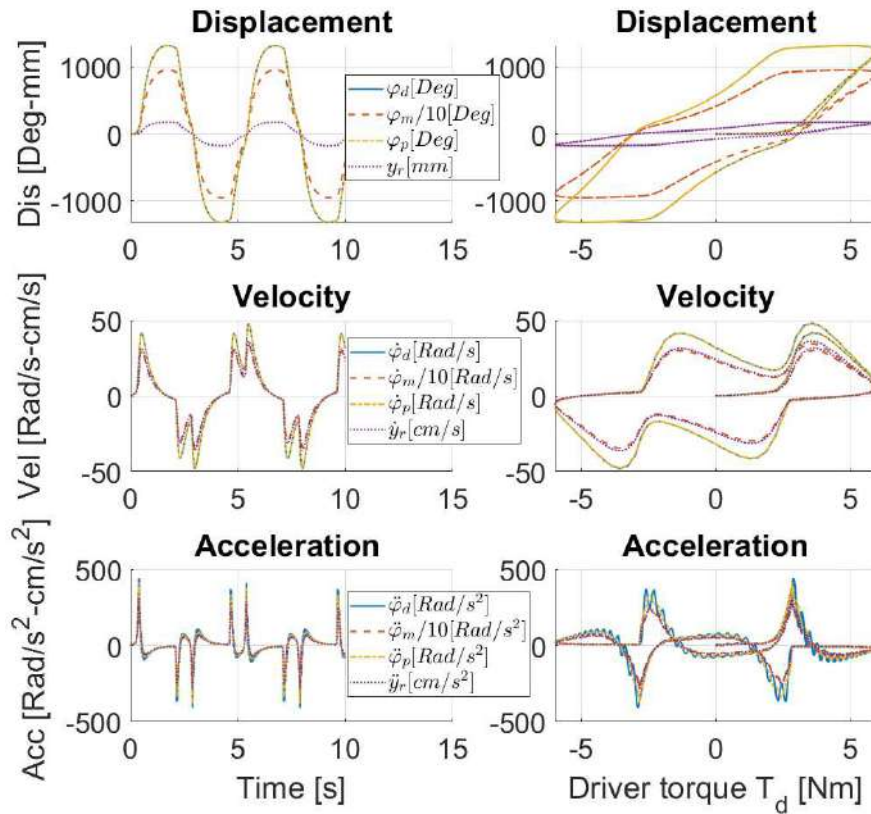


$v = 150 \text{ km/h}$

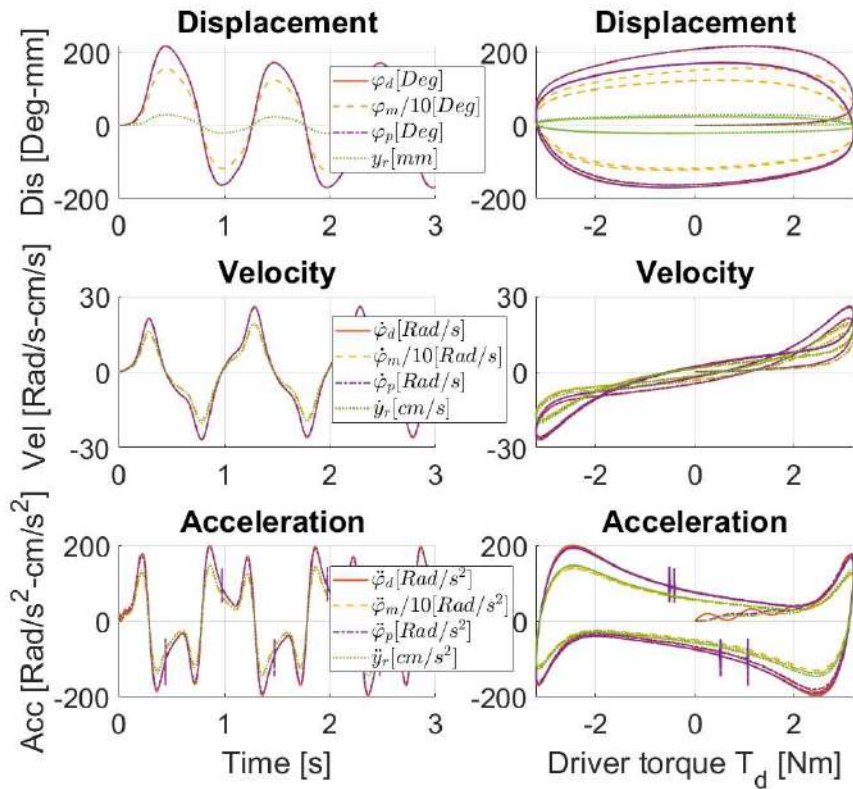
Hình PL4.2. KQMP ĐLH EPS $T_d = 6\sin(\frac{2\pi}{5}t) \text{ Nm}$; ($f = 0.2 \text{ Hz}$);

4.1.1.3. Kích bản 3 $T_d = 3.2 \sin(2\pi t) \text{ Nm}$; ($f = 1 \text{ Hz}$)

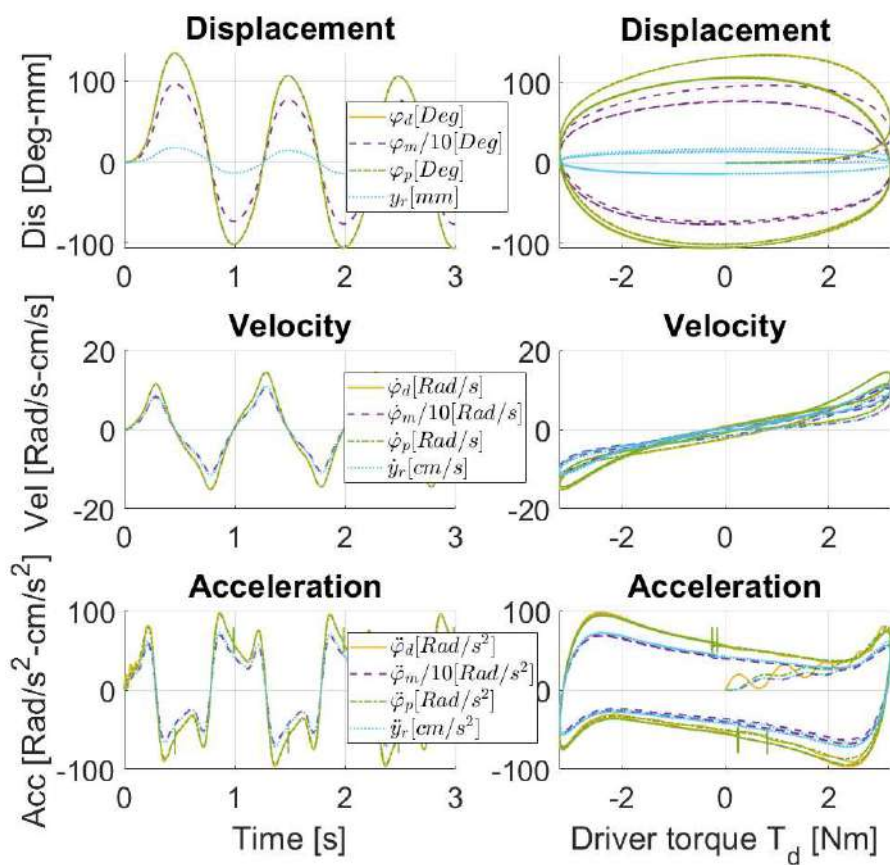
Kết quả mô phỏng tại các vận tốc $v = [0; 10; 100; 150] \text{ km/h}$.



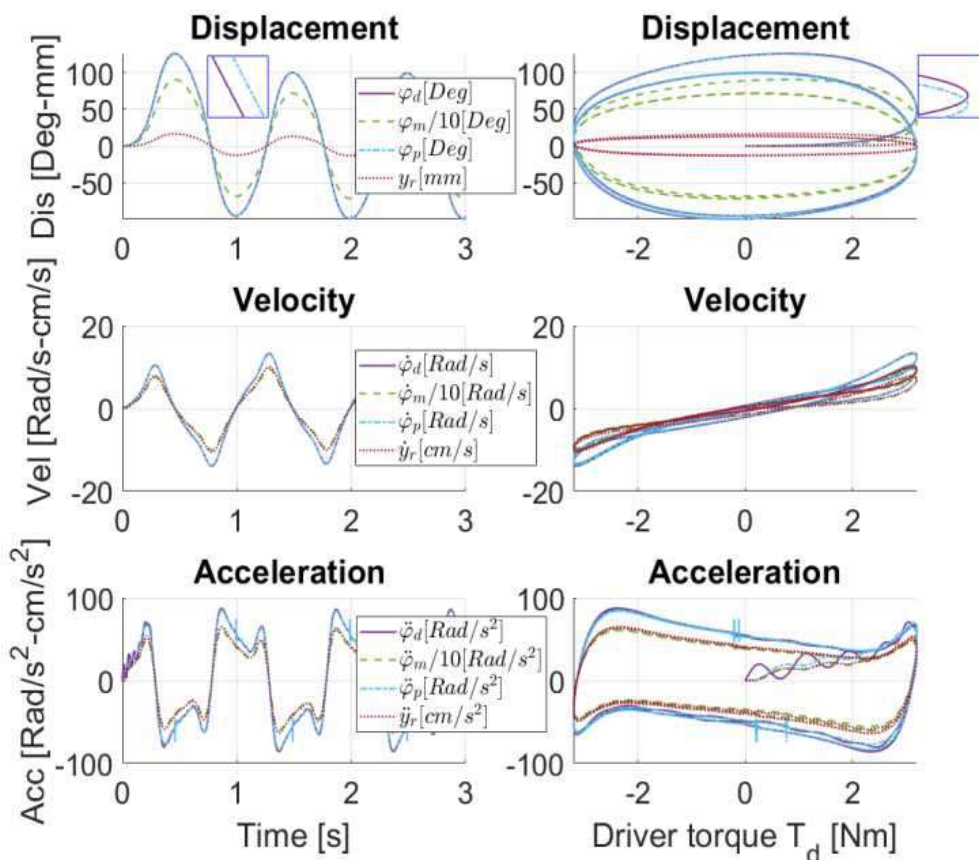
$v = 0 \text{ km/h}$



$v = 10 \text{ km/h}$



$v = 100\text{km/h}$



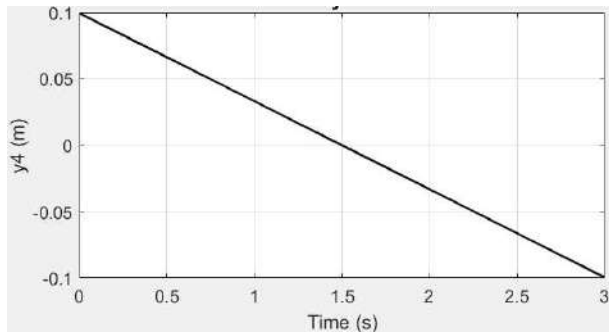
$v = 150\text{km/h}$

Hình PL4.3. KQMP ĐLH EPS $T_d = 3.2\sin(2\pi t)\text{Nm}$; ($f = 1\text{Hz}$);

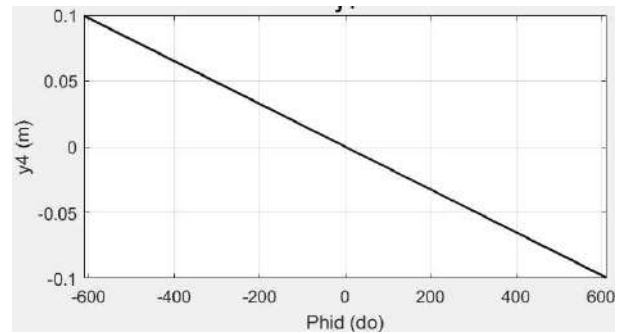
4.1.2. Cụm hình thang lái Ackermann

4.1.2.1. Động học hình thang lái Ackermann

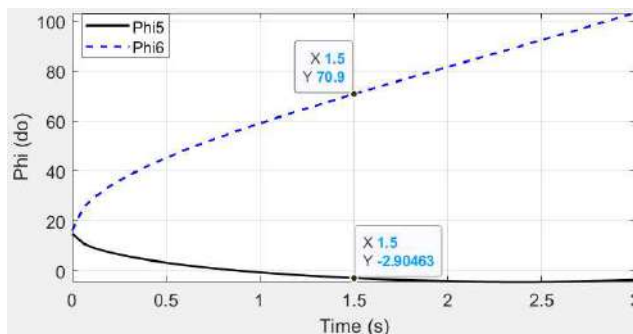
KQMP khảo sát động học hình thang lái khi góc lái tăng dần đều $\varphi_d = 0^\circ \div \pm 612^\circ$ ($\pm 1,7$ vòng về hai phía) như Hình PL4.4 đến Hình PL4.17.



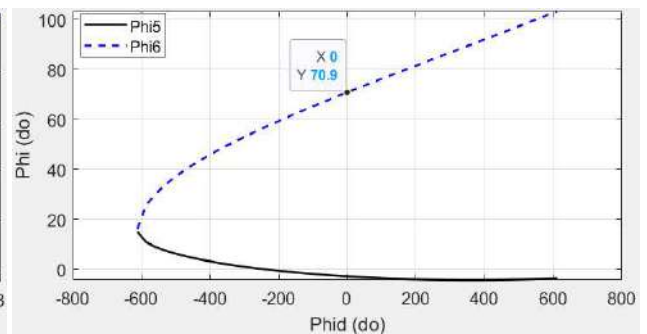
Hình PL4.4. Biến thiên của y_r theo thời gian



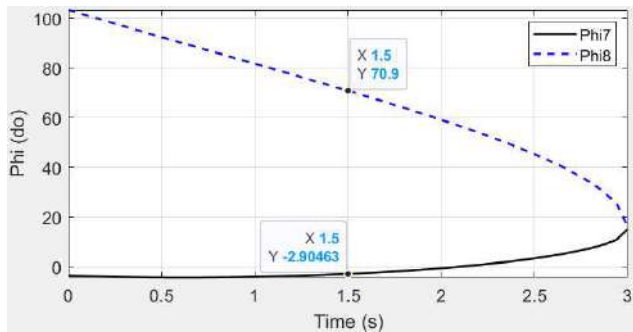
Hình PL4.5. Biến thiên của y_r theo φ_d



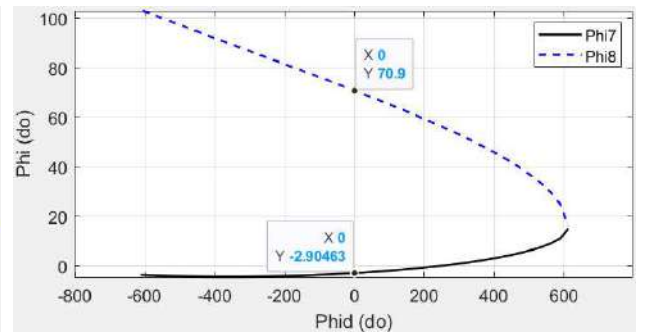
Hình PL4.6. Biến thiên φ_5, φ_6 theo thời gian



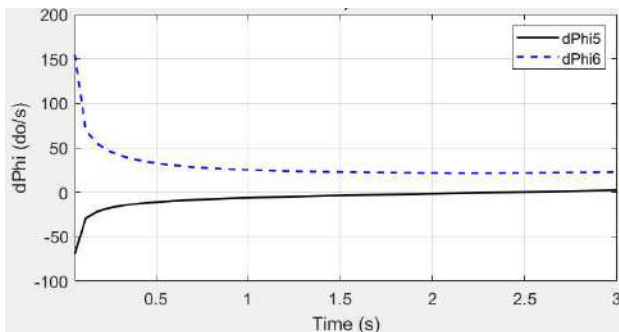
Hình PL4.7. Biến thiên φ_6, φ_6 theo φ_d



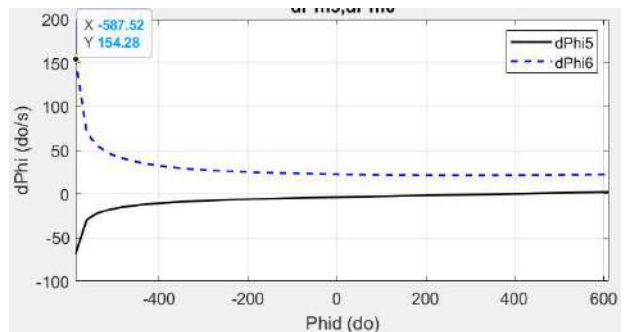
Hình PL4.8. Biến thiên φ_7, φ_8 theo thời gian



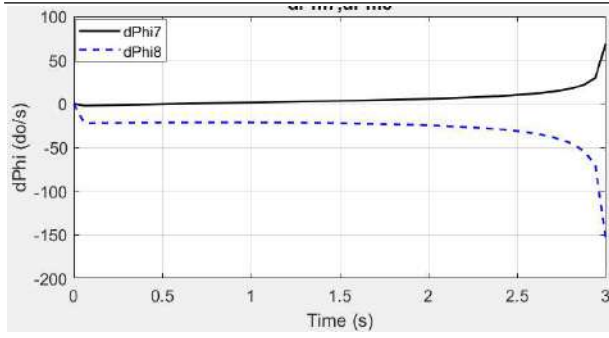
Hình PL4.9. Biến thiên của φ_7, φ_8 theo φ_d



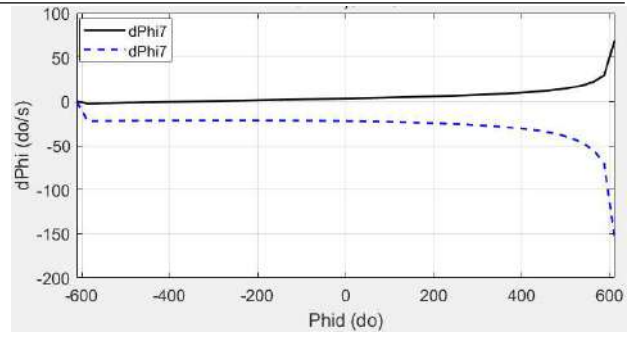
Hình PL4.10. Biến thiên $\dot{\varphi}_5, \dot{\varphi}_6$ theo thời gian



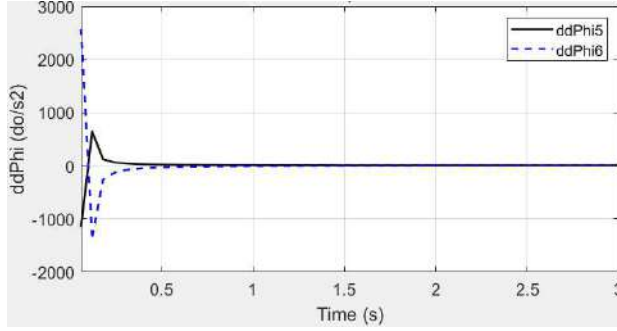
Hình PL4.11. Biến thiên $\dot{\varphi}_5, \dot{\varphi}_6$ theo φ_d



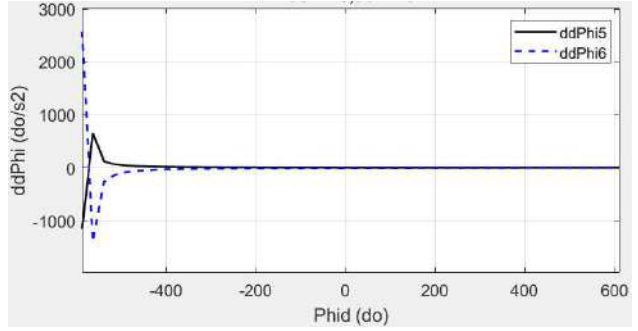
Hình PL4.12. Biến thiên $\dot{\varphi}_7, \dot{\varphi}_8$ theo thời gian



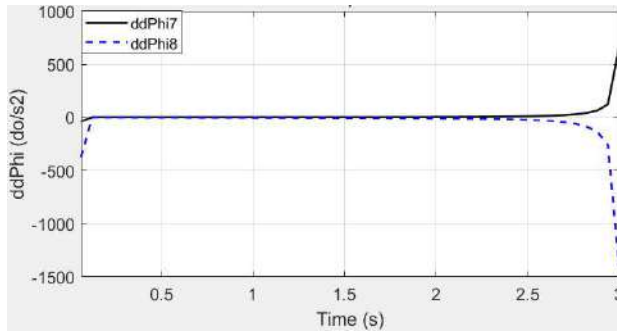
Hình PL4.13. Biến thiên $\dot{\varphi}_7, \dot{\varphi}_8$ theo φ_d



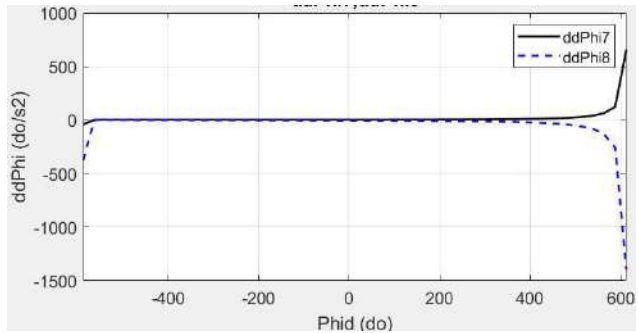
Hình PL4.14. Biến thiên $\ddot{\varphi}_5, \ddot{\varphi}_6$ theo thời gian



Hình PL4.15. Biến thiên $\ddot{\varphi}_5, \ddot{\varphi}_6$ theo φ_d



Hình PL4.16. Biến thiên $\ddot{\varphi}_7, \ddot{\varphi}_8$ theo thời gian



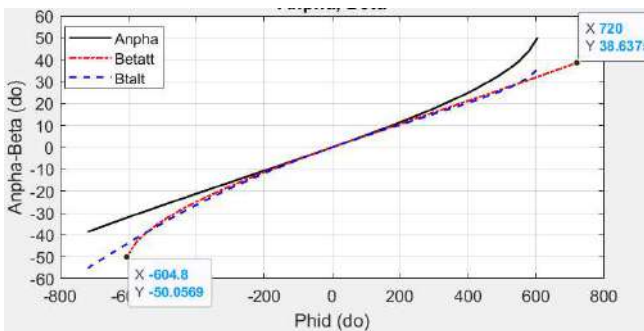
Hình PL4.17. Biến thiên $\ddot{\varphi}_7, \ddot{\varphi}_8$ theo φ_d

Nhận xét: Từ Hình PL4.4 đến PL4.17 cho thấy khi $|\varphi_d| > 600^\circ$ thì $\varphi_5 \approx \varphi_6$ (hoặc $\varphi_7 \approx \varphi_8$) có nghĩa hình thang lái sát gần điểm giới hạn (l_5, l_6 thẳng hàng hoặc l_7, l_8 thẳng hàng). Từ Hình PL4.10 đến Hình PL4.17 cho thấy khi gần đến điểm giới hạn, vận tốc và gia tốc góc của các thanh l_5, l_6, l_7, l_8 tăng lên rất nhanh và có giá trị rất lớn.

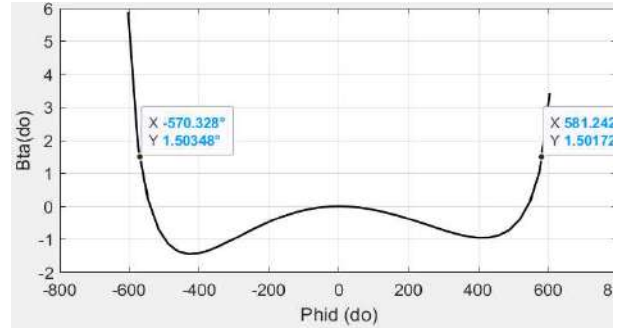
Ghi chú trong hình: Phi- φ , dPhi- $\dot{\varphi}$, ddPhi- $\ddot{\varphi}$, $y_4 - y_7$.

4.1.2.2. KQMP đặc tính động học quay vòng bánh xe dẫn hướng

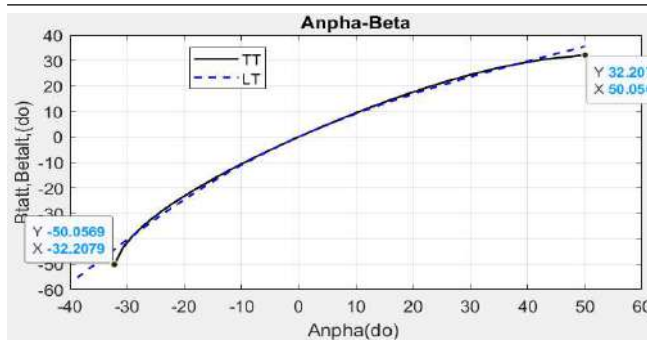
KQMP động học quay vòng bánh xe dẫn hướng như Hình PL4.18 đến Hình PL4.25.



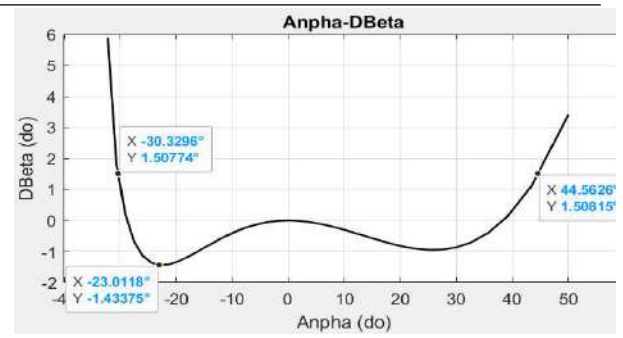
Hình PL4.18. Biến thiên δ_2, δ_{1tt} và δ_{1lt} theo φ_d



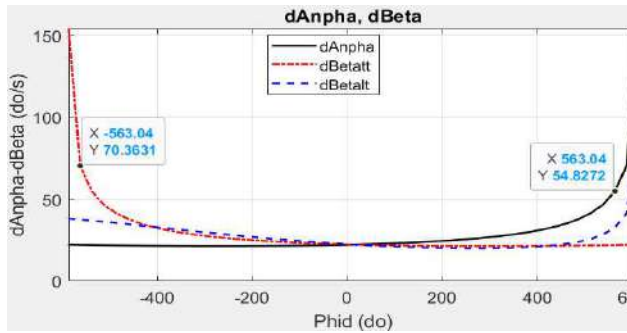
Hình PL4.19. Độ lệch $\Delta\delta_1$ theo φ_d



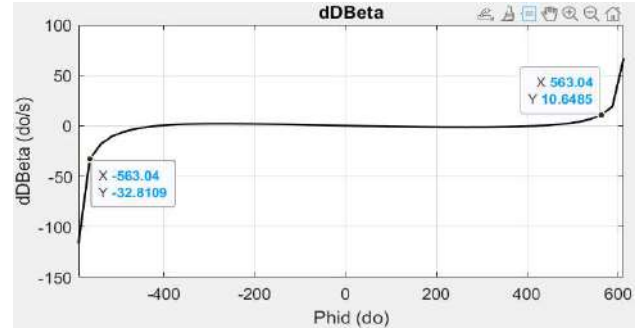
Hình PL4.20. Biến thiên δ_{1tt} và δ_{1lt} theo δ_2



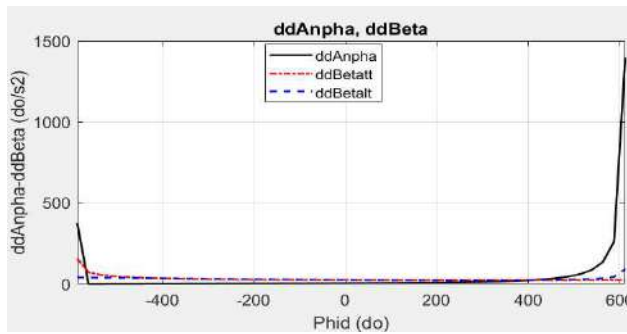
Hình PL4.21. Độ lệch $\Delta\delta_1$ theo δ_2



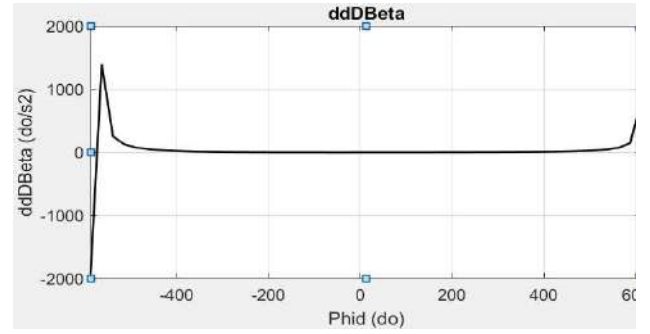
Hình PL4.22. Biến thiên $\dot{\delta}_2, \dot{\delta}_{1lt}, \dot{\delta}_{1tt}$ theo φ_d



Hình PL4.23. Biến thiên $\Delta\dot{\delta}_1$ theo φ_d

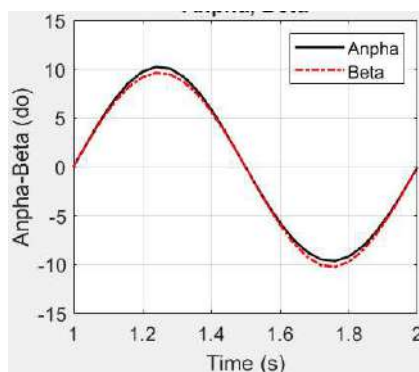


Hình PL4.24. Biến thiên $\ddot{\delta}_2, \ddot{\delta}_{1lt}, \ddot{\delta}_{1tt}$ theo φ_d

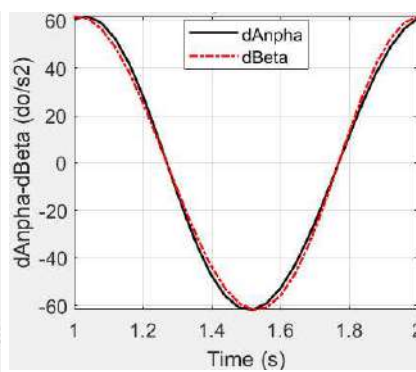


Hình PL4.25. Biến thiên $\Delta\ddot{\delta}_1$ theo φ_d

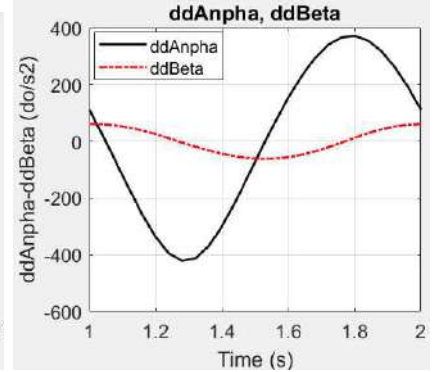
KQMP khảo sát động học quay vòng của bánh xe dẫn hướng khi góc lái hình sin như Hình PL4.26 đến Hình PL4.28.



Hình PL4.26. Góc δ_1, δ_2



Hình PL4.27. Vận tốc góc $\dot{\delta}_1, \dot{\delta}_2$



Hình PL4.28. Gia tốc góc $\ddot{\delta}_1, \ddot{\delta}_2$

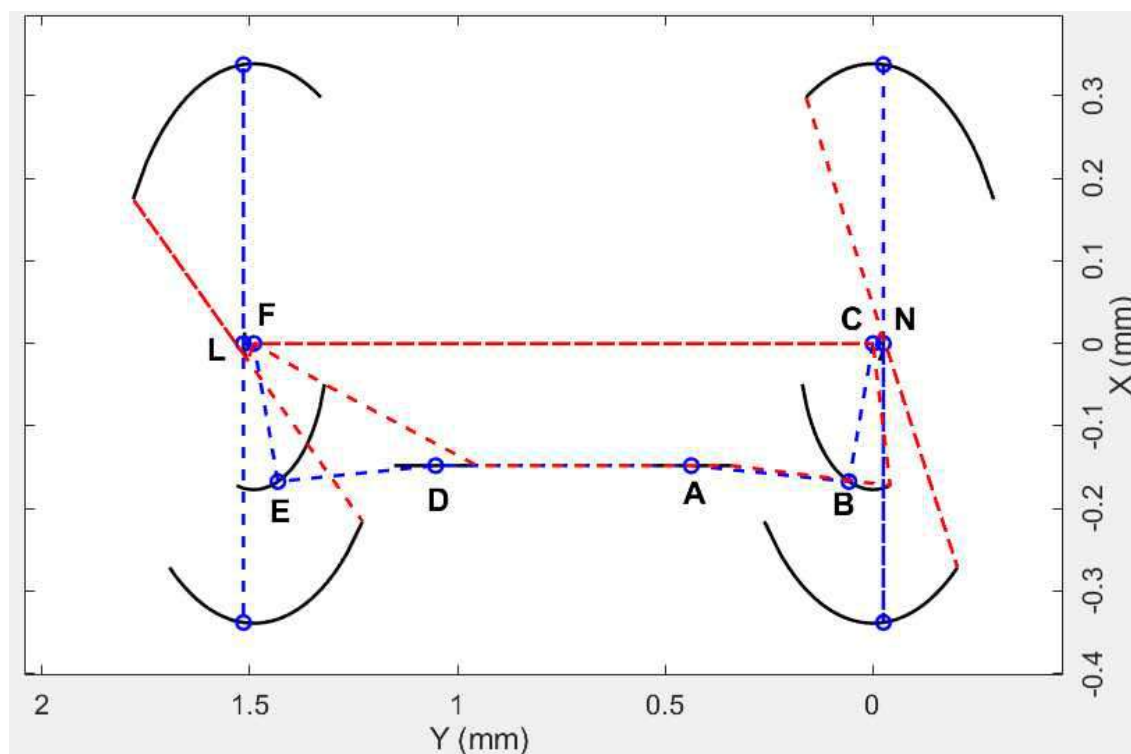
Nhận xét: Từ Hình PL4.18 đến Hình PL4.28, có thể thấy: Giới hạn (điểm chết) góc quay bánh xe dẫn hướng phía trong và phía ngoài là $50,0569^\circ/32,2079^\circ$, ứng với góc lái là $604,8^\circ$. Khi góc quay bánh xe dẫn hướng phía trong từ $0^\circ \div 44^\circ$ (ứng với $\varphi_d = 0^\circ \div 570^\circ$) thì góc lệch $\Delta\delta_1 = |\delta_{1lt} - \delta_{1tt}| < 1,5^\circ$, nếu tiếp tục tăng φ_d , thì $\Delta\delta_1 > 1,5^\circ$ và tăng

rất nhanh, lúc này hệ thống lái không đáp ứng yêu cầu động học quay vòng đúng của ô tô, vì vậy với hệ thống lái này cần có bộ phận hạn chế hành trình để giới hạn góc quay ra phía ngoài của bánh xe dẫn hướng không quá 44° trong quá trình làm việc. Điều này vẫn thỏa mãn được yêu cầu thiết kế hình thang lái đảm bảo góc quay lớn nhất của bánh xe dẫn hướng đạt $40^\circ \div 45^\circ$.

Ghi chú trong hình: $Beta - \Delta\delta_1$, $Betalt - \delta_{1lt}$, $Betatt - \delta_{1tt}$, $Anpha - \delta_2$.

4.1.2.3. KQMP quỹ đạo hệ thống lái

KQMP quỹ đạo chuyển động thực của các khâu, khớp và các bánh xe dẫn hướng như Hình PL4.29.



Hình PL4.29. Quỹ đạo chuyển động của các khâu, khớp hình thang lái

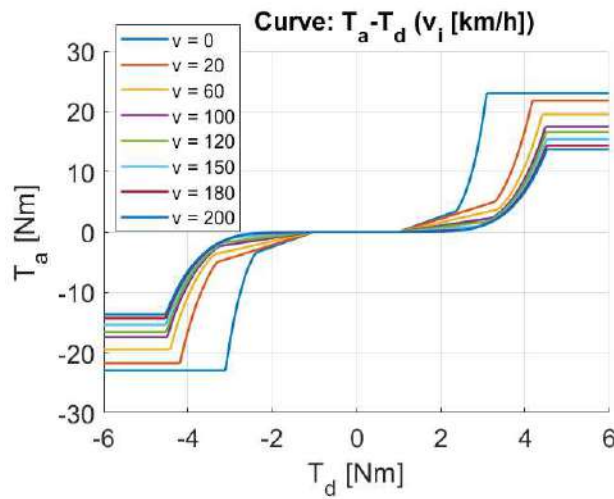
Nhận xét: Từ Hình PL4.29 ta có thể xác định được quỹ đạo chuyển động và vị trí của các khâu, khớp và bánh xe dẫn hướng trong hệ thống lái. Kết quả cho thấy kích thước và bố trí của hình thang lái là hợp lý, không gian chiếm chỗ nhỏ, các khâu khớp không bị va chạm khi chuyển động trong giới hạn góc quay của bánh xe dẫn hướng.

4.2. MÔ PHỎNG ĐẶC TÍNH TRỢ LỰC LÁI THEO ĐẶC ĐIỂM PHONG CÁCH LÁI

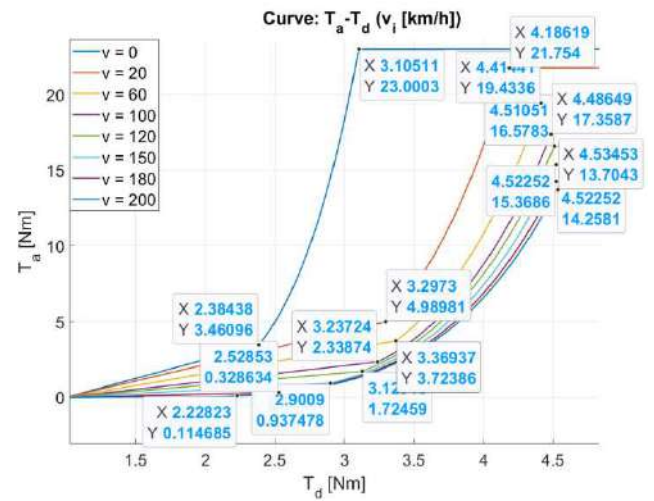
Mô phỏng và đánh giá kết quả đặc tính trợ lực theo đặc điểm phong cách lái đối với “Đặc tính trợ lực hỗn hợp”.

4.2.1. Phong cách lái thoải mái/Comfortable driving style

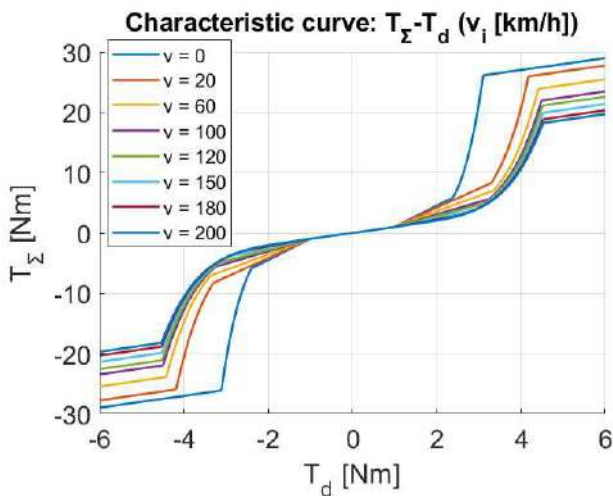
KQMP phong cách lái thoải mái được thể hiện như Hình PL4.30.



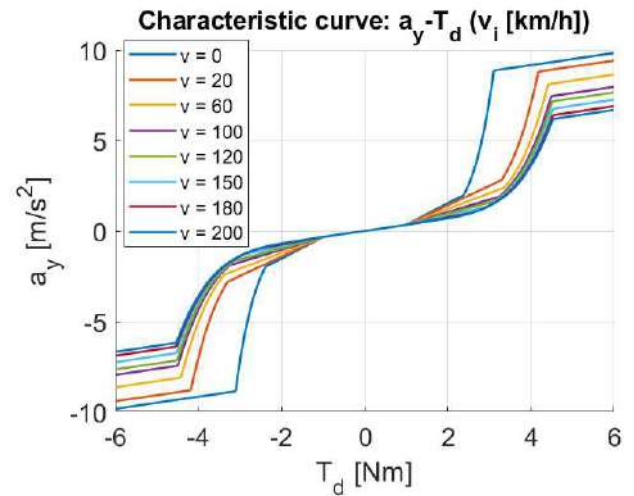
1. Đặc tính T_a-T_d



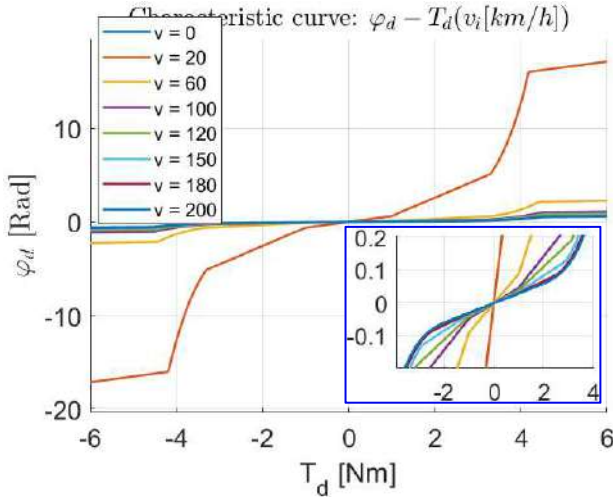
2. Giá trị đặc tính T_a-T_d



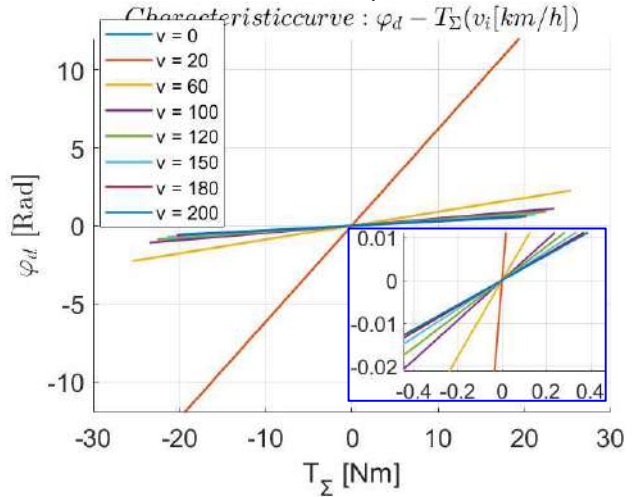
3. Đặc tính $T_\Sigma-T_d$



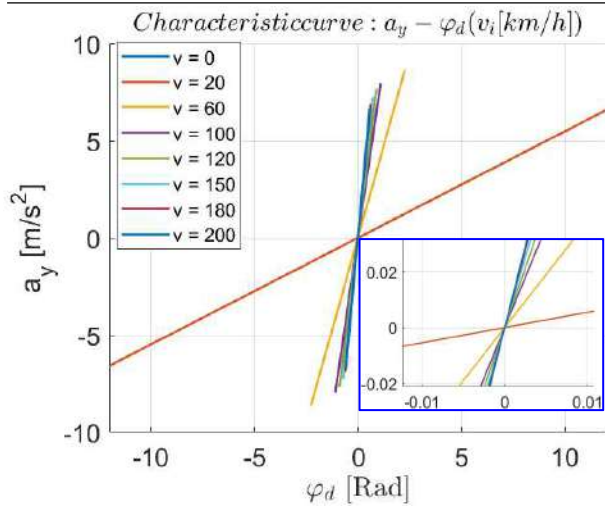
4. Đặc tính a_y-T_d



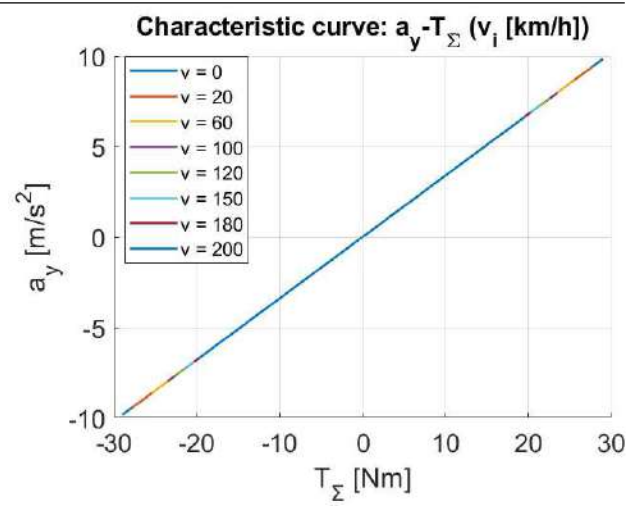
5. Đặc tính φ_d-T_d



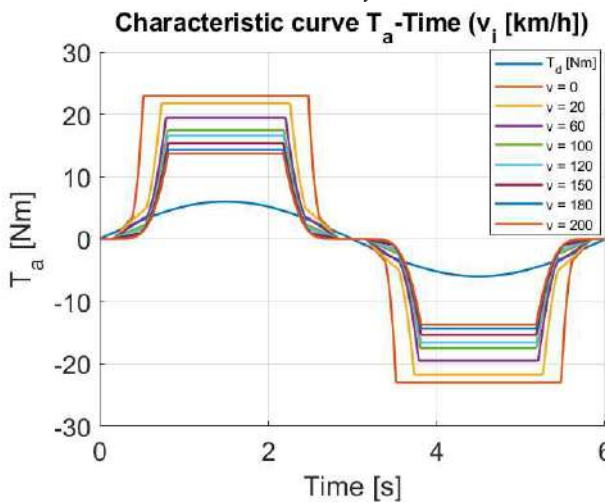
6. Đặc tính φ_d-T_Σ



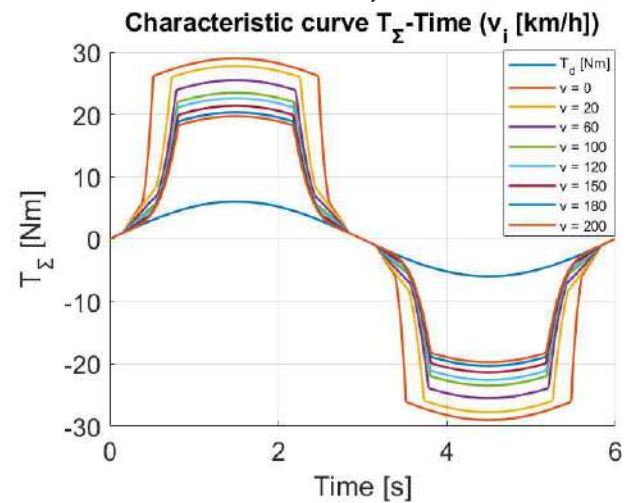
7. Đặc tính a_y - φ_d



8. Đặc tính a_y - T_Σ



9. Đặc tính T_a -time đầu vào sin



1. Đặc tính T_Σ -time đầu vào sin

Hình PL4.30. Trường hợp 1: Phong cách lái thoải mái

Từ kết quả mô phỏng như Hình PL4.30, cho thấy:

(1) Các yêu cầu về nguyên tắc xây dựng đặc tính trợ lực của **Trường hợp 1 “Phong cách lái thoải mái”** đã được thực hiện, cụ thể:

- Từ Hình PL4.30.1 và Hình PL4.30.2, khi $|T_d| < 1.0 Nm$ thì $T_a = 0$ (động cơ trợ lực chưa được kích hoạt);

- Khi $|T_d| \geq 1.0 Nm$, mô men trợ lực ban đầu tăng tuyến tính $T_a = K_v T_d^*$ theo mô men lái T_d , khi chạm đến giao điểm giữa đường tuyến tính và đường cong phi tuyến, thì tăng theo đường phi tuyến $T_a = K_T K_a |T_d^*|^n$. Ứng với các vận tốc $v = [0, 20, 60, 100, 120, 150, 180, 200] km/h$, các điểm chuyển tiếp tương ứng là $T_d = \pm [2.38, 3.30, 3.37, 3.24, 3.12, 2.90, 2.53, 2.23]$ và $T_a = [3.46, 4.99, 3.72, 2.34, 1.72, 0.94, 0.33, 0.11]$. Do đó mô men trợ lực không quá lớn khi mô men lái còn nhỏ để đảm bảo cảm giác đường của người lái, khi qua điểm chuyển tiếp thì T_a tăng nhanh, cung cấp mô men trợ lực lớn cho hệ thống lái, điều này đảm bảo cảm giác lái nhất quán với sức cản mặt đường, đồng thời người lái sẽ có cảm giác lái nhẹ nhàng thoải mái.

- Khi mô men lái đạt đến giá trị lớn nhất $T_d = T_{dmax}$, tương ứng ở các vận tốc $v = [0, 20, 60, 100, 120, 150, 180, 200] km/h$, khi mô men lái $T_d = T_{dmax}(v_i) = [3.10, 4.19, 4.41, 4.49, 4.51, 4.52, 4.52, 4.53]$ thì mô men trợ lực T_a đạt giá trị bão hòa

$T_{amax} = K(v_i)T_{dmax}^* = [23.00, 21.75, 19.43, 17.36, 16.58, 15.37, 14.26, 13.70]$, đồng thời T_a sẽ không tăng thêm ngay cả khi T_d tiếp tục tăng.

(2) Từ Hình PL4.30.1 đến Hình PL4.30.3, cho thấy:

- Khi người lái tác dụng mô men lái T_d tăng dần, mô men trợ lực T_a tăng dần, gia tốc ngang của phương tiện (tức cường độ quay vòng) cũng tăng dần;

- Ứng với các vận tốc khác nhau, khi tác dụng cùng một giá trị độ lớn mô men lái thì phản ứng gia tốc ngang cũng khác nhau, mức độ phản ứng của gia tốc ngang giảm dần khi vận tốc tăng, hay nói cách khác để tạo được cùng một giá trị độ lớn gia tốc ngang ở vận tốc càng cao thì cần tác dụng mô men lái càng lớn, điều này sẽ làm cho người lái có cảm giác tay lái nặng hơn ở vận tốc cao, từ đó tăng tính an toàn khi điều khiển ô tô ở vận tốc cao;

- Tương tự, đối với đặc tính giữa góc lái với mô men tổng cộng tác dụng lên trục răng (pinion) như Hình PL4.30.4 và đặc tính giữa góc lái với gia tốc ngang như Hình PL4.30.5, cho thấy cùng một góc lái, ứng với vận tốc ô tô tăng dần, thì mô men trợ lực và mô men tổng cộng giảm dần, do đó gia tốc ngang giảm dần (cường độ quay vòng giảm).

(3) Từ Hình PL4.30.6 và Hình PL4.30.7 đặc tính $a_y - T_\Sigma$ và $\varphi_d - T_d$ là tuyến tính không phụ thuộc vào vận tốc ô tô, điều này đảm bảo cho cảm giác lái là nhất quán;

(4) Như Hình PL4.30.8 và Hình PL4.30.9 là phản ứng của mô men trợ lực và mô men tổng khi đánh lái hình sin, kết quả cũng cho thấy các nguyên tắc định ra đều được thực hiện.

(5) Các Hình PL4.30.1 đến Hình PL4.30.4 cho thấy rằng khi người lái tăng dần mô men lái T_d , mô men trợ lực T_a và tổng mô men tại cơ cấu lái T_Σ tăng tương ứng. Sự gia tăng này trực tiếp làm tăng gia tốc ngang của xe, qua đó cải thiện đáp ứng quay vòng (yaw response). Điều này chứng minh mối liên hệ chặt chẽ và nhất quán giữa tín hiệu vào của người lái, hệ thống trợ lực và động học chuyển động ngang của xe.

(6) Các Hình PL4.30.4 và Hình PL4.30.5 mô tả mối quan hệ giữa mô men lái - gia tốc ngang ($a_y - T_d$) và mô men lái - góc lái ($\varphi_d - T_d$) tại các tốc độ khác nhau. Với cùng một giá trị mô men lái, cả gia tốc ngang và góc lái đều giảm khi tốc độ tăng. Điều này cho thấy tại vận tốc cao, để đạt cùng mức phản ứng động học ngang, người lái phải tác dụng mô men lái lớn hơn. Hệ quả trực tiếp là cảm giác lái trở nên nặng và chắc hơn ở tốc độ cao, phù hợp với mục tiêu tăng cường độ ổn định và an toàn vận hành.

(7) Phân tích các Hình PL4.30.6 và Hình PL4.30.7 cho thấy mối quan hệ giữa góc lái - tổng mô men ($\varphi_d - T_\Sigma$) và giữa góc lái - gia tốc ngang ($a_y - \varphi_d$). Tại một tốc độ không đổi, đặc tính $\varphi_d - T_\Sigma$ có là tuyến tính, đảm bảo tính đồng nhất của cảm giác lái. Tuy nhiên, khi tốc độ xe tăng, độ dốc của đường đặc tính này giảm đáng kể, chứng tỏ yêu cầu mô men lái lớn hơn để đạt cùng một góc lái. Điều này tạo ra phản hồi lực lái rõ rệt và chắc chắn hơn ở vận tốc cao, góp phần nâng cao ổn định hướng. Ngược lại, đường đặc tính ($a_y - \varphi_d$) trở nên dốc hơn khi tốc độ tăng, cho thấy gia tốc ngang nhạy hơn với góc lái. Vì vậy, việc tăng lực cản đánh lái ở tốc độ cao là cần thiết để hạn chế góc lái quá lớn, từ đó cải thiện khả năng kiểm soát xe trong các tình huống chuyển động vận tốc cao.

(8) Kết quả như Hình PL4.30.8 cho thấy mối quan hệ giữa tổng mô men tại cơ cấu lái và gia tốc ngang ($a_y - T_\Sigma$) là tuyến tính và không phụ thuộc vào tốc độ xe. Đặc tính này đảm bảo tính nhất quán của cảm giác lái trong toàn bộ dải vận tốc, đồng thời phản ánh sự

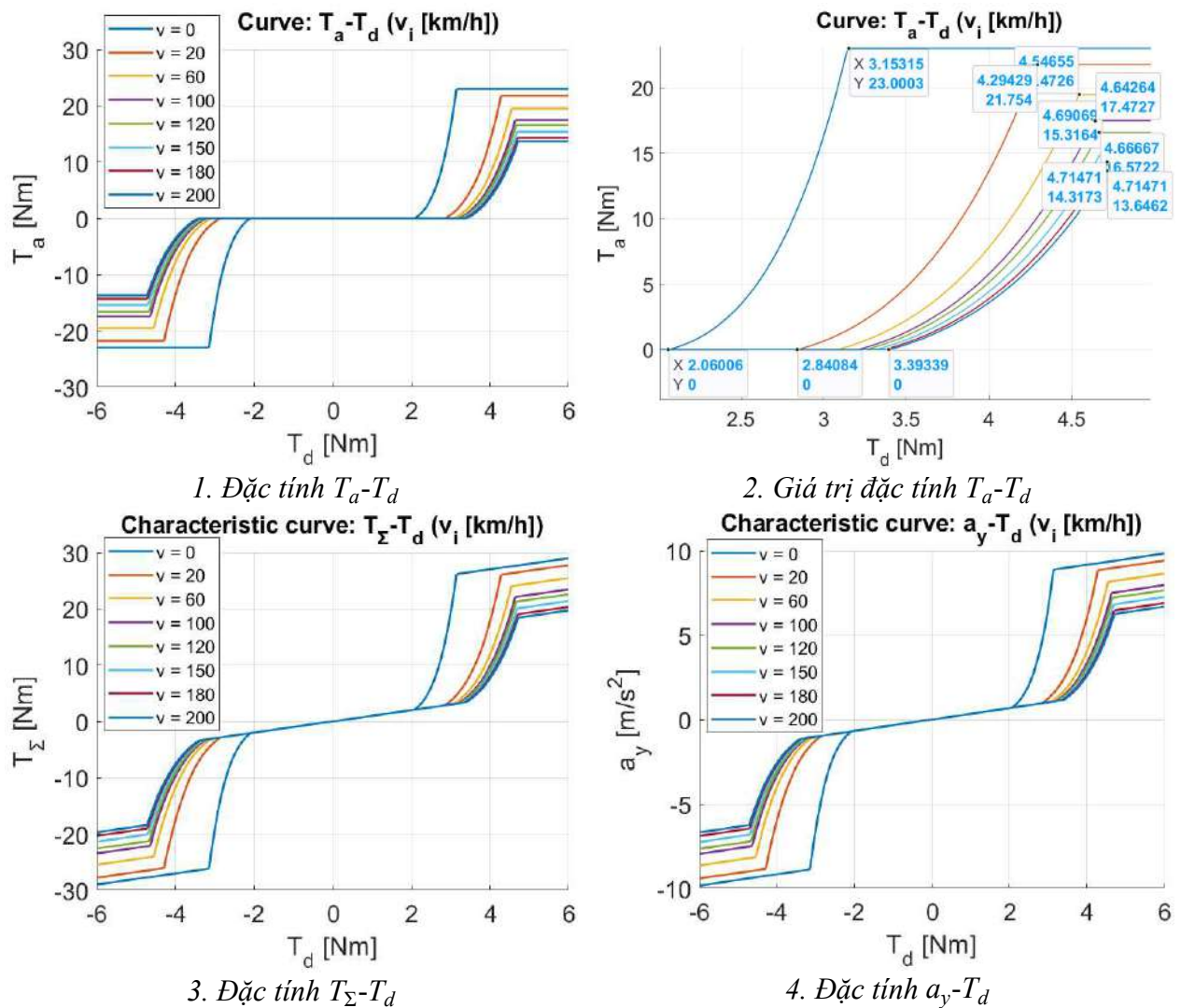
phối hợp hợp lý giữa hệ thống trợ lực và động học ngang của xe.

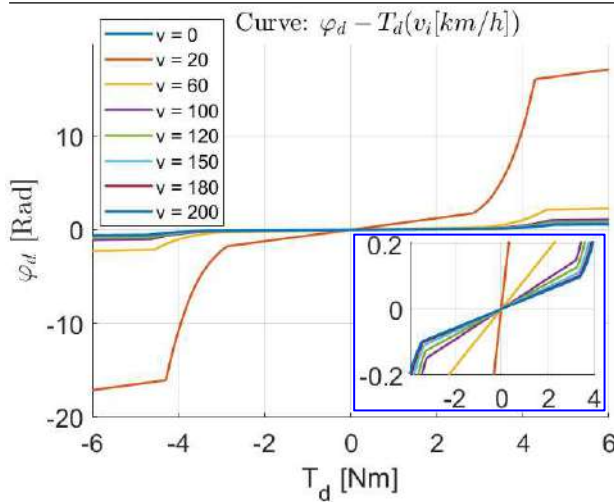
(9) Các Hình PL4.30.9 và Hình PL4.30.10 trình bày đáp ứng của mô men trợ lực và tổng mô men trong điều kiện tác động tín hiệu đánh lái dạng hình sin. Kết quả thu được cho thấy hệ thống phản ứng ổn định, liên tục và không xuất hiện các hiện tượng phi tuyến bất lợi, qua đó khẳng định rằng các nguyên lý thiết kế đã đề xuất được triển khai đúng đắn và hiệu quả.

Như vậy với đặc tính trợ lực này, động cơ trợ lực được kích hoạt sớm và ứng với các vận tốc khác nhau thì mô men lái T_{dmax} duy trì trong khoảng $[3.10 \div 4.52]$ mô men trợ lực T_a đã đạt giá trị lớn nhất, do đó người lái sẽ có “**Cảm giác lái nhẹ nhàng và thoải mái**”.

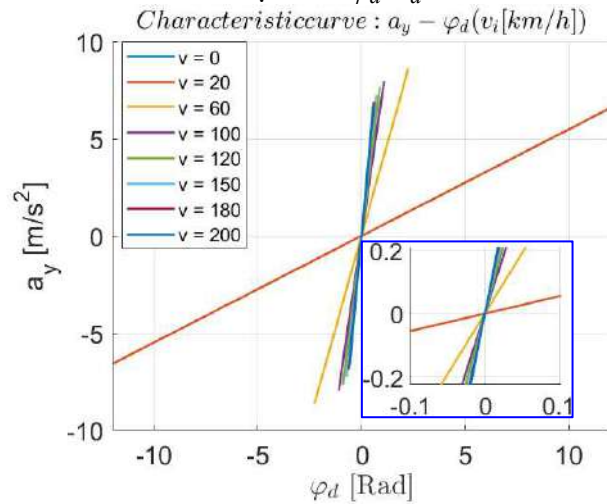
4.2.2. Phong cách lái thể thao/Sporty driving style

KQMP phong cách lái thể thao được thể hiện như Hình PL4.31.

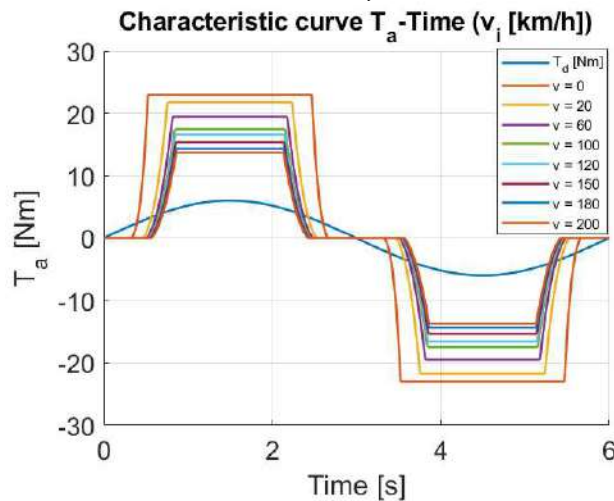




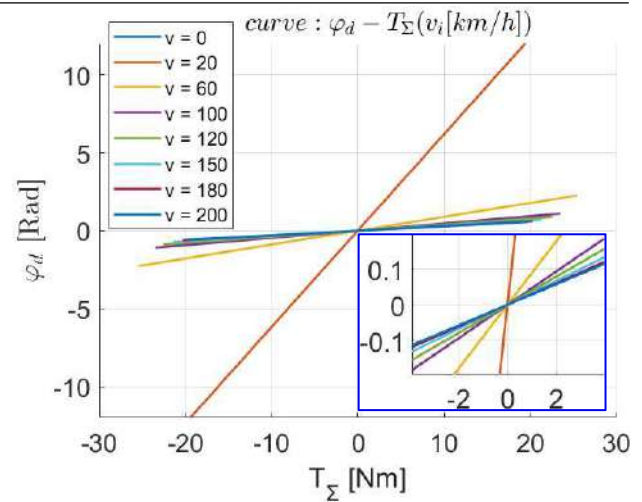
5. Đặc tính $\varphi_d - T_d$



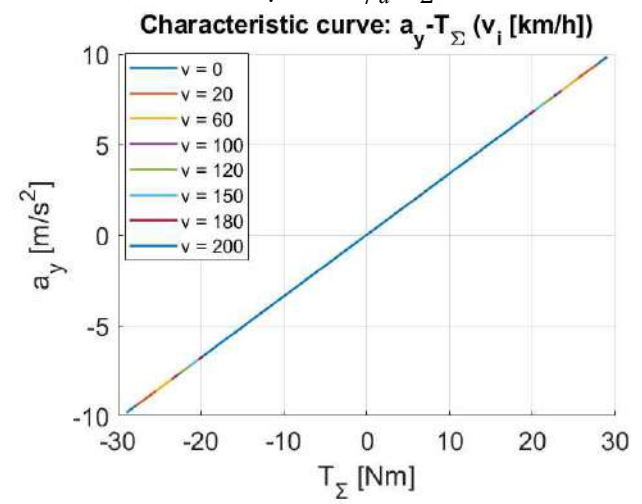
7. Đặc tính $a_y - \varphi_d$



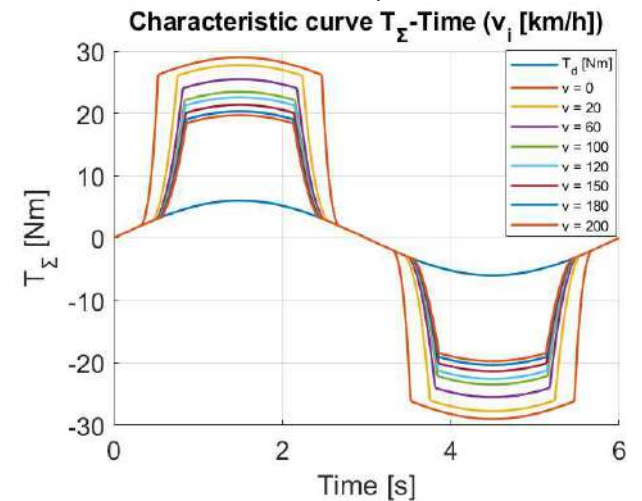
9. Đặc tính T_a -time đầu vào sin



6. Đặc tính $\varphi_d - T_\Sigma$



8. Đặc tính $a_y - T_\Sigma$



1. Đặc tính T_Σ -time đầu vào sin

Hình PL4.31. Trường hợp 2: Phong cách lái thể thao

Từ kết quả mô phỏng ở Hình PL4.31, cho thấy: Các yêu cầu xây dựng đặc tính trợ lực của Trường hợp 2 “**Phong cách lái thể thao**” đã được đáp ứng, cụ thể:

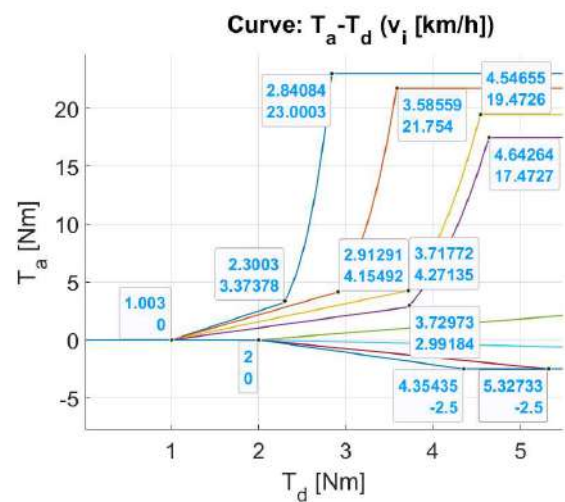
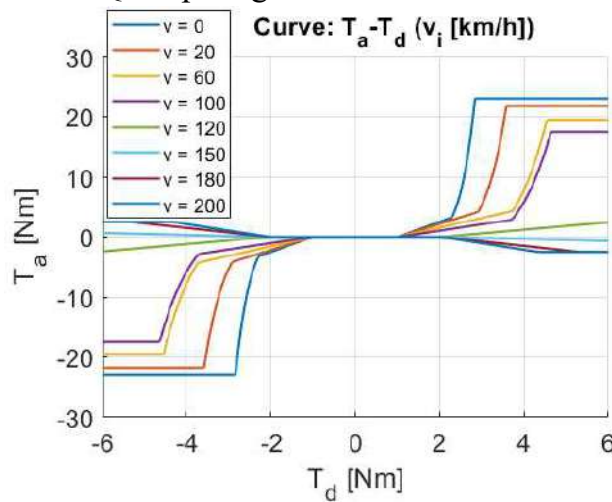
- Từ Hình PL4.31.1 và Hình PL4.31.2, động cơ trợ lực chỉ được kích hoạt khi $T_d = (2.0 \div 3.39)Nm$ giá trị lớn với vận tốc ô tô lớn hơn. Sau đó T_a tăng phi tuyến theo T_d nhưng độ dốc của đường đặc tính thấp hơn mức tăng của **Trường hợp 1**, để tạo cảm giác lái đầm chắc hơn.

- Ứng với các vận tốc khác nhau $v = [0, 20, 60, 100, 120, 150, 180, 200] \text{ km/h}$, thì mô men trợ lực T_a đạt giá trị bão hòa $T_{amax} = K(v_i)T_{dmax}^* = [23.00, 21.75, 19.43, 17.36, 16.58, 15.37, 14.26, 13.70]$ tại mô men lái đạt $T_d = \pm [3.15, 4.29, 4.55, 4.69, 4.64, 4.67, 4.71, 4.71]$.

Như vậy với đường đặc tính trợ lực này, mô men trợ lực được kích hoạt muộn, đồng thời khi được kích hoạt mô men trợ lực không tăng quá nhanh (độ dốc đặc tính thoải hơn) và mô men trợ lực đạt lớn nhất khi mô men lái đạt giá trị tương đối lớn $T_d = [3.15 \div 4.71]$, do đó người lái sẽ có cảm giác lái “**đằm chắc**” hơn hay nói cách khác là “**Phong cách lái thể thao**” hơn.

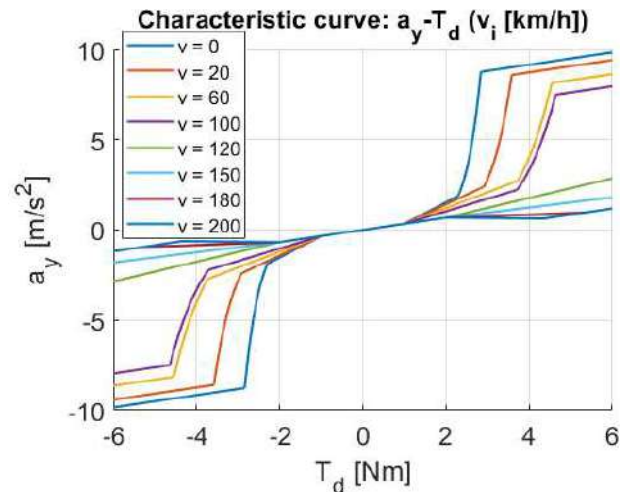
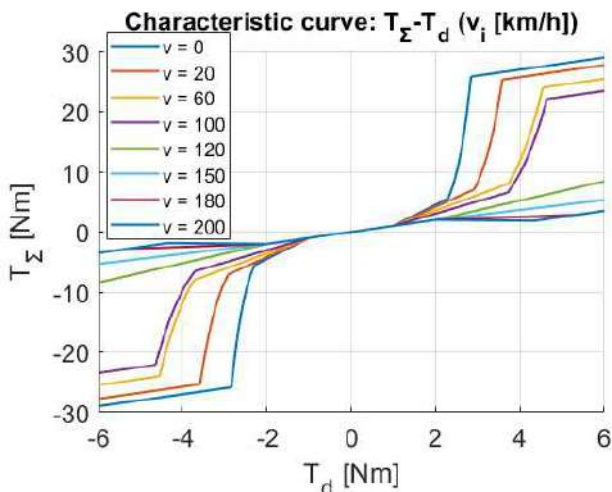
4.2.3. Phong cách đa mức/Multi-level driving style

KQMP phong cách lái đa mức được thể hiện như Hình PL4.32.



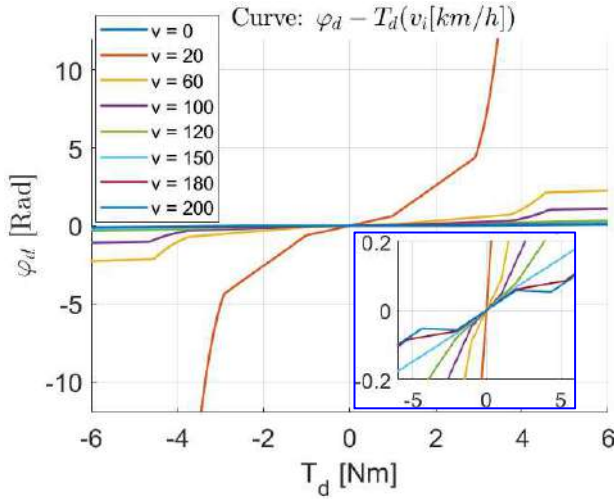
1. Đặc tính $T_a - T_d$

2. Giá trị đặc tính $T_a - T_d$

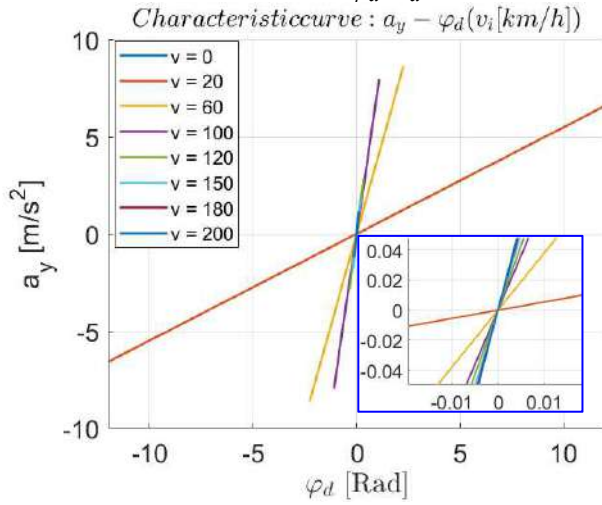


3. Đặc tính $T_\Sigma - T_d$

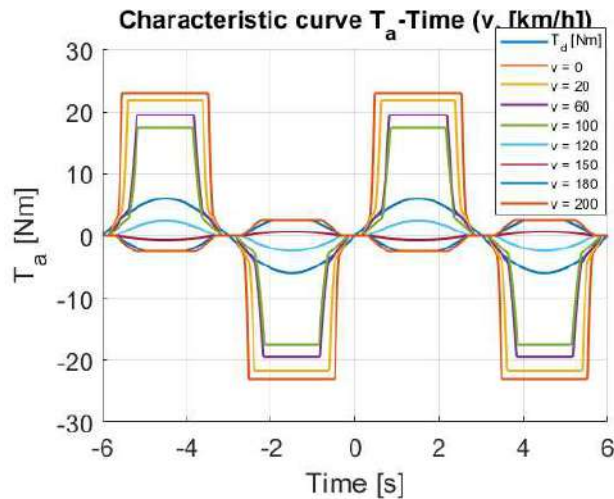
4. Đặc tính $a_y - T_d$



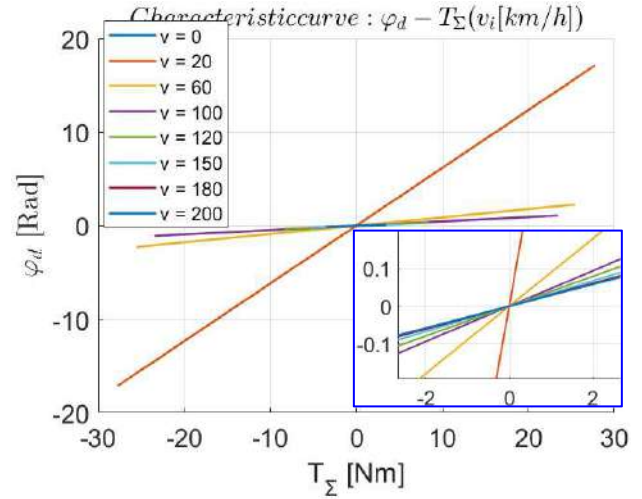
5. Đặc tính $\varphi_d - T_d$



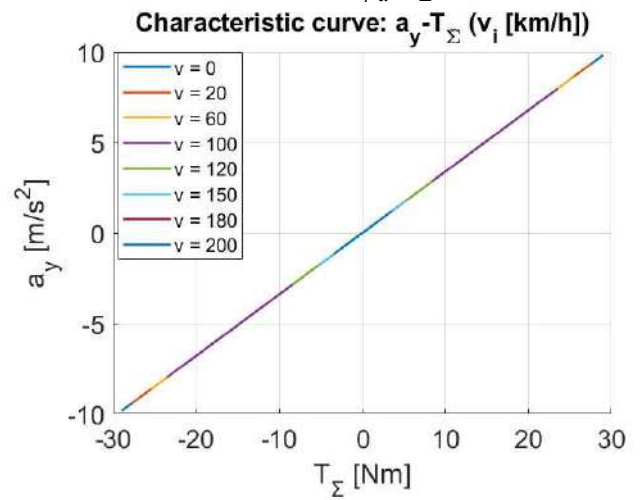
7. Đặc tính $a_y - \varphi_d$



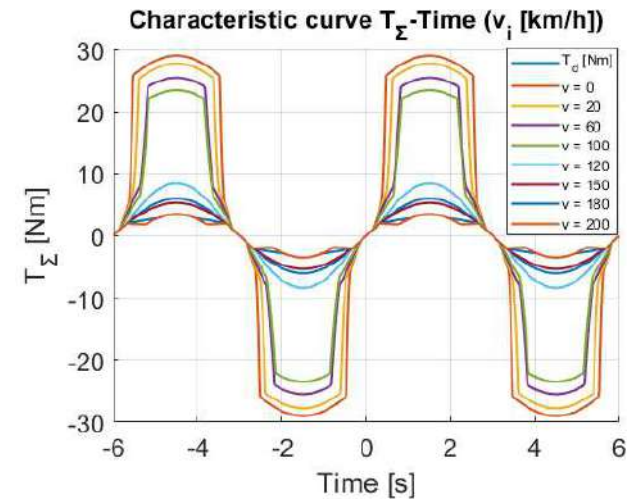
9. Đặc tính T_a -time đầu vào sin



6. Đặc tính $\varphi_d - T_\Sigma$



8. Đặc tính $a_y - T_\Sigma$



1. Đặc tính T_Σ -time đầu vào sin

Hình PL4.32. Trường hợp 3: Phong cách lái đa mức

Từ kết quả mô phỏng ở Hình PL4.32, cho thấy: Các yêu cầu xây dựng đặc tính trợ lực của Trường hợp 3 đã được đáp ứng, cụ thể:

- Trong vùng $v < 20 \text{ km/h}$, xây dựng đường đặc tính như trong **Trường hợp 1**;
- Trong vùng $20 \text{ km/h} < v \leq 100 \text{ km/h}$, mô men T_a tính theo **Trường hợp 2**;
- Trong vùng $100 \text{ km/h} < v < 150 \text{ km/h}$, khi $|T_d| \leq T_{drq} = 3.5 \text{ Nm}$ thì $T_a = 0$, và

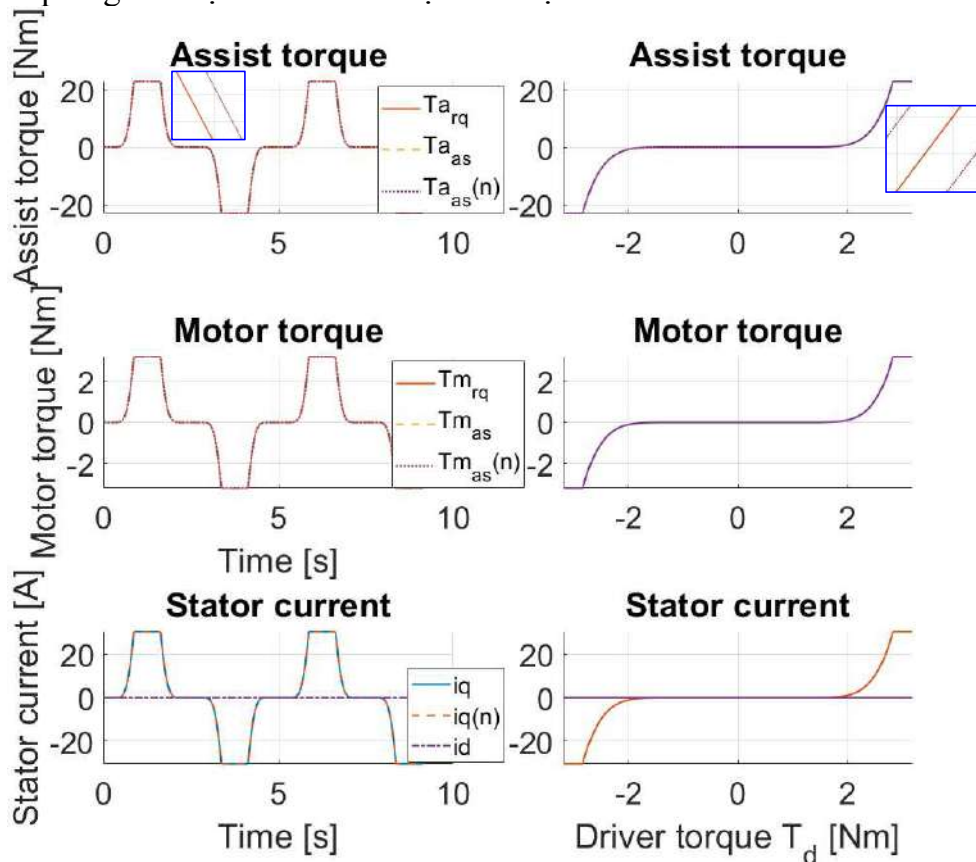
sau đó tăng theo đặc tính tuyến tính để giảm trợ lực so với đặc tính phi tuyến tính;

- Trong vùng $v \geq 150 \text{ km/h}$, khi $|T_d| \leq T_{drq} = 2.0 \text{ Nm}$ thì $T_a = 0$, khi $|T_d| > T_{drq} = 2.0 \text{ Nm}$ thì $T_a < 0$ và tăng theo chiều ngược hướng với T_d , cho đến khi $T_a = -2.5 \text{ Nm}$ sẽ không tiếp tục tăng nữa dù T_d tiếp tục tăng (tuy nhiên trong quá trình vận hành ô tô thực tế, trường hợp lái với mô men lớn ở vận tốc cao rất hiếm khi xảy ra). Các giá trị tại các điểm chuyển tiếp của đường đặc tính được thể hiện ở Hình PL4.32.2. Với đặc tính này, người lái sẽ có “**Cảm giác lái nhẹ, thoải mái ở vận tốc thấp, thể thao ở vận tốc trung bình và chắc nặng, an toàn ở vận tốc cao**”.

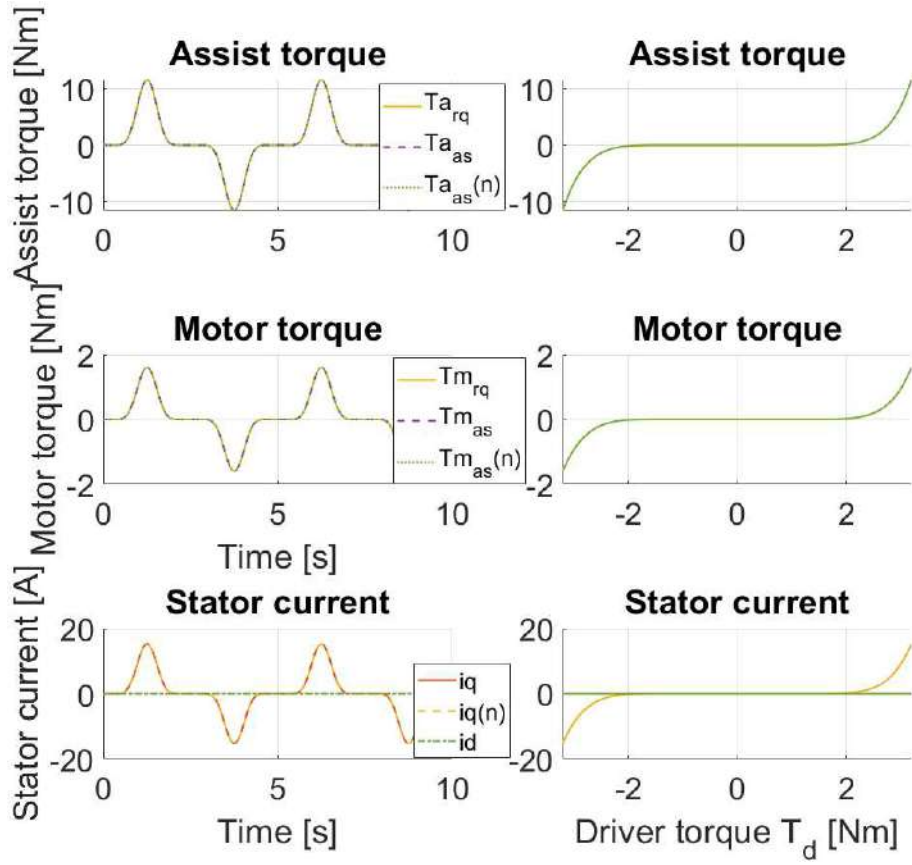
4.3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ BỘ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG LÁI EPS

4.3.1. Kịch bản 1 $T_d = 3.2 \sin(\frac{2\pi}{5}t) \text{ Nm}$, ($f = 0.2 \text{ Hz}$)

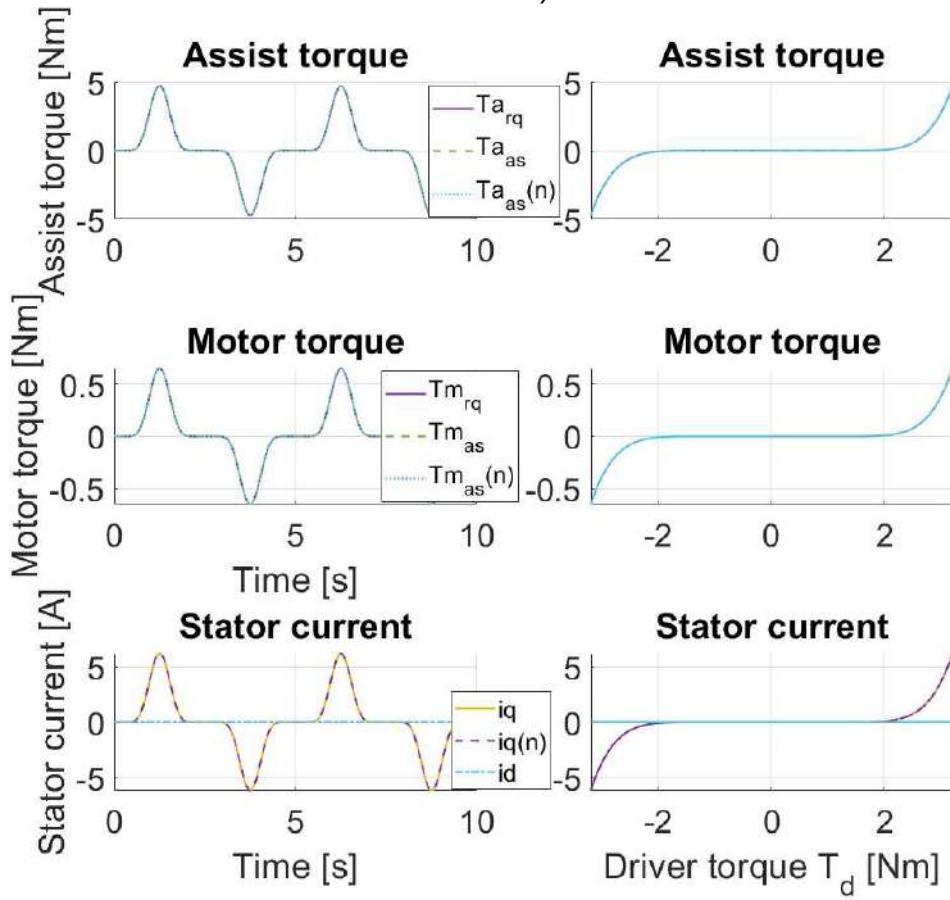
KQMP đáp ứng của bộ điều khiển được thể hiện như Hình PL4.33 và Hình PL4.34.



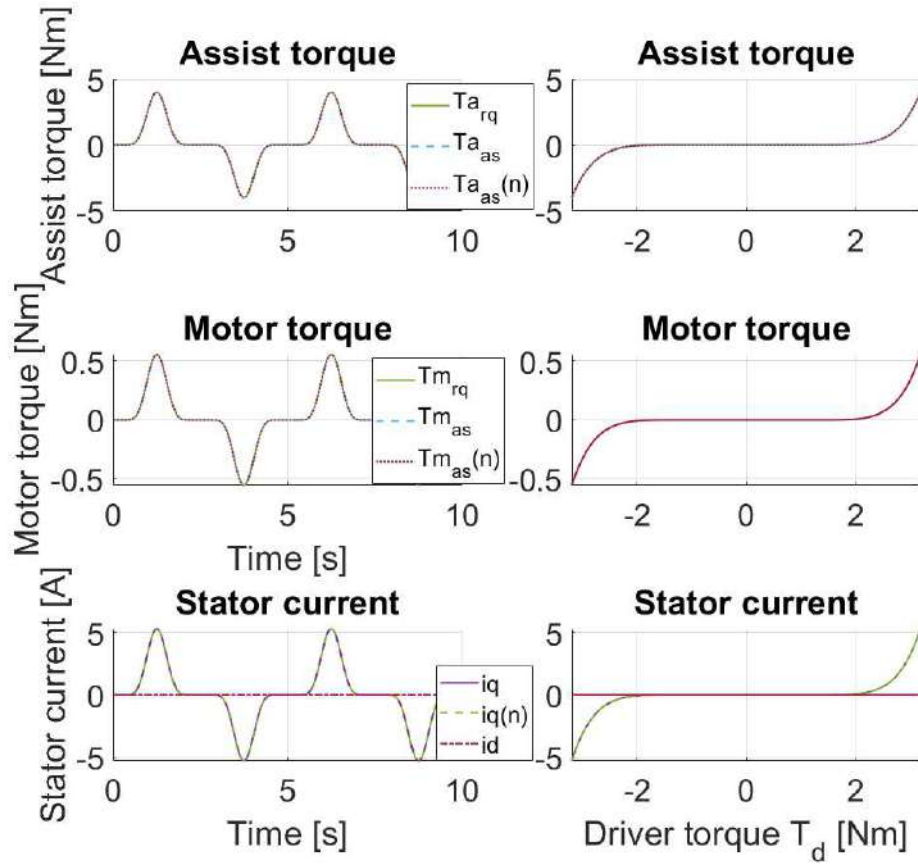
a. $v = 0 \text{ km/h}$



b. $v=10\text{km/h}$

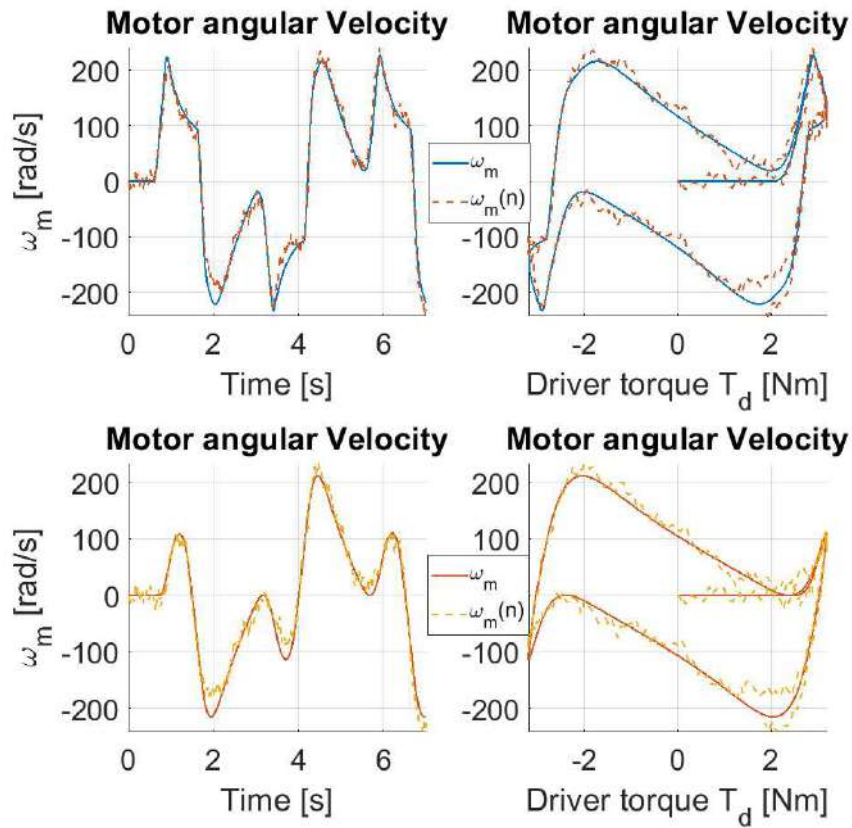


c. $v=100\text{km/h}$

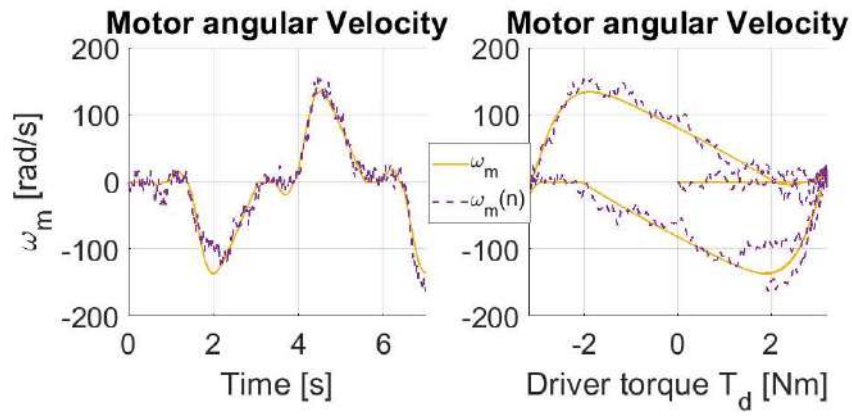


d. $v=150 \text{ km/h}$

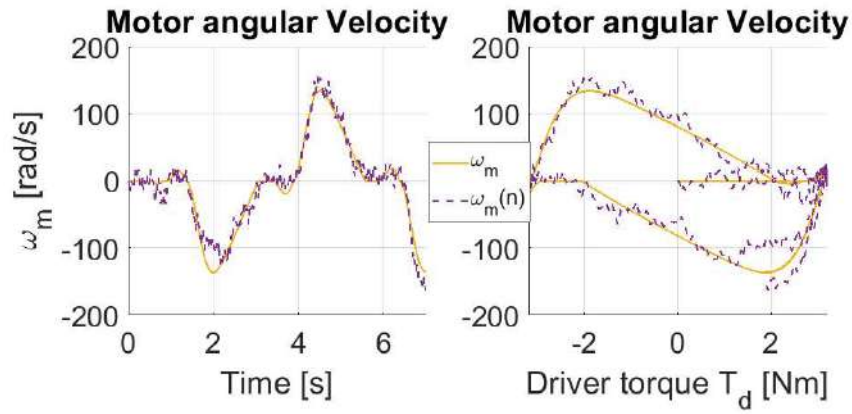
Hình PL4.33. Kịch bản 1: Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ



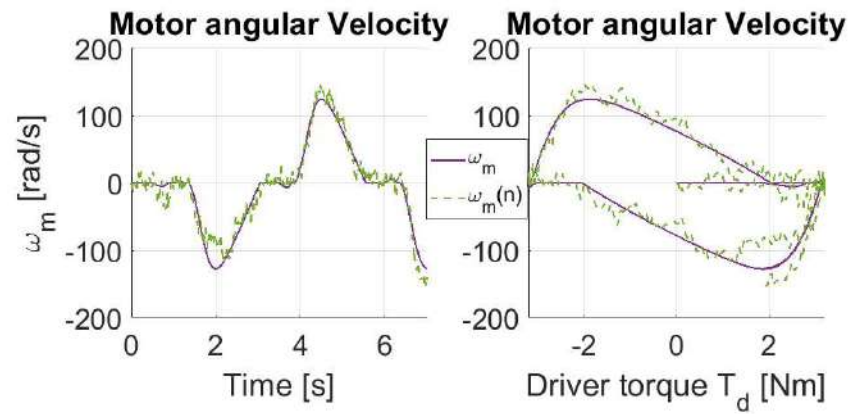
a. $v=0 \text{ km/h}$



b. $v=10\text{km/h}$



c. $v=100\text{km/h}$

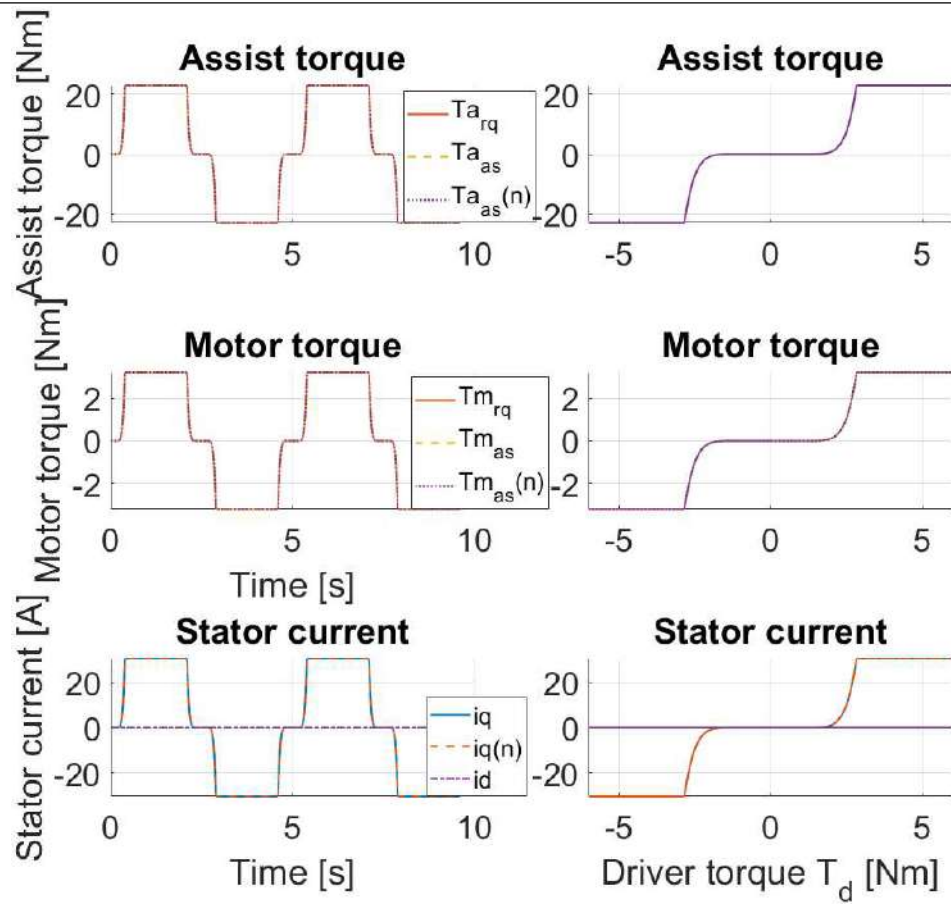


d. $v=150\text{km/h}$

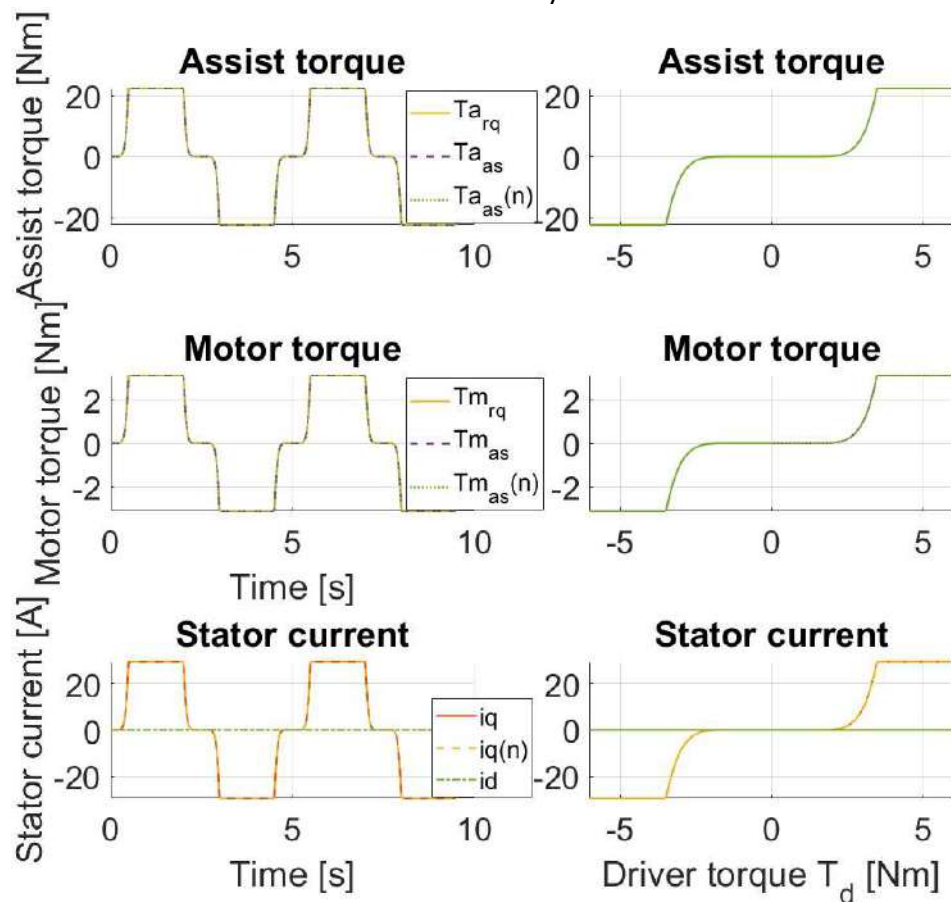
Hình PL4.34. Kịch bản 1- Vận tốc góc động cơ trợ lực

4.3.2. Kịch bản 2 $T_d = 6\sin(\frac{2\pi}{5}t)\text{Nm}$, ($f = 0.2\text{Hz}$)

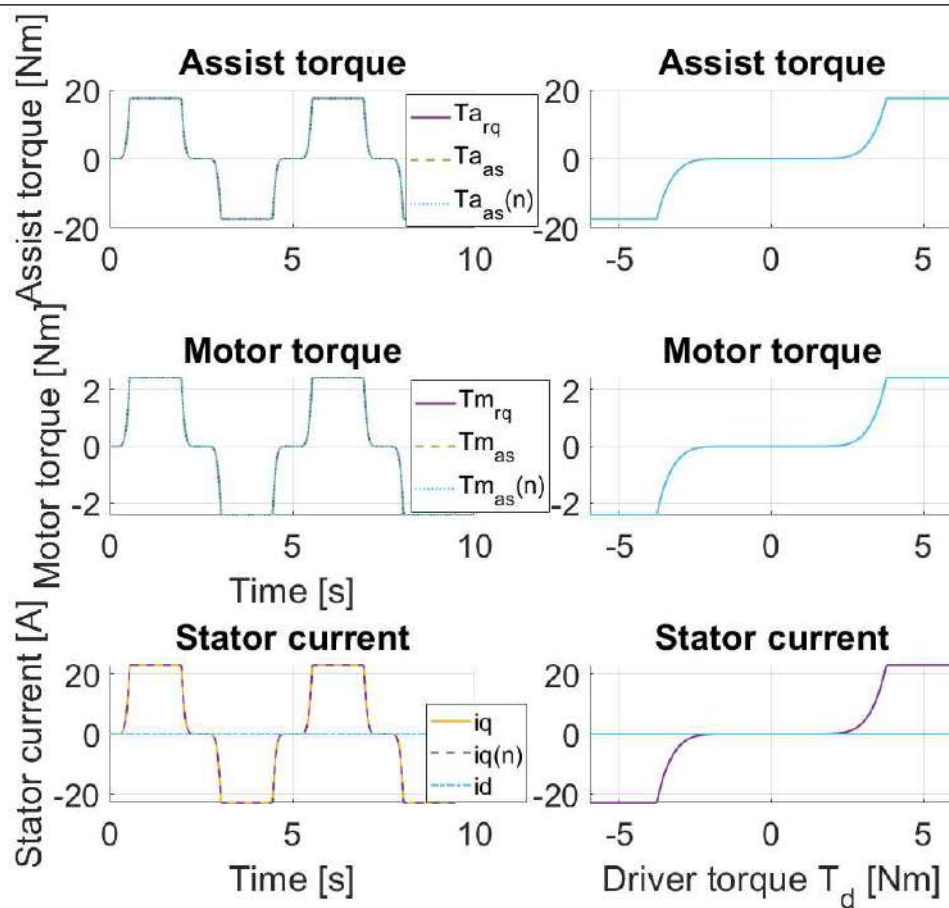
KQMP đáp ứng của bộ điều khiển được thể hiện như Hình PL4.35 và Hình PL4.36.



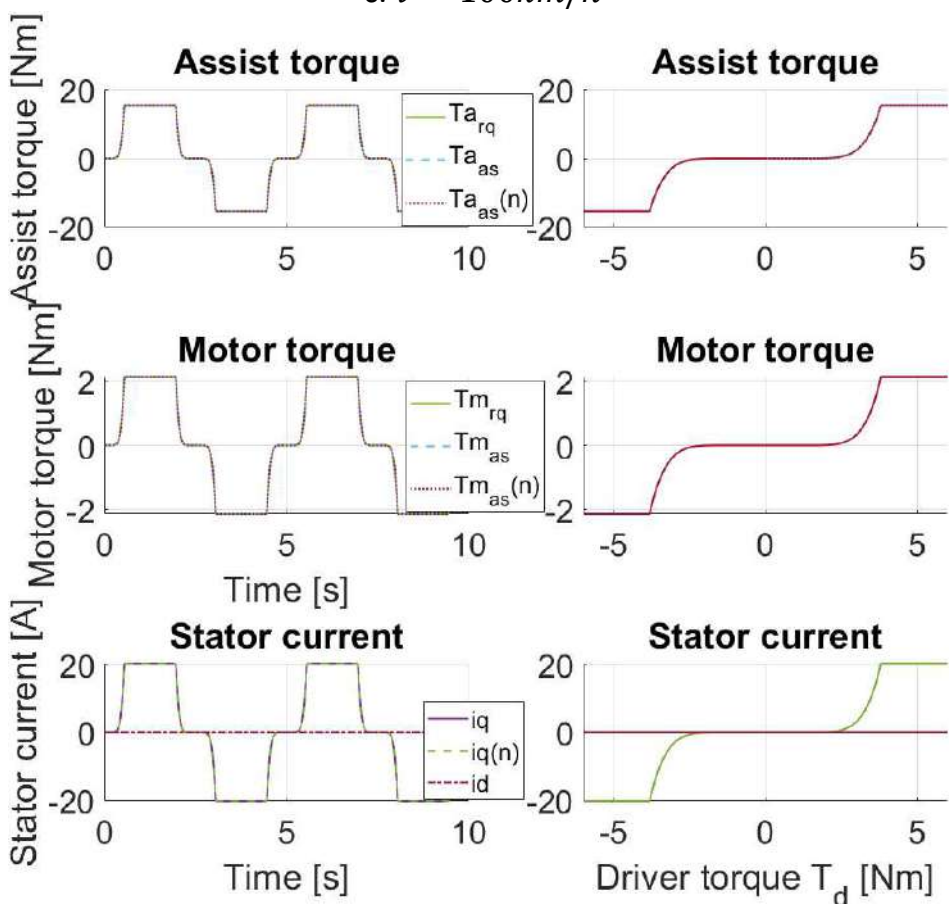
a. $v = 0 \text{ km/h}$



b. $v = 10 \text{ km/h}$

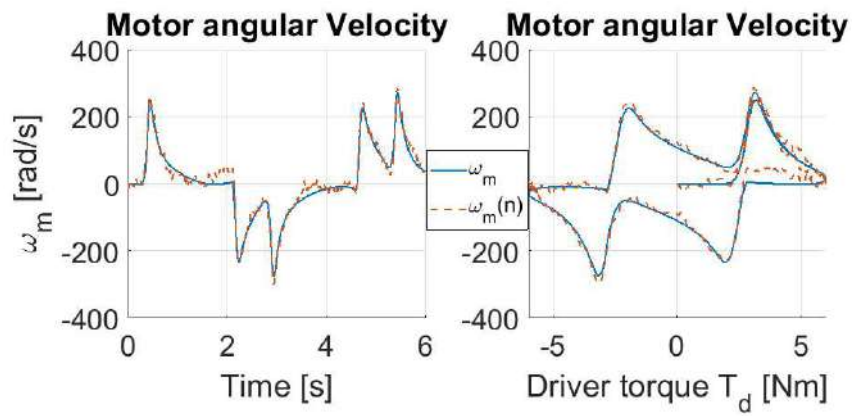


c. $v = 100 \text{ km/h}$

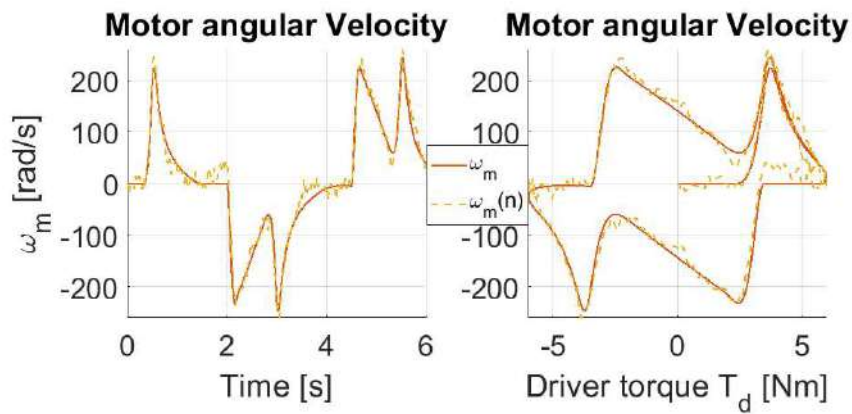


d. $v = 150 \text{ km/h}$

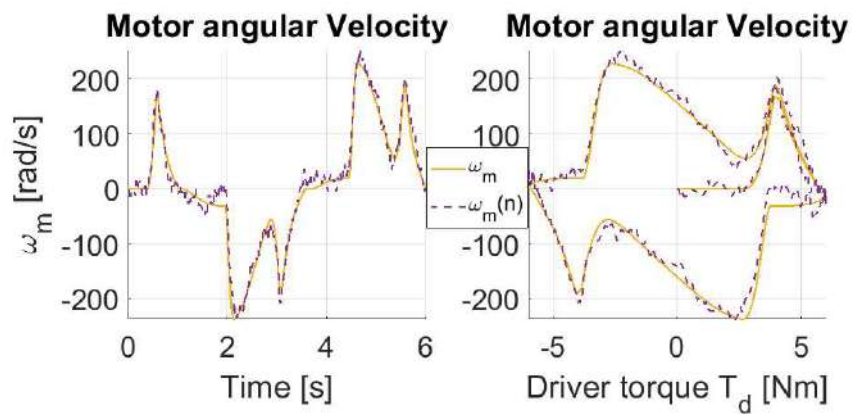
Hình PL4.35. Kịch bản 2- Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ



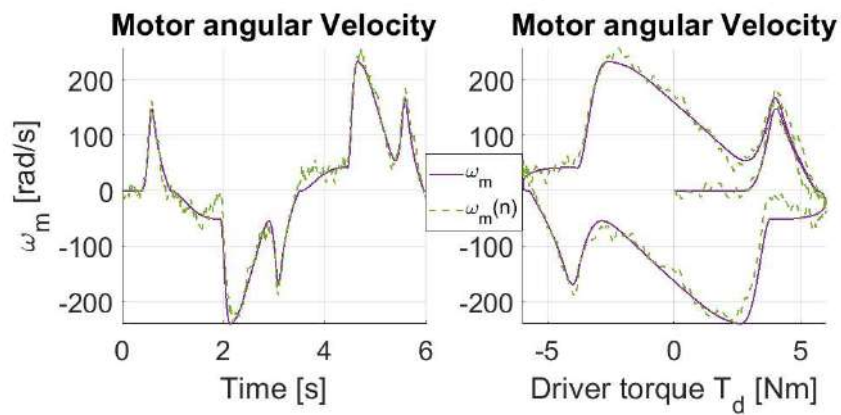
a. $v = 0 \text{ km/h}$



b. $v = 10 \text{ km/h}$



c. $v = 100 \text{ km/h}$

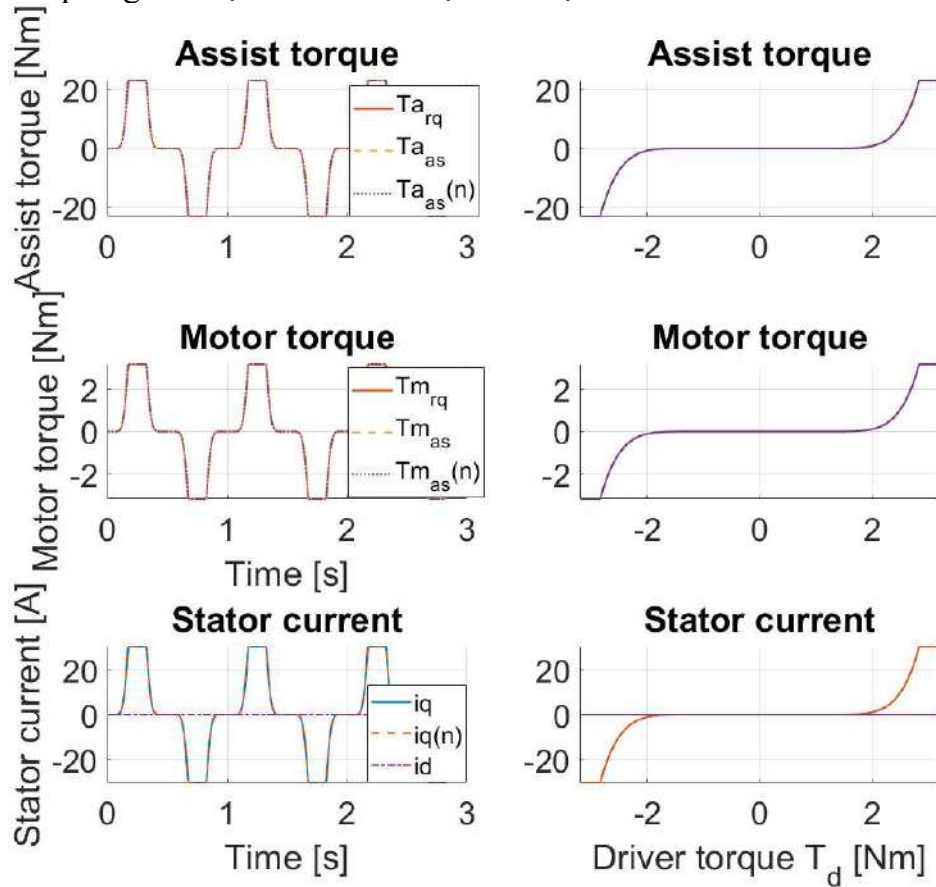


d. $v = 150 \text{ km/h}$

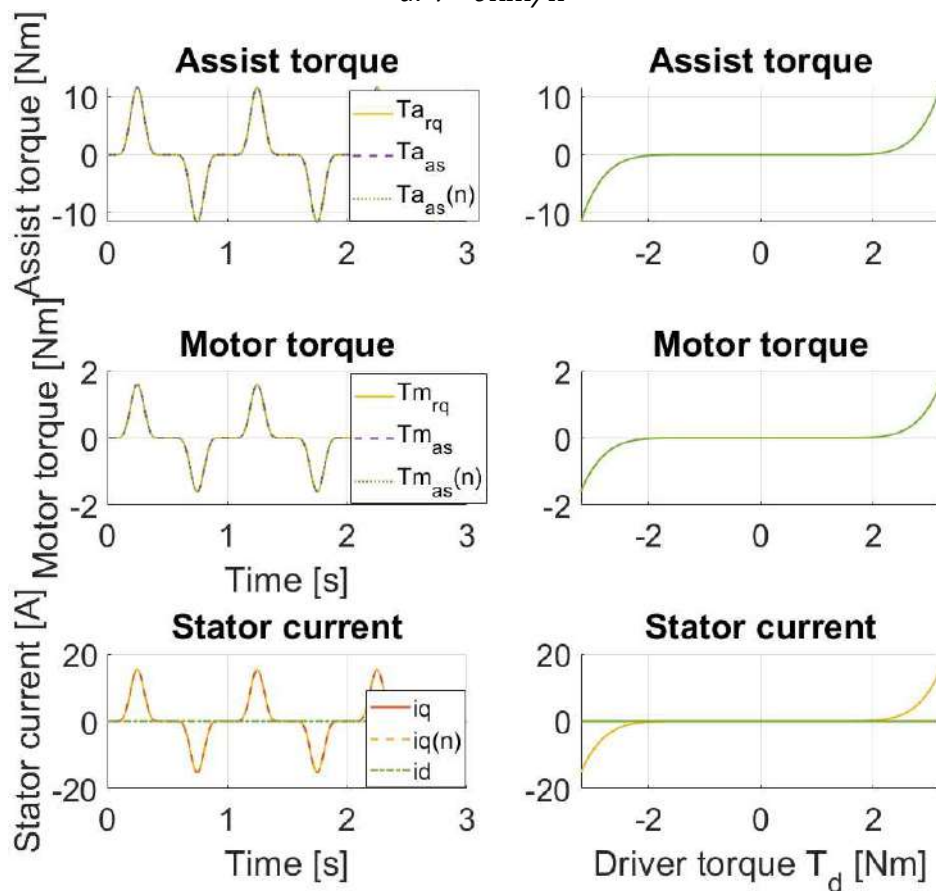
Hình PL4.36. Kịch bản 2- Vận tốc góc động cơ trợ lực

4.3.3. Kịch bản 3 $T_d = 3.2 \sin(2\pi t) \text{ Nm}$, ($f = 1 \text{ Hz}$)

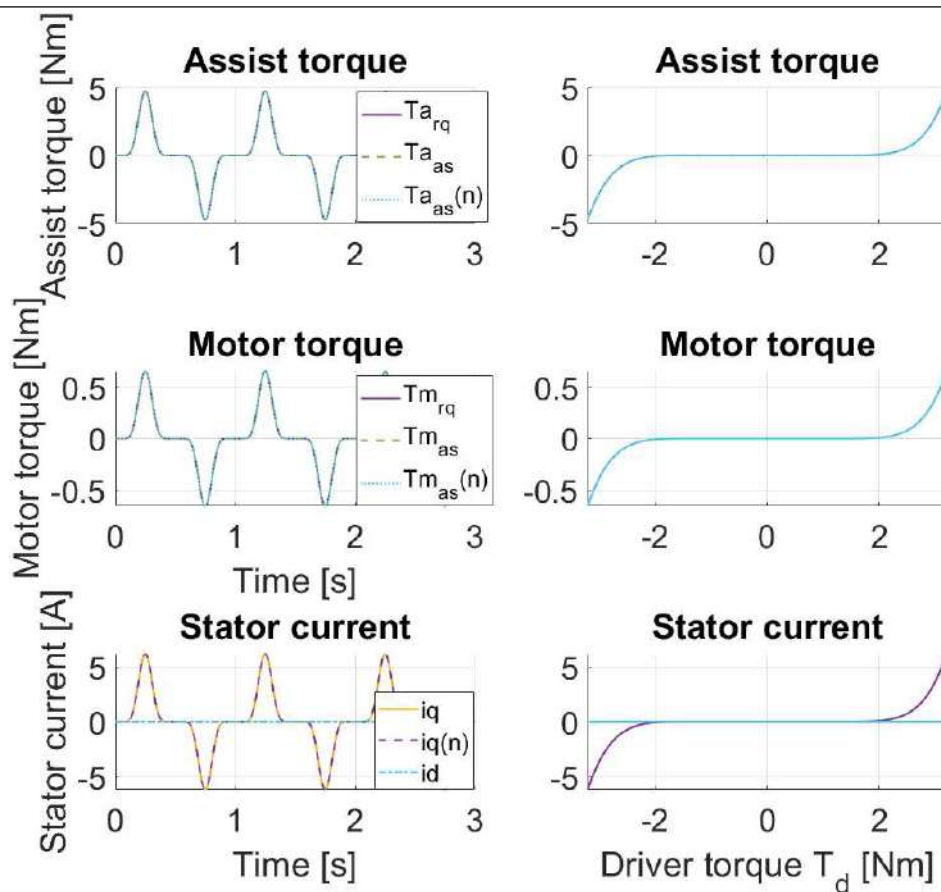
KQMP đáp ứng của bộ điều khiển được thể hiện như Hình PL4.37 và Hình PL4.38.



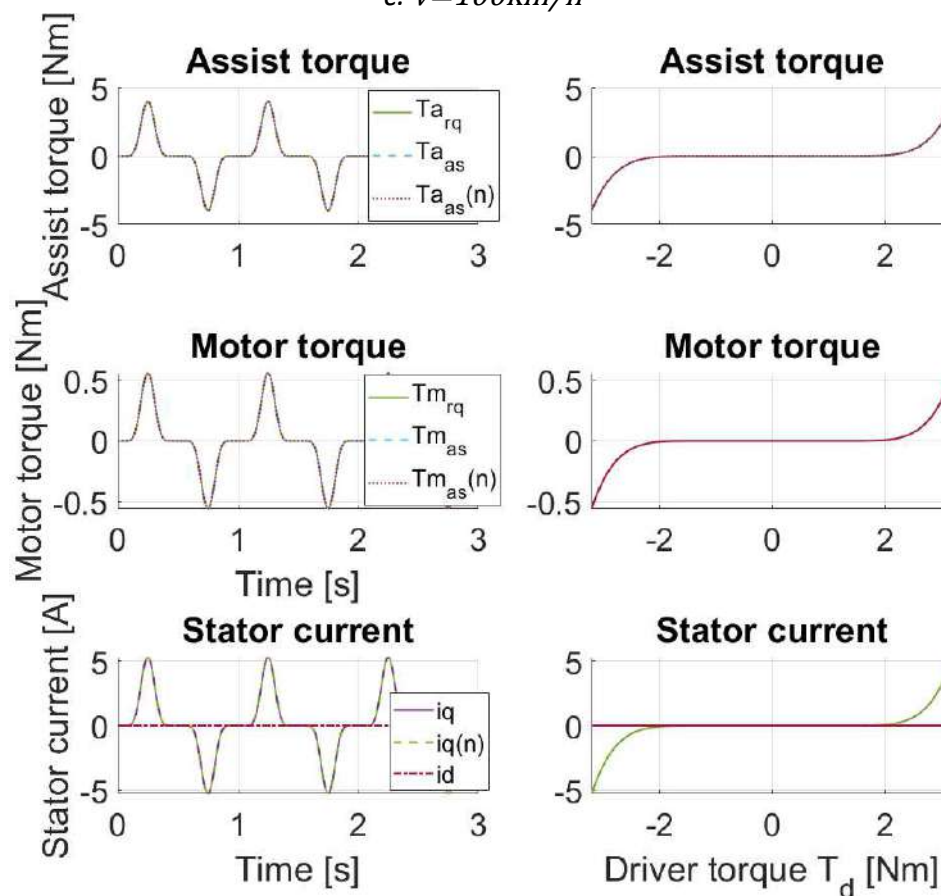
a. $v=0\text{km/h}$



b. $v=10\text{km/h}$

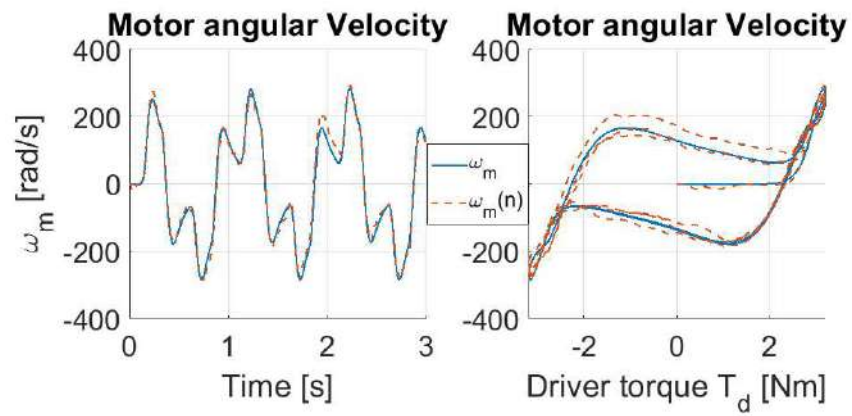


c. $v=100\text{km/h}$

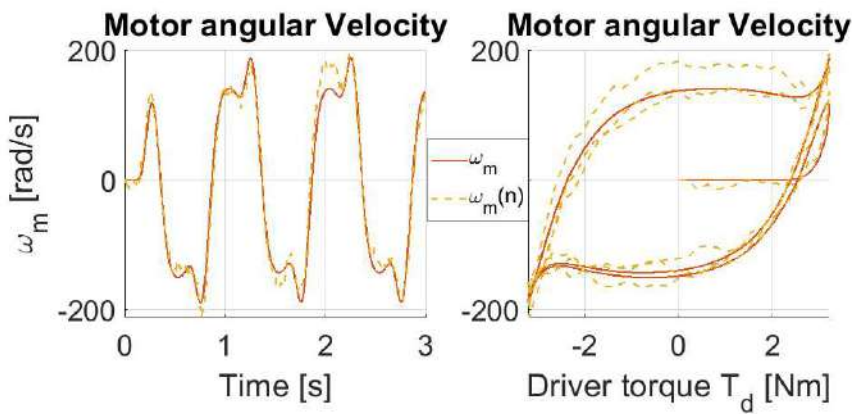


d. $v=150\text{km/h}$

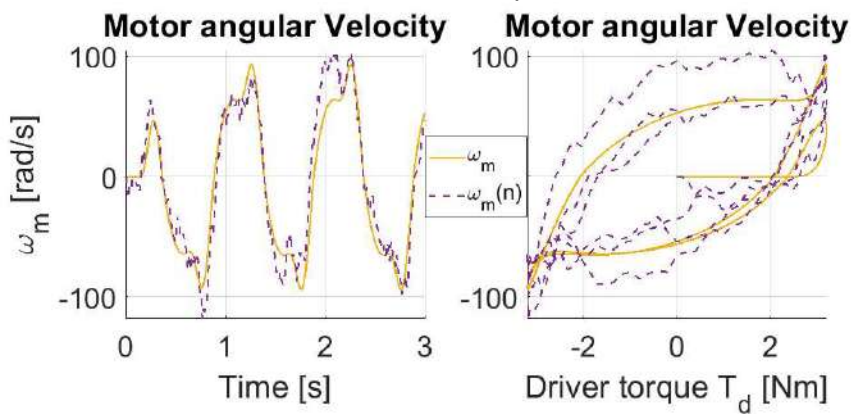
Hình PL4.37. Kịch bản 3- Mô men trợ lực, mô men động cơ và dòng điện động cơ



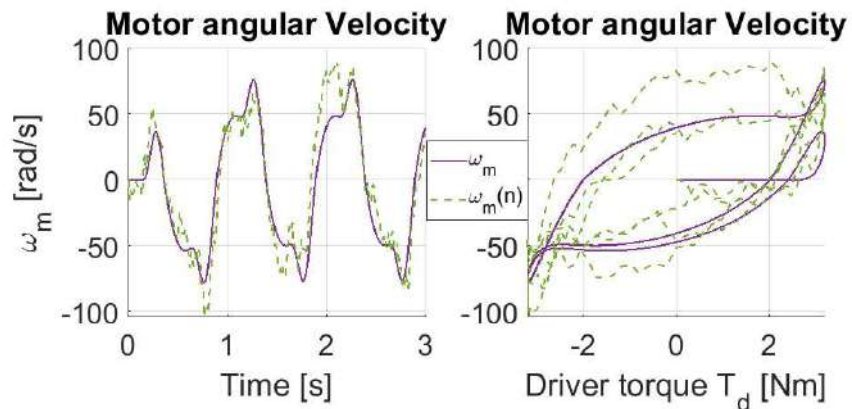
a. $v=0\text{km/h}$



b. $v=10\text{km/h}$



c. $v=100\text{km/h}$



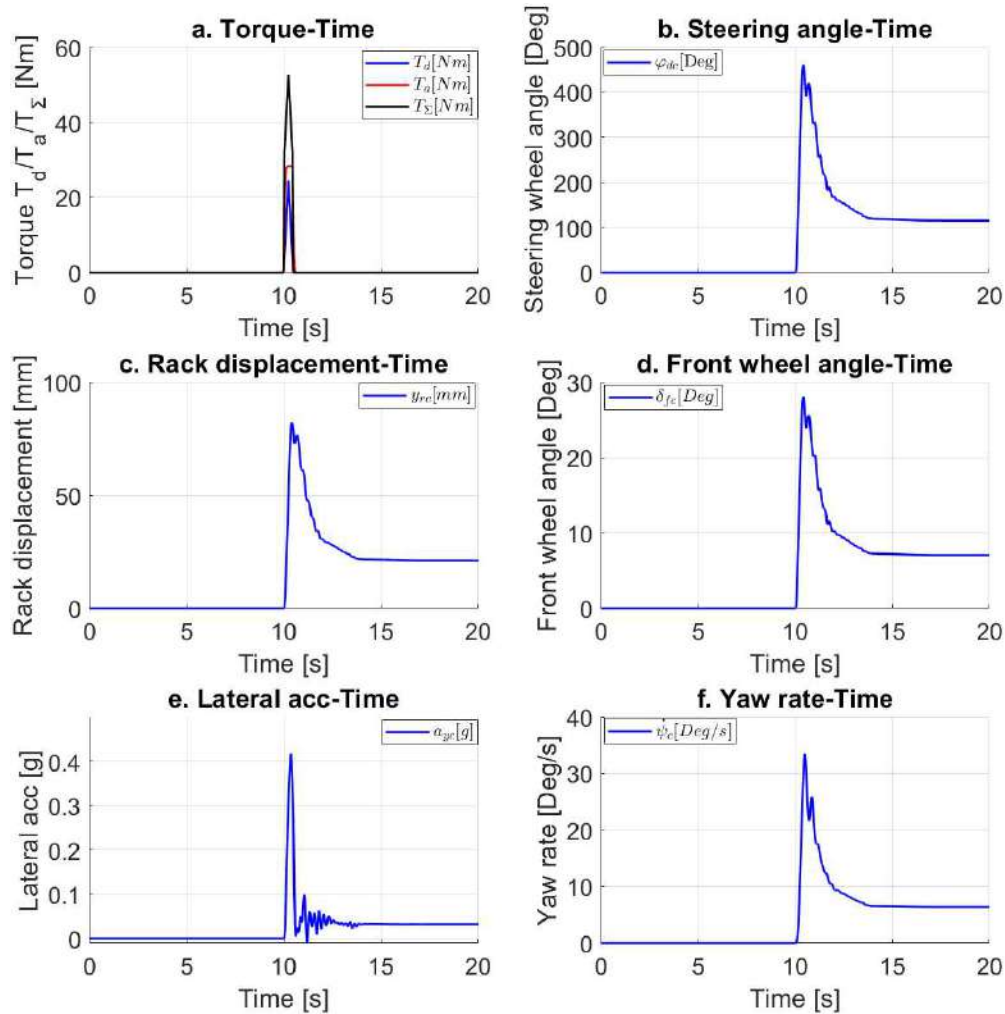
d. $v=150\text{km/h}$

Hình PL4.38. Kịch bản 3- Vận tốc góc động cơ trợ lực

4.4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ CẢM GIÁC LÁI

4.4.1. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu xung (Pulse input test)

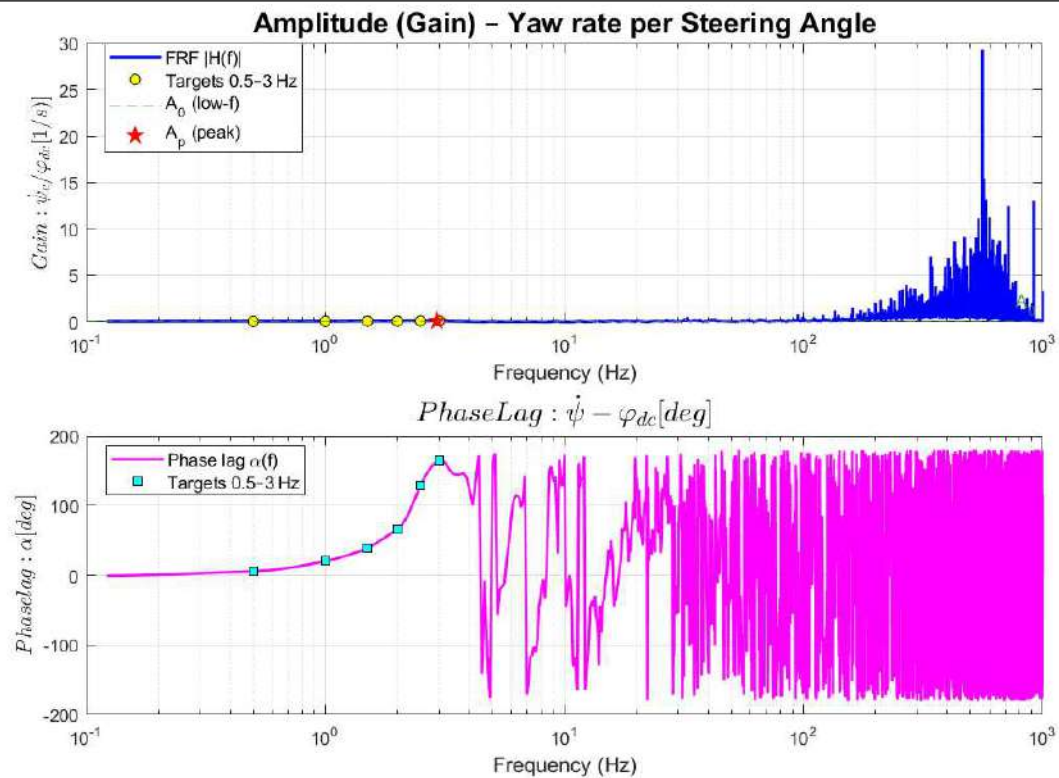
4.4.1.1. Trường hợp vận tốc thấp $v = 10\text{km/h}$



Hình PL4.39. KQMP thử nghiệm phản ứng tức thời tín hiệu xung tại $v = 10\text{km/h}$

Bảng PL4.1. Xử lý số liệu miền tần số với kích thích lái xung, $v = 10\text{km/h}$

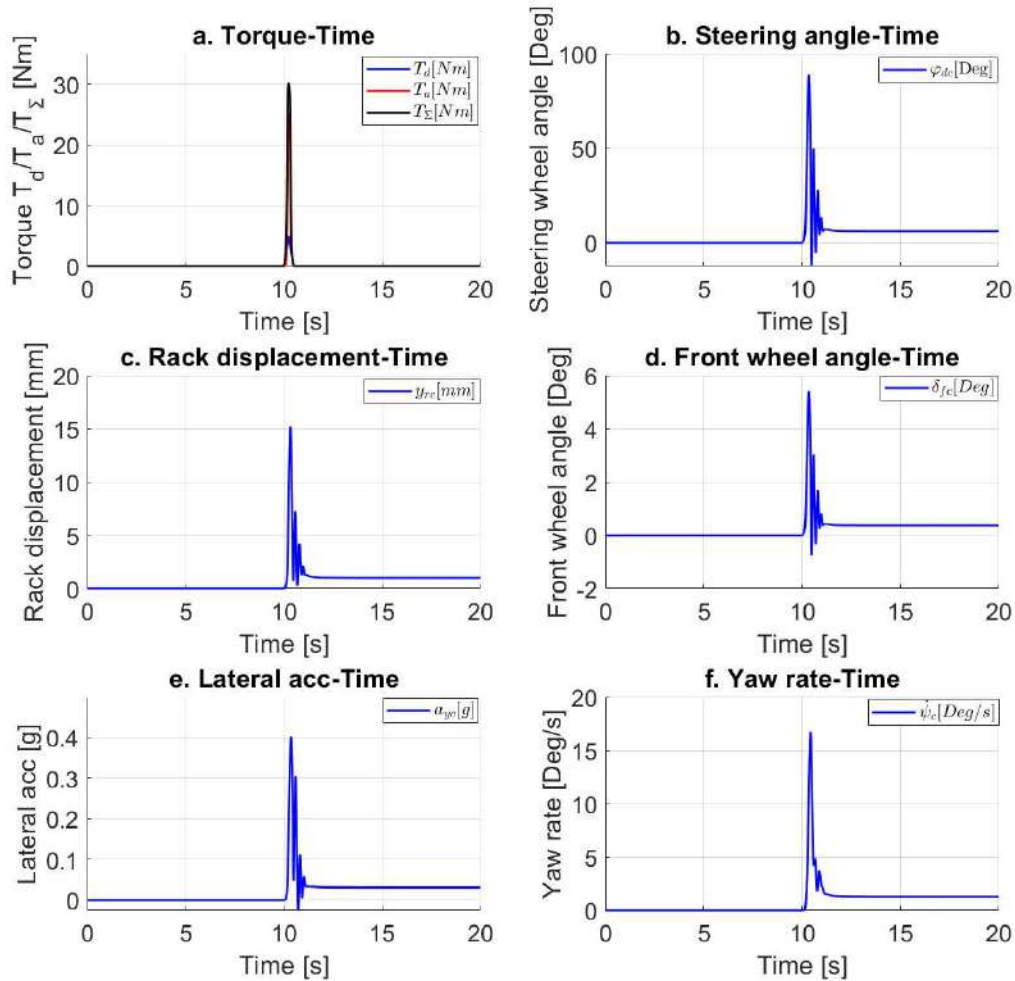
TT No	Tham số Parameter	Ký hiệu Symbol	Đơn vị Unit	Giá trị Values					
1	Tần số quan tâm (Frequency)	f	[Hz]	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
2	Hệ số nhạy vận tốc xoay thân xe (yaw rate sensitivity gain)	$G_{(j\omega_k)}$	$[(^\circ/s)/g]$	0,065	0,074	0,083	0,094	0,106	0,111
3	Trễ pha góc lái và vận tốc xoay thân xe (Phase lag SWA-yaw rate)	α	$[^\circ]$	5,755	20,350	38,296	65,884	128,62	164,64
4	Hệ số tương hợp tín hiệu (Coherence)	$\gamma^2(\omega)$	-	0,998	0,995	0,987	0,978	0,933	0,996



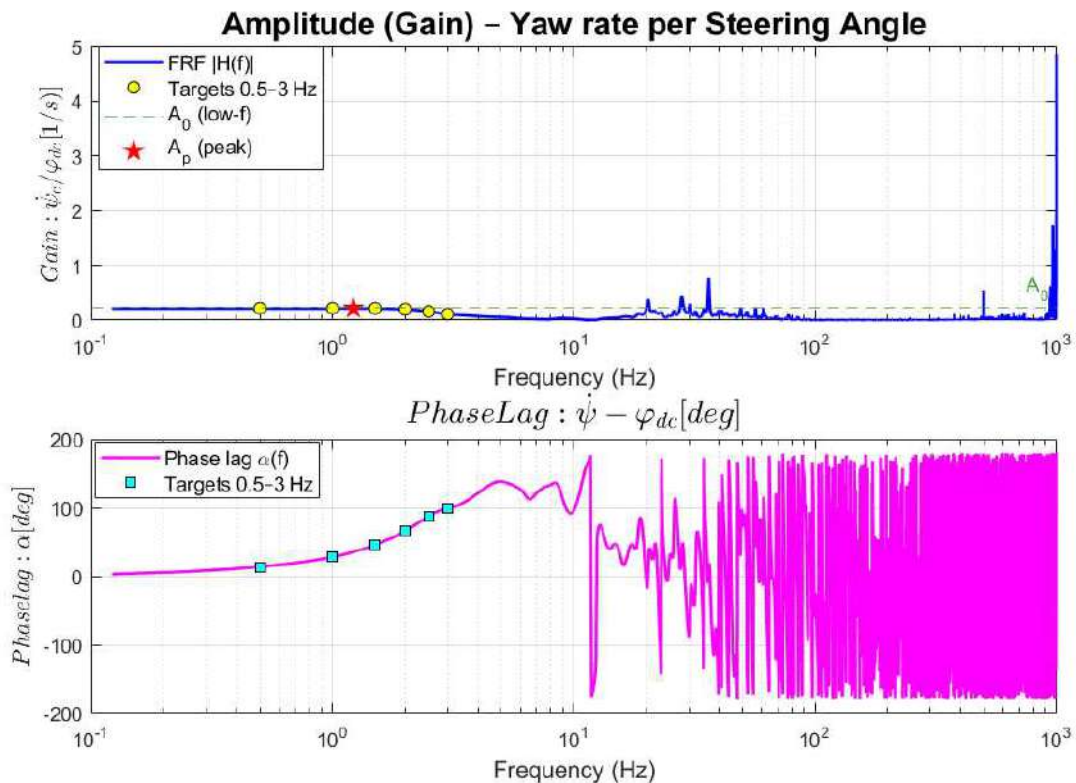
Hình PL4.40. Đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 10\text{km/h}$
Bảng PL4.2. Kết quả đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 10\text{km/h}$

TT	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị	Miêu tả
No	Parameter	Symbol	Unit	Values	Description
1	Độ nhạy trạng thái gần tĩnh (low-frequency gain)	A_0	[1/s]	0,061	Biểu thị độ nhạy xoay thân xe theo góc lái khi xe ở trạng thái gần tĩnh ($f \approx 0$ Hz). Phản ánh khả năng phản ứng chậm, ổn định của hệ thống lái
2	Độ nhạy trạng thái cộng hưởng (Peak gain)	A_p	[1/s]	0,112	Hệ số khuếch đại biên độ ở tần số cộng hưởng f_0 . Biểu thị mức khuếch đại cực đại của vận tốc xoay thân xe so với góc lái khi hệ thống đạt dao động cộng hưởng do quán tính, độ cứng lốp và damping hệ thống lái.
3	Tần số cộng hưởng (Resonant frequency)	f_0	[Hz]	2,930	Tần số nhạy cảm
4	Mức cộng hưởng (Resonant level)	D	[dB]	5,303	Cho biết mức độ cộng hưởng tức chênh lệch giữa phản ứng ở cộng hưởng và phản ứng tĩnh.

4.4.1.2. Trường hợp vận tốc trung bình $v = 50\text{km/h}$



Hình PL4.41. KQMP Thử nghiệm phản ứng tức thời tín hiệu xung tại $v = 50\text{km/h}$

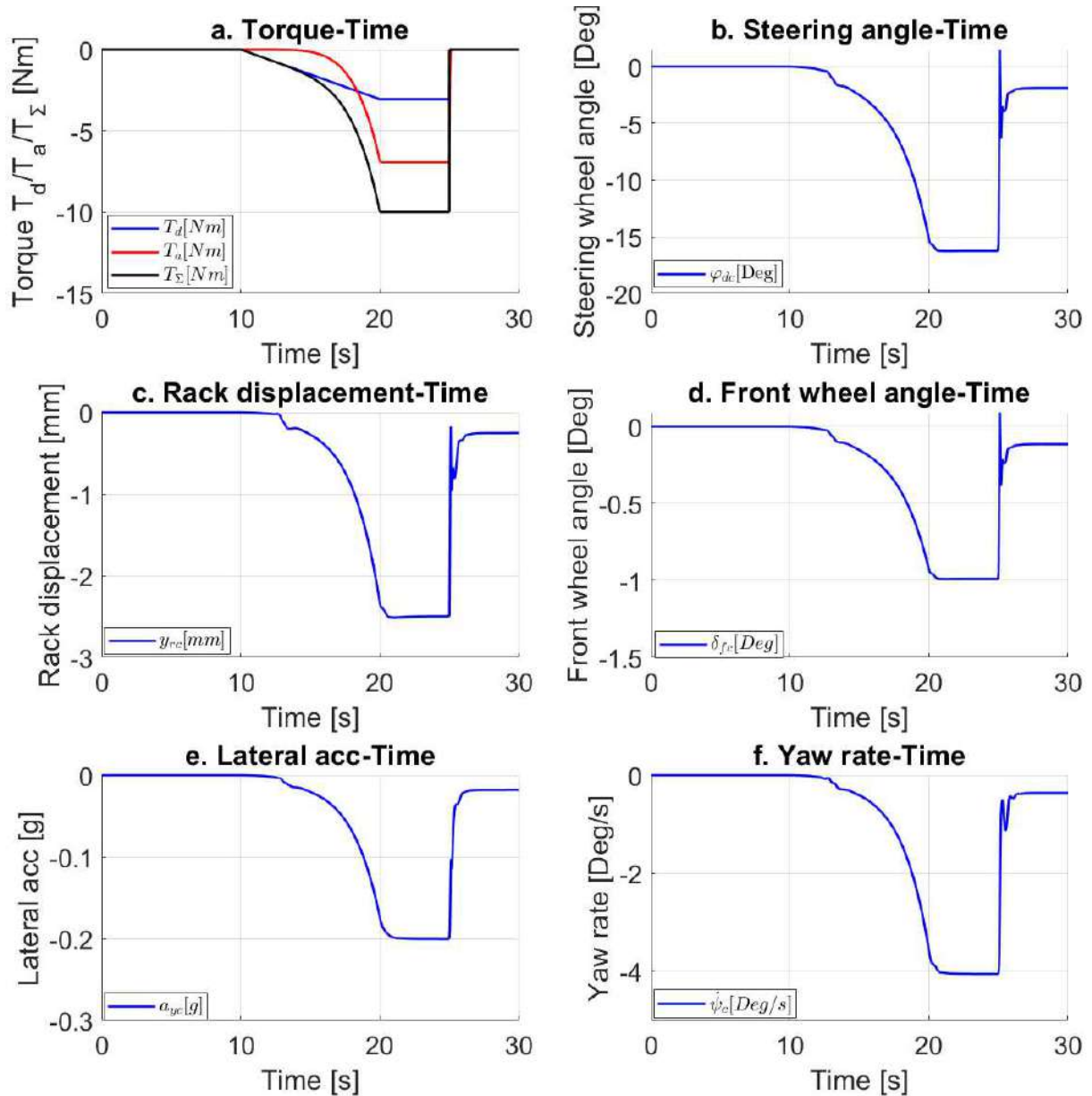


Hình PL4.42. Đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 50\text{km/h}$

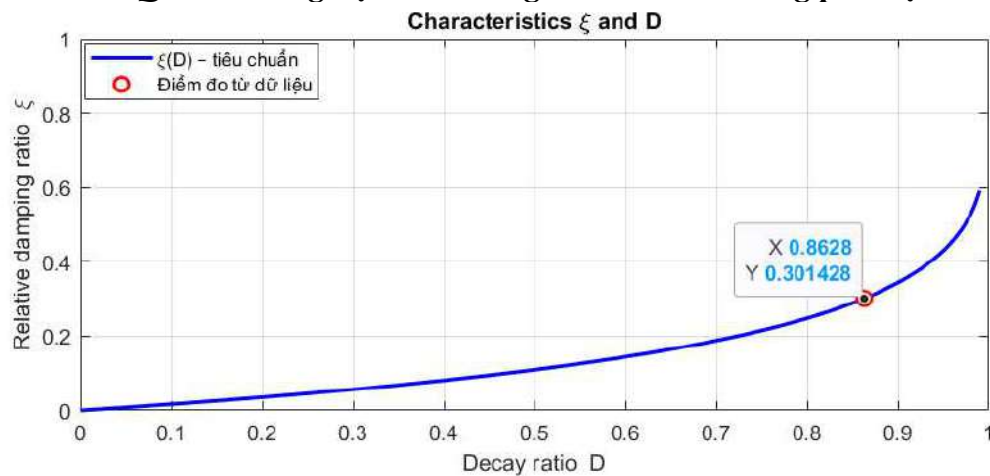
Bảng PL4.3. Xử lý số liệu miền tần số với kích thích lái xung, $v = 50\text{km/h}$									
TT	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị					
No	Parameter	Symbol	Unit	Values					
1	Tần số quan tâm (Frequency)	f	[Hz]	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
2	Hệ số nhạy vận tốc xoay thân xe (yaw rate sensitivity gain)	G_ψ	[$^\circ/s$]/ $^\circ$	0,214	0,214	0,213	0,199	0,158	0,112
3	Trễ pha góc lái và vận tốc xoay thân xe (Phase lag SWA-yaw rate)	α	[$^\circ$]	13,777	27,984	45,742	65,881	87,748	98,813
4	Hệ số tương hợp tín hiệu (Coherence)	$\gamma^2(\omega)$	-	0,997	0,996	0,994	0,991	0,988	0,995

Bảng PL4.4. Kết quả đặc tính pha-tần số và đặc tính biên độ-tần số, $v = 50\text{km/h}$				
TT	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
No	Parameter	Symbol	Unit	Values
1	Độ nhạy trạng thái gần tĩnh (low-frequency gain)	A_0	[1/s]	0,216
2	Độ nhạy trạng thái cộng hưởng (Peak gain)	A_p	[1/s]	0,215
3	Tần số cộng hưởng (Resonant frequency)	f_0	[Hz]	1,221
4	Mức cộng hưởng (Resonant level)	D	[dB]	-0,030

4.4.2. Thử nghiệm khả năng trả lái (Returnability test)



Hình PL4.43. KQMP Thử nghiệm khả năng trả lái khi lái sang phải tại $v = 100\text{km/h}$



Hình PL4.44. Đặc tính ζ - D, khi lái sang phải tại $v = 100\text{km/h}$

4.4.3. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái chuyển trạng thái (Transition test)

4.4.3.1. Mục đích, phương pháp, xử lý số liệu thử nghiệm

4.4.3.1.1. Mục đích thử nghiệm

Bài thử nghiệm đánh giá cảm giác lái chuyển trạng thái nhằm đánh giá khả năng đáp ứng chuyển tiếp của hệ thống lái và toàn bộ xe khi chuyển từ trạng thái ổn định sang trạng thái điều khiển khác như từ chuyển động thẳng sang quay vòng nhẹ, hoặc từ trạng thái ổn định bên trái sang bên phải. Các mục tiêu chính bao gồm:

- Xác định tính tuyến tính, độ trễ và độ nhạy cảm giác lái trong vùng chuyển tiếp.
- Đánh giá độ chính xác và sự nhất quán giữa phản hồi mô men lái, gia tốc ngang và góc quay thân xe.
- Kiểm chứng bản đồ đặc tính trợ lực lái của hệ thống EPS trong điều kiện lái thực tế.
- Phân tích tính ổn định động học và cảm giác điều khiển trong các thao tác đánh lái ngắn hoặc trung bình.

4.4.3.1.2. Phương pháp thử nghiệm

Xe chạy ổn định ở vận tốc nhất định. Người lái hoặc thiết bị đánh lái tự động thực hiện một chuỗi lệnh đánh lái chuyển trạng thái từ vị trí trung gian qua trái và qua phải, biên độ lái đủ nhỏ để không gây trượt lốp (gia tốc ngang khoảng $(0,2 \div 0,3)g$).

4.4.3.1.3. Xử lý số liệu và đánh giá kết quả

Các thông số đo lường: Thời gian thử nghiệm, vận tốc thử nghiệm, góc lái, góc quay bánh xe dẫn hướng, mô men lái, mô men trợ lực, vận tốc góc xoay thân xe, gia tốc ngang.

Các số liệu thử nghiệm được xử lý, tính toán và đánh giá các chỉ tiêu như trong Bảng PL4.5 và Bảng PL4.6.

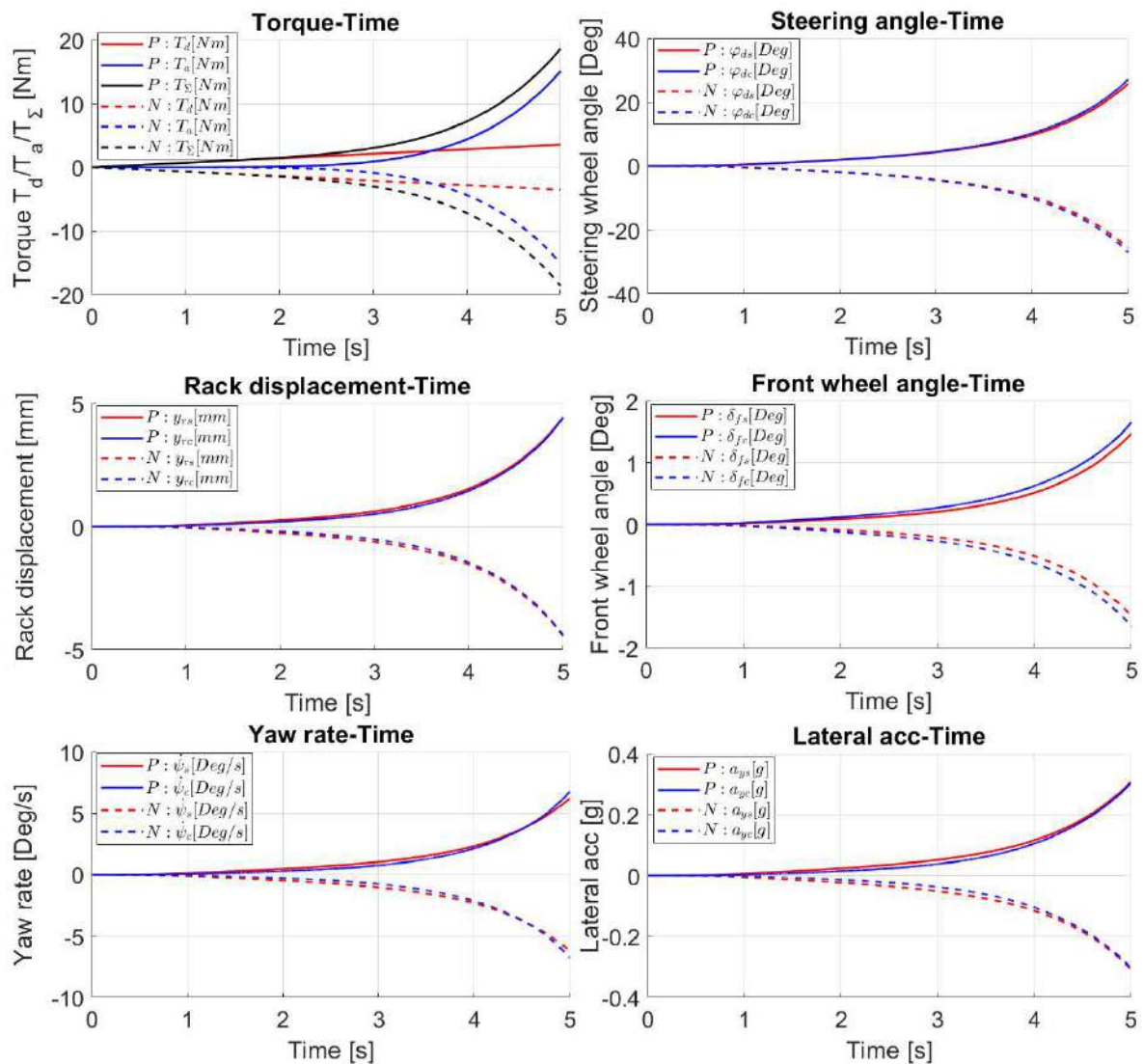
4.4.3.2. Kết quả và đánh giá kết quả thử nghiệm

4.4.3.2.1. Thử nghiệm

Từ quy định trên, luận án thực hiện mô phỏng: vận tốc ô tô $v = 100 \text{ km/h}$; mô men lái sóng hình sin, thực hiện đánh lái rất chậm từ vị trí trung gian sang trái và từ vị trí trung gian sang phải, giá trị đỉnh sóng mô men đảm bảo tạo ra gia tốc ngang của xe đặt đỉnh $0,3g$ trong khoảng thời gian 5s. Kết quả thử nghiệm ảo được thể hiện như Hình PL4.45 và Hình PL4.46.

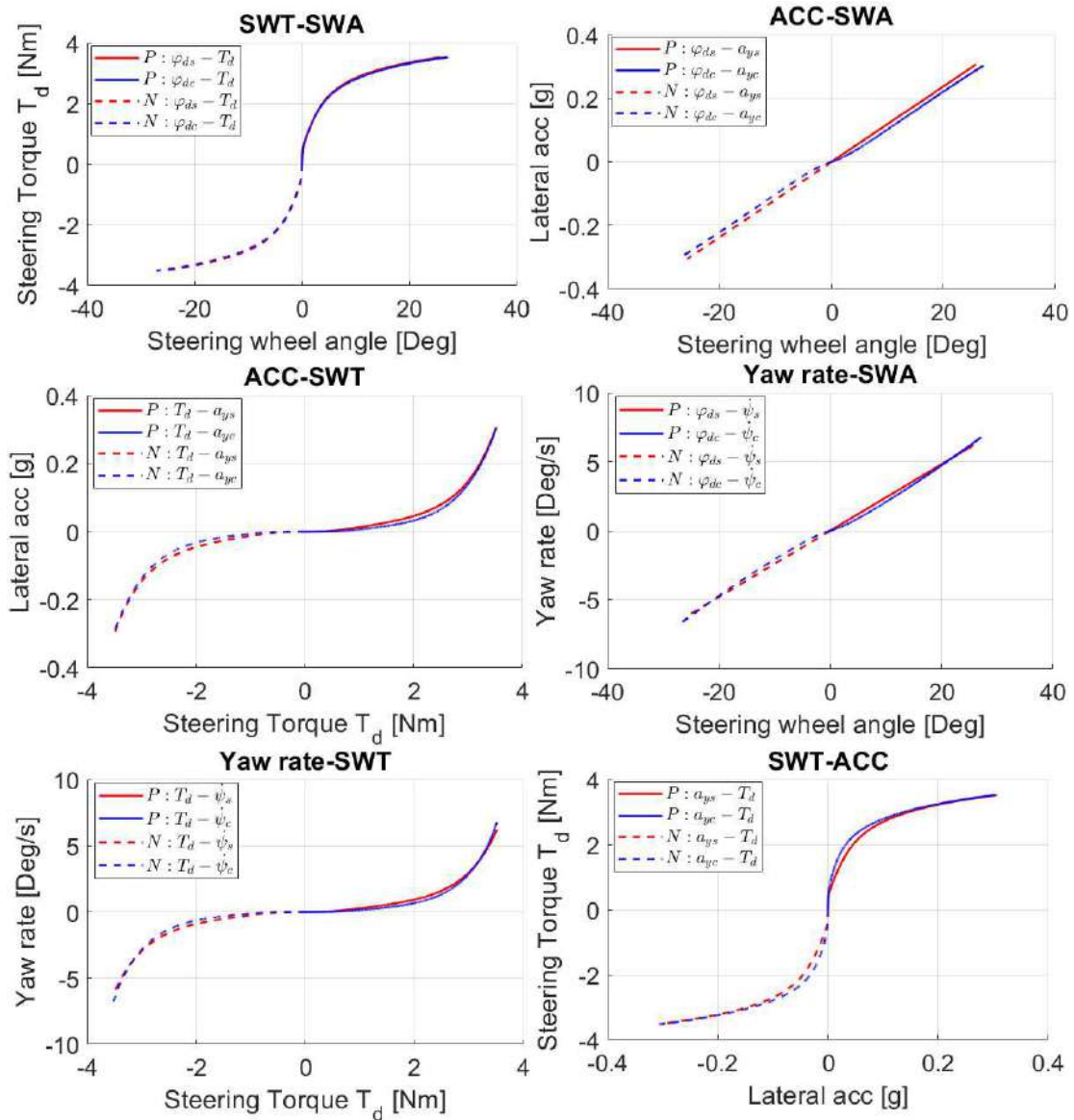
Bảng PL4.5. Bảng so sánh KQMP chuyển trạng thái Simulink và CarSim

Tham số <i>Parameter</i>	Đơn vị <i>Unit</i>	Chiều <i>Direction</i>	RMS(x)			Max x		
			Simulink	CarSim	Error	Simulink	CarSim	Error
Time	(s)		2,887	2,887	0,00%	5,000	5,000	0,00%
T_d	[Nm]		2,032	2,032	0,00%	3,520	3,520	0,00%
φ_d	[°]		8,261	8,653	4,53%	25,782	27,137	4,99%
y_r	[mm]	Sang trái	1,361	1,319	3,09%	4,416	4,436	0,46%
δ_f	[°]		0,494	0,527	6,31%	1,573	1,654	4,88%
a_y	[g]		0,098	0,093	5,54%	0,306	0,303	1,07%
$\dot{\psi}$	[°/s]		1,987	1,973	0,68%	6,200	6,773	8,45%
T_d	[Nm]		2,032	2,032	0,00%	3,520	3,520	0,00%
φ_d	[°]		8,259	8,653	4,55%	25,782	27,137	4,99%
y_r	[mm]	Sang phải	1,361	1,319	3,06%	4,416	4,436	0,46%
δ_f	[°]		0,494	0,527	6,32%	1,573	1,654	4,88%
a_y	[g]		0,098	0,093	5,52%	0,306	0,303	1,07%
$\dot{\psi}$	[°/s]		1,986	1,973	0,66%	6,201	6,773	8,45%



Hình PL4.45. KQMP thử nghiệm chuyển trạng thái, (P) sang trái; (N) sang phải

Nhận xét về tính tương đồng dữ liệu theo thời gian: Từ Hình PL4.45 và Bảng PL4.5 cho thấy. Dưới điều kiện bài thử nghiệm chuyển trạng thái chuyển động, kết quả giữa Matlab/Simulink và CarSim thể hiện mức tương hợp cao. Chuỗi thời gian của mô men lái, góc vành tay lái, dịch chuyển thanh răng, góc bánh trước, gia tốc ngang và tốc độ quay thân xe hầu như đồng pha, tăng gần tuyến tính, không xuất hiện trễ đáng kể ở cả hai chiều đánh lái. Về định lượng, cung đầu vào là mô men lái như nhau, sai khác RMS nhỏ: góc vành tay lái 4,53%, dịch chuyển thanh răng 3,09%, góc bánh trước 6,31%, gia tốc ngang 5,54%, tốc độ quay thân xe 0,68%. Ở mức cực đại, sai khác cũng thấp: góc vành tay lái 4,99%, dịch chuyển thanh răng 0,46%, góc bánh trước 4,88%, gia tốc ngang 1,07%. Khác biệt đáng lưu ý là cực đại tốc độ quay thân xe $\approx 8,45\%$ trong khi RMS rất nhỏ, gợi ý CarSim dự báo biên độ vận tốc xoay thân xe lớn hơn do tham số hoá lớp/độ mềm hệ thống lái hoặc khác biệt thuật toán giải. Tổng thể, Matlab/Simulink đủ tin cậy cho phân tích chuyển trạng thái chuyển động.



Hình PL4.46. KQMP Thử nghiệm cảm giác lái chuyển trạng thái

Bảng PL4.6. Bảng so sánh chỉ tiêu cảm giác lái chuyển trạng thái Simulink và CarSim

TT No	Tham số Parameter	Ký hiệu Symbol	Đơn vị Unit	Giá trị Values		Sai lệch Error	Giá trị Values		Sai lệch Error
				SML	CS		SML	CS	
				Sang trái			Sang phải		
I	Đặc tính $T_d - \varphi_d$ /Characteristic $T_d - \varphi_d$								
1.1	Độ cứng lái trung bình (Mean Steering stiffness)	K_p	$[Nm/^\circ]$	0,144	0,159	9,55%	0,144	0,159	9,54%
1.2	Độ cứng lái tại góc lái bằng 0 (Steering stiffness at zero steer)	K_n	$[Nm/^\circ]$	2,088	2,200	5,11%	2,088	2,200	5,11%
1.3	Hệ số tuyến tính R^2 (Linearity R^2)	$[R^2]$	-	0,950	0,923	2,92%	0,950	0,923	2,90%
1.4	Mô men lái lớn nhất (Maximum torque)	$[T_{dmax}]$	$[Nm]$	3,520	3,520	0,00%	3,520	3,520	0,00%
1.5	Góc lái lớn nhất (Maximum steering angle)	$[\varphi_{dmax}]$	$[^\circ]$	25,78	27,13	4,99%	25,78	27,13	4,99%

II Đặc tính $a_y - \varphi_d$/Characteristic $a_y - \varphi_d$									
Độ nhạy gia tốc ngang									
2.1	trung bình (Mean sensitivity)	S_p	$[g/^\circ]$	0,012	0,011	9,38%	0,012	0,011	9,38%
Độ nhạy lái tại góc lái bằng 0									
2.2	(Mean sensitivity at swa = 0)	S_n	$[g/^\circ]$	0,012	0,011	9,20%	0,012	0,011	9,20%
2.3	Hệ số tuyến tính R^2 (Linearity R^2)	$[R^2]$	-	1,000	0,997	0,35%	1,000	0,997	0,35%
III Đặc tính $T_d - a_y$/Characteristic $T_d - a_y$									
Độ dốc mô men lái tại gia tốc bằng 0 m/s^2									
3.1	(Torque gradient at 0)	G_{T0}	$[Nm/g]$	53,22 3	58,89 4	9,63%	53,22 3	58,89 4	9,63%
Độ dốc mô men lái tại gia tốc bằng 0,1g									
3.2	(Torque gradient at 0,1g)	G_{T1}	$[Nm/g]$	8,310	7,658	7,85%	8,240	7,658	7,07%
3.3	Hệ số tuyến tính R^2 (Linearity R^2)	$[R^2]$		0,870	0,786	9,59%	0,870	0,787	9,55%
Giá trị cực đại của gia tốc ngang									
3.4	(Peak value of lateral acceleration)	$[a_{ymax}]$	$[g]$	0,306	0,303	1,07%	0,306	0,303	1,07%
Giá trị cực đại của mô men lái									
3.5	(Peak value of Steering Torque)	$[T_{dmax}]$	$[Nm]$	3,520	3,520	0,00%	3,520	3,520	0,00%
IV Đặc tính $\psi - \varphi_d$/Characteristic $\psi - \varphi_d$									
Độ nhạy góc xoay thân xe theo góc lái tại tâm									
4.1	(Yaw gain vs SWA on-centre)	$G_{\psi 0}$	$[(^\circ/s)/^\circ]$	0,241	0,219	9,15%	0,241	0,219	9,15%
4.2	Hệ số tuyến tính R^2 (Linearity R^2)	$[R^2]$	-	1,000	0,997	0,32%	1,000	0,997	0,32%
V Đặc tính $\psi - T_d$/Characteristic $\psi - T_d$									
Độ nhạy góc xoay thân xe theo mô men lái tại tâm									
5.1	(Yaw gain vs torque on-centre)	$G_{\psi T}$	$[(^\circ/s)/(Nm)]$	0,031	0,028	9,75%	0,031	0,028	9,75%
5.2	Hệ số tuyến tính R^2 (Linearity R^2)	$[R^2]$	-	0,933	0,965	3,33%	0,933	0,965	3,33%

4.4.3.2.2. Đánh giá kết quả thử nghiệm

a. Nhận xét về tính tương đồng dữ liệu đánh giá cảm giác lái

Phân tích thử nghiệm chuyển trạng thái. Từ Hình PL4.46 và Bảng PL4.6 cho thấy:

Các đồ thị quan hệ (SWT-SWA, ACC-SWA, Yaw-SWA, SWT-ACC) của Matlab/Simulink và CarSim chồng khít, nhánh tăng/giảm gần trùng nhau ở cả hai chiều đánh lái, cho thấy đáp ứng gần tuyến tính và vòng trễ rất nhỏ quanh vị trí trung tâm.

Theo bảng chỉ tiêu, độ cứng lái trung bình của Matlab/Simulink thấp hơn CarSim ~9,5% (0,144 so với 0,159 Nm/°); độ cứng tại góc lái bằng 0 chênh ~5,1%. Ngược lại, độ nhạy gia tốc ngang theo góc lái của Matlab/Simulink cao hơn ~9÷9,4% (0,012 so với

0,011 g/°). Độ dốc mô men theo gia tốc ngang tại $a_y = 0$ chênh ~9,6% (Matlab/Simulink nhỏ hơn), còn tại 0,1g chênh ~7,1% (Matlab/Simulink lớn hơn). Các hệ số tuyến tính R^2 đều rất cao ($\approx 0,95 \div 1,00$), xác nhận quan hệ gần tuyến tính. Giá trị cực đại trùng khớp: mô men lớn nhất 3,52 Nm, gia tốc ngang cực đại ~0,306 g (sai khác ~1%). Độ nhạy vận tốc xoay thân xe theo góc lái và theo mô men ở tâm trong CarSim nhỏ hơn Matlab/Simulink ~9÷10%, hàm ý CarSim dự báo phản ứng xoay thân xe bảo thủ hơn. Kết quả cho thấy hai mô hình cho mức tương đồng cao cả về hình thái và định lượng; sai khác tập trung ở nhóm độ cứng và độ nhạy (~7÷10%), có thể do tham số hóa lớp, ma sát-đàn hồi hệ thống lái và khác biệt thuật toán giải. Matlab/Simulink là mô hình đủ tin cậy cho phân tích và hiệu chỉnh cảm giác lái trong bài thử nghiệm chuyên trạng thái.

b. Đánh giá cảm giác lái từ chỉ tiêu khách quan đến mô tả chủ quan

So sánh các giá trị trong Bảng PL4.6 với Bảng 2.3, bảng các chỉ tiêu đánh giá cảm giác lái khách quan trong luận án, cho thấy:

- Cảm giác ban đầu quanh 0°: tay lái mượt, ổn định, nhưng hơi có độ dính/độ rơ nhỏ. Khi đảo chiều rất nhỏ người lái có thể thấy “dính nhẹ” rồi mới “ăn”.

- Tính nhạy xử lý trung tâm: do $S_n \sim 0.011$ g/° và hệ số nhạy vận tốc xoay thân xe ~0.22÷0.24, cảm giác chưa thật “sống/sắc” ở pha đầu; cần xoay vành tay lái hơi nhiều để xe phản hồi.

- Khi rời tâm: phản hồi trở nên chắc và liền lạc, diện tích vòng trễ nhỏ tạo độ mượt tốt; không có xu hướng giật hoặc dao động.

- Tổng thể: an toàn, dễ đoán, thiên về “êm - ổn định” hơn là “sắc - nhanh”.

c. Đánh giá tính phù hợp bản đồ đặc tính trợ lực lái C-EPS

- Bản đồ đặc tính trợ lực lái hiện tại ưu tiên ổn định và chắc tay trợ lực cao ở tâm, giảm nhanh theo a_y). Đổi lại, độ nhạy xử lý trung tâm bị hy sinh và khởi phát phản hồi theo mô men còn trễ.

4.4.4. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ (Steering effort test at standstill)

4.4.4.1. Mục đích, phương pháp, xử lý số liệu thử nghiệm

4.4.4.1.1. Mục đích

Bài thử nghiệm quay vòng tại chỗ thuộc nhóm các phép thử đánh giá đặc tính điều khiển ổn định của hệ thống lái, đặc biệt nhằm kiểm tra:

Khả năng tạo và điều khiển mô men lái trong điều kiện xe đứng yên hoặc tốc độ rất thấp.

Mức độ hỗ trợ của hệ thống trợ lực lái điện thông qua bản đồ đặc tính trợ lực lái để đảm bảo cảm giác lái “nhẹ - chính xác - nhất quán”.

Đánh giá cảm giác lái tĩnh học: Độ nặng tay, độ mượt, độ đồng nhất của trợ lực trong vùng ma sát khởi động và khi đổi chiều quay lái.

Kiểm tra tính phù hợp của bản đồ đặc tính trợ lực lái, đặc biệt ở tốc độ thấp, nơi ảnh hưởng lớn đến cảm giác “nặng/nhẹ” khi đỗ xe, quay đầu, hoặc thao tác trong không gian hẹp.

4.4.4.1.2. Phương pháp thử nghiệm

Xe đứng yên, bánh xe trước đặt trên bề mặt có độ bám cao, vô hiệu hóa hệ thống phanh. Người lái hoặc rô bốt điều khiển xoay vành tay lái từ vị trí trung tâm sang trái hoặc phải đến hết hành trình góc lái, rồi quay trở lại vị trí trung tâm.

4.4.4.1.3. Xử lý dữ liệu thử nghiệm

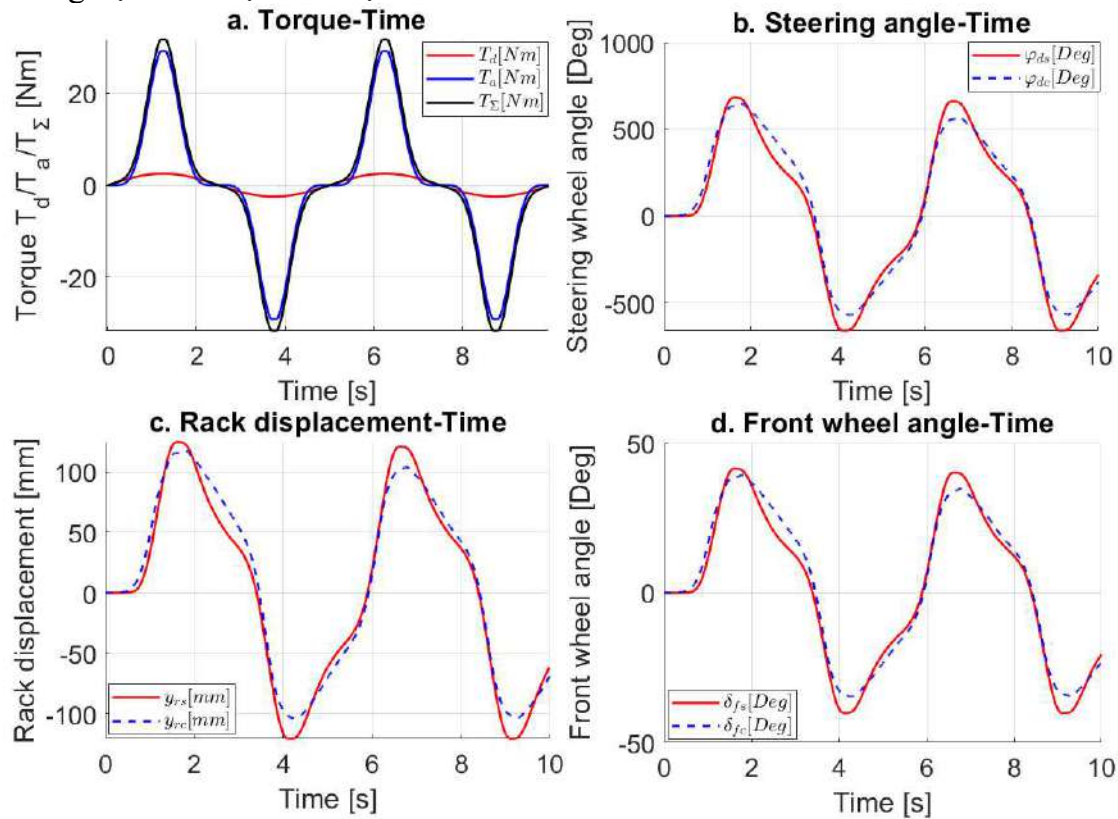
Thông số đo lường: Thời gian thử nghiệm, góc lái, góc quay bánh xe dẫn hướng, mô men lái, mô men trợ lực. Các đại lượng được tính toán từ tín hiệu đo như trong Bảng

PL4.7 và Bảng PL4.8.

4.4.4.2. Thử nghiệm và đánh giá kết quả thử nghiệm

4.4.4.2.1. Thử nghiệm

Từ quy định trên, luận án thực hiện mô phỏng: vận tốc $v=0 \text{ km/h}$; thực hiện đánh lái hình sin tần số $0,2\text{Hz}$, giá trị đỉnh sóng mô men đảm bảo vành tay lái đi hết hành trình từ vị trí trung gian - sang trái - sang phải - về trung gian trong khoảng thời gian 5s . Kết quả thử nghiệm ảo được thể hiện như Hình PL4.47 và Hình PL4.48.



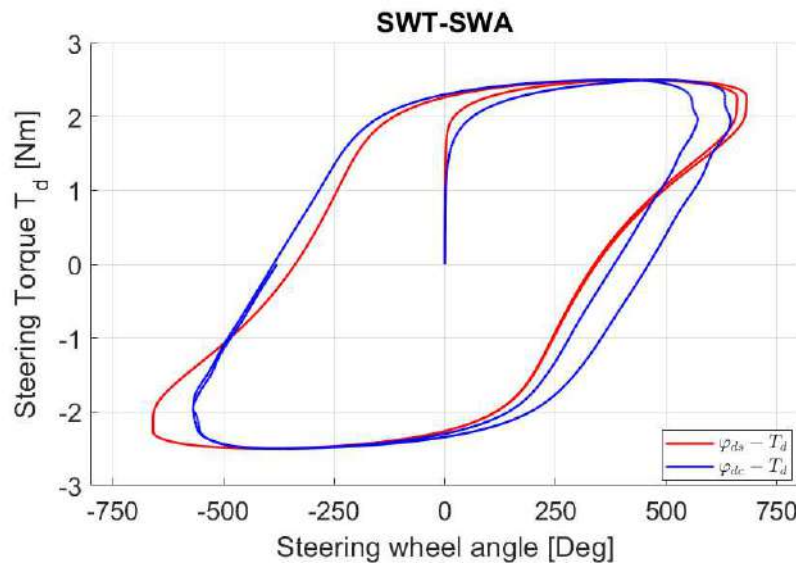
Hình PL4.47. KQMP Bài thử nghiệm quay vòng tại chỗ

Bảng PL4.7. Bảng so sánh KQMP quay vòng tại chỗ Simulink và CarSim

Tham số <i>Parameter</i>	Đơn vị <i>Unit</i>	RMS(x)			Max x		
		Simulink	CarSim	Sai lệch Error	Simulink	CarSim	Sai lệch Error
Time	(s)	5,774	5,774	0,00%	10,000	10,000	0,00%
T_d	[Nm]	1,768	1,768	0,00%	2,500	2,500	0,00%
φ_d	[°]	421,131	408,798	2,93%	682,012	645,627	5,33%
y_r	[mm]	77,023	74,664	3,06%	124,684	117,754	5,56%
δ_f	[°]	25,615	24,917	2,72%	41,466	39,352	5,10%

Nhận xét về tính tương đồng dữ liệu theo thời gian: Từ Hình PL4.47 và Bảng PL4.7 cho thấy. Trong phép thử quay vòng tại chỗ, kết quả giữa Matlab/Simulink và CarSim cho thấy mức tương hợp rất cao, các đồ thị mô men lái, góc vành tay lái, dịch chuyển thanh răng và góc bánh trước chòng khít về pha, tăng đối xứng theo thời gian và hầu như không xuất hiện vòng trễ. Về định lượng, mô men lái trùng khớp tuyệt đối ($\text{RMS} \approx 1,768 \text{ Nm}$; cực đại $2,50 \text{ Nm}$; thời gian chu kỳ 10 s). Sai khác còn lại đều nhỏ, góc vành tay lái lệch $2,93\%$ theo RMS và $5,33\%$ ở cực đại; dịch chuyển thanh răng lệch $3,06\%$ và $5,56\%$; góc bánh trước lệch $2,72\%$ và $5,10\%$. Các chênh lệch chủ yếu xuất hiện ở vùng gần cực trị, nhiều khả năng do khác biệt tính chỉnh tỷ số truyền lái và hành trình thanh răng, định nghĩa giới hạn cơ khí, cũng như mô hình ma sát và đàn hồi trong hệ thống trợ lực điện. Tổng thể, mô hình

Matlab/Simulink đủ độ tin cậy để thay thế CarSim trong đánh giá đặc tính quay vòng tại chỗ và hiệu chỉnh hệ thống lái.



Hình PL4.48. KQMP Đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ

Bảng PL4.8. Bảng so sánh chỉ tiêu cảm giác lái quay vòng tại chỗ Simulink và CarSim

TT No	Tham số Parameter	Ký hiệu Symbol	Đơn vị Unit	Giá trị/Values		Sai lệch Error
				SML	CS	
1	Độ cứng lái trung bình-chiều dương (Steering stiffness-positive)	K_p	$[Nm/^\circ]$	0,0018	0,0016	7,60%
2	Độ cứng lái trung bình-chiều âm (Steering stiffness-negative)	K_n	$[Nm/^\circ]$	0,0018	0,0016	7,57%
3	Độ cứng lái tại góc lái bằng 0-chiều dương (Steering stiffness at zero steer-positive)	K_{p0}	$[Nm/^\circ]$	0,0015	0,0014	4,95%
4	Độ cứng lái tại góc lái bằng 0-chiều âm (Steering stiffness at zero steer-negative)	K_{n0}	$[Nm/^\circ]$	0,0015	0,0013	8,27%
5	Hệ số bất đối xứng (Asymmetry ratio)	$[K_{r_{swt-swa}}]$	-	1,0030	0,9815	2,14%
6	Mô men lái lớn nhất (Maximum torque)	$[T_{dmax}]$	$[Nm]$	2,5000	2,5000	0,00%
7	Góc lái lớn nhất (Maximum steering angle)	$[\varphi_{dmax}]$	$[^\circ]$	660,320	570,92	13,5%
8	Hệ số tuyến tính R^2 - chiều dương (Linearity R^2 -positive)	$[R^2](+)$	-	1,0000	0,9665	3,35%
9	Hệ số tuyến tính R^2 - chiều âm (Linearity R^2 -negative)	$[R^2](-)$	-	0,9626	0,9150	4,95%
10	Độ trễ mô men lái và góc lái (Steering torque - Steering angle time lag)	$[\tau_{swt/swa}]$	$[s]$	0,6691	0,7225	7,39%
11	Diện tích vòng trễ (Steering work per cycle)	$[A_{swt.swa}]$	$[J]$	-	62,372	-
12	Vùng chết mô men (Steering friction - Torque deadband)	$[T_d(\varphi_d(0))]$	$[Nm]$	2,2633	2,2998	1,59%

4.4.4.2.2. Đánh giá kết quả thử nghiệm

a. Nhận xét về tính tương đồng dữ liệu đánh giá cảm giác lái

Từ Hình PL4.48 và Bảng PL4.8 cho thấy. Trong phép thử quay vòng tại chỗ, hai mô

hình cho mức tương hợp cao về hình thái: đường quan hệ mô men lái - góc lái của Matlab/Simulink và CarSim gần chồng khít, vòng trễ nhỏ và phân nhánh trái/phải gần đối xứng (tỷ số bất đối xứng $\approx 1,00$; sai lệch $\sim 2\%$). Các đặc trưng định lượng cũng sát nhau, mô men lớn nhất trùng khớp 2,50 Nm; vùng chết mô men quanh vị trí trung tâm sai khác $\sim 1,6\%$; độ trễ thời gian của cặp tín hiệu mô men lái - góc lái lệch $\sim 7\%$. Chênh lệch đáng chú ý nằm ở “độ cứng lái”: giá trị trung bình theo cả hai chiều của Matlab/Simulink cao hơn CarSim khoảng $7\div 8\%$ và tại góc lái bằng không lệch $5\div 8\%$, hàm ý cảm giác nặng tay hơn trong mô hình Matlab/Simulink. Ngoài ra, góc lái cực đại của Matlab/Simulink lớn hơn khoảng $13,5\%$ (660° so với 571°), cho thấy khác biệt tham số hóa hành trình thanh răng/tỷ số truyền hoặc định nghĩa điểm dừng cơ khí. Hệ số tuyến tính R^2 đều rất cao ($\approx 0,96\div 1,00$), xác nhận quan hệ gần tuyến tính ngoài vùng dừng. Tổng thể, Matlab/Simulink tái hiện tốt đặc tính quay vòng tĩnh.

b. Đánh giá cảm giác lái từ chỉ tiêu khách quan đến mô tả chủ quan

Từ giá trị trong Bảng PL4.8, cho thấy:

Kết quả quay vòng tại chỗ cho thấy độ cứng tay lái trung bình hai chiều gần tương đương ($K_p \approx 0,0018$; $K_n \approx 0,0018$ ở Matlab/Simulink và $\approx 0,0016$ ở CarSim), tuyến tính cao ($R^2(+)\approx 1,00$; $R^2(-)\approx 0,95\div 0,96$) và mức bất đối xứng nhỏ ($K_r \approx 0,98\div 1,00$), nên khi đã vượt ma sát ban đầu cảm giác tay lái đều, dễ dự đoán ở cả hai chiều. Tuy vậy, vùng trung tâm còn hơi nặng: mô men khởi động $T_{d(\varphi d=0)} \approx 2,26\div 2,30\text{Nm}$ làm người lái phải “ra lực” rõ mới bắt đầu quay; đồng thời độ trễ mô men lái và góc lái $\approx 0,67$ đến $0,72$ và vòng trễ dày khi đổi chiều, gây cảm giác khác nhẹ quanh 0° . Ở gần giới hạn hành trình, $T_{dmax} \approx 2,5\text{Nm}$ giúp nhận biết điểm chặn rõ ràng mà không quá gắt, phù hợp thao tác đảo/quay đầu.

c. Đánh giá bản đồ đặc tính trợ lực lái C-EPS (Assist map)

Bản đồ đặc tính trợ lực lái hiện tại giữ được độ đều ở dải giữa hành trình, độ dốc tổng ổn định, R^2 cao, K_r gần 1 nên không lệch trái/phải, vì vậy cảm giác sau khi vánh tay lái đã chuyển động là tự nhiên và nhất quán. Điểm cần cải thiện nằm ở vùng trung tâm: bù ma sát tĩnh còn thiếu nên $T_d(\varphi_d(0))$ cao, thời gian chuyển lực qua 0° dài và vòng trễ còn lớn, dẫn tới nặng tay khi bắt đầu quay. Tóm lại, bản đồ đặc tính trợ lực lái đáp ứng tốt ở dải giữa và cuối hành trình, nhưng cần tăng bù ma sát tĩnh có điều kiện và làm mượt chuyển tiếp quanh 0° , giảm trễ, thu hẹp vòng trễ, để đạt cảm giác “nhẹ - êm - nhất quán” đúng mục tiêu của hệ C-EPS khi quay tại chỗ.

4.4.5. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu bước (Step steering input test)

4.4.5.1. Mục đích, phương pháp, xử lý số liệu thử nghiệm

4.4.5.1.1. Mục đích

Thử nghiệm với tín hiệu bước được trình bày trong tiêu chuẩn GB/T 6323-2014 và ISO 7401:2011. Bài thử này đánh giá khả năng phản ứng nhanh, độ nhạy và tính ổn định tức thời của hệ thống lái thông qua kích thích góc lái dạng bước. Bao gồm:

- Đánh giá cảm giác lái phản ứng tức thời tại vùng trung tâm - tức phản ứng đầu tiên của xe khi người lái quay vánh tay lái nhanh trong vùng tâm. Liên quan trực tiếp đến cảm giác “nhảy”, “chắc” hay “ì” của tay lái.

- Phân tích sự phối hợp giữa tốc độ phản ứng vận tốc xoay thân xe, gia tốc ngang, và mô men lái trong pha khởi động đánh lái.

- Kiểm chứng bản đồ đặc tính trợ lực lái: EPS có đủ nhanh để tạo cảm giác tự nhiên, không bị “trễ” hoặc “trợ lực vượt quá”; mô men trợ lực tăng đúng tỷ lệ với vận tốc và mô men lái.

4.4.5.1.2. Phương pháp thử nghiệm

- Xác định tốc độ thử không lớn hơn 70% tốc độ tối đa của xe, làm tròn đến bội số 10, nhưng không vượt quá 120 km/h.

- Xác định trước góc lái: chọn góc quay tương ứng với các giá trị gia tốc ngang ổn định $a_y = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 \text{ m/s}^2$.

- Thực hiện thử: xe chạy thẳng ở tốc độ thử, loại bỏ hành trình rơi tự do của vành tay lái, bắt đầu ghi dữ liệu. Sau $0,2 \pm 0,5 \text{ s}$, quay vành tay lái nhanh ($\leq 0,2 \text{ s}$ hoặc $\geq 200^\circ/\text{s}$) đến vị trí đã chọn và giữ vài giây cho đến khi các biến ổn định.

4.4.5.1.3. Xử lý dữ liệu thử nghiệm

Thông số đo lường: Thời gian thử nghiệm, vận tốc thử nghiệm, góc lái, góc quay bánh xe dẫn hướng, mô men lái, mô men trọng lực, vận tốc góc xoay thân xe, gia tốc ngang.

Các đại lượng được tính toán từ tín hiệu đo như trong Bảng PL4.9. Trong đó:

$$\Delta\psi = |\psi(t_r + 3) - \psi_0|; \sigma = 100\% \frac{|\psi_{peak}| - |\psi_0|}{|\psi_0|}$$

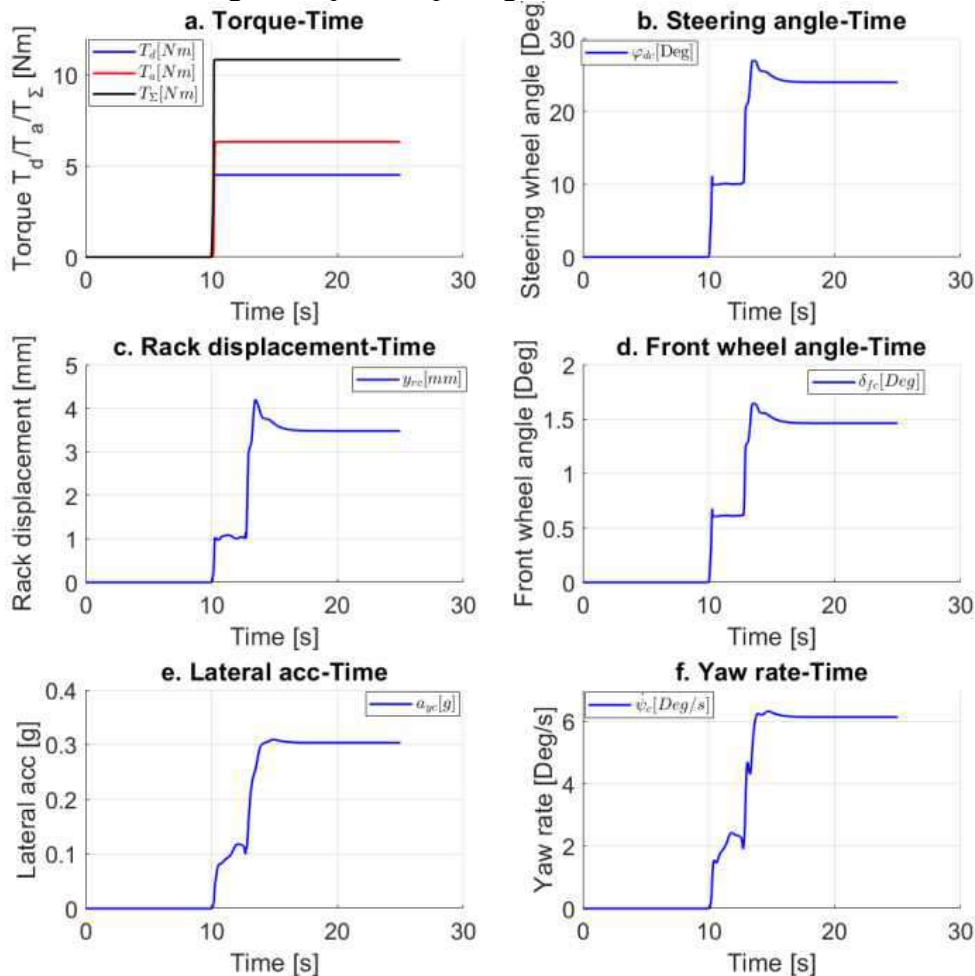
$$E_\psi = \int_{t_0}^{t_0+T} |\dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_0|^2 dt \quad (T - \text{thời gian đạt đến ổn định mới})$$

$$E_{a_y} = \int_{t_0}^{t_0+T} |a_y(t) - a_{y0}|^2 dt; G_{a_y} = \frac{a_{y0}}{\varphi_{d0}}; G_\psi = \frac{\dot{\psi}_0}{\varphi_{d0}}$$

4.4.5.2. Thử nghiệm và đánh giá kết quả thử nghiệm

4.4.5.2.1. Thử nghiệm

Theo yêu cầu trên, luận án tiến hành thử nghiệm ảo: Vận tốc ô tô $v = 100 \text{ km/h}$; mô men lái dạng Step kích thích trong $0,2\text{s}$, giá trị đỉnh mô men đảm bảo tạo ra gia tốc ngang của xe đạt đỉnh $0,3g$. Kết quả mô phỏng được thể hiện như Hình PL4.49.



Hình PL4.49. KQMP Phản ứng tức thời với kích thích bước (Đánh lái sang trái)

Bảng PL4.9. Bảng chỉ tiêu đánh giá cảm giác lái lái phản ứng tức thời

TT No	Tham số <i>Parameter</i>	Ký hiệu <i>Symbol</i>	Đơn vị <i>Unit</i>	Giá trị <i>Values</i>		Sai lệch <i>Error</i>	Đánh giá
				trái	phải		
1	Thời gian thử nghiệm (Test duration)	t	[s]	25	25	0%	Giá trị phù hợp với $a_y \approx 0.294 \text{ g}$
2	Thời điểm 5% góc lái (Time at 5% steering angle)	$\varphi_d(5\%)$	[t]	10,074	10,074	0%	
3	Góc lái ổn định (Steering angle steady)	φ_{do}	[$^\circ$]	23,793	-23,793	0%	
4	Vận tốc xoay thân xe ổn định (yaw rate steady)	$\dot{\psi}_0$	[$^\circ/\text{s}$]	6,082	-6,082	0%	
5	Gia tốc ngang ổn định (Lateral acc steady)	a_{y0}	[g]	2,940	-2,940	0%	
6	Độ vượt của vận tốc xoay thân xe (Overshoot of yaw rate)	σ	[%]	2,484	2,484	0%	< 5 % → dao động thấp, hệ thống có giảm chấn tốt
7	Tổng phương sai vận tốc xoay thân xe (Total deviation of yaw rate)	E_ψ	[s]	0,084	0,084	0%	Nhỏ → dao động ít, ổn định
8	Tổng phương sai gia tốc ngang (Total deviation of lateral acceleration)	E_{a_y}	[s]	0,089	0,089	0%	Nhỏ → cảm giác êm dịu, giảm quá độ.
9	Hệ số nhạy vận tốc xoay thân xe (yaw rate sensitivity gain)	G_ψ	[($^\circ/\text{s}$) / $^\circ$]	0,256	0,256	0%	Đặc trưng phản ứng ôn hòa, thiên về êm dịu, ổn định, không quá nhạy hay đột ngột
10	Hệ số nhạy gia tốc ngang (Lateral acc sensitivity gain)	G_{a_y}	[g/ $^\circ$]	0,0124	0,0124	0%	Tuyến tính, nằm vùng ổn định.
11	Thời gian đạt 10% giá trị ổn định (Time to reach 10% of steady-state)	t_{10}	[s]	0,176	0,176	0%	Chậm-vừa, êm ái, thiên an toàn
12	Thời gian đạt 50% giá trị ổn định (Time to reach 50% of steady-state)	t_{50}	[s]	2,830	2,830	0%	
13	Thời gian đạt 90% giá trị ổn định (Time to reach 90% of steady-state)	t_{90}	[s]	3,469	3,469	0%	
14	Thời gian tăng từ 10% đến 90% (Rise time from 10% to 90%)	t_{10-90}	[s]	3,293	3,293	0%	
15	Trễ pha giữa góc lái và vận tốc xoay thân xe (Phase time lag SWA-yaw rate)	τ	[s]	0,109	0,109	0%	Phản hồi nhanh, ổn định.
16	Mô men cực đại của góc lái	T_{dmax}	[Nm]	4,506	-4,506	0%	Cho cảm giác trung

(Peak steering torque)

tính-hơi nhẹ ở cao
tốc: hợp “sang-êm”,
nhưng chưa đầm
nếu hướng “thể
thao”

4.4.5.2.2. Đánh giá kết quả thử nghiệm

a. Đánh giá cảm giác lái từ chỉ tiêu khách quan đến mô tả chủ quan

- Khách quan: Dựa vào các giá trị trong Bảng PL4.9, cho thấy hệ thống cho độ ổn định cao (σ , E_r thấp), độ trễ pha nhỏ, đối xứng trái/phải tốt, xe đi thẳng và phản ứng ổn định.

- Chủ quan: Cảm giác lái “chắc tay, bám đường, êm dịu”, không bị văng đuôi khi kích thích nhanh. Tuy nhiên, thời gian tích lũy đáp ứng 3.29s khiến phản ứng chuyển làn chưa “sắc” → phù hợp xe hạng E thiên êm ái, ít thể thao.

b. Đánh giá bản đồ đặc tính trợ lực lái C-EPS (Assist map)

- Với σ , E_r , E_{ay} đều nhỏ và thời gian trễ τ ngắn, bản đồ C-EPS hiện tại đang phân bố trợ lực ổn định và hiệu quả.

- Tuy nhiên, ở tốc độ 100 km/h, cảm giác lái có thể hơi nhẹ → còn thiếu “độ đầm” cần thiết trong đường cao tốc.

- Về cấu trúc điều khiển, bản đồ đang duy trì độ cản phù hợp; không cần tăng thêm vì sẽ làm kéo dài t_{50}/t_{90} và giảm tính linh hoạt.

PHỤ LỤC V: MÃ CODE CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH

5.1. MÃ CHƯƠNG TRÌNH CHẠY MÔ PHÒNG

5.1.1. Mã chương trình thiết kế tối ưu động học hình thang lái Ackermann

```
% Thông số đầu vào%
l4= 0.702;
l5=0.377; %m chiều dài đòn thanh nối bên hình thang lái
l6=0.154; %m chiều dài đòn bên hình thang lái
l7=l5;
l8=l6;
l9=0.0395;
l10=l9;
h=0.175; %m khoảng cách trục thuộc lái và đòn ngang
m=1.521; %m khoảng cách tam trụ dung
Lcs=3.05; %m chiều dài cơ sở xe
L= Lcs;
phi60=77.5; %[Do] Góc ban đầu đòn quay bên
phi80=phi60; %[Do] Góc ban đầu đòn quay bên
phi50 = 0.0654323963; %[Rad] Góc ban đầu thanh day bên
phi70 = phi50; %[Rad] Góc ban đầu thanh day bên
rp=0.0105; %m bán kính trục rang
r=rp;
rw = 0.353; %m bán kính bánh xe
gc = 3.5*pi/180; %rad góc caster (0-3) độ
gp = 8*pi/180; %rad góc kingpin (0-8) độ
lw=0.0395; %m độ dài ngồng trục bánh xe dẫn hướng
lw1= lw*0.9; %m tọa độ trong tam thanh 8 so với tam quay
%b=0.14*rw; %m lệch sau của phản lực ngang
rss = 0.16; %m bán kính vành tay lái

m1 = 2.557; %kg
m2 = 1.973; %kg
m3 = 0.074; %kg
m4 = 2.370; %kg
m5 = 0.337; %kg
m6 = 45.117; %kg
m7 = m5; %kg
m8 = m6; %kg

J1 = 0.009787; %kg.m2
J2 = 0.000099; %kg.m2
J3 = 0.000004; %kg.m2
J4 = 0.000185; %kg.m2
J5 = 0.016239; %kg.m2
J6 = 1.303406; %kg.m2
J7 = J5; %kg.m2
J8 = J6; %kg.m2

%-----
%%%%%%%% THIẾT KẾ TỐI ƯU HÌNH THANG LÁI
t = 0:0.5:5;
alp = 0:4:40;
bet = acot((m/L + cot(alp*pi/180)))*180/pi;

% Khởi tạo giá trị ban đầu cho l4, l5, l6, phi50, phi60
initial_params = [0.63, 0.4, 0.18, -2.67, 70, 0.15]; % [l4, l5, l6, phi50, phi60, h]

% Tùy chọn cho tối ưu hóa
```

```

options = optimset('Display', 'iter', 'TolFun', 1e-6, 'TolX', 1e-6);

% Tối ưu hóa
[optimal_params, fval] = fminunc(@(params) objective_function(params, rp, m),
initial_params, options);

% % Hiển thị kết quả

fprintf('Giá trị tối ưu:\n');
fprintf('l4 = %.4f\n', optimal_params(1));
fprintf('l5 = %.4f\n', optimal_params(2));
fprintf('l6 = %.4f\n', optimal_params(3));
fprintf('phi50 = %.4f\n', optimal_params(4));
fprintf('phi60 = %.4f\n', optimal_params(5));
fprintf('h = %.4f\n', optimal_params(6));
fprintf('Giá trị hàm mục tiêu: %.4f\n', fval);

fprintf('Giá trị tối ưu:\n');
fprintf('%.4f\n', optimal_params(1));
fprintf('%.4f\n', optimal_params(2));
fprintf('%.4f\n', optimal_params(3));
fprintf('%.4f\n', optimal_params(4));
fprintf('%.4f\n', optimal_params(5));
fprintf('%.4f\n', optimal_params(6));
fprintf('Giá trị hàm mục tiêu: %.4f\n', fval);

% Hàm tính toán phi6, phi8, phi3, alptt, bettt, betlt
function [phi6, phi8, alptt, bettt, betlt, phi3] = calculate_values(params,rp,m)
l4 = params(1);
l5 = params(2);
l6 = params(3);
phi50 = params(4);
phi60 = params(5);
h = params(6);

% Xác định dịch chuyển thành răng y4 và n1, n2
phi3 = 0:0.1:720*pi/180;
y4 = rp.*phi3;
% l40 = m - 2*(l6.*cos(phi60*pi/180) + l5.*cos(phi50*pi/180));
n1 = (m-l4)/2 + rp.*phi3;
n2 = (m-l4)/2 - rp.*phi3;
% h = l6.*sin(phi60*pi/180) + l5.*sin(phi50*pi/180);

% Xác định phi5, phi6, phi7, phi8
A = 2.*h.*l5;
B = -2.*n1.*l5;
C = h.^2 + n1.^2 + l5.^2 - l6.^2;
D = -2.*h.*l6;
E = -2.*n1.*l6;
F = h.^2 + n1.^2 + l6.^2 - l5.^2;
phi5 = 2.*atan((A+sqrt(A.^2+B.^2-C.^2))/(B-C)); %phi5
phi6 = 2.*atan((D-sqrt(D.^2+E.^2-F.^2))/(E-F)); %phi6

G = 2.*h.*l5;
H = -2.*n2.*l5;
K = h.^2 + n2.^2 + l5.^2 - l6.^2;
L = -2.*h.*l6;
M = -2.*n2.*l6;
N = h.^2 + n2.^2 + l6.^2 - l5.^2;
phi7 = 2.*atan((G+sqrt(G.^2+H.^2-K.^2))/(H-K)); %phi7
phi8 = 2.*atan((L-sqrt(L.^2+M.^2-N.^2))/(M-N)); %phi8

```

```

alptt = phi60 - phi6;
bettt = phi60 - phi8;

for i =1:length(phi3)
% h(i) = 16.*sin(phi60*pi/180) + 15.*sin(phi50*pi/180);
% l4(i)= m(i)- 2*(16.*cos(phi60*pi/180) + 15.*cos(phi50*pi/180));
n1(i) = (m-l4)/2 + rp.*phi3(i);
n2(i) = (m-l4)/2 - rp.*phi3(i);
D = -2.*h.*l6;
E(i) = -2.*n1(i).*l6;
F(i) = h.^2 + n1(i).^2 + 16.^2 - 15.^2;
phi6(i) = 2.*atan((D-sqrt(D.^2+E(i).^2-F(i).^2))/(E(i)-F(i)));
L = -2.*h.*l6;
M(i) = -2.*n2(i).*l6;
N(i) = h.^2 + n2(i).^2 + 16.^2 - 15.^2;
phi8(i) = 2.*atan((L+sqrt(L.^2+M(i).^2-N(i).^2))/(M(i)-N(i)));
alptt(i) = phi60 - phi6(i);
bettt(i) = phi60 - phi8(i);
betlt(i) = acot((m/L + cot(alptt(i)*pi/180))*180/pi);

end
end
% Hàm mục tiêu để tối ưu hóa
function error = objective_function(params, rp, m)
[phi6, phi8, alptt, bettt, betlt, phi3] = calculate_values(params, rp,m);
% Tính toán sai số
error = sum((bettt - betlt) .^ 2); % Sai số bình phương

%-----
% CHAY SIMULINK
v=90/3.6; %m/s
tsim=3;
[t]=sim('PTVPVS3',[0,tsim]);
%-----
%TOA DO CAC KHAU
xC = 0; yC = 0;
xF = 0; yF = m;
xB = -16*sin(phi6.signals.values/180*pi); yB = 16*cos(phi6.signals.values/180*pi);
xA= xB-15*sin(phi5.signals.values/180*pi); yA = yB+15*cos(phi5.signals.values/180*pi);
xD = xA; yD = yA + l4;
xE= xF-18*sin(phi8.signals.values/180*pi); yE = yF-18*cos(phi8.signals.values/180*pi);

xN = xC+a*sin((phi6.signals.values-phi60)/180*pi); yN = yC-
a*cos((phi6.signals.values-phi60)/180*pi);
xN1 = xN+Rw*cos((phi6.signals.values-phi60)/180*pi); yN1 =
yN+Rw*sin((phi6.signals.values-phi60)/180*pi);
xN2 = xN-Rw*cos((phi6.signals.values-phi60)/180*pi); yN2 = yN-
Rw*sin((phi6.signals.values-phi60)/180*pi);

xL = xF+a*sin((phi8.signals.values-phi80)/180*pi); yL =
yF+a*cos((phi8.signals.values-phi80)/180*pi);
xL1 = xL+Rw*cos((phi80-phi8.signals.values)/180*pi); yL1 = yL+Rw*sin((phi80-
phi8.signals.values)/180*pi);
xL2 = xL-Rw*cos((phi80-phi8.signals.values)/180*pi); yL2 = yL-Rw*sin((phi80-
phi8.signals.values)/180*pi);
%vi tri quay sang trái
XYN = [xN1(end,1) xN2(end,1) xN(end,1) xC(end,1) xB(end,1) xA(end,1) xD(end,1)
xE(end,1) xF(end,1) xC(end,1) xF(end,1) xL(end,1) xL1(end,1) xL2(end,1)
yN1(end,1) yN2(end,1) yN(end,1) yC(end,1) yB(end,1) yA(end,1) yD(end,1) yE(end,1)
yF(end,1) yC(end,1) yF(end,1) yL(end,1) yL1(end,1) yL2(end,1)];

CC = [0 0]; BB = [-16*sin(phi60/180*pi) 16*cos(phi60/180*pi)]; AA = [-h (m-l4)/2];

```

```

FF = [0 m]; EE = [-l8*sin(phi80/180*pi) m-l8*cos(phi80/180*pi)]; DD = [-h (m+l4)/2];
LL = [0 m+a]; LL1 = [Rw m+a]; LL2 = [-Rw m+a]; NN = [0 -a]; NN1 = [Rw -a]; NN2 = [-Rw
-a];
%vi tri ban dau
XY = [NN1(1,1) NN2(1,1) NN(1,1) CC(1,1) BB(1,1) AA(1,1) DD(1,1) EE(1,1) FF(1,1)
CC(1,1) LL(1,1) LL1(1,1) LL2(1,1)
NN1(1,2) NN2(1,2) NN(1,2) CC(1,2) BB(1,2) AA(1,2) DD(1,2) EE(1,2) FF(1,2) CC(1,2)
LL(1,2) LL1(1,2) LL2(1,2)];

% plot(XY(1,:),XY(2,:), 'b-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%
% plot(xN,yN, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
% plot(xN1,yN1, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
% plot(xN2,yN2, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%
% plot(xL,yL, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
% plot(xL1,yL1, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
% plot(xL2,yL2, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%*****

%I.DONG HOC
%1.1. Phid,phin,phim,phiH
figure(1);
%QUY DAO Phid,phin,phim,phiH
% Phid,phin,phim,phiH theo time
subplot(121)
plot(Phidp.time,Phidp.signals.values, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.time,phim.signals.values, 'g-*', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,phin.signals.values, 'b--', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,phiH.signals.values, 'r-.', 'LineWidth',1.5);hold on;
title('Phid,phin,phiH', 'FontSize', 12);
ylabel('Phi (do)', 'FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize',12);
% Phid,phin,phim,phiH theo phid
subplot(122)
plot(Phidp.signals.values,Phidp.signals.values, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.signals.values,phim.signals.values, 'k-*', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,phin.signals.values, 'b--', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,phiH.signals.values, 'r-.', 'LineWidth',1.5);hold on;
title('Phid,phin,phiH', 'FontSize', 12);
ylabel('Phi (do)', 'FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize',12);

figure(2)
%van toc Phid,phin,phim,phiH
% Phid,phin,phim,phiH theo time
subplot(221)
plot(Phidp.time,dphid.signals.values, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.time,dphim.signals.values, 'g-*', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,dphin.signals.values, 'b--', 'LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,dphiH.signals.values, 'r-.', 'LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhid,dphin,dphiH', 'FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)', 'FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize',12);
% Phid,phin,phim,phiH theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,dphid.signals.values, 'k-', 'LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.signals.values,dphim.signals.values, 'k-*', 'LineWidth',1.5);hold on;

```

```

plot(Phidp.signals.values,ddphin.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,dphiH.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhid,dphin,dphiH','FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

%gia toc Phid,phin,phim,phiH
% Phid,phin,phim,phiH theo time
subplot(223)
plot(Phidp.time,ddphid.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.time,ddphim.signals.values,'g-*','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,ddphin.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,ddphiH.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhid,ddphin,ddphiH','FontSize', 12);
ylabel('ddPhi (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Phid,phin,phim,phiH theo phid
subplot(224)
plot(Phidp.signals.values,ddphid.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
%plot(Phidp.signals.values,ddphim.signals.values,'k-*','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddphin.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddphiH.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhid,ddphin,ddphiH','FontSize', 12);
ylabel('ddPhi (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

%1.2. Phi5,phi6,phi7,phi8
figure(3);
% Phi5,phi6 theo time
%quy dao
subplot(221)
plot(Phidp.time,phi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,phi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Phi5,Phi6','FontSize', 12);
ylabel('Phi (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Phi5,phi6 theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,phi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,phi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Phi5,Phi6','FontSize', 12);
ylabel('Phi (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo time
subplot(223)
plot(Phidp.time,phi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,phi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Phi7,Phi8','FontSize', 12);
ylabel('Phi (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo phid
subplot(224)
plot(Phidp.signals.values,phi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,phi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Phi7,Phi8','FontSize', 12);

```

```

ylabel('Phi (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

figure(4);
%van toc Phi5,phi6,phi7,phi8
% Phi5,phi6 theo time
subplot(221)
plot(Phidp.time,dphi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,dphi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhi5,dPhi6','FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Phi5,phi6 theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,dphi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,dphi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhi5,dPhi6','FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo time
subplot(223)
plot(Phidp.time,dphi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,dphi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhi7,dPhi8','FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo phid
subplot(224)
plot(Phidp.signals.values,dphi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,dphi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dPhi7,dPhi8','FontSize', 12);
ylabel('dPhi (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

figure(5);
%Gia toc Phi5,phi6,phi7,phi8
% Phi5,phi6 theo time
subplot(221)
plot(Phidp.time,ddphi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,ddphi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhi5,ddPhi6','FontSize', 12);
ylabel('ddPhi (do/s^2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Phi5,phi6 theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,ddphi5.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddphi6.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhi5,ddPhi6','FontSize', 12);
ylabel('ddPhi (do/s^2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo time
subplot(223)
plot(Phidp.time,ddphi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,ddphi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhi7,ddPhi8','FontSize', 12);

```

```

ylabel('ddPhi (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% phi7,phi8 theo phid
subplot(224)
plot(Phidp.signals.values,ddphi7.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddphi8.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddPhi7,ddPhi8','FontSize', 12);
ylabel('ddPhi (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

%1.3. Y4
figure(6);
%Quy dao
% Y4 theo time
subplot(121)
plot(Phidp.time,Y4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('y4','FontSize', 12);
ylabel('y4 (m)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Y4 theo phid
subplot(122)
plot(Phidp.signals.values,Y4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('y4','FontSize', 12);
ylabel('y4 (m)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

figure(7);
%Van toc
% Y4 theo time
subplot(221)
plot(Phidp.time,dY4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('dy4','FontSize', 12);
ylabel('dy4 (m/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Y4 theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,dY4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('dy4','FontSize', 12);
ylabel('dy4 (m/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

%Gia toc
% Y4 theo time
subplot(223)
plot(Phidp.time,ddY4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddy4','FontSize', 12);
ylabel('ddy4 (m/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Y4 theo phid
subplot(224)
plot(Phidp.signals.values,ddY4.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddy4','FontSize', 12);
ylabel('ddy4 (m/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

```

```

%1.4. anpha, bta, dba
figure(8);
%Quy dao anpha, bta, dba
% anpha, bta theo phid
subplot(221)
plot(Phidp.signals.values,Apha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,Btatt.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,Btalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Anpha, Beta','FontSize', 12);
ylabel('Anpha-Beta (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,Dbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('DBeta','FontSize', 12);
ylabel('Beta(do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% bta theo anpha
subplot(223)
plot(Apha.signals.values,Btatt.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Apha.signals.values,Btalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('Anpha-Beta','FontSize', 12);
ylabel('Btatt,Betalt,(do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Anpha(do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo anpha
subplot(224)
plot(Apha.signals.values,Dbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('Anpha-DBeta','FontSize', 12);
ylabel('DBeta (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Anpha(do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

figure(9);
%Van toc anpha, bta, dba
% anpha, bta theo phid
subplot(221)
plot(Phidp.signals.values,dApha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,dBtatt.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,dBtalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dAnpha, dBeta','FontSize', 12);
ylabel('dAnpha-dBeta (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,dDbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('dDBeta','FontSize', 12);
ylabel('dDBeta (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% bta theo anpha
subplot(223)
plot(dApha.signals.values,dBtatt.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(dApha.signals.values,dBtalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('dAnpha-dBeta','FontSize', 12);
ylabel('dBetatt,dBetalt(do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('dAnpha (do/s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

```

```

% Dbta theo anpha
subplot(224)
plot(dApha.signals.values,dDbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('dAnpha-dDBeta','FontSize', 12);
ylabel('dDBeta (do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('dAnpha(do/s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

figure(10);
%Gia toc anpha, bta, dba
% anpha, bta theo phid
subplot(221)
plot(Phidp.signals.values,ddApha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddBtatt.signals.values,'r-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.signals.values,ddBtalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddAnpha, ddBeta','FontSize', 12);
ylabel('ddAnpha-ddBeta (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo phid
subplot(222)
plot(Phidp.signals.values,ddDbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddDBeta','FontSize', 12);
ylabel('ddDBeta (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Phid (do)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% bta theo anpha
subplot(223)
plot(ddApha.signals.values,ddBtatt.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(ddApha.signals.values,ddBtalt.signals.values,'b--','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddAnpha-ddBeta','FontSize', 12);
ylabel('ddBetatt,ddBetalt(do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('dAnpha (do/s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo anpha
subplot(224)
plot(ddApha.signals.values,ddDbta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddAnpha-ddDBeta','FontSize', 12);
ylabel('ddDBeta (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('ddAnpha(do/s2)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

%1.5. TOA DO CAC KHOP (X;Y)
figure(11);
%subplot(211)
plot(xA,yA,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xB,yB,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xC,yC,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xD,yD,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xE,yE,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xF,yF,'k-','LineWidth',1.5);hold on;

plot(xN,yN,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xN1,yN1,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xN2,yN2,'k-','LineWidth',1.5);hold on;

plot(xL,yL,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xL1,yL1,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(xL2,yL2,'k-','LineWidth',1.5);hold on;

plot(XY(1,:),XY(2:),'b--','LineWidth',1.5);hold on;
plot(XYN(1,:),XYN(2:),'r--','LineWidth',1.5);hold on;

```

```

title('QUY DAO','FontSize', 12);
ylabel('Y (mm)','FontSize', 12);grid;
xlabel('X (mm)','FontSize', 12);grid;
set(gca,'FontSize',12);

%1.6. MO MEN DONG CO
figure(12);
% Tm-Phim
subplot(221)
plot(phim.time,Tm.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('DAC TINH MO MEN DONG CO','FontSize', 12);
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
ylabel('Tm (Nm)','FontSize', 12);grid;
set(gca,'FontSize',12);
subplot(222)
plot(phim.signals.values*pi/180,Tm.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('DAC TINH MO MEN DONG CO','FontSize', 12);
xlabel('Phim (rad)','FontSize', 12);
ylabel('Tm (Nm)','FontSize', 12);grid;
set(gca,'FontSize',12);
% It-Phim
subplot(223)
plot(phim.time,I.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('DAC TINH DONG DIEN DONG CO','FontSize', 12);
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
ylabel('I (A)','FontSize', 12);grid;
set(gca,'FontSize',12);
subplot(224)
plot(phim.signals.values*pi/180,I.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
title('DAC TINH DONG DIEN DONG CO','FontSize', 12);
xlabel('Phim (rad)','FontSize', 12);
ylabel('I (A)','FontSize', 12);grid;
set(gca,'FontSize',12);

figure(13);
%Quy dao anpha, bta, dba
% anpha, bta theo time
subplot(221)
plot(Phidp.time,Apha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,Btatt.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('Anpha, Beta','FontSize', 12);
ylabel('Anpha-Beta (do)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
% Dbta theo time
subplot(222)
plot(Phidp.time,dBta.signals.values,'k','LineWidth',1.5);hold on;
title('dBeta','FontSize', 12);
ylabel('dBeta(do/s)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

subplot(223)
%Van toc anpha, bta theo time
plot(Phidp.time,dApha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,dBtatt.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('dAnpha, dBeta','FontSize', 12);
ylabel('dAnpha-dBeta (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);

subplot(224)

```

```
%Gia toc anpha, bta theo time
plot(Phidp.time,ddApha.signals.values,'k-','LineWidth',1.5);hold on;
plot(Phidp.time,ddBtatt.signals.values,'r-.','LineWidth',1.5);hold on;
title('ddAnpha, ddBeta','FontSize', 12);
ylabel('ddAnpha-ddBeta (do/s2)','FontSize', 12);grid;
xlabel('Time (s)','FontSize', 12);
set(gca,'FontSize',12);
```

5.1.2. Mã chương trình tối ưu tham số c, k, n

```
%Optimize
%CHAY TOI UU THAM SO b,c,k,n
% Dữ liệu đầu vào
% % P4
% % V 40; 65; 80; 97; 110
% % V 11.11; 18.06; 22.22; 26.94; 30.56
% % T 3.00; 3.30; 3.40; 3.80; 4.10
% % a 3.00 3.00; 3.00; 3.00; 3.00

% %E49(P4)
% v = [40/3.6; 40/3.6; 40/3.6; 40/3.6];
% ay = [0.25; 0.35; 0.45; 0.5].*1;
% Td = [2.25; 2.35; 2.43; 2.53];

% v [5/3.6; 5/3.6; 5/3.6; 5/3.6]
% dsw [pi/3 2*pi/3 p 2*pi]
% Tsw 1.66 1.77 1.79 1.80

% a = 0.0;
%v = [80/3.6; 80/3.6; 80/3.6; 80/3.6; 80/3.6; 80/3.6];
% Td = [2.393+a; 2.547+a; 2.738+a; 2.921+a; 3.035+a; 3.097+a];
% v = [160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6];
% Td = [3.201+a; 3.399+a; 3.586+a; 3.781+a; 3.979+a; 4.190+a];
% v = [160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6];
% Td = [2.225+a; 2.348+a; 2.492+a; 2.635+a; 2.799+a; 2.963+a];
% ay = [1.00; 2.00; 3.00; 4.00; 5.00; 6.00];

% Giá trị hàm tối mô men mong muốn
% v = [160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6];
% Td = [3.201; 3.399; 3.586; 3.781; 3.979; 4.190];
% ay = [1.00; 2.00; 3.00; 4.00; 5.00; 6.00];

% % v =
[100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6;100/3.6];
% % Td =
[19.148;20.838;23.848;27.882;30.354;32.833;32.439;33.841;33.271;35.381;35.188;35.249];
% % ay = [1.522;1.976;2.786;3.958;4.857;5.196;5.670;6.246;6.664;6.737;7.574;7.874].*1;
%
% % v = [10/3.6; 15/3.6; 20/3.6; 40/3.6; 60/3.6];
% % Td = [2.00; 3.00; 3.00; 3.00; 3.00];
% % ay = [1.06; 7.41; 5.32; 2.35; 1.45];
%
% v = [15/3.6; 20/3.6; 40/3.6; 60/3.6; 80.00/3.6; 100.00/3.6];
% Td = [3.00; 3.00; 3.00; 3.00; 3.00; 3.00];
% ay = [7.41; 5.32; 2.35; 1.45; 1.02; 0.78];

% KT = 2.6715; % KT = 2.9477; % KT = 3.8554;
```

```

v = [160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6];
Td = [2.201; 2.399; 2.586; 2.781; 2.979; 3.190];
ay = [1.00; 2.00; 3.00; 4.00; 5.00; 6.00];

% Khởi tạo giá trị ban đầu cho b, c, n, k
initial_params = [1, 1, 1, 1]; % [b, c, k, n]

% Tùy chọn cho tối ưu hóa
options = optimset('Display', 'iter', 'TolFun', 1e-6, 'TolX', 1e-6);

% Tối ưu hóa
[optimal_params, fval] = fminunc(@(params) objective_function(params, v, Td, ay, KT),
initial_params, options);

% Hiển thị kết quả

fprintf('Giá trị tối ưu:\n');
fprintf('b = %.4f\n', optimal_params(1));
fprintf('c = %.4f\n', optimal_params(2));
fprintf('n = %.4f\n', optimal_params(4));
fprintf('k = %.4f\n', optimal_params(3));
fprintf('Giá trị hàm mục tiêu: %.4f\n', fval);

%%chạy lấy số liệu
fprintf('Giá trị tối ưu:\n');
fprintf('%.4f\n', optimal_params(1)); % b
fprintf('%.4f\n', optimal_params(2)); % c
fprintf('%.4f\n', optimal_params(4)); % n
fprintf('%.4f\n', optimal_params(3)); % k
fprintf('Giá trị hàm mục tiêu: %.4f\n', fval);

%%chạy lấy số liệu
% fprintf('Giá trị tối ưu:\n');
% fprintf('%.4f\n', optimal_params(1)); % b
% fprintf('%.4f\n', optimal_params(2)); % c
% fprintf('%.4f\n', optimal_params(4)); % n
% fprintf('%.4f\n', optimal_params(3)); % k
% fprintf('Giá trị hàm mục tiêu: %.4f\n', fval);

% Hàm tính toán Kd, ay và T(a)
function [ay_calculated, Ta, Kv] = calculate_values(params, v, Td, KT)
b = params(1);
c = params(2);
k = params(3);
n = params(4);
Kd = b ./ (1 + c * v .^ k);
ay_calculated = (b ./ (1 + c * v .^ k)) .* (abs(Td)) .^ n .* sign(Td);
Kv = (1 - 0.0606.*v + 0.0003.*(v.^2));
Tmin =1;
% T(a) tính toán
Ta = zeros(size(Td));
for i = 1:length(Td)
Ta(i) = (KT * Kd(i) * (abs(Td(i)))^(n-1) - 1)*Td(i); %% THAY THẾ BẰNG CỤM LỆNH IF-END
PHÍA DƯỚI CHO KẾT QUẢ GIỐNG NHAU
% if abs(Td) < Tmin
% Ta = 0;
% elseif abs(Td(i)) >= Tmin
% if abs(KT*Kd(i)*((Td(i)-Tmin*sign(Td(i))))^(n-1))<= 1
% Ta(i) = 0;

```

```

% elseif (abs((KT * Kd(i) * abs((Td(i)-Tdmin*sign(Td(i))))^(n-1) - 1)*(Td(i)-
Tdmin*sign(Td(i)))) < abs(Kv(i) * (Td(i)-Tdmin*sign(Td(i)))) && (Kv(i) >0))
% Ta(i) = Kv(i)*(Td(i)-Tdmin*sign(Td(i)));
% elseif (abs((KT * Kd(i) * abs((Td(i)-Tdmin*sign(Td(i))))^(n-1) - 1)*(Td(i)-
Tdmin*sign(Td(i)))) >= abs(Kv(i) * (Td(i)-Tdmin*sign(Td(i)))) && (abs((KT * Kd(i) *
abs((Td(i)-Tdmin*sign(Td(i))))^(n-1) - 1)*(Td(i)-Tdmin*sign(Td(i)))) <= 24)
% Ta(i) = (KT * Kd(i) * abs((Td(i)-Tdmin*sign(Td(i))))^(n-1) - 1)*(Td(i)-
Tdmin*sign(Td(i)));
% else Ta(i) = 24*sign(Td(i));
% end
% end
end
end

% Hàm mục tiêu để tối ưu hóa
function error = objective_function(params, v, Td, ay, KT)
[ay_calculated, T_a] = calculate_values(params, v, Td, KT);
% Tính toán sai số
error = sum((ay_calculated - ay) .^ 2); % Sai số bình phương

```

5.1.3. Mã chương trình xây dựng và phân tích EPS Map

```

%VE DO THI Ta_Td (ĐÃ OK)
function calculate_and_plot(NHAPSOLIEU)

%CAC HE SO LUA CHON
gama = 1.1; %He so ke den anh huong cua mo men can on dinh
kv = 3.6; %He so doi don vi van toc
kpi = 180/pi; %He so doi don vi goc
kdg = 1;
f= 0.02; % he so can lan
gy = 0.8; % He so bam ngang
gx = 0.8; % He so bam doc
%k = 0.2; % He so luc keo cau sau
g = 9.81; % [m/s2] gia toc trong truong
kg = 1000/g; %He so chuyen doi kN thanh kg
Pdmax = 30; %N luc tac dung lon nhat cua nguoi lai khi co tro luc
Td_min = 1; %[Nm] Momen tro luc bat dau tac dung
Ka = 1;
t0 = 0.5; % [s] Thời gian trễ

% Khai báo các tham số
%THONG SO HINH HOC CUA HTL
l4= 0.702;
l5=0.377; %m chieu dai don thanh noi ben hinh thang lai
l6=0.154; %m chieu dai don ben hinh thang lai
l7=l5;
l8=l6;
l9=0.0395;
l10=l9;
h=0.175; %m khoang cach truc thuoc lai va don ngang
m=1.521; %m khoang cach tam tru dung
Lcs=3.05; %m chieu dai co so xe
L= Lcs;
phi60=77.5; %[Do] Goc ban dau don quay ben
phi80=phi60; %[Do] Goc ban dau don quay ben
phi50 = 0.0654323963; %[Rad] Goc ban dau thanh day ben
phi70 = phi50; %[Rad] Goc ban dau thanh day ben
rp=0.0105; %m ban kinh truc rang
r=rp;
rw = 0.353; %m ban kinh banh xe

```

```

gc = 3.5*pi/180; %rad goc caster (0-3) do
gp = 8*pi/180; %rad goc kingpin (0-8) do
lw=0.0395; %m do dai ngong truc banh xe dan huong
lw1= lw*0.9; %m toa do trong tam thanh 8 so voi tam quay
%b=0.14*rw; %m lech sau cua phan luc ngang
rss = 0.16; %m ban kinh vanh tay lai
pa = 0.35; %Mpa ap suat lop;
is = 20.42; % Ti so truyen he thong lai;
iss = is; % Ti so truyen he thong lai;
itl = 1; % He so tro luc
nss = 0.7; %% Hieu suat he thong lai;
nr = 0.14*rw; % m lech sau cua phan luc ngang
nk = rw*tan(gc); % [m] Lech sau cua tru dung tren mat duong
ns = (nr+nk)*cos(gc); % [m] cah tay don tong cong cua mo men can do luc ngang
Kalf = 61000; % [N/rad] Do cung ngang cua truoc
Kalr = 61000; % [N/rad] Do cung ngang cua sau
Kss = 12500; %Kc*K3*K4*rp^2/(K3*K4*rp^2 + Kc*K4*rp^2 + Kc*K3); % [Nm/rad] Do cung
tong cua truc lai + banh rang + thanh rang
rs = lw-rw*tan(gp); % [m] canh tay don cua truc kingpin do goc kingpin

%KHOI LUONG XE
%Khối lượng được treo
Ms = 1650; %kg Khoi luong được treo cua xe
xfs = 1.400; %m K/c tu trong tam khối lượng được treo den tam cau truoc
xrs= Lcs-xfs; %m K/c tu trong tam khối lượng được treo den tam cau sau
Mfs = Ms*xfs/Lcs; %N Khoi luong toan bo phan bo len cau dan huong day tai 1000kg
(khong tai 870kg)
Mrs = Ms - Mfs; %N Khoi luong toan bo phan bo len cau sau day tai 1170kg (khong tai
685kg)
%Khối lượng không được treo
Mfus = 95.6; %kg Khoi luong không được treo cầu trước
Mrus = 93; %kg Khoi luong không được treo cầu sau
Mus = Mfus + Mrus; %kg Khoi luong không được treo
%Khối lượng toàn bộ
Mf = Mfus+Mfs; %kg Khoi luong cầu trước
Mr = Mrus+Mrs; %kg Khoi luong cầu sau
M = Ms +Mf; %kg Khoi luong toàn bộ của xe
xf = Mr/M*Lcs;
xr = Lcs-xf;
% %
%TOA DO TRONG TAM XE
%Khong tai
Gf = (Mfs+Mfus)*g/2; %N tai trong tinh phan bo len 1 banh xe dan huong
Gr = (Mrs+Mrus)*g/2; %N tai trong tinh phan bo len 1 banh xe cau sau

yf=1.6/2; %m K/c tu trong tam o to den tam vet banh xe ben trai
yr=1.6/2; %m K/c tu trong tam o to den tam vet banh xe ben phai
Jz=3234.0; %M*xf*yf; %kgm2 Mo men quan tinh khoi cua toan xe

= 2.9477; %Giá trị KT DỪNG CHO CHUYÊN ĐỀ LÝ THUYẾT (SỬ DỤNG TRƯỜNG HỢP MIX)
% a = -0.5;
00; 3.00; 4.00; 5.00; 6.00];
%%% SỬ DỤNG TRƯỜNG HỢP MIX
%%% Hệ số khi V<=100 km/h
b = 0.2675;
c = 2.7646;
n = 4.5357;
k = 0.4442;

%%% Hệ số để tính khi V=0 km/h

```

```

b1 = 0.2061;
c1 = 3.1114;
n1 = 5.9132;
k1 = 1.2078;

%%% Hệ số khi V>=150 km/h
b2 = 0.2675;
c2 = 2.7646;
n2 = 4.5357;
k2 = 0.4442;

% b = 0.06;
% c = 2.7646;
% n = 4.5357;
% k = 0.4442;

% Giá trị hàm tối mô men mong muốn
% v = [160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6; 160/3.6];
% Td = [3.201+a; 3.399+a; 3.586+a; 3.781+a; 3.979+a; 4.190+a];
% ay = [1.00; 2.00; 3.00; 4.00; 5.00; 6.00];
% b = 0.2796;
% c = 3.2489;
% n = 5.2249;
% k = 0.8389;

% e0 = 5.0000;
% e1 = -0.0607;
% e2 = 0.0003;
% e3 = 0.0000;

f0 = 6.0527;
f1 = -0.0606;
f2 = 0.0003;
f3 = 0.0000;
% %% EPSI
Td_min =1;
Td_max = 4.8;
Td_1 = 3.5;

e0 = f0*(Td_1-Td_min)/(Td_max-Td_min); %% Lấy giá trị Tamax bé
e1 = -0.0607;
e2 = 0.0003;
e3 = -0.0000;

% e0 = 5.0000; %% Lấy giá trị Tamax lớn
% e1 = -0.0607;
% e2 = 0.0003;
% e3 = -0.0000;

% Hệ số nhảy tốc độ tại V = 0
% Kvo = 2.5; %% DỪNG CHO ĐOẠN MIX LINEAR AND NONLINEAR V <=100 KM/H
Kvo2 = 2.5; %% DỪNG CHO ĐOẠN LINEAR 100 <V < 150 KM/H
Tmax = 6;
Tmin = -Tmax; %0; %
min = 5000; % Độ mịn của đồ thị

% Giá trị của v
%Vin = [0; 5/3.6; 10/3.6; 20/3.6; 40/3.6; 60/3.6; 80/3.6; 100/3.6; 120/3.6; 140/3.6;
160/3.6; 180/3.6; 200/3.6]; %[180/3.6]; %

```

```

% Vin = [0; 5/3.6; 10/3.6; 20/3.6; 30/3.6; 60/3.6; 90/3.6; 120/3.6; 150/3.6; 180/3.6;
200/3.6]; %[180/3.6]; %
Vin = [0; 10/3.6; 50/3.6; 100/3.6; 150/3.6; 200/3.6]; % ]; %; 10/3.6; 20/3.6; 60/3.6;
100/3.6; 140/3.6; 180/3.6; 200/3.6

% Giá trị của Td
%Td = linspace(-6, 6, 100); % Tạo 100 giá trị từ -6 đến 6
syms t
t = linspace(Tmin, Tmax, 1000); % Tạo 1000 giá trị từ -10 đến 10
Td = t; % Tmax*sin(2*pi*t/Tmax); %
% figure;
% plot(t, Td, 'DisplayName', ['T_d', ' [Nm]']);
% xlabel('Time [s]'); grid on;
% ylabel('T_d [Nm]'); grid on;
% title('T_d characteristic curve with time');
% legend show;
% hold on;
%
% Khởi tạo mảng để lưu kết quả
Tas = zeros(length(Vin), length(Td));
T_sigma = zeros(length(Vin), length(Td));
fd = zeros(length(Vin), length(Td));
% Tính toán các giá trị
for i = 1:length(Vin)
% Kv = calculate_Kv(Kvo, Vin(i)); % Tính toán Kv
% Kv1 = calculate_Kv1(Kvo1, Vin(i)); % Tính toán Kv
Kv = calculate_Kv(e0, e1, e2, e3, Vin(i));
Kv1 = calculate_Kv1(f0, f1, f2, f3, Vin(i));
Kv2 = calculate_Kv2(Kvo2, Vin(i));
KT = (M*xr*ns) / (is * Lcs);
[Kalff, B, vdpsi] = calculate_parameters(Kalf, ns, Kss, is, Lcs, Ms, Kalr, xrs, xfs,
Vin(i));
[Kd0, Kd] = calculate_Kd(b, c, Vin(i), k, b2, c2, k2);
Kd1 = calculate_Kd1(b1, c1, Vin(i), k1);

for j = 1:length(Td)
% Kd = calculate_Kd(b, c, Vin(i), k);
Tas(i, j) = calculate_Tas(Ms, xrs, ns, is, Lcs, Kd, Kd1, Kd0, Td(j), n, Kv, Kv1, Kv2,
Vin(i));
T_sigma(i, j) = Tas(i, j) + Td(j);
ay(i,j) = T_sigma(i, j)/KT;
fd(i,j) = T_sigma(i, j)*B;
end
end

%%===== VẼ ĐỒ THỊ
%%=====
%%I. ĐỒ THỊ Ta, Tsum, Td

% 1. Vẽ đồ thị cho T_sigma theo time

figure;
hold on;
plot(t, Td,'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['T_d ', '[Nm]']);
for i = 1:length(Vin)
plot(t, T_sigma(i, :),'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ', num2str(Vin(i)*3.6)]);
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('Time [s]','FontSize', 16); grid on;
ylabel('T_Σ [Nm]','FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve T_Σ-Time (v_i [km/h])','FontSize', 16);

```

```
legend show;
```

```
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%2. Vẽ đồ thị cho  $T_a$  theo time
figure;
hold on;
plot(t, Td, 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['T_d ', '[Nm]']);
for i = 1:length(Vin)
    plot(t, Tas(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ',
        num2str(Vin(i)*3.6)]);
    lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('Time [s]', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('T_a [Nm]', 'FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve T_a-Time (v_i [km/h])', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y
```

```
%%II. ĐỒ THỊ HÀM TRUYỀN
```

```
%3. Vẽ đồ thị cho  $a_y$  theo Tsum
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
    plot(T_sigma(i, :), ay(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ',
        num2str(Vin(i)*3.6)]);
    lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_Σ [Nm]', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('a_y [m/s^2]', 'FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve: a_y-T_ΣSigma (v_i [km/h])', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y
```

```
%4. Vẽ đồ thị cho  $a_y$  theo  $\varphi_d$ 
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
    plot(f_d(i, :), ay(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ',
        num2str(Vin(i)*3.6)]);
    lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('$\varphi_d$ [Rad]', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('a_y [m/s^2]', 'FontSize', 16); grid on;
title('$Characteristic curve: a_y - \varphi_d (v_i [km/h])$', 'Interpreter',
    'latex', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
```

```

ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%5. Vẽ đồ thị cho fd theo Tsum
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
plot(T_sigma(i, :), fd(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ',
num2str(Vin(i)*3.6)]);
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_Σ [Nm]', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('$\varphi_d$ [Rad]', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve: $\varphi_d - T_\Sigma$ (v_i [km/h])$', 'Interpreter',
'latex', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%6. Vẽ đồ thị cho fd theo Td
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
plot(Td, fd(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ', num2str(Vin(i)*3.6)]);
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ

lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_d [Nm]', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('$\varphi_d$ [Rad]', 'Interpreter', 'latex', 'FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve: $\varphi_d - T_d$ (v_i [km/h])$', 'Interpreter',
'latex', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%7. Vẽ đồ thị cho ay theo Td
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
plot(Td, ay(i, :), 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ', num2str(Vin(i)*3.6)]);
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kẻ lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_d [Nm]', 'FontSize', 16); grid on;
ylabel('a_y [m/s^2]', 'FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve: a_y-T_d (v_i [km/h])', 'FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%8. Vẽ đồ thị cho Tsum - theo Td
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)

```

```

plot(Td, T_sigma(i, :),'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ',
num2str(Vin(i)*3.6)]);
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kề lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_d [Nm]','FontSize', 16); grid on;
ylabel('T_Σ [Nm]','FontSize', 16); grid on;
title('Characteristic curve: T_Σ-T_d (v_i [km/h])','FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y

%9. Vẽ đồ thị cho Ta - theo Td
figure;
hold on;
for i = 1:length(Vin)
plot(Td, Tas(i, :),'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', ['v = ', num2str(Vin(i)*3.6)]);
%-----Làm mịn
% y(i,:) = Tas(i,:);
% x_interp = linspace(Tmin, Tmax, 200000); % Tạo 100 điểm giữa min và max của x
% y_interp = interp1(x, y(i,:), x_interp, 'spline');
% plot(x_interp, y_interp, 'b-', 'LineWidth', 2); % Đường cong xanh
%-----end Làm mịn
lgd = legend('FontSize', 12); grid on; % Kề lưới cho biểu đồ
end
hold off;
xlabel('T_d [Nm]','FontSize', 16); grid on;
ylabel('T_a [Nm]','FontSize', 16); grid on;
title(' Curve: T_a-T_d (v_i [km/h])','FontSize', 16);
legend show;
% Tùy chỉnh cỡ chữ cho các trục tọa độ
ax = gca; % Lấy trục hiện tại
ax.XAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục x
ax.YAxis.FontSize = 16; % Cỡ chữ cho trục y
end

%%===== CÁC HÀM TÍNH TOÁN
%%=====TÍNH Kd
function [Kd0, Kd] = calculate_Kd(b, c, v, k, b2, c2, k2)
Kd0 = b2 / (1 + c2 * v^k2);
Kd = b / (1 + c * v^k);
end

function Kd1 = calculate_Kd1(b1, c1, v, k1)
Kd1 = b1 / (1 + c1 * v^k1);
end

%%===== TÍNH Kv
function Kv = calculate_Kv(e0, e1, e2, e3, v)
Kv = (e0 + e1*v + e2*(v^2)+ e3*(v^3));
end

function Kv1 = calculate_Kv1(f0, f1, f2, f3, v)
Kv1 = (f0 + f1*v + f2*(v^2)+ f3*(v^3));
end

```

```

function Kv2 = calculate_Kv2(Kvo2, v) %% DÙNG CHO ĐOẠN LINEAR 100 <V < 150 KM/H
Kv2 = (Kvo2*(110/3.6)/v - 0.0606*v + 0.0003*(v^2));
end

```

```

%% %% ===== TÍNH Ta
%% %% CHARACTERISTIC CURVE TYPES

```

```

% function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, Lcs, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1,
Kv2, Vin)
% Tdmin = 1;
% Tdmax = 4.8;
% Tdrq = 3.5;
% KT = (M*xr*ns) / (is * Lcs);
% % Tas1 = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0);
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% Tasmax = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% i = 0; %% i = [0, 1]
%
% %% 1. NONLINEAR
% %% PP2
% % % % % if abs(Td) < Tdmin
% % % % % Tas = 0;
% % % % % elseif (abs(Td) >= Tdmin)
% % % % %
% % % % % if (Vin <= 200/3.6)
% % % % % if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= 0)
% % % % % Tas = 0;
% % % % % elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td));
% % % % % elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (Kv*(Tdmax-Tdmin));
% % % % % elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= 0)
% % % % % Tas = 0;
% % % % % elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= (-Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td));
% % % % % elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (-Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (-Kv*(Tdmax-Tdmin));
% % % % % end
% % % % %
% % % % %
% % % % % elseif (Vin > 200/3.6)
% % % % % if (abs(Td)<=Tdrq)
% % % % % Tas = 0;
% % % % % elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (Kv*(Tdmax-
Tdmin)))
% % % % % Tas = Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td));
% % % % % elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (Kv*(Tdmax-Tdmin));

```

```

% % % % % elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% % % % % Tas = (-Kv*(Tdmax-Tdmin));
% % % % % end
% % % % % end
% % % % % end

%%% EXPERIMENT
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
%
% if (Vin <= 200/3.6)
% if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
<= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td)) >= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% end
%
%
% elseif (Vin > 200/3.6)
% if (abs(Td)<=Tdrq)
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv*(Td-Tdrq*sign(Td));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% end
% end
% end
% end
%
%
%%% 2. BREAK-LINEAR
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
% if (abs(Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td)) + Kv*(Td-Tdmin*sign(Td))) >= Tasmax)
% Tas = Kv1*(Tdmax-Tdmin)*sign(Td);
% elseif (Td>=0) && (abs(Td)<=Tdrq) && (Kv >0)
% Tas = Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && (abs(Td)>=Tdrq) && (Kv >0)

```

```

% Tas = Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td)) + Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
%
% elseif (Td<=0) && (abs(Td)<=Tdrq) && (Kv >0)
% Tas = Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<=0) && (abs(Td)>=Tdrq) && (Kv >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td)) + Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% end
% end
% end

%%% 3. LINEAR

% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
% if (abs(Kv*(Td-Tdmin*sign(Td))) >= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv*(Tdmax-Tdmin)*sign(Td);
% elseif (Td>=0) && (Kv >0)
% Tas = Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<=0) && (Kv >0)
% Tas = Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% end
% end
%
% end

%%% 4. MIX-LINEAR-NONLINEAR

%%% 4.1. TÍNH TRƯỜNG HỢP CASE 1 (PHONG CÁCH LÁI THOẢI MÁI)

% function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, Lcs, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1,
Kv2, Vin)
% Tdmin = 1;
% Tdmax = 4.8;
% Tdrq = 2;
% KT = (M*xr*ns) / (is * Lcs);
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0);
%
%
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
% if (abs((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td)) >= (Kv*(Tdmax-
Tdmin)))
% Tas = Kv*(Tdmax-Tdmin)*sign(Td);
% % elseif (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0 >= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% elseif (Td>=0) && ((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td) > 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && ((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td) <= 0)
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0);
% elseif (Td<=0) && ((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td) < 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<=0) && ((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td) >= 0)
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*sign(Td);
% end
% end

```

```

% Tas_limit = Kv * (Tdmax - Tdmin) * sign(Td);
% % Xác định các điểm Td và Tas mẫu để nội suy spline
% Td_sample = linspace(Tdmin * sign(Td), Tdmax * sign(Td), 1000);
% Tas_sample = arrayfun(@(Td) Tas, Td_sample);
%
% % Nội suy spline bám sát dữ liệu mẫu
% spline_func = spline(Td_sample, Tas_sample);
%
% % Áp dụng spline cho các giá trị Tas trong vùng giới hạn
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif abs(Td) >= Tdmin
% if abs(Tas * sign(Td)) >= abs(Tas_limit)
% Tas = Tas_limit;
% else
% % Áp dụng spline nếu trong khoảng Tas <= Tas_limit
% if abs(Tas) <= abs(Tas_limit)
% Tas = ppval(spline_func, Td);
% else
% Tas = Tas;
% end
% end
% end

```

```

%%%%%%-----KẾT THÚC CASE 1

```

```

%%% 4.2. TÍNH TRƯỜNG HỢP CASE 2 (PHONG CÁCH LÁI THỂ THAO)

```

```

% function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, Lcs, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1,
% Kv2, Vin)
% Tdmin =1;
% Tdmax = 4.8;
% Tdrq = 3.0;
% KT = (M*xr*ns) / (is * Lcs);
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1) * (Td-Tdmin*sign(Td));
%
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
%
% if (Vin <= 200/3.6)
% if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))
% <= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-
% Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-
% Tdmin*sign(Td)) <= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-
% Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-
% Tdmin*sign(Td)) > (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv*(Tdmax-Tdmin));
%
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-
% Tdmin*sign(Td)) >= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))
% < 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td)) >= (-
% Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td));

```

```

% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <= (-
Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv*(Tdmax-Tdmin));
% end
%
%
% elseif (Vin > 200/3.6)
% if (abs(Td)<=Tdrq)
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv1*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv*(Tdmax-Tdmin));
% end
% end
% end
%
% end
%%%%%%-----KẾT THÚC CASE 2

```

%%% 4.3. TÍNH TRƯỜNG HỢP CASE 3 (PHONG CÁCH LÁI HỖN HỢP)

```

% function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, Lcs, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1,
Kv2, Vin)
% Tdmin =1;
% Tdmax = 4.8;
% Tdrq = 2;
% KT = (M*xr*ns) / (is * Lcs);
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1) * (Td-Tdmin*sign(Td));
%
% if (Vin > 200/3.6)
% if (abs((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td)) <= (2.5)) && (abs(Td)<3)
% Tas = (KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td);
% elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td) > (2.5)) || (Td <-3)
% Tas = 2.5;
% elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td) < -2.5) || (Td>3)
% Tas = -2.5;
% end
% elseif abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
%
% if (Vin <= 20/3.6)
% if (abs((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) >=
(Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv*(Tdmax-Tdmin)*sign(Td);
% elseif (Td>=0) && (((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) >= 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && (((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) < 0) && (abs((KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) <= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<0) && (((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) < 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<0) && (((Kv1 *(Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td))) > 0)
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0)*(Td-Tdmin*sign(Td));

```

```

% end
%
% elseif (Vin > 20/3.6) && (Vin <= 100/3.6)
% if (abs((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) >=
(Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv*(Tdmax-Tdmin)*sign(Td);
% elseif (Td>=0) && ((abs(Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1) <= 0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && (((Kv1 * (Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) >= 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && (((Kv1 * (Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) < 0) && (abs((KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) <= (Kv*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td));
%
% elseif (Td<0) && (((Kv1 * (Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) < 0) && (Kv1 >0)
% Tas = Kv1*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<0) && (((Kv1 * (Td-Tdmin*sign(Td)))-(KT * Kd * abs((Td-
Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td))) > 0)
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% end
%
% elseif (Vin > 100/3.6) && (Vin <= 200/3.6)
% if (abs(Td)<=Tdrq)
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= 2.5) %(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td)) > 2.5) %(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = 2.5; %(Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -2.5) %-(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = -2.5; %(-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% end
%
% end
%
% end
% end

%%%%%%%%-----KẾT THÚC CASE 3

%% NONLINEAR - TYPES
%%TÍNH TRƯỜNG HỢP CASE 1 (PHONG CÁCH LÁI THOẢI MÁI); CASE 2 (PHONG CÁCH LÁI THỂ THAO)

% function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, L, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1, Kv2,
Vin)
% Tdmin =1;
% Tdmax = 4.8;
% Tdrq = 3.5;
% KT = (M*xr*ns) / (is * L);
% % Tas1 = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-0) - 0);
% Tas = Kv*(Td-Tdmin*sign(Td));
% Tasmax = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% i = 1; %% i = [0, 1] if abs(Td) < Tdmin CASE 1: i=0 & CASE 2: i=1
% Tas = 0;
% if abs(Td) < Tdmin
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td) >= Tdmin)
%
% if (Vin <= 200/3.6)

```

```

% if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
<= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= 0)
% Tas = 0;
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td)) >= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td));
% elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - i)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% end
%
%
% elseif (Vin > 200/3.6)
% if (abs(Td)<=Tdrq)
% Tas = 0;
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv*(Td-Tdrq*sign(Td));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% end
% end
% end
% end
%%%%%%%%-----KẾT THÚC CASE 1 & CASE 2

```

```

%%TÍNH TRƯỜNG HỢP CASE 3 (PHONG CÁCH LÁI HỖN HỢP)

```

```

function [Tas] = calculate_Tas(M, xr, ns, is, L, Kd, Kd1, Kd0, Td, n, Kv, Kv1, Kv2,
Vin)
Tdmin =1;
Tdmax = 4.8;
Tdrq = 3.5;
KT = (M*xr*ns) / (is * L);
Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-1) - 1) * (Td-Tdmin*sign(Td));
i = 0;
q = 0;
j = 1;
k = 1;

if (Vin > 200/3.6)
if (abs((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td)) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td);
elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = Kv*(Tdmax-Tdmin);
elseif ((KT * Kd1 * abs(Td)^(n-1) - 1)*(Td) < -Kv1*(Tdmax-Tdmin))
Tas = -Kv1*(Tdmax-Tdmin);
end

```

```

elseif abs(Td) < Tdmin
Tas = 0;
elseif (abs(Td) >= Tdmin)

if (Vin <= 20/3.6)

if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <=
0)
Tas = 0;
elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td));
elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= 0)
Tas = 0;
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td)) >= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td));
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-i) - q)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
end
elseif (Vin > 20/3.6) && (Vin <= 100/3.6)
if (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <=
0)
Tas = 0;
elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td));
elseif (Td>=0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-
Tdmin*sign(Td)) >= 0)
Tas = 0;
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td)) >= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td));
elseif (Td<0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td))
< 0) && ((KT * Kd * abs((Td-Tdmin*sign(Td)))^(n-j) - k)*(Td-Tdmin*sign(Td)) <= (-
Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
end
elseif (Vin > 100/3.6) && (Vin <= 200/3.6)
if (abs(Td)<=Tdrq)
Tas = 0;

elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (2.5))
Tas = Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td));
elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (2.5))
Tas = (2.5);
elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(2.5))

```

```

Tas = (-2.5);

% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (abs(Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td))) <= (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdrq*sign(Td)) > (Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (Kv1*(Tdmax-Tdmin));
% elseif (abs(Td)>Tdrq) && (Kv2*(Td-Tdmin*sign(Td)) < -(Kv1*(Tdmax-Tdmin)))
% Tas = (-Kv1*(Tdmax-Tdmin));
end

end

end
end

%%%%%-KẾT THÚC CASE 3

function [Kalff, B, vdpsi] = calculate_parameters(Kalf, ns, Kss, is, Lcs, M, Kalr, xr,
xf, v)
% Tính K'_{af}
Kalff = Kalf / (1 + (Kalf * ns) / Kss);
% Tính v_psi
vdpsi = sqrt((Kalff * Kalr * Lcs^2) / (M * (Kalr * xr - Kalff * xf)));
% Tính phi_d
B = ((is^2 * Lcs^2) / (M * ns*xr)) * ((1 + (v / vdpsi)^2)/v^2); % T_d cần được định
nghĩa
end

%%MÃ CODE TRONG SIMULINK NHƯ SAU:

```

5.2. MÃ CHƯƠNG TRÌNH THỬ NGHIỆM MÔ PHÒNG

5.2.1. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái xử lý trung tâm (On-centre handling test)

```

function CARSIM_on_centre_KPI_VS2(matFile, outXlsx)
% KPI on-centre, chỉ chu kỳ đầu tiên sau t >= 20 s. ay ở [g].
% Xuất 1 sheet Excel (Group | Metric | Unit | Value) và in theo cột dọc.

%% 0) LOAD & TIỀN XỬ LÝ
if nargin < 1 || isempty(matFile), matFile = 'Carsim_sweepstest_V100_T3.21.mat'; end
if nargin < 2 || isempty(outXlsx), outXlsx =
'Carsim_sweepstest_V100_T3.21_KPIs_SLOPE.xlsx'; end

S = load(matFile);
Time = S.Timec_data(:);
Td = S.Tdc_data(:); % Nm
fd = S.fdc_data(:); % deg
ay = S.ayc_data(:); % g
yaw = S.dpsic_data(:); % deg/s

% Lấy từ t >= 20 s, loại NaN đồng thời
m = Time >= 20;
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
m = ~(isnan(Time)|isnan(Td)|isnan(fd)|isnan(ay)|isnan(yaw));
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
if numel(Time) < 6, error('Không đủ dữ liệu sau 20 s.');
```

```

%% 1) CẮT CHU KỲ ĐẦU (zero-crossing cùng chiều → fallback 5 s)
[i1,i2] = first_cycle_indices(fd);
if ~isempty(i1) && ~isempty(i2) && i2 > i1+1
    r = i1:i2;
else
    T1 = Time(1); T2 = min(Time(1)+5, Time(end));
    r = (Time>=T1) & (Time<=T2);
    warning('Auto detect fail → dùng cửa sổ 5 s (%.3f→%.3f s).',T1,T2);
end
Time = Time(r); Td = Td(r); fd = fd(r); ay = ay(r); yaw = yaw(r);

%% 2) THAM SỐ PHỤ
bw_fd = 0.01*max(abs(fd)); bw_Td = 0.01*max(abs(Td));
bw_ay = 0.01*max(abs(ay)); bw_yaw = 0.01*max(abs(yaw));
mask_fd_pm3 = abs(fd) <= 3;
mask_fd_pm = abs(fd) <= max(abs(fd));

% Phân nhánh theo chiều đánh lái (tăng/giảm SWA)
fd_dot = gradient(fd, Time);
inc = fd_dot >= 0; % nhánh đi
dec = fd_dot < 0; % nhánh về

%% 3) TÍNH KPI
G={}; M={}; U={}; V=[];
addRow = @(g,m,u,v) local_add_row(g,m,u,v);

% ===== I) Torque vs SWA =====
[pos_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td>=0));
[neg_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td<=0));

% (Đổi) dùng local_slope thay vì mean(gradient(...))
grad_Td0_P = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
grad_Td0_N = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));

[torque_db_fd0,~,~] = deadband_y_at_x0(fd,Td);
area_Td_fd = polyarea([fd;fd(1)],[Td;Td(1)]);

% R² theo từng nhánh (Pearson r²)
[~,R2_I_inc] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & inc);
[~,R2_I_dec] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('I','Mean Stiffness (+)','Nm/deg',pos_stiff);
addRow('I','Mean Stiffness (-)','Nm/deg',neg_stiff);
addRow('I','Local_slope @SWA=0 (pos)','Nm/deg',grad_Td0_P);
addRow('I','Local_slope @SWA=0 (neg)','Nm/deg',grad_Td0_N);
addRow('I','Asymmetry ratio (+/-)','-',safe_ratio(pos_stiff,neg_stiff));
addRow('I','Torque deadband @SWA=0','Nm',torque_db_fd0);
addRow('I','Loop area (Torque-SWA)','Nm·deg',area_Td_fd);
addRow('I','Max |Torque|','Nm',max(abs(Td)));
addRow('I','Max |SWA|','deg',max(abs(fd)));
addRow('I','Linearity R² (Torque~SWA, inc)','-',R2_I_inc);
addRow('I','Linearity R² (Torque~SWA, dec)','-',R2_I_dec);

% ===== II) Ay vs SWA =====
[ay_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,ay);
ay_thr = bw_ay;
[resp_db,~,~]=deadband_y_at_x0(fd,ay);
% x_pos = x_at_y_target(fd,ay,+ay_thr);
% x_neg = x_at_y_target(fd,ay,-ay_thr);
% resp_db = NaN; if ~isnan(x_pos)&&~isnan(x_neg), resp_db = abs(x_pos-x_neg); end
area_Ay_fd = polyarea([fd;fd(1)],[ay;ay(1)]);

```

```

[~,R2_II_inc] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & inc);
[~,R2_II_dec] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('II','Response angle deadband @Ay=0','deg',ay_ang_db);
addRow('II','Lateral acceleration deadband @fd=0','g',resp_db);
addRow('II','Loop area (Ay-SWA)','g.deg',area_Ay_fd);
addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, inc)','-',R2_II_inc);
addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, dec)','-',R2_II_dec);

% ===== III) Torque vs Ay =====
[torque_db_ay0,~,~] = deadband_y_at_x0(ay,Td);
[ay_db_Td0,~,~] = deadband_y_at_x0(Td,ay);
area_Td_ay = polyarea([ay;ay(1)],[Td;Td(1)]);

% dSlope ổn định @0 & @±0.1 g (hồi quy + cửa sổ thích nghi)
s0p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,+1);
s0n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,-1);
s01p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,+0.1,+1);
s01n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,-0.1,-1);
s01 = mean([s01p s01n],'omitnan');

% R2 theo nhánh, giới hạn |Ay|≤0.15 g để tránh deadband quá phẳng
centreAy = abs(ay) <= 0.15;
[~,R2_III_inc] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & inc);
[~,R2_III_dec] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & dec);

addRow('III','Torque deadband @Ay=0','Nm',torque_db_ay0);
addRow('III','Ay deadband @Torque=0','g',ay_db_Td0);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (pos)','Nm/g',s0p);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (neg)','Nm/g',s0n);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=±0.1 g (avg)','Nm/g',s01);
addRow('III','Loop area (Torque-Ay)','Nm.g',area_Td_ay);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, inc)','-',R2_III_inc);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, dec)','-',R2_III_dec);
addRow('III','Peak |Ay|','g',max(abs(ay)));
addRow('III','Peak |Torque|','Nm',max(abs(Td)));

% ===== IV) Yaw vs SWA =====
[yaw_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,yaw);
area_yaw_fd = polyarea([fd;fd(1)],[yaw;yaw(1)]);
[~,R2_IV_inc] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & inc);
[~,R2_IV_dec] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & dec);
lag_yaw_fd = time_lag(fd,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope
addRow('IV','Yaw gain vs SWA (centre)','(deg/s)/deg', local_slope(fd,yaw,
mask_fd_pm3));
addRow('IV','Yaw time lag vs SWA','s',lag_yaw_fd);
addRow('IV','Yaw deadband @0','deg',yaw_ang_db);
addRow('IV','Loop area (Yaw-SWA)','(deg/s).deg',area_yaw_fd);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, inc)','-',R2_IV_inc);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, dec)','-',R2_IV_dec);

% ===== V) Yaw vs Torque =====
[yaw_T_db,~,~] = deadband_x_at_y0(Td,yaw);
area_yaw_Td = polyarea([Td;Td(1)],[yaw;yaw(1)]);
mask_Td = abs(Td) <= 0.3;
[~,R2_V_inc] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & inc);
[~,R2_V_dec] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & dec);
lag_yaw_Td = time_lag(Td,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope

```

```

addRow('V','Yaw gain vs Torque (centre)','(deg/s)/Nm', local_slope(Td,yaw, mask_Td));
addRow('V','Yaw time lag vs Torque','s',lag_yaw_Td);
addRow('V','Yaw deadband vs Torque @0','Nm',yaw_T_db);
addRow('V','Loop area (Yaw-Torque)','(deg/s)·Nm',area_yaw_Td);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, inc)','-',R2_V_inc);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, dec)','-',R2_V_dec);

%% 4) GHI EXCEL & IN
T = table(G,M,U,V,'VariableNames',{'Group','Metric','Unit','Value'});
writetable(T,outXlsx,'Sheet','Results','WriteVariableNames',true);

fprintf('=== on-centre KPIs (1 chu kỳ đầu sau t >= 20 s) ===\n');
for i=1:height(T)
    fprintf('%-2s | %-52s [%s] : %.6g\n',T.Group{i},T.Metric{i},T.Unit{i},T.Value(i));
end
fprintf('Đã lưu: %s (sheet: Results)\n', outXlsx);

%% nested: thêm hàng
function local_add_row(g,m,u,v)
G{end+1,1}=g; M{end+1,1}=m; U{end+1,1}=u;
if isempty(v) || ~(isnumeric(v)&&isscalar(v)), V(end+1,1)=NaN; else, V(end+1,1)=v;
end
end
end

%% ===== HÀM PHỤ TRỢ =====
function [i1,i2]=first_cycle_indices(fd)
fd=fd(:); z=find(fd(1:end-1).*fd(2:end)<=0);
if numel(z)<2, i1=[]; i2=[]; return; end
s=sign(fd(z+1)-fd(z)); i1=[]; i2=[];
for k=1:numel(z)-1
    if s(k)~=0
        j=find(s(k+1:end)==s(k),1,'first');
        if ~isempty(j), i1=z(k); i2=z(k+1+j-1); return; end
    end
end
end

function [slope,R2]=linfit_OLS(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); yf=polyval(p,x);
SSres=sum((y-yf).^2); SStot=sum((y-mean(y)).^2); R2=1-SSres/max(SStot,eps);
end

function [slope,R2]=linfit_Pearson(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); C=corrcoef(x,y); R2=C(1,2)^2;
end

% ---- local_slope: ước lượng độ dốc đặc tính x→y trong mask (OLS + smoothing tùy
chọn) ----
function s = local_slope(x,y,mask)
x = x(:); y = y(:);
if nargin<3 || isempty(mask), mask = true(size(x)); end
x = x(mask); y = y(mask);
if numel(x) < 3, s = NaN; return; end
% Sắp xếp theo x để mượt ổn định theo biến độc lập
[xs,idx] = sort(x);
ys = y(idx);
% Smoothing nhẹ để giảm nhiễu
if exist('sgolayfilt','file') && numel(ys) >= 11
    ys = sgolayfilt(ys,3,11);

```

```

elseif numel(ys) >= 5
ys = movmedian(ys,5);
end
p = polyfit(xs,ys,1);
s = p(1);
end

function [db,y1,y2]=deadband_y_at_x0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(x(1:end-1).*x(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; y1=NaN; y2=NaN; return; end
y1=interp1(x(i(1):i(1)+1),y(i(1):i(1)+1),0);
y2=interp1(x(i(2):i(2)+1),y(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(y2-y1);
end

function [db,x1,x2]=deadband_x_at_y0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(y(1:end-1).*y(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; x1=NaN; x2=NaN; return; end
x1=interp1(y(i(1):i(1)+1),x(i(1):i(1)+1),0);
x2=interp1(y(i(2):i(2)+1),x(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(x2-x1);
end

function lag_s=time_lag(x,y,dt,maxLagS)
x=x(:)-mean(x); y=y(:)-mean(y);
N=min(round(maxLagS/dt),floor(numel(x)/4)); if N<1, lag_s=NaN; return; end
[c,l]=xcorr(y,x,N,'coeff'); [~,i]=max(c); lag_s=l(i)*dt;
end

function x_at_y=x_at_y_target(x,y,y0)
x=x(:); y=y(:);
i=find((y(1:end-1)<=y0 & y(2:end)>=y0) | (y(1:end-1)>=y0 & y(2:end)<=y0),1,'first');
if isempty(i), x_at_y=NaN; else, x_at_y=interp1(y(i:i+1),x(i:i+1),y0); end
end

function slope=slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,ay0,branchSign)
A=max(abs(ay)); if A==0, slope=NaN; return; end
bw=0.01*A; bw_max=0.10*A; Nmin=20; spreadMin=0.02; % g
ok=(branchSign>0 & Td>=0) | (branchSign<0 & Td<=0);
slope=NaN;
while bw<=bw_max
m=ok & abs(ay-ay0)<=bw; x=ay(m); y=Td(m);
if numel(x)>=Nmin && (max(x)-min(x)>=spreadMin)
if exist('sgolayfilt','file') && numel(y)>=11, y=sgolayfilt(y,3,11); end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); return;
end
bw=bw*1.5;
end
end

function r=safe_ratio(a,b)
if ~isfinite(a)||~isfinite(b)||b==0, r=NaN; else, r=abs(a)/abs(b); end
end
%%%=====

function SIMULINK_On_centre_KPI_SIMULINK(matFile, outXlsx)
% KPI on-centre, chỉ chu kỳ đầu tiên sau t >= 0 s (Simulink). ay ở [g].
% Xuất 1 sheet Excel (Group | Metric | Unit | Value) và in theo cột dọc.

%% 0) LOAD & TIỀN XỬ LÝ
if nargin < 1 || isempty(matFile), matFile = 'EX_FEEL_Weavetest_10s_V100'; end
if nargin < 2 || isempty(outXlsx), outXlsx = 'Simulink_on_centre_KPIs.xlsx'; end

```

```

S = load(matFile);
Time = S.Time_data(:);
Td = S.Td_data(:); % Nm
fd = S.fddeg_data(:); % deg
ay = S.afg_data(:); % g
yaw = S.dpsideg_data(:); % deg/s

% Lấy từ t >= 0 s, loại NaN đồng thời
m = Time >= 5;
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
m = ~(isnan(Time)|isnan(Td)|isnan(fd)|isnan(ay)|isnan(yaw));
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
if numel(Time) < 6, error('Không đủ dữ liệu sau thời điểm bắt đầu.');
```

end

```

dt = median(diff(Time));

%% 1) CẮT CHU KỲ ĐẦU (zero-crossing cùng chiều → fallback 5 s)
[i1,i2] = first_cycle_indices(fd);
if ~isempty(i1) && ~isempty(i2) && i2 > i1+1
r = i1:i2;
else
T1 = Time(1); T2 = min(Time(1)+5, Time(end)); % weave 0.2 Hz ~ 5 s
r = (Time>=T1) & (Time<=T2);
warning('Auto detect fail → dùng cửa sổ 5 s (%.3f→%.3f s).',T1,T2);
end
Time = Time(r); Td = Td(r); fd = fd(r); ay = ay(r); yaw = yaw(r);

% Khử bias yaw trong chu kỳ để tránh deadband NaN
yaw = yaw - mean(yaw,'omitnan');
```

%% 2) THAM SỐ PHỤ

```

bw_fd = 0.01*max(abs(fd)); bw_Td = 0.01*max(abs(Td));
bw_ay = 0.01*max(abs(ay)); bw_yaw = 0.01*max(abs(yaw));
mask_fd_pm3 = abs(fd) <= 3;
```

% Phân nhánh theo chiều đánh lái (tăng/giảm SWA), có làm mượt & ngưỡng

```

fd_s = movmedian(fd,5); % mượt nhẹ SWA
fd_dot = gradient(fd_s, Time);
thr = 1e-4; % ngưỡng nhỏ để tránh lẫn
inc = fd_dot >= thr; % nhánh đi
dec = fd_dot <= -thr; % nhánh về
```

%% 3) TÍNH KPI

```

G={}; M={}; U={}; V=[];
addRow = @(g,m,u,v) local_add_row(g,m,u,v);

% ===== I) Torque vs SWA =====
[pos_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm3 & (Td>=0));
[neg_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm3 & (Td<=0));

% Mean gradient @SWA=0: OLS trong cửa sổ ±1% (không dùng gradient)
grad_Td0_P = mean_grad_masked(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
grad_Td0_N = mean_grad_masked(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));

[torque_db_fd0,~,~] = deadband_y_at_x0(fd,Td);
area_Td_fd = polyarea([fd;fd(1)],[Td;Td(1)]);

% R² theo từng nhánh (Pearson r²), bỏ vùng phẳng |SWA|<1°
centre_exclude = abs(fd) >= 1;
[~,R2_I_inc] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & inc & centre_exclude);
[~,R2_I_dec] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & dec & centre_exclude);
```

```

addRow('I','Stiffness (+), |SWA|≤3°','Nm/deg',pos_stiff);
addRow('I','Stiffness (-), |SWA|≤3°','Nm/deg',neg_stiff);
addRow('I','Asymmetry ratio (+/-)', '- ',safe_ratio(pos_stiff,neg_stiff));
addRow('I','Mean gradient @SWA=0 (pos)','Nm/deg',grad_Td0_P);
addRow('I','Mean gradient @SWA=0 (neg)','Nm/deg',grad_Td0_N);
addRow('I','Torque deadband @SWA=0','Nm',torque_db_fd0);
addRow('I','Loop area (Torque-SWA)','Nm·deg',area_Td_fd);
addRow('I','Max |Torque|','Nm',max(abs(Td)));
addRow('I','Max |SWA|','deg',max(abs(fd)));
addRow('I','Linearity R2 (Torque~SWA, inc)', '- ',R2_I_inc);
addRow('I','Linearity R2 (Torque~SWA, dec)', '- ',R2_I_dec);

% ===== II) Ay vs SWA =====
[ay_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,ay);
ay_thr = bw_ay;
x_pos = x_at_y_target(fd,ay,+ay_thr);
x_neg = x_at_y_target(fd,ay,-ay_thr);
resp_db = NaN; if ~isnan(x_pos)&&~isnan(x_neg), resp_db = abs(x_pos-x_neg); end
area_Ay_fd = polyarea([fd;fd(1)],[ay;ay(1)]);
[~,R2_II_inc] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & inc & centre_exclude);
[~,R2_II_dec] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & dec & centre_exclude);

addRow('II','Angle deadband @Ay=0','deg',ay_ang_db);
addRow('II','Response angle deadband @±1% Aymax','deg',resp_db);
addRow('II','Loop area (Ay-SWA)','g·deg',area_Ay_fd);
addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, inc)', '- ',R2_II_inc);
addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, dec)', '- ',R2_II_dec);

% ===== III) Torque vs Ay =====
[torque_db_ay0,~,~] = deadband_y_at_x0(ay,Td);
[ay_db_Td0,~,~] = deadband_y_at_x0(Td,ay);
area_Td_ay = polyarea([ay;ay(1)],[Td;Td(1)]);

% dSlope ổn định @@ & @±0.1 g (hồi quy + cửa sổ thích nghi, phân nhánh theo ay_dot)
s0p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,+1,Time);
s0n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,-1,Time);
s01p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,+0.1,+1,Time);
s01n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,-0.1,-1,Time);
s01 = mean([s01p s01n],'omitnan');

% R2 theo nhánh, giới hạn |Ay|≤0.15 g để tránh deadband quá phẳng
centreAy = abs(ay) <= 0.15;
ay_dot = gradient(movmedian(ay,5), Time);
inc_ay = ay_dot >= thr;
dec_ay = ay_dot <= -thr;
[~,R2_III_inc] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & inc_ay);
[~,R2_III_dec] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & dec_ay);

addRow('III','Torque deadband @Ay=0','Nm',torque_db_ay0);
addRow('III','Ay deadband @Torque=0','g',ay_db_Td0);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (pos)','Nm/g',s0p);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (neg)','Nm/g',s0n);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=±0.1 g (avg)','Nm/g',s01);
addRow('III','Loop area (Torque-Ay)','Nm·g',area_Td_ay);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, inc)', '- ',R2_III_inc);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, dec)', '- ',R2_III_dec);
addRow('III','Peak |Ay|','g',max(abs(ay)));
addRow('III','Peak |Torque|','Nm',max(abs(Td)));

% ===== IV) Yaw vs SWA =====
[yaw_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,yaw);
area_yaw_fd = polyarea([fd;fd(1)],[yaw;yaw(1)]);

```

```

[~,R2_IV_inc] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & inc & centre_exclude);
[~,R2_IV_dec] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & dec & centre_exclude);
lag_yaw_fd = time_lag(fd,yaw,dt,1.0); % ✓ hàm đã khai báo phía dưới

addRow('IV','Yaw gain vs SWA (centre)','(deg/s)/deg', slope_OLS(fd,yaw, mask_fd_pm3));
addRow('IV','Yaw time lag vs SWA','s',lag_yaw_fd);
addRow('IV','Yaw deadband @0','deg',yaw_ang_db);
addRow('IV','Loop area (Yaw-SWA)','(deg/s)·deg',area_yaw_fd);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, inc)','-',R2_IV_inc);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, dec)','-',R2_IV_dec);

% ===== V) Yaw vs Torque =====
[yaw_T_db,~,~] = deadband_x_at_y0(Td,yaw);
area_yaw_Td = polyarea([Td;Td(1)],[yaw;yaw(1)]);
mask_Td = abs(Td) <= 0.3;
[~,R2_V_inc] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & inc);
[~,R2_V_dec] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & dec);
lag_yaw_Td = time_lag(Td,yaw,dt,1.0); % ✓

addRow('V','Yaw gain vs Torque (centre)','(deg/s)/Nm', slope_OLS(Td,yaw, mask_Td));
addRow('V','Yaw time lag vs Torque','s',lag_yaw_Td);
addRow('V','Yaw deadband vs Torque @0','Nm',yaw_T_db);
addRow('V','Loop area (Yaw-Torque)','(deg/s)·Nm',area_yaw_Td);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, inc)','-',R2_V_inc);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, dec)','-',R2_V_dec);

%% 4) GHI EXCEL & IN
T = table(G,M,U,V,'VariableNames',{'Group','Metric','Unit','Value'});
writetable(T,outXlsx,'Sheet','Results','WriteVariableNames',true);

fprintf('=== on-centre KPIs (1 chu kỳ đầu sau t >= 0 s) ===\n');
for i=1:height(T)
    fprintf('%-2s | %-52s [%s] : %.6g\n',T.Group{i},T.Metric{i},T.Unit{i},T.Value(i));
end
fprintf('Đã lưu: %s (sheet: Results)\n', outXlsx);

%% nested: thêm hàng
function local_add_row(g,m,u,v)
G{end+1,1}=g; M{end+1,1}=m; U{end+1,1}=u;
if isempty(v) || ~(isnumeric(v)&&isscalar(v)), V(end+1,1)=NaN; else, V(end+1,1)=v;
end
end
end

%% ===== HÀM PHỤ TRỢ =====
function [i1,i2]=first_cycle_indices(fd)
fd=fd(:); z=find(fd(1:end-1).*fd(2:end)<=0);
if numel(z)<2, i1=[]; i2=[]; return; end
s=sign(fd(z+1)-fd(z)); i1=[]; i2=[];
for k=1:numel(z)-1
    if s(k)~=0
        j=find(s(k+1:end)==s(k),1,'first');
        if ~isempty(j), i1=z(k); i2=z(k+1+j-1); return; end
    end
end
end

function [slope,R2]=linfit_OLS(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask);
if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); yf=polyval(p,x);
SSres=sum((y-yf).^2); SStot=sum((y-mean(y)).^2); R2=1-SSres/max(SStot,eps);

```

```

end

function [slope,R2]=linfit_Pearson(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask);
if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1);
C=corrcoef(x,y); R2=C(1,2)^2;
end

function s=slope_OLS(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, s=NaN; else, s=polyfit(x,y,1); s=s(1); end
end

% ---- ROBUST mean gradient trong cửa sổ (OLS + sort) ----
function g = mean_grad_masked(x,y,mask)
xw=x(mask); yw=y(mask);
if numel(xw) < 5, g = NaN; return; end
[xs,idx] = sort(xw); ys = yw(idx);
if exist('sgolayfilt','file') && numel(ys) >= 11
ys = sgolayfilt(ys,3,11);
end
p = polyfit(xs,ys,1); g = p(1);
end

% ---- Deadband robust: chấp nhận trùng điểm, không dùng interp1 ----
function [db,y1,y2] = deadband_y_at_x0(x, y)
x = x(:); y = y(:);
if numel(x)<2, db=NaN; y1=NaN; y2=NaN; return; end
eps0 = 1e-9*max(1,range(x));
xz = x; xz(abs(xz)<eps0) = 0; % xét dấu
s = sign(xz);
cand = find(s(1:end-1).*s(2:end) <= 0);
vals = [];
for k = 1:numel(cand)
i = cand(k); j = i+1;
if x(i) == x(j) % tránh điểm trùng
jj = j;
while jj <= numel(x) && x(jj) == x(i), jj = jj + 1; end
if jj <= numel(x), j = jj; else
ii = i;
while ii >= 1 && x(ii) == x(i), ii = ii - 1; end
if ii >= 1, i = ii; else, continue; end
end
end
if (xz(i)<=0 && xz(j)>=0) || (xz(i)>=0 && xz(j)<=0)
denom = (x(j) - x(i));
if denom ~= 0
y0 = y(i) + (y(j)-y(i))*(0 - x(i))/denom; % tuyến tính tay
vals(end+1,1) = y0; %#ok<AGROW>
end
end
if numel(vals) >= 2, break; end
end
if numel(vals) >= 2, y1 = vals(1); y2 = vals(2); db = abs(y2 - y1);
else, db = NaN; y1 = NaN; y2 = NaN; end
end

function [db,x1,x2] = deadband_x_at_y0(x, y)
x = x(:); y = y(:);
if numel(y)<2, db=NaN; x1=NaN; x2=NaN; return; end
eps0 = 1e-9*max(1,range(y));
yz = y; yz(abs(yz)<eps0) = 0;

```

```

s = sign(yz);
cand = find(s(1:end-1).*s(2:end) <= 0);
vals = [];
for k = 1:numel(cand)
i = cand(k); j = i+1;
if y(i) == y(j)
jj = j;
while jj <= numel(y) && y(jj) == y(i), jj = jj + 1; end
if jj <= numel(y), j = jj; else
ii = i;
while ii >= 1 && y(ii) == y(i), ii = ii - 1; end
if ii >= 1, i = ii; else, continue; end
end
end
if (yz(i)<=0 && yz(j)>=0) || (yz(i)>=0 && yz(j)<=0)
denom = (y(j) - y(i));
if denom ~= 0
x0 = x(i) + (x(j)-x(i))*(0 - y(i))/denom;
vals(end+1,1) = x0; %#ok<AGROW>
end
end
if numel(vals) >= 2, break; end
end
if numel(vals) >= 2, x1 = vals(1); x2 = vals(2); db = abs(x2 - x1);
else, db = NaN; x1 = NaN; x2 = NaN; end
end

% ---- Tìm x tại y=y0 an toàn (tránh trùng điểm) ----
function x_at_y = x_at_y_target(x, y, y0)
x = x(:); y = y(:);
if numel(y)<2, x_at_y = NaN; return; end
eps0 = 1e-9*max(1,range(y));
yz = y; yz(abs(yz - y0) < eps0) = y0;
s = sign(yz - y0);
cand = find(s(1:end-1).*s(2:end) <= 0);
x_at_y = NaN;
for k = 1:numel(cand)
i = cand(k); j = i+1;
if y(i) == y(j)
jj = j;
while jj <= numel(y) && y(jj) == y(i), jj = jj + 1; end
if jj <= numel(y), j = jj; else
ii = i;
while ii >= 1 && y(ii) == y(i), ii = ii - 1; end
if ii >= 1, i = ii; else, continue; end
end
end
denom = (y(j) - y(i));
if denom ~= 0
x_at_y = x(i) + (x(j)-x(i))*(y0 - y(i))/denom;
return;
end
end
end

% ---- Time lag (đã bổ sung) ----
function lag_s = time_lag(x, y, dt, maxLagS)
x = x(:) - mean(x); y = y(:) - mean(y);
Nlag = min(round(maxLagS/dt), floor(numel(x)/4));
if Nlag < 1, lag_s = NaN; return; end
[c, lags] = xcorr(y, x, Nlag, 'coeff'); % y so với x
[~, i] = max(c);

```

```

lag_s = lags(i) * dt;
end

% ---- Slope dTd/dAy ổn định @Ay=ay0, phân nhánh theo ay_dot ----
function slope=slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,ay0,branchSign,Time)
A=max(abs(ay)); if A==0, slope=NaN; return; end
bw=0.01*A; bw_max=0.15*A; Nmin=20; spreadMin=0.03; % g
ay_dot = gradient(movmedian(ay,5), Time);
thr=1e-4;
okBranch = ((branchSign>0) & (ay_dot>=thr)) | ((branchSign<0) & (ay_dot<=-thr));
slope=NaN;
while bw<=bw_max
m=okBranch & abs(ay-ay0)<=bw; x=ay(m); y=Td(m);
if numel(x)>=Nmin && (max(x)-min(x)>=spreadMin)
if exist('sgolayfilt','file') && numel(y)>=11, y=sgolayfilt(y,3,11); end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); return;
end
bw=bw*1.5;
end
end

function r=safe_ratio(a,b)
if ~isfinite(a)||~isfinite(b)||b==0, r=NaN; else, r=abs(a)/abs(b); end
end

fprintf('\nĐã ghi kết quả vào: %s (sheet "Results")\n', outFile);

end

% ===== HÀM PHỤ TRỢ =====
function tC = firstCrossing(t, y, yth, sgn)
sgn = sign(sgn); if sgn == 0, sgn = 1; end
yy = (y - yth) * sgn;
ix = find(yy >= 0, 1, 'first');
if isempty(ix) || ix == 1, tC = t(max(1, ix)); return; end
tC = interp1(yy(ix-1:ix), t(ix-1:ix), 0, 'linear', 'extrap');
end

function Ts = settlingTime(t, y, yss, t0, band)
mask = t >= t0; t = t(mask); y = y(mask);
th = band * max(abs(yss), 1e-9);
ok = abs(y - yss) <= th;
Ts = NaN;
for k = 1:numel(t)
if all(ok(k:end)), Ts = t(k) - t(1); break; end
end
end

function [tR, SWR, rR, ayR] = resampleIfNeeded(t, SW, r, ay, t0, t_end, dtMax)
mask = (t >= t0 & t <= t_end);
t = t(mask); SW = SW(mask); r = r(mask); ay = ay(mask);
dt = median(diff(t));
if dt <= dtMax
tR = t; SWR = SW; rR = r; ayR = ay;
else
tR = (t(1):dtMax:t(end))';
SWR = interp1(t, SW, tR, 'linear', 'extrap');
rR = interp1(t, r, tR, 'linear', 'extrap');
ayR = interp1(t, ay, tR, 'linear', 'extrap');
end
end

```

```

function lag_s = timeLag_xcorr(t, x, y)
dt = median(diff(t)); x = detrend(x); y = detrend(y);
[c, lags] = xcorr(y, x, 'coeff'); [~, i] = max(c); lag_s = lags(i) * dt;
end

function tfrac = interpTimeFrac(t, r, r0, t0, frac, sgn)
r_init = mean(r(t < t0));
target = r_init + frac * (r0 - r_init);
tfrac = firstCrossing(t, r, target, sgn) - t0;
end

%%%%%%=====

```

5.2.2. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu xung (Pulse input test)

```

%% CARSIM_Pulse.m
% Phân tích pulse test theo GB/T 6323-2014 + xuất Excel
clear; clc;

%% ===== 1) Load data =====
matFile = 'Carsim_Pulse_V100_Td19.85.mat'; % chỉnh nếu tên khác
S = load(matFile);

req = {'Timec_data', 'fdc_data', 'dpsic_data'};
for k = 1:numel(req)
assert(isfield(S, req{k}), 'Thiếu biến %s trong file MAT.', req{k});
end

t = S.Timec_data(:); % [s]
dSW = S.fdc_data(:); % steering angle [deg]
rYW = S.dpsic_data(:); % yaw rate [deg/s]
Tsw = []; ay = [];
if isfield(S, 'Tdc_data'), Tsw = S.Tdc_data(:); end
if isfield(S, 'ayc_data'), ay = S.ayc_data(:); end

%% ===== 2) Tiền xử lý =====
good = isfinite(t) & isfinite(dSW) & isfinite(rYW);
t = t(good); dSW = dSW(good); rYW = rYW(good);
[~,ord] = sort(t); t = t(ord); dSW = dSW(ord); rYW = rYW(ord);

dt = median(diff(t)); Fs = 1/dt;
dSW_d = detrend(dSW,1); % deg
rYW_d = detrend(rYW,1); % deg/s

%% ===== 3) Ước lượng FRF H(f)=R/Delta =====
N = 2^nextpow2(max(numel(t)/4, 1024)); % kích thước cửa sổ đề xuất
N = max(N,1024);
nover = floor(0.5*N);
if exist('hann','file')
win = hann(N);
else
win = hanning(N);
end

f_targets = 0.5:0.5:3.0; % Hz theo bảng tiêu chuẩn

[H,f] = tfestimate(dSW_d, rYW_d, win, nover, [], Fs); % H = R/Delta
[Cxy,~] = mscohere(dSW_d, rYW_d, win, nover, [], Fs); % coherence 0..1

Gain = abs(H); % [1/s]
PhaseDeg = rad2deg(angle(H)); % pha của r so với delta (dương: r dẫn)

```

```

gain_at = interp1(f, Gain, f_targets, 'pchip', 'extrap');
phase_at = interp1(f, PhaseDeg, f_targets, 'pchip', 'extrap');
coh_at = interp1(f, Cxy, f_targets, 'pchip', 'extrap');

% Pha trễ  $\alpha = -\angle H$ , đưa về  $[-180, 180]$ 
alpha_at = -wrapTo180_local(phase_at);

%% ===== 4) Chỉ tiêu cộng hưởng (7.5.3) =====
lowBand = f <= 0.2;
if any(lowBand) % A0 ~ gain tần số rất thấp
A0 = mean(Gain(lowBand), 'omitnan');
else
A0 = interp1(f, Gain, 0.5, 'pchip', 'extrap'); % fallback khi thiếu dải thấp
end

idxBand = f >= 0.5 & f <= 3.0;
[Ap, iPk] = max(Gain(idxBand));
f_res = f(idxBand); f_res = f_res(iPk);
D_dB = 20*log10(Ap/A0);

%% ===== 5) Bảng kết quả + lưu CSV/XLSX =====
T = table(f_targets(:), gain_at(:), alpha_at(:), coh_at(:), ...
'VariableNames',
{'Frequency_Hz', 'Gain_r_div_dsw_per_s', 'PhaseLag_alpha_deg', 'Coherence'});

disp('=== Frequency Response Metrics (Pulse Test - GB/T6323-2014) ===');
disp(T);
fprintf('A0 (low-frequency gain) = %.4f 1/s\n', A0);
fprintf('Ap (resonant peak gain) = %.4f 1/s @ f = %.3f Hz\n', Ap, f_res);
fprintf('D (resonant peak level) = %.2f dB\n', D_dB);

% Tên file xuất
if exist('erase','builtin')
base = erase(matFile, '.mat');
else
base = strrep(matFile, '.mat', '');
end
csvName = [base '_GBT6323_Pulse_FRF.csv'];
writetable(T, csvName);

xlsxName = [base '_GBT6323_Pulse_FRF.xlsx'];
if exist(xlsxName, 'file'), delete(xlsxName); end

% --- Sheet 1: FRF_0p5_3Hz (bảng chỉ tiêu theo tần số mục tiêu) ---
writetable(T, xlsxName, 'Sheet', 'FRF_0p5_3Hz');

% --- Sheet 2: Resonance (tóm tắt cộng hưởng) ---
summaryTbl = table(A0, Ap, f_res, D_dB, ...
'VariableNames', {'A0_1_per_s', 'Ap_1_per_s', 'f_res_Hz', 'D_dB'});
writetable(summaryTbl, xlsxName, 'Sheet', 'Resonance');

% Thêm hàng tiêu đề mô tả đơn vị/ý nghĩa (đặt lên đầu sheet Resonance)
res_header = {
'Metric', 'Value', 'Unit', 'Description';
'A0 (low-frequency gain)', A0, '1/s', 'Gain rất thấp tần số (xấp xỉ DC)';
'Ap (resonant peak gain)', Ap, '1/s', 'Đỉnh cộng hưởng của |H(f)| trong 0.5–3 Hz';
'f_res', f_res, 'Hz', 'Tần số tại đỉnh cộng hưởng';
'D', D_dB, 'dB', 'Mức cộng hưởng 20log10(Ap/A0)'};
};
writecell(res_header, xlsxName, 'Sheet', 'Resonance', 'Range', 'F1');

```

```

% --- Sheet 3: Meta (thông tin cấu hình xử lý) ---
metaCell = {
'MAT file', matFile;
'Fs (Hz)', Fs;
'dt (s)', dt;
'Window (N)', N;
'Overlap (samples)', nover;
'Targets (Hz)', sprintf('%.1f ', f_targets);
'Notes 1', 'Gain cao @ 0.5-1 Hz & \alpha nhỏ -> phản ứng trực tiếp.';
'Notes 2', 'D (dB) lớn -> cộng hưởng rõ, cần nhắc tăng damping EPS/chassis.'
};
metaTbl = cell2table(metaCell, 'VariableNames', {'Name','Value'});
writetable(metaTbl, xlsName, 'Sheet','Meta');

% fprintf('\n--- Notes ---\n');
% fprintf('* Excel: sheets FRF_0p5_3Hz, Resonance, Meta -> %s\n', xlsName);
% fprintf('* Gain cao ở 0.5-1 Hz & \alpha nhỏ -> phản ứng trực tiếp.\n');
% fprintf('* D (dB) lớn -> cộng hưởng rõ, nên tăng damping EPS/chassis.\n');

%% ===== 6) Vẽ đồ thị đặc tính biên tần =====
figure('Color','w','Name','GB/T6323-2014 Pulse Test - Frequency Characteristics');

subplot(2,1,1);
f_plot = f; f_plot(f_plot<=0) = NaN; % tránh log(0) trên trục x
semilogx(f_plot, Gain, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
semilogx(f_targets, gain_at, 'ko', 'MarkerFaceColor','y');
yline(A0,'--','A_0','Color',[0.2 0.6 0.2]);
plot(f_res, Ap, 'rp', 'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
grid on; xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 12); ylabel('$Gain: \dot{\psi}_c/\varphi_{dc}[1/s]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex');
title('Amplitude (Gain) - Yaw rate per Steering Angle', 'FontSize', 16);
legend({'FRF |H(f)|', 'Targets 0.5-3 Hz', 'A_0 (low-f)', 'A_p (peak)'}, 'Location','best', 'FontSize', 10);

subplot(2,1,2);
semilogx(f_plot, -wrapTo180_local(PhaseDeg), 'm-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
semilogx(f_targets, alpha_at, 'ks', 'MarkerFaceColor','c');
grid on; xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 12); ylabel('$Phase lag: \alpha[deg]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex');
title('$Phase Lag: \dot{\psi}_c-\varphi_{dc}[deg]$', 'FontSize', 16,'Interpreter','latex');
legend({'Phase lag \alpha(f)', 'Targets 0.5-3 Hz'}, 'Location','best', 'FontSize', 10);

%% ===== 7) (Tuỳ chọn) hiển thị thêm tín hiệu thời gian =====
if ~isempty(Tsw) || ~isempty(ay) % <== đã sửa: dùng ~ thay vì !
figure('Color','w','Name','Signals - Time Histories');
tiledlayout(3,1,'Padding','compact','TileSpacing','compact');
nexttile; plot(t, dSW, 'k'); grid on; ylabel('$\varphi_{dc}[deg]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex'); title('Steering Wheel Angle', 'FontSize', 16);
nexttile; plot(t, rYW, 'b'); grid on; ylabel('$\dot{\psi}_c[Deg/s]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex'); title('Yaw Rate', 'FontSize', 16);

nexttile;
if ~isempty(Tsw), plot(t, Tsw, 'r'); hold on; ylabel('$T_{dc}[Nm]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex'); end
if ~isempty(ay), yyaxis right; plot(t, ay, 'g'); ylabel('$a_{yc}[g]$', 'FontSize', 12,'Interpreter','latex'); end
grid on; xlabel('Time (s)', 'FontSize', 12); title('Other Signals', 'FontSize', 16);
end

%% ===== Notes =====

```

```

fprintf('\n--- Notes ---\n');
fprintf('* Excel: sheets FRF_0p5_3Hz, Resonance, Meta -> %s\n', xlsName);
fprintf('* Gain cao ở 0.5-1 Hz &  $\alpha$  nhỏ -> phản ứng trực tiếp.\n');
fprintf('* D (dB) lớn -> cộng hưởng rõ, nên tăng damping EPS/chassis.\n');

%% ===== Local function: wrapTo180 (không cần toolbox) =====
function out = wrapTo180_local(inDeg)
% Đưa góc (độ) về [-180, 180]
out = mod(inDeg + 180, 360) - 180;
end

```

5.2.3. Thử nghiệm khả năng trả lái (Returnability test)

```

function CARSIM_returnability_GBT6323(a)
% GB/T 6323-2014 - Mục 8.4: Steering Returnability
% - A1(|yaw| peak) = max |peak| after release
% - Tính  $\xi$ , D cả khi không overshoot (A1 cho  $\xi/D$  = NaN)
% - Er theo 8.4.7
% - Vẽ SWA, Yaw, ACC, Phase và đồ thị  $\xi$ -D (theo yêu cầu)

%% ===== Cấu hình =====
cfg.file_mat = 'Carsim_Return_N_V100_Td3.06.mat';
cfg.sg_win = 21; cfg.sg_poly = 3;
cfg.torque_eps = 0.20; cfg.min_hold_s = 0.10; cfg.min_angle_deg = 5;
cfg.band_yaw = 0.4; cfg.band_dur_s = 1.0;
cfg.delta_r_time = 3.0; cfg.min_peak_dist_s = 0.10;
cfg.var_stop_when_stable = true;

% ===== MANUAL trước; để trống -> AUTO =====
cfg.release_mode='manual'; cfg.release_time_s=NaN;
if nargin>=1 && ~isempty(a) && isnumeric(a) && isfinite(a) && a>=0
    cfg.release_time_s=a;
else
    try ain=input('Nhập a (s) để ấn định thời điểm thả. Bỏ trống = AUTO: ', 's'); catch,
        ain=''; end
    ain=strtrim(ain);
    if isempty(ain), cfg.release_mode='auto';
    else
        aval=str2double(ain);
        if ~isnan(aval)&&isfinite(aval)&&aval>=0, cfg.release_time_s=aval; else,
            cfg.release_mode='auto'; end
    end
end

%% ===== Nạp dữ liệu =====
S=load(cfg.file_mat);
must={'Timec_data','Tdc_data','fdc_data','ayc_data','dpsic_data'};
for k=1:numel(must), assert(isfield(S,must{k}), 'Thiếu %s trong .mat', must{k}); end
t=S.Timec_data(:); assert(all(diff(t)>0), 'Time phải tăng đơn điệu. ');
dt=mean(diff(t)); fs=1/dt; % #ok<NASGU>
Tsw=S.Tdc_data(:); ang=S.fdc_data(:); ay=S.ayc_data(:); yaw=S.dpsic_data(:);

if mod(cfg.sg_win,2)==0, cfg.sg_win=cfg.sg_win+1; end
try, ang_f=sgolayfilt(ang, cfg.sg_poly, cfg.sg_win);
yaw_f=sgolayfilt(yaw, cfg.sg_poly, cfg.sg_win);
catch, ang_f=ang; yaw_f=yaw; end

%% ===== 8.4.1 - thời điểm thả =====
if strcmpi(cfg.release_mode, 'manual') && isfinite(cfg.release_time_s)
    a_clamp=min(max(cfg.release_time_s, t(1)), t(end));
    [~,idx0]=min(abs(t-a_clamp)); rel_note=sprintf('MANUAL (a = %.3fs)', t(idx0));

```

```

else
idx0=detect_release_local(t,Tsw,ang_f,cfg); rel_note='AUTO (torque & angle-rate
thresholds)';
end
t_release=t(idx0); ang0=interp1(t,ang,t_release); yaw0=interp1(t,yaw,t_release);
ay0=interp1(t,ay,t_release);

%% ===== 8.4.2 - thời gian ổn định =====
[ts, idx_end]=settle_time_local(t,yaw_f,idx0,cfg.band_yaw,cfg.band_dur_s,0);
if isnan(ts), idx_end=min(numel(t),idx0+round(3/dt)); ts=t(idx_end)-t_release; end
holdN=max(1,round(cfg.band_dur_s/dt)); idx_a=max(idx_end-holdN+1,idx0);
r_ss=mean(yaw_f(idx_a:idx_end));

%% ===== 8.4.3 - Δr @3s =====
t_3s=t_release+cfg.delta_r_time;
delta_r=interp1(t,yaw,t_3s,'linear','extrap');

%% ===== 8.4.4 - Peak (A1 |yaw| peak) =====
t_end_pk=min(t(end), t_release+max(ts,1.0)); mask_pk=(t>=t_release)&(t<=t_end_pk);
yseg=yaw_f(mask_pk)-r_ss; dtloc=mean(diff(t));
mpd=max(1,round(cfg.min_peak_dist_s/dtloc));
[p_pos,~]=findpeaks( yseg, 'MinPeakDistance', mpd);
[p_neg,~]=findpeaks(-yseg, 'MinPeakDistance', mpd);
if isempty(p_pos)&&isempty(p_neg), A1_abs_display=max(abs(yseg));
else, A1_abs_display=max([p_pos(:); p_neg(:)]); end

%% ===== 8.4.4a - σ =====
den=abs(yaw0);
if den>1e-6, sigma_pct=(A1_abs_display-den)/den*100; if sigma_pct<0, sigma_pct=0; end
else, sigma_pct=0; end

%% ===== 8.4.5 & 8.4.6 - f0, ξ, D & A1 =====
[hasOS,~]=first_overshoot_peak(t,yaw_f,t_release,r_ss,cfg.min_peak_dist_s);
side_for_decay='same'; if hasOS, side_for_decay='opposite'; end
[tpks,
Apks]=peaks_on_side(t,yaw_f,t_release,r_ss,cfg.min_peak_dist_s,yaw0,side_for_decay);
if numel(tpks)>=2, Tper=diff(tpks(1:2)); fo=1/mean(Tper); else, fo=NaN; end
if numel(Apks)>=2
A1_calc=Apks(1); A2_calc=Apks(2);
delta=log(A1_calc/A2_calc);
xi= delta / sqrt(4*pi^2 + delta^2);
D_meas= 1 - (A2_calc/A1_calc);
else
xi=NaN; D_meas=NaN;
end
if hasOS, A1_for_table=A1_calc; else, A1_for_table=NaN; end

%% ===== 8.4.7 - Er =====
dtE=min(0.2,dt); t0=t_release; t1=min(t(end), t_release+3.0);
tk=(t0:dtE:t1).'; if tk(end)<t1, tk(end+1,1)=t1; end
r0i=abs(interp1(t,yaw,t_release,'linear','extrap'));
if r0i<1e-6, Er=NaN;
else, rik=interp1(t,yaw,tk,'linear','extrap'); q=(rik./r0i).^2; Er=(sum(q)-0.5)*dtE;
end

%% ===== In & Ghi =====
P={}; SYM={}; UNIT={}; VAL=[]; NOTE={};
add_row("Thời điểm thả vô-lăng (Steering release time)","t_release","s", t_release);
add_row("Chế độ xác định thời điểm thả (Method for determining release time)","-","-",
rel_note);
add_row("Góc tại thời điểm thả (Steering angle at release)","angle_release","deg",
ang0);

```

```

add_row("Tốc độ quay thân xe tại thời điểm thả (Yaw rate at
release)","yaw_release","deg/s", yaw0);
add_row("Gia tốc ngang tại thời điểm thả (Lateral acceleration at
release)","ay_release","g", ay0);
add_row("Thời gian ổn định (Settling time)","ts","s", ts);
add_row("Điều kiện ổn định (Stability criterion)","yaw","≤ ... (Stability criterion)",
cfg.band_yaw);
add_row("Thời lượng duy trì (Duration time)","tr","s", cfg.band_dur_s);
add_row("Vận tốc quay còn lại sau 3 s (Remaining yaw rate after 3 s)","Δr@3s","deg/s",
delta_r);
add_row("Độ vượt quá (Overshoot ratio)","σ","%", sigma_pct);
add_row("Tốc độ quay cực đại sau thả (Peak yaw rate after release)","Apeak","deg/s",
A1_abs_display);
add_row("Tần số dao động riêng (Natural frequency)","f0","Hz", fo);
if isnan(A1_for_table), add_row("Đỉnh đầu 1 (First peak amplitude A1)","A1","deg/s",
NaN);
else, add_row("Đỉnh đầu 1 (First peak amplitude A1)","A1","deg/s", A1_for_table); end
add_row("Tỷ số suy giảm (Decay ratio between 2 peaks)","D","-", D_meas);
add_row("Hệ số tắt dần tương đối (Relative damping ratio)","ξ","-", xi);
add_row("Tổng phương sai vận tốc quay thân xe (Total yaw-rate variance)","Er","s",
Er);

fprintf('\n==== KẾT QUẢ MỤC 8.4 (GB/T 6323-2014) - SINGLE RUN =====\n');
fprintf('%-60s | %-12s | %-16s | %-14s | %s\n', ...
'Thông số (Tiếng Việt - English)', 'Ký hiệu (Symbol)', 'Đơn vị (Unit)', 'Value', 'Note');
fprintf('%s\n', repmat('-',1,125));
for i=1:numel(P)
if i<=numel(VAL) && isfinite(VAL(i)), vstr=sprintf('%.9g',VAL(i)); else, vstr=''; end
if i<=numel(NOTE)&&~isempty(NOTE{i}), nstr=NOTE{i}; else, nstr=''; end
fprintf('%-60s | %-12s | %-16s | %-14s | %s\n', ...
char(P{i}), char(SYM{i}), char(UNIT{i}), vstr, nstr);
end

xls=regexprep(cfg.file_mat,'\.mat$','.xlsx','once');
try, if exist(xls,'file'), delete(xls); end, catch, end
T=table(string(P),string(SYM),string(UNIT),VAL,string(NOTE), ...
'VariableNames',{ 'Thong_so_TV_EN', 'Ky_hieu_Symbol', 'Don_vi_Unit', 'Value', 'Note'});
writetable(T,xls,'Sheet','Sec8_4','WriteMode','overwritesheet');
Meta=table(string(cfg.file_mat),dt,fs,cfg.torque_eps,cfg.min_hold_s,cfg.min_angle_deg
, ...
cfg.band_yaw,cfg.band_dur_s,cfg.delta_r_time,cfg.min_peak_dist_s, ...
string(cfg.release_mode),cfg.release_time_s,r_ss, ...
'VariableNames',{ 'mat_file', 'dt_s', 'fs_Hz', 'torque_eps', 'min_hold_s', 'min_angle_deg',
...
'band_yaw_degps', 'band_dur_s', 'delta_r_time_s', 'min_peak_dist_s', 'release_mode', 'rele
ase_time_s', 'r_ss_degps'});
writetable(Meta,xls,'Sheet','Meta','WriteMode','overwritesheet');
disp(['>> Ghi Excel: ' xls]); disp('>> DONE.');
```

```

%% ===== HÌNH MINH HỌA CHÍNH =====
[~,tag,~]=fileparts(cfg.file_mat);

% ===== SWA =====
f1=figure('Color','w');
plot(t,ang,'LineWidth',1.4); grid on; hold on;
try xline(t_release,'k--','Release'); catch, yl=ylim; line([t_release
t_release],yl,'Color','k','LineStyle','--'); end
yline(0,'k:'); title('SWA','FontSize',16); xlabel('Time (s)','FontSize',12);
ylabel('$\varphi_{dc}$[Deg]$', 'FontSize',12,'Interpreter','latex');
```

```

% ===== Yaw rate =====
f2=figure('Color','w');
```

```

plot(t,yaw,'LineWidth',1.4); grid on; hold on;
try xline(t_release,'k--','Release'); catch, yl=ylim; line([t_release
t_release],yl,'Color','k','LineStyle','--'); end
yline(0,'k:');
if ~isnan(ts)
try xline(t_release+ts,'g--','ts'); catch, yl=ylim; line([t_release+ts
t_release+ts],yl,'Color','g','LineStyle','--'); end
end
plot(t_3s,delta_r,'o','MarkerSize',6,'LineWidth',1.4);
title('Yaw rate','FontSize',16); xlabel('Time (s)','FontSize',12);
ylabel('$\dot{\psi}_c$[Deg/s]','FontSize',12,'Interpreter','latex');

% ===== Lateral acceleration =====
f3=figure('Color','w');
plot(t,ay,'LineWidth',1.4); grid on; hold on;
try xline(t_release,'k--','Release'); catch, yl=ylim; line([t_release
t_release],yl,'Color','k','LineStyle','--'); end
yline(0,'k:'); title('ACC','FontSize',16); xlabel('Time (s)','FontSize',12);
ylabel('$a_{yc}$[g]','FontSize',12,'Interpreter','latex');

% ===== Phase plots =====
f4=figure('Color','w');
subplot(2,1,1); plot(ang,yaw,'LineWidth',1.2); grid on;
xlabel('Angle (deg)','FontSize',12);
ylabel('$\dot{\psi}_c$[Deg/s]','FontSize',12,'Interpreter','latex');
title('Yaw rate vs SWA','FontSize',16);
subplot(2,1,2); plot(ang,ay,'LineWidth',1.2); grid on;
xlabel('Angle (deg)','FontSize',12);
ylabel('$a_{yc}$[g]','FontSize',12,'Interpreter','latex');
title('ACC vs SWA','FontSize',16);

% ===== Quan hệ  $\xi$  - D =====
D_grid = linspace(0,0.99,400);
delta_g = -log(1 - D_grid);
xi_grid = delta_g ./ sqrt(4*pi^2 + delta_g.^2);
fxi = figure('Color','w');
plot(D_grid, xi_grid, 'b-', 'LineWidth', 1.8); grid on; hold on;
xlim([0 1]); ylim([0 1]);
xlabel('Decay ratio D');
ylabel('Relative damping ratio \xi');
title('Characteristics \xi and D');
if ~isnan(D_meas) && ~isnan(xi)
plot(D_meas, xi, 'ro', 'MarkerSize', 7, 'LineWidth', 1.6);
legend({'\xi(D) - tiêu chuẩn','Điểm đo từ dữ liệu'}, 'Location','southeast');
else
legend({'\xi(D) - tiêu chuẩn'}, 'Location','southeast');
end

%% ===== helpers lồng =====
function add_row(param,symb,unit,val)
P{end+1,1}=char(param); SYM{end+1,1}=char(symb); UNIT{end+1,1}=char(unit);
if isnumeric(val)&&isscalar(val)&&isfinite(val)
VAL(end+1,1)=double(val); NOTE{end+1,1}='';
else
VAL(end+1,1)=NaN;
if isstring(val), NOTE{end+1,1}=char(val);
elseif ischar(val), NOTE{end+1,1}=val;
else, NOTE{end+1,1}='';
end
end
end
end

```

```

%% ===== Local functions =====
function idx_rel=detect_release_local(t,Tsw,ang,cfg)
dt=mean(diff(t)); dang=[0;diff(ang)]/dt;
mask_lowT=abs(Tsw)<=cfg.torque_eps;
mask_relax=movmean(abs(dang),max(1,round(0.05/dt)))<5;
idx_start=find(abs(ang)>=cfg.min_angle_deg,1,'first'); if isempty(idx_start),
idx_start=1; end
cand=find(mask_lowT & mask_relax & ((1:numel(t))'>=idx_start),1,'first');
if isempty(cand), error('Không xác định được thời điểm thả vô-lăng.');
```

end

```

needN=max(1,round(cfg.min_hold_s/dt)); cand2=min(numel(t),cand+needN-1);
if all(mask_lowT(cand:cand2)), idx_rel=cand; else, idx_rel=cand; end
end

function [ts,idx_end]=settle_time_local(t,y,idx0,band,hold_s,r_ss)
dt=mean(diff(t)); needN=max(1,round(hold_s/dt)); run=0; ts=NaN; idx_end=NaN;
for i=idx0:numel(t)
if abs(y(i)-r_ss)<=band, run=run+1; else, run=0; end
if run>=needN, idx_end=i; ts=t(idx_end)-t(idx0); return; end
end
end

function [hasOS,r_peak]=first_overshoot_peak(t,y,t_rel,r_ss,min_peak_dist_s)
dt=mean(diff(t)); idx0=find(t>=t_rel,1,'first');
if isempty(idx0)||idx0>=numel(t), hasOS=false; r_peak=r_ss; return; end
yseg=double(y(idx0:end)-r_ss); sgn0=sign_eps(yseg(1));
zc=find(sign_eps(yseg(1:end-1))~=sign_eps(yseg(2:end))) & ...
sign_eps(yseg(1:end-1))==sgn0, 1,'first');
if isempty(zc), hasOS=false; r_peak=r_ss; return; end
from=idx0+zc; if from>numel(y), hasOS=false; r_peak=r_ss; return; end
ypost=yseg(from:end)*(-sgn0);
if isempty(ypost)||all(~isfinite(ypost)), hasOS=false; r_peak=r_ss; return; end
[pk,~]=safe_findpeaks(ypost,max(1,round(min_peak_dist_s/dt)),1);
if isempty(pk), hasOS=false; r_peak=r_ss; else, hasOS=true; r_peak=(-sgn0)*pk(1)+r_ss;
end
end

function [tpks,Apks]=peaks_on_side(t,y,t_rel,r_ss,min_peak_dist_s,yaw0,side)
dt=mean(diff(t)); idx0=find(t>=t_rel,1,'first'); if isempty(idx0)||idx0>=numel(t),
tpks=[]; Apks=[]; return; end
sgn0=sign_eps(yaw0-r_ss); if strcmpi(side,'opposite'), sgn=-sgn0; else, sgn=sgn0; end
y_side=double((y(idx0:end)-r_ss)*sgn);
[Apks,locs]=safe_findpeaks(y_side,max(1,round(min_peak_dist_s/dt)),5);
tpks=t(idx0-1+locs); Apks=Apks(:);
end

function [pks,locs]=safe_findpeaks(yvec,minDist,N)
pks=[]; locs=[]; if isempty(yvec)||all(~isfinite(yvec)), return; end
yvec=yvec(:);
try, [pks,locs]=findpeaks(yvec,'MinPeakDistance',minDist,'NPeaks',N);
catch, [pmax,idx]=max(yvec); if isfinite(pmax), pks=pmax; locs=idx; end, end
end

function s=sign_eps(x)
eps0=1e-6; if x>eps0, s=1; elseif x<-eps0, s=-1; else, s=0; end
End

```

5.2.4. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái chuyển trạng thái (Transition test)

```

function CARSIM_Transition_KPI(matFile, outXlsx)
% KPI on-centre, chỉ chu kỳ đầu tiên sau t >= 20 s. ay ở [g].

```

% Xuất 1 sheet Excel (Group | Metric | Unit | Value) và in theo cột dọc.

```
%% 0) LOAD & TIỀN XỬ LÝ
if nargin < 1 || isempty(matFile), matFile = 'Carsim_N_Transition_V100_T3.52'; end
if nargin < 2 || isempty(outXlsx), outXlsx =
'Carsim_N_Transition_V100_T3.52_KPIs_SLOPE.xlsx';
end
```

```
S = load(matFile);
Time = S.Timec_data(:);
Td = S.Tdc_data(:); % Nm
fd = S.fdc_data(:); % deg
ay = S.ayc_data(:); % g
yaw = S.dpsic_data(:); % deg/s
```

```
% Lấy từ t >= 20 s, loại NaN đồng thời
m = Time >= 0;
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
m = ~(isnan(Time)|isnan(Td)|isnan(fd)|isnan(ay)|isnan(yaw));
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
if numel(Time) < 6, error('Không đủ dữ liệu sau 20 s.');
```

```
end
dt = median(diff(Time));

%% 1) CẮT CHU KỲ ĐẦU (zero-crossing cùng chiều → fallback 5 s)
% [i1,i2] = first_cycle_indices(fd);
% if ~isempty(i1) && ~isempty(i2) && i2 > i1+1
% r = i1:i2;
% else
% T1 = Time(1); T2 = min(Time(1)+5, Time(end));
% r = (Time>=T1) & (Time<=T2);
% warning('Auto detect fail → dùng cửa sổ 5 s (%.3f→%.3f s).',T1,T2);
% end
% Time = Time(r); Td = Td(r); fd = fd(r); ay = ay(r); yaw = yaw(r);
```

```
%% 2) THAM SỐ PHỤ
bw_fd = 0.01*max(abs(fd)); bw_Td = 0.01*max(abs(Td));
bw_ay = 0.01*max(abs(ay)); bw_yaw = 0.01*max(abs(yaw));
mask_fd_pm3 = abs(fd) <= 3;
mask_fd_pm = abs(fd) <= max(abs(fd));
mask_ay_pm3 = abs(ay) <= 0.01;
mask_ay_pm = abs(ay) <= max(abs(ay));
```

```
% Phân nhánh theo chiều đánh lái (tăng/giảm SWA)
fd_dot = gradient(fd, Time);
inc = fd_dot >= 0; % nhánh đi
dec = fd_dot < 0; % nhánh về
```

```
%% 3) TÍNH KPI
G={}; M={}; U={}; V=[];
addRow = @(g,m,u,v) local_add_row(g,m,u,v);
```

```
% ===== I) Torque vs SWA =====
[pos_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td>=0));
[neg_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td<=0));
```

```
% (Đổi) dùng local_slope thay vì mean(gradient(...))
grad_Td0_P = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
% grad_Td0_N = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));
```

```
% R2 theo từng nhánh (Pearson r2)
[~,R2_I_inc] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & inc);
```

```

% [~,R2_I_dec] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('I','Mean Stiffness (+)','Nm/deg',pos_stiff);
% addRow('I','Mean Stiffness (-)','Nm/deg',neg_stiff);
addRow('I','Local_slope @SWA=0 (pos)','Nm/deg',grad_Td0_P);
% addRow('I','Local_slope @SWA=0 (neg)','Nm/deg',grad_Td0_N);
addRow('I','Linearity R2 (Torque~SWA, inc)', '-',R2_I_inc);
% addRow('I','Linearity R2 (Torque~SWA, dec)', '-',R2_I_dec);
addRow('I','Max |Torque|','Nm',max(abs(Td)));
addRow('I','Max |SWA|','deg',max(abs(fd)));

% ===== II) Ay vs SWA =====
[meanP_sensitivity,~] = linfit_OLS(fd, ay, mask_fd_pm & (Td>=0));
% [meanN_sensitivity,~] = linfit_OLS(fd, ay, mask_fd_pm & (Td<=0));

% (Đổi) dùng local_slope thay vì mean(gradient(...))
slope_fd0_P = local_slope(fd,ay,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
% slope_fd0_N = local_slope(fd,ay,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));

[~,R2_II_inc] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & inc);
% [~,R2_II_dec] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('II','Mean sensitivity (+)','g/deg',meanP_sensitivity);
% addRow('II','Mean sensitivity (-)','g/deg',meanN_sensitivity);
addRow('II','Local_slope @SWA=0 (pos)','g/deg',slope_fd0_P);
% addRow('II','Local_slope @SWA=0 (neg)','g/deg',slope_fd0_N);
addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, inc)', '-',R2_II_inc);
% addRow('II','Linearity R2 (Ay~SWA, dec)', '-',R2_II_dec);

% ===== III) Torque vs Ay =====
% [torque_db_ay0,~,~] = deadband_y_at_x0(ay,Td);
% [ay_db_Td0,~,~] = deadband_y_at_x0(Td,ay);
% area_Td_ay = polyarea([ay;ay(1)],[Td;Td(1)]);

% dSlope ổn định @0 & @±0.1 g (hồi quy + cửa sổ thích nghi)
s0p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,+1);
% s0n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,-1);
s01p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,+0.1,+1);
% s01n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,-0.1,-1);
% s01 = mean([s01p s01n],'omitnan');

% R2 theo nhánh, giới hạn |Ay|≤0.15 g để tránh deadband quá phẳng
centreAy = abs(ay) <= 0.15;
[~,R2_III_inc] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & inc);
[~,R2_III_dec] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & dec);

addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (pos)','Nm/g',s0p);
% addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (neg)','Nm/g',s0n);
addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0.1 g (avg)','Nm/g',s01p);
% addRow('III','dTorque/dAy @Ay=-0.1 g (avg)','Nm/g',s01n);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, inc)', '-',R2_III_inc);
% addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, dec)', '-',R2_III_dec);
addRow('III','Peak |Ay|','g',max(abs(ay)));
addRow('III','Peak |Torque|','Nm',max(abs(Td)));

% ===== IV) Yaw vs SWA =====
% [yaw_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,yaw);
% area_yaw_fd = polyarea([fd;fd(1)],[yaw;yaw(1)]);
[~,R2_IV_inc] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & inc);
% [~,R2_IV_dec] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & dec);

```

```

% lag_yaw_fd = time_lag(fd,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope
addRow('IV','Yaw gain vs SWA (centre)','(deg/s)/deg', local_slope(fd,yaw,
mask_fd_pm3));
% addRow('IV','Yaw time lag vs SWA','s',lag_yaw_fd);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, inc)','-',R2_IV_inc);
% addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, dec)','-',R2_IV_dec);

% ===== V) Yaw vs Torque =====
% [yaw_T_db,~,~] = deadband_x_at_y0(Td,yaw);
% area_yaw_Td = polyarea([Td;Td(1)],[yaw;yaw(1)]);
mask_Td = abs(Td) <= 0.3;
[~,R2_V_inc] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & inc);
% [~,R2_V_dec] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & dec);
% lag_yaw_Td = time_lag(Td,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope
addRow('V','Yaw gain vs Torque (centre)','(deg/s)/Nm', local_slope(Td,yaw, mask_Td));
% addRow('V','Yaw time lag vs Torque','s',lag_yaw_Td);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, inc)','-',R2_V_inc);
% addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, dec)','-',R2_V_dec);

%% 4) GHI EXCEL & IN
T = table(G,M,U,V,'VariableNames',{'Group','Metric','Unit','Value'});
writetable(T,outXlsx,'Sheet','Results','WriteVariableNames',true);

fprintf('=== on-centre KPIs (1 chu kỳ đầu sau t >= 20 s) ===\n');
for i=1:height(T)
fprintf('%-2s | %-52s [%s] : %.6g\n',T.Group{i},T.Metric{i},T.Unit{i},T.Value(i));
end
fprintf('Đã lưu: %s (sheet: Results)\n', outXlsx);

%% nested: thêm hàng
function local_add_row(g,m,u,v)
G{end+1,1}=g; M{end+1,1}=m; U{end+1,1}=u;
if isempty(v) || ~(isnumeric(v)&&isscalar(v)), V(end+1,1)=NaN; else, V(end+1,1)=v;
end
end
end

%% ===== HÀM PHỤ TRỢ =====
function [i1,i2]=first_cycle_indices(fd)
fd=fd(:); z=find(fd(1:end-1).*fd(2:end)<=0);
if numel(z)<2, i1=[]; i2=[]; return; end
s=sign(fd(z+1)-fd(z)); i1=[]; i2=[];
for k=1:numel(z)-1
if s(k)~=0
j=find(s(k+1:end)==s(k),1,'first');
if ~isempty(j), i1=z(k); i2=z(k+1+j-1); return; end
end
end
end

function [slope,R2]=linfit_OLS(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); yf=polyval(p,x);
SSres=sum((y-yf).^2); SStot=sum((y-mean(y)).^2); R2=1-SSres/max(SStot,eps);
end

function [slope,R2]=linfit_Pearson(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end

```

```

p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); C=corrcoef(x,y); R2=C(1,2)^2;
end

% ---- local_slope: ước lượng độ dốc đặc tính x→y trong mask (OLS + smoothing tùy
chọn) ----
function s = local_slope(x,y,mask)
x = x(:); y = y(:);
if nargin<3 || isempty(mask), mask = true(size(x)); end
x = x(mask); y = y(mask);
if numel(x) < 3, s = NaN; return; end
% Sắp xếp theo x để mượt ổn định theo biến độc lập
[xs,idx] = sort(x);
ys = y(idx);
% Smoothing nhẹ để giảm nhiễu
if exist('sgolayfilt','file') && numel(ys) >= 11
ys = sgolayfilt(ys,3,11);
elseif numel(ys) >= 5
ys = movmedian(ys,5);
end
p = polyfit(xs,ys,1);
s = p(1);
end

function [db,y1,y2]=deadband_y_at_x0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(x(1:end-1).*x(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; y1=NaN; y2=NaN; return; end
y1=interp1(x(i(1):i(1)+1),y(i(1):i(1)+1),0);
y2=interp1(x(i(2):i(2)+1),y(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(y2-y1);
end

function [db,x1,x2]=deadband_x_at_y0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(y(1:end-1).*y(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; x1=NaN; x2=NaN; return; end
x1=interp1(y(i(1):i(1)+1),x(i(1):i(1)+1),0);
x2=interp1(y(i(2):i(2)+1),x(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(x2-x1);
end

function lag_s=time_lag(x,y,dt,maxLagS)
x=x(:)-mean(x); y=y(:)-mean(y);
N=min(round(maxLagS/dt),floor(numel(x)/4)); if N<1, lag_s=NaN; return; end
[c,l]=xcorr(y,x,N,'coeff'); [~,i]=max(c); lag_s=l(i)*dt;
end

function x_at_y=x_at_y_target(x,y,y0)
x=x(:); y=y(:);
i=find((y(1:end-1)<=y0 & y(2:end)>=y0) | (y(1:end-1)>=y0 & y(2:end)<=y0),1,'first');
if isempty(i), x_at_y=NaN; else, x_at_y=interp1(y(i:i+1),x(i:i+1),y0); end
end

function slope=slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,ay0,branchSign)
A=max(abs(ay)); if A==0, slope=NaN; return; end
bw=0.01*A; bw_max=0.10*A; Nmin=20; spreadMin=0.02; % g
ok=(branchSign>0 & Td>=0) | (branchSign<0 & Td<=0);
slope=NaN;
while bw<=bw_max
m=ok & abs(ay-ay0)<=bw; x=ay(m); y=Td(m);
if numel(x)>=Nmin && (max(x)-min(x))>=spreadMin
if exist('sgolayfilt','file') && numel(y)>=11, y=sgolayfilt(y,3,11); end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); return;
end

```

```

bw=bw*1.5;
end
end

function r=safe_ratio(a,b)
if ~isfinite(a)||~isfinite(b)||b==0, r=NaN; else, r=abs(a)/abs(b); end
end

%%%%=====
function SIMULINK_Transition_KPI(matFile, outXlsx)
% KPI on-centre, chỉ chu kỳ đầu tiên sau t >= 20 s. ay ở [g].
% Xuất 1 sheet Excel (Group | Metric | Unit | Value) và in theo cột dọc.

%% 0) LOAD & TIỀN XỬ LÝ
if nargin < 1 || isempty(matFile), matFile = 'EX_Full_P_Transitions_5s_V100_Td3.52';
end
if nargin < 2 || isempty(outXlsx), outXlsx =
'SIMULINK_P_Transitions_5s_V100_Td3.52_KPIs_SLOPE.xlsx'; end

S = load(matFile);
Time = S.Time_data(:);
Td = S.Td_data(:); % Nm
fd = S.fddeg_data(:); % deg
ay = S.afg_data(:); % g
yaw = S.dpsideg_data(:); % deg/s

% Lấy từ t >= 20 s, loại NaN đồng thời
m = Time >= 0;
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
m = ~(isnan(Time)|isnan(Td)|isnan(fd)|isnan(ay)|isnan(yaw));
Time = Time(m); Td = Td(m); fd = fd(m); ay = ay(m); yaw = yaw(m);
if numel(Time) < 6, error('Không đủ dữ liệu sau 20 s.');
```

```

end
dt = median(diff(Time));

%% 1) CẮT CHU KỲ ĐẦU (zero-crossing cùng chiều → fallback 5 s)
% [i1,i2] = first_cycle_indices(fd);
% if ~isempty(i1) && ~isempty(i2) && i2 > i1+1
% r = i1:i2;
% else
% T1 = Time(1); T2 = min(Time(1)+5, Time(end));
% r = (Time>=T1) & (Time<=T2);
% warning('Auto detect fail → dùng cửa sổ 5 s (%.3f→%.3f s).',T1,T2);
% end
% Time = Time(r); Td = Td(r); fd = fd(r); ay = ay(r); yaw = yaw(r);

%% 2) THAM SỐ PHỤ
bw_fd = 0.01*max(abs(fd)); bw_Td = 0.01*max(abs(Td));
bw_ay = 0.01*max(abs(ay)); bw_yaw = 0.01*max(abs(yaw));
mask_fd_pm3 = abs(fd) <= 3;
mask_fd_pm = abs(fd) <= max(abs(fd));
mask_ay_pm3 = abs(ay) <= 0.01;
mask_ay_pm = abs(ay) <= max(abs(ay));

% Phân nhánh theo chiều đánh lái (tăng/giảm SWA)
fd_dot = gradient(fd, Time);
inc = fd_dot >= 0; % nhánh đi
dec = fd_dot < 0; % nhánh về

%% 3) TÍNH KPI
G={}; M={}; U={}; V=[];
addRow = @(g,m,u,v) local_add_row(g,m,u,v);

```

```

% ===== I) Torque vs SWA =====
[pos_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td>=0));
[neg_stiff,~] = linfit_OLS(fd, Td, mask_fd_pm & (Td<=0));

% (Đổi) dùng local_slope thay vì mean.gradient(...)
grad_Td0_P = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
grad_Td0_N = local_slope(fd,Td,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));

% R² theo từng nhánh (Pearson r²)
[~,R2_I_inc] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & inc);
% [~,R2_I_dec] = linfit_Pearson(fd,Td, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('I','Mean Stiffness (+)','Nm/deg',pos_stiff);
% addRow('I','Mean Stiffness (-)','Nm/deg',neg_stiff);
addRow('I','Local_slope @SWA=0 (pos)','Nm/deg',grad_Td0_P);
% addRow('I','Local_slope @SWA=0 (neg)','Nm/deg',grad_Td0_N);
addRow('I','Linearity R² (Torque~SWA, inc)','-',R2_I_inc);
% addRow('I','Linearity R² (Torque~SWA, dec)','-',R2_I_dec);
addRow('I','Max |Torque|','Nm',max(abs(Td)));
addRow('I','Max |SWA|','deg',max(abs(fd)));

% ===== II) Ay vs SWA =====
[meanP_sensitivity,~] = linfit_OLS(fd, ay, mask_fd_pm & (Td>=0));
% [meanN_sensitivity,~] = linfit_OLS(fd, ay, mask_fd_pm & (Td<=0));

% (Đổi) dùng local_slope thay vì mean.gradient(...)
slope_fd0_P = local_slope(fd,ay,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td>=0));
% slope_fd0_N = local_slope(fd,ay,(abs(fd)<=bw_fd)&(Td<=0));

[~,R2_II_inc] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & inc);
% [~,R2_II_dec] = linfit_Pearson(fd,ay, mask_fd_pm3 & dec);

addRow('II','Mean sensitivity (+)','g/deg',meanP_sensitivity);
% addRow('II','Mean sensitivity (-)','g/deg',meanN_sensitivity);
addRow('II','Local_slope @SWA=0 (pos)','g/deg',slope_fd0_P);
% addRow('II','Local_slope @SWA=0 (neg)','g/deg',slope_fd0_N);
addRow('II','Linearity R² (Ay~SWA, inc)','-',R2_II_inc);
% addRow('II','Linearity R² (Ay~SWA, dec)','-',R2_II_dec);

% ===== III) Torque vs Ay =====
% [torque_db_ay0,~,~] = deadband_y_at_x0(ay,Td);
% [ay_db_Td0,~,~] = deadband_y_at_x0(Td,ay);
% area_Td_ay = polyarea([ay;ay(1)],[Td;Td(1)]);

% dSlope ổn định @0 & @±0.1 g (hồi quy + cửa sổ thích nghi)
s0p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,+1);
% s0n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td, 0.0,-1);
s01p = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,+0.1,+1);
% s01n = slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,-0.1,-1);
% s01 = mean([s01p s01n],'omitnan');

% R² theo nhánh, giới hạn |Ay|≤0.15 g để tránh deadband quá phẳng
centreAy = abs(ay) <= 0.15;
[~,R2_III_inc] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & inc);
[~,R2_III_dec] = linfit_Pearson(ay,Td, centreAy & dec);

addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (pos)','Nm/g',s0p);
% addRow('III','dTorque/dAy @Ay=0 (neg)','Nm/g',s0n);

```

```

addRow('III','dTorque/dAy @Ay≈0.1 g (avg)','Nm/g',s01p);
% addRow('III','dTorque/dAy @Ay≈-0.1 g (avg)','Nm/g',s01n);
addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, inc)','-',R2_III_inc);
% addRow('III','Linearity R2 (Torque~Ay, dec)','-',R2_III_dec);
addRow('III','Peak |Ay|','g',max(abs(ay)));
addRow('III','Peak |Torque|','Nm',max(abs(Td)));

% ===== IV) Yaw vs SWA =====
% [yaw_ang_db,~,~] = deadband_x_at_y0(fd,yaw);
% area_yaw_fd = polyarea([fd;fd(1)],[yaw;yaw(1)]);
[~,R2_IV_inc] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & inc);
% [~,R2_IV_dec] = linfit_Pearson(fd,yaw, mask_fd_pm3 & dec);
% lag_yaw_fd = time_lag(fd,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope
addRow('IV','Yaw gain vs SWA (centre)','(deg/s)/deg', local_slope(fd,yaw,
mask_fd_pm3));
% addRow('IV','Yaw time lag vs SWA','s',lag_yaw_fd);
addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, inc)','-',R2_IV_inc);
% addRow('IV','Linearity R2 (Yaw~SWA, dec)','-',R2_IV_dec);

% ===== V) Yaw vs Torque =====
% [yaw_T_db,~,~] = deadband_x_at_y0(Td,yaw);
% area_yaw_Td = polyarea([Td;Td(1)],[yaw;yaw(1)]);
mask_Td = abs(Td) <= 0.3;
[~,R2_V_inc] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & inc);
% [~,R2_V_dec] = linfit_Pearson(Td,yaw, mask_Td & dec);
% lag_yaw_Td = time_lag(Td,yaw,dt,1.0);

% (Đổi) dùng local_slope
addRow('V','Yaw gain vs Torque (centre)','(deg/s)/Nm', local_slope(Td,yaw, mask_Td));
% addRow('V','Yaw time lag vs Torque','s',lag_yaw_Td);
addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, inc)','-',R2_V_inc);
% addRow('V','Linearity R2 (Yaw~Torque, dec)','-',R2_V_dec);

%% 4) GHI EXCEL & IN
T = table(G,M,U,V,'VariableNames',{'Group','Metric','Unit','Value'});
writetable(T,outXlsx,'Sheet','Results','WriteVariableNames',true);

fprintf('=== TRANSITION KPIs ===\n');
for i=1:height(T)
fprintf('%-2s | %-52s [%s] : %.6g\n',T.Group{i},T.Metric{i},T.Unit{i},T.Value(i));
end
fprintf('Đã lưu: %s (sheet: Results)\n', outXlsx);

%% nested: thêm hàng
function local_add_row(g,m,u,v)
G{end+1,1}=g; M{end+1,1}=m; U{end+1,1}=u;
if isempty(v) || ~(isnumeric(v)&&isscalar(v)), V(end+1,1)=NaN; else, V(end+1,1)=v;
end
end
end

%% ===== HÀM PHỤ TRỢ =====
function [i1,i2]=first_cycle_indices(fd)
fd=fd(:); z=find(fd(1:end-1).*fd(2:end)<=0);
if numel(z)<2, i1=[]; i2=[]; return; end
s=sign(fd(z+1)-fd(z)); i1=[]; i2=[];
for k=1:numel(z)-1
if s(k)~=0
j=find(s(k+1:end)==s(k),1,'first');
if ~isempty(j), i1=z(k); i2=z(k+1+j-1); return; end

```

```

end
end
end

function [slope,R2]=linfit_OLS(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); yf=polyval(p,x);
SSres=sum((y-yf).^2); SStot=sum((y-mean(y)).^2); R2=1-SSres/max(SStot,eps);
end

function [slope,R2]=linfit_Pearson(x,y,mask)
x=x(mask); y=y(mask); if numel(x)<3, slope=NaN; R2=NaN; return; end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); C=corrcoef(x,y); R2=C(1,2)^2;
end

% ---- local_slope: ước lượng độ dốc đặc tính x→y trong mask (OLS + smoothing tùy
chọn) ----
function s = local_slope(x,y,mask)
x = x(:); y = y(:);
if nargin<3 || isempty(mask), mask = true(size(x)); end
x = x(mask); y = y(mask);
if numel(x) < 3, s = NaN; return; end
% Sắp xếp theo x để mượt ổn định theo biến độc lập
[xs,idx] = sort(x);
ys = y(idx);
% Smoothing nhẹ để giảm nhiễu
if exist('sgolayfilt','file') && numel(ys) >= 11
ys = sgolayfilt(ys,3,11);
elseif numel(ys) >= 5
ys = movmedian(ys,5);
end
p = polyfit(xs,ys,1);
s = p(1);
end

function [db,y1,y2]=deadband_y_at_x0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(x(1:end-1).*x(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; y1=NaN; y2=NaN; return; end
y1=interp1(x(i(1):i(1)+1),y(i(1):i(1)+1),0);
y2=interp1(x(i(2):i(2)+1),y(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(y2-y1);
end

function [db,x1,x2]=deadband_x_at_y0(x,y)
x=x(:); y=y(:); i=find(y(1:end-1).*y(2:end)<0);
if numel(i)<2, db=NaN; x1=NaN; x2=NaN; return; end
x1=interp1(y(i(1):i(1)+1),x(i(1):i(1)+1),0);
x2=interp1(y(i(2):i(2)+1),x(i(2):i(2)+1),0);
db=abs(x2-x1);
end

function lag_s=time_lag(x,y,dt,maxLagS)
x=x(:)-mean(x); y=y(:)-mean(y);
N=min(round(maxLagS/dt),floor(numel(x)/4)); if N<1, lag_s=NaN; return; end
[c,l]=xcorr(y,x,N,'coeff'); [~,i]=max(c); lag_s=l(i)*dt;
end

function x_at_y=x_at_y_target(x,y,y0)
x=x(:); y=y(:);
i=find((y(1:end-1)<=y0 & y(2:end)>=y0) | (y(1:end-1)>=y0 & y(2:end)<=y0),1,'first');
if isempty(i), x_at_y=NaN; else, x_at_y=interp1(y(i:i+1),x(i:i+1),y0); end
end

```

```

function slope=slope_Td_wrt_ay_at(ay,Td,ay0,branchSign)
A=max(abs(ay)); if A==0, slope=NaN; return; end
bw=0.01*A; bw_max=0.10*A; Nmin=20; spreadMin=0.02; % g
ok=(branchSign>0 & Td>=0) | (branchSign<0 & Td<=0);
slope=NaN;
while bw<=bw_max
m=ok & abs(ay-ay0)<=bw; x=ay(m); y=Td(m);
if numel(x)>=Nmin && (max(x)-min(x)>=spreadMin)
if exist('sgolayfilt','file') && numel(y)>=11, y=sgolayfilt(y,3,11); end
p=polyfit(x,y,1); slope=p(1); return;
end
bw=bw*1.5;
end
end

function r=safe_ratio(a,b)
if ~isfinite(a)||~isfinite(b)||b==0, r=NaN; else, r=abs(a)/abs(b); end
end

```

5.2.5. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái quay vòng tại chỗ (Steering effort test at standstill)

```

%% Carsim_Turninginplace_KPI.m
% Tính KPI Turning-in-place cho E-class, rack&pinion, C-EPS
% DỮ LIỆU YẾU CẦU TRONG MAT:
% Time_data (s), Td_data (Nm), fddeg_data (deg)
% (ayc_data, dpsic_data không dùng trong KPI này)
%
% Output: Excel 1 sheet, các KPI theo cột dọc.

% clear; clc;

%% ===== Tham số người dùng (có thể chỉnh) =====
matfile = 'Carsim_Turninginplace_V0.mat'; % tên file .mat
outxlsx = 'Carsim_Turninginplace_V0_KPI.xlsx'; % file Excel xuất kết quả
use_full_range = false; % =true: dùng toàn dải thời gian trong file
a = 10; % [s] nếu use_full_range=false
b = 20; % [s]

%% ===== 0) Nạp dữ liệu =====
S = load(matfile);
Time = S.Timec_data(:);
Td = S.Tdc_data(:); % Steering torque [Nm]
fd = S.fdc_data(:); % Steering wheel angle [deg]
% ay = S.ayc_data(:); % lateral accel [g] (không dùng KPI này)
% yaw = S.dpsic_data(:); % yaw rate [deg/s] (không dùng KPI này)

% Chuẩn hoá chiều dài & thời gian tăng dần
N = min([numel(Time), numel(Td), numel(fd)]);
Time = Time(1:N); Td = Td(1:N); fd = fd(1:N);
[Time, ix] = sort(Time,'ascend'); Td = Td(ix); fd = fd(ix);

% Chọn khoảng [a,b]
if use_full_range
a = Time(1); b = Time(end);
end
maskAB = (Time >= a) & (Time <= b);
Time = Time(maskAB); Td = Td(maskAB); fd = fd(maskAB);

if numel(Time) < 2, error('Khoảng [a,b] quá ngắn hoặc dữ liệu trống.');
```

```

dt = median(diff(Time));

%% ===== 1) Cửa sổ  $\pm \max(|fd|)$ : stiffness full-range theo nhánh =====
max_fd = max(abs(fd));
bw_fd = max_fd; % dùng toàn bộ dải góc lái

% Tách nhánh theo chiều chuyển động (df/dt) và theo dấu mô men
dfdt = [diff(fd)./diff(Time); 0]; % đạo hàm số của SWA theo thời gian

% Nhánh dương:  $T_d \geq 0$ , fd trong  $\pm \max\_fd$ , đang tăng
mask1 = (fd >= -bw_fd) & (fd <= bw_fd) & (Td >= 0) & (dfdt >= 0);
fd_f1 = fd(mask1);
Td_f1 = Td(mask1);
if ~isempty(Td_f1)
% Độ cứng trung bình full-range (fit tuyến tính) phía dương
stiff_fullrange_pos = local_slope(fd_f1, Td_f1); % [Nm/deg]
else
stiff_fullrange_pos = NaN;
end

% Nhánh âm:  $T_d \leq 0$ , fd trong  $\pm \max\_fd$ , đang giảm
mask2 = (fd >= -bw_fd) & (fd <= bw_fd) & (Td <= 0) & (dfdt <= 0);
fd_f2 = fd(mask2);
Td_f2 = Td(mask2);
if ~isempty(Td_f2)
% Độ cứng trung bình full-range (fit tuyến tính) phía âm
stiff_fullrange_neg = local_slope(fd_f2, Td_f2); % [Nm/deg]
else
stiff_fullrange_neg = NaN;
end

%% ===== 2) Stiffness (+/-) trong  $|SWA| \leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  (near-zero) =====
% (tách nhánh theo chiều chuyển động và dấu mô men)
dfdt = [diff(fd)./diff(Time); 0]; % đạo hàm số của SWA theo thời gian

% Nhánh dương:  $fd \in [0, 0.01 \cdot \max\_fd]$ , đang tăng ( $df/dt \geq 0$ ) và  $T_d \geq 0$ 
mask3p = (fd >= 0) & (fd <= 0.01*max_fd) & (dfdt >= 0) & (Td >= 0);
% Nhánh âm :  $fd \in [-0.01 \cdot \max\_fd, 0]$ , đang giảm ( $df/dt \leq 0$ ) và  $T_d \leq 0$ 
mask3n = (fd <= 0) & (fd >= -0.01*max_fd) & (dfdt <= 0) & (Td <= 0);

stiff_pos = local_slope(fd(mask3p), Td(mask3p)); % [Nm/deg]
stiff_neg = local_slope(fd(mask3n), Td(mask3n)); % [Nm/deg]
asym_ratio = stiff_pos / stiff_neg;

%% ===== 3) Torque deadband tại  $SWA=0$  (hai giao điểm) =====
cross_indices = find(fd(1:end-1).*fd(2:end) < 0); % các lần qua  $0^\circ$ 
Td_at0 = [];
for k = 1:numel(cross_indices)
i = cross_indices(k);
x = fd(i:i+1); y = Td(i:i+1);
if diff(x) ~= 0
Td_at0(end+1,1) = interp1(x, y, 0); %#ok<SAGROW>
end
end
if numel(Td_at0) >= 2
torque_deadband = mean(abs(diff(Td_at0))); % [Nm]
else
torque_deadband = NaN;
end

%% ===== 4) Loop area (Steering work per cycle) [J] =====

```

```

% Công =  $\oint Td d\theta$  ( $\theta$  tính bằng rad). Tính trung bình theo chu kỳ 0.2 Hz.
[~,locP] = findpeaks(Td,'MinPeakDistance',max(2,round(0.6/(0.2)/dt)));
if numel(locP) < 2
% fallback: dùng các điểm Td đổi dấu âm->dương
locP = find(Td(1:end-1)<=0 & Td(2:end)>0);
end
areas = [];
for k = 1:numel(locP)-1
idx = locP(k):locP(k+1);
if numel(idx) < 5, continue; end
theta = deg2rad(fd(idx));
torque = Td(idx);
% Tính xấp xỉ tích phân hình thang
areas(end+1,1) = sum( 0.5*(torque(1:end-1)+torque(2:end)) .*
diff(theta) ); %#ok<SAGROW>
end
if ~isempty(areas)
loop_area_J = mean(abs(areas));
else
loop_area_J = NaN;
end

%% ===== 5) Max |Torque| ; Max |SWA| =====
max_abs_torque = max(abs(Td));
max_abs_SWA = max(abs(fd));

%% ===== 6) Linearity R2 (inc/dec) trong  $\pm 3^\circ$  =====
maskLin = abs(fd) <= 3;
R2_inc = local_r2(fd(maskLin & dfdt>=0), Td(maskLin & dfdt>=0));
R2_dec = local_r2(fd(maskLin & dfdt<=0), Td(maskLin & dfdt<=0));

%% ===== 7) Time lag Td  $\leftrightarrow$  SWA (tính toàn cửa sổ) =====
if numel(Time) > 10
[xc,lags] = xcorr(detrend(Td), detrend(fd), 'coeff');
[~,imax] = max(xc);
time_lag = lags(imax)*dt; % [s]
else
time_lag = NaN;
end

%% ===== 8) In ra màn hình (cột dọc) =====
fprintf('\n===== Turning-in-place KPI (file: %s, a=%.3f s, b=%.3f s) =====\n',
matfile, a, b);
print_kv('1 Steering stiffness (+) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]', stiff_pos);
print_kv('2 Steering stiffness (-) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]', stiff_neg);
print_kv('3 Steering stiffness (+) full range [Nm/deg]', stiff_fullrange_pos);
print_kv('4 Steering stiffness (-) full range [Nm/deg]', stiff_fullrange_neg);
print_kv('5 Left-right stiffness asymmetry [-]', asym_ratio);
print_kv('6 Steering work per cycle [J]', loop_area_J);
print_kv('7 Linearity R2 within  $\pm 3^\circ$  (inc) [-]', R2_inc);
print_kv('8 Linearity R2 within  $\pm 3^\circ$  (dec) [-]', R2_dec);
print_kv('9 Steering friction-Torque deadband [Nm]', torque_deadband);
print_kv('10 Maximum torque [Nm]', max_abs_torque);
print_kv('11 Maximum steering angle [deg]', max_abs_SWA);
print_kv('12 Td-SWA time lag per window [s]', time_lag);

%% ===== 9) Ghi Excel (một sheet, cột dọc) =====
Metric = {
'Steering stiffness (+) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]'
'Steering stiffness (-) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]'
'Steering stiffness (+) full range [Nm/deg]'
'Steering stiffness (-) full range [Nm/deg]'

```

```

'Left-right stiffness asymmetry [-]'
'Steering work per cycle [J]'
'Linearity R^2 within  $\pm 3^\circ$  (inc) [-]'
'Linearity R^2 within  $\pm 3^\circ$  (dec) [-]'
'Steering friction - Torque deadband [Nm]'
'Maximum torque [Nm]'
'Maximum steering angle [deg]'
'Steering torque - Steering angle time lag [s]'
};
Value = [
stiff_pos;
stiff_neg;
stiff_fullrange_pos;
stiff_fullrange_neg;
asym_ratio;
loop_area_J;
R2_inc;
R2_dec;
torque_deadband;
max_abs_torque;
max_abs_SWA;
time_lag];
T = table(Metric, Value);
writetable(T, outxlsx, 'Sheet', 1, 'WriteMode','overwritesheet');

%% ===== Helpers =====
function s = local_slope(x,y)
% Slope trung bình trong khoảng bằng polyfit bậc 1 (OLS, ổn định)
% Có fallback sang mean.gradient) khi dữ liệu quá ít/biến thiên quá nhỏ.
x = x(:); y = y(:);
ok = isfinite(x) & isfinite(y);
x = x(ok); y = y(ok);
if numel(x) >= 5 && range(x) > 1e-9
p = polyfit(x,y,1);
s = p(1);
elseif numel(x) >= 2
s = mean.gradient(y,x,'omitnan');
else
s = NaN;
end
end

function R2 = local_r2(x,y)
% Tính R^2 của fit tuyến tính y ~ x
x = x(:); y = y(:);
ok = isfinite(x) & isfinite(y);
x = x(ok); y = y(ok);
if numel(x) < 3 || range(x) < 1e-9
R2 = NaN; return;
end
p = polyfit(x,y,1);
yhat = polyval(p,x);
SSres = sum((y - yhat).^2);
SStot = sum((y - mean(y)).^2);
R2 = 1 - SSres / max(SStot, eps);
end

function print_kv(name, val)
% In key-value gọn gàng, chịu được NaN, [], string/missing
if isnumeric(val)
if isempty(val)
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');

```

```

elseif isscalar(val)
fprintf('%-45s : %g\n', name, val); % %g in được NaN/Inf
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, num2str(val));
end
elseif ischar(val)
if isempty(val)
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, val);
end
elseif isstring(val)
if ismissing(val) || strlen(val)==0
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, char(val)); % ép về char để an toàn
end
else
% Fall back: cố gắng chuyển sang chuỗi, nếu vẫn lỗi → NA
try
fprintf('%-45s : %s\n', name, char(string(val)));
catch
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
end
end
end

%% %%=====
%% Simulink_Turninginplace_KPI.m
% Tính KPI Turning-in-place cho E-class, rack&pinion, C-EPS
% DỮ LIỆU YÊU CẦU TRONG MAT:
% Time_data (s), Td_data (Nm), fddeg_data (deg)
% (ayc_data, dpsic_data không dùng trong KPI này)
%
% Output: Excel 1 sheet, các KPI theo cột dọc.

% clear; clc;

%% ===== Tham số người dùng (có thể chỉnh) =====
matfile = 'EX_Full_Turninginplace_V0.mat'; % tên file .mat
outxlsx = 'Simulink_Turninginplace_V0_KPI.xlsx'; % file Excel xuất kết quả
use_full_range = false; % =true: dùng toàn dải thời gian trong file
a = 2.5; % [s] nếu use_full_range=false
b = 10; % [s]

%% ===== 0) Nạp dữ liệu =====
S = load(matfile);
Time = S.Time_data(:);
Td = S.Td_data(:); % Steering torque [Nm]
fd = S.fddeg_data(:); % Steering wheel angle [deg]
% ay = S.ayc_data(:); % lateral accel [g] (không dùng KPI này)
% yaw = S.dpsic_data(:); % yaw rate [deg/s] (không dùng KPI này)

% Chuẩn hoá chiều dài & thời gian tăng dần
N = min([numel(Time), numel(Td), numel(fd)]);
Time = Time(1:N); Td = Td(1:N); fd = fd(1:N);
[Time, ix] = sort(Time, 'ascend'); Td = Td(ix); fd = fd(ix);

% Chọn khoảng [a,b]
if use_full_range
a = Time(1); b = Time(end);
end

```

```

maskAB = (Time >= a) & (Time <= b);
Time = Time(maskAB); Td = Td(maskAB); fd = fd(maskAB);

if numel(Time) < 2, error('Khoảng [a,b] quá ngắn hoặc dữ liệu trống.');
```

```

dt = median(diff(Time));

%% ===== 1) Cửa sổ  $\pm \max(|fd|)$ : stiffness full-range theo nhánh =====
max_fd = max(abs(fd));
bw_fd = max_fd; % dùng toàn bộ dải góc lái

% Tách nhánh theo chiều chuyển động (df/dt) và theo dấu mô men
dfdt = [diff(fd)./diff(Time); 0]; % đạo hàm số của SWA theo thời gian

% Nhánh dương: Td >= 0, fd trong  $\pm \max\_fd$ , đang tăng
mask1 = (fd >= -bw_fd) & (fd <= bw_fd) & (Td >= 0) & (dfdt >= 0);
fd_f1 = fd(mask1);
Td_f1 = Td(mask1);
if ~isempty(Td_f1)
% Độ cứng trung bình full-range (fit tuyến tính) phía dương
stiff_fullrange_pos = local_slope(fd_f1, Td_f1); % [Nm/deg]
else
stiff_fullrange_pos = NaN;
end

% Nhánh âm: Td <= 0, fd trong  $\pm \max\_fd$ , đang giảm
mask2 = (fd >= -bw_fd) & (fd <= bw_fd) & (Td <= 0) & (dfdt <= 0);
fd_f2 = fd(mask2);
Td_f2 = Td(mask2);
if ~isempty(Td_f2)
% Độ cứng trung bình full-range (fit tuyến tính) phía âm
stiff_fullrange_neg = local_slope(fd_f2, Td_f2); % [Nm/deg]
else
stiff_fullrange_neg = NaN;
end

%% ===== 2) Stiffness (+/-) trong  $|SWA| \leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  (near-zero) =====
% (tách nhánh theo chiều chuyển động và dấu mô men)
dfdt = [diff(fd)./diff(Time); 0]; % đạo hàm số của SWA theo thời gian

% Nhánh dương: fd  $\in [0, 0.01 \cdot \max\_fd]$ , đang tăng (df/dt >= 0) và Td >= 0
mask3p = (fd >= 0) & (fd <= 0.01*max_fd) & (dfdt >= 0) & (Td >= 0);
% Nhánh âm : fd  $\in [-0.01 \cdot \max\_fd, 0]$ , đang giảm (df/dt <= 0) và Td <= 0
mask3n = (fd <= 0) & (fd >= -0.01*max_fd) & (dfdt <= 0) & (Td <= 0);

stiff_pos = local_slope(fd(mask3p), Td(mask3p)); % [Nm/deg]
stiff_neg = local_slope(fd(mask3n), Td(mask3n)); % [Nm/deg]
asym_ratio = stiff_pos / stiff_neg;

%% ===== 3) Torque deadband tại SWA=0 (hai giao điểm) =====
cross_indices = find(fd(1:end-1).*fd(2:end) < 0); % các lần qua 0°
Td_at0 = [];
for k = 1:numel(cross_indices)
i = cross_indices(k);
x = fd(i:i+1); y = Td(i:i+1);
if diff(x) ~= 0
Td_at0(end+1,1) = interp1(x, y, 0); %#ok<SAGROW>
end
end
if numel(Td_at0) >= 2
torque_deadband = mean(abs(diff(Td_at0))); % [Nm]
else
torque_deadband = NaN;

```

```

end

%% ===== 4) Loop area (Steering work per cycle) [J] =====
% Công =  $\oint T_d d\theta$  ( $\theta$  tính bằng rad). Tính trung bình theo chu kỳ 0.2 Hz.
[~,locP] = findpeaks(Td,'MinPeakDistance',max(2,round(0.6/(0.2)/dt)));
if numel(locP) < 2
% fallback: dùng các điểm Td đổi dấu âm->dương
locP = find(Td(1:end-1)<=0 & Td(2:end)>0);
end
areas = [];
for k = 1:numel(locP)-1
idx = locP(k):locP(k+1);
if numel(idx) < 5, continue; end
theta = deg2rad(fd(idx));
torque = Td(idx);
% Tính xấp xỉ tích phân hình thang
areas(end+1,1) = sum( 0.5*(torque(1:end-1)+torque(2:end)) .*
diff(theta) ); %#ok<SAGROW>
end
if ~isempty(areas)
loop_area_J = mean(abs(areas));
else
loop_area_J = NaN;
end

%% ===== 5) Max |Torque| ; Max |SWA| =====
max_abs_torque = max(abs(Td));
max_abs_SWA = max(abs(fd));

%% ===== 6) Linearity R2 (inc/dec) trong  $\pm 3^\circ$  =====
maskLin = abs(fd) <= 3;
R2_inc = local_r2(fd(maskLin & dfdt>=0), Td(maskLin & dfdt>=0));
R2_dec = local_r2(fd(maskLin & dfdt<=0), Td(maskLin & dfdt<=0));

%% ===== 7) Time lag Td  $\leftrightarrow$  SWA (tính toàn cửa sổ) =====
if numel(Time) > 10
[xc,lags] = xcorr(detrend(Td), detrend(fd), 'coeff');
[~,imax] = max(xc);
time_lag = lags(imax)*dt; % [s]
else
time_lag = NaN;
end

%% ===== 8) In ra màn hình (cột dọc) =====
fprintf('\n===== Turning-in-place KPI (file: %s, a=%.3f s, b=%.3f s) =====\n',
matfile, a, b);
print_kv('1 Steering stiffness (+) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]', stiff_pos);
print_kv('2 Steering stiffness (-) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]', stiff_neg);
print_kv('3 Steering stiffness (+) full range [Nm/deg]', stiff_fullrange_pos);
print_kv('4 Steering stiffness (-) full range [Nm/deg]', stiff_fullrange_neg);
print_kv('5 Left-right stiffness asymmetry [-]', asym_ratio);
print_kv('6 Steering work per cycle [J]', loop_area_J);
print_kv('7 Linearity R2 within  $\pm 3^\circ$  (inc) [-]', R2_inc);
print_kv('8 Linearity R2 within  $\pm 3^\circ$  (dec) [-]', R2_dec);
print_kv('9 Steering friction-Torque deadband [Nm]', torque_deadband);
print_kv('10 Maximum torque [Nm]', max_abs_torque);
print_kv('11 Maximum steering angle [deg]', max_abs_SWA);
print_kv('12 Td-SWA time lag per window [s]', time_lag);

%% ===== 9) Ghi Excel (một sheet, cột dọc) =====
Metric = {
'Steering stiffness (+) |SWA| $\leq 0.01 \cdot \max\_fd^\circ$  [Nm/deg]'

```

```

'Steering stiffness (-) |SWA|<=0.01*max_fd° [Nm/deg]'
'Steering stiffness (+) full range [Nm/deg]'
'Steering stiffness (-) full range [Nm/deg]'
'Left-right stiffness asymmetry [-]'
'Steering work per cycle [J]'
'Linearity R^2 within ±3° (inc) [-]'
'Linearity R^2 within ±3° (dec) [-]'
'Steering friction - Torque deadband [Nm]'
'Maximum torque [Nm]'
'Maximum steering angle [deg]'
'Steering torque - Steering angle time lag [s]'
};
Value = [
stiff_pos;
stiff_neg;
stiff_fullrange_pos;
stiff_fullrange_neg;
asym_ratio;
loop_area_J;
R2_inc;
R2_dec;
torque_deadband;
max_abs_torque;
max_abs_SWA;
time_lag];
T = table(Metric, Value);
writetable(T, outxlsx, 'Sheet', 1, 'WriteMode','overwritesheet');

%% ===== Helpers =====
function s = local_slope(x,y)
% Slope trung bình trong khoảng bằng polyfit bậc 1 (OLS, ổn định)
% Có fallback sang mean.gradient) khi dữ liệu quá ít/biến thiên quá nhỏ.
x = x(:); y = y(:);
ok = isfinite(x) & isfinite(y);
x = x(ok); y = y(ok);
if numel(x) >= 5 && range(x) > 1e-9
p = polyfit(x,y,1);
s = p(1);
elseif numel(x) >= 2
s = mean.gradient(y,x,'omitnan');
else
s = NaN;
end
end

function R2 = local_r2(x,y)
% Tính R^2 của fit tuyến tính y ~ x
x = x(:); y = y(:);
ok = isfinite(x) & isfinite(y);
x = x(ok); y = y(ok);
if numel(x) < 3 || range(x) < 1e-9
R2 = NaN; return;
end
p = polyfit(x,y,1);
yhat = polyval(p,x);
SSres = sum((y - yhat).^2);
SStot = sum((y - mean(y)).^2);
R2 = 1 - SSres / max(SStot, eps);
end

function print_kv(name, val)
% In key-value gọn gàng, chịu được NaN, [], string/missing

```

```

if isnumeric(val)
if isempty(val)
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
elseif isscalar(val)
fprintf('%-45s : %g\n', name, val); % %g in được NaN/Inf
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, num2str(val));
end
elseif ischar(val)
if isempty(val)
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, val);
end
elseif isstring(val)
if ismissing(val) || strlen(val)==0
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
else
fprintf('%-45s : %s\n', name, char(val)); % ép về char để an toàn
end
else
% Fall back: cố gắng chuyển sang chuỗi, nếu vẫn lỗi → NA
try
fprintf('%-45s : %s\n', name, char(string(val)));
catch
fprintf('%-45s : %s\n', name, 'NA');
end
end
end

```

5.2.6. Thử nghiệm đánh giá cảm giác lái với tín hiệu bước (Step steering input test)

```

function CS_Step_GBT6323(win_a, win_b)
% -----
% Step-Steer (转向盘转角阶跃输入) - GB/T 6323-2014
% Tính các chỉ tiêu:  $\sigma$  (Eq.7),  $E_r$  (Eq.8),  $E_{ay}$  (Eq.9) + chỉ tiêu bổ sung
% Nguồn dữ liệu: Carsim_Step_V30.mat
% Xuất: Carsim_Step_V30.xlsx (1 sheet, 1 cột dọc)
% -----
if nargin<1, win_a = 0.0; end
if nargin<2, win_b = inf; end

inFile = 'Carsim_Step_N_V100_T4.506.mat';
outFile = 'Carsim_Step_N_V100_T4.506.xlsx';
g = 9.80665; % m/s^2 per g
dtMax = 0.2; % yêu cầu tiêu chuẩn:  $\Delta t \leq 0.2$  s

% ----- Đọc dữ liệu -----
S = load(inFile);

% Kiểm tra sự tồn tại của các biến cần thiết
if ~isfield(S, 'Timec_data') || ~isfield(S, 'Tdc_data') || ...
~isfield(S, 'fdc_data') || ~isfield(S, 'ayc_data') || ...
~isfield(S, 'dpsic_data')
error('Không tìm thấy các biến cần thiết trong file .mat.');
```

```

end

% Đọc các tín hiệu từ file
t = S.Timec_data(:); % Thời gian mô phỏng (s)
T_sw = S.Tdc_data(:); % Mô men lái (Nm)
SW = S.fdc_data(:); % Góc lái (deg)
ayg = S.ayc_data(:); % Gia tốc ngang (g)

```

```

r = S.dpsic_data(:); % Vận tốc góc xoay thân xe (deg/s)

% ----- Cửa sổ [a,b] -----
if ~isfinite(win_b), win_b = t(end); end
msk = (t >= win_a & t <= win_b);
t = t(msk); T_sw = T_sw(msk); SW = SW(msk); ayg = ayg(msk); r = r(msk);

% Kiểm tra giá trị mô men sau khi cắt dữ liệu
fprintf('Max |T_sw| trong cửa sổ phân tích: %.4f\n', max(abs(T_sw)));

% ----- Phát hiện thời điểm bắt đầu bước (t0 theo 5% SW) -----
n0 = max(3, round(0.1 * numel(t)));
nf = max(3, round(0.1 * numel(t)));
SWi = mean(SW(1:n0)); % trước bước
SWf = median(SW(end-nf+1:end)); % cuối
dSW = SWf - SWi; sgn = sign(dSW); assert(sgn ~= 0, 'Không phát hiện bước SW');

SW_05 = SWi + 0.05 * dSW; SW_95 = SWi + 0.95 * dSW;
t0 = firstCrossing(t, SW, SW_05, sgn); % thời điểm 5%
t95 = firstCrossing(t, SW, SW_95, sgn); % thời điểm 95% SW

% ----- Giá trị steady -----
steadyStart = t95 + 0.3; % sau 0.3 s kể từ 95% SW
ssMask = (t >= steadyStart);
if nnz(ssMask) < 5, ssMask = t >= t(round(0.8 * numel(t))); end
r0 = mean(r(ssMask)); % r0: steady yaw-rate (Eq.7,8)
ay0 = mean(ayg(ssMask)) * g; % ay0: steady lateral accel (m/s^2) (Eq.9)

% ----- Mốc thời gian kết thúc để tính E_r, E_ay -----
Ts_5 = settlingTime(t, r, r0, t0, 0.05); % ±5% band
if isnan(Ts_5), t_end = t(find(t >= steadyStart, 1, 'last')); else, t_end = t0 + Ts_5;
end

% Đảm bảo Δt không vượt 0.2s: resample nếu cần
[tR, SWR, rR, ayR] = resampleIfNeeded(t, SW, r, ayg * g, t0, t_end, dtMax);

% ----- Các chỉ tiêu chính thức theo tiêu chuẩn -----
% (7) σ = (r_max - r0)/r0 * 100%
post = t >= t0;
r_peak = (sgn >= 0) * max(r(post)) + (sgn < 0) * min(r(post));
sigma_perc = max(0, (r_peak - r0) / max(1e-9, abs(r0))) * 100;

% (8) E_r = Σ ((δ_swk/δ_sw0 - r_k/r0)^2) * Δt
delta_hat = (SWR - SWi) / dSW; % chuẩn hoá theo tổng bước δ_sw0
r_hat = rR / max(1e-9, r0);
Er = trapz(tR, (delta_hat - r_hat).^2);

% (9) E_ay = Σ ((δ_swk/δ_sw0 - ay_k/ay0)^2) * Δt
if abs(ay0) < 1e-9
Eay = NaN; % không xác định nếu ay0 ≈ 0
else
ay_hat = ayR / ay0;
Eay = trapz(tR, (delta_hat - ay_hat).^2);
end

% ----- Các chỉ tiêu bổ sung cho tuning (tham khảo) -----
% Thời gian 10/50/90% (tính theo r)
r10 = interpTimeFrac(t, r, r0, t0, 0.10, sgn);
r50 = interpTimeFrac(t, r, r0, t0, 0.50, sgn);
r90 = interpTimeFrac(t, r, r0, t0, 0.90, sgn);
Rise_T10_T90 = r90 - r10;
lag_s = timeLag_xcorr(t, SW, r);

```

```

T_sw_peak = max(abs(S.Tdc_data(:)));

% ----- Xuất kết quả -----
names = {
    'File nguồn';
    'Cửa sổ phân tích [a b] (s)';
    't0 (s) – thời điểm 5% SW';
    'δ_sw0 – biên độ bước (deg)';
    'r0 – yaw-rate steady (deg/s)';
    'ay0 – lateral accel steady (m/s^2)';
    'σ – overshoot of yaw rate (%) (Eq.7)';
    'E_r – tổng phương sai yaw rate (s) (Eq.8)';
    'E_ay – tổng phương sai lateral accel (s) (Eq.9)';
    'T10 (s)'; 'T50 (s)'; 'T90 (s)'; 'Rise T10→T90 (s)';
    'Phase time lag SW→r (s)';
    'Peak |T_sw| (Nm)';
};

vals = {
    inFile;
    sprintf('%.3f %.3f', win_a, win_b);
    t0;
    dSW;
    r0;
    ay0;
    sigma_perc;
    Er;
    Eay;
    r10; r50; r90; Rise_T10_T90;
    max(lag_s, 0);
    T_sw_peak;
};

fprintf('=== KET QUA STEP-STEER (GB/T 6323-2014) ===\n');
for i = 1:numel(names)
    if ischar(vals{i})
        fprintf('%-52s : %s\n', names{i}, vals{i});
    else
        fprintf('%-52s : %.6g\n', names{i}, vals{i});
    end
end

T = table(string(names), vals, 'VariableNames', {'Chi_tieu', 'Gia_tri'});
writetable(T, outFile, 'Sheet', 'Results', 'WriteMode', 'overwritesheet');

```
