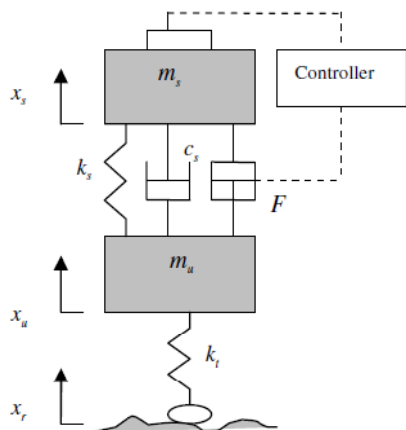


طراحی یک سطح لغزش بهینه تناسبی- انتگرالی برای سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با ادوات تعلیق دارای ثابت‌های نامعین و مشخصه‌های غیر خطی

سیدعلی ظهیری پور و علی اکبر جلالی



شکل ۱: مدل سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو.

در دسته اول، سطوح پیشنهادی می‌توانند دارای پارامترهای کاملاً مشخص و یا یک یا چند پارامتر نامشخص باشند. همچنین سطوح می‌توانند به صورت یک دینامیک از خطای ردیابی و یا خطای تطابق انتخاب شوند. منظور از خطای تطابق، اختلاف خروجی سیستم و خروجی یک مدل مرجع است. Jeen Lin و همکاران در سال ۲۰۰۹ سطح لغزش خطی با پارامترهای مشخص را به صورت تابعی تناسبی-مشتقی از خطای ردیابی [۲] و Nurkan Yagiz با همکارانش در سال ۲۰۰۸ سطحی مشابه را برای کنترل سیستم تعلیق فعال خودرو پیشنهاد دادند [۳]. Andika Aji Wijaya به همراه همکارانش در سال ۲۰۱۰ سطحی لگاریتمی را به عنوان یک سطح غیر خطی با پارامترهای مشخص ارائه نمودند [۴]. Yon-Ping Chen و همکاران در سال ۲۰۱۰ سطح لغزش را به صورت یک ترکیب خطی از حالت‌ها ولی با پارامترهای نامشخص پیشنهاد داده و شرطی کافی روی پارامترهای نامعلوم سطح را با هدف تحقق یک دینامیک پایدار روی سطح لغزش به دست آوردند [۵]. F. Deepak و همکاران در سال ۲۰۱۱ سطحی غیر خطی را با تعدادی پارامتر نامشخص ارائه کرده و ضمن یافتن این پارامترها، اثر آنها را روی عملکرد سیستم حلقه‌بسته تحلیل کردند [۶]. Ren Chuanbo و همکارانش در سال ۲۰۱۰ سطح لغزش را به صورت دینامیکی پایدار از خطای تطابق انتخاب کردند. مدل مورد استفاده این محققین، سیستم تعلیق کنترل شده با یک استراتژی بهینه بود [۷]. Song Hui با همکاران در سال ۲۰۱۰ برای انتخاب سطح از خطای تطابق استفاده کردند اما مدل مورد استفاده آنها مدل قلاب آسمانی بود [۸]. Babak Assadsangabi و همکارانش در سال ۲۰۰۹ از پیوند دو مدل قلاب آسمانی و قلاب زمینی استفاده کرده و امکان برقراری مصالحه بهتر بین جابه‌جایی جرم‌های معلق و غیر معلق را فراهم آوردند [۹].

چکیده: در این مقاله، طراحی کنترل‌کننده برای سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با محوریت مد لغزشی انجام گرفته است. ادوات سیستم تعلیق شامل فنر و ضربه‌گیر دارای مشخصه‌های غیر خطی بوده و ثابت‌های این مشخصه‌ها نامعین ولی دارای کران مشخصی هستند. جهت ساده‌سازی طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم، خطی‌سازی فیدبک پیشنهاد شده است و در ادامه با استفاده از یک استراتژی بهینه، یک سطح لغزش تناسبی-انتگرالی به دست آورده و کنترل‌کننده‌ای برای برآورده‌سازی شرط لغزش پیشنهاد شده است. فرایند طراحی به گونه‌ای است که نه تنها پایداری مجانبی سیستم تعلیق را در حضور نامعینی‌های پارامتری موجود تضمین می‌کند، بلکه طراح می‌تواند با تنظیم پارامترهایی، مصالحه مورد نظر خود بین راحتی سرنشینان خودرو و فرمان‌پذیری و کنترل‌پذیری خودرو را به عنوان اهداف مهم یک سیستم تعلیق ایجاد کند.

کلید واژه: سیستم تعلیق فعال، مد لغزشی، خطی‌سازی فیدبک، سطح لغزش تناسبی-انتگرالی، نامعینی‌های پارامتری.

۱- مقدمه

امروزه یکی از زمینه‌های رقابتی در عرصه صنعت خودروسازی، طراحی سیستم‌های تعلیق فعال خودرو با بازدهی بالاتر است. در سیستم‌های تعلیق فعال مطابق شکل ۱، برای کنترل دقیق میزان ارتعاشات خودرو از عملگرهای هیدرولیکی، نیوماتیکی، هیدرونیوماتیکی و ... استفاده می‌شود که به موازات فنرها و کمک‌فنرها قرار گرفته و با استفاده از اطلاعات حاصل از ارتعاشات بدنه و چرخ‌ها استراتژی مناسب کنترل اعمال می‌شود [۱]. روش کنترلی مد لغزشی به دلیل پاسخگو بودن در حضور انواع نامعینی‌ها، در بین روش‌های کنترل مقاوم از محبوبیت بالایی برخوردار است و پژوهش‌های مختلف در این زمینه منجر به ایجاد ایده‌های جدیدی در مورد این روش شده است. از جمله این ایده‌ها، پیشنهاد‌های مختلف در مورد چگونگی انتخاب سطح لغزش است که می‌توان آنها را به دو دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

الف) طراح، در گام اول مستقیماً یک سطح را به عنوان سطح لغزش پیشنهاد می‌کند.

ب) طراح، استراتژی مشخصی را پیشنهاد می‌کند که اجرای آن منجر به استخراج یک سطح لغزش می‌شود.

این مقاله در تاریخ ۴ اسفند ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۱۱ مهر ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

سیدعلی ظهیری پور، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (email: ali.zahri85@yahoo.com)

علی اکبر جلالی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (email: drjalali@iust.ac.ir)

مورد سیستم تعلیق فعال استفاده شده و سرانجام، کنترل کننده مد لغزشی بر اساس آن طراحی شده است. سازمان‌دهی این مقاله به این صورت است که در بخش دوم مدل غیر خطی سیستم تعلیق ۱/۴ خودرو نمایش داده شده و در بخش سوم چگونگی خطی‌سازی فیدبک سیستم مورد نظر، مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم چگونگی انتخاب سطح لغزش و فرایند طراحی کنترل کننده انجام گرفته و در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. سرانجام در بخش ششم یک نتیجه‌گیری از این مقاله بیان شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم تعلیق

با استفاده از قانون نیوتن و با توجه به غیر خطی بودن مشخصه‌های ادوات تعلیق طبق شکل ۲ و ۳، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم تعلیق در شکل فضای حالت به صورت (۱) خواهد بود

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m_s} (-k_s(x_1 - x_r)^\tau - B_s(x_2 - x_r)^\delta + U) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m_u} (+k_s(x_1 - x_r)^\tau + B_s(x_2 - x_r)^\delta - K_t x_4 \\ &\quad + K_r Z_r - U) \end{aligned} \quad (1)$$

که در این معادلات x_1 و x_2 به ترتیب جابه‌جایی و سرعت عمودی جرم معلق و x_3 و x_4 به ترتیب جابه‌جایی و سرعت عمودی جرم غیر معلق هستند. k_s ثابت مشخصه نیروی غیر خطی فنر، B_s ثابت مشخصه میرایی غیر خطی کمک‌فنر، K_t ثابت فنری تایر خودرو، Z_r دامنه دست‌انداز و U نیروی تولیدی عملگر مورد استفاده است. k_s و B_s پارامترهایی نامعین هستند ولی کران آنها مشخص است. لازم به یادآوری است که در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب مشخصه‌های غیر خطی اجزا در شرایط نامی رسم شده‌اند.

۳- خطی‌سازی فیدبک

تعریف: یک سیستم غیر خطی تک‌ورودی به شکل ۲ که f و g توابع همواری^۱ در R^n باشند، خطی‌پذیر ورودی-حالت^۲ است اگر ناحیه‌ای مثل Ω در R^n ، یک تبدیل diffeomorphism مثل $\phi: \Omega \rightarrow R^n$ و یک قانون کنترل فیدبک غیر خطی مثل $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ وجود داشته باشد، به طوری که متغیرهای حالت جدید $z = \phi(x)$ و ورودی جدید v در رابطه خطی و تغییرناپذیر با زمان (۳) صدق کنند [۱۴]

$$\dot{z} = f(z) + g(z)u \quad (2)$$

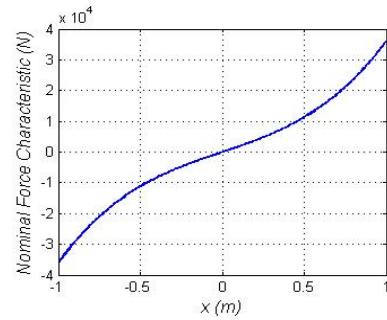
$$\dot{z} = Az + Bv \quad (3)$$

که در این رابطه

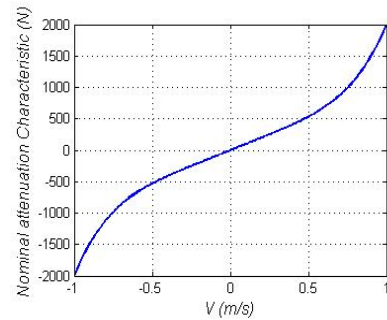
$$A = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

1. Smooth

2. Input-State Linearizable



شکل ۲: مشخصه نیروی فنر در شرایط نامی ($f = kx^\tau$).



شکل ۳: مشخصه میرایی کمک‌فنر در شرایط نامی ($f = Bx^\delta$).

در دسته دوم با توجه به امکان پیشنهاد استراتژی‌های متعدد، یک حوزه وسیع پیش روی محققان قرار دارد. تبدیل مسأله انتخاب سطح به انواع مسایل بهینه‌سازی را می‌توان در این دسته جای داد. همچنین استفاده از یک استراتژی کنترلی جهت انتخاب سطح لغزش می‌تواند به عنوان یکی از ایده‌های مطرح در این دسته باشد. B. L. Zhang و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از یک ماتریس تبدیل، معادلات فضای حالت سیستم تعلیق خودرو را به شکل جدیدی درآوردند. سپس با طراحی یک کنترل کننده مجازی برای زیرسیستم حاصل و اعمال کنترل کننده به دست آمده، سطح لغزشی را استخراج کردند [۱۰]. E. Chavez-Conde و همکارانش در سال ۲۰۰۹ از ایده روش کنترلی تناسبی-انتگرالی تعمیم‌یافته جهت استخراج سطح لغزش برای سیستم تعلیق خودرو بهره جستند [۱۱]. Yahaya Md. Sama و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۱۲] و Xiang Jia و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با طراحی یک کنترل کننده بهینه برای سیستم تعلیق و اعمال آن به معادلات دینامیکی سیستم، سطح لغزشی تناسبی-انتگرالی را استخراج کرده‌اند [۱۳]. در این مقاله اگرچه همانند دو مرجع اخیر از سطح لغزش تناسبی-انتگرالی استفاده شده، اما دارای تفاوت‌های اساسی با آنهاست که به طور مختصر ذکر می‌کنیم. مهم‌ترین تفاوت آن است که ادوات تعلیق در این مقاله دارای مشخصه‌های غیر خطی هستند که منجر به غیر خطی شدن مدل سیستم می‌گردد، حال آن که در این دو مرجع مدل سیستم تعلیق خطی است. تفاوت دیگر در نوع عدم قطعیت‌هاست. عدم قطعیت در این تحقیق، پارامتری بوده و ناشی از عدم آگاهی از ثابت‌های ادوات تعلیق است، حال آن که در دو مرجع اشاره‌شده، عدم قطعیت، ناشی از اثر اغتشاش و ناهمواری سطح جاده در نظر گرفته شده است. تفاوت دیگر آن است که در دو مرجع فوق‌الذکر به چگونگی استخراج سطح لغزش اشاره نشده است، حال آن که در تحقیق جاری به طور کامل، استراتژی بهینه‌ای را که منجر به استخراج سطح لغزش تناسبی-انتگرالی می‌گردد، ذکر کرده‌ایم. در این مقاله برای رفع مشکل وجود ترم‌های غیر خطی در مدل، از خطی‌سازی فیدبک و سپس برای غلبه بر نامعینی‌های پارامتری موجود، از یک استراتژی بهینه، برای استخراج سطح لغزش تناسبی-انتگرالی در

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= z_4 \\ \dot{z}_4 &= (f - f_n) + v \end{aligned}$$

۴- چگونگی انتخاب سطح لغزش و فرایند طراحی کنترل کننده

برای انتخاب سطح لغزش این روش پیشنهاد می‌شود: سیستم را در شرایط نامی خود در نظر می‌گیریم و کنترل کننده بهینه مجازی v با معیار عملکرد (۶) را طراحی می‌کنیم

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} z^T Q z + v^T R v \quad (6)$$

که در آن Q یک ماتریس مثبت نیمه‌معین و R یک اسکالر مثبت انتخاب می‌شود.

در شرایط نامی $(f = f_n)$ ، معادلات دینامیکی سیستم تبدیل یافته عبارت است از

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + Bv \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

قانون کنترل مجازی به صورت زیر قابل بیان است

$$v = -Kz$$

$$K = R^{-1} B^T P$$

و P پاسخ معادله ریکاتی زیر است

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0$$

به این ترتیب دینامیک سیستم در شرایط نامی مطابق (۷) خواهد بود

$$\dot{z} = (A - BK)z \quad (7)$$

از همین رابطه دینامیکی بردار-ماتریسی، جهت انتخاب سطح لغزش استفاده می‌کنیم. با توجه به آن که متغیر لغزشی یک اسکالر است با ضرب طرفین این رابطه در بردار سطری C و انگترال گیری از طرفین

$$Cz = \int_0^t (CA - CBK)z$$

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4]$$

خواهد بود و بر این اساس سطح لغزش پیشنهادی عبارت است از

$$s = Cz - \int_0^t (CA - CBK)z$$

با توجه به نحوه انتخاب سطح لغزش می‌توان نشان داد خاصیت این سطح لغزشی آن است که اگر سیستم در مد لغزشی و شرایط نامی خود قرار داشته باشد، پس از گذشت زمان محدودی، دینامیک سیستم مطابق دینامیک بهینه (۷) خواهد شد.

پس از انتخاب سطح لغزش، v را طراحی می‌کنیم

$$v = v_{eq} - \rho \text{sign}(s) \quad (8)$$

v_{eq} ترمی است که مسیر حالت را روی سطح لغزش نگه می‌دارد. با فرض آن که سیستم در شرایط نامی باشد

قضیه: سیستم غیر خطی (۲)، خطی‌پذیر ورودی-حالت است اگر ناحیه‌ای مثل Ω وجود داشته باشد به طوری که در آن، شرایط زیر برآورده شوند [۱۴]:

(الف) بردارهای $\{g, ad_f g, \dots, ad_{f^{n-1}} g\}$ مستقل خطی باشند.

(ب) مجموعه $\{g, ad_f g, \dots, ad_{f^{n-1}} g\}$ Involutive باشد.

در مورد سیستم تعلیق (۱)، تحت شرط $Z_r = 0$

$$\begin{aligned} f &= [x_r \quad \frac{1}{m_s} \{-k_s(x_1 - x_r)^r - B_s(x_r - x_r)^s\} \\ &\quad x_r \quad \frac{1}{m_u} \{+k_s(x_1 - x_r)^r + B_s(x_r - x_r)^s - K_t x_r\}]^T \\ g &= [0 \quad \frac{1}{m_s} \quad \frac{1}{m_u}]^T \end{aligned}$$

اولاً $\{g, ad_f g, ad_{f^2} g\}$ مستقل خطی هستند و ثانیاً $\{g, ad_f g\}$ Involutive هستند. بنابراین طبق [۱۴] می‌توان z_1 را به گونه‌ای یافت که

$$L_{[f^i, g]} z_1 = \nabla z_1 \cdot ad_{f^i} g = 0, \quad i = 0, 1, 2 \quad (4)$$

$$\& L_{[f^2, g]} z_1 = \nabla z_1 \cdot ad_{f^2} g \neq 0$$

و دیگر متغیرهای مورد نظر به شکل زیر به دست می‌آید

$$z = [z_1 \quad L_f z_1 \quad \dots \quad L_{f^{r-1}} z_1] \quad (5)$$

در مورد سیستم تعلیق، یک انتخاب برای برآورده‌سازی ۴ رابطه موجود در (۴) عبارت است از

$$z_1 = m_s x_r + m_u x_r$$

و سایر متغیرهای حالت جدید طبق (۵) به صورت زیر به دست می‌آیند

$$z_r = m_s x_r + m_u x_r$$

$$z_r = -K_t x_r$$

$$z_r = -K_t x_r$$

فرم فضای حالت جدید، قبل از انتخاب ورودی کنترل به صورت زیر خواهد بود

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = z_4$$

$$\dot{z}_4 = f + gu$$

که

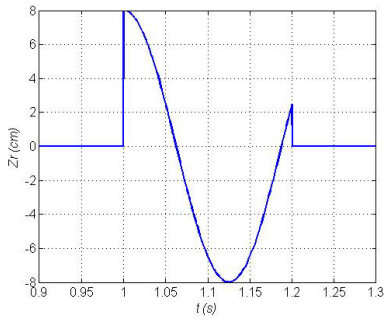
$$f = -\frac{K_t}{m_u} \{+k_s(x_1 - x_r)^r + B_s(x_r - x_r)^s - K_t x_r\}$$

$$g = \frac{K_t}{m_u}$$

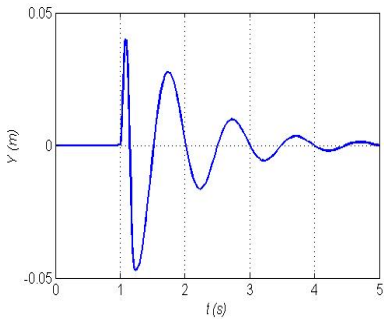
با انتخاب $u = (v - f)/g$ ، فرم مورد نظر فضای حالت به دست خواهد آمد. اما همان طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل نامعین بودن k_s و B_s ، تابع f به طور کامل مشخص نیست و لذا

$$u = \frac{v - f_n}{g}$$

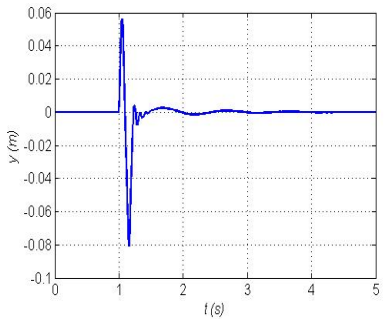
که f_n تابع f است که به ازای شرایط نامی پارامترهای k_s و B_s به دست آمده است. با جایگذاری قانون کنترل در فرم فضای حالت خواهیم داشت



شکل ۴: مدل زمانی دست‌انداز.



شکل ۵: جابه‌جایی جرم معلق در حالت تعلیق غیر فعال.



شکل ۶: جابه‌جایی جرم غیر معلق در حالت تعلیق غیر فعال.

۵- نتایج شبیه‌سازی

مقادیر پارامترهای معین سیستم تعلیق به صورت زیر نمایش داده می‌شوند

$$m_s = 400 \text{ (kg)}, m_u = 40 \text{ (kg)}, k_t = 20000 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right)$$

پارامترهای نامعین به صورت زیر نمایش داده می‌شوند

$$16000 < k_s < 20000, k_{sn} = 18000 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}}\right)$$

$$900 < B_s < 1100, B_{sn} = 1000 \left(\frac{\text{Ns}}{\text{m}}\right)$$

و فرض شده که عملگر مورد استفاده، حداکثر، توان تولید ۵ کیلو نیوتن نیرو را دارد. یعنی

$$|U_{\max}| = 5 \text{ (KN)}$$

مدل زمانی دست‌انداز به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شده است

$$Z_r(t) = \begin{cases} 0.8 \cos(\lambda \pi t) & , 1 < t < 1.2 \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}$$

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب جابه‌جایی جرم معلق و غیر معلق را پیش از کنترل و در حالت تعلیق غیر فعال در شرایط نامی نمایش می‌دهد.

$$\dot{s} = 0 \Rightarrow Cz - (CA - CBK)z = 0 \\ \Rightarrow C(Az + Bv) - (CAz - CBKz) = 0$$

اگر $c_r \neq 0$

$$v_{eq} = -Kz$$

و این همان نتیجه‌ای است که قبلاً در مورد آن بحث شد. با انتخاب شرط لغزش به صورت

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{c_r} s' \right) < -\eta |s|, s \neq 0$$

خواهیم داشت

$$s\dot{s} = s(Cz - CAz + CBKz) \\ = s(c_r z_r + c_r z_r + c_r z_r + c_r((f - f_n) + v) \\ - c_r z_r - c_r z_r - c_r z_r + c_r Kz)$$

با جایگذاری (۸) در رابطه اخیر و ساده‌سازی

$$s\dot{s} = s\{c_r((f - f_n) - \rho \text{sign}(s))\}$$

بنابراین

$$s\{c_r((f - f_n) - \rho \text{sign}(s))\} < -\eta |s| \\ \Rightarrow \rho c_r |s| > sc_r(f - f_n) + \eta |s|, s \neq 0$$

در ادامه، شرط کافی برقراری رابطه بالا را می‌یابیم

$$\rho c_r |s| > |sc_r(f - f_n) + \eta |s|$$

اگر $c_r > 0$

$$\rho c_r |s| > c_r |s| |f - f_n| + \eta |s|$$

اگر $|f - f_n| < F(x)$ ، کافی است

$$\rho = F(x) + \frac{\eta}{c_r}$$

بنابراین کنترل کننده طراحی شده به صورت (۹) خواهد بود

$$u = \frac{v - f_n}{g} \tag{9}$$

که

$$v = v_{eq} - \rho \text{sign}(s)$$

$$v_{eq} = -Kz$$

$$z = Tx$$

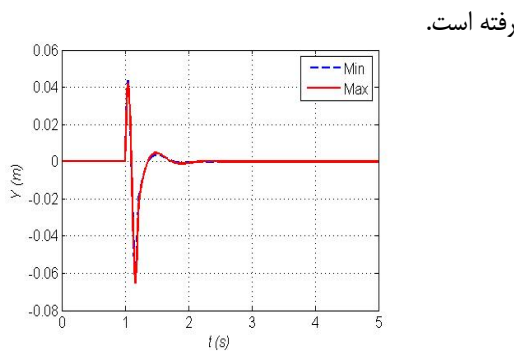
$$T = \begin{bmatrix} m_s & \cdot & m_u & \cdot \\ \cdot & m_s & \cdot & m_u \\ \cdot & \cdot & -k_t & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -k_t \end{bmatrix}$$

$$\rho = F(x) + \frac{\eta}{c_r}$$

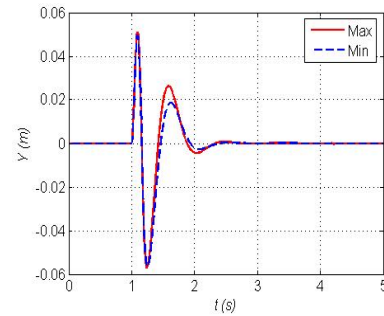
$$s = Cz - \int (CA - CBK)z$$

$$f_n = -\frac{K_t}{m_u} \{k_{sn}(x_1 - x_r)^r + B_{sn}(x_r - x_r)^o - K_t x_r\}$$

$$g = \frac{k_t}{m_u}$$



شکل ۸: جابه‌جایی جرم غیر معلق در حالت تعلیق فعال، در دو حالت حداقل و حداکثر پارامترهای نامعین.



شکل ۷: جابه‌جایی جرم معلق در حالت تعلیق فعال، در دو حالت حداقل و حداکثر پارامترهای نامعین.

یادآوری: روش پیشنهادی به دلیل وجود تابع علامت در سیگنال کنترل، همگرایی مجانبی متغیر لغزشی را تضمین می‌کند اما باید توجه داشت که یکی از نتایج استفاده از تابع علامت در کنترل، چترینگ خواهد بود که آثار نامطلوبی همچون تحریک مدهای فرکانس بالا و احتمالاً مدل نشده سیستم و همین طور استهلاک عملگرها را به دنبال خواهد داشت. می‌توان برای رفع مشکل اشاره شده در این روش، به جای تابع علامت، از یک تابع پیوسته شبیه آن مثل $\tanh(s)$ استفاده کرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش استخراج یک سطح لغزش بهینه تناسبی-انتگرالی، برای سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو در حضور ادوات تعلیق دارای ثابت‌های نامعین و مشخصه‌های غیر خطی ارائه شد. مشاهده و مقایسه پاسخ‌های مربوط به بدنه و چرخ خودرو، پیش و پس از فعال‌سازی سیستم تعلیق، نه تنها بهبود عملکرد سیستم را با کاهش دامنه نوسانات و افزایش سرعت دفع اثر اغتشاش نشان می‌دهد، بلکه قوام بالای سیستم حلقه‌بسته نیز در مقابل تغییر پارامترهای مربوط به اجزای سیستم تعلیق آشکار است.

مراجع

[۱] پ. پولادزاده، ک. لوکس، م. ر. جاهد مطلق و ع. ا. لطفی نیستانک، "کنترل هوشمند سیستم تعلیق فعال ۱/۴ خودرو با عملگر هیدرولیکی"، ماهنامه مهندسی خودرو و صنایع وابسته، جلد ۵، شماره ۵، صص. ۹-۵، ۱۳۸۸.

[2] J. Lin, R. J. Lian, C. N. Huang, and W. T. Sie, "Enhanced fuzzy sliding mode controller for active suspension systems," *Mechatronics*, vol. 19, no. 7, pp. 1178-1190, Oct. 2009.

[3] N. Yagiz, Y. Hacıoglu, and Y. Taskin, "Fuzzy sliding-mode control of active suspensions," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3883-3890, Oct. 2008.

[4] A. A. Wijaya, W. Wahyudi, R. Akmeliawati, and F. J. Darsivan, "Natural logarithm sliding mode control (ln-SMC) using EMRAN for active engine mounting system," in *Proc. 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics, and Vision Singapore*, pp. 1365-1369, Dec. 2011.

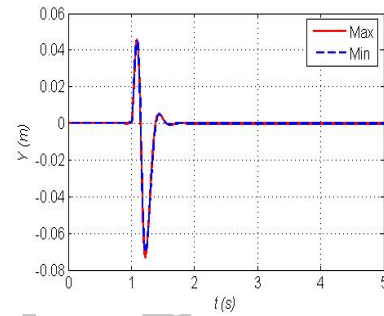
[5] Y. P. Chen and J. L. Chang, "A new method for constructing sliding surfaces of linear time-invariant systems," *Int. J. of Systems Science*, vol. 31, no. 4, pp. 417-420, Apr. 2000.

[6] F. Deepak, B. Bandyopadhyay, and L. Fridman, "Non-linear sliding surface: towards high performance robust control," *IET Control Theory Appl.*, vol. 6, no. 2, pp. 235-242, 2012.

[7] R. Chuanbo, W. Liang, Z. Cuicui, and L. Lin, "Variable structure model following control for dual-input active suspension," in *Proc. Second Int. Conf. on Information Engineering and Computer Science, ICIECS'10*, 6 pp., 2010.

[8] S. Hui and Q. Wei, "The sliding model-following control for semi-active MR-vehicle suspension," in *Proc. Int. Conf. on Networking, Sensing and Control, ICNSC'10*, pp. 351-354, 10-12 Apr. 2010.

[9] B. Assadsangabi, M. Eghtesad, F. Daneshmand, and N. Vahdati, "Hybrid sliding mode control of semi-active suspension systems,"



شکل ۹: بهبود جابه‌جایی جرم معلق در حالت تعلیق فعال.

طراحی کنترل‌کننده: پارامترهای طراحی به صورت زیر انتخاب شده‌اند

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{5.5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 10^{-6}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 10], \quad \eta = 10$$

با توجه به مقادیر نامی پارامترهای نامعین، می‌توان F را به صورت زیر انتخاب کرد

$$F = \left\{ \frac{K_t}{m_u} \left[2 \dots (x_l - x_r)^T + 10 \cdot (x_r - x_l)^T \right] \right\}$$

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب جابه‌جایی جرم معلق و غیر معلق را در دو حالت حداقل و حداکثر پارامترهای نامعین (a, b) نشان می‌دهد. در شکل ۸ دو پاسخ تقریباً بر هم منطبق هستند

$$a) k_s = 16 \dots \left(\frac{N}{m} \right), \quad B_s = 90 \dots \left(\frac{Ns}{m} \right)$$

$$b) k_s = 20 \dots \left(\frac{N}{m} \right), \quad B_s = 110 \dots \left(\frac{Ns}{m} \right)$$

با تغییر ماتریس‌های Q و R می‌توان پاسخ‌های سیستم را مطابق با مصالحه مورد نظر تغییر داد. به عنوان مثال برای بهبود پاسخ بدنه می‌توان عنصر اول ماتریس Q را افزایش داد

$$Q = \begin{bmatrix} 10^7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

شکل ۹ جابه‌جایی جرم معلق را در دو حالت حداقل و حداکثر پارامترهای نامعین در وضعیت جدید نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نسبت به حالت قبل، نوسان دوم موقعیت عمودی بدنه تقریباً از بین

سید علی ظهیری پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت می‌باشد. نام‌برده از سال ۱۳۹۱ تا کنون به عنوان کارشناس ارشد تحقیقات ناوبری صنایع هوافضا در تهران مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: فعال‌سازی سیستم‌های تعلیق خودرو و قطار، کنترل مقاوم ساختار متغیر، سیستم‌های ناوبری با صفحه پایدار و strap down، انواع روش‌های افزایش دقت ناوبری و کالیبراسیون سیستم‌های ناوبری.

علی اکبر جلالی در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۶۸ مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و دانشگاه ال‌ا‌ه‌ا‌ما در آمریکا دریافت نمود و در سال ۱۳۷۳ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق- کنترل از دانشگاه ویرجینیای غربی آمریکا گردید. دکتر جلالی پس از اتمام دوره دکتری و بازگشت به ایران در دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت ایران در تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت‌علمی این دانشکده با رتبه علمی استادی می‌باشد. ایشان هم‌اکنون استاد پاروقت دانشگاه ویرجینیای غربی نیز بوده و از متخصصین خیره فناوری اطلاعات و ارتباطات کشور محسوب می‌شوند. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند کنترل کلاسیک، کنترل فرایندهای اتفاقی، کنترل مقاوم، کنترل بهینه و فناوری اطلاعات و کاربردهای آن می‌باشد.

Journal of Smart Materials and Structures, vol. 18, no. 12, pp. 1-10, Dec. 2009.

- [10] B. L. Zhang, G. Y. Tang, and F. L. Cao, "Optimal sliding mode control for active suspension systems," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Networking, Sensing, and Control*, pp. 351-356, Okayama, Japan, Sep. 2009.
- [11] E. Chavez-Conde, F. Beltran-Carbajal, A. Blanco-Ortega, and H. Mendez-Azua, "Sliding mode and generalized PI control of vehicle active suspensions," in *Proc. 18th IEEE Int. Conf. on Control Applications Part of IEEE Multi-Conf. on Systems and Control*, pp. 1726-1731, Jul. 2009.
- [12] Y. M. Sam, J. H. S. Osman, and M. R. A. Ghani, "A class of proportional-integral sliding mode control with application to active suspension system," *Systems & Control Letters*, vol. 51, no. 3-4, pp. 217-223, Mar. 2004.
- [13] X. Jia, W. Weia, and H. Sub, "Comments on a class of proportional-integral sliding mode control with application to active suspension system," *Systems & Control Letters*, vol. 56, no. 3, pp. 253-254, 2007.
- [14] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.

Archive of SID