

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU CHO HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH NGANG CHỦ ĐỘNG TRÊN Ô TÔ

Vũ Văn Tấn¹

Tóm tắt: Tai nạn giao thông đường bộ liên quan đến các ô tô tải trọng lớn thường gây ra các hậu quả nghiêm trọng về tính mạng con người cũng như phương tiện. Trong đó hiện tượng lật ngang được ghi nhận với mức độ xảy ra phổ biến nhất đối với các loại phương tiện này. Hiện nay hầu hết các ô tô đều trang bị các thanh ổn định ngang bị động, tuy nhiên nhược điểm của chúng là không cung cấp đủ mô men ổn định trong các tình huống khẩn cấp. Bên cạnh các hệ thống an toàn chủ động như hệ thống treo, hệ thống phanh, hệ thống lái, thì hệ thống ổn định ngang chủ động được đánh giá là một trong những giải pháp hiệu quả nhất để nâng cao độ ổn định của ô tô. Trong nghiên cứu này tác giả đề xuất hai bộ điều khiển tối ưu là LQR và LQG cho hệ thống ổn định ngang chủ động, bằng cách cung cấp thêm hai mô men từ các cơ cấu chấp hành ở cầu trước và cầu sau ô tô. Với mục tiêu đáp ứng hiệu quả thực tế trong việc áp dụng trên ô tô, tác giả sử dụng kết hợp bộ quan sát Kalman để xác định các tín hiệu đầu vào cho bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng cho thấy, hệ thống ổn định ngang chủ động có thể nâng cao độ ổn định ngang của ô tô trên 30% khi so với ô tô sử dụng hệ thống treo bị động.

Từ khóa: Động lực học ô tô, Điều khiển tuyến tính, Điều khiển tối ưu, Bộ quan sát Kalman-Bucy, Hệ thống ổn định ngang chủ động.

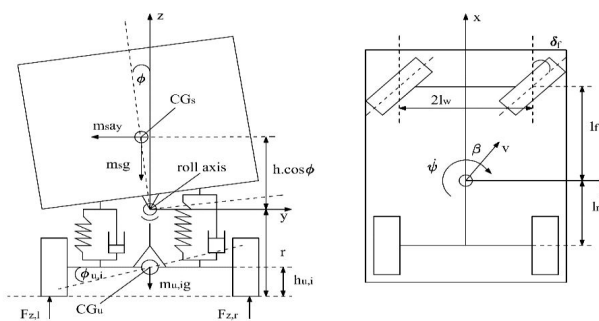
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lật ngang là hiện tượng nguy hiểm đối với các phương tiện giao thông, tuy rất ít khi xảy ra nhưng lại để lại hậu quả rất nặng nề. Mất ổn định ngang là nguyên nhân chính cho hiện tượng lật ngang trên ô tô. Theo báo cáo của Cục quản lý đường bộ (NHTSA) tại Mỹ, trong năm 2012 có hơn 333000 xe hạng nặng liên quan đến các vụ tai nạn giao thông khiến 3912 người thiệt mạng và 104000 người bị thương bởi hiện tượng lật xe. Trong năm 2013, có hơn 4500 người thiệt mạng trong các vụ tai nạn giao thông liên quan đến xe hạng nặng tại EU, chiếm 18% tổng số trường hợp tử vong do tai nạn đường bộ năm đó, điều này đặt ra câu hỏi với các nhà quản lý để khắc phục các loại tai nạn trên.

Từ năm 2000 đại học Cambridge vương quốc Anh đã tiến hành nghiên cứu hệ thống ổn định ngang chủ động nhằm nâng cao tính ổn định ngang cho ô tô. Hệ thống này gồm có thanh ổn định ngang bị động có dạng hình chữ U cùng với đó là 2 xylanh

thuỷ lực liên kết giữa thanh ổn định bị động và khung xe để sinh ra momen giúp ô tô ổn định hơn. Để điều khiển được cơ cấu này chúng ta có rất nhiều cách như: bộ điều khiển LQR, bộ điều khiển H_∞ ... Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất việc áp dụng phương pháp sử dụng bộ quan sát Kalman-Bucy kết hợp với điều khiển tối ưu LQR để xây dựng bộ điều khiển LQG.

2. MÔ HÌNH Ô TÔ



Hình 1. Mô hình yaw-roll của ô tô tải hai trục

Mô hình ô tô được sử dụng trong nghiên cứu này là Yaw-Roll của ô tô đơn 2 trục trang bị hệ thống treo phụ thuộc, được thể hiện trong hình 1. Mô hình gồm 3 phần:

¹ Bộ môn Cơ khí ô tô, Khoa Cơ khí, Đại học Giao thông Vận tải
Email: vvtan@utc.edu.vn

khối lượng được treo m_s , khối lượng không được treo cầu trước m_{uf} , khối lượng không được treo cầu sau m_{ur} . Momen điều khiển của hệ thống ổn định ngang

chủ động ở cả hai cầu là u_f, u_r . Các kí hiệu và thông số của mô hình Yaw-roll được thể hiện trong (Vu, Olivier Sename, Luc Dugard & Peter Gaspar, 2017).

Phương trình động lực học của ô tô được xác định như sau:

$$m.v.(\dot{\beta} + \dot{\psi}) - m_s.h.\ddot{\phi} = \left[\mu.C_f \cdot \left(-\beta + \delta_f - \frac{l_f.\dot{\psi}}{v} \right) \right] + \left[\mu.C_r \cdot \left(-\beta + \frac{l_r.\dot{\psi}}{v} \right) \right] \quad (1)$$

$$-I_{xz}.\ddot{\phi} + I_{zz}.\ddot{\psi} = \left[\mu.C_f \cdot \left(-\beta + \delta_f - \frac{l_f.\dot{\psi}}{v} \right) \right].l_f - \left[\mu.C_r \cdot \left(-\beta + \frac{l_r.\dot{\psi}}{v} \right) \right].l_r \quad (2)$$

$$(I_{zz} + m_s.h^2).\ddot{\phi} - I_{xz}.\ddot{\psi} = m_s.g.h.\phi + m_s.v.h.(\dot{\beta} + \dot{\psi}) - k_f(\phi - \phi_{yf}) - b_f(\dot{\phi} - \dot{\phi}_{yf}) + u_f - k_r(\phi - \phi_{yr}) - b_r(\dot{\phi} - \dot{\phi}_{yr}) + u_r \quad (3)$$

$$-r.Y_{yf} = m_{uf}.v.(r - h_{uf}).(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + m_{uf}.g.h_{uf}.\phi_{yf} - k_{yf}.\phi_{yf} + k_f.(\phi - \phi_{yf}) + b_f(\dot{\phi} - \dot{\phi}_{yf}) + u_f \quad (4)$$

$$-r.Y_{yr} = m_{ur}.v.(r - h_{ur}).(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + m_{ur}.g.h_{ur}.\phi_{yr} - k_{yr}.\phi_{yr} + k_r.(\phi - \phi_{yr}) + b_r(\dot{\phi} - \dot{\phi}_{yr}) + u_r \quad (5)$$

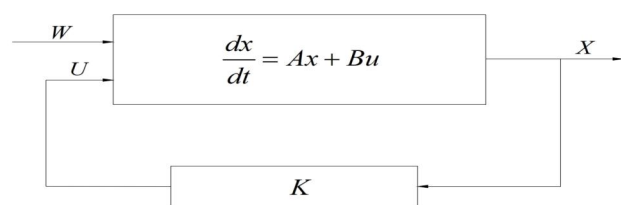
Phương trình động lực học từ (1-5) được biểu diễn dưới dạng không gian trạng thái sau:

$$\begin{cases} \dot{X} = A.X + B_1.W + B_2.U \\ Z = C.X + D_1.W + D_2.U \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó; vectơ trạng thái $X = [\beta \ \dot{\psi} \ \phi \ \dot{\phi} \ \phi_{yf} \ \phi_{yr}]^T$, $\dot{X} = [\dot{\beta} \ \ddot{\psi} \ \dot{\phi} \ \ddot{\phi} \ \dot{\phi}_{yf} \ \dot{\phi}_{yr}]^T$, kích thích là góc đánh lái: $W = \delta_f$. Tín hiệu điều khiển $U = [u_f \ u_r]^T$.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH NGANG CHỦ ĐỘNG

3.1. Cơ sở lý thuyết điều khiển tối ưu phản hồi âm



Hình 2. Bộ điều khiển phản hồi âm vector trạng thái

Điều khiển tối ưu là để xác định luật điều khiển cho hệ thống động cho trước sao cho tối thiểu hoá một hoặc một vài chỉ tiêu chất lượng. Có 2 phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái tối ưu là phản hồi dương và phản hồi âm. Sau đây tác giả sử dụng điều khiển phản hồi âm có cấu trúc như hình 2.

Đối với việc thiết kế bộ điều khiển, ta giả định rằng mọi thông số của vector trạng thái đều có thể đo được hay ước lượng được. Từ đó chúng ta xem xét đến lực điều khiển:

$$u = -K.x \quad (7)$$

Trong đó K là ma trận phản hồi trạng thái. Quá trình tối ưu cần xác định tín hiệu đầu vào u để giảm thiểu một số tín hiệu trong hàm mục tiêu J được biểu diễn như sau:

$$J(x, u) = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \quad (8)$$

Với ma trận Q được giả thiết là ma trận đối xứng, xác định không âm và R là ma trận đối xứng xác định dương.

Theo lý thuyết điều khiển tối ưu tuyến tính thì K được xác định như sau:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (9)$$

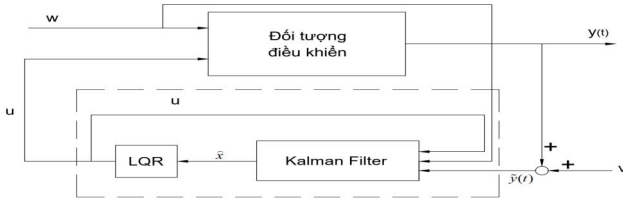
Với P là nghiệm của phương trình Riccati:

$$AP + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

3.2. Xây dựng bộ điều khiển tối ưu

3.2.1. Xây dựng bộ điều khiển LQG

Phương pháp điều khiển tối ưu LQG (Linear Quadratic Gaussian) là sự kết hợp của bộ lọc Kalman vào bài toán tối ưu LQR và được biểu diễn qua hình 3.



Hình 3. Sơ đồ bộ điều khiển LQG

Bộ điều khiển LQR tạo ra lực điều khiển u thích hợp cho đối tượng điều khiển và sử dụng nó như một tín hiệu để kết hợp với kích thích bên ngoài w (góc đánh lái) và vector đầu ra được xem xét đến nhiều là $\tilde{y}(t)$ làm tín hiệu đầu vào cho bộ lọc Kalman.

Điểm khác biệt ở đây là bộ điều khiển LQR thông thường sẽ sử dụng 6 tín hiệu coi như đo được từ cảm biến nhưng bộ điều khiển LQG được xây

$$J = \int_0^{\infty} (\rho_1 \beta^2 + \rho_2 \dot{\psi}^2 + \rho_3 \phi^2 + \rho_4 \dot{\phi}^2 + \rho_5 \phi_{uf}^2 + \rho_6 \phi_{ur}^2 + \rho_7 u_f^2 + \rho_8 u_r^2) dt$$

Trong đó $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6 \geq 0$ là các trọng số cho trước. Giá trị của các trọng số thể hiện mức độ ưu tiên khác nhau cho các chỉ tiêu khác nhau. Độ ổn định ngang của ô tô được đánh giá thông qua: $\phi, \phi_{uf}, \phi_{ur}$. Do vậy giá trị của các tín hiệu của ρ_3, ρ_5, ρ_6 sẽ được xem xét tăng lên so với các yếu tố khác. Với mô hình Yaw-Roll tác giả chọn giá trị $\rho_i (i = 1 \div 8)$ như bảng sau:

Bảng 1. Thông số ρ_i của bộ điều khiển cho mô hình Yaw-roll

	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8
LQR	1	1	10^6	1	10^4	10^3	10^{-6}	10^{-6}
LQG	1	1	10^6	1	10^4	10^3	10^{-6}	10^{-6}

Lưu ý: Việc lựa chọn giá trị của ρ_i phụ thuộc rất nhiều vào mục tiêu điều khiển và kinh nghiệm của người thiết kế. Thông thường việc lựa chọn này

được sử dụng tín hiệu \hat{x} được ước lượng từ bộ quan sát Kalman với chỉ 2 cảm biến để sử dụng và thường được lắp đặt là cảm biến vận tốc góc xoay thân xe và cảm biến gia tốc ngang. Đây chính là điểm mấu chốt khác biệt của điều khiển LQG so với LQR.

3.2.2. Bộ quan sát Kalman-Bucy

Việc xây dựng và đánh giá bộ quan sát Kalman-Bucy đã được giới thiệu rất kỹ trong nghiên cứu (Vũ Văn Tân; Đinh Đức Thiện; Đỗ Trọng Tú, 19-20 tháng 7/2019). Tuy nhiên trong nghiên cứu đó tác giả chưa xem xét đến sự tồn tại của tín hiệu điều khiển u . Sự khác biệt cơ bản ở bộ quan sát Kalman-Bucy ở đây là đầu vào của bộ quan sát gồm có: hai cảm biến như đã đề cập ở trên, tín hiệu điều khiển u và góc đánh lái w . Do vậy việc tổng hợp bộ quan sát cần có sự thay đổi ở các ma trận.

3.2.3. Lựa chọn hàm mục tiêu

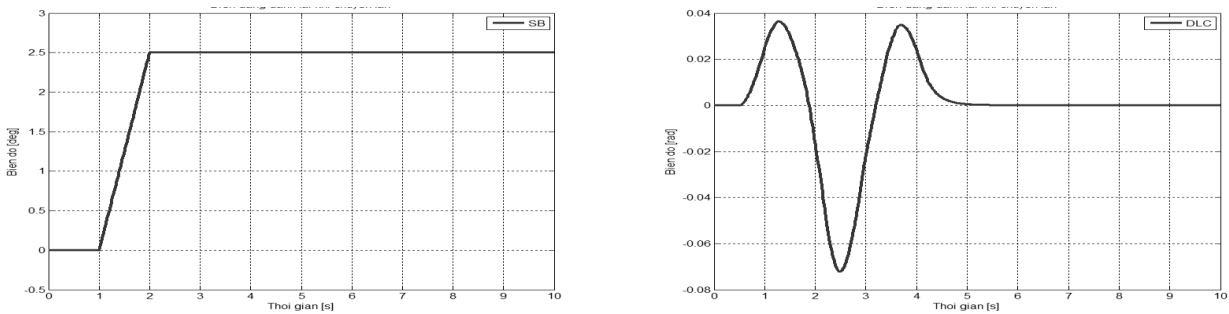
Mục đích của hệ thống điều khiển tối ưu là nâng cao độ tính ổn định ngang của ô tô. Do vậy ta lựa chọn hàm mục tiêu như sau:

được thực hiện thông qua hai công đoạn “Thử - Kiểm tra”, tuy nhiên hiện nay chúng ta có thể áp dụng phương pháp tối ưu mới như thuật giải di truyền (GA) để lựa chọn.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp điều khiển, tác giả khảo sát với hai loại góc đánh lái là: góc đánh lái khi ô tô quay vòng và góc đánh lái khi ô tô chuyển làn như hình 4 ở các tốc độ khác nhau từ 10 km/h đến 130 km/h. Hiệu quả của bộ điều khiển được đánh giá thông qua 2 chỉ tiêu:

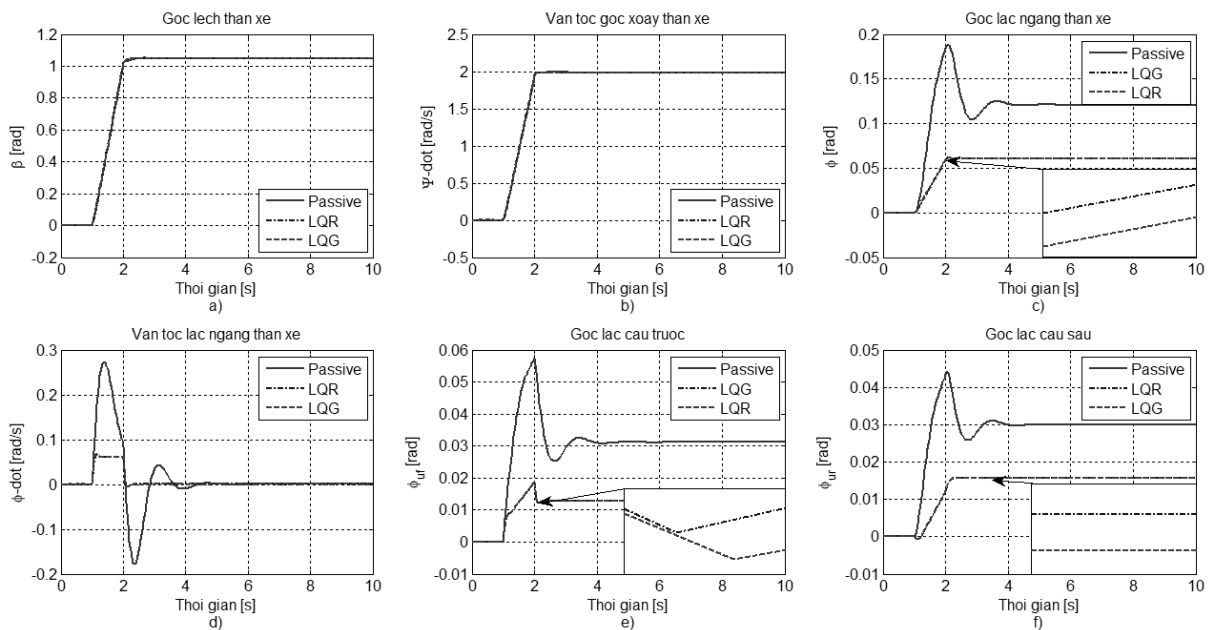
- Hình dạng - giá trị các tín hiệu theo thời gian,
- Sai lệch bình phương trung bình RMS của các tín hiệu. Các tín hiệu được khảo sát bao gồm: a) Góc lắc thân xe β ; b) Vận tốc lắc ngang thân xe $\dot{\psi}$; c) Góc lắc ngang thân xe ϕ ; d) Vận tốc góc lắc ngang thân xe $\dot{\phi}$; e) Góc lắc cầu trước ϕ_{uf} ; f) Góc lắc cầu sau ϕ_{ur} .



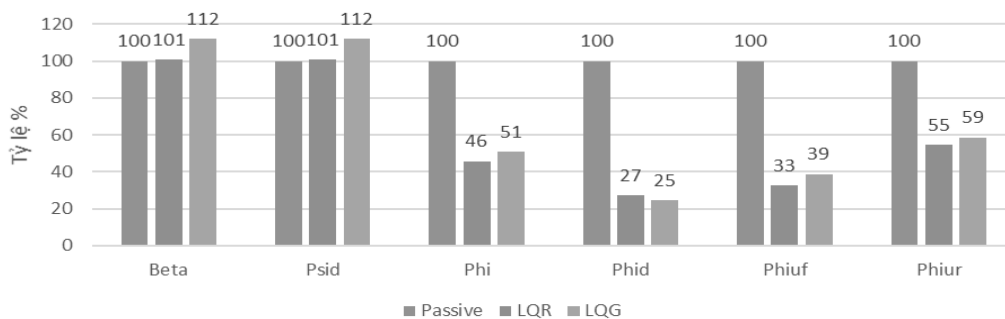
Hình 4. Mô phỏng góc đánh lái

a) Góc đánh lái khi ô tô quay vòng; b) Góc đánh lái khi ô tô chuyển làn.

4.1. Trường hợp 1: Ô tô đánh lái quay vòng



Hình 5. Đáp ứng thời gian của $\beta; \dot{\psi}; \phi; \dot{\phi}; \phi_{ur}; \dot{\phi}_{ur}$



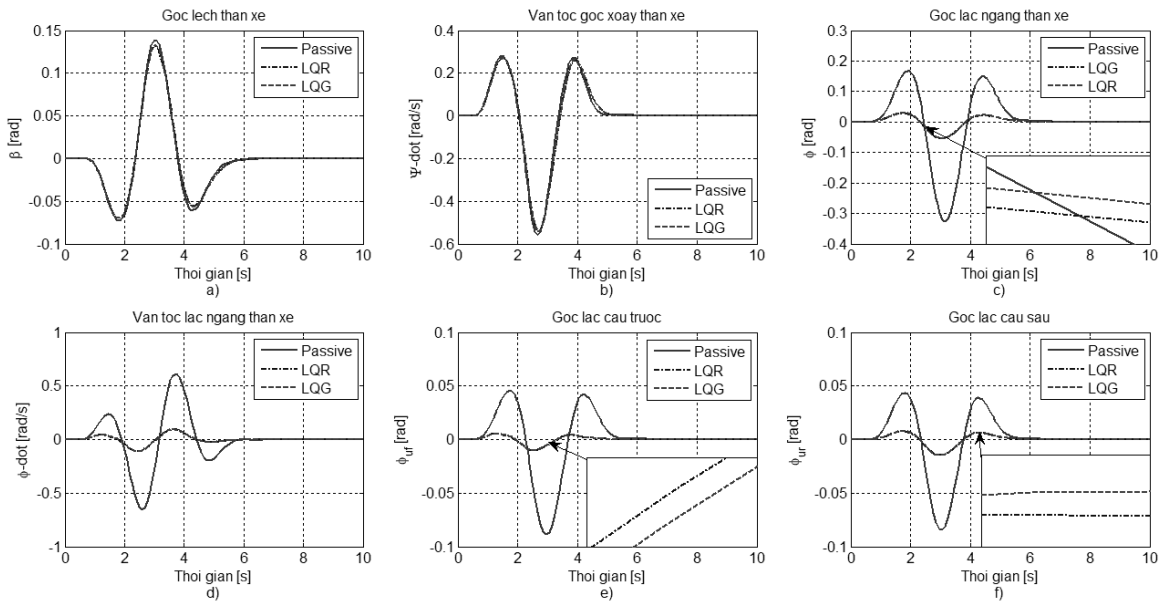
Hình 6. Tỷ lệ sai lệch bình phương trung bình RMS giữa các tín hiệu

Theo như hình 5, 6 ta thấy được tín hiệu thông qua điều khiển LQG bám rất sát với giá trị của tín hiệu điều khiển LQR (tín hiệu tối ưu mà chúng ta mong muốn) và cùng với đó chúng ta thấy có sự khác biệt rõ rệt giữa việc sử dụng hệ thống có điều khiển và bị động.

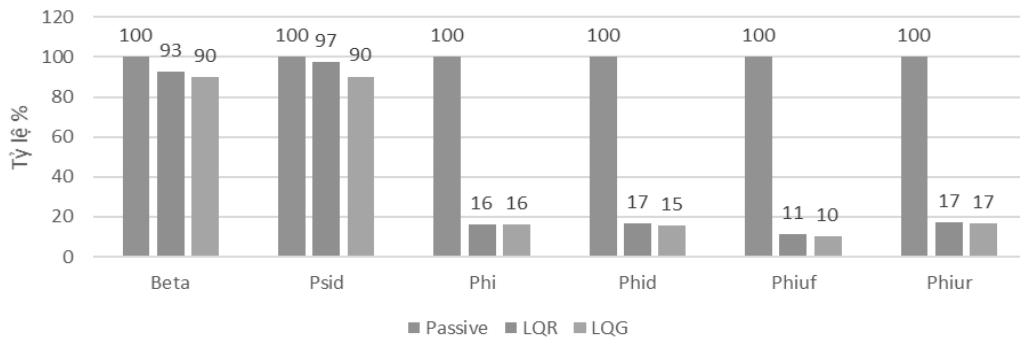
Coi tín hiệu bị động là 100% thì ta thấy được sau

khi thông qua bộ điều khiển giá trị các tín hiệu đã giảm đi đáng kể (giá trị chỉ còn dưới 50% so với hệ thống bị động) cho thấy rõ việc bộ điều khiển đem lại sự ổn định tốt hơn cho ô tô. Như vậy ở vận tốc 40 km/h với góc đánh lái để ô tô quay vòng thì bộ điều khiển LQR và LQG hoạt động tốt.

4.2. Trường hợp 2: Ô tô đánh lái chuyển làn



Hình 7. Đáp ứng thời gian của $\beta; \dot{\psi}; \phi; \dot{\phi}; \phi_{uf}; \phi_{ur}$



Hình 8. Tỷ lệ sai lệch bình phương trung bình RMS giữa các tín hiệu

Theo hình 7, 8 ta thấy được giá trị của các giá trị liên quan đến ổn định ngang ô tô của hai bộ điều khiển là rất nhỏ (chỉ 10% so với bị động là 100%). Đây cũng là trường hợp mà bộ điều khiển làm việc tốt nhất trong các trường hợp được khảo sát. Bộ điều khiển LQG không những có thể đưa ra tín hiệu chính xác như LQR mà còn có thể làm tốt hơn bộ điều khiển LQR (mặc dù sự khác biệt là không quá lớn). Như vậy ta thấy được cả 2 bộ điều khiển LQR và LQG đều làm việc tốt khi ô tô chuyển làn ở vận tốc 60 km/h.

Từ kết quả mô phỏng trên chúng ta thấy rằng, hệ thống ổn định ngang chủ động chỉ có vai trò nâng cao ổn định ngang của ô tô chứ không làm thay đổi đặc tính dẫn hướng của ô tô (giá trị của β và ψ gần như không thay đổi). Điều này đảm bảo rằng ô tô

trang bị hệ thống ổn định ngang chủ động không làm thay đổi cảm giác lái.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này tác giả đã tập chung trong việc áp dụng phương pháp điều khiển tối ưu vào điều khiển hệ thống ổn định ngang chủ động trên ô tô tải. Bộ quan sát Kalman-Bucy và bộ điều khiển LQR đã được kết hợp để tạo ra bộ điều khiển LQG với hai cảm biến cơ bản là cảm biến vận tốc góc xoay thân xe và cảm biến gia tốc ngang. Kết quả mô phỏng cho thấy mặc dù chỉ sử dụng 2 cảm biến nhưng bộ điều khiển LQG gần bám sát với kết quả của bộ điều khiển LQR (lý tưởng) nhằm nâng cao tính ổn định ngang của ô tô. Từ đó mở ra một cơ hội để có thể áp dụng kết quả nghiên cứu này vào việc thử nghiệm trên ô tô thực tế sau này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Nguyễn Doãn Phước. (2009). *Lý thuyết điều khiển nâng cao*. Hà Nội: In lần thứ 4. NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- Nguyễn Doãn Phước. (2009). *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*. Hà Nội: In lần thứ 4. NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- Vũ Văn Tấn; Đinh Đức Thiện; Đỗ Trọng Tú. (19-20 tháng 7/2019). Ước Lượng Trạng Thái Của Ô tô Tải Bằng Bộ Quan Sát. *Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ nhất về Động lực học và Điều khiển*. Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Đà Nẵng.
- Gaspar P, Szabo Z, Bokor J. (2005). *Prediction based combined control to prevent the rollover of heavy*. Limassol, Cyprus: Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation.
- Gaspar P, Szaszi I, Bokor J. (2004). *The design of a combined control structure to prevent the rollover*. Euro Journal of Control.
- Miege AJP, Cebon D. (2002). *Design and implementation of an active roll control system for heavy*. Hiroshima, Japan: 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC 2002.
- Sampson DJM. (2000). *Active roll control of articulated heavy vehicles*. University of Cambridge, UK.
- Sampson DJM, Cebon D. (2003). *Achievable roll stability of heavy road vehicles*. United Kingdom: Journal of Automobile Engineering.
- Van Tan Vu, Olivier Sename, Luc Dugard & Peter Gaspar. (2017). *Enhancing roll stability of heavy vehicle by LQR active anti-roll bar control using electronic servovalve hydraulic actuators*. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility.
- Vu VT, Sename O, Dugard L, et al. (2016). *H ∞ active anti-roll bar control to prevent rollover of heavy vehicles: a robustness analysis*. Istanbul, Turkey: IFAC Symposium on System Structure and Control - 6th SSSC.

Abstract:

RESEARCHING OPTIMAL CONTROL DESIGN FOR ACTIVE ANTI-ROLL BAR SYSTEM ON AUTOMOBILES

Road traffic accidents involving heavy vehicles often cause serious consequences on human lives as well as vehicles. In which rollover phenomenon is recorded with the most common occurrence for these vehicles. Currently most vehicles are equipped with the passive anti-roll bar system, but their disadvantages are not providing enough stable torque in emergency situations. Besides active safety systems such as suspension, brake and steering systems, the active anti-roll bar system is considered as one of the most effective solutions to improve the vehicle roll stability. In this study, the author proposes the two optimal controllers, LQR and LQG, for this active system, by providing two additional moments from actuators in the front and rear axles. For the purpose of meeting practical effectiveness in applying on real vehicles, the author uses a combination of Kalman-Bucy observer to determine the input signals for the controller. Simulation results show that the active anti-roll bar system can improve the roll stability over 30% when compared with vehicles using the passive suspension system.

Keywords: Vehicle dynamic, Linear control, Optimal control, Kalman-Bucy observer, Active anti-roll bar system.

Ngày nhận bài: 18/6/2019

Ngày chấp nhận đăng: 22/8/2019