



طراحی و پیاده سازی کنترل کننده تطبیقی برای کنترل موقعیت یک عملگر نیوماتیک تحت بارگذاری متغیر

مصطفی تقی زاده^{1*}، سید مهدی چاووشیان²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی، 1743524155، mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 بهمن 1394

پذیرش: 18 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 30 خرداد 1395

کلید واژگان:

کنترل موقعیت

عملگر نیوماتیک

کنترل کننده تطبیقی

سیگنال PWM

چکیده

در شرایط بارگذاری یکنواخت، استفاده از یک کنترل کننده با ضرایب ثابت می تواند برای سیستم سرونوماتیک قابل قبول باشد؛ اما در شرایط بارگذاری متغیر با دامنه تغییرات گسترده برای دستیابی به عملکرد مطلوب، روش های پیشرفته تر کنترلی بایستی مدنظر قرار گیرند. در این مقاله کنترل کننده ای تطبیقی برای یک سیستم سرونوماتیک با شیر دو وضعیتی و تحریک PWM تحت بارگذاری متغیر طراحی گردیده و روی آن پیاده سازی شده است. در سیستم سرونوماتیک تحت آزمایش به جای استفاده از شیر گران قیمت سرو یا پروپرشال از شیر دو وضعیتی پاسخ سریع با تحریک PWM استفاده شده است. شناسایی پارامترهای سیستم با استفاده از اطلاعات ورودی - خروجی به صورت بلادرنگ انجام شده و پارامترهای کنترل کننده بطور لحظه ای تنظیم می شوند. در طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی از الگوریتم رگولاتورهای خودتنظیم استفاده شده است. کنترل طراحی شده از طریق یک کارت واسط کامپیوتری روی سیستم سرونوماتیک مدنظر اعمال شده و عملکرد آن مورد بررسی و مقایسه با روش های کنترل تناسبی - مشتق گیر و کنترل چندمدله قرار گرفته است. در روش کنترل چند مدله، بر خلاف روش ارائه شده می بایست تعداد محدود و گسسته ای بار مرجع را در میان گستره ی تغییرات بار در نظر گرفته و کنترل کننده های ثابت را متناظر با این نقاط، طراحی یا تنظیم نمود. آزمایش های تجربی انجام شده تحت بارگذاری متغیر عملکرد مطلوب کنترل کننده تطبیقی را به ازای گستره ی کامل تغییرات بار نشان می دهند.

Adaptive control for position control of a pneumatic actuator under variable loads

Mostafa Taghizadeh*, Seyed Mahdi Chavoshian

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* P.O.B. Tehran, Iran, 1743524155, mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 February 2016
Accepted 07 May 2016
Available Online 19 June 2016

Keywords:
Position control
Pneumatic Actuator
Adaptive Controller
PWM

ABSTRACT

Under a constant loading condition, use of a controller with constant coefficients can be acceptable for servo pneumatic systems. However, in variable loads with widespread changes, more advanced control methods should be considered to achieve desirable performance. In this paper, an adaptive controller is designed and implemented to a variably loaded servo pneumatic system with PWM driven switching valve. In the experimental setup, a pneumatic circuit is used which consists of one PWM driven fast switching valve instead of an expensive servo or proportional valve. In the designed adaptive controller, real time identification of system parameters is performed using input-output data and controller parameters are adjusted instantaneously. "Self-tuning regulators" algorithm in which the desired closed loop poles and zeroes are predefined, is applied to design the proposed controller. The designed controller is applied to the pneumatic actuator via an interface board and its results are compared to results of a PD and a multi model controller. Unlike the proposed method which varies the control parameters continuously according to load variations, in multi-model method the control law is selected among a number of fixed controllers. Experimental results demonstrate the high performance of the adaptive controller under variable loads.

1- مقدمه

مواد اولیه مورد نیاز، تعمیرپذیری کم هزینه و آسان و قیمت تمام شده پایین از جمله ویژگی های مطلوب این عملگرها هستند. در نیوماتیک مزایای موتورهای الکتریکی مانند عملکرد تمیز و قابل اطمینان و مزایای سیستم های هیدرولیکی مثل قابلیت اعمال مستقیم و بدون واسطه به بار در یک جا جمع

ویژگی های فراوان و بعضاً منحصر به فرد عملگرهای نیوماتیکی باعث شده که این عملگرها از جمله ی پرکاربردترین عملگرهای صنعتی باشند. ویژگی هایی چون سرعت، قابلیت اطمینان، عملکرد و ساختار ساده، دسترسی آسان به

شده‌اند. علاوه بر اینها سیستم‌های نیوماتیکی در مقایسه با دو سیستم دیگر دارای مزایای ویژه ای مثل نرمی¹ ذاتی هستند؛ که دلیل آن قابلیت تراکم هوا می‌باشد. این مزیت در کاربردهای خاص مثل کاربردهای رباتیکی که در آن ربات با انسان در تعامل است، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. اما وجود عوامل غیرخطی و پارامترهای متغیر با زمان، استفاده از نیوماتیک در کاربردهای سرو را با مشکل مواجه می‌نماید. با این وجود مزایای سیستم‌های نیوماتیک از یک سو و پیشرفت‌ها در تئوری و تکنولوژی کنترل از سوی دیگر، سرونوماتیک را در مسیر تبدیل به یک سروتکنولوژی مطلوب قرار داده است. در مقاله ای که در سال 1996 منتشر شد، مور و پو مروری بر توسعه فناوری سرونوماتیک و مقایسه‌ی محاسن و محدودیت‌های آن با سایر فناوری‌های مشابه، ارائه داده‌اند [1].

چهار جزء اصلی یک سیستم سرونوماتیک عبارت از عملکرد، شیر کنترلی، کنترل کننده و اندازه‌گیر است. برای هر یک از این اجزای چهارگانه، گزینه‌های مختلفی وجود دارد و هر ترکیب چهارتایی از میان گزینه‌های موجود منجر به تحقق یک سیستم سرونوماتیک متفاوت می‌شود. در این میان تقسیم‌بندی از نقطه نظر شیر مورد استفاده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که بر این اساس این سیستم‌ها به دو دسته‌ی سیستم‌های سرونوماتیک استاندارد (با شیرهای سرو یا پروپرشنال) و سیستم‌های سرونوماتیک با شیرهای دو وضعیتی² تحریک شده توسط سیگنال PWM² تقسیم می‌شوند. اکثر مقالات منتشر شده در زمینه‌ی سرونوماتیک به تحقیق پیرامون سیستم‌های سرو نیوماتیک استاندارد پرداخته‌اند که در آنها از شیرهای پروپرشنال یا سرو (با عملکرد پیوسته) استفاده شده است [2]. اما این شیرها معمولاً حجیم و گران قیمت بوده و بهره برداری و تعمیر آنها در مقایسه با شیرهای دو وضعیتی مشکل‌تر است. این در حالیست که شیرهای دو وضعیتی قیمت پایین‌تر (حدود یک دهم) نسبت به شیرهای سرو و پروپرشنال دارند. به منظور کاهش هزینه‌ها و گسترش کاربرد سیستم‌های سرونوماتیک، می‌توان از شیرهای دو وضعیتی پاسخ سریع استفاده کرد که با سیگنال PWM با فرکانس حدود 50 هرتز تحریک می‌شوند و بدین ترتیب عملکرد شبه پیوسته پیدا می‌کنند [3].

اولین کاربردهای تکنیک PWM در سیستم‌های سرونوماتیک به سال‌های 1968 توسط گلدشتاین و همکارش باز می‌گردد [4]. پس از آن نوریتسوگو در سال 1987 دومقاله ارائه کرد [5,6] که در آنها از سه شیر دو وضعیتی با تحریک PWM و یک کنترل کننده تناسبی با فیدبک موقعیت و سرعت استفاده شده بود. سیستم‌های سرو نیوماتیک با تحریک PWM مزیتی نسبی دیگری در مقایسه با سیستم‌های استاندارد دارند که انعطاف آنها در طراحی مدار نیوماتیک است. برای مدار نیوماتیک تعداد و انواع متفاوتی از شیرهای پاسخ سریع را می‌توان مورد استفاده قرار داد [3,7-10]. مدار نیوماتیک انتخاب شده اثر عمده‌ای بر خطی بودن سیستم دارد. وارسولد و بون [7] از یک مدار نیوماتیک با دو شیر 2-3 استفاده نموده و خطی بودن رابطه‌ی بین ورودی - خروجی را با طرح پالس ویژه‌ای بهبود بخشیده‌اند. تقی زاده و همکاران [2] مدلی غیرخطی از شیر نیوماتیک پاسخ سریع با تحریک PWM را با لحاظ نمودن زیر سیستم‌های الکترومغناطیسی، مکانیکی و سیالاتی ارائه نموده‌اند. آنها استراتژی ساده‌سازی جدیدی را برای این مدل خطی ارائه نموده و به منظور استفاده از این مدل در کنترل PWM، مدل استاتیکی بین ورودی سیکل وظیفه و میانگین جابجایی اسپول را با استفاده

از این روش ساده‌سازی بدست آورده‌اند. همچنین تقی‌زاده و همکاران [3] مدار نیوماتیک جدیدی با استفاده از تنها یک شیر دو وضعیتی با تحریک PWM را معرفی نموده و رفتار شبه خطی آن را با استفاده از تست‌های حلقه باز و حلقه بسته نشان داده‌اند. این مدار نیوماتیک که ساده و کم هزینه بوده و با کاهش نویز همراه است، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور درک عمیق و کامل از اجزای داخل سیستم دستیابی به یک مدل تحلیلی، که از روابط فیزیکی حاکم بر اجزای سیستم تشکیل شده، ضروری است. در زمینه‌ی سیستم‌های سرونوماتیک استاندارد تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی تحلیلی سیستم صورت گرفته است. اما برای مدل‌سازی تحلیلی سیستم سرونوماتیک با شیرهای دو وضعیتی و تحریک PWM تعداد مقالات بسیار محدود است. کانت و سینگ [11] رفتار دینامیکی یک سیستم سرونوماتیک با شیر دو وضعیتی را به عنوان یک سیستم خطی متغیر با زمان بررسی کردند. یی و همکارانش دو مدل برای شیرهای سلونوئیدی مورد استفاده در روش PWM ارائه دادند [12]. آنها در مدل‌سازی خود زمانهای تأخیر شیر را لحاظ کرده بودند.

مهمترین قسمت در طراحی یک سیستم سرونوماتیک ارائه‌ی کنترل کننده برای آن است. در زمینه طراحی کنترل کننده‌ی خطی لای و همکاران [13] یک کنترل کننده‌ی دو حلقه‌ای برای کنترل موقعیت سیلندر سیستم نیوماتیک با تحریک PWM طراحی نموده‌اند. حلقه‌ی داخلی یک کنترل کننده‌ی PI برای فشار، و حلقه‌ی اصلی یک PD کنترلر بود که روی موقعیت سیلندر کار می‌کرد. جنتیله و همکاران نیز از یک کنترل کننده‌ی PID استفاده کردند که پارامترهای آن ابتدا به روش زیگلر و نیکولز تنظیم شده و سپس با استفاده از روش‌های ابتکاری و سعی و خطا اصلاح می‌شدند [14]. وارسولد و بون [7] با استفاده از روش‌های شناسایی یک مدل گسسته‌ی خطی برای سیستم به دست آورده و سپس یک کنترل کننده‌ی PID دیجیتال به‌همراه جبران کننده اصطکاک برای آن طراحی کردند. عملکرد مطلوب و مقاوم بودن سیستم به وسیله چند آزمایش نشان داده شده است.

اگرچه سیستم کنترل خطی طراحی شده در [7] جزء تحقیقات خوب در این زمینه محسوب می‌شوند، اما سیستم سرونوماتیک اساساً یک سیستم غیرخطی است و باید در چارچوبی غیرخطی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. پائول و همکاران یک کنترل کننده غیرخطی برای سیستم سرونوماتیک با شیر دو وضعیتی ارائه کردند که پایداری را از دیدگاه لیپانوف تضمین می‌کرد [15]. البته سیگنال کنترلی آنها یک سیگنال PWM نبود؛ اما از آنجا که از شیر دو وضعیتی استفاده کرده بودند، مقاله آنها در این بخش قابل ذکر است. اگرچه مدل آنها غیرخطی بود ولی عوامل غیرخطی مهمی مثل دینامیک غیرخطی فشار در محفظه‌های سیلندر و تمایز بین جریان مادون صوت و مافوق صوت در شیر را در نظر نگرفته بودند. آن و همکاران نیز کنترل هوشمند این سیستم‌ها را با استفاده از شبکه‌های عصبی مورد بررسی قرار دادند [16]. شن و همکاران برای مدل سیستم همان روش قبلی خود را به کار گرفته ولی این بار بجای در نظر گرفتن یک تابع تبدیل خطی مرتبه اول، از معادله‌ی غیرخطی فشار استفاده نموده و با توجه به مدل غیرخطی بدست آمده یک کنترل کننده‌ی مد لغزشی برای سیستم طراحی کردند [17-19]. اگرچه انتظار می‌رود که با استفاده از مدل و کنترل کننده‌ی غیرخطی نتایج بهتری حاصل شود ولی بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم جدید به چشم نمی‌خورد. علاوه براین، کنترل مد لغزشی در عمل با مشکل لرزش مواجه است. نگوین و همکارانش نیز در مقاله‌ای جدیدتر به طراحی کنترل

¹ Compliance² Pulse width Modulated

سیگنال PWM یک سیگنال باینری با فرکانس ثابت و پهنای پالس متغیر می باشد. دوره ی تناوب سیگنال یعنی مجموع زمان های روشن بودن و خاموش بودن آن ثابت است ولی درصد زمان روشن بودن نسبت به دوره تناوب (پهنای پالس) متغیر است. همان گونه که در شکل 2 مشاهده می شود، این سیگنال از مقایسه یک سیگنال پیوسته با یک سیگنال دندان دانه اره ای بدست می آید. هر کجا مقدار سیگنال پیوسته از سیگنال دندان دانه اره ای بزرگتر باشد، سیگنال PWM در وضعیت روشن قرار می گیرد؛ و اگر مقدار سیگنال پیوسته از مقدار سیگنال دندان دانه اره ای کمتر باشد، مقدار سیگنال PWM صفر است.

در شیرهای دو وضعیتی، جابجایی اسپول کنترل شده نیست و شیر فقط می تواند کاملاً باز یا کاملاً بسته باشد. با اعمال سیگنال PWM به عنوان ورودی، شیر با فرکانس ثابت دائماً باز و بسته می شود. بدین ترتیب سیال به صورت بسته بندی شده در بسته هایی کوچک و به طور گسترده از شیر دو وضعیتی عبور کرده و به عملگر تحویل داده می شود. سرعت ارسال بسته های هوا که همان فرکانس PWM است باید به اندازه کافی بالا باشد تا رفتاری شبه پیوسته حاصل شود. با تغییر پهنای پالس سیگنال می توان زمان باز بودن شیر در هر سیکل و در نتیجه اندازه بسته های ارسالی یا دبی سیال عبوری از شیر را تغییر داد.

سیگنال آنالوگ کنترلی برای تبدیل شدن به سیگنال PWM با پتانسیل 24 ولت به مدار الکترونیکی شکل 3 ارسال می شود؛ که شامل درایور PWM و تقویت کننده بوده و در آزمایشگاه ساخته شده است. لازم به ذکر است که سیگنال PWM را می توان در داخل کامپیوتر و به صورت نرم افزاری نیز تولید نموده و از طریق خروجی های دیجیتال کارت واسط به شیر دو وضعیتی

کننده مد لغزشی پرداخته اند [20]. ارباب و نجفی روش کنترل مد لغزشی را برای کنترل امپدانس یک عملگر نیوماتیک با شیرهای قطع/وصل ارائه نموده اند [21]. آنها امکان دستیابی به پارامترهای امپدانس و اثر آنها بر پایداری سیستم، ضمن کاربرد این روش کنترلی، را مورد بررسی قرار داده اند. کنترل فازی نیز از دیگر روش هایی است که کاربرد آن در سیستم های سرونیماتیک با تحریک PWM مورد بررسی قرار گرفته است. شیخ و هوانگ یک کنترل کننده فازی - PWM برای کنترل موقعیت سیلندر در یک ربات اتوماتیک ارائه دادند [22]. آنها برای حذف ناحیه مرده و بهبود عملکرد سیستم از یک روش PWM اصلاح شده استفاده کردند. نمونه ی دیگری از کنترل فازی در سیستم های مورد مطالعه توسط شیخ و ما در [23] آمده است.

تقی زاده و همکاران [24] کنترل کننده ی چندمدله را برای عملگر نیوماتیکی تحت بار متغیر ارائه داده و عملکرد خوب کنترل کننده ی طراحی شده را با آزمایش های تجربی نشان داده اند. که در این مقاله عملکرد کنترل کننده ی پیشنهادی با عملکرد کنترل کننده ی چندمدله نیز مورد مقایسه قرار می گیرد.

در ادامه ی این مقاله تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی شده و در مورد سیگنال PWM و نحوه ی ساخت آن توضیح داده می شود. سپس طراحی کنترل کننده ی تطبیقی برای سیستم مورد بررسی ارائه می شود. در انتها نیز نتایج تست عملی کنترل کننده ی پیشنهادی ارائه گردیده و عملکرد آن مورد بررسی و مقایسه با روش های کنترل تناسبی - مشتق گیر و کنترل چندمدله قرار می گیرد.

2- تجهیزات آزمایشگاهی و پیاده سازی کنترل کننده ی تطبیقی

به منظور انجام آزمایش های عملی از تجهیزات گوناگونی استفاده شده که در این بخش به معرفی این تجهیزات، شامل اجزای نیوماتیکی، سنسورها، تجهیزات الکترونیکی و سیستم کنترل کامپیوتری، پرداخته می شود.

عملگر تحت کنترل یک سیلندر تک میله دو طرفه ساخت شرکت فستو با کورس 150 میلی متر و قطر پیستون 25 میلی متر است. شیر 3-2 دو وضعیتی پاسخ سریع ساخت فستو نیز برای کنترل جریان هوا مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه گیری موقعیت پیستون از یک پتانسیومتر خطی ساخت شرکت جفران¹ با کورس 170 میلی متر و دقت 0.05 میلی متر استفاده شده است (جدول 1).

شکل 1 سیستم سرونیماتیک تحت آزمایش را نشان می دهد. یک گاری چرخ دار کوچک نیز در این شکل دیده می شود که به منظور اعمال بار به انتهای جلویی میله پیستون متصل شده است. یک کامپیوتر به عنوان کنترل کننده و یک کارت واسط I/O ساخت شرکت ادونتک² جهت برقراری ارتباط با شیرها و سنسورها مورد استفاده قرار گرفته اند. داده های اندازه گیری شده (خروجی سنسورها) از طریق ورودی های آنالوگ به کامپیوتر ارسال شده و در محیط نرم افزار متلب سیمولینک³ پردازش می شوند. همچنین در این محیط مقادیر مرجع تعیین شده و قوانین کنترلی برنامه نویسی می شوند. بدین ترتیب سیگنال کنترل به صورت نرم افزاری در داخل کامپیوتر ساخته شده و از طریق کانال های خروجی کارت واسط به صورت یک ولتاژ آنالوگ بین 0 تا 5 ولت خارج می شود. پس از آن تنها کافیت تا سیگنال کنترلی به سیگنال PWM تبدیل شود.

¹ GEFAN

² ADVANTECH

³ Matlab/Simulink

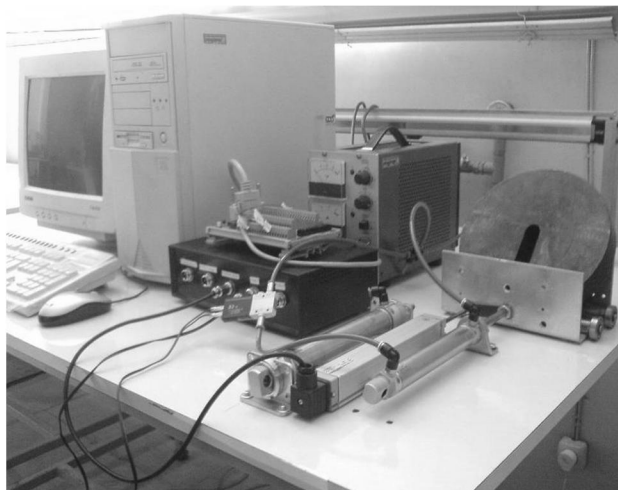


Fig. 1 Experimental setup

شکل 1 تجهیزات آزمایشگاهی

جدول 1 مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی

Table 1 Experimental setup specification

تجهیزات	سازنده	مشخصات
عملگر نیوماتیک	فستو	سیلندر دو طرفه، کورس 150mm، قطر پیستون 25mm
شیر	فستو	شیر پاسخ سریع 3-2 MHE4-MS1H-3/2G-1/4K
پتانسیومتر	جفران	کورس 170mm، دقت 0.05mm
کارت واسط	ادونتک	PCLD-8710

براساس آن پارامترهای کنترل کننده بطور لحظه ای تنظیم می شوند. البته شناسایی بلادرنگ پارامترها نیاز به زمان دارد که می تواند کنترل تطبیقی را در مواردی که تغییر پارامترها سریع هستند دچار مشکل کند.

یکی از الگوریتم های کنترل تطبیقی که در آن ابتدا پارامترهای مدل بهنگام شده و سپس پارامترهای کنترل کننده (تنظیم کننده) از حل یک مساله طراحی به دست می آیند به رگولاتورهای خود تنظیم¹ موسوم است. نمودار بلوکی این روش که در این مقاله نیز از آن استفاده شده [25] در شکل 5 نشان داده شده است. می توان چنین در نظر گرفت که یک سیستم کنترل تطبیقی از دو حلقه تشکیل می شود، یک حلقه پسخور معمولی شامل فرایند و کنترل کننده، و دیگری حلقه تخمین مدل و تنظیم پارامترهای کنترل کننده است.

در ادامه نحوه طراحی کنترل کننده با استفاده از روش جابجایی قطب تشریح خواهد شد. ایده اصلی این روش که در رگولاتورهای خود تنظیم استفاده می شود، عبارت است از تعیین کنترل کننده به گونه ای که قطب ها و صفرهای حلقه بسته در نقاط مطلوب از پیش تعیین شده قرار گیرند. برای این منظور فرض می شود که فرایند با مدل تک ورودی تک خروجی رابطه (1) قابل توصیف باشد:

$$A(q)y(t) = B(q)(u(t) + v(t)) \quad (1)$$

که در آن y ، u و v به ترتیب خروجی، ورودی و اغتشاش می باشند. A و B نیز چند جمله ای های مخرج و صورت تابع تبدیل سیستم برحسب عملگر انتقال پیشرو q هستند. در سیستم سرونیوماتیک مورد مطالعه درجه این چند جمله ای ها و درجه ی نسبی سیستم d_0 ، به صورت رابطه (2) می باشند:

$$\begin{aligned} \deg(A) &= n = 3 \\ \deg(B) &= m = 2 \\ d_0 &= n - m = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

فرض می شود که A و B نسبت به هم اول هستند² یعنی عامل مشترک ندارند. بعلاوه فرض می شود که A مونیک³ است، یعنی ضریب بزرگترین توان A برابر واحد است. حال سیستم کنترلی مطابق شکل 6 در نظر گرفته می شود که نشان دهنده ی یک کنترل کننده دو درجه آزادی RST است و در آن R و S و T چند جمله ای هایی برحسب q هستند.

در این سیستم، خروجی حلقه بسته به صورت رابطه (3) بدست می آید:

$$y(t) = \frac{BT}{AR + BS} u_c(t) + \frac{BR}{AR + BS} v(t) \quad (3)$$

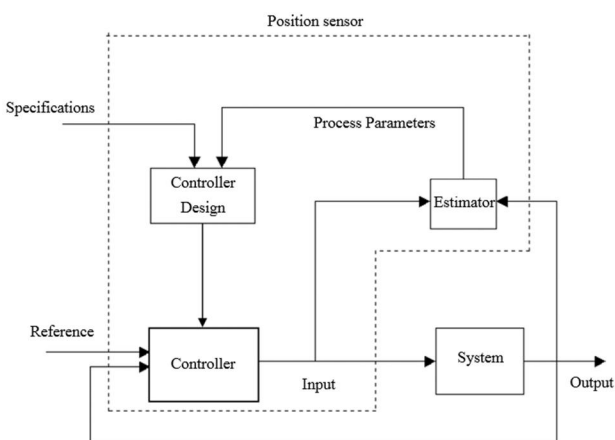


Fig. 5 Block diagram of the self-tuning regulator

شکل 5 نمودار بلوکی رگولاتور خودتنظیم

¹ Self-Tuning Regulators (STR)

² Relatively Prime

³ Monic

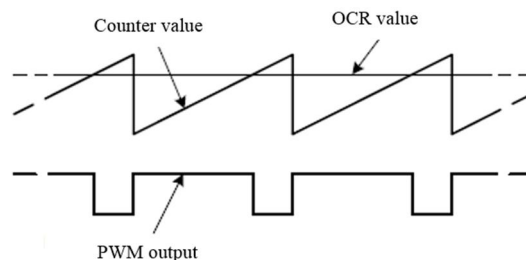


Fig. 2 PWM signal generating

شکل 2 نحوه ساخت سیگنال PWM

اعمال نمود. ولی این کار بار محاسباتی کامپیوتر را بالا برده و زمان های نمونه برداری بسیار کوچکی نیاز دارد. به منظور کاهش بار محاسباتی و برای استفاده از زمان های نمونه برداری بزرگتر، در این تحقیق سیگنال PWM به صورت سخت افزاری در خارج از محیط کامپیوتر ساخته شده است. زمان نمونه برداری حدودا 0.004 ثانیه در نظر گرفته شده تا بتوان نمودارهای خروجی را در فواصل 4 ثانیه ای ثبت و رسم نمود.

آزمایش ها در فشار تغذیه 5 بار و با مدار نیوماتیک شکل 4 [3]، که در آن فقط یک شیر دو وضعیتی پاسخ سریع وجود دارد، انجام شده است.

3- کنترل کننده تطبیقی

روش کنترل تطبیقی می تواند برای کنترل سیستم های دارای پارامترهای متغیر از جمله بار متغیر مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، برخلاف کنترل چند مدله، نیازی به گسسته کردن گستره ی تغییرات بار و شناسایی چند مدل در نقطه کارهای مختلف سیستم نمی باشد. بلکه مدل سیستم بطور بلادرنگ با استفاده از اطلاعات ورودی-خروجی در هر لحظه شناسایی شده و

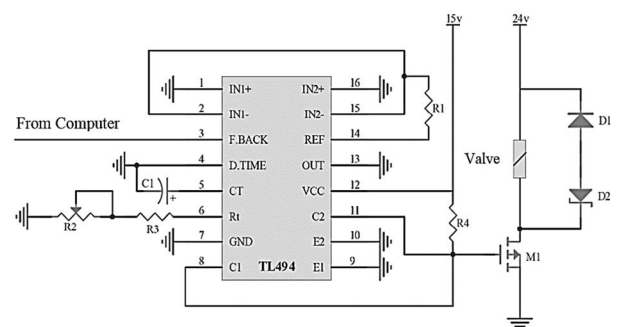


Fig. 3 PWM signal generator

شکل 3 مدار مبدل سیگنال آنالوگ به PWM

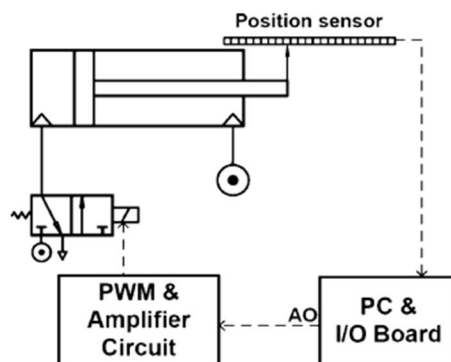


Fig. 4 The applied pneumatic circuit

شکل 4 مدار نیوماتیک مورد استفاده

باید شرایط زیر نیز برقرار گردد:

$$\begin{aligned} \deg(R) &= \deg(A_c) - \deg(A) \\ \deg(A_c) &= 2 \cdot \deg(A) - 1 \\ \deg(A_m) - \deg(B_m) &= \deg(A) - \deg(B) = d_0 \end{aligned} \quad (13)$$

باتوجه به مطالب ارائه شده در بالا، طراحی کنترل کننده را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

(1) با توجه به شروط حداقل درجه و علی بودن می توان رابطه (14) را نوشت:

$$\deg(R) = \deg(S) = \deg(T) = 2 \quad (14)$$

(2) چندجمله ای B به صورت $B = B^+ B^-$ تجزیه می شود و با انتخاب $B_m = B^- B_m'$ به صورت B_m به صورت یک عدد، بدست می آید، مقدار B_m' به گونه ای تعیین می شود که بهره ماندگار سیستم مطلوب برابر واحد شود.

(3) با توجه به رابطه (13)، درجه A_m تعیین شده و با فرض ریشه تکراری برای A_m می توان رابطه (15) را نوشت:

$$A_m = (z - a_m)^{\deg(B^-)+1} \quad (15)$$

به این ترتیب مقدار B_m' به صورت رابطه (16) محاسبه می شود:

$$B_m' = \frac{A_m}{B^-} | z = 1 = \frac{(1 - a_m)^{\deg(B^-)+1}}{B^- | z = 1} \quad (16)$$

(4) با توجه به رابطه (13)، درجه A_0 تعیین شده و این چندجمله ای به صورت رابطه (17) انتخاب می شود:

$$A_0 = z^{n-1} \quad (17)$$

(5) چندجمله ای، به صورت رابطه (18) بدست می آید:

$$T = B_m' A_0 = B_m' z^{n-1} \quad (18)$$

(6) با حل معادله دیوفانتین (10) و بکارگیری رابطه (9) چندجمله ای های R و S تعیین می شوند. در این مرحله با توجه به درجه B^+ سه حالت زیر ممکن است اتفاق بیفتد. لازم به ذکر است که ریشه هایی از B که داخل دایره ای به شعاع α قرار دارند، متعلق به B^+ و مابقی به B^- در نظر گرفته شده اند. α پارامتری است که مقدار آن بین صفر و یک انتخاب می شود.

حالت اول) $\deg(B^+) = 2$

$$T = B_m' A_0 = B_m' z^{n-1} \quad (19)$$

$$S = \frac{A_0 A_m - A}{b_0} \quad (20)$$

حالت دوم) $\deg(B^+) = 1$

در این حالت می توان روابط (21) را نوشت:

$$\begin{aligned} B^- &= (b_0^- z + b_1^-) \\ R' &= (z + r_1') \\ S &= (s_0 z^2 + s_1 z + s_2) \end{aligned} \quad (21)$$

که در آنها ضرایب s_1, s_0, r_1' و s_2 مجهول بوده و با استفاده از رابطه دیوفانتین که به صورت ماتریسی (22) نوشته شده، بدست می آیند:

$$\begin{bmatrix} 1 & b_0^- & 0 & 0 \\ a_1 & b_1^- & b_0^- & 0 \\ a_2 & 0 & b_1^- & b_0^- \\ a_3 & 0 & 0 & b_1^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1' \\ s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2a_m - a_1 \\ a_m^2 - a_2 \\ -a_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

سپس با استفاده از رابطه (9) چندجمله ای R نیز بدست می آید.

حالت سوم) $\deg(B^+) = 0$

در این حالت می توان روابط (23) را نوشت:

$$\begin{aligned} B^- &= B = (b_0 z^2 + b_1 z + b_2) \\ R' &= R = (z^2 + r_1 z + r_2) \\ S &= (s_0 z^2 + s_1 z + s_2) \end{aligned} \quad (23)$$

که در آنها ضرایب s_1, s_0, r_2, r_1 و s_2 مجهول بوده و با استفاده از رابطه ماتریسی دیوفانتین به صورت (24) محاسبه می شوند:

و چند جمله ای مشخصه حلقه بسته به صورت رابطه (4) می باشد:

$$AR + BS = AC \quad (4)$$

ایده کلیدی طراحی، مشخص کردن تابع تبدیل حلقه بسته مطلوب زیر است:

$$\frac{BT}{AR + BS} = \frac{BT}{A_c} = \frac{B_m}{A_m} \quad (5)$$

که در آن B_m و A_m به ترتیب چند جمله ای های صورت و مخرج تابع تبدیل مطلوب هستند. معمولاً مطلوبست که درجه ی چند جمله ای های B_m و A_m کوچک انتخاب شود که این مسأله مستلزم حذف عامل های مشترک BT و A_c است. بدین منظور چند جمله ای B به صورت رابطه (6) تجزیه می شود:

$$B = B^+ B^- \quad (6)$$

که B^+ چند جمله ای مونیکی است که صفرهای آن پایدار بوده و به خوبی میرا می شوند. بنابراین می تواند از صورت و مخرج تابع تبدیل حذف شود و B^- با عوامل ناپایدار یا عواملی که میرایی ضعیف داشته و قابل حذف نیستند، متناظر است. بنابراین نتیجه می شود که B^- باید عاملی از B_m باشد، پس:

$$B_m = B^- B_m' \quad (7)$$

از آنجا که B^+ حذف می شود، باید عواملی از A_c باشد، بعلاوه از معادله (4) نتیجه می شود که A_m نیز باید عاملی از A_c باشد. بنابراین چند جمله ای مشخصه حلقه بسته به شکل رابطه (8) است:

$$A_c = A_0 A_m B^+ \quad (8)$$

که چند جمله ای A_0 یک چند جمله ای مونیکی و پایدار است که برای برابر شدن درجه چند جمله ای های دو طرف تساوی در رابطه (8) به سمت راست اضافه می شود. از طرفی چون B^+ عاملی از B و A است، از معادله (4) نتیجه می شود که عاملی از R نیز می باشد. پس می توان رابطه (9) را نوشت:

$$R = R' B^+ \quad (9)$$

و معادله (4) به معادله (10) تبدیل می گردد:

$$AR' + B^- S = A_0 A_m = A_c' \quad (10)$$

چندجمله ای های R' و S را می توان از حل معادله (10) بدست آورد. این معادله که نقش اساسی در جبر بازی می کند، معادله دیوفانتین¹ نامیده شده و در صورتی که چند جمله ای های A و B عامل مشترک نداشته باشند، همواره دارای جواب است.

با قرار دادن معادلات (6-8) در معادله (5) رابطه (11) بدست می آید:

$$T = A_0 B_m' \quad (11)$$

از طرفی برای بدست آوردن یک کنترل کننده علی² باید شرایط ذیل برقرار باشد:

$$\deg(S) \leq \deg(R) \quad \& \quad \deg(T) \leq \deg(R) \quad (12)$$

همچنین برای اینکه کنترل کننده بدست آمده از کمترین درجه باشد،

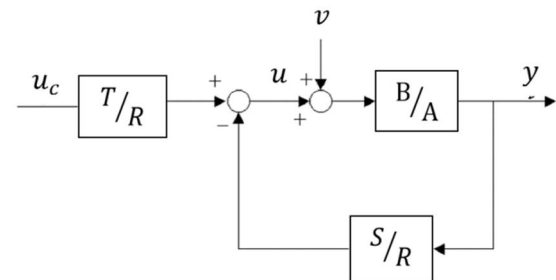


Fig. 6 Two degree of freedom RST controller

شکل 6 کنترل کننده دو درجه آزادی RST

¹ Diophantine Equation

² Causal

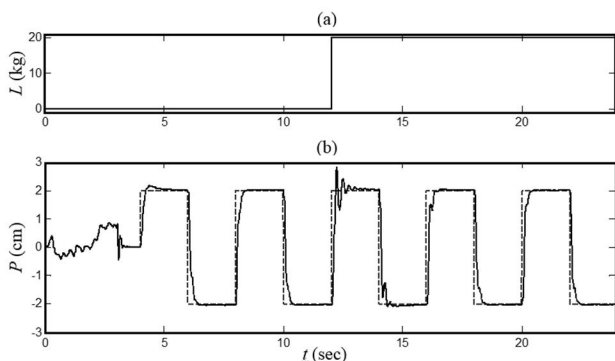


Fig. 8 Adaptive controller performance in load change from 0 to 20 kg. a) Load change b) Response

شکل 8 نتایج عملکرد کنترل کننده تطبیقی به ازای تغییر بار از 0 تا 20 کیلوگرم.

(a) تغییرات بار (b) پاسخ

کنترلی سیستم، آزمایش‌هایی بطور جداگانه انجام شده و نتایج آنها در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده‌اند. شکل 9 تأثیر تغییرات ضریب فراموشی بر عملکرد کنترل کننده نشان می‌دهد. در این شکل محل قطب حلقه بسته در $a_m = 0.72$ ثابت نگه داشته شده و سه مقدار $\lambda = 0.99, 0.995, 0.999$ برای پارامتر ضریب فراموشی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل پیداست، با افزایش ضریب فراموشی اهمیت داده‌های جدید نسبت به داده‌های قدیمی‌تر کم شده و سیستم کندتر می‌شود. کاهش ضریب فراموشی نیز می‌تواند به ناپایداری سیستم منجر شود.

شکل 10 نیز تأثیر محل قطب حلقه بسته را بر عملکرد کنترل کننده نشان می‌دهد. در این شکل ضریب فراموشی ثابت و برابر $\lambda = 0.995$ در نظر گرفته شده و محل قطب حلقه بسته در نقاط $a_m = 0.55$ و $a_m = 0.72$ و $a_m = 0.85$ تغییر داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود و در شکل هم پیداست، با نزدیک شدن محل قطب به مقدار واحد (دایره با شعاع واحد) سیستم کندتر و با دور شدن از دایره واحد به سمت مرکز، سیستم سریع‌تر می‌شود. اما نزدیک شدن محل قطب به مرکز و افزایش سرعت کنترل با محدودیت روبروست و منجر به ناپایدار شدن سیستم می‌شود.

به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله با عملکرد کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر و کنترل کننده چند مدله‌ای ارائه شده در [23]، دو آزمایش صورت گرفته است. ابتدا آزمایشی در گستره‌ی بین بی باری تا بار کامل انجام شده است. نتایج این آزمایش برای کنترل کننده تطبیقی در شکل 11 و برای کنترل کننده چند مدله در شکل 12 نشان داده شده است.

برای مقایسه و نمایش میزان بهبود عملکرد دو کنترل کننده ذکر شده در بالا نسبت به یک کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر آزمایشی تحت شرایط بارگذاری یکسان انجام شده است. به منظور تقارن، مناسب‌ترین کنترل کننده ثابت یعنی کنترل کننده متناظر با بارگذاری متوسط انتخاب شده و نتایج به دست آمده در شکل 13 ارائه شده‌اند.

میزان خطای رهگیری موقعیت با استفاده از سه کنترل کننده مورد بررسی، با استفاده از دو روش میانگین مربعات خطای نرمال¹ و میانگین خطای بایاس نرمال²، مورد بررسی قرار می‌گیرد [26]. جدول 2 نتایج این دو معیار را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & b_2 & b_1 & b_0 \\ a_3 & a_2 & 0 & b_2 & b_1 \\ 0 & a_3 & 0 & 0 & b_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

4- نتایج عملی

در این قسمت عملکرد کنترل کننده تطبیقی طراحی شده با انجام آزمایش‌های مختلفی روی سیستم سرونوماتیک، بررسی و نتایج آن ارائه شده است. بدین منظور پارامترهایی که به عنوان شرایط اولیه می‌باشند در تمامی آزمایش‌ها ثابت و به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$\theta(0) = 0, P(0) = \beta \cdot I_{6 \times 6}, \beta = 100$$

اثر تغییر دو پارامتر طراحی دیگر یعنی فراموشی، λ و محل مطلوب

قطب‌های حلقه بسته، a_m نیز در آزمایش‌های جداگانه‌ای بررسی و نمایش داده شده است.

به عنوان اولین آزمایش عملکرد بخش تخمین پارامتر را بررسی نموده و خروجی سیستم واقعی را با خروجی مدل شناسایی شده مقایسه می‌کنیم. به منظور شناسایی سیستم قبل از اعمال کنترل، سیستم برای مدت معینی به صورت حلقه باز و با ورودی نویز سفید تحریک شده است. شکل 7 ضمن مقایسه خروجی‌های سیستم و مدل، تأثیر مدت زمان شناسایی اولیه را نیز روی پاسخ کنترلی سیستم نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل a-7 دیده می‌شود، عدم وجود شناسایی اولیه، باعث ایجاد فراجش‌های بزرگ در ابتدای عملکرد کنترلی می‌شود؛ که می‌تواند باعث ناپایداری یا ضربه زدن سیلندر به انتهای کورس گردد. در شکل‌های b-7 و c-7 با افزایش زمان شناسایی اولیه، خروجی مدل به خروجی سیستم واقعی نزدیکتر شده است.

شکل 8 عملکرد کنترل کننده تطبیقی را در برابر تغییر ناگهانی بار سیستم از حالت بی باری (صفر کیلوگرم) به حالت بار کامل (20 کیلوگرم) نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود پس از تغییر ناگهانی بار ابتدا پاسخ سیستم نوسانی شده و فراجش‌های نامطلوبی نشان می‌دهد. اما به تدریج در اثر بهبود شناسایی، پاسخ کنترلی سیستم بهبود می‌یابد. با توجه به شکل، حدوداً 6 ثانیه زمان لازم است تا در اثر این تغییر بار شدید پاسخ سیستم به حالت مطلوب خود بازگردد.

نتایج شکل 8 به ازای مقادیر ضریب فراموشی $\lambda = 0.995$ و محل قطب حلقه بسته مطلوب در $a_m = 0.72$ بدست آمده‌اند؛ که مقادیر فوق به صورت تجربی تنظیم شده‌اند. به منظور نمایش تأثیر این دو پارامتر بر پاسخ

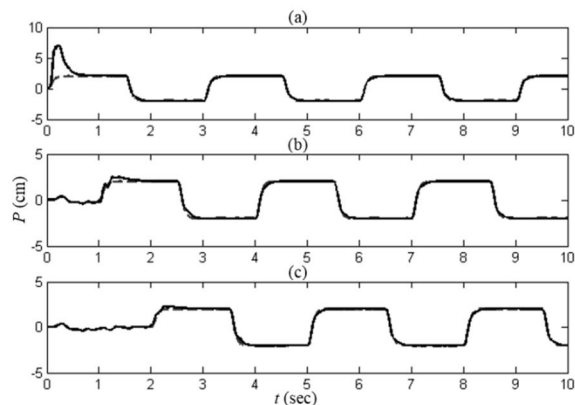


Fig. 7 Comparison of system and model outputs with different identification time. a) 0 sec b) 2 sec c) 4 sec

شکل 7 مقایسه خروجی‌های سیستم و مدل در بازه‌های زمانی شناسایی متفاوت.

(a) صفر ثانیه (b) 2 ثانیه (c) 4 ثانیه

¹ Normalized Root Mean Square Error

² Normalized Mean Bias Error

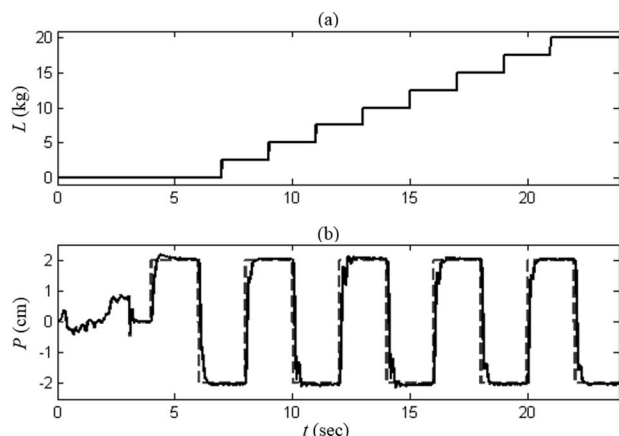


Fig. 11 a) Load change b) Performance of adaptive controller.

شکل 11 a) تغییرات بار b) عملکرد کنترل کننده تطبیقی

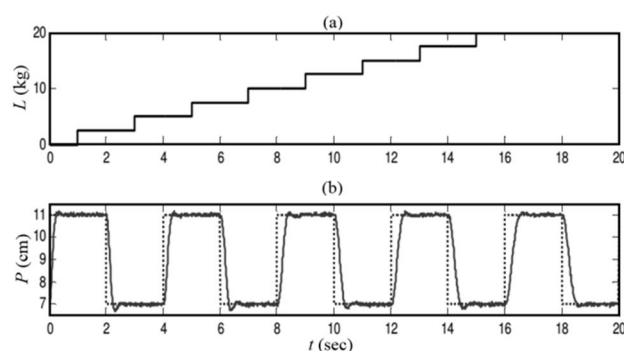


Fig. 12 a) Load change b) Performance of multi model controller.

شکل 12 a) تغییرات بار b) عملکرد کنترل کننده چند مدل

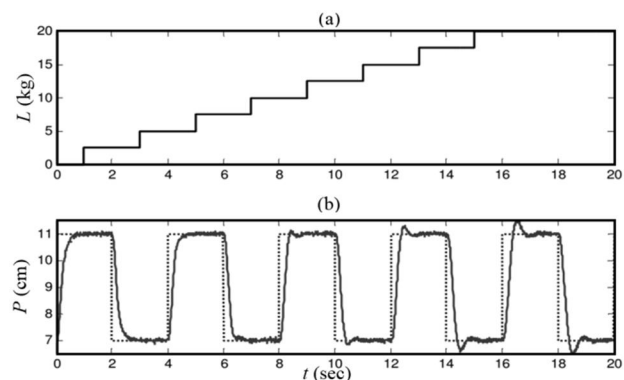


Fig. 13 a) Load change b) Performance of PD controller in average loading condition

شکل 13 a) تغییرات بار b) عملکرد کنترل کننده متناظر با شرایط میان باری

جدول 2 خطای کنترل کننده‌ها در رهگیری موقعیت

Table 2 Tracking error of the controllers

کنترل کننده	NMSE	NMBE
تناسبی مشتق گیر	0.0726	0.182
چند مدل	0.0311	0.0788
تطبیقی	0.0539	0.0950

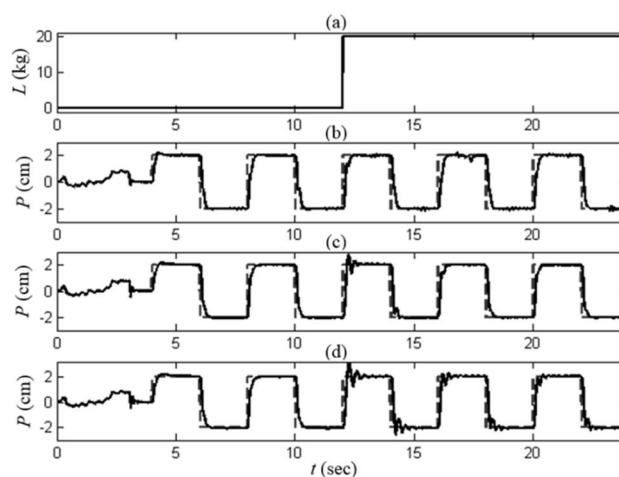
5- نتیجه گیری

کنترل موقعیت برای یک سیستم سرونوماتیک تحت بارگذاری متغیر با استفاده از روش کنترل تطبیقی، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی سیستم سرونوماتیک تحت آزمایش استفاده از شیر دو وضعیتی و تحریک

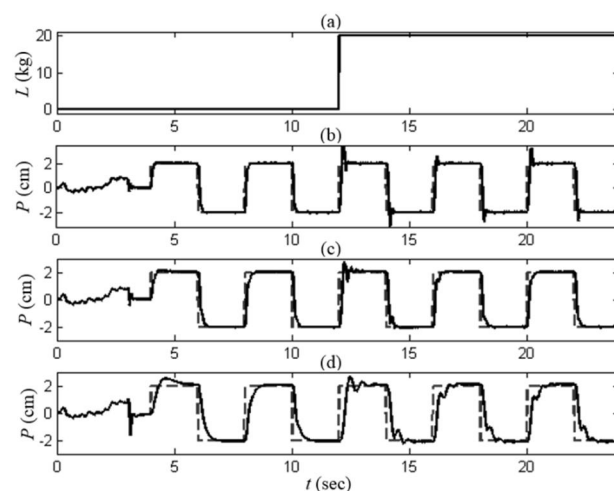
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (\text{actual value} - \text{setpoint value})^2}}{\frac{1}{N} \sum_1^N \text{setpoint value}} \quad (25)$$

$$NMBE = \frac{\sum_1^N (\text{actual value} - \text{setpoint value})}{\sum_1^N \text{setpoint value}} \quad (26)$$

همان گونه که از مقایسه شکل های 11 و 13 و جدول 2 بدست می آید، کنترل کننده تطبیقی عملکرد بهتری از یک کنترل کننده PD ثابت دارد. اما بررسی شکل های 11 و 12 و جدول 2 نشان می دهد که در مقایسه با پاسخ کنترل کننده چندمدله، عملکرد کنترل کننده تطبیقی ضعیف تر است. البته اگر فاصله زمانی تغییر بارها (که در این آزمایش ها 2 ثانیه است) افزایش یابد و کنترل کننده تطبیقی فرصت کافی برای شناسایی سیستم داشته باشد، در آن صورت پاسخ سیستم تطبیقی به تدریج بهتر می شود. به عنوان نمونه، همان طور که در شکل 8 قابل مشاهده است عملکرد کنترل کننده تطبیقی پس از حدود 6 ثانیه به حالت ایده آل خود نزدیک می شود.

Fig. 9 Effect of forget factor on controller performance. a) Load change b) $\lambda = 0.99$ c) $\lambda = 0.995$ d) $\lambda = 0.999$

شکل 9 تأثیر ضریب فراموشی بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار $\lambda = 0.99$ (b) $\lambda = 0.999$ (c) $\lambda = 0.995$ (d)

Fig. 10 Effect of pole place on controller performance. a) Load change b) $a_m = 0.55$ c) $a_m = 0.72$ d) $a_m = 0.85$

شکل 10 تأثیر محل قطب بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار $a_m = 0.55$ (b) $a_m = 0.85$ (c) $a_m = 0.72$ (d)

- circuit, *Electrical Engineering*, Vol. 91, No. 2, pp. 79–87, 2009.
- [9] M. Sorli, S. Pastorelli, Performance of a pneumatic force controlling servosystem: influence of valves conductance, *Robotics and Autonomus Systems*, Vol. 30, No. 3, pp. 283–300, 2000.
- [10] K. Ahn, S. Yokota, Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Mechatronics*, Vol. 15, No. 6, pp. 683–702, 2005.
- [11] C. Kunt, R. Singh, A linear time varying model for on-off valve controlled pneumatic actuator, *ASME of Dynamic System Measurment and Control*, Vol. 112, No. 4, pp. 740–748, 1990.
- [12] N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, A. Jutard, Models of pneumatic PWM solenoid valve for engineering application, *ASME of Dynamic System Measurment and Control*, Vol. 114, No. 4, pp. 680–688, 1992.
- [13] J. Y. Lai, C. H. Meng, R. Singh, Accurate position control of a pneumatic actuator, *ASME of Dynamic System Measurment and Control*, Vol. 112, No. 4, pp. 734–739, 1990.
- [14] A. Gentile, N. Giannoccaro, G. Reina, Exprimmental tests on position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Proceeding of IEEE/ICIT, Bangkok*, Vol. 1, pp. 555–559, 2002.
- [15] A. K. Paul, J. K. Mishra, M. G. Radke, Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator, *IEEE Transaction on control systems technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 271–276, 1994.
- [16] K. Ahn, S. Yokota, Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Mechatronics*, Vol. 15, No. 16, pp. 683–702, 2005.
- [17] E. J. Barth, J. Zhang, M. Goldfarb, Sliding mode approach to PWM-controlled pneumatic systems, *The American Control Conference, Anchorage Alaska*, Vol. 3, IEEE Cat. No. CH37301, pp. 2362–2367, 2002.
- [18] X. Shen, J. Zhang, E. J. Barth, M. Goldfarb, Non linear averaging applied to the control of pulse width modulated (PWM) pneumatic systems, *The American Control Conference, Boston*, Vol. 5, pp. 4444–4448, 2004.
- [19] X. Shen, J. Zhang, E. J. Barth, M. Goldfarb, Nonlinear model-based control of pulsewidth modulated pneumatic servo systems, *ASME Transaction Journal of Dynamic Systems, Measurment and Control*, Vol. 128, No. 3, pp. 663–669, 2006.
- [20] T. Nguyen, J. Leavitt, F. Jabbari, J. E. Bobrow, Accurate sliding-mode control of pneumatic systems using low-cost solenoid valves, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 12, No. 2, pp. 216–219, 2007.
- [21] N. Hosseingholi Arbab, F. Najafi, Impedance control of a pneumatic actuator with solenoid on/off valves, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 12–20, 2014. (in Persian فارسی)
- [22] M. C. Shih, C. Hwang, Fuzzy PWM control of the positions of a pneumatic robot cylinder using high speed solenoid valve, *JSME International Journal*, Vol. 40, No. 3, pp. 469–476, 1997.
- [23] M. C. Shih, M. Ma, Position control of a pneumatic rodless cylinder using fuzzy PWM control method, *Mechatronics*, Vol. 41, No. 2, pp. 241–253, 1998.
- [24] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Multimodel PD-control of a pneumatic actuator under variable loads, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 5, pp. 655–662, 2010.
- [25] K. J. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Second Edition, Dover publications INC, New York, 2008.
- [26] D. Li, G. Cheung, Study of Models for Predicting the Diffuse Irradiance on Inclined Surfaces, *Elsevier Applied Energy*, Vol. 81, No. 2, pp. 170–186, 2005.

PWM به جای استفاده از شیر گران قیمت سرو یا پروپرشنال است. الگوریتم رگولاتورهای خودتنظیم در طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. کنترل کننده طراحی شده از طریق یک کارت واسط کامپیوتری روی سیستم سرونوماتیک مدنظر اعمال شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد مطلوب کنترل کننده تطبیقی به ازای گستره‌ی کامل تغییرات بار، توسط آزمایش های صورت گرفته مورد تأیید قرار گرفته است. سپس به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله با عملکرد کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر و کنترل کننده چند مدله دو آزمایش طراحی و انجام شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت در شرایط بارگذاری متغیر با دامنه تغییرات گسترده، مشاهده شد که استفاده از یک کنترل کننده ثابت تناسبی مشتق گیر عملکرد مطلوبی ندارد. کنترل کننده تطبیقی مشکل گسستگی کنترل کننده چند مدله را به خوبی مرتفع نموده است؛ اما با توجه به زمان لازم برای شناسایی مدل سیستم در کنترل تطبیقی، این کنترل کننده در صورتی عملکرد مطلوب دارد که تغییرات بار سیستم خیلی سریع نباشد.

6- مراجع

- [1] P. R. Moore, J. S. Pu, Pneumatic servo actuator technology, *IEE colloquium: Actuator Technology: Current Practice and New Developments*, Vol. 1, No. 1, pp. 3/1–3/6, 1996.
- [2] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications, *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 337, No. 3, pp. 131–140, 2009.
- [3] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Improving dynamic performances of PWM-driven servo-pneumatic systems via a novel pneumatic circuit, *ISA Transaction*, Vol. 48, No. 4, pp. 512–518, 2009.
- [4] S. Goldstein, H. Richardson, A differential pulse-width modulated pneumatic servo utilizing floating flapper disc switching valves, *ASME Transaction Journal of Basic Eijineering, Series C*, Vol. 90, No. 2, pp. 143–151, 1968.
- [5] T. Noritsugu, Development of PWM mode electro-pneumatic servomechanism, Part I: Speed control of pneumatic system, *Journal Fluid control*, Vol. 17, No. 2, pp. 7–28, 1987.
- [6] T. Noritsugu, Development of PWM mode electro-pneumatic servomechanism, Part II: Position control of pneumatic system, *Journal Fluid control*, Vol. 17, No. 2, pp. 65–79, 1987.
- [7] V. Varseveld, G. Bone, Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *IEEE/ASME Transaction Mechatron*, Vol. 2, No. 3, pp. 195–204, 1997.
- [8] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Increased tracking ability of pulse width modulation-driven pneumatic servo systems via a modified pneumatic