

کنترل مد لغزشی رول - فین کشتی در مقابل نوسانات ناشی از امواج و عدم قطعیت

حمید ملکی زاده^۱، محمدرضا جاهد مطلق^۲، بیژن معاونی^۳، علی معرفیان پور^۴

jahedmr@iust.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

در این مقاله، طراحی کنترلر مد لغزشی برای کاهش نوسانات ناشی از اغتشاشات محیط و عدم قطعیت در دینامیک رول- فین کشتی ارائه می شود. برای طراحی کنترلر مد لغزشی، ابتدا مدل غیرخطی سیستم مورد بررسی قرار گرفته و سپس عدم قطعیت وارد دینامیک رول- فین کشتی شده است. و با استفاده از روش های طراحی کنترلر مد لغزشی، کنترلر مورد نظر برای غلبه بر عدم قطعیت ها و اغتشاشات طراحی شده و با استفاده از روش پایداری لیاپانوف، پایداری سیستم حلقه بسته اثبات می شود. برای بررسی عملکرد سیستم حلقه بسته، شبیه سازی انجام شده و نتایج بدست آمده از پاسخ کنترلر مد لغزشی با روش کنترلر PID مقایسه می شود. نتایج نشان می دهند که روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش PID دارد. و تغییرات رول کشتی با استفاده از کنترلر مد لغزشی کمتر می شود.

واژگان کلیدی: دینامیک رول - فین کشتی، کنترلر مد لغزشی، روش پایداری لیاپانوف.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۹/۰۸

۱- مقدمه

به دلیل تاثیر امواج و عدم قطعیت در دینامیک کشتی که در اثر مدل سازی نامناسب و در برخی موارد در اثر گذشت زمان و تغییر در پارامترهای سیستم کشتی و همچنین تغییر شدید شرایط دریا، بخصوص در زمان هایی که دریا دارای موج های بزرگ باشد، هدایت کشتی بسیار مشکل بوده که در نهایت به دلیل نوسانات شدید در رول کشتی، بسیاری از دستگاه ها و همچنین خدمه آسیب جدی می بینند. برای کاهش این مشکلات، در طول سالیان گذشته، پایداری رول کشتی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. مرجع [۱] از روش مستقیم لیاپانوف برای طراحی کنترل کننده جهت پایداری رول کشتی استفاده کرده است. در مرجع [۲] از ترکیب روش کنترل پیش بین و یک مدل پیشگویی شده از اغتشاش ورودی جهت غلبه بر این مشکل استفاده کرده است. مدل خطی دینامیک رول در مرجع [۳] ارائه شده است و سپس روش کنترل مدل داخلی برای شکل دادن تابع حساسیت خروجی به منظور رسیدن به ضریب تضعیف نویز مناسب بررسی شده است. کنترلر PID بر پایه مدل خطی برای پایداری دینامیک رول توسط مرجع [۴] بررسی شده است. برای طراحی کنترلر PID پس از خطی سازی سیستم، مدل سنسورها و محرک ها به مدل سیستم اضافه شده و پس از آن کنترلر PID طراحی شده است. بررسی کامل عملکرد کنترلر PID روی سیستم رول کشتی در مرجع [۵] بررسی شده و نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار داده شده است. برای بهبود عملکرد کنترلر PID روش های متعددی ارائه شده است. یکی از این روش ها، استفاده از روش گام به عقب^۱ می باشد که با PID ترکیب شده و از آن برای کنترل سیستم مورد نظر استفاده شده است [۶].

کنترل مد لغزشی یک الگوریتم کنترلی و یک رهیافت قدرتمند در جهت کنترل سیستم های غیرخطی و غیرقطعی می باشد. گر چه استفاده از این الگوریتم کنترلی جدید نیست اما هدف، اعمال آن به سیستم رول کشتی جهت پیشبرد اهداف بعدی و گسترش استفاده از این الگوریتم در پژوهش های آتی می باشد.

کنترل لغزشی یک روش کنترل مقاوم است و می تواند با داشتن عدم قطعیت ها و اغتشاشات پارامترها بکار رود، به

شرط اینکه محدوده این عدم قطعیت ها و اغتشاش ها معلوم باشد. در کنترل لغزشی هدف، قرار دادن حالت های سیستم غیر خطی در یک مسیر مشخص و اعمال قانون کنترلی جهت حفظ حالت های سیستم در این مسیر بوده تا اینکه حالت های سیستم به مقدار دلخواه از پیش تعیین شده برسند و سیستم در این وضعیت بماند. پیاده سازی این روش کنترلی با استفاده از فرکانس های سوئیچینگ بینهایت در تئوری و فرکانس های سوئیچینگ محدود در عمل، در سیستم کنترل، امکان پذیر می باشد.

در این مقاله، روش کنترل مد لغزشی برای پایداری سیستم حلقه بسته رول - فین مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مدل سیستم معرفی می شود. سپس عدم قطعیت ها وارد مدل سیستم می شوند. برای بررسی عملکرد کشتی در حالت واقعی، معادله موج برای شبیه سازی مدل امواج و بررسی تاثیرات آن بر روی سیستم حلقه بسته، به مدل کلی سیستم اضافه می شود. سپس روش کنترل مد لغزشی با توجه به عدم قطعیت ها و اغتشاشات طراحی می گردد. یکی از مشکلات بنیادی روش مد لغزشی نوسانات شدید خروجی کنترلر می باشد که در عمل مناسب نمی باشد. دو روش برای رفع این مشکل در مقالات متعدد ارائه شده است. روش اول تغییر تابع علامت و استفاده از تابع اشباع با شیب دلخواه و روش دیگر استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک می باشد. برای جلوگیری از ایستایی در فین به دلیل تغییرات زاویه ای بزرگ، در خروجی کنترلر از سیستم اشباع استفاده می شود. در این مقاله برای اثبات پایداری سیستم حلقه بسته از روش لیاپانوف استفاده می شود. روش لیاپانوف یکی از روش های اساسی در علم کنترل می باشد که در بسیاری از موارد برای اثبات پایداری سیستم های حلقه بسته، بخصوص در مواردی که سیستم دارای دینامیک غیرخطی بوده و یا عدم قطعیت در سیستم وجود دارد دارای اهمیت زیادی می باشد [۷ و ۸]. برای مطالعه عملکرد کنترلر طراحی شده و ارزیابی پاسخ سیستم، نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج بدست آمده از روش کنترلر PID در مرجع [۵] مقایسه می شود. ادامه مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ جهت آگاهی مخاطب ابتدا اصول اساسی کنترل مد لغزشی آورده شده است. در بخش ۳ دینامیک سیستم بیان شده و مدل مناسب برای استفاده در طراحی کنترلر استخراج می گردد. در بخش ۴ کنترلر مد لغزشی بیان شده

¹ Back Stepping

دیفرانسیل خطی را نشان می‌دهد که پاسخ یکتای آن $e(t) = 0$ برای شرایط اولیه $e(0) = 0$ می‌باشد. بنابراین مسئله کنترل ردیابی ما، معادل با قرار دادن تابع اسکالر $S(X, t)$ در صفر خواهد بود. برای رسیدن به این هدف، ما می‌توانیم کنترل u را چنان انتخاب کنیم که رابطه زیر برقرار گردد.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq -\eta |S| \quad (6)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱) و (۴) مثلاً برای $n = 2$ داریم:

$$u = -\hat{f}(x) + \ddot{x}_d - \lambda e - k(x, \dot{x}) \operatorname{sgn}(s) \quad (7)$$

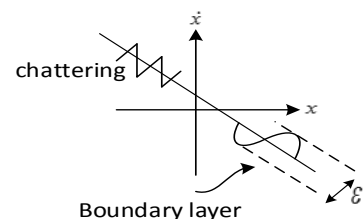
اگر بخواهیم شرط $\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq -\eta |S|$ همواره برقرار باشد، k را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$k(x, \dot{x}) = \eta + F(x) \quad (8)$$

اگر کنترل $u = -\hat{f}(x) + \ddot{x}_d - \lambda e - k(x, \dot{x}) \operatorname{sgn}(s)$ همراه با شرط $k(x, \dot{x}) = \eta + F(x)$ به سیستم غیر خطی اعمال کنیم مطابق شکل (۱) به علت وجود تابع sgn باعث ایجاد کنترلی سخت همراه با حالت زیگزآگ^۱ خواهد شد. لذا برای غلبه بر این مشکل بجای آن از تابع $\tanh(s/\varepsilon)$ استفاده می‌کنیم. در اینجا ε ضخامت لایه مرزی حول سطح لغزش می‌باشد. البته استفاده از تابع اخیر باعث افزایش خطا خواهد شد، ولی در عوض قانون کنترل یک کنترل نرم است.

۳- دینامیک کشتی

شکل (۲) مدل حلقه باز سیستم کشتی را نشان می‌دهد که در آن زاویه رول کشتی، F_u ورودی کنترلی و f_w ورودی اغتشاش موج می‌باشد. در این مدل به دلیل عدم استفاده از کنترلر، پاسخ سیستم مطلوب نخواهد بود. برای بیان معادلات کشتی از مرجع [۷] استفاده شده است. دینامیک رول کشتی به صورت زیر می‌باشد.



شکل (۱) نوسان و لایه مرزی.

و پایداری سیستم حلقه بسته اثبات می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه سازی ارائه شده و در نهایت در بخش ۶ نتیجه گیری بیان می‌گردد.

۲- اصول اساسی کنترل لغزشی [۹]

سیستم غیر خطی تک ورودی-تک خروجی زیر را در نظر بگیرید.

$$\dot{x}^{(n)} = f(X) + u \quad (1)$$

که u ورودی کنترل و $X = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ بردار حالت می‌باشد. در رابطه (۱) تابع $f(X)$ محدود به یک تابع معلوم است. یعنی اینکه:

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X) \quad (2)$$

$$|\Delta f(X)| \leq F(X) \quad (3)$$

$\Delta f(X)$ نامعلوم بوده ولی $\hat{f}(X)$ و $F(X)$ معلوم می‌باشند. هدف کنترل عبارت است از تعیین یک کنترل فیدبک $u = u(X)$ می‌باشد، به نحوی که حالت X در سیستم حلقه بسته قادر به ردگیری حالت مطلوب $X_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]^T$ باشد. یعنی خطای ردیابی $e = X - X_d = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$ به صفر همگرا گردد. ایده اساسی کنترل لغزشی این است که یک تابع اسکالر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + I\right)^{n-1} e \\ = e^{(n-1)} + c_{n-1}^1 I e^{(n-2)} + c_{n-2}^2 I^2 e^{(n-3)} + \dots + I^{n-1} e \quad (4)$$

که λ یک ثابت مثبت می‌باشد. آنگاه $s(X, t) = 0$ یک سطح وابسته به زمان $S(t)$ را در فضای R^n تعریف می‌کند. به عنوان مثال اگر $n = 2$ باشد، آنگاه سطح $S(t)$ عبارت است از:

$$s(X, t) = \dot{e} + I e = \dot{x} + I x - \dot{x}_d - I x_d \quad (5)$$

که یک خط مستقیم در صفحه فاز $x \leftrightarrow \dot{x}$ می‌باشد. از آنجا که \dot{x}_d ، x_d معمولاً توابع متغیر با زمان می‌باشند، لذا $S(t)$ نیز متغیر با زمان خواهد بود. اگر حالت اولیه $X(0)$ با حالت اولیه مطلوب $X_d(0)$ مساوی باشد، یعنی اگر $e(0) = 0$ باشد، آنگاه از رابطه (۴) مشاهده می‌گردد که در صورتیکه بردار حالت X برای تمامی $t \geq 0$ روی سطح $S(t)$ باقی بماند، آنگاه ما برای تمامی $t \geq 0$ ، $e(t) = 0$ را خواهیم داشت. در حقیقت $S(x, t) = 0$ یک معادله

¹ Chattering

$a = I_{xx} - \delta I_{xx}$, $b = -B_4$, $c = -B_1 U^2$
 $f_h = B_5 \dot{\phi}^3 - \rho g \nabla G_z(\phi) + B_2 |U| \dot{\phi} + B_3 \dot{\phi} |\dot{\phi}|$
 نیروی هیدرودینامیکی کشتی است. با اضافه کردن معادلات موج به معادلات سیستم، معادله (۱۲) به فرم زیر تبدیل می‌شود.

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = f_h + f_w + F_u \quad (13)$$

که F_u , f_w , f_h به ترتیب نیروهای هیدرودینامیکی، اغتشاش امواج و کنترلی هستند و F_u , f_w بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$f_w = \omega_e^2 \alpha_m I_{xx} \cos(\omega_e t) , F_u = \frac{1}{2} C_L \rho A U^2 L$$

$$\alpha_e = -\alpha - \arctan\left(\frac{LP}{2U}\right) \quad (14)$$

که در آن ω_e فرکانس برخورد موج به کشتی، a_m بیشترین شیب موج، L مشخصه فین که بدلیل اینکه از دو فین در دو طرف کشتی استفاده می‌شود این مقدار در دو ضرب شده است، A مساحت فین، a_e , a زوایای فین موثر و مکانیکی می‌باشند. معادله نهایی به فرم زیر است.

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = F_w + F_u , F_w = f_h + f_w \quad (15)$$

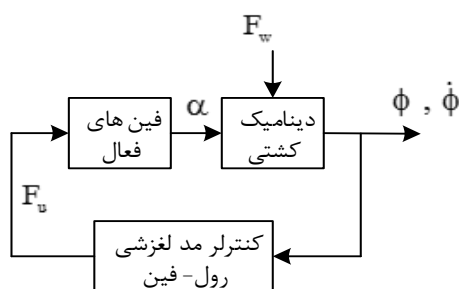
معادله (۱۵) هم ارز با معادله (۱) است.

۴- کنترلر مد لغزشی

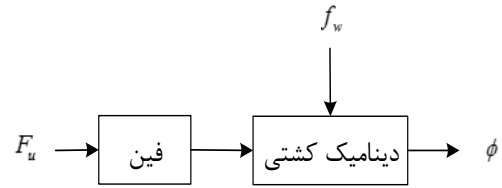
مدل سیستم حلقه بسته در شکل (۳) مشاهده می‌شود. در این شکل از کنترلر مد لغزشی در مسیر فیدبک استفاده شده است. برای طراحی کنترلر مد لغزشی، معادله (۱۵) را به صورت زیر می‌نویسیم.

$$(a + da)\ddot{\phi} + (b + db)\dot{\phi} + (c + dc)\phi = F_w + F_u \quad (16)$$

در معادله (۱۶) علاوه بر پارامترهای سیستم، عدم قطعیت نیز بصورت δa , δb , δc مدل شده است.



شکل (۳) سیستم حلقه بسته با کنترلر مد لغزشی.



شکل (۲) مدل حلقه باز سیستم رول - فین

$$\eta_1 \dot{v} + I_{xx} \dot{p} = \eta_2 \dot{v} + \delta I_{xx} \dot{p} + \eta_3 |u| |v| + \eta_4 ur + \eta_5 v |v| + \eta_6 v |r| + \eta_7 r |v| + \eta_8 \phi |uv| + \eta_9 \phi |ur| + B_1 \phi u^2 + B_2 p |u| + B_3 p |p| + B_4 p + B_5 \dot{\phi}^3 - \rho g \nabla G_z(\phi) \quad (9)$$

که در آن p و r سرعت زاویه‌ای حول محورهای x , z کشتی در قاب مختصات بدنه مطابق سیستم مختصات اوپلری می‌باشند.

سرعت در راستای محور x , v سرعت در راستای محور y است. I_{xx} و δI_{xx} ممان اینرسی کل سیستم و تاثیر جرم اضافه شده به سیستم بوده و ρ چگالی جرم آب، g جاذبه زمین، ∇ جابجایی کشتی و $G_z(\phi)$ تابع بیویانسی^۱ کشتی می‌باشد. η_1, \dots, η_9 , B_1, \dots, B_5 ضرایب ثابت موجود در سیستم می‌باشند.

در این مقاله فرض می‌شود که کشتی در یک مسیر مستقیم و با سرعت تقریباً ثابت در حال حرکت می‌باشد. در نتیجه شرایط زیر در سیستم برقرار است:

$$v = 0 , \dot{v} = 0 , u = U , r = 0 \quad (10)$$

با استفاده از معادله (۱۰) و با توجه به این حقیقت که در کشتی رابطه $p = \dot{\phi}$ برقرار است، که $\dot{\phi}$ زاویه رول و $\dot{\phi}$ سرعت رول کشتی می‌باشند. معادله (۹) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$I_{xx} \ddot{\phi} = \delta I_{xx} \ddot{\phi} + B_1 \phi U^2 + B_2 |U| \dot{\phi} + B_3 \dot{\phi} |\dot{\phi}| + B_4 \dot{\phi} + B_5 \dot{\phi}^3 - \rho g \nabla G_z(\phi) \quad (11)$$

که در آن ϕ زاویه رول و U سرعت کشتی می‌باشد. معادله (۱۱) را بصورت یک معادله درجه ۲ به فرم زیر می‌توان نوشت.

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = f_h \quad (12)$$

که در آن

^۱ نیروی عکس العمل آب به کشتی که معادل وزن آب جابجا شده است.

$$H = H_1 |f| + H_2 |\dot{f}| + H_3 \quad (26)$$

$$1 < I < a$$

که پارامترهای H_1 , H_2 , H_3 بگونه‌ای انتخاب می‌شوند که در معادلات زیر صدق کنند.

$$H_1 > (a + da)^{-1} (g_2(a + da) - (c + dc))$$

$$H_2 > (a + da)^{-1} (g_1(a + da) - (b + db))$$

$$H_3 > (a + da)^{-1} F_w$$

$$\Rightarrow H > \Delta_l \quad (27)$$

حال نشان خواهیم داد که سیستم حلقه بسته با کنترلر پیشنهادی پایدار می‌باشد. برای این منظور تابع لیاپانوف زیر را در نظر می‌گیریم.

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (28)$$

با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف داریم:

$$\dot{V} = S\dot{S} = S\Delta_f + SF_u \leq |S| |\Delta_l + \Delta_r| |S| \|F_u\| + SF_u \quad (29)$$

می‌دانیم که روابط زیر برقرار می‌باشند.

$$SF_u = -ISH \operatorname{sgn}(S) = -|S| |IH|$$

$$\Delta_r |F_u| = I\Delta_r H \quad (30)$$

با استفاده از (30) و جایگذاری آن در (29) داریم:

$$\dot{V} \leq -|S| |IH| + |S| |\Delta_l| + |S| |\Delta_r| |IH|$$

$$\dot{V} \leq -|S| |IH| (1 - \Delta_r) + |S| |\Delta_l| \quad (31)$$

با در نظر گرفتن رابطه (23) که داشتیم $|\Delta_r| = |(a + da)^{-1} da|$ لذا $\Delta_r > 0$ و با توجه به معادله (27) $H > \Delta_l$ می‌توان نوشت

$$\dot{V} \leq -|S| (|IH| (1 - \Delta_r) - \Delta_l) \leq 0 \quad (32)$$

رابطه (32) نشان می‌دهد که با وجود اغتشاشات ناشی از امواج و عدم قطعیت سیستم حلقه بسته پایدار می‌باشد. در شبیه سازی برای جلوگیری از نوسانات شدید از تابع $\tanh(S/e)$ بجای تابع sign استفاده می‌کنیم که در آن e یک مقدار مثبت معین می‌باشد.

۵- شبیه سازی

در این بخش، سیستم رول فین کشتی به همراه کنترلر PID و مد لغزشی شبیه سازی شده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۴ کنترلر مد لغزشی بر اساس آگاهی ما از بیشترین دامنه عدم قطعیت در سیستم و اغتشاشات طراحی شده است. در نتیجه می‌توان مقادیر

از نظر فیزیکی این عدم قطعیت‌ها به دلیل تغییرات موج در دریا و تغییر در پارامترهای هیدرو دینامیکی کشتی می‌باشند. این عمل سبب می‌شود تا کنترلر بگونه‌ای طراحی شود که سیستم حلقه بسته در مقابل تغییرات ناخواسته پایدار باشد. در ادامه کنترلر مد لغزشی طراحی می‌شود. سطح لغزش را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$S = \dot{f} + g_1 f + g_2 \int_0^t f dt \quad (17)$$

از معادله (16) می‌توان نوشت:

$$\ddot{f} = (a + da)^{-1} (F_w + F_u - (b + db)\dot{f} - (c + dc)f) \quad (18)$$

با جایگذاری معادله (18) در معادله (17) داریم:

$$\dot{S} = (a + da)^{-1} (F_w + (g_1(a + da) - (b + db))\dot{f} + (g_2(a + da) - (c + dc))f + (a + da)^{-1} F_u) \quad (19)$$

حال اگر تقریب $a \cong I$ را در نظر بگیریم:

$$(a + da)^{-1} = I - (a + da)^{-1} da \quad (20)$$

و با جایگذاری در معادله (19) به رابطه زیر می‌رسیم»

$$\dot{S} = (a + da)^{-1} (F_w + (g_1(a + da) - (b + db))\dot{f} + (g_2(a + da) - (c + dc))f - (a + da)^{-1} da F_u + F_u) \quad (21)$$

با در نظر گرفتن رابطه (21) بصورت $\dot{S} = \Delta_f + F_u$ داریم:

$$\Delta_f = (a + da)^{-1} (F_w + (g_1(a + da) - (b + db))\dot{f} + (g_2(a + da) - (c + dc))f - (a + da)^{-1} da F_u) \quad (22)$$

Δ_f را می‌توان بصورت $\Delta_f = \Delta_l - (a + da)^{-1} da F_u$ بازنویسی کرد و همچنین با در نظر گرفتن رابطه $|\Delta_r| = |(a + da)^{-1} da|$ داریم:

$$\Delta_l = |(a + da)^{-1}| \| (F_w + (g_1(a + da) - (b + db))\dot{f} + (g_2(a + da) - (c + dc))f) \|$$

$$\Delta_f \leq \Delta_l + \Delta_r |F_u| \quad (23)$$

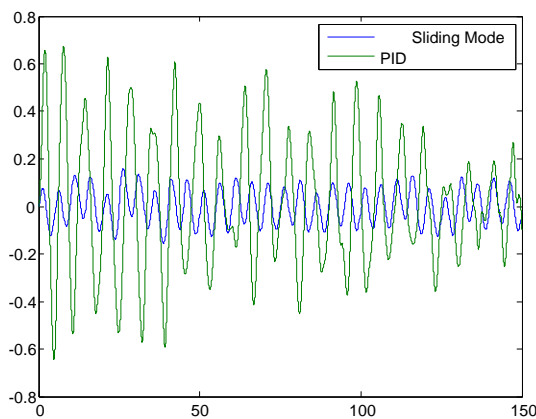
با توجه به اینکه $\dot{S} = \Delta_f + F_u$ و $\Delta_f \leq \Delta_l + \Delta_r |F_u|$ به رابطه (24) می‌رسیم

$$\dot{S} \leq \Delta_l + \Delta_r |F_u| + F_u \quad (24)$$

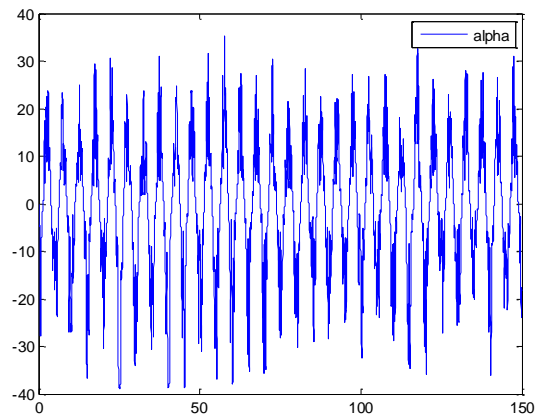
کنترلر مدل لغزشی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$F_u = -IH \operatorname{sgn}(S) \quad (25)$$

که در آن H و λ پارامترهای طراحی می‌باشند که بصورت زیر تعریف می‌شوند.



شکل (۶) پاسخ سیستم با کنترلر PID و کنترلر مد لغزشی.



شکل (۷) تغییرات زاویه فین کشتی.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، کنترلر مد لغزشی برای غلبه بر اغتشاشات ناشی از امواج و عدم قطعیت‌ها در مدل سیستم ارائه شد. معادلات دینامیکی سیستم رول کشتی بررسی شده و مدل سیستم به همراه عدم قطعیت بدست آمد. پایداری سیستم با استفاده از روش لیاپانوف اثبات شد. بهره‌های کنترلر مد لغزشی بر اساس اطلاع ما از دامنه اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها طراحی شده است. در عمل همواره آگاهی از این دامنه تغییرات امکان پذیر نیست. تحقیقات بعدی را می‌توان بر روی روش‌هایی برای کنترل سیستم بدون آگاهی از دامنه نوسانات متمرکز کرد.

۷- مراجع

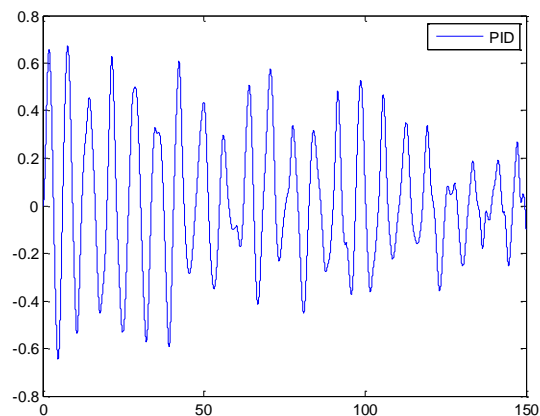
[1] Safak, C. Karakas, "Control Design of Fin Roll Stabilization in Beam Seas Based on Lyapunov's

مناسب را برای ضرایب کنترلر طراحی کرد. داده‌ها برای شبیه سازی مربوط به یک کشتی چند منظوره نیروی دریایی می‌باشد، که از مرجع [۵] گرفته شده است. پارامترهای کنترلر به صورت زیر است.

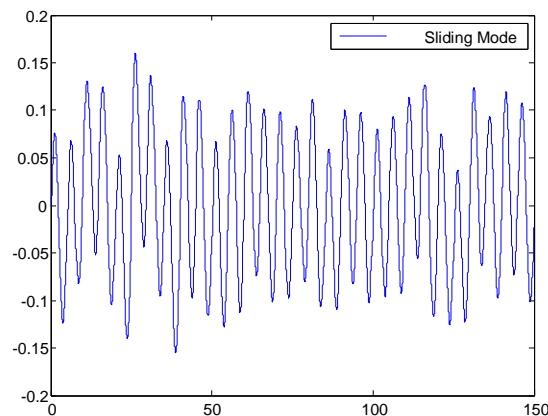
$$g_1 = g_2 = 0.1, \quad l = 18 \times 10^4, \quad H_1 = 10 \\ H_2 = 50, \quad H_3 = 5, \quad e = 0.5, \quad U = 60 \text{ km/h}$$

محدودیت دامنه تغییرات فین $|a| < 35 \text{ deg}$ است و پاسخ سیستم و تغییرات زاویه فین در شکل‌های (۴) تا (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ کنترلر مد لغزشی تغییرات کوچکتری نسبت به پاسخ کنترلر PID دارد.

همچنین به دلیل تغییر تابع علامت، تغییرات شدید با دامنه بزرگ در زاویه فین وجود ندارد. از این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که کنترلر پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به کنترلرهای PID دارد.



شکل (۴) پاسخ سیستم با کنترلر PID.



شکل (۵) پاسخ سیستم با کنترلر مد لغزشی.

- Direct Method”, Polish Maritime Research, Vol 19, pp. 25-30, 2012.
- [2] Liu, J. Allen, R., Yi H. and Zhang, Y., “Ship Stabilization Control using an Adaptive Input Disturbance Predictor”, 8th IEEE International Conference on Control and Automation Xiamen, China, pp. 1-4, 2010.
- [3] Tzeng, C., Wu, Y., “On the Design and Analysis of Ship Stabilizing Fin Controller”, Journal of Marine, Science and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 117-124, 2000.
- [4] Demirel, H., “Modified PID Control Design for Roll Fin Actuator of Nonlinear Modeling of the Fishing Boat”, Polish Maritime Research Vol. 21, No. 1, 2013.
- [5] Surendran, S. and Lee, S. K., “Studies on an Algorithm to Control the roll Motion using Active Fins”, Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 542-551, 2007.
- [6] Guan, W. and Zhang, X. K., “Concise Robust Fin Roll Stabilizer Design Based on Integrator Back Stepping and CGSA”, IEEE 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, Harbin, China, pp. 1392-1397, 2010.
- [7] Du, J., “Adaptive Autopilot Design of Time Varying Uncertain Ships with Completely Unknown Control Coefficient”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 32, No. 2, 2007.
- [8] Alarçin F., “Conventional PID and Modified PID Controller Design for Roll Fin Electro-Hydraulic Actuator”, Acta Polytechnica Hungarica Vol. 11, No. 3, pp. 116-223, 2014.
- [9] Rainer P., “Sliding Mode Fuzzy Control”, proc.1st IEEE Inter. conf. on Fuzzy systems, pp.519-526, 1992.