



Petroleum Research

Research Article

Petroleum Research, 2022(August-September), Vol. 32, No. 124, 1-3

DOI:10.22078/PR.2022.4575.3073

Intelligentization of Rotary Steerable System (RSS) to Improve Tracking of Directional Drilling Planned Trajectory Using Robust Controller

Habiballah Zafarian, Mohammad Javad Ameri* and Ali Salmani Sayah

Department of Petroleum Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

ameri@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4575.3073

Received: September/08/2021

Accepted: January/15/2022

Introduction

Since vertical drilling to access oil and gas reservoirs is associated with various limitations, directional drilling has been employed and developed as a useful method in oil and gas industry. One of the challenges encountered during directional drilling, especially when the drilling length is increased, is to guide the drill bit in a direction that can track the planned path with the least error. Currently, the conventional method used for directional drilling involves application of downhole motors that are guided by the human agent (directional driller). The increase in error becomes especially important when the layer under drilling is thin. If the drilling accuracy is low, it can lead to the entrance of well into the adjacent (gas and water) layers and subsequent problems. In most of the cases, there is a need for smart automated system to achieve this goal. Also, intelligentization of different processes in the oil and gas industry, generally known as “smart well, reservoir and field”, has been extensively developed in recent years. Based on the definition of intelligentization, directional drilling can be seriously taken into account in “smart well”, because there are both “monitoring” and “controlling” procedure in this process. Smart directional drilling can be used especially for complex three-dimensional paths and where a high accuracy is needed. Based on these considerations, rotary steerable system (RSS) technology has been developed by major oil

companies. Given that intelligentization of directional drilling systems (especially in the case of RSS technology) are at the beginning of their development pathway, improving of borehole evolution modeling and utilization of more precise control methods to track the planned path is important.

Intelligentization of directional drilling system has been performed based on tool-independent and tool-dependent models. A tool-independent model is entirely based on kinematic (geometric) relationships and models the system regardless of the type, shape, and applied forces on the actuator; i.e. drilling tool. Among these researches, the most complete borehole evolution model has been developed by Perneder and Detournay [1]. This model, which has been used as the base model in the present study, models the directional drilling system as a time-delay nonlinear system. Although several studies have been conducted to control the directional drilling system (especially since 2000), most of them have utilized simplified tool-independent models. Other researches in this area based on analytical models of borehole evolution have been mainly initiated by Downton's studies. Major studies on directional drilling control have been performed based on the Perneder-Detournay's model. For instance, in this model has been used to formulate the directional drilling system in the state-space formulation, as a robust tracking problem [2]. The aim of this study is to present a new formulation of

directional drilling system (nonlinear delayed system described by Perneder-Detournay) that is compatible with LMI-based controller. Through this study, in all steps, the stability of the system is mathematically proved. For this purpose, first the nonlinear delayed system is considered as a linear system. In second step, using mathematical transformations based on the physics of problem, the system nonlinear terms is formulated as an uncertainty, then the linear system with uncertainty is achieved. By using state feedback controller, the Lyapunov function for delayed system is converted to LMI and then solving the LMI using the Mosek solver results in the gains of controller. Third, by proving stability for the step reference input, the tracking problem is also solved. Simulation results of all these steps are presented. The performance (specially settling time and overshoot) of the controlled system is improved using this controller.

New Formulation of Directional Drilling Model

This section presents the modeling of directional drilling system based on the Perneder-Detournay's model, which is the most complete modeling available for the borehole evolution system. Perneder has derived this model using a three-component model, consisting of BHA modeling, rock/bit interaction law, and a geometrical (kinematics) relationship [1]. Combining the three components leads to the single differential equation for the variations of the drill bit inclination angle:

$$X \cdot \Pi \cdot \theta' = M_b \cdot ((\theta)_i - \theta) + \frac{X}{\eta} \cdot F_b \cdot (\theta - \theta_i) + \sum_{i=1}^2 \frac{F_b M_i - F_i M_b - M_i \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot ((\theta)_i - (\theta)_{(i+1)}) \quad (1)$$

$$- \frac{X}{\eta} \sum_{i=1}^2 F_i \cdot \left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{x_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{x_{i+1}} \right) - \frac{X}{\eta} \cdot F_w \cdot \gamma \cdot (\theta - \theta_i) \cos(\theta)_i \quad (2)$$

$$+ \frac{F_b M_r - F_r M_b - M_r \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot \gamma \sin(\theta)_i \pm \frac{X}{\eta} \cdot F_r \cdot \Gamma' + \frac{F_b M_r - F_r M_b - M_r \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot \Gamma \quad (3)$$

Considering Θ (borehole inclination angle) as one of the system states, the mean inclination in the first and second parts of BHA ($\langle \Theta \rangle_1, \langle \Theta \rangle_2$) can be regarded as two other states, which can be obtained based on the system geometry [5]. Based on the equations presented for the three states of borehole evolution system, the system state-space form can be formulated as below [2].

$$x'(\xi) = A_0 x(\xi) + A_1 x(\xi_1) + A_2 x(\xi_2) + B_0 \Gamma + B_1 \Gamma' + B W \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A_0 &= [a \ b \ c; d \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0] \\ A_1 &= [e \ 0 \ 0; f \ 0 \ 0; g \ 0 \ 0] \\ A_2 &= [h \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; i \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (2)$$

In this system, the control input is the amount of lateral force exerted by the RSS (Γ) and the control parameter is related to all three states of the system, especially the inclination of the borehole. Also, the simulation of the system response indicate that the open loop system is unstable.

The system presented in Equation 2 has three states such that the second and third states are functions of the first one. Therefore, in order to select optimum states and reduce the system order, we differentiate the first state of Equation 2. After some algebraic calculation, by selecting the following states for the system, we will have the new formulation of directional drilling system:

$$y_1 = x_1, y_2 = x_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ bd & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ bf + cg & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-1) \\ y_2(t-1) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ ci & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-2.6) \\ y_2(t-2.6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_w w \end{bmatrix} + Bu; B = [0; 1] \end{aligned} \quad (4)$$

Controller Design

Similar to non-delayed systems, the stability of delayed systems can be analyzed based on two general logics, including frequency domain and time domain methods. An effective method for analyzing the stability or performance of delayed systems is the Lyapunov direct method [3].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{j=1}^m A_j x(t - h_j(t)) + Bu \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5)$$

For a simple delayed system based on Equation 5, selection of Lyapunov function represented by Equation 6 will lead to LMI condition according to the following expressions [3]:

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) + \sum_{j=1}^m \int_{t-h_j}^t x^T(s)Q_j x(s)ds \quad (6)$$

For controlling system based on introduced Lyapunov function, three steps are presented:

1. Designing controller for linear directional drilling system without uncertainty: the directional drilling system has two nonlinear terms due to the weight of BHA. The order of these two terms related to the system terms is 10^{-5} . This difference can be also predicted from system modeling, as the effect of weight is very weak, compared to other applied forces. One approach to solve this problem is to eliminate these nonlinear terms. In fact, a model reduction takes place here and a simplified system is controlled. The controller of linear delayed systems is mainly in the form of the feedback of system states.

$$u(t) = k_0 x(t) + k_1 x(t - h_1) + k_2 x(t - h_2) \quad (7)$$

2. Designing a robust controller for the directional

drilling system: there are several approaches to solve the problem when nonlinear terms are present in the system. One approach is to use the robust control approach and consider all nonlinear terms as disturbances in the system. Another approach is to use the theory of nonlinear systems and employ controllers such as feedback linearization, sliding mode, etc. In this paper, based on the formulation of nonlinear terms that covers system states, the concepts of robust control are used, and nonlinear terms of the system are introduced and analyzed as uncertainties in the system. The controller design of this step is explained in the paper.

3. Design of tracking problem: all the solutions presented so far for different cases only solve the problem of regulation, in which the reference input is always considered to be zero. Although this solution justifies some directional drilling patterns such as “hold” (slope retention), the problem of tracking for the system should be solved as other patterns exist in directional drilling, such as “Continuous Build”. For solving tracking problem, the method presented is used [4]:

$$u(t) = k_0 x(t) + k_1 x(t - h_1) + k_2 x(t - h_2) + k_r r(t) \quad (7)$$

Results and Discussion

In this section, the results of system simulation for the three steps of controlling system have been presented and discussed. In all steps, using yalmip in the Matlab environment, the LMI derived in the previous section is solved by the Mosek solver and the controller gains are obtained. In all stages of solving this problem, the most important constraint is the amount of control effort (the force exerted by the RSS) that is associated with operational limitation (the operating range of the RSS force is between 0 to 20000 N, which is approximately equivalent to $0 < \Gamma < 0.013$). Therefore, for the problem to be realistic and operational, all provided answers must fall within this operational range.

For example, the results of tracking problem is presented. As mentioned, in directional drilling, it is very important to track the path that is interpreted as the inclination angle tracking here. In the previous section, it was proven that the system can track the step reference input. In the Figure 1, the simulation results of tracking the following reference path by the nominal system ($\Pi_n = 0.279$) with initial condition of $x = 0.01$ have been demonstrated.

$$\begin{aligned} x_r &= 0; 0 < x < 4, \\ x_r &= 0.035; 4 < x < 11, \\ x_r &= 0.0175; 11 < x < 20 \end{aligned} \quad (9)$$

As can be seen in the above figure, the nonlinear system has been able to track the path with a high accuracy. The control effort has also been lower than the allowed value in all locations, and the system is indeed controlled in an actual manner.

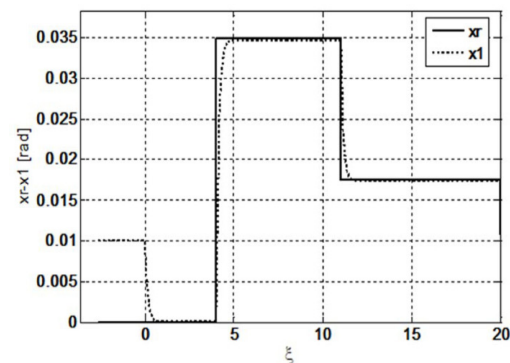


Fig. 1 Tracking of reference trajectory (first state)

Conclusions

In this study, the system has been controlled by a delayed state feedback controller. First, the linear system (with eliminating the weight effect of BHA) was controlled. Then, with adopting a robust approach based on the physics of the problem, the nonlinear terms of the system were introduced into the system as uncertainty, and the system was obtained in a linear form with uncertainty. Finally, due to tracking nature of directional drilling, the tracking problem is solved. The simulation results of tracking is better than previous studies. In the previous article presented by authors, the effect of BHA weight was ignored, leading to a linear delayed model. In contrast, the present article analyses the system as a model, which means a nonlinear delayed model involving disturbance terms. Afterwards, a robust control approach was used to control the disturbance.

References

1. Perneder L (2013) A three-dimensional mathematical model of directional drilling.
2. Kremers N A H, Detournay E, Van De Wouw N (2015) Model-based robust control of directional drilling systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 24, 1: 226-239.
3. Boukas E K, Liu Z K (2002) *Deterministic and stochastic time-delay systems*, Springer Science and Business Media.
4. Ogata K (2010) *Modern control engineering*, Prentice hall.
5. Zafarian H, Ameri M, Vaghasloo Y A (2021) Error reduction of tracking planned trajectory in a thin oil layer drilling using smart rotary steerable system." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107668.

هوشمندسازی سیستم دوار هدایت پذیر به منظور بهبود دنبال کردن مسیر طراحی شده چاه انحرافی از طریق کنترلر مقاوم

حبیب الله ظفریان ریگی، محمد جواد عامری شهرابی* و علی سلمانی سیاح

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

چکیده

یکی از چالش‌های حفاری انحرافی، هدایت سرمته در جهتی است که بتواند مسیر طراحی شده را با کمترین خطا دنبال کند. بهبود دنبال کردن مسیر طراحی شده، زمانی اهمیت جدی می‌یابد که لایه تحت حفاری نازک بوده و در صورت پایین بودن دقت حفاری، مشکلاتی برای چاه ایجاد می‌شود. در چنین مواردی استفاده از روش‌های هوشمندسازی مسیر حفاری انحرافی به‌ویژه تکنولوژی سیستم دوار هدایت‌پذیر (RSS) اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه برای هوشمندسازی حفاری انحرافی، از مدل تحلیلی پرنده-دورنی که حفاری انحرافی را به‌صورت یک سیستم تاخیردار غیرخطی دارای نامعینی مدل می‌کند، استفاده شده است. تاکنون برای هوشمندسازی این سیستم، اثبات پایداری مبتنی بر تابع لیپانوف انجام نشده است. نوآوری اصلی مقاله حاضر آن است که توانسته صورت‌بندی جدیدی برای روابط سیستم ارائه دهد به گونه‌ای که امکان استفاده از تابع لیپانوف برای اثبات پایداری سیستم حفاری انحرافی که یک سیستم تاخیردار غیرخطی است، ایجاد گردد. بدین منظور علاوه بر کاهش مرتبه سیستم، ترم‌های غیرخطی سیستم نیز به نامعینی تبدیل و وارد سیستم شده‌اند. با این دو تغییر، تابع لیپانوف مطلوب برای کنترل مقاوم سیستم تاخیردار خطی دارای نامعینی استخراج شده و با تبدیل تابع لیپانوف به یک نامساوی ماتریس خطی (LMI) و سپس حل آن به‌وسیله حل‌کننده موزک، سیستم حفاری انحرافی هوشمندسازی و شبیه‌سازی شده است. در نهایت مساله دنبال کردن نیز برای سیستم حفاری انحرافی حل شده است. در تمامی مراحل، نیروی وارده از سمت RSS در محدوده عملیاتی حفاری قرار دارد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با کارهای قبلی نشان‌دهنده بهبود عملکرد روش هوشمندسازی پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: حفاری انحرافی، هوشمندسازی، سیستم دوار هدایت‌پذیر، سیستم تاخیردار، کنترل مقاوم

مقدمه

(جهت دار) به‌عنوان یک روش کارا در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفته و توسعه یافته است. حفاری انحرافی (جهت‌دار)، حفاری تحت کنترل در مسیر معین و تعریف شده از قبل تا رسیدن به هدف مد نظر است [۱].

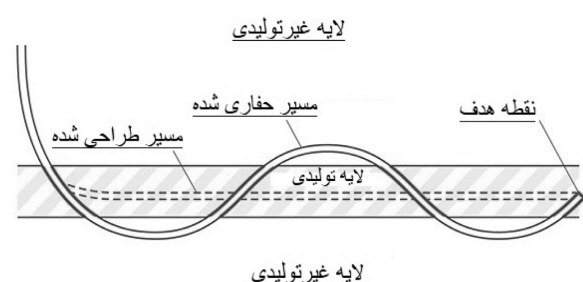
با توجه به محدودیت‌های مختلف حفاری عمودی برای دسترسی به مخازن نفت و گاز، حفاری انحرافی^۱

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی

ameri@aut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/PR.2021.4514.3037)

یکی از چالش‌های حفاری انحرافی به‌ویژه زمانی که طول حفاری شده افزایش می‌یابد، هدایت سرشته در جهتی است که بتواند مسیر از قبل طراحی شده^۱ را با کمترین خطا دنبال نماید [۲]. در هر چاه انحرافی میزان خطای قابل قبول در قالب یک بیضی عدم قطعیت^۲ توسط کارفرما ارائه می‌شود. در حال حاضر روش مرسوم برای حفاری انحرافی استفاده از موتورهای درون‌چاهی است که به‌وسیله عامل انسانی-حفار انحرافی- هدایت می‌شوند. از این رو در حفاری مرسوم فعلی، حذف و کاهش خطا تماماً مبتنی بر تجربه حفار است که دارای خطا است. افزایش خطا به‌ویژه زمانی اهمیت جدی می‌یابد که لایه تحت حفاری نازک بوده و در صورت پایین بودن دقت حفاری، چاه وارد لایه‌های مجاور (گاز و آب) شده و مشکلات بعدی را به‌دنبال خواهد داشت (شکل ۱).



شکل ۱ حرکت مته در مسیر طراحی شده [۲]

همچنین در برخی موارد به دلایل اقتصادی و یا

محدودیت‌های زمین‌شناسی و عملیاتی، نیاز به حفار چاه‌های انحرافی دارای مسیرهای پیچیده سه‌بعدی وجود دارد. در عمده موارد این چینی، هدایت مسیر چاه انحرافی از طریق ابزارهای فعلی که مبتنی بر تجربه حفار (عامل انسانی) است امکان‌پذیر نبوده و نیاز به وجود یک سیستم خودکار هوشمند برای این کار است [۳-۵]. با توجه به نیاز به حفاری‌های با طول و دقت زیاد، فن‌آوری RSS در راستای هوشمندسازی فرآیندهای مختلف صنعت نفت، توسط شرکت‌های بزرگ نفتی در سالیان اخیر توسعه یافته است. به‌عنوان مثال یکی از طولانی‌ترین چاه‌های افقی حفاری شده در میدان الشاهین قطر، با طول ۴۰۳۲۰ ft (حدود ۱۳ km) و طول افقی ۳۵۷۷۰ ft (حدود ۱۱ km)، است که توسط ابزار پاوردرایو اکسیدر^۳ شرکت شلمبرژه حفاری شده است که بخش‌های مختلف این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است [۶]. این فن‌آوری به‌طور کلی دارای دو مزیت اساسی است:

- افزایش دقت در دنبال کردن مسیر طراحی شده و در نتیجه کاهش خطای مسیر (به‌دلیل هوشمندسازی و حذف عامل انسانی)
- چرخش دائم رشته حفاری حین حفاری (باعث افزایش کیفیت چاه، بهبود نرخ حفاری، بهبود تمیزکاری چاه، کاهش مشکلات حفاری و کاهش ترک و درگ)



شکل ۲ بخش‌های مختلف سیستم دوار هدایت‌پذیر (RSS) [۶]

1. Planned Path
2. Ellipse of Uncertainty
3. PowerDrive Xceedr

از کنترلر بهینه H_{∞} استفاده کرد ولی نتایج به دست آمده تقریباً یکسان بود. کارهای دیگر انجام شده در این زمینه که براساس مدل‌های تحلیلی گسترش حفره چاه انجام شده‌اند؛ با کارهای دونتون آغاز شد. دونتون در مقاله خود [۱۰]، سه مدل برای مدل‌سازی گسترش حفره چاه ارائه کرده‌است. در مدل‌های دونتون، متغیر مستقل در تابع تبدیل زمان نیست؛ بلکه طول حفاری شده است. این مسئله باعث ساده سازی استخراج و تفسیر ساده تر نتایج می‌شود. در مدل دونتون توسط کنترلر $L1$ کنترل شده است. [۱۱] دونتون و ایگنوا مدلی کامل تر ارائه و در مورد پایداری آن بحث کردند که در آن اثر وزن رشته حفاری نیز در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین مطالعه کنترل حفاری انحرافی بر روی مدل تأخیردار پرندار انجام شده است. با استفاده از مدل پرندار، سیستم حفاری انحرافی را در قالب فضای حالت به فرم مسئله دنبال کردن مقاوم صورت‌بندی کرده است. در این صورت‌بندی روابط تمامی ترم‌های غیرخطی سیستم به صورت اغتشاش در نظر گرفته شده است و سیستم خطی توسط یک کنترلر فیدبک حالت کنترل شده است. در این مطالعه، مقاوم بودن کنترلر پیشنهادی برای نامعینی‌های^۴ سیستم که عمدتاً ناشی از تغییر جنس سنگ و وزن روی سرمرته است مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما برای کنترل سیستم از تابع لیپانوف استفاده نشده است و در واقع، اثبات پایداری برای سیستم انجام نشده است. مقاله حاضر به دنبال ارائه یک کنترلر مقاوم برای سیستم حفاری انحرافی مدل شده توسط پرندار است؛ به گونه‌ای که اولاً در تمامی مراحل، اثبات پایداری به صورت ریاضی (مبتنی بر تابع لیپانوف سیستم‌های تأخیردار) صورت گیرد و ثانیاً این کنترلر در برابر نامعینی‌های موجود در سیستم حفاری انحرافی مقاوم باشد.

هوشمندسازی حفاری چاه انحرافی مبتنی بر مدل‌های مختلف توصیف سیستم حفاری انحرافی انجام شده است که می‌توان این مدل‌ها را به دو دسته مدل‌های مستقل از ابزار^۱ و مدل‌های وابسته به ابزار^۲ تقسیم‌بندی کرد. مدل مستقل از ابزار، مدلی است که کاملاً مبتنی بر روابط سینماتیکی (روابط هندسی) بوده و فارغ از نوع، شکل و نیروهای وارد بر عملگر (ابزار حفاری) اقدام به مدل‌سازی سیستم می‌نماید [۷]. در مقابل، مدل‌های وابسته به ابزار سعی در مدل‌سازی گسترش حفره چاه^۳ با در نظر گرفتن مدل‌سازی تجهیزات ته‌چاهی و مدل‌سازی برهم‌کنش سنگ و سرمرته دارند. اولین و مؤثرترین کار تئوریک در این زمینه توسط لوبینسکی و وودز [۸] انجام شده است. این کار و دیگر کارهای اولیه مانند مورفی و چیثام، مدل‌های تحلیلی برای برهم‌کنش سنگ و سرمرته و مدل‌سازی تجهیزات ته‌چاهی استخراج کردند؛ ولی فرمولاسیون کلی از سینماتیک سیستم ارائه نداده‌اند. در دهه ۷۰ و ۸۰ عمده مطالعات حفاری انحرافی بر روی مدل مکانیکی تجهیزات ته‌چاهی متمرکز شد؛ چرا اعتقاد بر این بود که مهم‌ترین فاکتور در حفاری انحرافی، طراحی تجهیزات ته‌چاهی است. بنابراین برهم‌کنش بین سنگ و سرمرته تا اواسط دهه ۸۰ در حاشیه قرار گرفت. از میان تعداد کمی از مطالعات که به دنبال استخراج روابط حاکم به روش تحلیلی بوده‌اند (از جمله نیوبرت و هیسینگ و نیوبرت و دونتون، کامل‌ترین مدل گسترش حفره چاه مدل پرندار و دتورنی [۹] است که به عنوان مدل مبنا در مقاله حاضر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل سیستم حفاری انحرافی را به صورت یک سیستم غیر خطی تأخیردار مدل می‌کند. به منظور کنترل سیستم حفاری انحرافی به‌ویژه از سال ۲۰۰۰ به بعد کارهای نسبتاً زیادی انجام شده است. پانچال با توسعه یک مدل مستقل از ابزار، توانست با استفاده از کنترلر PI اقدام به هوشمندسازی این مدل نماید. در ادامه، برای کنترل مدل ارائه شده توسط پانچال

1. Tool-Independent

2. Tool-Dependent

3. Borehole Evolution

4. Uncertainties

مدل سازی تجهیزات ته چاهی، محاسبه نیروها و گشتاورهای اعمالی (محوری، جانبی و زاویه ای) روی سرمرته مبتنی بر تغییر شکل ایجاد شده در تجهیزات ته چاهی به وسیله پایدارکننده هایی در تماس با دیواره چاه محدود است؛ چاه، نیرو و گشتاورهایی را به سرمرته در یک فضای تأخیری اعمال می کند. لذا، روابط سیستم به صورت سیستم تأخیردار خواهند بود. در مطالعات قبلی نشان داده شده است که دینامیک سیستم عمدتاً تحت تأثیر دو پایدارکننده اول قرار دارد و پایدارکننده های بعدی تأثیر ناچیزی دارند [۱۳ و ۱۲]. در اینجا تجهیزات ته چاهی به عنوان یک تیر خطی اوپلر-برنولی با EI (سفتی خمشی)^۲ ثابت و توزیع یکنواخت وزن (وزن) تعدیل شده به دلیل بویانسی ناشی از سیال حفاری) مدل می شود. قانون برهم کنش سنگ/سرمرته نشان می دهد چگونه نیروها و گشتاورهایی (F1, F2, M) که روی سرمرته عمل می کنند با میزان نفوذ سرمرته (در دو بعد d1, d2, φ1) در سنگ مرتبط هستند. در مدل پرند، قانون تماس توسط یک رابطه خطی مدل شده است. در نهایت، این دو رابطه از طریق یک رابطه سینماتیکی به یکدیگر مرتبط شده اند. با ترکیب سه جزء، رابطه زیر برای تغییرات زاویه شیب سرمرته حاصل می شود:

$$X \cdot \Pi \cdot \theta' = M_b \cdot ((\theta)_1 - \theta) + \frac{X}{\eta} \cdot F_b \cdot (\theta - \theta_1) + \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{F_b M_i - F_i M_b - M_i \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot ((\theta)_i - (\theta)_{(i+1)})$$

$$- \frac{X}{\eta} \sum_{i=1}^2 F_i \cdot \left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{x_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{x_{i+1}} \right) - \frac{X}{\eta} \cdot F_w \cdot \gamma \cdot (\theta - \theta_1) \cos(\theta)_1$$

$$+ \frac{F_b M_r - F_r M_b - M_r \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot \gamma \cdot \sin(\theta)_1 \pm$$

$$\frac{X}{\eta} \cdot F_r \cdot \Gamma' + \frac{F_b M_r - F_r M_b - M_r \eta \Pi}{\eta \Pi} \cdot \Gamma$$

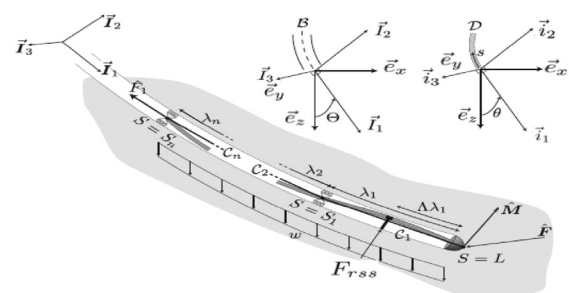
1. Feedback
2. Tracking
3. Bending Stiffness

برای این منظور ابتدا سیستم تأخیردار غیرخطی دارای نامعینی پرند، با یک کاهش مرتبه به فرم جدیدی تبدیل می شود که امکان استفاده از تابع لیاپانوف برای آن وجود داشته باشد. در ادامه، ترم های غیرخطی سیستم (ناشی از وزن تجهیزات ته چاهی) با تبدیلات ریاضی و مبتنی بر فیزیک مسئله حفاری انحرافی، به صورت نامعینی در سیستم وارد می شوند و سیستم به صورت یک سیستم خطی دارای نامعینی صورت بندی می شود. حال با استفاده از تابع لیاپانوف سیستم های تأخیردار، سیستم خطی دارای نامعینی توسط کنترل بازخوردی^۱ حالت تأخیردار، کنترل می شود. در نهایت با توجه به اینکه هدف حفاری انحرافی همواره دنبال کردن یک مسیر است، مساله دنبال کردن^۲ حل می شود.

مدل سازی و تحلیل رفتار سیستم حفاری انحرافی

مدل سازی سیستم حفاری انحرافی

در این بخش، مدل سازی سیستم حفاری انحرافی مبتنی بر مدل پرند **شکل ۳** ارائه می شود.



شکل ۳ مدل سازی گسترش حفره چاه در مدل پرند- دتورنی [۹]

که کامل ترین مدل سازی موجود برای این سیستم است. پرند برای استخراج مدل خود از یک مدل سه جزئی شامل مدل سازی تجهیزات ته چاهی، قانون برهم کنش سنگ/سرمرته و یک رابطه هندسی (سینماتیک) استفاده کرده است. به جهت رعایت اختصار، تنها روابط نهایی ارائه می شود. هدف از

$$A_2 = [h \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; i \ 0 \ 0]$$

تحلیل سیستم حلقه باز

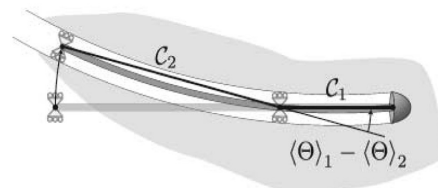
به منظور ارزیابی و تحلیل سیستم حفاری انحرافی ابتدا لازم است پاسخ سیستم در مقابل ورودی‌های متعارف بررسی شود. برای تحریک حلقه باز سیستم، نیروی RSS به صورت ورودی پله در مکان ۱ از صفر به ۱۳۰۰۰ N (معادل $\Gamma = 0.0081$) به سیستم وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است سیستم ($\eta\Pi = 0.15$) ناپایدار بوده و به صورت نوسانی به بی‌نهایت میل می‌کند. متناسب با عدم قطعیت سیستم (حاصل ضرب $\eta\Pi$)، میزان نوسانی بودن پاسخ متفاوت خواهد بود؛ بدین نحو که عدم قطعیت کوچکتر دارای نوسان بیشتر است و بالعکس. با توجه به پاسخ حلقه باز سیستم، قدم اول پایدار کردن سیستم به وسیله قانون کنترل مناسب است. در گام بعد، بایستی سیستم دارای اغتشاش (ناشی از ترم‌های غیر خطی) و نامعینی پایدار شود. همچنین با توجه به فیزیک مسئله حفاری، قدم بعدی اثبات پایداری برای مسئله دنبال کردن است. لازم به تأکید است که تمامی این مراحل باید به گونه‌ای عمل شود که نیروی وارده توسط RSS (تلاش کنترلی) در محدوده عملیاتی واقعی حفاری قرار گیرد [۱۶].

طراحی قانون کنترل

در قسمت قبل دیده شده که مدل‌سازی سیستم حفاری انحرافی، منتج به یک مدل تأخیردار برای سیستم می‌شود. همان‌طور که مشخص است سیستم ارائه شده برای حفاری انحرافی، یک سیستم تأخیردار^۱ از نوع تأخیر در ورودی و از منظر ماهیت تأخیر، دارای دو تأخیر گسسته ثابت (با مقدار ۱ و ۲/۶۶) است [۱۷]. در این قسمت قانون کنترل مورد نیاز برای کنترل سیستم طراحی می‌شود.

با در نظر گرفتن Θ (شیب حفره چاه) به عنوان یکی از حالت‌های سیستم، می‌توان دو حالت دیگر را متوسط شیب در قسمت اول و دوم تجهیزات ته‌چاهی در نظر گرفت و مطابق شکل ۴ از روی هندسه سیستم بدین نحو به دست آورد [۱۵ و ۱۴]:

$$(\theta')_i = \frac{1}{x_i} [\theta(\xi_{i-1}) - \theta(\xi_i)] \quad (2)$$



شکل ۴ حالت‌های سیستم در مدل تأخیردار حفاری انحرافی [۱۵]

با توجه به روابط ارائه شده برای حالت‌های سه گانه سیستم گسترش حفره چاه، فرم فضای حالت سیستم را می‌توان به صورت زیر صورت‌بندی کرد. در این رابطه Γ ورودی کنترلی سیستم میزان نیروی جانبی وارد شده از سمت RSS و پارامتر کنترلی، هر سه حالت سیستم به‌ویژه شیب حفره چاه است. در واقع، خطای شیب حفره چاه که توسط سنسور موجود در بالای RSS اندازه گرفته شده است نسبت به شیب مرجع، مقایسه شده و کنترلر مبتنی بر این خطا، به عملکرد RSS فرمان وارد کردن نیرو به دیواره چاه می‌دهد. همچنین، W (اغتشاش سیستم) حاصل ترم‌های غیرخطی رابطه ۱ است که ناشی از وزن تجهیزات ته‌چاهی هستند. ضمناً سیستم دارای دو نامعینی (عدم قطعیت) است: نامعینی ناشی از وزن روی سرمته (Π) و نامعینی ناشی از جنس سنگ تحت حفاری (η). مطابق روابط سیستم، حاصل ضرب این دو پارامتر به عنوان پارامتر نامعینی سیستم در نظر گرفته می‌شود.

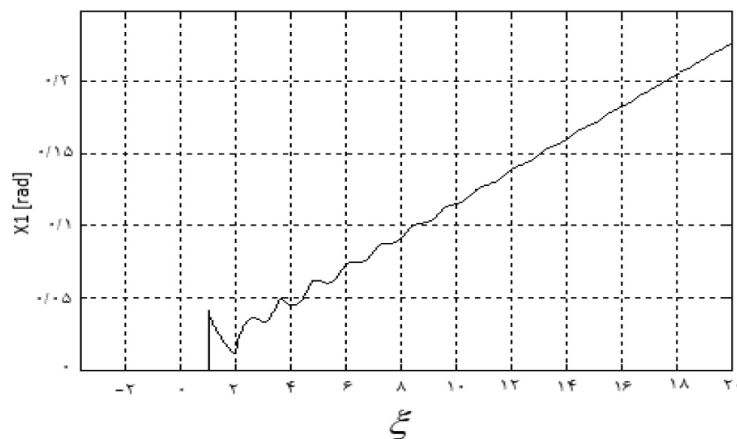
$$x'(\xi) = A_0 x(\xi_0) + A_1 x(\xi_1) + \quad (3)$$

$$A_2 x(\xi_2) + B_0 \Gamma + B_1 \Gamma' + B W$$

$$A_0 = [a \ b \ c; d \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$$

$$A_1 = [e \ 0 \ 0; f \ 0 \ 0; g \ 0 \ 0]$$

1. Time-Delayed



شکل ۵ زاویه شیب سرمته

ثابت می‌شود که مشتق لیاپانوف منفی و لذا سیستم پایدار خواهد بود:

$$L = \begin{pmatrix} A^T P + PA + \sum_{j=1}^m Q_j & PA_1 & \dots & PA_m \\ A_1^T P & -Q_1 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & -Q_m & 0 \\ A_m^T P & 0 & 0 & -Q_m \end{pmatrix} < 0 \quad (9)$$

فرم جدید رابطه

فرم اولیه رابطه سیستم رابطه ۳ در شرایط نامساوی ماتریس خطی (LMI) حاصل از تابع لیاپانوف سیستم‌های تأخیردار که در بخش قبل توضیح داده شد، صدق نمی‌کند. این بدان معنی است که برای سیستم حاضر، امکان استفاده از تابع لیاپانوف سیستم‌های تأخیردار که منجر به اثبات پایداری برای سیستم می‌شود، وجود ندارد. به همین دلیل نیز در مطالعات قبلی برای کنترل سیستم از تابع لیاپانوف استفاده نشده و در واقع برای سیستم اثبات پایداری صورت نگرفته است. از طرف دیگر، سیستم ارائه شده در رابطه ۳ دارای ۳ حالت است که مطابق رابطه ۲، حالت‌های دوم و سوم تابع حالت اول هستند. با توجه به وابسته بودن حالت‌های سیستم به یکدیگر، بهتر است یک کاهش مرتبه در سیستم انجام شود؛ چرا که با این کار، تحلیل و کنترل سیستم ساده‌تر می‌شود.

روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان، به‌منظور اثبات پایداری برای سیستم که جزو نوآوری‌های مقاله حاضر است بایستی از روش تابع لیاپانوف استفاده نمود. مشکل استفاده از این روش آن است که فقط شرط کافی پایداری را بیان می‌کند. دو روش تحلیل زمانی با روش مستقیم لیاپونوف برای سیستم‌های تأخیردار، روش کراسوفسکی^۱ برای تابع‌های لیاپونوف^۲ و روش رازومیکین^۳ برای توابع لیاپونوف هستند [۱۸].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{j=1}^m A_j x(t - h_j(t)) + Bu \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

برای یک سیستم تأخیردار ساده به رابطه ۴، انتخاب تابع لیاپانوف با رابطه ۵ منجر به ایجاد شرط LMI مطابق روابط زیر خواهد شد:

$$V(x(t)) = x^T(t)Px(t) + \sum_{j=1}^m \int_{t-h_j}^t x^T(s)Q_j x(s)ds \quad (5)$$

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + \quad (6)$$

$$x^T(t) \left(\sum_{j=1}^m Q_j \right) x(t) - \sum_{j=1}^m x^T(t - \tau_j) Q_j x(t - \tau_j)$$

$$\dot{V}(x(t)) = x^T \left(A^T P + PA + \sum_{j=1}^m Q_j \right) x(t) + 2 \sum_{j=1}^m x^T(t - \tau_j) A_j^T P x(t) - \sum_{j=1}^m x^T(t - \tau_j) Q_j x(t - \tau_j) \quad (7)$$

$$\dot{V}(x(t)) = \eta_t^T L \eta_t \quad (8)$$

بنابراین در صورت وجود ماتریس‌های مثبت معین P و Q و در صورتی که رابطه (LMI) زیر برقرار باشد

1. Krasovskii
2. Lyapunov Functionals
3. Razumikhin

نسبت به نیروهای اعمالی دیگر بسیار اندک است. یک رویکرد به حل این مساله، حذف این ترم‌های غیر خطی است. در واقع در اینجا یک کاهش مدل اتفاق می‌افتد و سیستم ساده شده‌ای تحت کنترل قرار می‌گیرد.

عمدتاً کنترلر سیستم‌های تاخیردار خطی به فرم فیدبک حالت‌های سیستم (با فرض دسترسی به حالت‌های سیستم) است. در اینجا به‌طور کلی دو فرم برای قانون کنترل وجود دارد که به‌شکل زیر هستند [۱۹]:

$$u(t) = k_0 x(t) \quad (17)$$

$$u(t) = k_0 x(t) + k_1 x(t - h_1) + k_2 x(t - h_2) \quad (18)$$

در اینجا h_1, h_2 تاخیرهای سیستم هستند. استفاده از کنترلر دوم در سیستم منجر به ایجاد LMI زیر برای اثبات پایداری سیستم خواهد شد:

$$L = \begin{pmatrix} v(X, Y) & A_1 X + B Y_1 & \dots & A_m X + B Y_m \\ * & -U_1 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ * & 0 & & -U_m \end{pmatrix} < 0 \quad (19)$$

$$v(X, Y) = A X + X A^T + B Y + Y^T B^T + \sum_{j=1}^m U_j \quad (20)$$

طراحی کنترلر با رویکرد مقاوم برای سیستم غیرخطی دارای نامعینی

در قسمت قبل با حذف ترم‌های غیرخطی سیستم، کنترلری برای سیستم خطی طراحی شد. در صورتی که ترم‌های غیرخطی در سیستم وجود داشته باشند چند رویکرد برای حل مساله وجود دارد. یک رویکرد در نظر گرفتن کلیه ترم‌های غیرخطی به‌صورت اغتشاش در سیستم است که در مطالعات قبلی انجام شده است [۲۰]. در مقاله حاضر به‌دلیل فرمولاسیون ترم‌های غیرخطی که در بردارنده حالت‌های سیستم است؛ از مفاهیم

بنابراین به‌منظور ساده‌سازی رابطه سیستم و دستیابی به فرمی از رابطه که بتوان از تابع لیاپانوف سیستم‌های تاخیردار برای آن استفاده کرد، از روابط موجود مشتق‌گیری کرده و با جای‌گذاری مشتق روابط دوم و سوم در رابطه اول، رابطه ۱۰ حاصل می‌شود:

$$\dot{x}_1(\xi) = a x_1 + b \dot{x}_2 + c \dot{x}_3 + e \dot{x}_1(t-1) + h(x_1)'(t-1) + b_0 \Gamma' + b_1 \Gamma'' + b_w w' \quad (11)$$

$$\dot{x}_2 = d x_1 + f x_1(t-1) \quad (12)$$

$$\dot{x}_3 = g x_1(t-1) + i x_1(t-2.6) \quad (13)$$

که در این روابط، مشتق اغتشاش به‌صورت زیر خواهد بود:

$$w = K_w \gamma \cos \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1)) + L_w \gamma \cos \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1))' + L_w \gamma \sin \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1))^2; \Theta = x \quad (14)$$

حال سیستم را به‌صورت زیر خواهیم داشت:

$$\dot{x}_1(\xi) = a x_1 + e \dot{x}_1(t-1) + h \dot{x}_1(t-2.6) + b d x_1 + (b f + c g) x_1(t-1) + c i x_1(t-2.6) + b u + b_w w; \quad (15)$$

$b u = b_0 \Gamma + b_1 \Gamma'$
بنابراین با انتخاب حالت‌های زیر برای سیستم داریم:

$$y_1 = x_1, y_2 = \dot{x}_1 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ b d & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b f + c g & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-1) \\ y_2(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ c i & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-2.6) \\ y_2(t-2.6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_w w \end{bmatrix} + B u; \quad (16)$$

$$B = [0; 1] \quad (17)$$

طراحی کنترلر برای سیستم در حالت‌های مختلف

سیستم خطی بدون نامعینی

سیستم حفاری انحرافی مورد بحث، دارای دو ترم غیر خطی ناشی از وزن تجهیزات ته‌چاهی است. مرتبه بزرگی این دو ترم نسبت به ترم‌های سیستم (10^{-5}) است. این تفاوت از مدل‌سازی سیستم نیز قابل حدس است؛ چرا که اثر وزن

برای استخراج LMI مربوط به سیستم دارای نامعینی و با در نظر گرفتن کنترلر فیدبک حالت، سیستم پایدار خواهد بود اگر با فرض X, V, ε مثبت، LMI زیر برقرار باشد [۲۱]:

$$L = \begin{pmatrix} M_{11} & M_1 & \dots & M_m & \beta \\ M_1^T & -V_1 & \dots & 0 & \beta_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_m^T & 0 & \dots & -V_m & \beta_m \\ \beta^T & \beta_1^T & \dots & \beta_m^T & -\varepsilon I \end{pmatrix} < 0 \quad (24)$$

$$M_{11} = AX + XA^T + BY + Y^T B^T + \varepsilon DD^T + \sum_{j=1}^m V_j \quad (25)$$

$$M_{11} = AX + XA^T + BY + Y^T B^T + \varepsilon DD^T + \sum_{j=1}^m V_j \quad (26)$$

$$\beta = XE_A^T + Y^T E_B^T; 1 < i < m \quad (28)$$

$$\beta_i = XE_i^T + Y_i^T E_B^T; 1 < i < m \quad (28)$$

حل مسئله دنبال کردن

تمامی حل‌هایی که تاکنون برای حالت‌های مختلف ارائه شد، تنها مسئله تنظیم^۲ را حل می‌کنند؛ بدین معنا که ورودی مرجع در این مسائل همواره صفر در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این حل برخی از الگوهای حفاری انحرافی از جمله الگوی حفظ شیب^۳ را توجیه می‌نماید، اما با توجه به الگوهای دیگر موجود در حفاری انحرافی از جمله افزایش پیوسته شیب، بایستی مسئله دنبال کردن برای سیستم حل شود. درحالتی که سیستم دارای ورودی مرجع پله است داریم:

$$u(t) = k_0 x(t) + k_1 x(t - h_1) + k_2 x(t - h_2) + k_r r(t) \quad (29)$$

بنابراین سیستم حلقه بسته به صورت زیر درخواهد آمد:

$$\dot{x}(t) = (A_0 - BK_0)x(t) + (A_1 - BK_1)x(t - h_1) + (A_2 - BK_2)x(t - h_2) + Bk_r r(t) \quad (30)$$

کنترل مقاوم استفاده شده و ترم‌های غیرخطی سیستم به صورت نامعینی‌هایی در خود سیستم وارد و تحلیل می‌شوند. به بیان دیگر، در اینجا ترم‌های غیرخطی سیستم به صورت نامعینی به سیستم اولیه (که دارای نامعینی ناشی از پارامترهای عدم قطعیت بوده است) اضافه می‌شوند. مزیت این کار خطی کردن سیستم است. برای این منظور داریم:

$$x_1(\xi) = ax_1 + ex_1(t-1) + hx_1(t-2.6) + bdx_1 + (bf + cg)x_1(t-1) + cix_1(t-2.6) + bu + b_w w \quad (31)$$

$$w = K_w \gamma \cos \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1)) + L_w \gamma \cos \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1))' + L_w \gamma \cos \Theta_1 (\Theta - \Theta(t-1))^2 \leq K_w \gamma (\Theta - \Theta(t-1)) L_w \gamma (\Theta - \Theta(t-1))' + L_w \gamma (\Theta - \Theta(t-1))^2 \quad (32)$$

در این عبارت، حد بیشینه ترم سینوس و کسینوس ۱ است. از طرفی به دلیل فیزیک مسئله حد ماکزیمم $(x_1(t) - x_1(t-1))$ نیز ۱ است؛ چرا که مبتنی بر فیزیک مسئله، شدت پاسگی^۱ در حفاری انحرافی به طور متوسط $\frac{3}{100ft}$ و حداکثر $\frac{8}{100ft}$ است که با توجه به طول حدود ۱۰ ft بین سرمرته و پایدارکننده اول، حداکثر مقدار عبارت فوق ۰/۸ خواهد بود. لذا می‌توان فرمولاسیون جدید را به صورت مساله مقاوم زیر نوشت: $(-1 < m < 1)$

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ bd + m \cdot |L_w \gamma + K_w \gamma| & a + m \cdot |2K_w \gamma| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ bf + cg + m \cdot |L_w \gamma| & e + m \cdot |K_w \gamma| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-1) \\ y_2(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ ci & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t-2.6) \\ y_2(t-2.6) \end{bmatrix} + Bu; B = [0; 1] \quad (33)$$

در واقع اتخاذ این رویکرد باعث شد که سیستم دارای ترم‌های غیرخطی به یک سیستم خطی تبدیل شود که ماتریس‌های آن دارای نامعینی هستند. لذا در حال حاضر با یک سیستم تاخیردار دارای نامعینی مواجه هستیم که بایستی با استخراج یک LMI مناسب برای آن، سیستم را کنترل کرد.

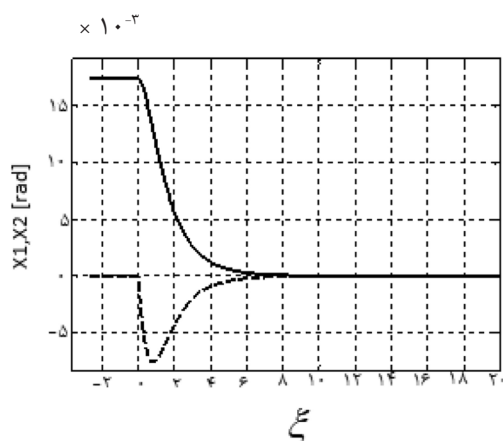
1. Dogleg Severity
2. Regulation
3. Hold Section

یالمپ^۱ در متلب، LMI استخراج شده در بخش قبل توسط حل کننده موزک حل شده و بهره‌های کنترل کننده حاصل می‌شوند. همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، می‌توان سیستم غیرخطی را به صورت یک سیستم خطی دارای نامعینی کراندار مدل کرده و برای آن یک LMI مناسب استخراج کرد. در اینجا با فرض اینکه تمامی نامعینی ماتریس‌ها در پارامترهای $E_A, E_B, \dots$ ظاهر می‌شود با حل این LMI در متلب، بهره‌های زیر برای کنترلر به دست می‌آید:

$$k_0 = [2894.1 \ 2217.4], k_1 = [-5958.6 \ -15.4], \\ k_2 = [3062.1 \ 2.5] \quad (32)$$

حال شبیه‌سازی سیستم در حضور این کنترلر، نتایج زیر را در پی خواهد داشت (شکل ۶). لازم به ذکر است برای بررسی دقیق‌تر و واقعی‌تر مساله مقدار اولیه (خطای اولیه) سیستم برابر 1° (کمی کمتر از 0.2° رادیان) در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که مشخص است سیستم توانسته است در فاصله مکانی کمتر از $8\lambda_1$ (فاصله سرشته تا نیروی RSS) پایدار شود. از منظر عملیاتی، محدوده عملیاتی نیروی RSS بین $N - 20000$ است که تقریباً معادل $0.13 < \Gamma < 0$ است.



برای اثبات پایداری سیستم کفایت دینامیک خطا در بی‌نهایت به سمت صفر حرکت کند. با قرار دادن $t = \infty$ در رابطه بالا و تفریق دو رابطه از یکدیگر و با توجه به اینکه $r(t) = r(\infty) = r$ ، لذا دینامیک خطا برای ورودی مرجع پله به صورت زیر به دست می‌آید که همان رابطه سیستم است و با استفاده از بهره‌های موجود در این دینامیک می‌توان قطب‌ها را به هر جایی منتقل کرده و سیستم را پایدار کرد [۲۲]:

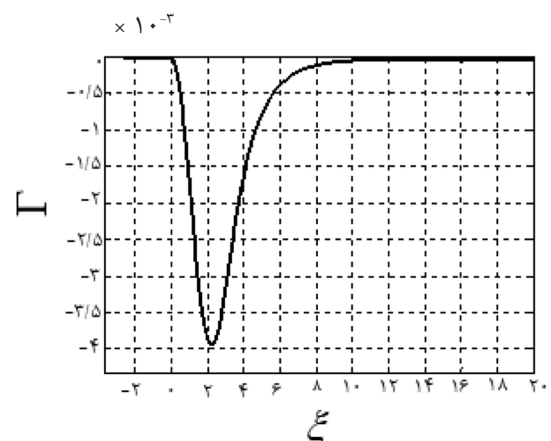
$$\dot{e} = (A_0 - BK_0)e(1) + (A_1 - BK_1)e(t-1) + (A_2 - BK_2)e(t-2) \quad (31)$$

نتایج شبیه‌سازی و بحث

در بخش قبل تئوری استفاده از تابع لیاپانوف و تبدیل آن به LMI برای اثبات پایداری سیستم در حالت‌های مختلف ارائه شد. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سیستم برای سیستم غیرخطی آورده شده و بر روی هر قسمت بحث شده است.

نتایج شبیه‌سازی برای سیستم غیرخطی بدون نامعینی

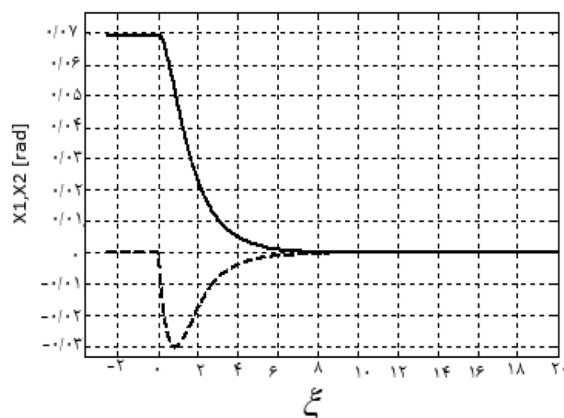
در ابتدا سیستم غیرخطی بدون نامعینی (با $\bar{\eta} = 0.15$) در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از محیط



شکل ۶ حالت‌های سیستم (الف) و نیروی RSS سیستم غیرخطی (با $\bar{\eta} = 0.15$) تحت کنترل (ب)

نیروی بیشتری توسط RSS وارد شود تا تضمین پایداری صورت گیرد. همان طور که از شکل های بالا مشخص است؛ نیروی RSS برای کنترل سیستم در حضور این مقدار از نامعینی، حداکثر نیروی RSS عملیاتی سیستم است. لذا با در نظر گرفتن نامعینی در محدوده $0.06 < \eta \Pi < 0.08$ میزان نیروی RSS در محدوده عملیاتی قرار می گیرد. همان طور که معلوم است بازه نامعینی تنها از کران پایین محدود شده است و کران بالای نامعینی مشکل محدودیت عملیاتی ندارد (محدودیت کران بالای سیستم ناشی از غیر مینیمم فاز شدن سیستم است). این نتیجه گیری با فیزیک مساله نیز سازگار است؛ چرا که کران پایین نامعینی باعث ایجاد نوسان های شدید در دیواره چاه می شود که برای کنترل آن نیاز به نیروی RSS بیشتری است.

به عبارت دیگر باید گفت اگرچه سیستم در کل بازه نامعینی پایدار است؛ اما از منظر عملیاتی، در یک بازه محدودتر از نامعینی عملیاتی است. این موضوع بیانگر آنست که باید عملگری مورد استفاده قرار گیرد که بتواند نیروی بیشتری اعمال کند و در حقیقت محدوده عملیاتی واقعی را افزایش دهد. در غیر این صورت برای تضمین پایداری، بایستی در عملیات حفاری نامعینی را به حداقل رساند و یا اینکه از دقت بالای جواب صرف نظر کرد و محدوده ای از جواب را به عنوان پاسخ مطلوب پذیرفت.

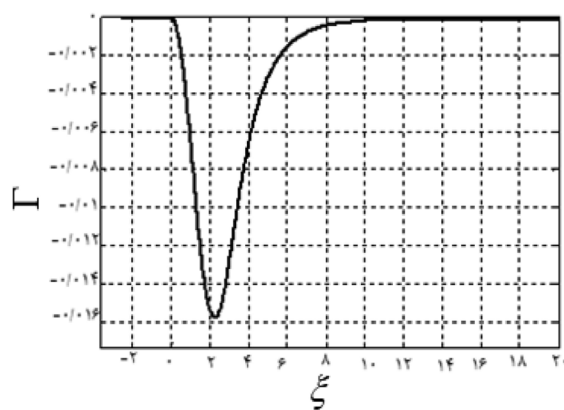


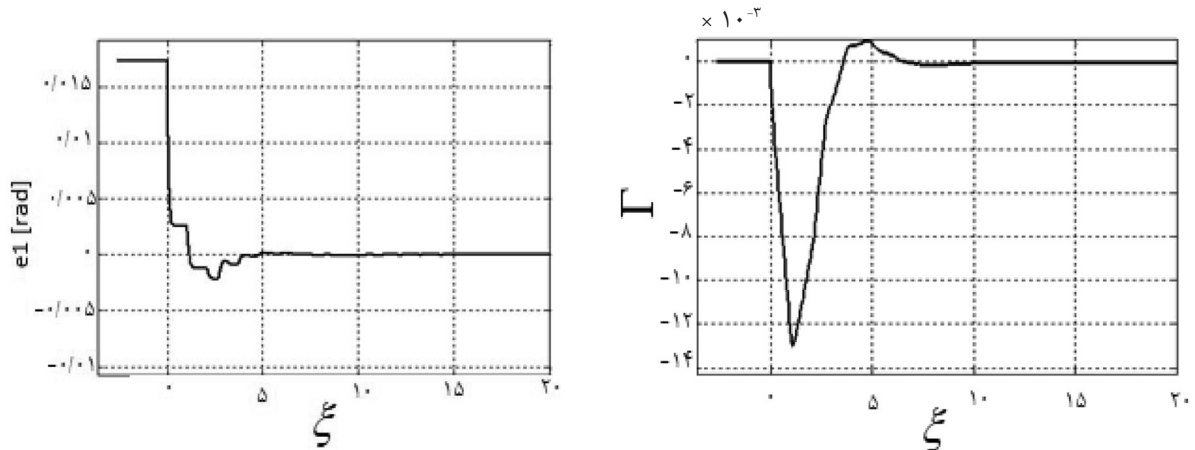
شکل ۷ حالت های سیستم الف) و نیروی RSS سیستم غیر خطی بدون نامعینی (با $\eta \Pi = 0.015$) (ب)

با توجه به شکل ۶، نیروی RSS لازم برای پایدار کردن سیستم در محدوده عملیاتی قرار دارد. لازم به ذکر است مبتنی بر اثبات پایداری ریاضی برای سیستم، سیستم در تمامی مقادیر خطای اولیه می تواند به پایداری برسد؛ با این وجود تنها برخی از این مقادیر از منظر عملیاتی امکان پذیر هستند. اگر فرض را بر اعمال نیروی حداکثری توسط RSS بگذاریم، حداکثر میزان خطای اولیه قابل تصحیح برای سیستم که در محدوده عملیاتی قرار گیرد، برابر میزان 3° خواهد بود. چنانچه در شکل ۷ مشخص است؛ اگر مقدار اولیه برابر 4° قرار داده شود، نیاز به نیرویی بیشتر از محدوده عملیاتی RSS خواهد بود.

بر همین اساس می توان برای نامعینی موجود در سیستم (محدوده تغییر $n\Pi$) نیز پایداری را اثبات کرد. مطابق LMI به دست آمده به ازای تمامی مقادیر نامعینی، سیستم پایدار است. شبیه سازی سیستم در حضور حداکثر نامعینی قابل ترسیم به وسیله نرم افزار متلب ($n\Pi = 0.06$) این موضوع را نشان می دهد. لازم به ذکر است در اینجا برای بررسی بهتر، تنها نمودار خطای حالت اول در شکل ۸ ارائه شده است.

همان طور که از اشکال مشخص است، با توجه به لزوم پوشش نامعینی موجود در سیستم، لازم است





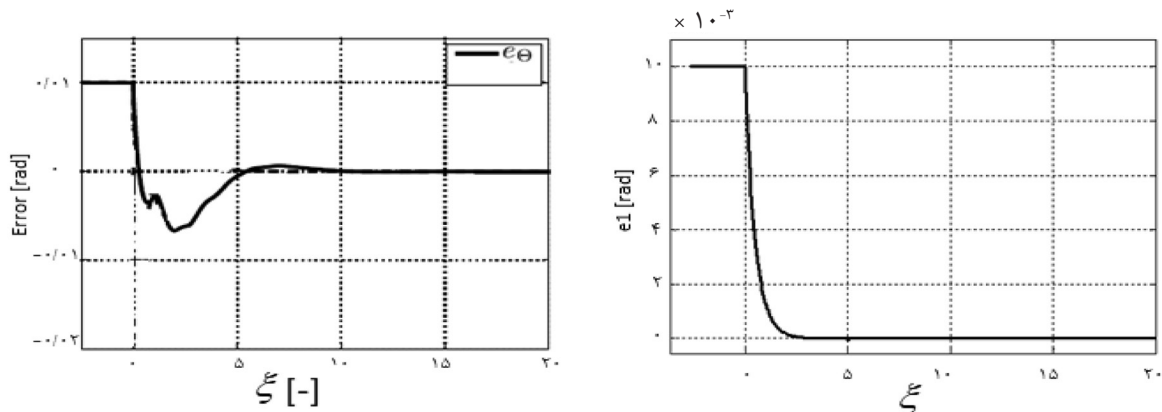
شکل ۸ حالت اول (الف) و نیروی RSS سیستم غیر خطی دارای نامعیتی ($\eta_{II}=0.06$) (ب)

نتایج شبیه‌سازی برای مسئله دنبال کردن

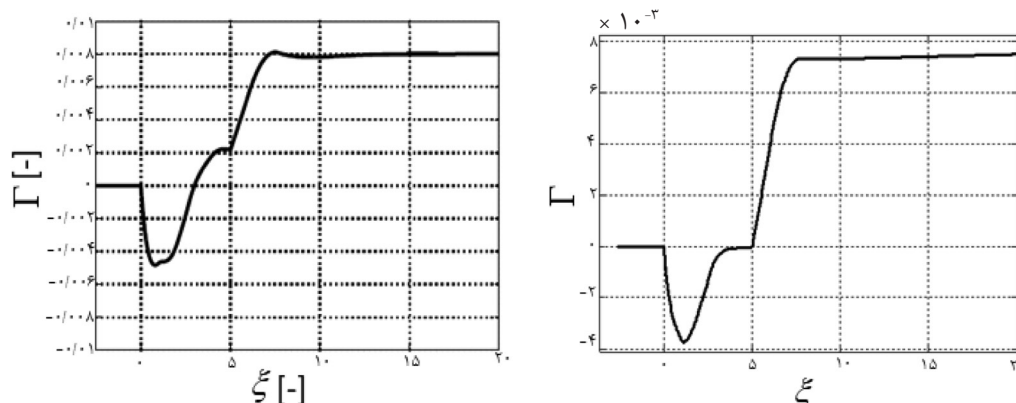
همان‌طور که گفته شد در حفاری انحرافی دنبال کردن مسیر که در اینجا به دنبال کردن زاویه شیب تعبیر می‌شود بسیار اهمیت دارد. در بخش قبل اثبات شد که سیستم می‌تواند ورودی مرجع پله را دنبال نماید. در اینجا ضمن ارائه نتایج شبیه‌سازی مساله دنبال کردن، تلاش می‌شود مقایسه‌ای نیز میان عملکرد هوشمندسازی انجام شده در این مقاله با کارهای قبلی انجام شود. بدین منظور در شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی مساله دنبال کردن مسیر مرجع زیر با شرایط اولیه $x = 0.01$ ، توسط کنترلر ارائه شده در این مقاله، با نتایج مقاله کرمر مقایسه شده است:

$$x_r = \pi/4; x < 5, \quad x_r = \pi/4 + 0.01(\xi - 5); x > 5 \quad (33)$$

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است سیستم توانسته است مسیر را با دقت بالا و خطای تقریباً صفر دنبال نماید. در حالیکه در مقاله کرمر، یک اورشوت حدود ۶۰٪ مشاهده می‌شود، در مقاله حاضر بدون اورشوت خطا به صفر میل کرده است. همچنین زمان رسیدن خطا به صفر مطابق شکل فوق حدود ۱/۷ طول بی بعد است در حالیکه در مقاله کرمر این مقدار حدود ۷ طول بی بعد بوده است. همچنین مقایسه دو نمودار در شکل ۱۰ نشان می‌دهد میزان نیروی RSS مورد نیاز برای دنبال کردن مسیر مرجع در مقاله حاضر نسبت به مقاله کرمر وضعیت بهتری دارد. بنابراین استفاده از هوشمندسازی ارائه شده در مقاله حاضر، نه تنها منجر به اثبات ریاضی پایداری برای سیستم می‌شود بلکه عملکرد بهتری نیز دارد.



شکل ۹ خطای دنبال کردن مسیر مرجع، مقاله کرمر (الف) و روش هوشمندسازی پیشنهادی (ب)



شکل ۱۰ نیروی RSS لازم برای دنبال کردن مسیر مرجع، مقاله کرمر (الف) و روش هوشمندسازی پیشنهادی (ب)

نتیجه گیری

از طریق کنترلر بازخوردی حالت تاخیردار استفاده شده است. هوشمندسازی سیستم در سه مرحله انجام شده است: در ابتدا سیستم خطی (با حذف اثر وزن تجهیزات ته‌چاهی) کنترل شده است. سپس با اتخاذ رویکرد مقاوم و مبتنی بر فیزیک مساله حفاری انحرافی، ترم‌های غیر خطی سیستم به‌صورت نامعینی وارد سیستم شده و سیستم به فرم خطی دارای نامعینی تبدیل شد. در نهایت نیز مساله دنبال کردن برای سیستم حفاری انحرافی حل شد. علاوه بر اینکه روش هوشمندسازی ارائه شده در مقاله حاضر منجر به اثبات پایداری برای سیستم می‌شود، مقایسه نتایج عملکرد این هوشمندسازی با مهم‌ترین کار قبلی انجام شده در این زمینه، نشان داد که عملکرد آن نیز بهتر است. در یک نمونه خاص، دقت بالاتر، سرعت حدود ۴ برابر بیشتر و عدم داشتن اورشوت (در مقابل اورشوت ۶۰٪ کار قبلی) و کاهش نیروی لازم برای تغییر جهت سرمته نشان داده شد.

مهم‌ترین قید در تمامی مراحل حل این مساله، میزان تلاش کنترلی (نیروی وارده از سمت RSS) است که دارای محدودیت عملیاتی است. لذا برای واقعی و عملیاتی بودن مساله، هوشمندسازی به نحوی انجام شده است که تمامی پاسخ‌های ارائه شده در این بازه عملیاتی قرار گرفته‌اند. با توجه به این مساله و با استفاده از رویکرد مقاوم، بازه

در سالیان اخیر افزایش تقاضا برای دسترسی به مخازنی که نیاز به حفاری پیچیده دارند و همچنین توسعه شیل‌های نفتی موجب شده است تا حفاری انحرافی هوشمند به گونه‌ای که بتواند مسیر از قبل طراحی شده را با دقت بالا دنبال کند، مورد توجه بیشتر قرار گیرد. این موضوع به‌ویژه در لایه‌های نازک که امکان ورود چاه به لایه‌های مجاور وجود دارد و همچنین مسیرهای پیچیده سه‌بعدی دارای اهمیت بیشتری است. برای این منظور نیاز به یک مدل از سیستم حفاری انحرافی وجود دارد تا بتوان براساس آن سیستم را کنترل کرد. در این مقاله از مدل تحلیلی پرندر-دتورنی که گسترش حفره چاه را به‌صورت یک مدل تاخیردار غیر خطی دارای نامعینی توصیف می‌کند، استفاده شده است. تاکنون، برای هوشمندسازی این سیستم، اثبات پایداری مبتنی بر تابع لیپانوف سیستم‌های تاخیردار صورت نگرفته است. در این مقاله به‌منظور ایجاد امکان استفاده از تابع لیپانوف برای اثبات پایداری سیستم حفاری انحرافی، صورت‌بندی جدیدی از روابط سیستم انجام شد که در آن با یک کاهش مرتبه، سیستم اولیه که دارای سه حالت بود به یک سیستم دارای دو حالت تبدیل شد.

برای هوشمندسازی سیستم از تابع لیپانوف سیستم‌های تاخیردار و تبدیل آن به شروط LMI

۱: مقاومت جهت‌دهی جانبی (بی بعد)	نامعینی سیستم که به صورت عملیاتی قابل کنترل
۲: مقاومت جهت‌دهی زاویه‌ای (بی بعد)	باشد نیز به صورت $\frac{8}{3} < \eta II < 0.6$ محاسبه شده
۳: فاصله بخش های تجهیزات ته‌چاهی (m)	است. لازم به ذکر است بازه نامعینی تنها از کران
۴: وزن توزیع شده تجهیزات ته‌چاهی (بی بعد)	پایین محدود شده است و کران بالای نامعینی
۵: ضریب برهم‌کنش سنگ و سرشته (بی بعد)	مشکل محدودیت عملیاتی ندارد. این نتیجه‌گیری
۶: میزان نفوذ محوری سرشته در سنگ (m)	با فیزیک مساله نیز سازگار است؛ چرا که کران
۷: میزان نفوذ جانبی سرشته در سنگ (m)	پایین نامعینی باعث ایجاد نوسان‌های شدید در
۸: میزان نفوذ زاویه‌ای (رادیان)	دیواره چاه می‌شود که برای کنترل آن نیاز به
۹: تاخیر ثابت سیستم (s)	نیروی RSS بیشتری است.
۱۰: طول حفاری شده (بی بعد)	
۱۱: طول بی بعد بخش‌های تجهیزات ته‌چاهی	علائم و نشانه‌ها
(بی بعد)	F : نیرو (Pas)
۱۲: زمان (s)	F, M : ضریب تاثیر وابسته به نوع چینش تجهیزات
۱۳: بهره کنترلی	ته‌چاهی (بدون بعد)
۱۴: ماتریس (LMI)	θ : زاویه شیب تجهیزات ته‌چاهی (رادیان)
۱۵: تابع لیاپانوف	Θ : زاویه شیب حفره چاه (رادیان)
۱۶: P, Q : ماتریس مثبت معین	۱۷: وزن توزیع شده تجهیزات ته‌چاهی (بی بعد)
۱۸: ورودی کنترلی	I : نیروی جانبی RSS (بی بعد)
۱۹: ورودی مرجع	W : اغتشاش سیستم (بی بعد)
۲۰: میزان خطا	II : وزن موثر روی سرشته (بی بعد)

مراجع

- [1]. Carden R S, Grace R D (2007) Directional horizontal drilling manual, petroskills, 1st edition, Tulsa, Oklahoma, Petroskills, LLC. AN OGC Company, 1-409.
- [2]. Panchal N, Bayliss M T, Whidborne J F (2010) Robust linear feedback control of attitude for directional drilling tools, (13th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing), IFAC Proceedings, 43, 9: 92-97.
- [3]. Kremers N A H, Detournay E, Van De Wouw N (2015) Model-based robust control of directional drilling systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 24, 1: 226-239.
- [4]. Peymani Y (2007) Smart wells concept, elements and applications, Paper presented at the 2nd Iranian Petroleum and Energy Club Congress, Tehran, Iran.
- [5]. Geoph P. D. I. CAGC Column: Revised Alberta exploration directives will change the layout of future seismic programs, Official Publication of the Canadian Society of Exploration Geophysics, 1-43.
- [6]. Schlumberger, Aker Solutions and Subsea 7 Create Joint Venture, Houston, Texas, the USA, 1-27864.
- [7]. Wu K, Liu Z G, Sun C Y (2018) Robust control for a class of time-delay nonlinear systems via output feedback strategy, International Journal of Control, Automation and Systems, 16, 3: 1091-1102.
- [8]. Lubinski A, Woods H (1953) Factors affecting the angle of inclination and dog-legging in rotary bore holes, Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute, OnePetro.
- [9]. Perneder L (2013) A three-dimensional mathematical model of directional drilling, University of Minnesota.
- [10]. Downton G, Hendricks A (1999) New directions in rotary steerable drilling, Journal of Pascal and Francis Bibliographic Databases, 226: 26: 29.
- [11]. Downton G C, Ignova M (2011) Stability and response of closed loop directional drilling system using linear delay differential equations, IEEE International Conference on Control Applications (CCA), IEEE.

- [12]. Ma T, Li L (2018) Stability criteria on delay-dependent robust stability for uncertain neutral stochastic nonlinear systems with time-delay, *Journal of Inequalities and Applications*, 1: 1-19.
- [13]. Matheus J, Ignova M, Hornblower P (2014) A hybrid approach to closed-loop directional drilling control using rotary steerable systems, *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Society of Petroleum Engineers.
- [14]. Zafarian H, Ameri M, Vaghasloo Y A (2021) Error reduction of tracking planned trajectory in a thin oil layer drilling using smart rotary steerable system, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 107668.
- [15]. Fridman E (2014) *Introduction to time-delay systems: Analysis and control*, Springer.
- [16]. Wen J Y, Kreutz-Delgado K (1991) The attitude control problem, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36, 10: 1148-1162.
- [17]. Bryan H H, Cox J, Blackwell D, Slayden F W, Naganathan S (2009) High-dogleg rotary-steerable systems: A step change in drilling process, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers.
- [18]. Boukas E, Liu ZK (2004) Delay-dependent stabilization of singularly perturbed jump linear systems, *International Journal of Control*, 77, 3: 310-319.
- [19]. Ogata K (2010) *Modern control engineering*, Prentice hall, Technology and Engineering, 894.
- [20]. Sun H, Li Z, Hovakimyan N, Başsar T, Downton G (2012) $\mathcal{H}_1$ adaptive control for directional drilling systems, *IFAC Proceedings*, 45, 8: 72-77.
- [21]. Loukianov A, Léchappé V, Sarkar M K (2017) Robust control for uncertain linear delay systems via sliding mode control, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27, 18: 4825-4845.
- [22]. Krstić, M. (2009). *Delay compensation for nonlinear, adaptive, and PDE systems*, Springer, 978-0.