



بهبود بازده انرژی سیستم های هیدرولیک دیجیتال برای مساله ی کنترل موقعیت با استفاده از شیر با سرعت سوئیچ بالا

احسن سعیدزاده¹، سید مهدی رضاعی²، عبدالرضا رحیمی³، محمد زارعی نژاد^{4*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- استادیار، پژوهشکده فناوری های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران صندوق پستی 159163331، mzare@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 آبان 1394

پذیرش: 12 بهمن 1394

ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

سیستم های هیدرولیک دیجیتال

بازده انرژی

سوئیچ سریع

کنترل موقعیت

چکیده

عملگرهای هیدرولیکی به طور گسترده ای در صنایع مختلف به ویژه در مواقعی که نیروهای اعمالی بسیار بزرگ هستند استفاده می شوند. اما، این سیستم ها در بسیاری از موارد بازده انرژی پایینی دارند. به این منظور حجم بالایی از مطالعات توسط پژوهشگران این حوزه برای بهبود بازده سیستم های الکتروهیدرولیک سروو صورت گرفته است. یکی از جدیدترین شیوه های پیشنهادی جهت افزایش راندمان عملگرهای هیدرولیکی استفاده از سیستم های هیدرولیکی دیجیتال است. قیمت پایین و راندمان انرژی بهتر دو مزیت عمده ای هستند که موجب محبوبیت این سیستم ها در میان پژوهشگران شده است. این مقاله امکان استفاده از یک شیر روشن/خاموش با سرعت سوئیچ بالا به شیوه ای نوین به جای شیر هیدرولیکی سروو به منظور افزایش بازده را مورد بررسی قرار می دهد. در این روش دبی عبوری از شیر روشن/خاموش با تنظیم مقدار مناسب برای زمان کاری PWM اعمالی به آن کنترل می شود. در این جا دبی اضافی پمپ به جای عبور از شیر اطمینان مستقیماً در زمان خاموش بودن شیر به تانک تخلیه شده و در نتیجه اتلاف انرژی ناشی از تخلیه سیال با فشار بالا از طریق شیر اطمینان به طور قابل توجهی کاهش می یابد. در این مساله برای کنترل زمان کاری شیر، یک کنترلر غیرخطی از روش پسگام طراحی شده است. کارایی این روش با آزمایش آن روی تجهیزات هیدرولیکی و ارائه ی نتایج عملی صحه گذاری شده است.

Energy-Efficient Position Tracking For Digital Hydraulic Systems Using Fast-Switching Valve

Ahsan Saeedzadeh¹, Seyed Mehdi Rezaei¹, Abdolreza Rahimi¹, Mohammad Zareinejad^{2*}

1- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2-New Technologies Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1591633311, Tehran, Iran, mzare@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 November 2015

Accepted 01 February 2016

Available Online 20 April 2016

Keywords:

Digital Hydraulics
energy efficient
fast-switching valve
position control

ABSTRACT

Hydraulic actuators are widely used where high-magnitude forces are exerted; however, they suffer from low energy-efficiency in many cases. To address this issue, there has been a surge in the volume of researches devoted to improving the efficiency of electro-hydraulic servo systems. Digital Hydraulics is the most recent method, proposed by many researchers to improve the efficiency of hydraulic actuators. Low cost and better energy efficiency are two major advantages of these systems that make them popular among researchers. This paper discusses the possibility of using a fast-switching on/off valve in a novel way, instead of servo valves to improve the efficiency of these systems. For this purpose the flow running through the fast-switching valve controlled, employing proper duty cycle. The excess pump flow is discharged to the tank directly instead of going through the relief valve when the valve is off. Thus the wasted energy, caused by the relief valve, is reduced significantly. A nonlinear backstepping controller is designed to control the duty cycle of the PWM signal of the on/off valve. Effectiveness of this method is tested after conducting experiments on a hydraulic test rig and presenting the experimental results.

1- مقدمه

در صنایع مختلف و سیستم های سیار به کار گرفته می شوند [1]. اگر چه عملگرهای هیدرولیکی به دلیل قابلیت کنترل موقعیت مناسب همواره مورد توجه بوده اند، راندمان انرژی آن ها به نسبت پایین است. این موضوع باتوجه به

سیستم های الکتروهیدرولیکی به دلیل ویژگی هایی چون نسبت نیرو به سایز بالا، انتقال قدرت آسان، سرعت پاسخ مناسب و دقت زیاد به طور گسترده ای

Please cite this article using:

A. Saeedzadeh, S. M. Rezaei, A. Rahimi, M. Zareinejad, Energy-Efficient Position Tracking For Digital Hydraulic Systems Using Fast-Switching Valve, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 239-247, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Saeedzadeh, S. M. Rezaei, A. Rahimi, M. Zareinejad, Energy-Efficient Position Tracking For Digital Hydraulic Systems Using Fast-Switching Valve, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 239-247, 2016 (in Persian)

کاربرد وسیع آن ها در دستگاه های تولیدی [2]، ماشین های خاک برداری و کشاورزی [3]، صنایع شکل دهی [4]، صنایع هوافضا [5] و ... اهمیت بهبود بازده انرژی در این سیستم ها را دو چندان می نماید. مساله متداول مورد بررسی در سیستم های الکترو هیدرولیک کنترل موقعیت و نیروی عملگرهای هیدرولیکی است.

کنترل موقعیت عملگرهای هیدرولیکی معمولاً توسط یک شیر هیدرولیکی تناسبی یا سروو که فشار سیال عملگر هیدرولیکی را کنترل می کند صورت می پذیرد. در این سیستم ها عموماً از یک پمپ دبی ثابت و یک شیر اطمینان به منظور ایجاد یک منبع فشار ثابت استفاده می شود و شیر تناسبی¹ با ایجاد اختناق در مسیر سیال فشار عملگر هیدرولیکی را کنترل می کند. این شیرها اگرچه قابلیت کنترل پذیری خوبی دارند اما مشکلات زیادی از جمله کلویتاسیون، نشتی زیاد، حساسیت به آلودگی و از همه مهم تر قیمت بالا و اتلاف توان زیاد را به همراه دارند [6]. تحقیقات زیادی برای بهبود کارایی این سیستم ها انجام شده که از کنترلرهای مختلفی چون کنترلر مقاوم [7]، کنترلرهای غیر خطی [8]، کنترلر تطبیقی [9]، کنترلر مد لغزشی [10] و ... برای رسیدن به این هدف استفاده شده است.

چالش های ناشی از مصرف رو به رشد انرژی در جهان، محدودیت منابع آن و هزینه ی سرسام آوری که به اقتصاد جهانی تحمیل می کند و نیز مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف بی رویه ی منابع انرژی تجدید ناپذیر موجب شده است که توجه پژوهشگران به طراحی سیستم های کم مصرف و افزایش بازده فرآیندهای موجود جلب شود. در همین راستا، استفاده ی وسیع از سیستم های سرو هیدرولیک و بازده به نسبت پایین آن ها موجب توجه بیشتر به طراحی سیستم های سرو هیدرولیک کم مصرف شده است. یکی از روش های پیشنهادی، کنترل موقعیت عملگر به طور مستقیم با استفاده از یک پمپ دبی متغیر است [11]. با این که در این روش دبی عملگر هیدرولیکی مستقیماً توسط پمپ تامین شده و بازده انرژی سیستم به مقدار قابل توجهی بهبود می یابد؛ سرعت پاسخ و دقت پایین، پهنای باند کم و قیمت بالای این سیستم سبب محدودیت در استفاده از آن شده است. به علاوه استفاده از این سیستم برای عملگرهای هیدرولیکی نامتقارن با مشکلاتی همراه است [11]. روش دیگر استفاده از شیرهای کارتریجی تناسبی مستقل از هم به جای شیر سروو تناسبی [12] می باشد. در این روش 5 شیر کارتریجی به گونه ای در مدار قرار می گیرند که فشار محفظه مقاوم در برابر حرکت عملگر کاهش یافته و در نتیجه بازده انرژی افزایش یابد. در مقابل این روش نیازمند پیکربندی هیدرولیکی و کنترلر پیچیده ای است که موجب محدود شدن دامنه استفاده از آن می گردد. یکی از جدیدترین روش های پیشنهادی استفاده از منبع فشار متغیر است [13]. در این شیوه فشار سیستم در مواقعی که نیاز نیست پایین آورده شده و در نتیجه راندمان انرژی بهبود می یابد.

اخیراً سیستم های هیدرولیک دیجیتال² به وسیله ی جمعی از پژوهشگران به عنوان یکی از تکنولوژی های برتر در حوزه ی سیستم های الکترو هیدرولیکی معرفی شده اند. برای نمونه، در مرجع [6] که یکی از مراجع پر استناد در این مبحث می باشد، اهمیت سیستم های هیدرولیک دیجیتال به همراه مروری بر پیشینه ی تحقیقات انجام شده در بخش های مختلف آن ارائه شده است. همچنین مزایای این سیستم ها در هر کدام از این کاربردها مورد بحث قرار گرفته است. در سال 2014 پان و همکاران [14]، خاصیت القا کنندگی در سیال هنگام استفاده از شیرهای روشن/خاموش با فرکانس سوئیچ

بالا و تاثیر آن بر کاهش اتلاف انرژی در شیر را به صورت تئوریک و عملی مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق همچنین تاثیر پارامترهای مختلف مانند فرکانس باز و بسته شدن شیر، ابعاد لوله ی استفاده شده و زمان کاری شیر در هر دوره بر روی اتلاف انرژی و افت فشار در شیر و نوسانات فشار و دبی خروجی شیر مطالعه شده اند. در سال 2015 آقای ککتر و همکاران مداری هیدرولیکی طراحی کردند که در آن موقعیت یک عملگر خطی توسط دو شیر روشن/خاموش³ سریع کنترل می شود [15]. مدار طراحی شده که HBC⁴ نامیده می شود از مدل الکتریکی آن EBC⁵ اقتباس شده است. کنترلر طراحی شده در این مقاله وابستگی زیادی به مدل داشته و برای ساده کردن تحلیل معادلات غیر خطی حول نقطه ی کاری خطی سازی شده و نامعینی ها و دینامیک مدل نشده ی سیستم را نادیده گرفته است. این امر محدودیت های زیادی را بر عملکرد کنترلر اعمال کرده است. کارهای انجام شده در این زمینه به چند گروه شامل شیرهای هیدرولیک دیجیتال، پمپ های هیدرولیک دیجیتال، عملگرهای هیدرولیک دیجیتال، مبدل های هیدرولیک دیجیتال و DHPMS⁶ تقسیم بندی شده اند که معرفی کامل آن ها در [6] آورده شده است. در زمینه ی شیرهای هیدرولیک دیجیتال استفاده از شیرهای خاموش/روشن با سرعت سوئیچ بالا اخیراً در چندین تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله ی آن ها می توان به تحقیقات صورت گرفته برای بررسی میزان افت فشار و اتلاف انرژی در شیرهای روشن/خاموش با سرعت پاسخ بالا [14]، کنترل موقعیت عملگر هیدرولیکی با شیر روشن/خاموش چرخشی [16] و دستیابی به پمپ دبی متغیر با استفاده از یک شیر روشن/خاموش و پمپ دبی ثابت [17] اشاره کرد. نشتی پایین، عدم حساسیت به آلودگی، عدم کلویتاسیون قیمت پایین تر و اتلاف انرژی کمتر از جمله مزیت های این شیرها نسبت به شیرهای تناسبی سروو است.

در این مقاله امکان استفاده از یک شیر روشن/خاموش با سرعت سوئیچ بالا به شیوه ای نوین به جای شیر هیدرولیکی سروو به منظور افزایش بازده مورد مطالعه قرار می گیرد. برای این منظور با سوئیچ کردن مداوم شیر بین منبع فشار بالا و تانک دبی ورودی به عملگر هیدرولیکی و در نتیجه موقعیت آن کنترل می شود. به این ترتیب علاوه بر تخلیه مستقیم دبی اضافی پمپ به تانک، از خاصیت مومنتوم سیال برای دریافت دبی از فشاری پایین تر به سیستم استفاده شده و در نتیجه بازده سیستم بالا می رود. در ادامه ی این مقاله ابتدا در بخش 2 مدل دینامیکی سیستم آورده شده است. سپس یک کنترلر غیر خطی پسگام برای دنبال کردن موقعیت توسط عملگر هیدرولیکی در بخش 3 طراحی شده است؛ و سرانجام نیز در بخش 4 عملکرد کنترلر با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی روی مدل واقعی صحت گذاری گشته است. در انتها جمع بندی این مقاله در قالب بخش نتیجه گیری آمده است.

2- مدل دینامیکی سیستم

مدار پیشنهاد شده در این مقاله شامل یک پمپ دبی ثابت، یک شیر اطمینان و یک شیر با سرعت سوئیچ بالا است. شماتیک مدار پیشنهاد شده در شکل 1 نشان داده شده است. همان گونه که در طرف راست شکل دیده می شود از یک پمپ و شیر اطمینان دیگر جهت اعمال نیروی خارجی به عملگر هیدرولیکی استفاده شده است. همچنین برای اندازه گیری موقعیت عملگر هیدرولیکی و فشارهای سیستم یک پتانسیومتر به عنوان حسگر⁷ موقعیت و

³ On/Off valve

⁴ Hydraulic Buck Converter

⁵ Electric Buck Converter

⁶ Digital Hydraulic Power Management System

⁷ Sensor

¹ Proportional Valve

² Digital hydraulics

دو حسگر فشار به کار گرفته شده اند.

محاسبه نمود [1]:

$$\Delta P_v = \frac{\rho}{2C_d^2 A_v^2} q^2 \quad (1)$$

که در آن ΔP_v اختلاف فشار دو طرف شیر، ρ چگالی سیال، C_d ضریب تخلیه روزنه ی¹ شیر و A_v سطح مقطع ورودی شیر است، وقتی که شیر کاملاً باز می باشد، مقدار $\rho/2C_d^2 A_v^2$ در این جا با R_v نشان داده می شود که معرف مقاومت شیر می باشد.

2-2- افت فشار و القا کنندگی² در لوله

با فرض آرام بودن رژیم جریان داخل لوله هیدرولیکی افت فشار آن از رابطه ی (2) محاسبه می شود [1].

$$\Delta P_t = \frac{128L\mu}{\pi D^4} q \quad (2)$$

در این معادله L طول لوله، μ ویسکوزیته ی سیال، D قطر لوله و q دبی عبوری از لوله می باشد، مقدار $128L/\pi D^4$ در این معادله مقاومت لوله نامیده شده و با R_t نشان داده می شود.

افت فشار ناشی از القا کنندگی لوله را می توان از معادله پیوستگی برای سیال به صورت رابطه (3) بدست آورد.

$$\Delta P = \frac{\rho L dq}{A dt} \quad (3)$$

در رابطه ی فوق A سطح مقطع لوله و q دبی ورودی به عملگر از طریق لوله می باشد، همان طور که مشاهده می شود این معادله نشان می دهد که بین فشار عملگر و دبی آن یک رابطه ی خطی برقرار است. همان طور که در معادلات بالا نیز نشان داده شده است، با افزایش طول لوله (L) خاصیت القا کنندگی آن بیشتر می شود که تاثیر مثبتی در افزایش راندمان انرژی دارد، اما از طرف دیگر این مساله موجب افزایش افت فشار در لوله و نوسانات دبی می شود که زیاد مطلوب نیست، سطح مقطع لوله تاثیر عکس دارد؛ به این ترتیب که با کاهش سطح مقطع خاصیت القا کنندگی، افت فشار و نوسانات دبی افزایش پیدا می کند. به این منظور در پژوهش های انجام شده در این زمینه از لوله نسبتاً بلند (2 تا 4 متر) با قطر کوچک (قطر = 7 الی 10 میلی متر) استفاده می شود [14,16].

2-3- مدل دینامیکی عملگر هیدرولیکی

برای بدست آوردن مدل دینامیکی عملگر ابتدا لازم است رابطه ی بین فشار عملگر با دبی عبوری از لوله محاسبه شود. این رابطه را می توان براساس معادلات (1)، (2) و (3) به صورت زیر نوشت.

$$P_d - P_i = R_t q + R_v q^2 + I \frac{dq}{dt} \quad (4)$$

که در آن P_d فشار محفظه ی سمت راست عملگر هیدرولیکی، R_t مقاومت لوله هیدرولیکی، R_v مقاومت شیر روشن/خاموش، I القا کنندگی لوله و P_i فشار پورت فعال شیر روشن/خاموش است که از رابطه ی (5) بدست می آید:

$$\begin{aligned} P_i &= P_H & \text{for } 0 \leq t < \alpha T \\ P_i &= P_T & \text{for } \alpha T \leq t < T \end{aligned} \quad (5)$$

در این رابطه α سیکل کاری و T دوره ی سیگنال PWM اعمالی به شیر است.

به منظور مدل کردن فشار عملگر، برای محفظه ی سمت راست سیلندر یک حجم کنترل در نظر گرفته می شود. با در نظر گرفتن تراکم پذیری سیال تغییرات فشار را با توجه به قانون پیوستگی برای این حجم کنترل می توان به شکل رابطه (6) محاسبه نمود:

یکی از مزایای مهم مدل پیشنهادی از منظر راندمان انرژی، دریافت دبی از فشاری پایین تر توسط سیستم، به دلیل مونتوم سیال است. این امر موجب می شود استفاده از یک پمپ با ظرفیت پایین تر برای سیستم میسر شود و در نتیجه راندمان انرژی بهبود قابل توجهی پیدا کند. این پدیده که با عنوان القا کنندگی سیال شناخته می شود، زمانی اتفاق می افتد که شیر روشن/خاموش در موقعیت 2 (حالت خاموش) قرار دارد. در این حالت همانطور از معادله ی پیوستگی برمی آید سیال به حرکت خود از شیر به سمت عملگر ادامه می دهد اما دبی آن به تدریج کاهش می یابد. اگر شیر به مدت کافی در این موقعیت بماند این کاهش دبی ادامه پیدا می کند تا این که جهت حرکت سیال عکس شود ولی از آن جایی که شیر خیلی سریع تغییر حالت می دهد سیال این فرصت را پیدا نمی کند. این رفتار مشابه عملکرد سلف در یک مدار الکتریکی است. معادل الکتریکی مدل پیشنهادی در شکل 2 آمده است.

در شکل 2، مقاومت معادل شیر و لوله است و I ، معادل القا کنندگی لوله می باشد. در ادامه مدل دینامیکی تجهیزات استفاده شده در سیستم آورده شده است.

2-1- افت فشار در شیر روشن/خاموش

سرعت سیال در سیستم های هیدرولیکی معمولاً به دلیل محدودیت دبی پمپ و تجهیزات استفاده شده در سیستم کم است و بنابراین می توان با فرض آرام بودن رژیم جریان سیال افت فشار ناشی از شیر را به صورت رابطه (1)

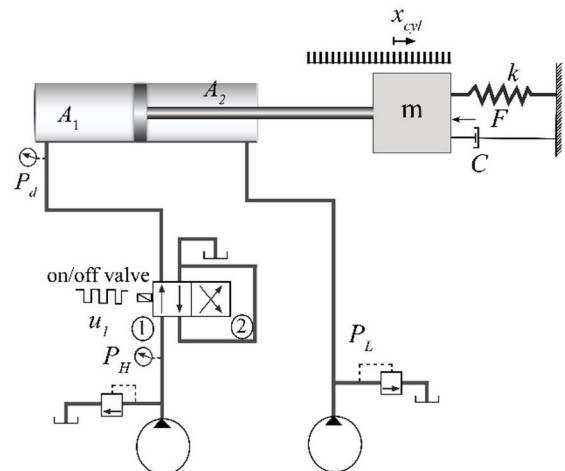


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed setup.

شکل 1 نمای شماتیک مدل پیشنهادی

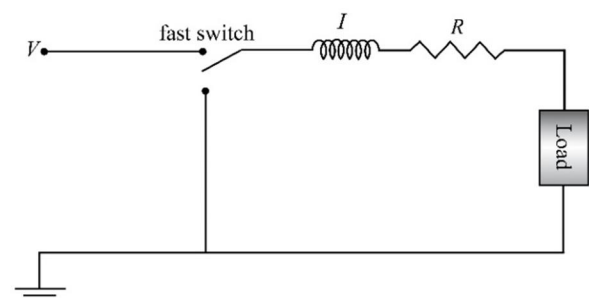


Fig. 2 Schematic diagram of the electrical equivalent of hydraulic setup

شکل 2 نمای شماتیک معادل الکتریکی مدل پیشنهادی

¹ Orifice
² Inertance

دیده می شود و دینامیک هر کدام از متغیرهای فضای حالت فقط به دینامیک متغیرهای فضای حالت قبلی و یکی بعد از آن متغیر وابسته است. با فرض $u=\alpha$ و $x_1=x_{cyl}$, $x_3=P_d$ معادله فضای حالت مدل پیشنهادی به صورت رابطه (10) بدست می آید.

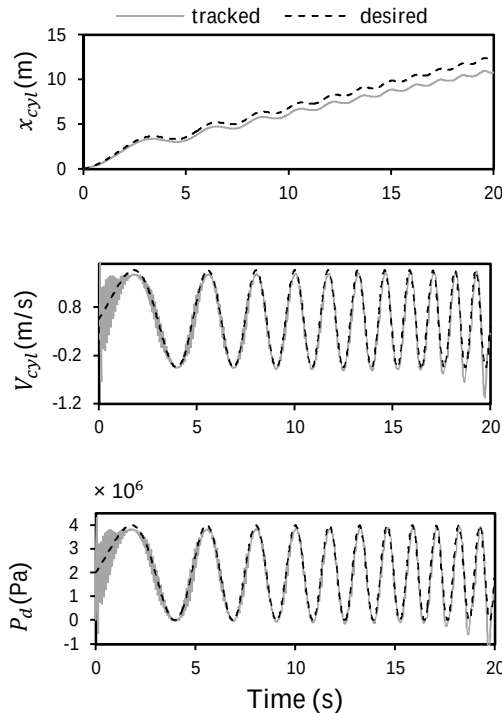


Fig. 3 Open-loop response of the primary and the modified model for 10 (Hz) switching frequency

شکل 3 پاسخ حلقه باز مدل اولیه و مدل اصلاح شده برای فرکانس 10 هرتز سوئیچ کردن شیر

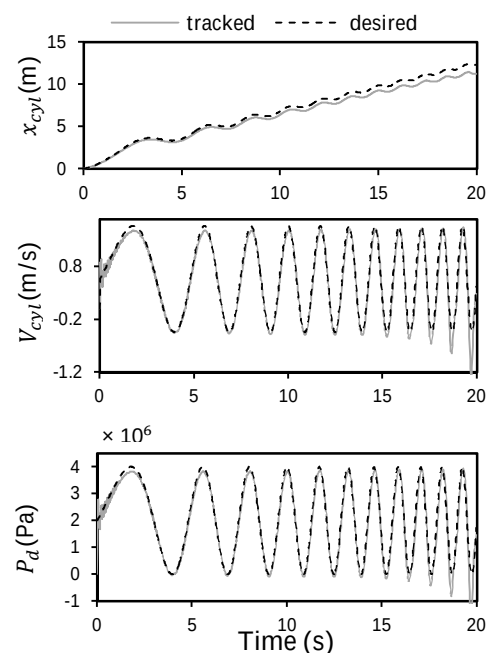


Fig. 4 Open-loop response of the primary and the modified model for 20 (Hz) switching frequency.

شکل 4 پاسخ حلقه باز مدل اولیه و مدل اصلاح شده برای فرکانس 20 هرتز سوئیچ کردن شیر.

$$\dot{P}_d = \beta \frac{q - A_1 \dot{x}_{cyl}}{V_{01} + A_1 x_{cyl}} \quad (6)$$

در این رابطه β مدول بالک سیال، A_1 سطح مقطع طرف راست سیلندر، x_{cyl} موقعیت سیلندر و V_{01} حجم اولیه محفظه سیلندر می باشد که در این جا وسط کورس سیلندر در نظر گرفته می شود.

دینامیک حرکت عملگر براساس قانون دوم نیوتن از رابطه ی (7) حاصل

می شود:

$$P_d A_1 - P_L A_2 = m \ddot{x}_{cyl} + c \dot{x}_{cyl} + k x_{cyl} + F \quad (7)$$

که در آن m ، c و k به ترتیب جرم، ضریب میرایی و ضریب سختی معادل عملگر و F نیروی خارجی اعمالی به عملگر می باشد.

همان طور که در معادلات (4) و (5) نشان داده شده است مدل پیشنهادی برای این سیستم وابسته به زمان و شدیداً غیرخطی می باشد که تحلیل رفتار سیستم و طراحی کنترلر برای آن را با مشکل مواجه می کند. به این منظور اصلاحاتی روی مدل انجام می شود تا وابستگی مستقیم به زمان برای مدل برداشته شود. برای این کار دبی عبوری از شیر روشن/خاموش، به جای استفاده از معادله ی (4)، از رابطه ی (8) تقریب زده می شود:

$$q = C_d A_v \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_H - P_d)} \quad (8)$$

در این رابطه موقعیت معادل اسپول شیر با استفاده از سیکل کاری شیر روشن/خاموش به صورت خطی در نظر گرفته شده و دبی عبوری از آن براساس معادله ی حاکم بر افت فشار ناشی از عبور سیال از یک روزنه که در مرجع [1] با d در نظر گرفتن معادله پیوستگی برای سیال بدست آمده است، محاسبه می شود. برای نمونه سیکل کاری صفر در معادله ی فوق نشان دهنده ی بسته بودن کامل مسیر سیال از پمپ به عملگر است و به طور مشابه سیکل کاری 1 نشان دهنده ی باز بودن کامل این مسیر است که معادله ی (4) نیز موید این موضوع است. برای صحت سنجی مدل اصلاح شده، متغیرهای حالت سیستم برحسب زمان برای مدل اولیه و مدل اصلاح شده مقایسه شده است. به این منظور یک ورودی چیرپ¹ برای سیکل کاری، به شیر روشن/خاموش اعمال شده و موقعیت و سرعت عملگر و فشار سیستم برای فرکانس 10، 20 و 100 هرتز PWM ورودی به شیر در شکل 3-6 رسم شده است.

همان گونه که در شکل 3-6 نشان داده شده است دقت مدل پیشنهادی با افزایش فرکانس سوئیچ کردن شیر روشن/خاموش بهبود می یابد. همچنین مشاهده می شود که خطای مدل برای فرکانس بالای تغییرات سیکل کاری افزایش می یابد.

3- طراحی کنترلر

در این قسمت یک کنترلر غیرخطی پسمام برای کنترل موقعیت عملگر هیدرولیکی به کار بسته می شود. این روش به خاطر ساختار مدل دینامیکی سیستم های هیدرولیکی و مقاوم بودن کنترلر در برابر عدم قطعیت های پارامتری بسیار موثر بوده و به همین دلیل توسط تعداد کثیری از پژوهشگران برای کنترل نیرو و موقعیت عملگرهای هیدرولیکی استفاده شده است. برای این امر باید مدل سیستم به فرم (9) نوشته شود [18].

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= f_a(\eta) + g_a(\eta) \xi \\ \xi &= f_b(\eta, \xi) + g_b(\eta, \xi) u, \quad g_b \neq 0 \quad \eta \in R^n, \quad \xi, u \in R \end{aligned} \quad (9)$$

همان طور که دیده می شود، در این رابطه ورودی فقط در معادله ی آخر

¹ chirp

این جا به آوردن آن بسنده می کنیم.

$$V_c = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}(x_2 + K_1x_1)^2 + \frac{1}{2}(x_3 - \frac{m}{A_1}\left((-1 + K_1^2\frac{k}{m} - \frac{K_1c}{m})x_1 + (\frac{c}{m} - K_1 - K_2)(x_2 + K_1x_1) - \frac{P_L A_2 + F}{m}\right))^2 \quad (11)$$

با انتخاب V_c به عنوان تابع کاندید لیاپانوف و با اعمال کردن شرط پایداری تابع لیاپانوف به صورت $\dot{V}_c < 0$ ورودی اعمالی برای سیستم به صورتی که در ادامه آمده است محاسبه می شود.

$$u = \left(-K_3(x_3 - \varphi_3) - \frac{m}{A_1}\left(1 - K_1^2\frac{cK_1}{m} - \frac{k}{m}\right)x_2 - \frac{m}{A_1}(K_1 + K_2 - \frac{c}{m})(-x_1 - K_2(x_2 + K_1x_1) + \frac{A_1}{m}(x_3 - \varphi_3) - A_1\left(\frac{x_2 + K_1x_1}{m}\right)\left(\frac{V_{01} + A_1x_1}{\beta C_d A_v \sqrt{\frac{2(P_H - x_3)}{\rho}} - A_1x_2}\right)\right) \quad (12)$$

که در آن φ_3 از رابطه (13) حساب می شود.

$$\varphi_3 = \frac{m}{A_1}\left(\left((-1 + K_1^2\frac{k}{m} - \frac{K_1c}{m})x_1 + (\frac{c}{m} - K_1 - K_2)(x_2 + K_1x_1) - \frac{P_L A_2 + F}{m}\right)\right) \quad (13)$$

همچنین مقادیر K_1 ، K_2 و K_3 اعداد ثابتی هستند که سرعت همگرایی سیستم را کنترل می کنند. انتخاب مقادیر بهینه برای این ثابت ها که به پارامترهای سیستم بستگی دارد را می توان با سعی و خطا یا روش های تحلیلی بهینه سازی بدست آورد. فرآیند طراحی کنترلر پسگام در مرجع [18] با جزئیات بیشتر آمده است.

شکل شماتیک سیستم حلقه بسته که در محیط شبیه سازی متلب استفاده شده در شکل 7 نمایش داده شده است.

4- بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

در این بخش کارایی کنترلر پیشنهاد شده با سیستم واقعی در آزمایشگاه صحنه گذاری شده است. سیستم آزمایشگاهی شامل یک عملگر هیدرولیکی، دو پمپ دبی ثابت و دو شیر اطمینان است. همچنین یک شیر سرو D761 سری ایزو 10372² اندازه 04³ محصول شرکت موگ به دلیل سرعت پاسخ بسیار بالای آن به عنوان شیر روشن/خاموش با سرعت سوئیچ بالا استفاده شده است. همان طور که در دفترچه راهنمای شرکت نیز نشان داده شده است این شیر توانایی پاسخ به ورودی تا فرکانس 100 هرتز بدون افت قابل توجهی در دامنه حرکت را دارد؛ بنابراین برای کاربرد در این شرایط مناسب می باشد. در شکل 8 عکسی از این سیستم آزمایشگاهی آورده شده است.

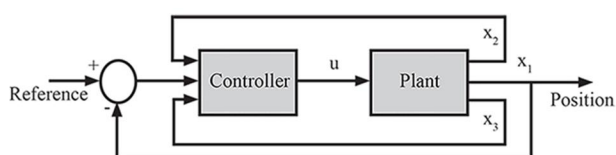


Fig. 7 Schematic block diagram of the close-loop system

شکل 7 نمای شماتیک سیستم حلقه بسته

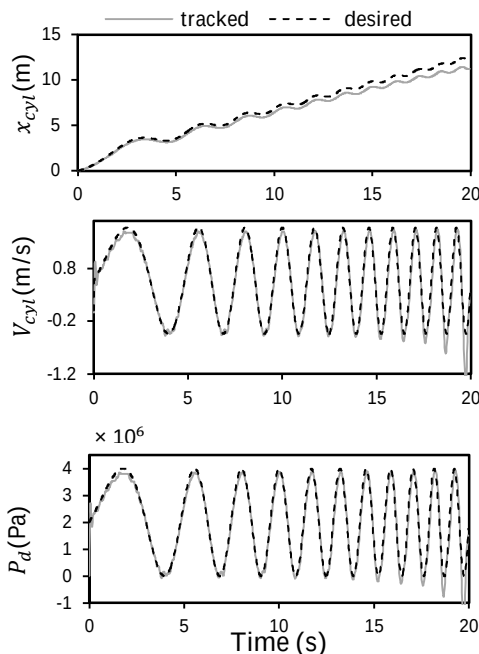


Fig. 5 Open-loop response of the primary and the modified model for 100 (Hz) switching frequency.

شکل 5 پاسخ حلقه باز مدل اولیه و مدل اصلاح شده برای فرکانس 100 هرتز سوئیچ کردن شیر.

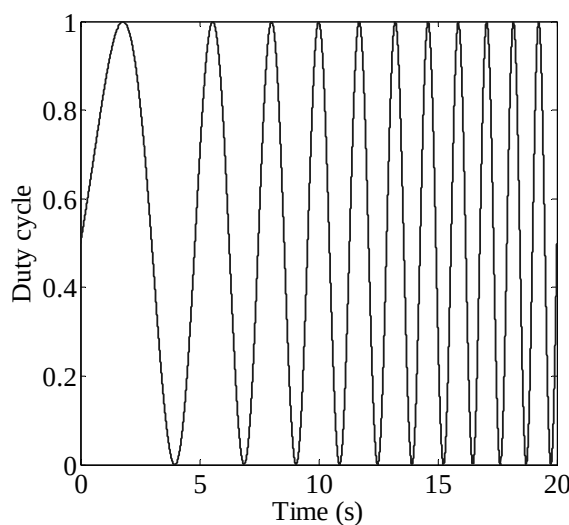


Fig. 6 Input duty cycle signal to the plants

شکل 6 ورودی زمان کاری سیستم

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(-cx_2 - kx_1 - F - P_L A_2 + A_1 x_3) \\ \dot{x}_3 &= \beta \frac{C_d A_v u \sqrt{\frac{2(P_H - x_3)}{\rho}} - A_1 x_2}{V_{01} + A_1 x_1} \end{aligned} \quad (10)$$

همان گونه در معادله (10) نشان داده شده است معادله ای فضای حالت به فرم (9) است. بنابراین روش پسگام به منظور طراحی کنترلر برای این سیستم قابل اعمال است. برای این کار ابتدا باید یک تابع کاندید لیاپانوف¹ برای سیستم در نظر گرفته شود. فرآیند انتخاب تابع کاندید لیاپانوف در الگوریتم طراحی کنترلر پسگام در مرجع [18] آمده است به این دلیل ما در

² ISO
³ Size

¹ Lyapunov Candidate Function

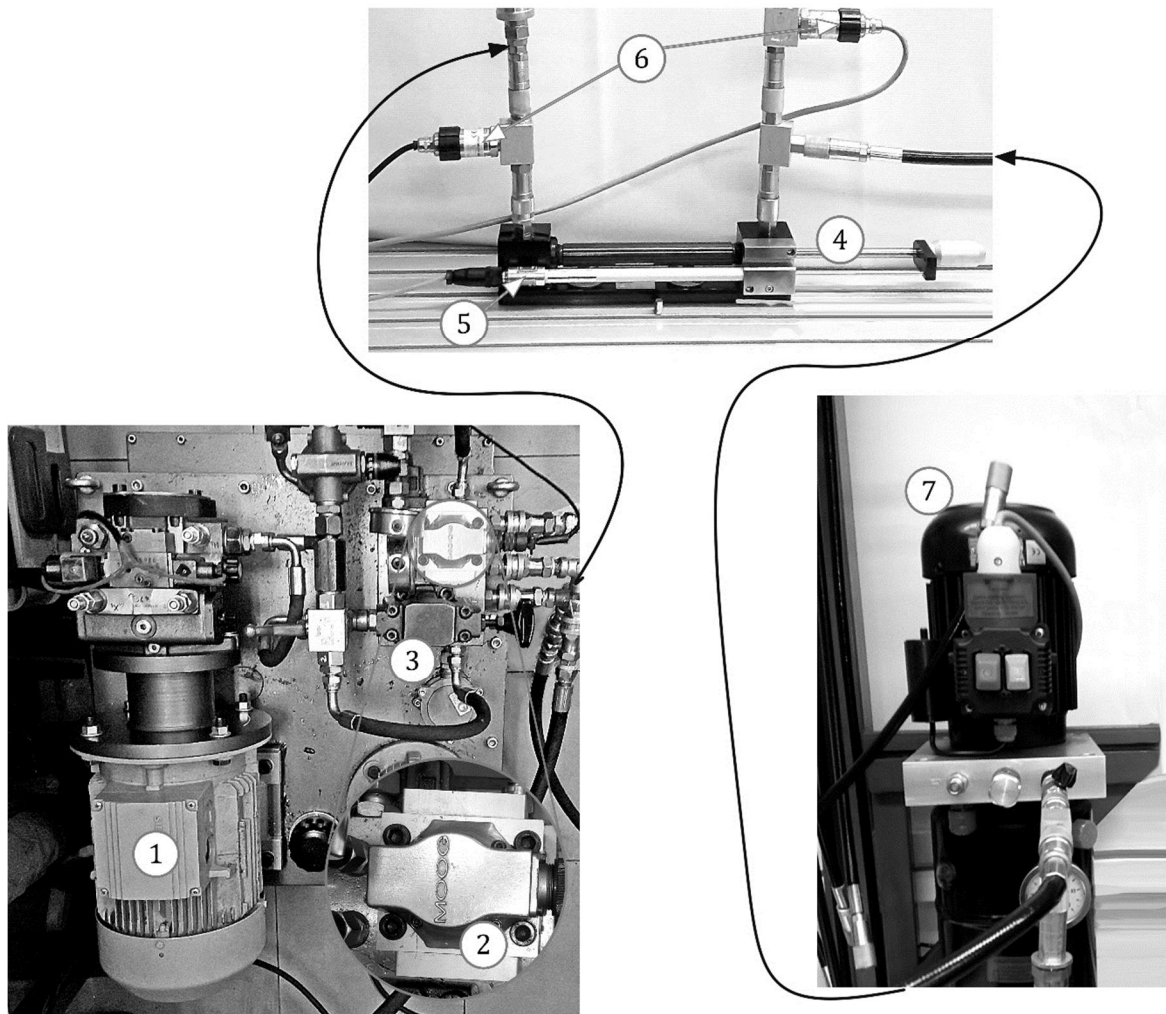


Fig. 8 Experimental setup: 1&7 hydraulic pumps, 2 servo valve, 3 relief valve, 4 hydraulic actuator, 5 position sensor, 6 pressure sensors

شکل 8 سامانه ی آزمایشگاهی: 1 و 7 پمپ دبی ثابت، 2 شیر سروو، 3 شیر اطمینان، 4 عملگر هیدرولیکی، 5 حسگر موقعیت، 6 حسگرهای فشار

کردن موقعیت نیز در این شکل ها آورده شده است. به منظور بررسی راندمان انرژی سیستم فشار سیستم نیز در شکل 13 و شکل 14 نشان داده شده است.

یکی از مهم ترین مزایای این مدل پیشنهادی بهبود راندمان انرژی سیستم است. بهبود راندمان در این سیستم ناشی از دلایل زیر است:

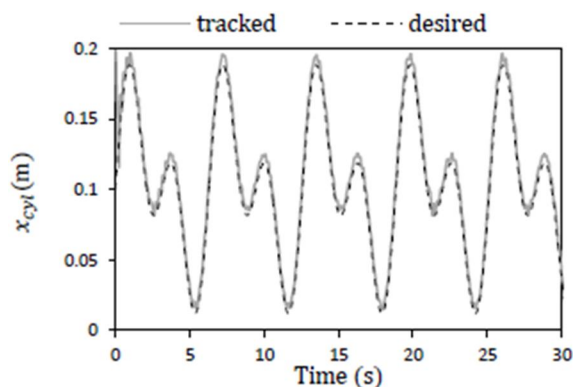


Fig. 9 Tracking performance of close-loop system for multi-frequency reference

شکل 9 عملکرد تعقیب موقعیت سیستم حلقه بسته برای سیگنال مرجع چند فرکانسی

موقعیت عملگر هیدرولیکی با یک پتانسیومتر خطی که به سیلندر هیدرولیکی متصل شده است اندازه گیری می شود. برای محاسبه ی فشارهای سیستم نیز از دو حسگر فشار که در شکل نشان داده شده استفاده شده است. به منظور اتصال تجهیزات آزمایشگاهی به کامپیوتر از یک برد تبادل داده¹ مدل PCI-1720 استفاده شده است. یک راه انداز² مدل MD03 به منظور اتصال شیر روشن/خاموش به خروجی دیجیتال به آنالوگ برد تبادل داده به کار رفته است. حسگرهای استفاده شده در مدار نیز به خروجی های آنالوگ به دیجیتال برد، وصل می شوند. کنترلر در محیط شبیه سازی متلب³ با گام زمانی 0.001 ثانیه اجرا شده و سیگنال های کنترلی لازم را تولید می کند.

در ادامه پاسخ سیستم حلقه بسته برای سیگنال مرجع چند فرکانسی و مربعی نشان در شکل 9 و شکل 10 داده شده است. استفاده از فرکانس های بالا برای روشن و خاموش کردن شیر موجب حرکت نرم عملگر هیدرولیکی می شود. به همین دلیل در این جا از فرکانس 100 هرتز برای شیر استفاده می شود. همان طور که در شکل 11 و شکل 12 مشاهده می شود خطای دنبال کردن موقعیت در حد قابل قبولی باقی می ماند. تلاش کنترلی و خطای دنبال

¹ Data Acquisition

² Driver

³ Matlab Simulink

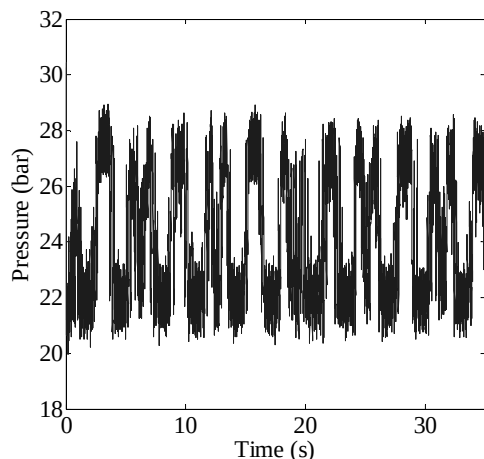


Fig. 13 System pressure (P_s) for multi-frequency reference

شکل 13 تغییرات فشار سیستم برای سیگنال مرجع چند فرکانسی

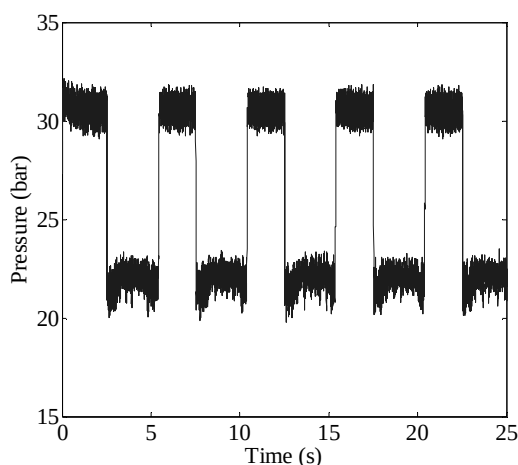


Fig. 14 System pressure (P_s) for square wave reference

شکل 14 تغییرات فشار سیستم برای سیگنال مرجع مربعی

انرژی می شود که خود را با داغ شدن شیر و سیال نشان می دهد. در مقابل در شیرهای روشن خاموش به دلیل باز بودن مسیر سیال، افت فشار و در نتیجه اتلاف انرژی در شیر ناچیز است.

- دبی اضافی پمپ (وقتی که شیر خاموش است) مستقیماً به تانک تخلیه می شود. در حالی که در سیستم های رایج کنترل موقعیت، این دبی باید از طریق شیراطمینان تخلیه شود که معمولاً فشار تنظیم شده ی آن مقدار بالایی است و موجب اتلاف قابل توجه انرژی می شود.

- در این سیستم، به دلیل مومنتوم سیال، امکان دریافت دبی از تانک وجود دارد. بنابراین می توان از پمپ با دبی پایین تر نسبت به سیستم های رایج برای کار مشابه استفاده کرد.

به منظور روشن شدن این موضوع توان مصرفی سیستم هیدرولیک دیجیتال پیشنهادی با مدل مرسوم EHSS که از شیر سروو برای کنترل موقعیت استفاده می شود، مقایسه شده است. با فرض این که در هر دو سیستم از یک پمپ دبی ثابت استفاده می شود، توان مصرفی را می توان از رابطه ی (14) محاسبه نمود.

$$\text{Overall Power Consumption} = Q_p \times P_s \quad (14)$$

در این معادله Q_p دبی و P_s فشار خروجی پمپ است. فشار پمپ برای سیستم مرسوم EHSS برابر کمینه فشار قابل تنظیم برای شیر اطمینان است

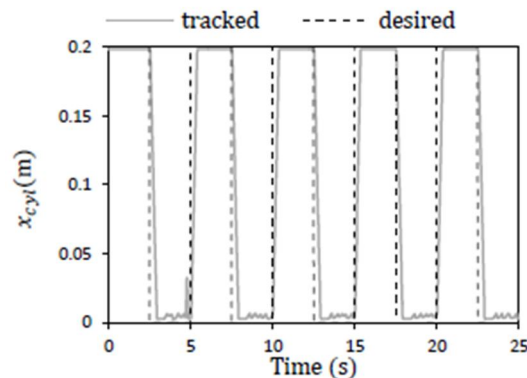


Fig. 10 Tracking performance of close-loop system for square wave reference

شکل 10 عملکرد تعقیب موقعیت سیستم حلقه بسته برای سیگنال مرجع مربعی

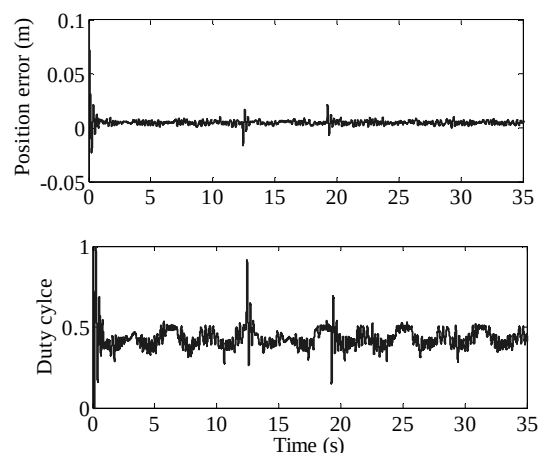


Fig. 11 Position tracking error and valve duty cycle for multi-frequency reference

شکل 11 خطای تعقیب موقعیت و زمان کاری سیگنال اعمالی به شیر برای سیگنال مرجع چند فرکانسی

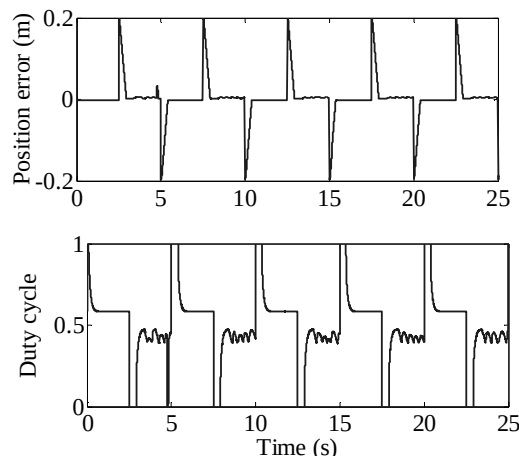


Fig. 12 Position tracking error and valve duty cycle for square wave reference

شکل 12 خطای تعقیب موقعیت و زمان کاری سیگنال اعمالی به شیر برای سیگنال مرجع مربعی

- در سیستم هایی که کنترل موقعیت با شیر تناسبی یا سروو انجام می شود، شیر با تنگ کردن مسیر حرکت سیال موجب افت فشار و کنترل فشار خروجی می شود. این افت فشار منجر به اتلاف

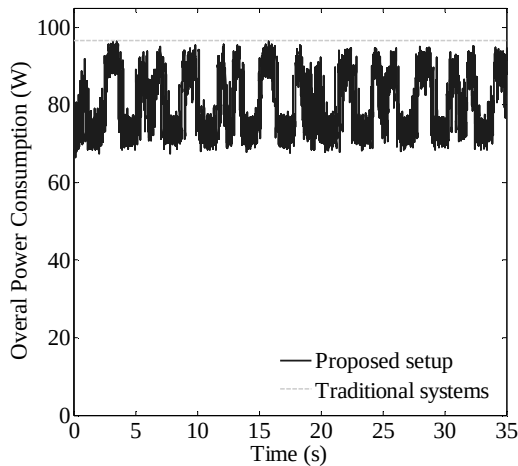


Fig. 16 Overall Power Consumption in traditional EHS (dash) and proposed system (solid) for multi-frequency reference

شکل 16 توان مصرفی در سیستم مرسوم EHSS (خط چین) و سیستم پیشنهاد شده (خط پر) برای سیگنال مرجع مربعی

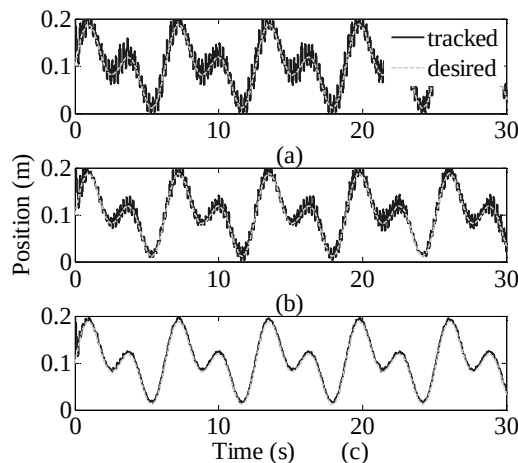


Fig. 17 Tracking performance for different switching frequency: (a) 20 Hz, (b) 50 Hz and (c) 100 Hz

شکل 17 عملکرد تعقیب موقعیت برای فرکانس های سوئیچ کردن مختلف: (a) 20 هرتز، (b) 50 هرتز و (c) 100 هرتز

انرژی در این روش می باشد. در این آزمایش همچنین تأثیر فرکانس سوئیچ کردن شیر بر روی کارایی سیستم مورد بررسی قرار گرفته و مشاهدات نشان می دهد که افزایش فرکانس سوئیچ کردن شیر تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سیستم دارد. این موضوع نشان دهنده اهمیت طراحی شیرهای روشن/خاموش با سرعت پاسخ بالا است که اخیراً تلاش های زیادی برای طراحی و ساخت نمونه های صنعتی از آن ها شده به ویژه با توجه به این که هزینه ی ساخت آن کمتر از شیرهای سروو برآورد شده است [6,14,15,19].

6- مراجع

- [1] H. E. Merritt, *Hydraulic control systems*: John Wiley & Sons New York, pp. 10-62, 1967.
- [2] Y. Koren, *Computer control of manufacturing systems*: McGraw-Hill New York, pp. 87-96, 1983.
- [3] T. H. Ho, K. K. Ahn, Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system, *Automation in Construction*, Vol. 22, No. 2, pp. 444-458, 2012.
- [4] K. Osakada, K. Mori, T. Altan, P. Groche, Mechanical servo press technology for metal forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 2, pp. 651-672, 2011.
- [5] Botten, S.L., Whitley, C.R. and King, A.D., 2000. Flight control actuation

به طوری که سیستم بتواند در حضور نیروی خارجی سیگنال مرجع موقعیت را دنبال کند در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل 15 و شکل 16 نمایش داده شده است بازده سیستم به مقدار قابل ملاحظه ای بهبود یافته است. البته باید در نظر داشت که، همان طور که پیشتر گفته شد چون سیستم هیدرولیک دیجیتال پیشنهادی توانایی دریافت دبی از ورودی فشار پایین شیر را نیز دارد می توان از پمپ با دبی کمتری نسبت به سیستم مرسوم برای آن استفاده نمود و در نتیجه بازده انرژی حتی بیشتر از آن چه در این شکل ها نشان داده شده، خواهد شد.

تأثیر فرکانس باز و بسته شدن شیر بر روی کارایی سیستم نیز در این جا مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار فرکانس های 20 و 50 و 100 هرتز برای PWM اعمالی به شیر استفاده شده و پاسخ کنترل موقعیت هر کدام از آن ها برای ورودی مرجع چند فرکانسی در شکل 17 رسم شده است. همان طور که دیده می شود، دقت سیستم برای فرکانس های بالاتر، بیشتر است. دلیل این امر کم شدن نوسانات دبی و فشار در فرکانس های بالا است. علاوه بر سرعت پاسخ شیر، یکی دیگر از عوامل محدود کننده فرکانس طبیعی سیستم است. به این منظور باید فرکانس سوئیچ کردن شیر به گونه ای انتخاب شود که نزدیک فرکانس طبیعی سیستم نباشد؛ زیرا موجب آسیب رسیدن به تجهیزات و کاهش بازده سیستم می شود. تحلیل و بررسی نوسانات دبی و فشار در شیرهای روشن خاموش در مرجع [14] آمده است.

5- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم هیدرولیک دیجیتال با هدف افزایش راندمان انرژی سیستم های هیدرولیکی در مساله ی کنترل موقعیت پیشنهاد شده است. به این منظور به جای استفاده از شیر تناسبی سروو؛ یک شیر روشن/خاموش با سرعت سوئیچ بالا برای کنترل موقعیت عملکرد هیدرولیکی به کار گرفته شده و در نتیجه ی اتلاف انرژی ناشی از ایجاد اختناق توسط شیر تناسبی و تخلیه ی دبی اضافی به تانک از طریق شیر اطمینان، که در روش های مرسوم از عوامل اصلی بازده پایین سیستم های هیدرولیکی می باشد، برطرف شده است. یک کنترلر غیرخطی از روش پسگام به منظور کنترل موقعیت عملکرد هیدرولیکی طراحی گردیده و با آزمایش کنترلر روی مدل واقعی کارایی مدل پیشنهاد شده صحت گذاری شده است. نتایج آزمایش بیانگر بهبود قابل توجهی راندمان

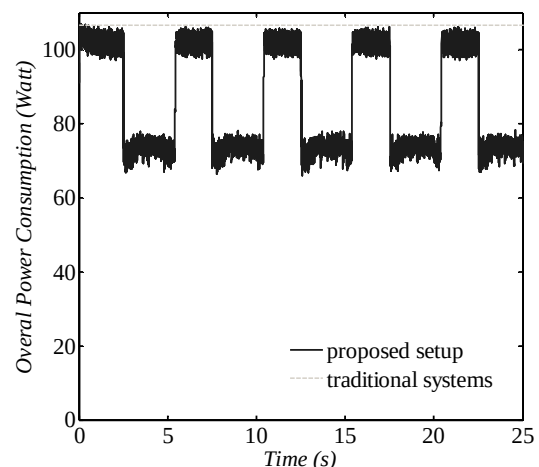


Fig. 15 Overall Power Consumption in traditional EHS (dash) and proposed system (solid) for multi-frequency reference

شکل 15 توان مصرفی در سیستم مرسوم EHSS (خط چین) و سیستم پیشنهاد شده (خط پر) برای سیگنال مرجع چند فرکانسی

- [13] A. Tivay, M. Zareinejad, S. M. Rezaei, K. Baghestan, A switched energy saving position controller for variable-pressure electro-hydraulic servo systems, *ISA transactions*, Vol. 53, No. 4, pp. 1297-1306, 2014.
- [14] M. Pan, N. Johnston, A. Plummer, S. Kudzma, A. Hillis, Theoretical and experimental studies of a switched inerance hydraulic system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 228, No. 1, pp. 12-25, 2014.
- [15] H. Kogler, R. Scheidl, Linear motion control with a low-power hydraulic switching converter-Part I: Concept, test rig, simulations, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 44, No. 9, pp. 1-11, 2015.
- [16] H. Kogler, R. Scheidl, Linear motion control with a low-power hydraulic switching converter-Part II: Flatness-based control, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 44, No. 9, pp. 11-23, 2015.
- [17] H.-S. Jeong, H.-E. Kim, Experimental based analysis of the pressure control characteristics of an oil hydraulic three-way on/off solenoid valve controlled by PWM signal, *Journal of dynamic systems, measurement and control*, Vol. 124, No. 1, pp. 196-205, 2002.
- [18] H. K. Khalil, J. Grizzle, *Nonlinear systems*: Prentice hall New Jersey, pp. 589-604, 1996.
- [19] J. J. Wu, J. D. Van de Ven, Development of a High-Speed On-Off Valve for Switch-Mode Control of Hydraulic Circuits With Four-Quadrant Control, in *Proceeding of, American Society of Mechanical Engineers*, pp. 281-288, 2010.
- technology for next-generation all-electric aircraft. *Technology Transfer and Training*, Vol. 23, No. 6, pp.55-68.
- [6] M. Linjama, *Digital Fluid Power: State of the Art*, Proceedings of The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, May 18-20, 2011.
- [7] V. Milić, Ž. Šitum, M. Essert, Robust H_{∞} position control synthesis of an electro-hydraulic servo system, *ISA transactions*, Vol. 49, No. 4, pp. 535-542, 2010.
- [8] M. R. Sirospour, S. E. Salcudean, Nonlinear control of hydraulic robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182, 2001.
- [9] C. Guan, S. Pan, Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters, *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 11, pp. 1275-1284, 2008.
- [10] Y. Lin, Y. Shi, R. Burton, Modeling and robust discrete-time sliding-mode control design for a fluid power electrohydraulic actuator (EHA) system, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-10, 2013.
- [11] J. D. Zimmerman, Toward optimal multi-actuator displacement controlled mobile hydraulic systems, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Indiana, 2012.
- [12] S. Liu, B. Yao, Coordinate control of energy saving programmable valves, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 34-45, 2008.