

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی رباتیک

طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده فازی تطبیقی یک عملگر

نیوماتیکی تحت بار گذاری متغیر

نگارنده:

مهرداد متولی زاده

اساتید راهنما

دکتر علی اکبرزاده

دکتر مهدی بامداد

تیر ۱۳۹۸

شماره: ۹۸۱۵۱۸۲
تاریخ: ۹۸/۴/۱۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهرداد متولی زاده با شماره دانشجویی ۹۴۱۵۶۵۴ رشته مهندسی برق- رباتیک گرایش کنترل ربات تحت عنوان: طراحی و پیاده سازی کنترل کننده فازی تطبیقی یک عملگر نیوماتیکی تحت بارگذاری متغیر که در تاریخ ۱۳۹۸/۴/۱۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:)	<input checked="" type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
نوع تحقیق:	<input checked="" type="checkbox"/> نظری	<input type="checkbox"/> عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر انبیراره	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر بهرادر	استادیار	
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهرداد ظریف	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهرداد انبیراره	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر الهی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

پروفسور

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۸۱۲۱۱



تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این

سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس

در پناهِشان به شجاعت می‌گراید

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

این مجموعه را به پدر و مادر و همسر عزیزم تقدیم می‌کنم

سپاس‌گزاری...

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاری‌شان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم‌نوعان را مقدم دارد،

با او معامله کند و در این خلوص‌انباز نگیرد و خوش‌باشد که پروردگار سمیع و بصیر است. به مصداق "من لم یشکر الخالق لم یشکر المخلوق" بسی شایسته است به جهت توفیق تحصیل علم، خداوند متعال را شکر گزارده و از درگاهش برای اساتید محترمی که در طی تحصیل از محضرشان کسب فیض نموده‌ام، آرزوی موفقیت نمایم.

وظیفه شاگردی خود می‌دانم از استاد راهنمای گران‌قدر جناب آقای دکتر علی اکبرزاده که با راهنمایی‌های خود راهگشای اینجانب بوده‌اند کمال تشکر و سپاس‌گزاری را بنمایم. هم‌چنین از جناب آقای دکتر بامداد به‌منظور راهنمایی‌های ارزشمند و کمک‌های ایشان سپاس‌گزاری می‌نمایم.

مهرداد متولی‌زاده

شهریور ۱۳۹۸

تعهدنامه

اینجانب **مهرداد متولی زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **رباتیک/گرایش کنترل ربات** دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و پیاده سازی کنترل کننده فازی تطبیقی یک عملگر نیوماتیکی تحت بارگذاری متغیر تحت راهنمایی دکتر علی اکبرزاده و دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم.

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است.) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

- ♦ این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

امروزه در کاربردهای صنعتی، استفاده از عملگرهای نیوماتیک با توجه به مزیت‌های فراوان آن‌ها مورد توجه روزافزون قرار گرفته است و با وجود معایبی چون تراکم‌پذیری هوا و مشخصه غیرخطی آن در موارد مختلف از آن‌ها بهره گرفته می‌شود. در اغلب موارد از سیلندرهای پنوماتیک برای جابجایی اجسام استفاده می‌شود. با توجه به این‌که مقدار باری که بر روی عملگرها قرار می‌گیرد متغیر است؛ لذا لازم است کنترل‌کننده‌ای طراحی شود که ضمن کنترل دقیق موقعیت با تغییر بار روی سیلندر نیز خللی در کار آن ایجاد نشود.

در این پایان‌نامه سعی شده است که از کنترل‌کننده فازی تطبیقی استفاده شود. این کنترل‌کننده علاوه بر کنترل موقعیت توانایی تطبیق با سیستم در طول انجام فرایند را دارد. این ویژگی باعث می‌شود عواملی همچون خواص غیر خطی متغیر با زمان و تغییرات بار خللی در عملکرد سیستم ایجاد نکند. برای کنترل سیلندر پنوماتیک از یک شیر کنترل دبی استفاده شده است که امکان کنترل دبی عبوری از هر دو محفظه سیلندر را دارد. برای پیاده‌سازی اهداف کنترلی از سه متغیر حالت موقعیت، سرعت و شتاب پیستون به عنوان ورودی‌های فازی استفاده می‌شود. در نهایت از خروجی کنترل‌کننده به عنوان سیگنال کنترل هم در سیستم شبیه‌سازی شده در متلب و هم در سیستم تجهیز شده در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلید واژه: عملگر نیوماتیک، شیر کنترل دبی، کنترل‌کننده فازی - تطبیقی، بارگذاری متغیر، اتوماسیون صنعتی.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه پژوهش

۲	۱-۱- پیشگفتار
۸	۲-۱- نیوماتیک
۱۲	۱-۲-۱- ساخت عملگرهای نیوماتیک
۱۲	۲-۲-۱- سیلندرهای نیوماتیک
۱۲	۳-۲-۱- ضربه گیر انتهای سیلندر
۱۳	۴-۲-۱- طول سیلندر
۱۳	۵-۲-۱- انواع سیلندر
۱۵	۶-۲-۱- شیرهای پنوماتیک
۱۶	۷-۲-۱- محرک‌های شیر
۱۷	۸-۲-۱- ساخت عملگرهای نیوماتیک
۱۸	۳-۱- ساختار پایان‌نامه

فصل دوم: عملگر نیوماتیک

۲۰	۱-۲- مقدمه
۲۰	۲-۲- ضرورت اجرای پروژه
۲۰	۳-۲- هدف پروژه
۲۲	۴-۲- پژوهش‌های گذشته
۲۲	۱-۴-۲- پژوهش‌های گذشته در زمینه ربات‌های توانبخش
۲۵	۲-۴-۲- پژوهش‌های گذشته در زمینه مدل‌سازی سیستم نیوماتیک
۲۶	۳-۴-۲- پژوهش‌های گذشته در زمینه کنترل عملگرهای نیوماتیک
۳۱	۵-۲- کنترل عملگرهای نیوماتیک
۳۲	۶-۲- ویژگی‌های کنترلی عملگرهای نیوماتیک
۳۳	۷-۲- کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم

فصل سوم: مدل‌سازی و کنترل عملگر نیوماتیک

۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۸	۲-۳- مقدمات فیزیکی و معادلات دیفرانسیل سیستم
۳۸	۱-۲-۳- مقدمه

۳۸	..... مدل‌سازی ۲-۲-۳
۴۴	..... رویکرد مدل‌سازی خطی ۳-۲-۳
۴۶	..... رویکرد کنترل فازی تطبیقی غیرمستقیم ۴-۲-۳
۴۹	..... طراحی کنترل‌کننده ۳-۳
۴۹	..... مقدمه ۱-۳-۳
۴۹	..... ساختار کنترلی ۲-۳-۳

فصل چهارم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۵۶	..... مقدمه ۱-۴
۵۷	..... تشریح شبیه‌سازی ۲-۴
۵۷	..... پیستون ۱-۲-۴
۵۸	..... شیر (Valve) ۲-۲-۴
۶۰	..... کنترل‌کننده ۳-۲-۴
۷۳	..... سیستم آزمایشگاهی ۳-۴
۷۸	..... نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملی و تحلیل آن‌ها ۴-۴
۷۸	..... آزمایش اول: ورودی سینوسی ۱-۴-۴
۸۱	..... آزمایش دوم: ورودی شیب ۲-۴-۴
۸۴	..... آزمایش سوم: ورودی دندان اره‌ای ۳-۴-۴
۸۴	..... تحلیل نتایج سیستم آزمایشگاهی ۵-۴

فصل پنجم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

۸۸	..... جمع‌بندی ۱-۵
۸۸	..... نتیجه‌گیری ۲-۵
۸۹	..... پیشنهادات ۳-۵
۹۱	..... منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: طرح ربات کنترل موقعیت مورد استفاده در صنعت مبل ۳
- شکل ۱-۲: طرح ربات کنترل موقعیت مورد استفاده در صنعت بسته بندی ۳
- شکل ۱-۳: طرح ربات مورد استفاده در صنعت پرس تناسبی ۴
- شکل ۱-۴: طرح ربات مورد استفاده در جابه جایی اجسام سنگین ۵
- شکل ۱-۵: طرح ربات اره نوسانی ۵
- شکل ۱-۶: طرح ربات کنترل موقعیت دو درجه آزادی ۶
- شکل ۱-۷: طرح ربات پنجره ایمن ۶
- شکل ۱-۸: بلوک دیاگرام سیستم نیوماتیکی به همراه کنترل کننده PID ۸
- شکل ۱-۹: طراحی، ساخت و مونتاژ عملگر نیوماتیک به کمک پرینت سه بعدی [۱۲] ۱۷
- شکل ۲-۱: ربات شش درجه آزادی بنام رانچو گلدن ارم [۱۴] ۲۳
- شکل ۲-۲: شماتیکی از ربات پوما ۲۴
- شکل ۲-۳: ربات مایم که از دو ربات پوما در آن استفاده شده است ۲۵
- شکل ۲-۴: ردیابی موقعیت با سه متغیر ورودی ۲۷
- شکل ۲-۵: ساختار سیستم کنترل ادمیتانس ارائه شده برای ربات لوکومات [۵] ۲۹
- شکل ۲-۶: عملگر الاستیک سری [۳۷ و ۳۸] ۳۰
- شکل ۲-۷: ربات توانبخشی یک درجه آزادی برای توانبخشی زانو [۳۴] ۳۱
- شکل ۲-۸: مدل ربات توانبخشی یک درجه آزادی توانبخشی زانو ۳۱
- شکل ۲-۹: نمودار بلوکی سیستم کنترل فازی تطبیقی ۳۵
- شکل ۳-۱: شمای سیستم سرونیوماتیک مورد بررسی [۵۱] ۴۱
- شکل ۳-۲: شمای کلی روند رویکرد خطی سازی ۴۵
- شکل ۴-۱: شماتیک ساده یک پیستون به همراه بار به جرم m ۵۷
- شکل ۴-۲: شماتیک پیستون شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB ۵۸
- شکل ۴-۳: شماتیک ساده یک شیر ۲ به ۵ ۵۸
- شکل ۴-۴: شماتیک شیر ۲ به ۵ شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB ۵۹
- شکل ۴-۵: شماتیک سیستم شامل شیر و پیستون شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB ۶۰
- شکل ۴-۶: شماتیک کنترل کننده طراحی شده برای سیستم شامل شیر و پیستون شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB ۶۱
- شکل ۴-۷: تابع سینوسی با دامنه ۶ سانتی متر و فرکانس $\pi \cdot 0.06$ با اغتشاش ۱٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه ۶۱
- شکل ۴-۸: سیگنال کنترل تولید شده برای ردیابی مسیر فوق ۶۲
- شکل ۴-۹: تنظیم پارامترهای ghat در طول زمان اجرای شبیه سازی ۶۳
- شکل ۴-۱۰: تنظیم پارامترهای phat در طول اجرای شبیه سازی ۶۳

- شکل ۴-۱۱: خطای ردیابی سیستم به وسیله کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم ۶۴
- شکل ۴-۱۲: تابع سینوسی با دامنه ۶ سانتی متر و فرکانس $\pi \cdot 0.06$ با اغتشاش ۱٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه ۶۵
- شکل ۴-۱۳: سیگنال کنترل برای ردیابی مسیر ۶۵
- شکل ۴-۱۴: خطای سیستم به ردیابی بالا ۶۶
- شکل ۴-۱۵: تابع سینوسی با دامنه ۶ سانتیمتر و فرکانس $\pi \cdot 0.06$ با اغتشاش ۵۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه ۶۷
- شکل ۴-۱۶: سیگنال کنترل ردیابی با اغتشاش ۵۰٪ ۶۷
- شکل ۴-۱۷: تابع پله با دامنه ۵ سانتی متر همراه با اغتشاش ۱٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه ۶۸
- شکل ۴-۱۸: سیگنال کنترل ۶۸
- شکل ۴-۱۹: خطای ردیابی موقعیت ۶۹
- شکل ۴-۲۰: ردیابی تابع پله با دامنه ۵ سانتیمتر و اغتشاش ۵۰٪ ۷۰
- شکل ۴-۲۱: سیگنال خروجی از کنترل کننده ۷۰
- شکل ۴-۲۲: خطای ردیابی سیستم همراه با اغتشاش ۵۰٪ ۷۱
- شکل ۴-۲۳: سینوسی با دامنه ۱ سانتی متر و فرکانس $\pi \cdot 0.16$ با اغتشاش ۵۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه ۷۲
- شکل ۴-۲۴: سیگنال کنترل مرتبط با ورودی مطرح شده ۷۲
- شکل ۴-۲۵: خطای ردیابی موقعیت ۷۳
- شکل ۴-۲۶: تصویر سیلندر نیوماتیک استفاده شده در سیستم ۷۴
- شکل ۴-۲۷: ساختار داخلی شیر سرونیوماتیک ۷۵
- شکل ۴-۲۸: نحوه اتصال پورت های شیر ۷۶
- شکل ۴-۲۹: شماتیک سیستم نیوماتیک ۷۶
- شکل ۴-۳۰: نمایی از کارت دیتا PCI-1710 ۷۷
- شکل ۴-۳۱: خروجی حاصل از ورودی سینوسی همراه با ورود اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۲۵ ۷۸
- شکل ۴-۳۲: سیگنال کنترل مرتبط با ورودی مورد نظر ۷۹
- شکل ۴-۳۳: تنظیم پارامترهای phat ۸۰
- شکل ۴-۳۴: تنظیم پارامترهای ghat ۸۰
- شکل ۴-۳۵: خروجی حاصل از ورودی سینوسی و اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۶۶ ۸۱
- شکل ۴-۳۶: ورودی شیب با اعمال اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۸۵ ۸۲
- شکل ۴-۳۷: سیگنال کنترل مربوط به ورودی شیب ۸۲
- شکل ۴-۳۸: تنظیم پارامتر ghat ۸۳
- شکل ۴-۳۹: تنظیم پارامترهای ghat ۸۳
- شکل ۴-۴۰: پاسخ سیستم به ورودی پله همراه با اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۱۹ ۸۴

فصل اول:
مقدمه پژوهش

۱-۱- پیشگفتار

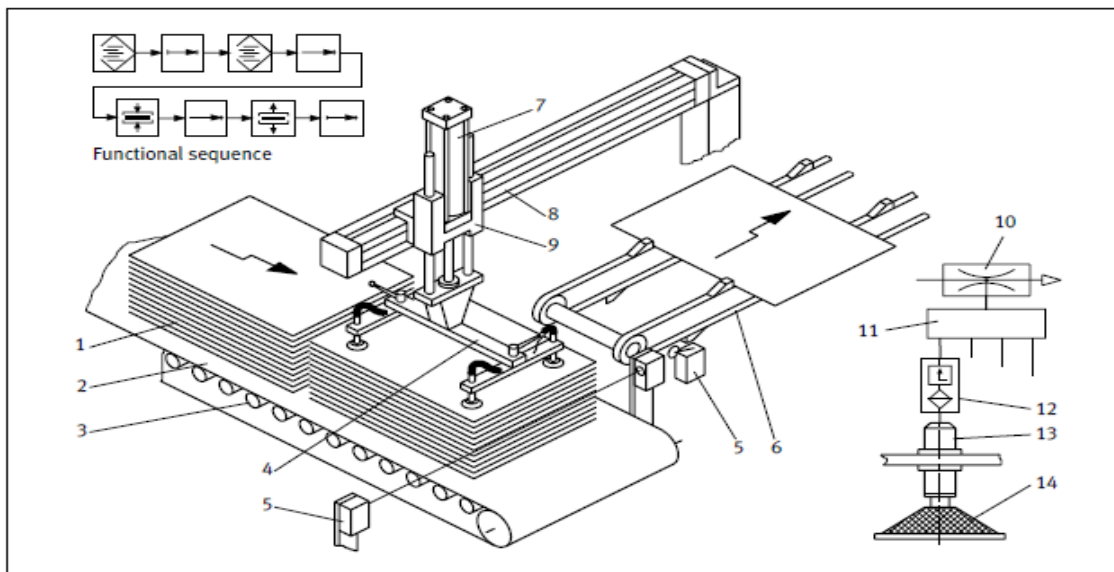
در حال حاضر عملگرهای الکترومکانیکی، هیدرولیکی و نیوماتیک دارای بیشترین کاربرد در تجهیزات اتوماسیون می‌باشند. هر کدام از این عملگرها دارای مزایا و معایبی می‌باشند. عملگرهای الکترومکانیکی قادر خواهند بود سرعت و شتاب را مستقل از بار وارده کنترل نمایند. اما امکان استفاده از آنها بدون واسطه وجود ندارد و باید از مواردی چون تسمه، گیربکس و ... استفاده شود. همچنین نسبت توان انتقالی به وزن و حجم در این عملگرها بسیار پایین است و کمترین کارامدی را در صنعت و اتوماسیون دارند.

عملگرهای هیدرولیکی با وجود این که بسیار سریع و دارای محدوده‌ی نیروی بالا می‌باشند؛ اما معایبی چون نشتی‌ها و قابلیت اشتعال روغن تحت فشار و ملزم بودن به استفاده از تجهیزات اضافه برای حفظ تمیزی و جلوگیری از نشت روغن در زمینه استفاده از این عملگرها وجود دارد و باعث شده است که کاربران به سراغ عملگرهای نیوماتیک بروند.

عملگرهای نیوماتیک با توجه به ویژگی‌هایی همچون هزینه پایین، نسبت قدرت بالا به وزن، پاکیزگی و منبع قدرتی در دسترس و ارزان، برای جابه‌جایی‌های ۱۰-۱ کیلوگرم مناسب‌ترین گزینه می‌باشند و طبق آمار در حدود ۷۰٪ جابه‌جایی‌ها در کاربردهای موقعیتیابی در این بازه قرار می‌گیرند. عملگرهای نیوماتیک در صنعت توان‌بخشی نیز به خاطر ویژگی‌هایی همچون نرمی ذاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ادامه به معرفی کامل چند نمونه از کاربردهای این عملگرها می‌پردازیم:

کاربرد در صنعت ساخت مبل: امروزه در صنعت به منظور افزایش کیفیت، دقت، سرعت ساخت و همچنین کاهش هزینه‌های فرایند تولید (هزینه‌های نیروی انسانی)، خطوط تولید به سمت اتوماسیون پیش رفته‌اند. در صنعت مبل‌سازی برای بلند کردن قطعات (تخته‌ها، تخته‌سه‌لا، فیبر کربنی و قطعات پلاستیکی) از فنجان‌های خلاء و برای جابه‌جایی آنها از سیلندرهای نیوماتیک استفاده می‌شود. سیلندرهای نیوماتیک قطعات را با دقت ۵mm برای نصب بر روی مبل قرار می‌دهند.

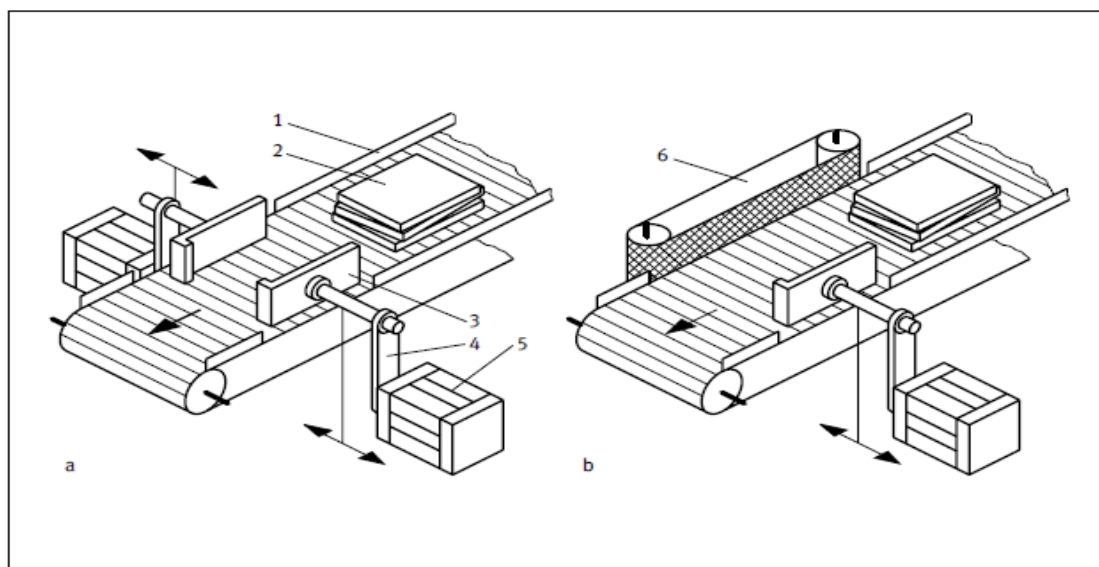
Destacking



شکل ۱-۱: طرح ربات کنترل موقعیت مورد استفاده در صنعت مبل [1]

کاربرد دیگر را می‌توان در بسته بندی قطعات نام برد؛ در خطوط تولید قبل از بسته بندی لازم است قطعات به شکل صحیحی بر روی یکدیگر مرتب شوند. برای این منظور در دو طرف نوار نقاله دو جک نیوماتیک قرار می‌گیرد که سنسورهای نصب شده بر روی نوار نقاله فرمان حرکت برای آن‌ها صادر می‌کند. شایان ذکر است برای مرتب سازی دقیق و جلوگیری از آسیب به قطعات کنترل دقیق موقعیت پیستون‌ها الزامیست.

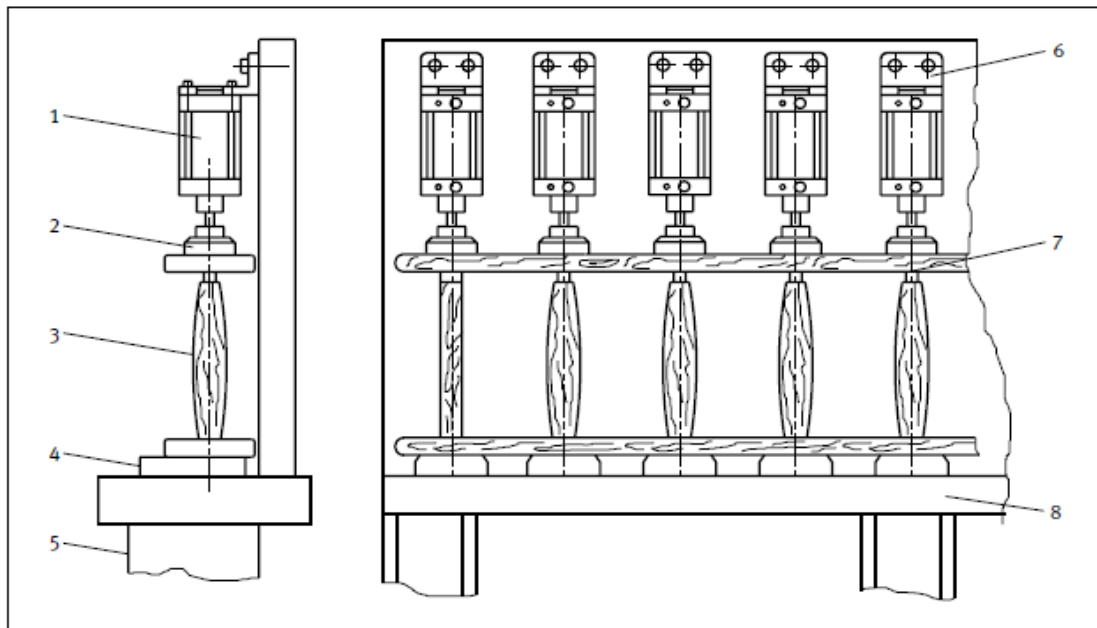
Alignment



شکل ۱-۲: طرح ربات کنترل موقعیت مورد استفاده در صنعت بسته بندی [1]

گروهی از دستگاه های پرس موسوم به دستگاه های پرس تناسبی¹ وجود دارند که برای کارهای خاص از قبیل جا انداختن رینگ ها در مکان های در نظر گرفته شده استفاده می شوند. این گروه از دستگاه های پرس نیازمند کنترل دقیق نیرو و موقعیت برای جلوگیری از آسیب دیدن قطعات می باشند. استفاده از جک های نیوماتیک در این دستگاه ها رواج داشته و به خوبی خواسته های مورد نیاز را فراهم می کند.

Press-fitting

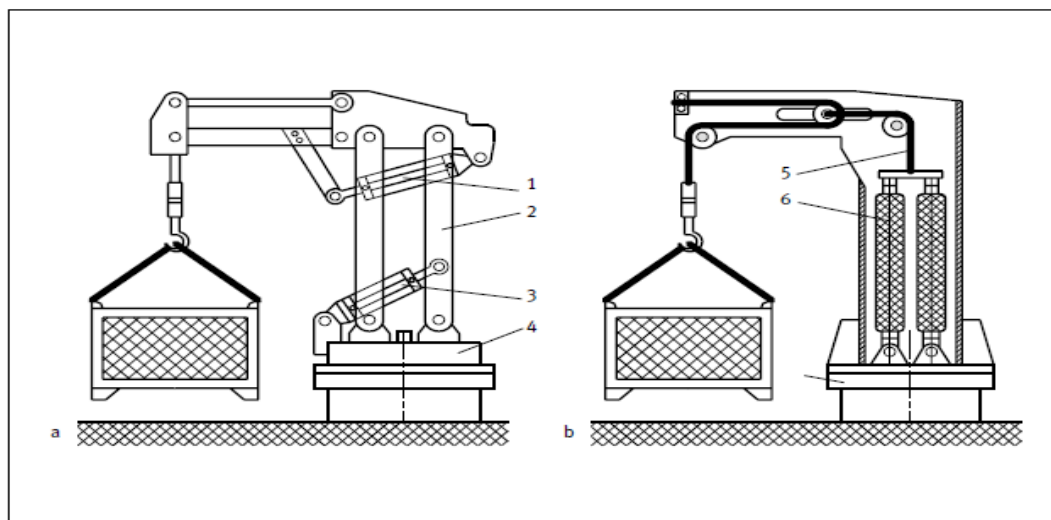


شکل ۱-۳: طرح ربات مورد استفاده در صنعت پرس تناسبی [1]

یکی از نیاز های اساسی بشر بلند کردن و جابه جایی اجسام با وزن زیاد می باشد. در صنعت نیز برای بلند کردن قطعات و تجهیزات سنگین از سیستم های پنوماتیک استفاده می شود. به طور کلی می توان توانایی تحمل وزن زیاد در کنار دقت بالا را از جمله مزیت های سیستم های پنوماتیک در نظر گرفت.

¹ Press-fitting

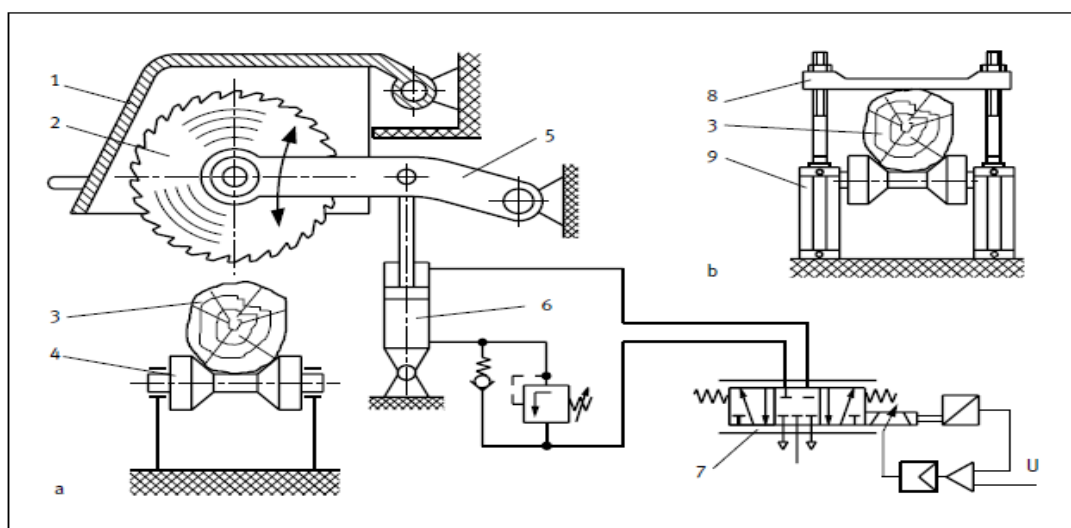
Lifting



شکل ۱-۴: طرح ربات مورد استفاده در جابه‌جایی اجسام سنگین [1]

در گذشته برای برش قطعات بزرگ چوب از سیستم‌های هیدرولیک برای کنترل اره‌های نوسانی^۱ استفاده شده است. یکی از خطرانی که در این نوع از کارگاه‌ها همواره در کمین است؛ قابلیت اشتعال روغن داغ تحت فشار می‌باشد. استفاده از سیستم‌های نیوماتیک خطر اشتعال در کارگاه‌های چوب‌بری را به حداقل می‌رساند. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید از یک جک پنوماتیک متصل به شیر کنترل جریان برای هدایت اره نوسانی استفاده شده است. [۱]

Sawing

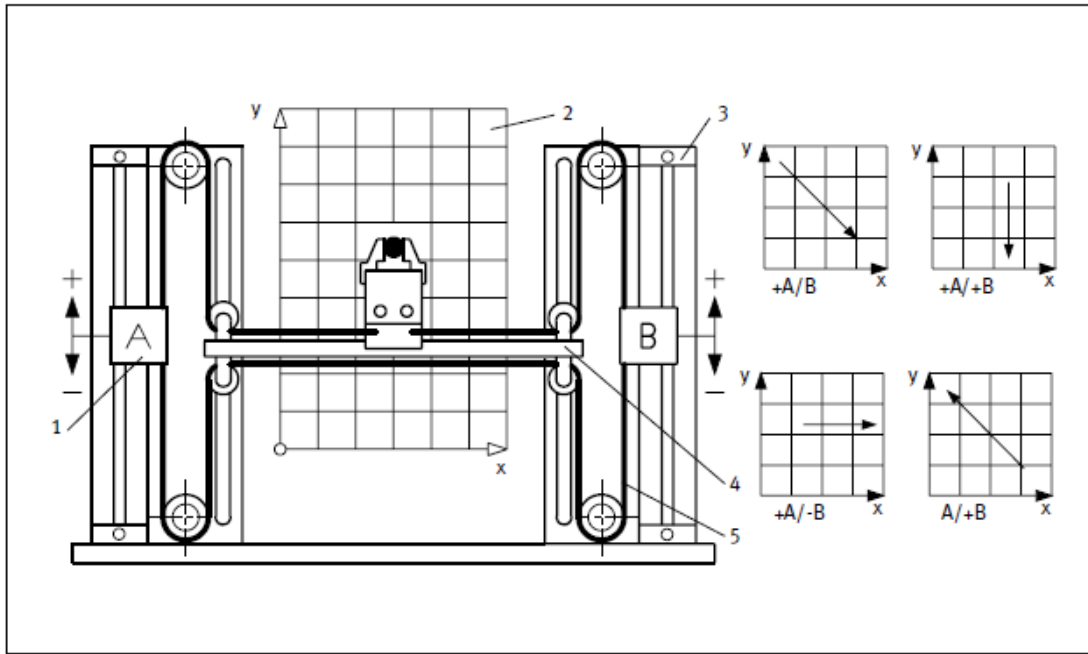


شکل ۱-۵: طرح ربات اره نوسانی [1]

¹ Swing saw

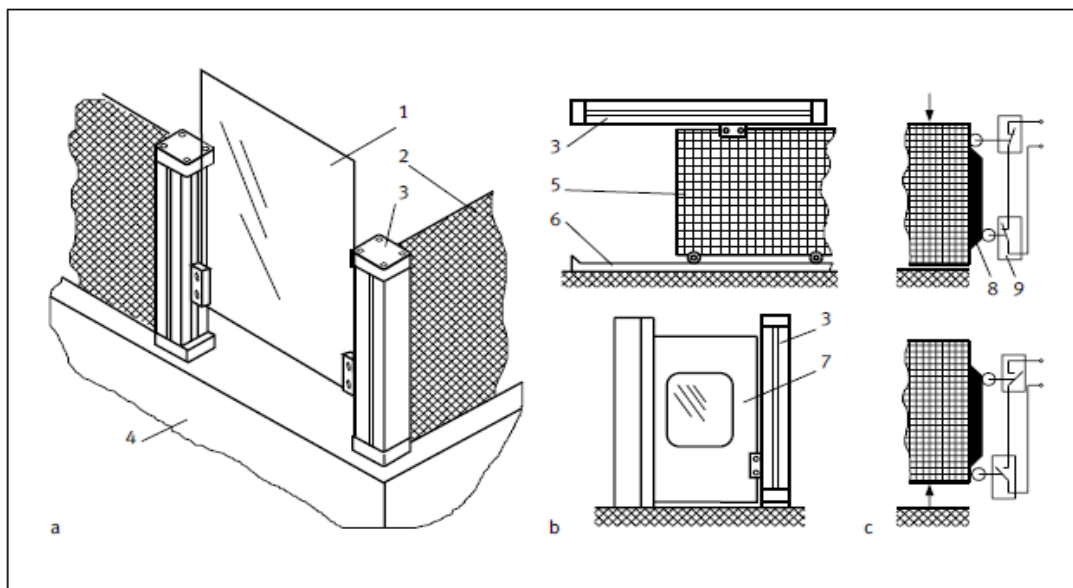
از کاربردهای دیگر نیز می‌توان به مکان‌یابی و کنترل موقعیت با دو درجه آزادی، صنعت قالب‌سازی، برش، پنجره‌های ایمن و... اشاره کرد [۳]. در ادامه توضیحاتی نیز در مورد کاربرد پنوماتیک در سیستم‌های توان‌بخشی اشاره شده است.

Positioning



شکل ۱-۶: طرح ربات کنترل موقعیت دو درجه آزادی [1]

Securing



شکل ۱-۷: طرح ربات پنجره ایمن [1]

با افزایش روزافزون آمار بیماران مبتلا به سکته مغزی و ضایعات نخاعی در دنیا، تعداد افرادی که به توانبخشی نیاز پیدا می‌کنند، به سرعت در حال افزایش است. بر اساس آمار در آمریکا، توانبخشی افرادی که تنها در اثر سکته مغزی دچار آسیب دیدگی می‌شوند، سالانه حدود ۷ میلیارد دلار هزینه در بر دارد [۴]. به طور سنتی در کلینیک‌های فیزیوتراپی، توانبخشی اندام آسیب دیده توسط فیزیوتراپ‌ها و با هدایت عضو در مسیرهای مشخص و نیز اعمال نیروهای مناسب در طی مسیر انجام می‌پذیرد. همچنین ممکن است به منظور نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، به عنوان مثال در توانبخشی پا، از تردمیل و سیستم مهار کننده وزن نیز کمک گرفته شود. با این حال، عمل توانبخشی فرآیندی سخت و طاقت فرسا هم برای درمانگر و هم برای بیمار می‌باشد و با طولانی شدن این فرآیند، مشکلات موجود در این زمینه نیز تشدید می‌گردد. با توجه به تحقیقات انجام شده، درمان‌های توانبخشی در افراد نیمه فلج به طور متوسط زمانی بین ۶ ماه تا دو سال را نیاز دارد و در پاره‌ای از مواقع ارزیابی و معاینات و درمان باید تا سالیان طولانی ادامه یابد. از طرفی امکانات استاندارد در مراکز توانبخشی گران قیمت بوده و نیاز به وجود حداقل یک درمانگر به ازاء هر بیمار می‌باشد. علاوه بر مشکلاتی که برای بیماران وجود دارد، مشکلاتی برای درمان کنندگان نیز به وجود می‌آید که عمدتاً به دلیل روند نسبتاً کند بهبودی می‌باشد. بنابراین استفاده از تکنولوژی‌هایی که بتوانند به طور هوشمند در روند توانبخشی کارا و موثر باشند از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، امروزه در سطح دنیا تحقیقات زیادی جهت طراحی و ساخت مکانیزم‌های مختلف جهت کمک به فرآیند توانبخشی صورت می‌پذیرد و با توجه به نتایج مطلوبی که داشته‌اند، استفاده از آنها در حال افزایش است. از مهم‌ترین این طرح‌ها در زمینه ربات‌های توانبخشی می‌توان به مجموعه‌های رباتیک لوکومات [۵]، الکس [۶ و ۷]، لویز [۸]، سوپار [۹]. ربات توان‌بخشی^۱ [۱۰] و هپتیک واکر [۱۱] اشاره کرد که معمولاً در سطوح ساده کنترلی مانند حرکت دادن عضو در مسیرهای از قبل مشخص شده عمل می‌نمایند.

مطابق تحقیقات کلینیکی انجام شده، به دلایل مختلف که عمدتاً به آثار روحی و روانی برمی‌گردد، استفاده از این ربات‌ها نیز برای افراد تحت درمان بعد از مدتی خسته کننده و تکراری می‌گردد و لزوم افزایش جذابیت در این دستگاه‌ها از جنبه‌های مختلف وجود دارد. در این راستا می‌توان با افزایش ویژگی تعاملی مجموعه، به طوری که ربات بتواند با گرفتن پسخور از بیمار در عملکرد خود تغییراتی را به طور متناسب با شرایط به وجود آورد بهبود قابل ملاحظه‌ای در کارایی فرآیند توانبخشی به وجود آورده که این تعامل می‌تواند در قالب تعامل دیداری، شنیداری، نیرویی و ... باشد. هر کدام از روش‌های تعاملی فوق دارای اهمیت خاص خود می‌باشند و می‌توانند به طور مستقل یا در ترکیب با جنبه‌های دیگر تعاملی، کارایی

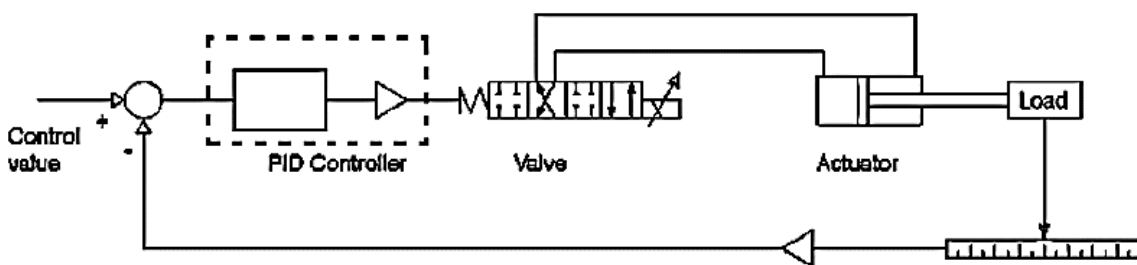
¹ Rehabilitation robots

مجموعه رباتیک توانبخشی را افزایش دهند. اهمیت و حساسیت در به کار گیری تعامل نیرویی را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. میزان نیروی وارد شده از طرف ربات به شخص در میزان تلاش عضلات او به طور مستقیم تاثیرگذار بوده که در مراحل مختلف توانبخشی و تسریع روند بهبودی بسیار موثر است.
۲. وارد شدن نیروهای زیاد و یا ناگهانی می تواند آسیب جدی به بیمار تحت درمان وارد نماید.
۳. احساس غرق شدگی که فاکتور بسیار مهمی در افزایش جذابیت فرآیند و ایجاد انگیزه در بیمار می باشد، به میزان زیادی به پسخورهای نیرویی که شخص از محیط می گیرد بستگی دارد. همچنین حسی که بیمار از دینامیک سیستم متصل به خود (مانند اینرسی، سفتی و میرایی آن) دارد، می تواند در ترکیب با مولفه های دیگر تعاملی در موفقیت شبیه سازی سناریوهای مختلف واقعیت مجازی بسیار موثر باشد.

۲-۱- نیوماتیک

سرو کنترل از قدیم در صنعت محدود به دو تکنولوژی موتورهای الکتریکی و عملگرهای هیدرولیکی بوده است. سرو موتورهای الکتریکی در کاربرد، تمیز و قابل اطمینان هستند اما معمولاً دارای سرعت های بالا، اعمال گشتاور پایین و نیز نیازمند یک المان انتقال دهنده برای تبدیل قدرت به فرم مناسب هستند. از طرفی، المان های مکانیکی دیگری نیز لازم هستند تا حرکت دورانی موتور را به حرکت خطی تبدیل کند. عملگرهای هیدرولیکی دارای خاصیت مناسب سرعت و نیرو هستند. اما این سیستم ها باعث ایجاد خطر در محیط های کاری می شوند. پرسنلی که در کنار پمپ های هیدرولیکی کار می کند و به محافظ گوش نیاز دارند و همچنین در این سیستم ها، پدیده نشت به وفور دیده می شود. اما نکته مثبتی که در رابطه با سیستم های هیدرولیکی و الکتریکی وجود دارد این است که مدل های خطی رسته یک تقریب مناسبی از هر دو سیستم هستند و کنترل های PID برای اهداف مورد نظر کافی می باشند. در ادامه به معرفی کامل سیستم های نیوماتیک می پردازیم.



شکل ۱-۸ بلوک دیاگرام سیستم نیوماتیکی به همراه کنترل کننده PID

نیوماتیک یا پنوماتیک یکی از انواع انرژی‌هایی است که در حال حاضر استفاده زیادی از آن در انواع صنایع می‌شود و می‌توان گفت امروزه کمتر کارخانجات یا مراکز صنعتی را می‌توان دید که از پنوماتیک استفاده نکند. انرژی نیوماتیک، در قرن حاضر یکی از انواع انرژی‌های اثبات شده‌ای است که بشر با اتکا به آن راه صنعت را می‌پیماید.

پنوما در زبان یونانی یعنی تنفس باد و پنوماتیک علمی است که در مورد حرکات و وقایع هوا صحبت می‌کند. عملگرهای نیوماتیکی دارای ویژگی‌هایی می‌باشند که می‌تواند آن را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای بسیاری از کاربردهای انتقال قدرت مطرح کند. امروزه در بین صنعتگران به عنوان انرژی کم خطر و ارزان مشهور است و از آن استفاده وافر می‌کنند.

عامل اصلی کارکرد سیستم پنوماتیک هوا است و هوا در همه جای زمین وجود دارد. هوای فشرده را می‌توان از طریق لوله کشی به نقاط مختلف کارخانجات یا مراکز صنعتی جهت کارکرد سیستم‌های پنوماتیک هدایت کرد. هوای فشرده را می‌توان در مخازن مخصوص انباشته و آن را انتقال داد. یعنی همیشه احتیاج به کمپرسور نبوده و می‌توان از سیستم پنوماتیک در مکان‌هایی که امکان نصب کمپرسور وجود ندارد نیز استفاده نمود. افزایش و کاهش دما اثرات مخرب بر روی سیستم پنوماتیک ندارد و نوسانات حرارتی از عملکرد سیستم جلوگیری نمی‌کند. هوای فشرده خطر انفجار و آتش سوزی ندارد به این دلیل نیاز زیادی به تاسیسات حفاظتی نیست. هوای فشرده نسبت به روغن هیدرولیک مورد مصرف در سیستم‌های هیدرولیکی تمیزتر است و به دلیل این تمیزی از سیستم پنوماتیک در صنایع دارویی و نظایر آن استفاده می‌شود.

قطعات پنوماتیک و اتصالات آن نسبتاً ارزان و از نظر ساختمانی قطعاتی ساده هستند، لذا تعمیرات آنها راحت‌تر از سیستم‌های مشابه نظیر سیستم‌های هیدرولیکی می‌باشد و نگهداری راحتی دارند که همه این موارد به کاهش هزینه‌های به کار رفته در این سیستم‌ها منجر می‌شود.

عملگرهای نیوماتیکی مانند عملگرهای هیدرولیکی می‌توانند بدون واسطه بر روی بار اثر کنند. نسبت بالای توان به وزن، سرعت عمل بالا، قابلیت اعمال نیرو در یک موقعیت ثابت برای مدت نسبتاً طولانی از دیگر ویژگی‌های ممتاز این سیستم‌ها می‌باشد. همچنین سرعت حرکت سیلندرهای عمل‌کننده با هوای فشرده در حدود ۱ الی ۲ متر در ثانیه است و در موارد خاصی به ۳ متر در ثانیه می‌رسد که این سرعت در صنایع قابل قبول بوده و بسیاری از عملیات‌های صنعتی را می‌تواند عهده‌دار شود.

عوامل سرعت و نیرو در سیستم پنوماتیک قابل کنترل و تنظیم است. عناصر پنوماتیک در مقابل اضافه بار مقاوم بوده و به آنها صدمه وارد نمی‌شود، مگر اینکه افزایش بار سبب توقف آنها گردد. تعمیرات و نگهداری سیستم‌های پنوماتیک در مقایسه با انرژی‌هایی نظیر انرژی برق و انرژی سیالات در سیستم‌های

هیدرولیک از خطر کمتری برخوردار است. سیستم پنوماتیک معایبی نیز دارد که در ادامه به ذکر آن پرداخته می‌شود.

با توجه به اینکه سیال اصلی مورد استفاده در سیستم پنوماتیک هوای فشرده است و جهت تهیه هوای فشرده باید با کمپرسور آنرا فشرده کرد، همراه هوای فشرده شده مقداری رطوبت و ناخالصی هوا وارد سیستم شده و سبب برخی خرابی‌ها در قطعات می‌شود، لذا باید جهت تهیه هوای فشرده فیلتراسیون مناسب استفاده نمود.

هوای مصرف شده در سیستم پنوماتیک در هنگام تخلیه از سیستم دارای صدای زیادی است که این مسئله سبب می‌شود تا از صدا خفه کن استفاده شود.

به علت تراکم پذیری هوا به خصوص در سیلندره‌های پنوماتیکی که زیر بار قرار دارند امکان ایجاد سرعت ثابت و یکنواخت وجود ندارد که این مسئله از معایب سیستم پنوماتیک به شمار می‌رود اما قابل ذکر است که اخیراً یک نوع سیلندر که به جای شفت سیلندر از نوار لاستیکی استفاده می‌کند؛ ساخته شده است که این عیب را برطرف ساخته است.

به طور کلی در مقایسه مزایا و معایب پنوماتیک می‌توان گفت با توجه به مزایای بسیار نسبت به معایب کمتر، می‌توان از پنوماتیک به عنوان یک انرژی مفید در صنایع استفاده کرد. اما به طور معمول از عملگرهای نیوماتیکی فقط به منظور جابجایی بار بین دو نقطه ثابت استفاده می‌شود. هوا به شدت تراکم پذیر است که این باعث نرمی پایین سیستم‌ها می‌شود و در پاسخ سیستم ایجاد پس‌فاز می‌کند. سفتی واقعی یک سیلندر نیوماتیکی به موقعیت پیستون بستگی دارد و همچنین این سیلندرها می‌توانند دارای اصطکاک زیادی باشند که در بسیاری از موارد مانع حرکت روان پیستون می‌شود.

امروزه دسترسی به کامپیوترهای ارزان قیمت با بازدهی بالا باعث فراهم آمدن فرصتی شده است که الگوریتم‌های پیشرفته کنترلی در کاربردهای صنعتی بر روی عملگرهای نیوماتیکی قابل اجرا باشد، این تکنولوژی هر روز عرصه‌های جدیدی را به روی کاربران می‌گشاید. اما هنوز زمینه‌های زیادی برای طراحی، مدل سازی و کنترل سیستم‌های نیوماتیکی وجود دارد که پژوهشگران زیادی را به خود جذب کرده است.

بطور خلاصه بعضی از ویژگی‌های سیستم‌های نیوماتیک که سبب بکارگیری فراوان آنها در کاربردهای صنعتی گردیده، به قرار زیر هستند.

- نگهداری آسان و ساده بودن سیستم
- ارزانی و فراوان بودن اجزاء

- کنترل آسان در کاربردهای معمول
- ایمنی بالا در عملیات کاری
- خود خنک کار بودن
- تمیزی و بهداشتی بودن
- چگالی توان خوب (نسبت نیرو به وزن بالا) در مقایسه با عملگرهای الکتریکی
- انعطاف پذیر و نرم بودن بدلیل قابل تراکم بودن هوا
- پاسخ سریع عملگر با شتاب بالای مثبت یا منفی (شتابگیری مثبت برای شروع حرکت و منفی برای توقف)

اما سیستم‌های نیوماتیکی دارای برخی معایب نیز هستند که در زیر به آنها اشاره شده است:

- گران بودن هوای فشرده به عنوان منبع تغذیه سیستم (عمدتاً بدلیل فرآیند فشرده سازی، تلفات در توزیع و عدم استفاده از لوله‌های برگشتی برای هوای مصرفی خط و تخلیه آن به محیط بیرون است)

- تراکم پذیری هوا که در برخی موارد موجب کاهش دقت و کاهش نیرو در عملگرها می‌گردد.

به هر حال با در نظر گرفتن موارد بالا، کاربردهایی برای سیستم‌های نیوماتیکی ایجاد شده است. اما همیشه انتخاب اینکه چه موقع از تکنولوژی نیوماتیک در مسائل استفاده نماییم، کاملاً مشخص و واضح نمی باشد. انواع عمده عملگرها در صنعت و اهداف اتوماسیون از نوع الکتریکی، نیوماتیکی و هیدرولیکی هستند. در اغلب موارد، انتخاب بهترین نوع عملگر از انواع مذکور، کاملاً مشخص و واضح نیست. عملگرهای نیوماتیکی به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. در اغلب موارد، کاربردهای این عملگرها تنها به کنترل نقطه به نقطه محدود می‌شوند. اما اگر به این عملگرها توانایی ردیابی موقعیت داده شود، به دلیل سبک و وزن سبک و سرعت بالا، می‌توان در بسیاری از کاربردهای اتوماسیون رباتیک، ماشینکاری، مهندسی پزشکی و واسطه‌های لامسه‌ای از آنها بهره برد.

نیازهای جدید در سیستم‌های نیوماتیکی به طور مداوم در حال شکل‌گیری می‌باشد. مواردی چون سیستم‌های حرکتی از راه دور¹، انعکاس دهنده نیرو، واسطه‌های لامسه‌ای و دیگر کاربردها در رباتیک به کارایی بالای عملگرهای نیوماتیکی مورد استفاده در مکانیزم‌هایی استوارت برای سیمولاتورهای پرواز با رانندگی نیز، نیاز به کنترل دقیق موقعیت، سرعت، شتاب و نیرو دارند. ضمناً مهم است که پاسخ این

¹ Teleoperation

عملگرها سریع باشد و بتوانند در محدوده‌های فرکانسی بالاتر کار نمایند. موتورهای الکتریکی دنده‌دار معمول نمی‌توانند چنین مشخصاتی را فراهم نمایند. موتورهای الکتریکی طراحی شده جدید که سیستم رانش مستقیم بدون مکانیزم‌های میانی و تبدیلی دارند، برای بکارگیری در چنین مواردی هنوز آماده نیستند. ضمناً این عملگرها، برای دفع حرارت تولید شده به سیستم‌های خنک کاری ویژه که خود وزن زیادی دارند و حجم بالایی اشغال می‌نمایند، نیاز دارند.

سیستم‌های سرونوماتیکی معایبی چون وجود نیروهای اصطکاکی بالا، باند مرده (بدلیل اصطکاک ایستایی کولمب) و زمان مرده (بدلیل تراکم پذیری هوا)، دارند. همین موارد، منجر به غیرخطی شدن معادلات سیستم‌های نیوماتیکی گشته که از لحاظ کاربردی، کنترل متغیرها را در نقاط خاص، مشکل می‌نماید. تحقیقات متنوعی برای بهبود کارایی سیستم‌های رانش نیوماتیکی با استفاده از محتویات تکنولوژی روز انجام گرفته است. اگرچه تکنولوژی جدید پتانسیل بیشتری را برای کارایی‌های بالاتر فراهم می‌نمایند، اما احساس می‌شود که کلید موفقیت در نیوماتیک، در رهیافت سخت‌تر طراحی و کنترل این سیستم‌ها قرار گرفته است.

۱-۲-۱ - کمپرسورهای تولید هوای فشرده

هوای فشرده در سیستم نیوماتیکی توسط کمپرسور فراهم می‌گردد. فشار متعارف برابر با ۶ تا ۱۰ بار است. ۱ بار برابر است با مقدار ۱۰ نیوتون که بر سطح معادل ۱ سانتی‌متر مربع وارد می‌آید.

غالباً این امکان وجود دارد که فشار هوایی که در سیستم لوله‌کشی نیوماتیکی جریان دارد، در سیلندر افزایش یابد. بدین جهت می‌بایست پیستونی با وسعت زیاد انتخاب کرد که نیروی لازم را فراهم آورد، که بدین منظور سیلندرهایی در طرح‌ها و اندازه‌های مختلف عرضه شده است.

۱-۲-۲ - سیلندرهای نیوماتیک

در داخل سیلندر پیستون قرار دارد و نیروی آن توسط دسته پیستون که در خارج از سرپوش سیلندر قرار می‌گیرد به سمت خارج انتقال می‌یابد. هرچه سطح پیستون وسیع‌تر و هوای فشرده بیشتر باشد، به همان مقدار نیروی پیستون افزایش می‌یابد.

۱-۲-۳ - ضربه‌گیر انتهای سیلندر

هنگام حرکت سریع پیستون، به ابتدا و انتهای بدنه سیلندر به شدت ضربه وارد می‌شود. به همین علت و به منظور جلوگیری از تکان‌های شدید جسم متحرک در هر دو طرف انتهای سیلندر، ضربه‌گیری نصب

می‌شود که پیستون را متوقف می‌سازد. طرز کار این ضربه‌گیر به این ترتیب می‌باشد که شاخک ضربه‌گیر سر پیستون با نزدیک شدن به دهانه خروجی بدنه سیلندر کشیده می‌شود و به این وسیله هوا در محل استوانه‌ای آن محبوس می‌شود و با حرکت هوا، پیستون تحت فشار قرار می‌گیرد. این فشار موجب می‌شود پیستون به طریقه ای ارتجاعی متوقف شود. هوای محبوس شده از طریق یک دریچه به آرامی به خارج هدایت می‌شود. هنگام خروج، هوا از رینگ‌های آب‌بندی شده عبور می‌کند. نکته قابل توجه این است که هنگام خروج هوا، تمام سطح پیستون جهت تولید نیرو استفاده می‌شود.

۱-۲-۴- طول سیلندر

طول سیلندر با توجه به مسیر حرکت مورد نیاز پیستون تنظیم می‌شود. سیلندرهایی با طول‌های متفاوت عرضه شده است. ولی طول استاندارد آن بیشتر توصیه شده است. به ویژه در مورد سیلندرهایی دوکاره نباید طول سیلندر بیشتر از مسیر حرکت پیستون باشد، زیرا در حرکت پیستون مقدار زیادی از هوای فشرده در فضای غیرقابل استفاده از سیلندر بیهوده پر و تخلیه می‌گردد و باعث ایجاد نیروی اصطکاک در قسمت ضربه‌گیرها می‌شود. لوله سیلندر با اندازه‌های مختلف، طبق نیاز مشتریان ارائه می‌شود که با بدنه، سرپوش سیلندر، بست‌ها و پیستون هماهنگی دارد و به این ترتیب، مشتریان می‌توانند طول سیلندر را با توجه به نیازشان انتخاب کنند.

هنگامی که طول سیلندر زیاد باشد. می‌توان حدود آن را معین نمود، زیرا وقتی که دسته پیستون به سمت خارج رانده می‌شود، تحت تاثیر نیروی متقابل، امکان بروز خطر شکستگی وجود خواهد داشت و لبه‌های پیستون در جهت مسیر حرکت دسته پیستون، در سرپوش سیلندر به شدت تحت فشار قرار می‌گیرد.

این که طول خمیدگی سیلندر، براساس استاندارد تعیین شود. از نقش بسزایی برخوردار است. در کاتالوگ-های مربوطه، نمونه طول‌ها با اندازه مجاز و با توجه به ظرفیت آن وجود دارد.

۱-۲-۵- انواع سیلندر

تحت تأثیر هوای فشرده پیستون به حرکت در می‌آید و دسته پیستون به سمت جلو رانده می‌شود. قبل از حرکت بعدی باید پیستون به عقب برگردد و برای حرکت بعدی آماده شود که این عمل به دو صورت انجام می‌شود.

۱-سیلندر یک کاره

در این نوع سیلندر، فنی فشاری، داخل سیلندر بین پیستون و سرپوش سیلندر نصب می‌گردد که با افت هوای فشرده و تخلیه آن، سیلندر را به عقب می‌راند. وقتی که پیستون به سمت خارج حرکت می‌کند، فنر بسته می‌شود. فنر نباید زیاد محکم باشد تا به وسیله آن حرکت برگشتی پیستون بدون نیروی خارجی امکان‌پذیر باشد. چنین سیلندری را که پیستون آن فقط در جهت مسیر حرکت خروجی خود نیرو تولید می‌کند، سیلندر یک کاره یا سیلندر یک‌طرفه می‌نامند.

۲- سیلندر دو کاره

نوع دیگری از سیلندرها سیلندر دو کاره یا دو طرفه می‌باشد. این نوع سیلندر برای حرکت پیستون از هوای فشرده که به دسته پیستون اعمال می‌شود، استفاده میکند و همزمان با آن در جهت مقابل نیز می‌توان فشار هوا را افزایش داد. در چنین مواردی باید در سرپوش سیلندر در محل دسته پیستون یک درزگیر نصب شود که مانع نفوذ هوا به سمت خارج دسته پیستون شود. چنین سیلندری که پیستون آن در هر دو جهت ورودی و خروجی با فشار هوای متراکم حرکت می‌کند، سیلندر دو طرفه یا دو کاره نامیده می‌شود. برای وارد کردن و تخلیه هوا در مسیر حرکت پیستون، باید از یک شیر مناسب استفاده کرد. قبل از این که وارد جزئیات شویم ذکر دو نوع دیگر از انواع سیلندر ضروری می‌باشد.

۳- سیلندر با کورس کوتاه

از سیلندر با طول کورس کوتاه ترجیحا در جهت نیروی انبساط و یا فرایند فشار استفاده می‌شود و مسیر حرکت آن بیش از چند میلی‌متر نیست.

۴- سیلندر بدون دسته پیستون

همان‌طور که از نامش پیداست فاقد دسته پیستون می‌باشد و بدون حرکت پیستون کار می‌کند. در این نوع سیلندر، برای انتقال نیروی پیستون به خارج به روش‌های مختلف عمل می‌شود. مثال، یک اتصال مغناطیسی بین پیستون در داخل و یک بوش در خارج از لوله سیلندر ایجاد می‌شود؛ که یک راه حل ساده به شمار می‌آید. راه حل دیگر این است که طول سیلندر را به طریقه مکانیکی شکاف داده و اتصالات ممتد بین پیستون و بوش خارج از سیلندر ایجاد کنیم. شکاف‌های قسمت جلو و عقب برش، توسط حلقه‌های آب‌بندی و نوار فولادی پوشیده می‌شود که این راه حلی قابل اطمینان است که بارها تجربه شده است. یکی دیگر از سیستم‌های متنوع و کارآمد این است که یک نوار فولادی به پیستون نصب شود که این نوار توسط سرپوش سیلندر و در بالای غلطک برگشتی به صورت متحرک قرار می‌گیرد و از آن‌جا توسط سرپوش سیلندر به طرف پیستون برمی‌گردد.

۱-۲-۶- شیرهای پنوماتیک

برای کنترل حرکت سیلندرها، شیرها به کار برده می‌شوند. به عنوان مثال برای جابه‌جایی و تغییر جهت حرکت اثرگر یک سیلندر یک‌طرفه، شیر مربوطه می‌بایست هوای فشرده را به محفظه سیلندر در پشت پیستون هدایت کند. زمانی که پیستون از طریق فنر نصب شده به سمت داخل رانده می‌شود هوای جلوی سیلندر نیز تخلیه شود. از این رو هر شیر به سه خط لوله متصل می‌شود.

۱- اتصال به فشار منبع هوا که هوا را با فشار وارد سیلندر می‌کند.

۲- اتصال به سیلندر که با توجه به یک‌طرفه یا دوطرفه بودن سیلندر، یک یا دو اتصال برقرار می‌شود.

۳- اتصال شیر به محیط آزاد برای تخلیه فشار

اتصال لوله‌ها توسط کوپلینگ‌های نصب شده که قابل جابه‌جایی است انجام می‌شود. پیستون شیر از خارج در دو موضع کنترل قادر به حرکت است یک موضع برای خروجی پیستون سیلندر و دیگری برای ورودی آن.

یک شیر راه دهنده با سه دهانه کنترل و دو موضع سوئیچی شیر راه‌دهنده ۳/۲ نامیده می‌شود. که اولین عدد بیانگر تعداد مسیرها یا دهانه‌های کنترل و دومین عدد بیانگر تعداد موضع سوئیچی می‌باشد. بر این اساس، یک شیر با چهار دهانه کنترل و دو موضع سوئیچی شیر ۴/۲ نامیده می‌شود.

برای حرکت یک سیلندر دوکاره، چهار اتصال شیر بکار برده می‌شود. یکی برای اتصال به شبکه فشار هوا و دیگری به خروجی هوا و دو اتصال دیگر به سیلندر متصل می‌شود. برای این که پیستون به سمت خارج رانده شود، باید شیر هوای فشرده را به پشت پیستون هدایت کرده و همزمان، هوای طرف مقابل تخلیه گردد. در حین برگشت پیستون دو دهانه کنترل در شیر جابه‌جا می‌شوند.

در بعضی مواقع شیرها بیش از ۲ موضع سوئیچی دارند. به عنوان مثال، جهت بکاراندازی یک سیستم کنترل، نیاز به کنترل تمام مواضع می‌باشد. شیرهای فوت نوت^۱ از جمله شیرها با چنین قابلیت می‌باشد که در فصول بعدی به‌طور مفصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در اکثر موارد دو تخلیه هوا برقرار می‌گردد. زیرا پس از هر مکانیزم کنترل، هوای برگشتی از هرطرف پیستون به بیرون منتقل شود و دارای درجه خروجی مشترک نباشند. از مزایای دیگر لوله برگشتی جدا این است که هوای برگشتی در هر فرایند کنترل متمایز می‌تواند به صورت جداگانه مورد استفاده قرار گیرد.

¹ MPYE

۷-۲-۱- محرک‌های شیر

برای بکارگیری یک شیر و برای این که یک فرایند کنترل صورت بگیرد، سیگنالی از شیر عبور می‌کند که این سیگنال می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد.

۱- محرک‌های دستی

ابتدا محرک‌های دستی هستند که در مورد آن‌ها تجهیزات نیوماتیکی، از طریق حرکت اهرم کنترل و دکمه‌ها با نیروی عضلانی کنترل می‌شود. ساخت آن‌ها به گونه‌ای است که هم‌اندازه با سرشیر می‌باشد و می‌توان به صورت مستقیم به انتهای شیر متصل شود.

۲- محرک‌های مکانیکی

دومین نوع محرک، محرک مکانیکی است که توسط شاخک، فنر و غلطک کار می‌کند. این نوع محرک‌ها نیز با سرشیر هم‌اندازه می‌باشند.

بر اساس طرح استاندارد DIN ISO 1219 چهار محرک مکانیکی وجود دارد. محرک‌های مکانیکی، توسط بادامک‌ها و نگه‌دارنده‌ها و به عبارتی از طریق اجزای تجهیزات فنی فشرده می‌شوند. از این رو، باید آن‌ها را همراه با شیر به مواضع مناسب در تجهیزات نصب نمود. ماشین یا تجهیزات با حرکت خود، شیر را برای خط کار بعدی کنترل می‌نمایند.

۳- کنترل از راه دور

سومین نوع محرک، محرک‌های کنترل از راه دور می‌باشد. برای این منظور، سیگنال کنترل به سوی محرک شیر از یک موضع سوئیچی به فاصله دور انتقال می‌یابد.

در تجهیزات نیوماتیکی، هوای فشرده یا ولتاژ الکتریکی برای انتقال سیگنال بکار می‌رود. زمانی که از هوای فشرده برای انتقال سیگنال کنترل استفاده می‌شود نصب محرک آسان است. از این رو بر روی سرشیر خط لوله هوای باریکی وصل می‌شود. شوک فشار، جهت کنترل شیر، از طریق شیر راه‌دهنده کوچکی که اصطلاحاً شیر پیلوتی نامیده می‌شود، داده می‌شود.

برای محرک الکتریکی، یک الکترومغناطیس بر روی سرشیر نصب می‌گردد که شیر را کنترل می‌نماید. توسط یک سوئیچ نصب شده در موضع دیگر، ولتاژ لازم جهت تحریک سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌شود.

متناسب با اندازه سیلندر، شیرها نیز در اندازه‌های گوناگون بکار می‌روند. جریان اسمی از موارد مهم در رابطه با اندازه‌های شیر به شمار می‌آید.

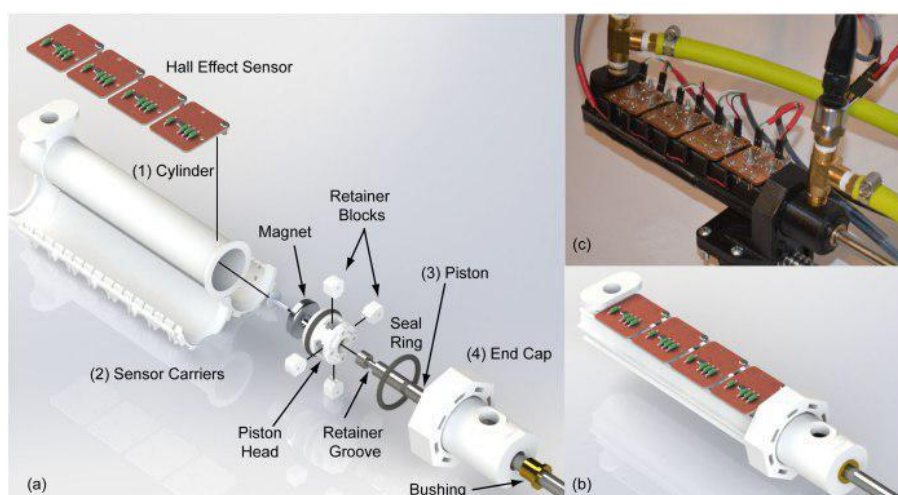
جریان اسمی، جریان هوایی است که در وضعیت استاندارد فشار ۶ بار، از طریق شیر جریان می‌یابد. زمانی که کاهش فشار یک بار مجاز باشد.

برای این منظور می‌بایست فشار خط تغذیه را به میزان ۶ بار و فشار خط تخلیه را ۵ بار در نظر گرفت و حجم مقدار هوای جاری به هنگام این کاهش فشار را در هر دقیقه اندازه گرفت. از آنجایی که هوا مانند دیگر گازها، دارای تراکم‌پذیری متغیر می‌باشد، از این رو حجم، هم به فشار مطلق Pa و هم به درجه حرارت T بستگی دارد. به همین منظور باید ارقام اندازه‌گیری شده را بر حسب وضعیت استاندارد محاسبه نمود. [۶]

جریان اسمی هم به ابعاد برش‌های داخلی دریاچه در شیر و هم به جریان مناسبی که در مجاری لوله‌ها شکل می‌گیرند، بستگی دارد. از اینرو سازندگان شیرها سعی کرده‌اند بین این دو تطابق ایجاد نمایند. شیرهای کنترلی انواع مختلفی دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به شیرهای کنترل فشار، کنترل دبی اشاره کرد که هر یک از آن‌ها نیز دارای انواع مختلفی می‌باشد. شیری که در این پایان‌نامه استفاده شده است شیر فوت نوت ساخت شرکت فستو^۱ می‌باشد. توضیحات بیش‌تر راجع به این نوع شیر در فصول بعدی گنجانده شده است.

۸-۲-۱- ساخت عملگرهای نیوماتیک

با افزایش کاربردها و پیشرفت در کارکرد عملگرهای نیوماتیک، ساخت این المان نیز با پیشرفت قابل توجهی مواجه شده است. استفاده از پرینت‌های سه بعدی در ساخت این ادوات مفهوم بسیار تازه‌ای بوده و هنوز هم امکان پیشرفت را دارد. استفاده از این تکنولوژی در ساخت یک عملگر نیوماتیک، علاوه بر آنکه دقت ساخت را افزایش داده است، باعث کاهش هزینه تولید نیز می‌شود.



شکل ۹-۱: طراحی، ساخت و مونتاژ عملگر نیوماتیک به کمک پرینت سه بعدی [۴۴]

شکل (۹-۱) مراحل ساخت یک عملگر نیوماتیک را نشان می‌دهد. محل قرارگیری سنسورهای موقعیت و نیرو دقیقاً مشخص می‌شود. این تکنولوژی ساخت قادر خواهد بود فاصله حرکتی مشخص پیستون را با دقت بسیار زیاد ایجاد کند [۱۲].

۱-۳- ساختار پایان نامه

از آنجایی که پایان نامه حاضر در رابطه با کنترل موقعیت جک‌های پنوماتیک می‌باشد، لذا بیان مقدماتی راجع به آشنایی با کاربردهای صنعتی و همچنین بیان مختصری در مورد عملگرهای نیوماتیک ضروری بود. لذا، فصل اول به بیان این مقدمات در حد نیاز این پایان نامه اختصاص پیدا کرد. مشخص است که مباحث مطرح شده بسیار گسترده‌تر و شامل جزئیات بیشتری هستند، لیکن به دلیل محدودیت و دور شدن از مبحث اصلی، امکان پرداختن به آنها وجود ندارد و مطالعه بیشتر به خواننده واگذار می‌گردد. در فصل آتی، ابتدا ضرورت و هدف پروژه بیان می‌گردد. پس از آن، در بخش دوم سابقه استفاده از سیستم‌های پنوماتیک در صنعت، پژوهش‌های گذشته در زمینه مدل‌سازی و کنترل آنها بیان می‌گردد. سپس به صورت جزئی‌تر در مورد سازوکار کنترل عملگرهای نیوماتیکی صحبت خواهد شد. از آنجایی که هدف پایان نامه کنترل موقعیت است، لذا بخش آخر فصل دوم به آشنایی با این موضوع تخصیص داده شده است. نحوه مدل‌سازی ریاضی عملگر نیوماتیکی و شیر کنترلی، مجموعاً به عنوان سیستم مورد مطالعه که قرار است کنترل شود، در ابتدای فصل سوم بیان می‌شود. در ادامه این فصل، ایده کنترلی پایان نامه به طور کامل تشریح خواهد شد.

فصل چهارم، با نام شبیه‌سازی و تحلیل نتایج، به شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه به همراه کنترل‌کننده طراحی شده در فصل قبل (سیستم حلقه بسته) اختصاص دارد. نرم‌افزار استفاده شده جهت شبیه‌سازی سیستم، نرم‌افزار متلب^۱ و در محیط سیمولینک^۲ می‌باشد. مزیت ارزشمند شبیه‌سازی حلقه بسته این پایان نامه نسبت به موارد مشابه، شبیه‌سازی نزدیک به حالت واقعی سیستم است. جهت نشان دادن صحت نتایج شبیه‌سازی در حالت واقعی، کنترل‌کننده طراحی شده به صورت عملی نیز بر روی یک عملگر نیوماتیک پیاده‌سازی و نتایج آن در فصل چهارم ارائه شده است. مقایسه نتایج با پروژه‌های مشابه به جهت نشان دادن مزایا و معایب طراحی حاضر، از دیگر اقداماتی است که نتایج آن، مختصراً، در فصل چهارم ذکر شده است.

فصل پنجم نیز به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و بیان پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده اختصاص یافته است.

¹ Matlab

² Simulink

فصل دوم:

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱-۲ - مقدمه

لازمه کنترل هر سیستمی ابتدا شناخت سیستم، تعیین روابط حاکم بر سیستم و مدل سازی دقیق آن و در نهایت، انتخاب کنترل کننده مناسب و طراحی اصولی و متناسب با شرایط موجود می باشد. به همین جهت، برای کنترل یک عملگر نیوماتیک به همراه شیر فرمان، که مجموعاً در این پایان نامه به عنوان سیستم شناخته می شوند، در فصل گذشته مقدمات کلی به جهت آشنایی با آن بیان گردید. در این فصل، هدف پروژه و اقدامات قبلی در زمینه مبحث مورد مطالعه بیان می شود. اصول و قواعد کنترلی مرتبط با عملگرهای کنترلی نیز در انتهای فصل بیان خواهد شد. به طور کلی، هدف از این فصل و فصل گذشته، آشنایی با سیستم مورد مطالعه، لزوم و کاربردهای پروژه و آماده سازی خواننده برای ارائه مدل و استراتژی کنترلی می باشد.

۲-۲ - ضرورت اجرا پروژه

با توجه به رشد روزافزون کاربردهای سیستم های نیوماتیک در صنعت، پژوهش های زیادی در این زمینه صورت گرفته است. از مهم ترین چالش هایی که در این زمینه وجود دارد می توان به خاصیت فشرده پذیری هوا و ایجاد غیرخطی های متغیر با زمان، امکان تغییر بار ناگهانی سیستم، نیروی اصطکاک بین سیلندر و پیستون، بازدهی کم انرژی سیستم های نیوماتیک، خاصیت پس فازی به علت تراکم پذیری هوا و... اشاره کرد. مزایای نسبتاً زیاد سیستم های نیوماتیک در مقایسه با معایب آنها باعث شده است که این سیستم ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات زیادی بر روی این سیستم ها انجام شود. از طرفی به کارگیری این نوع سیستم ها به دلیل چالش های مطرح شده نیازمند استفاده از روش های نوین کنترلی می باشد. از این رو بر آن شدیم که روش کنترلی فازی تطبیقی غیر مستقیم را به کار ببریم، دلیل استفاده از این روش نیز مقاوم کردن سیستم در برابر تغییرات بار می باشد. البته به دلیل این که در طول فرایند پارامترهای سیستم دائماً در حال تنظیم شدن می باشند، خواص غیر خطی سیستم که ممکن است در طول زمان نیز تغییر کنند در عملکرد سیستم کنترل موثر و باعث ایجاد تغییر در آن خواهد شد.

۳-۲ - هدف پروژه

همان طور که در فصل گذشته بیان شد، سیستم های پنوماتیک به دلیل مزیت های فراوان از قبیل ارزان و کارا بودن، کنترل آسان در کاربردهای معمول، غیر قابل اشتعال بودن، هزینه نگهداری و تعمیر پایین،

ایمنی بالا، انعطاف‌پذیری مناسب، در دسترس و ارزان بودن قطعات و... توجه بسیاری از کاربران را به خود جلب کرده است. تمامی این مزایا در کنار معایبی چون غیر خطی بودن، بازدهی انرژی کم، اصطکاک زیاد بین سیلندر و پیستون و... توجه بسیاری از محققان را برای برطرف کردن مشکلات فوق به خود جلب کرده است.

در بسیاری از کاربردهای صنعتی از قبیل جابه‌جایی قطعات، نوار نقاله، دستگاه‌های پرس تناسبی، صنعت یاتاقان‌سازی و...، بزرگ‌ترین چالش روبه‌رو کنترل دقیق موقعیت و نیرو می‌باشد که باعث افزایش کیفیت محصولات تولیدی و بسته بندی شده می‌شود. هدف ما در انجام این پروژه پیاده‌سازی الگوریتم فازی تطبیقی غیرمستقیم بر روی جک پنوماتیک متصل شده به شیر کنترل جریان می‌باشد. هدف نهایی این الگوریتم رسیدن به موقعیت مطلوب با کمترین خطا ممکن می‌باشد. ضمناً در پایان نتایج بر روی دستگاه تهیه شده پیاده‌سازی شده و نتایج آزمایشات تجربی نیز قابل مشاهده خواهد بود.

یک ربات توانبخشی برای داشتن کارایی قابل قبول باید قادر باشد محدوده‌های وسیعی از مطالبات نیرویی در تعامل با بیمار را پوشش دهد. این محدوده‌ها با میزان نیرو و امپدانس مکانیکی قابل ارائه توسط ربات قابل بیان است. وضعیت‌های مختلفی که ربات باید بتواند تطبیق‌پذیری خوبی با آنها داشته باشد معمولاً به صورت زیر بیان می‌شوند [۸].

۱. وضعیت نیروی غالب ربات^۱: در این وضعیت، بیمار تقریباً هیچ توانایی حرکتی ندارد و ربات باید بتواند اندام او را در مسیرهای مشخصی هدایت نماید. در این وضعیت ربات در مد کنترل موقعیت قرار می‌گیرد. این فاز در توانبخشی معمولاً فاز کمک‌کننده نامیده می‌شود.

۲. وضعیت نیروی غالب بیمار^۲: در این وضعیت بیمار در وضعیت نزدیک به سلامتی قرار دارد و ربات متصل به او باید توانایی ارائه امپدانس مکانیکی پایین را داشته باشد، هرچند امپدانس بالا نیز ممکن است از ربات خواسته شود. در واقع بیمار باید بتواند شرایط نزدیک به راه رفتن آزاد را تجربه کند تا پسخورهای نیرویی که از قسمت‌های مختلف پا، مثلاً در کف پای خود از تماس با زمین دریافت می‌کند نزدیک به واقعیت باشند. این فاز در توانبخشی معمولاً "فاز مقاومتی" نامیده می‌شود.

۳. وضعیت تصمیم‌گیری درمان‌گر^۳: در این وضعیت باید این قابلیت در ربات ایجاد شود که ربات طبق نظر درمانگر و مطابق با سناریوی مشخص شده از طرف او، با امپدانس مشخصی نیروی

¹ Robot-in-charge

² Patient-in-charge

³ Therapist-in-charge

خروجی مورد نظر را تولید کند. در این حالت ممکن است رفتاری با ضرایب امیدانسی ثابت اما در نیروهای مختلف و یا رفتاری با امیدانس متغیر از ربات خواسته شود. همچنین در این حالت ربات باید قابلیت عملکرد در هر دو فاز کمکی و مقاومتی را داشته باشد.

۲-۴- پژوهش‌های گذشته

از آنجایی که مبحث مورد مطالعه برخلاف عمر نسبتاً کوتاه، جذابیت بسیاری دارد، لذا پژوهش‌های علمی و اقدامات عملی بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. به همین جهت مطالعه و بررسی همه موارد غیرممکن است. در این بخش به بررسی مختصری از مهم‌ترین اقدامات در این زمینه پرداخته می‌شود. لذا به جهت گستردگی، پژوهش‌های انجام گرفته در سه بخش ربات‌های توانبخش، مدل‌سازی و کنترل عملگرهای نیوماتیک ارائه می‌شود.

۲-۴-۱- پژوهش‌های گذشته در زمینه ربات‌های توانبخش

سابقه ربات‌های توان بخش به حدود ۶۰ سال پیش برمی‌گردد. اولین چیزی که می‌توان آن را ربات توان بخش نامید در اوایل دهه ۱۹۶۰ ساخته شد و کیس^۱ نام داشت که عبارت بود از یک مکانیزم چهار درجه آزادی که می‌توانست دست افراد فلج را حرکت دهد [۱۳]. در سال ۱۹۶۹ در کالیفرنیا یک ربات شش درجه آزادی بنام رانچو گلدن ارم^۲ ساخته شد که دارای هیچ کنترلی نبود و از هفت سوئیچ در مود متوالی برای حرکت دادن این دستگاه برقی در فضا استفاده می‌شد (شکل ۲-۱) [۱۴]. کار دقیق در زمینه ربات‌های توان بخش در اواسط دهه ۱۹۷۰ شروع شد. برای اولین بار ربات صنعتی بازتوانی را رسلر و پیسلاک در دانشگاه هیدلبرگ ساختند و اثرگر نهایی آن را در یک محیط ساختار یافته کنترل کردند [۱۵]. پروژه مشابهی با شرکت سیمون و اشمایزر در دانشگاه جان‌هاپکینز در سال ۱۹۷۴ به حمایت انجمن مدیریت سربازان بازنشسته انجام شد که یک پروتز کامل را بعنوان لینک نهایی بر روی ربات چهار درجه جان‌هاپکینز بکار بردند [۱۶]. این مجموعه نیز هیچ سنسوری برای فیدبک نداشت ولی دارای امکانات زیادی از جمله کار با دفترچه تلفن و دیسک‌های کامپیوتری بود که بطور ساده ولی هوشمندانه‌ای قرار داشتند و بوسیله بیمار قابل دسترسی بودند.

¹ CASE

² Rancho Golden Arm



شکل ۱-۲: ربات شش درجه آزادی بنام رانچو گلدن ارم [۱۴]

از میانه دهه ۸۰ تلاش‌های چشم‌گیری برای ساخت و بهبود ربات‌های توان بخش انجام گرفت. بزودی ربات‌های ارباب- برده معرفی شدند که هدف از ساخت آنها، سیستم‌های کار از راه دور بود که به افراد ناتوان اجازه می‌داد ربات را برای انجام کارهایی کنترل کنند، از جمله: حرکت سریع در یک تراژکتوری پیچیده، لمس یک سطح با نیروی دلخواه، کاهش یا افزایش نیرو، پیگیری یک سطح با مسیر و حس کردن محل دست بدون استفاده از بینایی [۱۷].

در فرانسه و در سال ۱۹۸۳ ربات اسپارتاکوس^۱ بر اساس کاری که برای صنایع هسته‌ای انجام شده بود، بوجود آمد. این ربات دارای درجه امنیت بالایی بود و ساخت آن مقدمه را برای ساخت ربات‌های دیگر فراهم آورد. یکی دیگر از کارهای اولیه در امریکا کاری بود که ماسون^۲ در سال ۱۹۷۸ در انجمن حمایت از سربازان در نیویورک انجام داد و برای اولین بار بازوی ربات را بر روی یک صندلی چرخدار وصل کرد. طراحی خوب آن با چهار درجه آزادی اجازه رسیدن آن به سقف یا کف زمین را نیز می‌داد [۱۸].

یکی از برجسته‌ترین کارهای انجام شده از اوایل ۱۹۸۰ در دانشگاه استنفورد بوسیله لیفر و در بیمارستان پالو التو بوسیله وندرلوس انجام شد. کارهای آنها منجر به ساخت چند ربات از نوع دیوار^۳ با استفاده از ربات پوما^۴ شد (شکل ۲-۲). پوما یک ربات صنعتی با ویژگی‌های قابل توجه است که می‌تواند در توانبخشی مورد استفاده قرار گیرد و سازندگان آن را تا حد زیادی ارتقا داده‌اند. در کانادا ربات شش درجه‌ای بنام ریجنسیس^۵ ساخته شد که امکان حرکت بر روی تخت یا میز را هم داشت [۱۹].

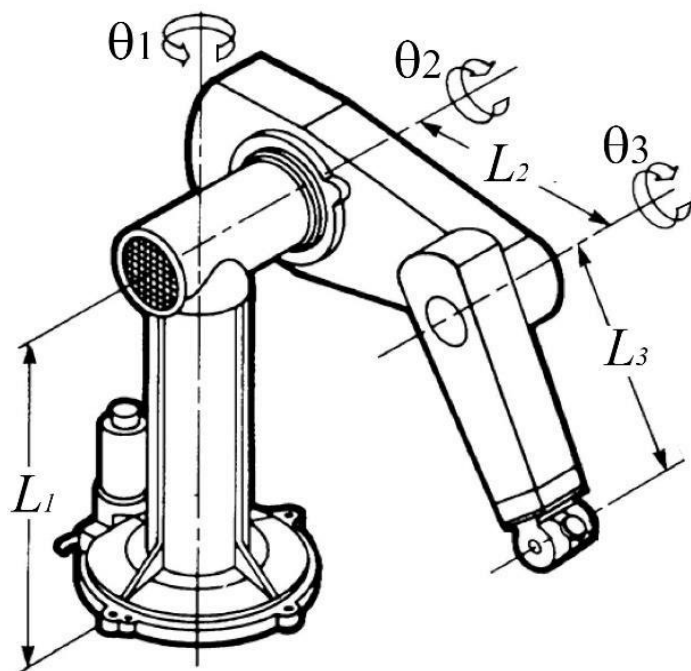
¹ Spartacus

² Mason

³ DeVAR (Desktop Vocational Assistive Robot)

⁴ Puma

⁵ Regensis



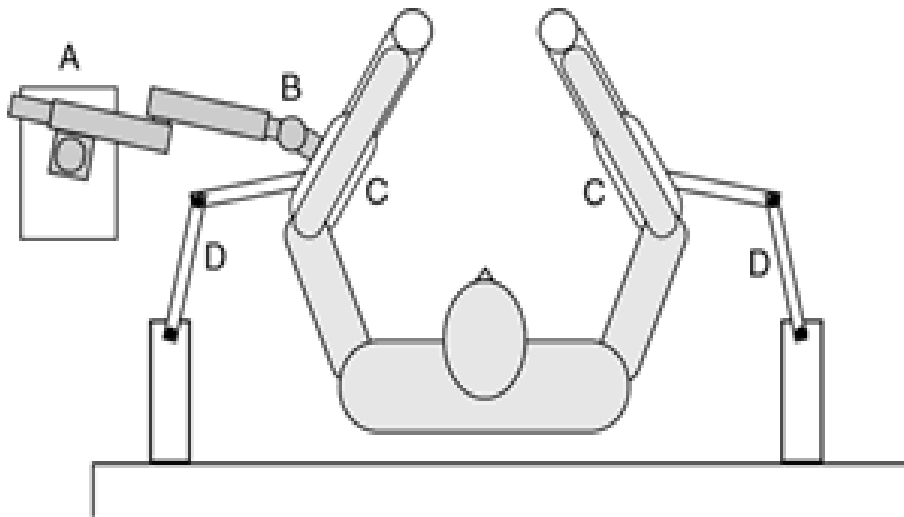
شکل ۲-۲: شماتیکی از ربات یوما

در انگلستان در سال ۱۹۸۶ ربات‌هایی از نوع موارد^۱ ساخته شد که عبارت بود از یک پومای کوچک که بر روی یک ربات متحرک نصب می‌شد و دارای یک دوربین بود که می‌توانست در یک اتاق دیگر کار کند. از سایر ربات‌هایی که در فیزیوتراپی بکار می‌روند، مایم^۲ را می‌توان نام برد که از دو ربات بازوی پوما استفاده می‌کند. این ربات در سال ۲۰۰۱ در پالوالتو برای درمان بالاتنه ساخته شده و در دو مود فعال و غیر فعال و در حالت متقارن برای هر دو سمت بدن قادر به کار است. با استفاده از این ربات بیمار باید عضو سالم و ناتوان خود را بطور همزمان بکار برد. ربات مانوس که در دانشگاه MIT در سال ۲۰۰۰ ساخته شد نیز برای بیماران سکته‌ای بوده است و اکنون یکی از پرفروش‌ترین و مشهورترین ربات‌های توانبخش است [۲۰]. ربات دیگر برای بیماران معلول جنتل^۳ نام دارد که یک اتاق سه بعدی مجازی دارد و بیمار را تشویق به حرکت می‌کند [۲۱]. در این ربات که در سال ۲۰۰۱ ساخته شده محدودیت‌هایی برای امنیت بیمار در ربات در نظر گرفته شده است که عبارتند از: محدودیت در سرعت، نیرو و ناحیه جابجایی و جبران گرانش در نقاط انتهایی.

^۱ MoVAR (Mobile Vocational Assistive Robot)

^۲ MIME

^۳ GENTLE



شکل ۲-۳: ربات مایم که از دو ربات پوما در آن استفاده شده است

استفاده از این ربات‌ها بعلاوه ساخت محیط‌های مجازی روش‌هایی است که توجه متخصصان را جلب کرد و بزودی ایده استفاده از محیط‌های مجازی برای توان بخشی ارائه شد. بعنوان مثال یک ربات سه درجه بنام ایمول^۱ برای بالا تنه ساخته شده که از محیط مجازی نیز بهره می‌گیرد برای کنترل ربات روش فعال کنترل امپدانس بکار رفته است [۲۲]. سایر ربات‌هایی که از محیط‌های مجازی استفاده می‌کنند عبارتند از: فانتوم که در امریکا بوسیله شرکت سنسبل^۲ ساخته شده و هپتیک مستر^۳ که در هلند بوسیله شرکت اف. سی. اس رباتیک ساخته شده است [۲۳].

۲-۴-۲- پژوهش‌های گذشته در زمینه مدل‌سازی سیستم نیوماتیک

می‌توان گفت اولین پژوهش‌ها در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های سرونوماتیک توسط شیرر^۴ ارائه گردید [۲۴]. در این پژوهش یک مدل ریاضی خطی از یک سیلندر دو طرفه با حرکت محدود در محدوده وسط کورس ارائه شده و نیز مدلی از جریان جرمی از یک شیر تناسبی با آزمایش صحه‌گذاری شده است، به دلیل دسترسی به کامپیوترهای مدرن در سال‌های بعد، مدل ساده شیرر جذابیت خود را از دست داد. در ادامه لیو^۵ و همکاران نیز با ارائه یک مدل خطی بر اساس نقطه کاری دلخواه، از کنترلر PD استفاده نمودند [۲۵]، کانت^۶ و همکاران یک مدل خطی متغیر با زمان ارائه نمودند که رفتار سیستم حلقه باز سیلندر نیوماتیکی که به وسیله یک شیر با اسپول^۷ دورانی کنترل می‌شد را شبیه‌سازی می‌کرد و سپس این مدل

^۱ EMUL

^۲ Sensable

^۳ Haptic Master

^۴ Shearer, 1956

^۵ Liu, 1988

^۶ Kunt, 1990

^۷ Spool

را با مدل نامتغیر با زمان مقایسه نمودند [۲۶]. مدل‌های خطی دیگری نیز در کارهای دیگر پژوهشگران آمده است که مثلاً از کنترلر PI خود تنظیم و یا از کنترلر تطبیقی استفاده کرده‌اند.

۲-۴-۳- پژوهش‌های گذشته در زمینه کنترل عملگرهای نیوماتیک

عملگرهای نیوماتیک به دلیل خاصیت‌های غیرخطی ذاتی آن‌ها دارای پیچیدگی‌هایی در زمینه کنترل می‌باشند و با استفاده از کنترلرهای ساده از قبیل PID پاسخ‌های دقیقی نخواهند داشت. به همین خاطر در سال ۲۰۱۵ فراگ^۱ و نورشینارا^۲ یک الگوی تطبیقی پسگام برای کنترل یک دست شبه انسان ارائه دادند. این کنترلر بر اساس تخمین عدم قطعیت‌ها ساخته و دارای دو حلقه درونی برای کنترل فشار و بیرونی برای کنترل موقعیت دست شبه انسان می‌باشد. [۲۷]

آقای پائولو گالینا^۳ و دوستانش نیز به دنبال پیاده سازی الگوریتم فازی برای کنترل موقعیت و تعقیب مسیرهای مرجع مورد نظر بودند. برای شیرکنترلی سه انتخاب متفاوت وجود دارد.

۱- استفاده از شیرهای کنترلی ON/OFF

۲- استفاده از دو شیر کنترلی 3way که هر یک از آن‌ها برای یکی از محفظه‌های سیلندر استفاده می‌شود.

۳- استفاده از شیرهای کنترلی 5way که به صورت همزمان جهت و جریان عبوری در هر دو محفظه را با یک سیگنال ورودی کنترل می‌کند.

استفاده از شیرهای نوع سوم به دلیل ساده‌تر بودن فرایند کنترل و همچنین ایجاد بیشترین اختلاف فشار بین دو محفظه (در هر زمان فشار یکی از محفظه‌ها برابر با فشار اتمسفر و فشار محفظه دیگر برابر با فشار کمپرسور می‌باشد) بیش‌تر از دو نوع قبل مورد توجه قرار گرفته است.

دلایل استفاده از منطق فازی این است که بسیاری از متغیرهای مستقل از قبیل دما، اصطحکاک و ارتعاشات سیلندر وجود دارند که نمی‌توان آن‌ها را در سیستم‌هایی که با کنترلر کلاسیک کار می‌کنند در نظر گرفت. از طرفی مدل‌های غیر خطی ارائه شده برای این سیستم‌ها تحت شرایط هم‌دمایی^۴ دو محفظه تهیه می‌شود و معمولاً اثرات دینامیک سیال نیز نادیده گرفته می‌شود. از این رو به منظور در نظر گرفتن شرایط فوق و ارائه یک کنترلر دقیق از الگوریتم فازی استفاده شده است. در این مقاله در ابتدا ۲ متغیر ورودی در نظر گرفته می‌شود و هفت قانون فازی برای آن نوشته می‌شود. با این شرایط سیستم قادر به

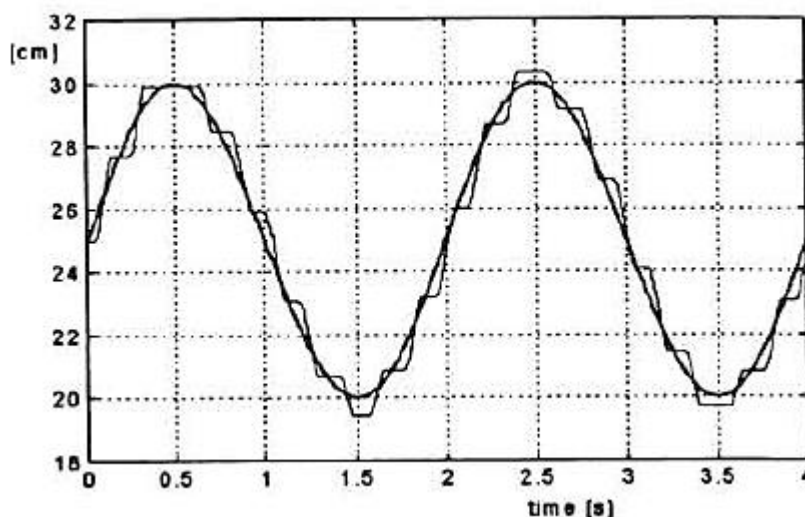
¹ ferag

² nourchinara

³ Paolo galina

⁴ temperator

دنبال کردن ورودی پله می‌باشد. ولی قابلیت دنبال کردن ورودی سینوسی نیست زیرا سیستم به اندازه کافی سریع نیست. در مرحله بعد مشتق خطای موقعیت را نیز به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته و با بیان چهارده قانون فازی به دقت قابل قبولی در کنترل موقعیت رسیده است. در مرحله بعد با در نظر گرفتن چهار متغیر ورودی و بیان هجده قانون فازی دقت تا حد قابل قبولی افزایش یافته است. متغیر چهارم ورودی نسبت فشار بین دو محفظه می‌باشد. [۲۸]



شکل ۲-۴: ردیابی موقعیت با سه متغیر ورودی

آقای کلر و اسیر من نیز یک کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع غیر خطی برای سیلندرهای نیوماتیک ارائه داده است. برای این منظور در ابتدا ضریب اصطکاک ویسکوز و کلمب را شناسایی و مدل سیستم را تقریب زده و الگوریتم تطبیقی مدل مرجع را بر روی آن پیاده سازی کرده است. او در این شبیه سازی به دقت 0.05mm دست یافته است. [۲۹]

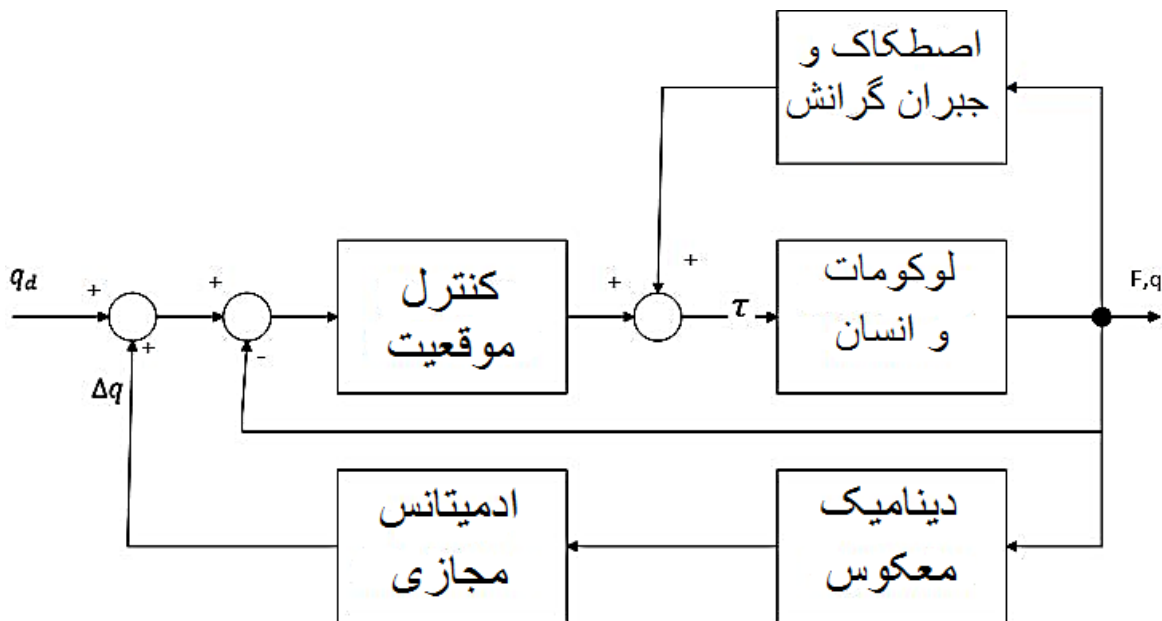
در سال ۱۹۹۵ مینگ جانگ ان^۱ یک روش فازی مبتنی بر سیگنال PWM بیان کردند. به دلیل خاصیت تراکم پذیری هوا، نیروی اصطکاک بین پیستون و سیلندر و معادلات غیرخطی جریان عبوری از شیرها، خطی سازی این سیستم ها دشوار و دارای دقت کافی نمی‌باشد. به همین خاطر محقق فوق یک الگوریتم فازی برای این سیستم غیرخطی پیاده سازی کرده است. البته ایشان به جای استفاده از شیر کنترل جریان از دو شیر کنترل فشار استفاده و سیستم کنترلی مبتنی بر سیگنال PWM می‌باشد. الگوریتم طراحی شده دارای معایبی همچون زمان خیز زیاد و دقت نسبتا پایین می‌باشد. [۳۰]

^۱ Jung un

در سال ۱۹۹۹ نیز پژوهشی برای کنترل دقیق موقعیت و زمان سیلندرهای پنوماتیک به منظور بهره برداری در صنعت بسته بندی شکلات انجام شد. در این پژوهش برای کنترل جک از یک شیر دو وضعیته ON/OFF و رگولاتورهای جریان استفاده شده است. حرکت عملگر نهایی را می توان در دو فاز مختلف زمان و موقعیت در نظر گرفت. در فاز زمانی باید عملگر در زمان مناسب به مکان مورد نظر برسد. در فاز موقعیت نیز باید در مکان مورد نظر آرام بگیرد تا فرایند بسته بندی به درستی انجام شود. محققان در این پژوهش به منظور دستیابی به هدف از یک کنترلر PID استفاده کرده و از دستگاه PLC برای پیاده سازی این کنترلر استفاده کرده اند. به دلیل وجود خواص غیرخطی سیستم استفاده از این نوع کنترلر نمی تواند پاسخ کاملاً دقیقی داشته باشد. دقت پاسخ در فاز زمان ۱ میلی ثانیه و در فاز موقعیت ۱ میلی متر می باشد. البته دقت اکتسابی به منظور به کارگیری در صنعت بسته بندی مناسب و قابل قبول می باشد [۳۱].

در مسائل مربوط به توان بخشی کنترل همزمان امپدانس و موقعیت ضروری می باشد. در واقع از طریق کنترل امپدانس و بر اساس میزان نیروی تعاملی وارده سیستم کنترلی راه کاری را برای حرکت در مسیر تعیین شده در نظر خواهد گرفت. تدوین الگوریتم کنترلی که بتواند در مواجهه با دینامیک ربات و حرکات گاهاً پیش بینی نشده بیمار تعامل نیرویی مفید و موثری را ایجاد نماید، امری ضروری است. در این راستا در ربات های توان بخشی از استراتژی های کنترل موقعیت و امپدانس به شکل های مختلف استفاده می شود [۳۲-۴۳]. به عنوان مثال، ولبرج و همکاران [۴۴] با استفاده از الگوریتم تطبیقی، به طوری که دینامیک مجموعه ربات انسان و نیز مقدار نیروی اعمال شده از طرف انسان (تلاش انسان) با استفاده از این الگوریتم در هر لحظه تخمین زده می شود، الگوریتم کنترل موقعیت را در ربات توان بخشی دست به کار برده اند که ضمن مشارکت دادن بیمار، به او در طی مسیر مرجع به مقدار نیاز کمک می کند. از جمله کاربردهای مهم الگوریتم کنترل امپدانس در ربات های توان بخشی می توان به ربات های توان بخشی ام آی تی-مانوس، لوکومات و الکس اشاره نمود.

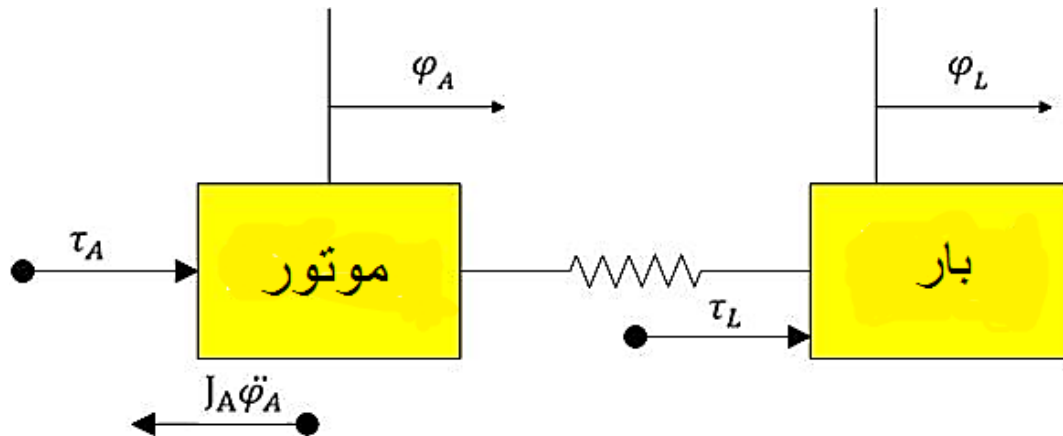
کلمبو و همکاران همچنین در یک ساختار کنترلی دیگر مطابق بلوک دیاگرام شکل (۴-۲) از استراتژی کنترل آدمیتانس استفاده نموده اند و گزارش داده اند که در اخذ امپدانس های بالا، این ساختار پایداری بیشتری از خود نشان می دهد. ملاحظه می گردد که در این ساختار، نیاز به حلقه کنترل موقعیت با کارایی مناسب می باشد. با توجه به ملاحظات پیاده سازی و نیز پایداری می توان با توجه به نیاز از هر کدام از کنترلرهای فوق الذکر استفاده نمود.



شکل ۲-۵: ساختار سیستم کنترل ادمیتانس ارائه شده برای ربات لوکومات [۵]

در ربات‌های توانبخشی، معمولاً به این دلیل که اینرسی ربات بالا بوده و همچنین حرکات با شتاب بالا در این ربات‌ها زیاد است، در نظر گرفتن ترم اینرسی نیز دارای اهمیت می‌شود [۳۴]. اهمیت ترم اینرسی در ربات‌های توانبخشی در چندین مرجع مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۳۳] اشاره شده است که اینرسی بالای ربات متصل به پای بیمار، موجب افزایش مصرف انرژی و در نتیجه ایجاد خستگی زودرس در کاربر می‌شود. در [۳۴] نیز، به از دست رفتن چابکی در انجام حرکات با شتاب بالا در صورت بالا بودن اینرسی ربات اشاره شده است. همچنین در این مراجع بیان شده است که شخص تمایل دارد در راه رفتن معمول خود و در فاز رهایی راه رفتن، از فرکانس طبیعی حرکت پای خود استفاده نماید و با این فرکانس حرکت کند که در این صورت کمترین میزان مصرف انرژی را دارد. از طرفی، با اضافه شدن اسکلت‌بندی خارجی، چون فرکانس طبیعی حرکت مجموعه پا و اسکلت بندی کاهش می‌یابد، بنابراین شخص تمایل دارد که به منظور کاهش مصرف انرژی، حرکت خود را با فرکانس طبیعی جدید انجام دهد و این امر در فرآیند توانبخشی مطلوب نیست. به همین دلیل می‌توان با کاهش اثر اینرسی ربات توسط الگوریتم‌های کنترلی، مجدداً به این فرکانس طبیعی نزدیک شود. مطابق این مرجع، حتی دستیابی به فرکانس‌های طبیعی بالاتر از فرکانس طبیعی حرکت پا نیز به عنوان امری مطلوب برای مجموعه ربات انسان محسوب شده است، به عنوان مثال افراد مسن که در حالت معمول فرکانس راه رفتن پایین‌تر از افراد میانسال دارند، می‌توانند راه رفتن با فرکانس بالاتر را تجربه کنند. با توجه به توضیحات فوق، لازم است که حتی‌الامکان اثر این اینرسی خارجی بر روی پای بیمار کاهش یابد. هر چند در الگوریتم کنترل ادمیتانس ربات لوکومات جبران‌سازی گرانش در نظر گرفته شده است، اما راهکاری برای کاهش اینرسی ظاهر شده در محل تعامل با کاربر دیده نشده و اثر منفی آن در [۳۶،۳۵] گزارش شده است.

برای کاهش اثر این اینرسی بر روی کاربر، معمولاً از دو راهکار استفاده می‌شود. روش اول، استفاده از المانی انعطاف پذیر بین کاربر و ربات مانند عملگرهای الاستیک سری است که علاوه بر حذف اثر اینرسی اثر اصطکاک را نیز حذف می‌کند [۳۷،۳۸]. مطابق شکل (۵-۲) در این نوع عملگرهای مولد قدرت از طریق یک المان الاستیک به اعمال نیرو می‌پردازد. با داشتن رابطه بین تغییر شکل المان و نیرو/کشناور در دو سر آن، نیرو/گشتاور خروجی عملگر به دست می‌آید که به عنوان فیدبک نیرو می‌توان از آن استفاده نمود.

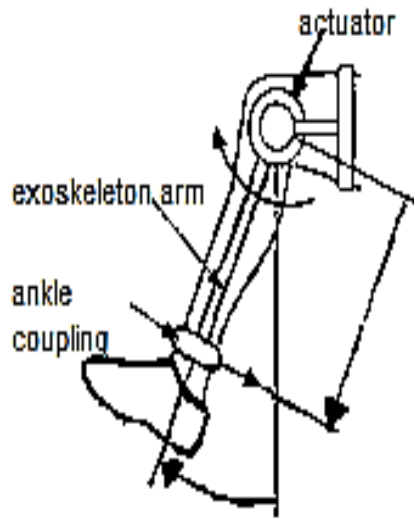


شکل ۲-۶: عملگر الاستیک سری [۲۶]

در ربات‌های لوپز و سوبار^۱، از این روش برای حذف اینرسی ظاهر شده از طرف ربات بر روی بیمار استفاده شده است [۹ و ۱۰]. روش دوم برای کاهش اثر اینرسی، استفاده از پیشخوراند پا پسخوراند نیرو با شتاب در الگوریتم کنترلی است [۳۹ و ۴۰-۴۲]. جیل^۲ با استفاده از پسخوراند نیرو، اینرسی ظاهر شده یک سیستم هپتیک بر روی دست کاربر را کاهش داد. الینگر و همکاران نیز از فیدبک شتاب برای کاهش اینرسی ظاهر شده بر روی پای بیمار در یک ربات توانبخشی یک درجه آزادی پا استفاده نموده‌اند. در شکل

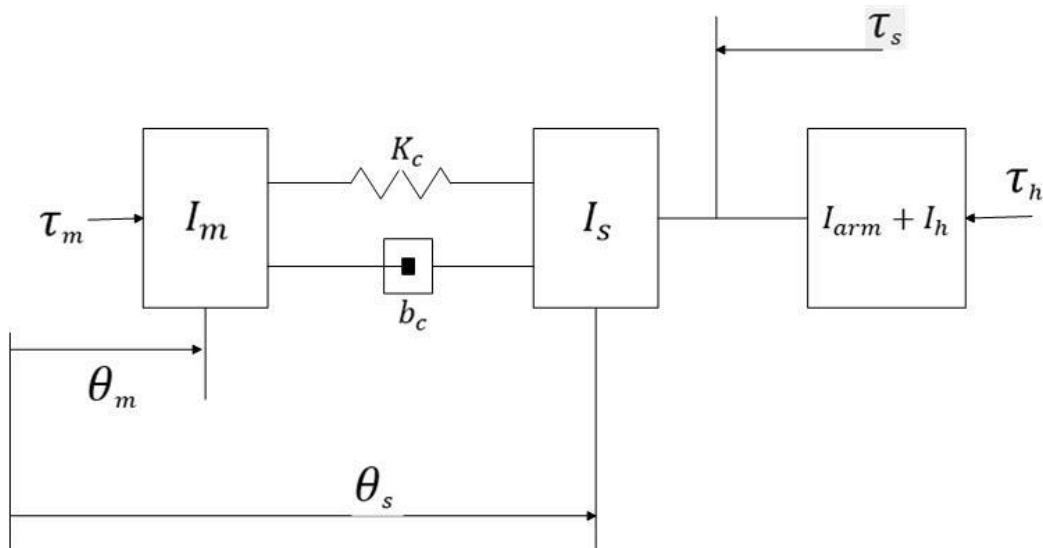
¹ Lopez & Sobar

² Gil



شکل ۲-۷: ربات توانبخشی یک درجه آزادی برای توانبخشی زانو [۳۴]

در این ربات از عملگر الکتریکی استفاده شده و هدف این بوده است که با استفاده از الگوریتم کنترل ادمینانس، اینرسی ظاهر شده از طرف ربات بر روی پای کاربر کاهش یابد. در شکل (۲-۷) مدل ساده شده‌ای از ربات نشان داده شده است.



شکل ۲-۸: مدل ربات توانبخشی یک درجه آزادی توانبخشی زانو [۳۴]

۲-۵- کنترل عملگرهای نیوماتیک

همان طور که گفته شد، کنترل عملگرهای نیوماتیک نسبت به انواع دیگر عملگرها مشکل تر است. با این حال، به دلیل ویژگی‌هایی مانند ارزانی، تمیز بودن، ایمنی بیشتر و تعمیر و نگهداری آسان تر (در مقایسه با عملگرهای هیدرولیک)، عدم ایجاد میدان مغناطیسی، همچنین قابلیت ایجاد نیروی ثابت به مدت زیاد

بدون داغ شدن (در مقایسه با عملگرهای الکتریکی)، تحقیقات زیادی در جهت اخذ رفتار مناسب از این عملگرها انجام شده است. این تحقیقات در زمینه مدل سازی، تخمین متغیرها و تخمین اصطکاک، کنترل موقعیت، کنترل فشار و کنترل نیرو و توسط انواع شیرها مانند شیرهای تناسبی، کنترل جریان و کنترل فشار، شیرهای از نوع فلاپر نازل و شیرهای قطع/ وصل انجام پذیرفته و از روش‌های کنترلی مختلف مانند استفاده از کنترلر PID، الگوریتم مد لغزشی، الگوریتم‌های تطبیقی، الگوریتم مرحله بندی بازگشتی^۱، الگوریتم پیش بین، روش‌های هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های فازی، شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک و بهره برداری شده که برخی از این الگوریتم‌ها جهت تخمین متغیرهای حالت و یا اصطکاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۶-۲- ویژگی‌های کنترلی عملگرهای نیوماتیک

عملگرهای نیوماتیک به دلیل تراکم پذیر بودن سیال عامل آن، مدل دینامیکی مرتبه بالا و رفتار غیرخطی دارند و نیز غیرخطی بودن رژیم جریان در داخل شیرهای نیوماتیک، همچنین وجود عوامل اصطکاک پیچیده و مشخص نبودن دقیق فرآیند انتقال حرارت در آن، بر پیچیدگی مدل می‌افزاید. این ویژگی‌ها موجب شده است که کنترل دقیق و با پهنای باند بالای موقعیت در آنها مشکل باشد. در مقایسه با ویژگی‌های کنترلی ذکر شده، وجود انعطاف ذاتی در این عملگرها موجب می‌شود که آن را برای کاربردهایی مانند ربات‌های توانبخشی [۴۱ و ۴۳-۴۴]، همچنین سیستم‌هایی که در تعامل با محیط‌های سفت قرار دارند [۴۵،۴۶] مناسب سازد. البته حجم قابل توجهی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد عملگرهای نیوماتیک در ربات‌های توانبخشی، مربوط به عملگرهای نیوماتیک ماهیچه‌ای است که به دلیل چند تفاوت اساسی در ساختار مکانیکی، همچنین در ویژگی‌های مدل سازی و کنترلی با عملگرهای سیلندر - پیستونی معمول، در اینجا به آنها پرداخته نمی‌شود. در مرجع [۴۷] به این تفاوت‌های ساختاری اشاره شده است. در عملگرهای نیوماتیک سیلندر پیستونی با قابلیت عملکرد دو سویه سفتی و نیرو را می‌توان به طور مستقل از یکدیگر و البته در بازه‌های مشخصی از لحاظ مقداری، کنترل نمود. از طرفی این عملگرها دارای سفتی مدار باز نیز می‌باشند که می‌توان از آن در کاربرد ذکر شده استفاده مثبت کرد [۴۷]. منظور از سفتی مدار باز این است که در صورت وجود هوا در محفظه‌ها، حتی بدون نیاز به تلاش کنترلی با تغییر مکان پیستون توسط عامل خارجی، نیرویی ایجاد می‌شود. البته این سفتی را در مورد عملگرهای هیدرولیک نیز می‌توان متصور شد، اما مقدار آن در این عملگرها قاعداً بسیار بالا است، این سفتی مدار باز از دو جهت یک مزیت برای عملگر نیوماتیک در کاربردهای تعاملی محسوب می‌شود. اول اینکه بر خلاف عملگرهای

^۱ Back-stepping

هیدرولیک، معمولاً مقدار آن در حد معقولی است (در حدود ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ نیوتن بر متر) که این امر باعث می‌شود در صورت اعمال نیروهای ناگهانی به آن، بدون نیاز به حسگر نیرو و اصولاً بدون نیاز به تلاش کنترلی، انعطاف لازم از طرف ربات برای آسیب ندیدن کاربر وجود داشته باشد. مزیت دوم این سفتی نیز این است که در صورت انحراف از موقعیت مرجع در سیستم کنترلی، مقداری نیرو به صورت مدار باز و بدون تلاش کنترلی در سیستم ایجاد می‌شود که می‌توان آن را به عنوان قسمتی از نیروی محرک مورد نیاز در سیستم کنترلی در نظر گرفت و از آن استفاده نمود، به این معنی که در سیستم کنترل امیدانس چون رفتار امیدانسی مطلوب توسط همین نیروی محرک تامین می‌شود، قسمتی از این نیرو به صورت مدار باز تامین شده است. شن^۱ و همکارش با در نظر گرفتن این موضوع محدوده پایداری بالایی را برای شبیه‌سازی دیوار مجازی در یک سیستم هپتیک گزارش داده‌اند و حتی ادعا نموده‌اند که عملگر نیوماتیک در این زمینه بهتر از عملگر الکتریکی عمل می‌کند [۲۴].

۲-۷- کنترل فازی تطبیقی

امروزه کاربرد کنترل کننده‌های فازی تطبیقی در زمینه‌های مختلف، مورد توجه بسیاری واقع شده است. از مهم‌ترین دلایل این امر می‌توان به عملکرد و کارایی مناسب این کنترل‌کننده‌ها در برابر نامعینی‌های مدل، تغییر پارامترهای مدل، اغتشاشات، امکان استفاده از دانش اپراتورهای باتجربه در طراحی آن‌ها و عدم نیاز به دانش تخصصی از سیستم تحت کنترل، اشاره کرد. کنترل کننده‌های فازی تطبیقی از یک مجموعه قوانین اگر-آنگاه فازی ساخته شده است که از یک قانون تطبیق برای تنظیم بهنگام پارامترهای کنترل‌کننده استفاده می‌کند. در این کنترل‌کننده‌ها، پارامترهای توابع عضویت فازی ثابت بوده، اما پارامترهای تطبیقی کنترل‌کننده، مطابق با قانون تطبیقی به منظور کنترل سیستم برای ردیابی مسیر مطلوب، تغییر می‌یابند. این قواعد فازی از دانش اپراتورهای انسانی باتجربه در طول فرایند تطبیق به دست می‌آیند.

طراحی کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی برای سیستم‌های غیر خطی از مرتبه n ، در طی سه مرحله انجام می‌شود: ابتدا تعدادی مجموعه فازی که توابع عضویت آن‌ها فضای حالت را بپوشاند، تعریف می‌گردد. سپس قواعد اگر-آنگاه فازی از دانش انسانی و برخی قواعد اختیاری برای ساخت یک کنترل‌کننده فازی تطبیقی که در آن برخی پارامترها قابل تغییر هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند و در نهایت یک قانون تطبیق برای تنظیم پارامترهای آزاد بر اساس روش ترکیب لیاپانوف توسعه می‌یابند، به صورتی که پایداری سیستم حلقه بسته تضمین شود و خطای ردیابی به سمت صفر همگرا شود. همان‌طور که اشاره شد، مهم‌ترین

¹ Shen

ویژگی کنترل‌کننده‌های فازی تطبیقی، تعیین قاعده انتخاب برای سیستم فازی بر اساس معادله پارامتری تحلیلی با چندین متغیر ورودی قابل اندازه‌گیری به عنوان ورودی کنترل‌کننده فازی، بدون نیاز به شناخت تخصصی از فرایند می‌باشد. همچنین در این کنترل‌کننده‌ها دانش کمتری از سیستم تحت کنترل به منظور دستیابی به بهترین تقریب ورودی کنترل خطی‌سازی با فیدبک به‌طور خودکار تنظیم می‌گردند. نکته قابل توجه در مورد این کنترل‌کننده‌ها حجم نسبتاً بالای محاسبات بهنگام، خصوصاً در روش غیرمستقیم به واسطه وجود چندین سیستم فازی می‌باشد، که این موضوع با توجه به پردازش‌گرهای سرعت بالای موجود و همچنین توسعه روزافزون آن‌ها، عملاً سبب بروز مشکل نمی‌شود.

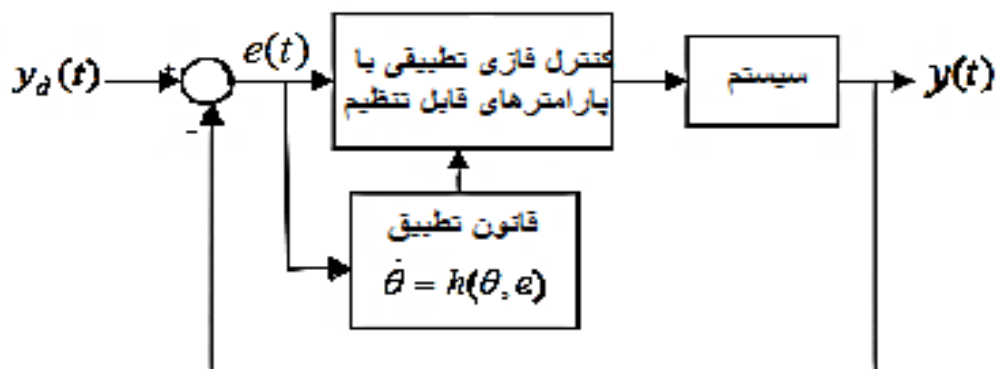
طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های غیرخطی، همواره توجه زیادی به خود جلب کرده است. معرفی تکنیک‌های هندسی و به‌ویژه خطی‌سازی با فیدبک، در زمینه طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های غیرخطی موفقیت‌آمیز بوده است. اما این روش تنها در مورد سیستم‌های غیرخطی با دینامیک نامشخص معرفی شده است. [۲۹]

کنترل فازی، به عنوان روشی برای کنترل سیستم‌های غیرخطی با ساختار پیچیده و نامشخص، که توصیف مدل ریاضی دقیق برای آن‌ها امکان پذیر نمی‌باشد، کاربرد گسترده‌ای یافته است. براساس قضیه تقریب‌زن عمومی سیستم‌های فازی، روش‌های کنترل فازی تطبیقی بسیاری ارائه شده است [۳۹]. با استفاده از این قضیه، الگوریتم کنترل فازی تطبیقی پایدار برای اولین بار برای دسته‌ای از سیستم‌های خطی تک‌ورودی-تک‌خروجی (SISO) با توابع کاملاً نامعین توسط وانگ ارائه شد [۵۸]. پس از آن روش‌های کنترل فازی تطبیقی دیگری برای سیستم‌های غیرخطی و نامعین SISO مطرح گردید، که در آن‌ها پایداری سیستم با استفاده از روش ترکیب لیانوف بررسی می‌شود [۵۱].

کار بر روی سیستم‌های فازی تطبیقی به‌طور جدی از سال ۱۹۹۳ میلادی آغاز شد و پس از آن مورد توجه بسیاری قرار گرفت. روش‌های کنترل فازی تطبیقی بر اساس مدل ممدانی، اولین بار توسط چن و هانگ در سال ۱۹۹۸ به صورت روش غیرمستقیم و در سال ۱۹۹۹ به صورت روش مستقیم ارائه شد [۵۲].

کنترل‌کننده فازی تطبیقی دارای دو حلقه می‌باشد، حلقه درونی که شامل قانون تطبیق جهت تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده است و حلقه بیرونی که شامل کنترل‌کننده و فرایند با یک فیدبک معمولی می‌باشد. تفاوت اصلی میان فازی تطبیقی و فازی غیرتطبیقی، حضور و یا عدم حضور همان قانون تطبیق می‌باشد. وجود این قانون تطبیق دارای مزایایی می‌باشد که می‌توان به چند نمونه از آن‌ها اشاره کرد:

- عملکرد و کارایی بالا ، از آنجایی که این کنترل کننده ها می توانند خود را با تغییرات محیطی تنظیم نمایند، دارای توانایی زیاد در مقابله با نامعینی های باشند.
- به دلیل توانایی قانون تطبیق، در جهت یاگیری برخط دینامیک سیستم، امکان استفاده از دانش افراد باتجربه در طراحی آنها وجود دارد و دانش کمتری از سیستم تحت کنترل نیاز است [۵۲].



شکل ۹-۲ نمودار بلوکی سیستم کنترل فازی تطبیقی [۵۲]

فصل سوم:
مدل سازی پروژه

۳-۱- مقدمه

سیستم مورد نظر از یک جک نیوماتیک، شیر کنترل دبی، سنسور تعیین موقعیت و کنترل کننده (کامپیوتر) تشکیل شده است. سنسور موقعیت به عنوان ورودی‌ها و شیر کنترل دبی خروجی کنترل کننده را تشکیل می‌دهند.

سیستم مطرح شده بر اساس موقعیت جک، نیروی وارده بر آن (بارگذاری متغیر) و همچنین زمان سپری شده از فرایند (سیستم متغیر با زمان)، در مورد وضعیت شیرهای کنترلی تصمیم گیری می‌کند. در واقع هدف ما در این پروژه استفاده از عملگر نیوماتیکی به عنوان یک سیستم جرم- فنر- دمپر تحت بارگذاری متغیر است.

در ادامه این فصل، مباحث مطرح شده به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش نخست، مربوط به مدل‌سازی یک سیستم نیوماتیکی شامل شیر و پیستون می‌باشد. در این بخش با توجه به روابط غیرخطی حاکم بر قسمت‌های مختلف سیستم، معادلات ریاضی برای مدل‌سازی و ارتباط دو قسمت سیستم که برای طراحی کنترل کننده لازم می‌باشد، ارائه می‌گردد. بخش دوم به طراحی و تشریح ساز و کار کنترلی اختصاص دارد. در این بخش، چگونگی طراحی کنترل کننده فازی- تطبیقی غیر مستقیم ارائه می‌گردد.

۳-۲- مقدمات فیزیکی و معادلات دیفرانسیل سیستم

۳-۲-۱- مقدمه

کنترل موقعیت خوب یک عملگر نیوماتیک، با وجود حجم عظیمی از تحقیقات، همچنان به عنوان یک مساله چالش برانگیز مطرح است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی به منظور حفظ امنیت نیاز است تا فشار هوای تغذیه کننده پایین نگاه داشته شود که این امر، طراحی با پهنای باند بالا را دشوار می‌کند. همچنین این بودن فشار تغذیه کننده باعث بروز محدودیت‌های جدی در دستیابی به سختی‌های مختلف عملگر شده که خود توانایی تحمل بارهای مختلف را تحت تاثیر قرار می‌دهد. گفتنیست کنترل غیر خطی جریان شیر و نایقینی‌های موجود در مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای سیستم فیزیکی طراحی کارا برای اینگونه سیستم‌ها را دشوارتر می‌سازد [۵۳].

۳-۲-۲- مدل‌سازی

معادله حرکت پیستون-میله-بار را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۴۹]:

$$(M_l + M_p)\ddot{X} + b\dot{X} + F_f + F_l = p_1A_1 + P_2A_2 - P_aA_r \quad (1-3)$$

که M_i جرم خارجی، M_p جرم پیستون و میله آن می‌باشد. x موقعیت پیستون، b ضریب اصطحکاک ویسکوزیته، F_i نیروی خارجی، F_f نیروی اصطحکاک بین پیستون و سیلندر، P_1 و P_2 فشارهای درون مخزن، P_a فشار اتمسفر و A_1, A_2 سطوح موثر پیستون‌ها می‌باشد. سمت راست معادله، نیروی موثر تولید شده در اثر فشارهای مختلف در دو سمت پیستون‌ها می‌باشد. برای کنترل موقعیت پیستون باید دبی گذرنده در هر محفظه سیلندر را کنترل کرد.

برای مدل سازی مخزن سیلندر ارتباط بین تغییرات فشار با جریان گاز و تغییرات سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فعالیت‌های قبلی که انجام شده است و معادلاتی که به دست آمده با فرض این که فرایند پر و خالی شدن مخازن بی دررو باشد، صورت گرفته است (منظور از فرایند بی دررو فرایندی است که با محیط اطراف خود ارتباط گرمایی ندارد). در این پایان‌نامه نیز معادلات سیستم تماما با فرض آدیاباتیک بودن فرایند صورت گرفته است. برای به دست آوردن روابط حاکم در این قسمت از مدل سازی فرضیات زیر را در نظر می‌گیریم:

۱- گاز کامل است. منظور از گاز کامل گازی است که قانون عمومی گازها در ارتباط با آن صادق باشد.

۲- فشار و دما درون مخزن به صورت یکنواخت می‌باشد.

۳- انرژی جنبشی و پتانسیل نادیده گرفته شده است.

اگر حجم را با V ، چگالی را با ρ ، جرم را با m ، فشار را با P و دما را با T نمایش دهیم، قانون عمومی گازها به صورت زیر نشان داده می‌شود [۵۰]:

$$p = \rho RT \quad (2 - 3)$$

$$\dot{m} = \frac{d}{dt} (\rho V) \quad (3 - 3)$$

معادلات انرژی به صورت زیر می‌باشد:

$$q_{in} - q_{out} + K C_v (\dot{m} T_{in} - \dot{m} T_{out}) - \dot{W} = \dot{U} \quad (4 - 3)$$

q_{in} و q_{out} پارامترهای تبدیل دما، K نسبت گرمایی ویژه، C_v دمای ویژه در حجم ثابت، T_{in} دمای گاز ورودی، \dot{W} میزان تغییرات کار و \dot{U} میزان تغییرات در انرژی داخلی می‌باشد. اگر دمای گاز ورودی را با دمای درون مخزن برابر در نظر بگیریم و با فرض این که سیستم بی دررو ($q_{in} = q_{out}$) باشد. معادله تغییر فشار به صورت زیر در خواهد آمد.

$$\dot{P}_i = \frac{\gamma RT}{V_i} \dot{m}_i - \frac{\alpha \gamma P_i A}{V_i} v_p \quad (5 - 3)$$

اگر مبدا حرکت پیستون را در وسط سیلندر در نظر بگیریم، حجم هر یک از مخازن به صورت زیر می-باشد:

$$V_i = V_{oi} + A_i \left(\frac{1}{2} L \pm X \right) \quad (6-3)$$

که در آن $i=1,2$ مربوط به هر یک از محفظه‌های سیلندر می‌باشد. V_{oi} حجمی است که با حرکت پیستون به سمت به انتهای سیلندر در انتها باقی می‌ماند، A_i ناحیه موثر پیستون، L طول کورس پیستون و X موقعیت پیستون می‌باشد. تفاوت بین نواحی موثر دو مخزن ناشی از میله پیستون می‌باشد. عبارت اول از محاسبه مشتق فشار ناشی از تاثیر جریان هوای ورودی و خروجی بر روی فشار و عبارت دوم نیز ناشی از حرکت پیستون می‌باشد. گاز درون مخزن از طریق نشتی شیرها و یا نشتی اطراف درزهای پیستون وارد محیط خارجی می‌شود. با این همه نشتی موجود با انتخاب درزگیر مناسب قابل چشم‌پوشی می‌باشد. البته در این حالت نیروی اصطحکاک اهمیت پیدا می‌کند.

سیستم سرونیوماتیک مورد بررسی به صورت شماتیک در شکل ۳-۱ آمده است. شرایط بلادرنگ (آدیاباتیک^۱) را برای شارژ و دشارژ محفظه‌ها مفروض می‌داریم. به طور کلی معادلات حالت غیرخطی زیر بر این سیستم حاکم است [۵۳]:

$$\dot{x}_p = v_p \quad (7-3)$$

$$\dot{v}_p = \frac{1}{M} (-bv_p + AP_1 - AP_2 - F_d) \quad (8-3)$$

$$\dot{P}_1 = \frac{\gamma RT}{V_1} \dot{m}_1 - \frac{\alpha \gamma P_1 A}{V_1} v_p \quad (9-3)$$

$$\dot{P}_2 = -\frac{\gamma RT}{V_2} \dot{m}_2 + \frac{\alpha \gamma P_2 A}{V_2} v_p \quad (10-3)$$

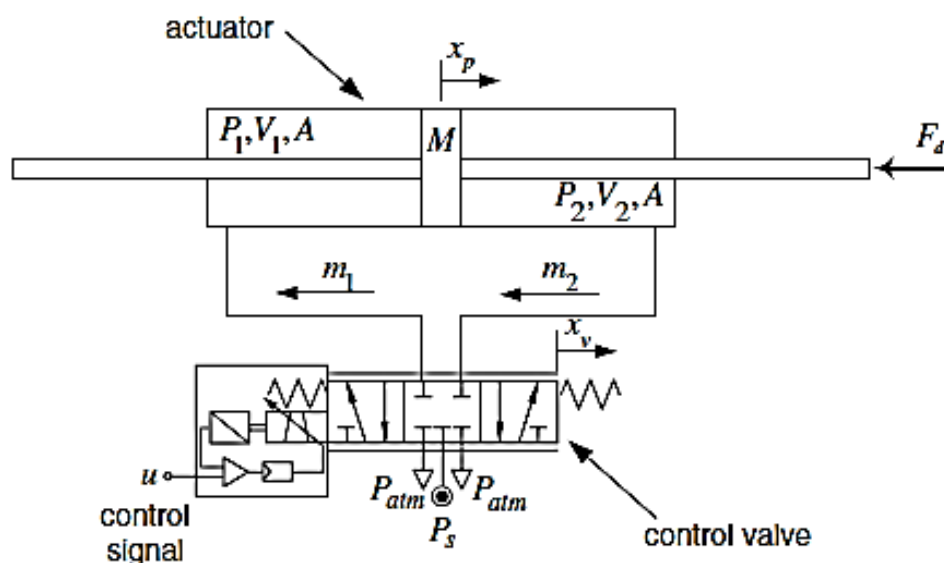
$$\dot{x}_v = -\frac{1}{\tau_v} x_v + \frac{k_v}{\tau_v} u \quad (11-3)$$

که در آن x_p مکان عملگر، v_p سرعت عملگر، x_v جا به جایی قرقره شیر و u سیگنال کنترلی است. P_1 ، P_2 و V_1 و V_2 به ترتیب فشار و حجم آنی محفظه‌ها هستند. در این بین پارامتر α فاکتور فشرده پذیری^۲ جریان سیال است. این پارامتر با توجه به اینکه یک سیستم نیوماتیک در دنیای واقعی رفتاری نه کاملاً آدیاباتیک و نه کاملاً ایزوله حرارتی^۳ دارد، به عنوان ضریبی در این بین تعیین می‌شود [۵۵]. همچنین در این مدل سازی نیروی وارده از جانب بار خارجی (F_d)، در قالب ورودی اغتشاشی در نظر گرفته می‌شود که با وجود آن، هدف کنترلی که دفع اغتشاش اعمالی می‌باشد، باید به خوبی برآورده گردد.

¹ Adiabatic

² Compressibility

³ Isothermal



شکل ۳-۱: شمای سیستم سرونیوماتیک مورد بررسی [۵۶]

شیرها از اجزاء حساس عملگرهای نیوماتیک می‌باشند. این شیرها از اجزاء فرمان سیستم بوده و باید دارای کنترل دقیق و سریع باشند. کندی شیر تاثیر مستقیم در کیفیت پاسخ کل سیستم دارد. همچنین فضای مرده یا مشخصه غیرخطی در شیر می‌تواند در پاسخ سیستم تأثیرات اساسی بگذارد. در این جا شیرهای تناسبی MPYE را که توسط یک سیم‌پیچ الکترومغناطیس باعث حرکت قرقره شیر و باز و بسته شدن شیر می‌گردد مورد مطالعه قرار می‌دهیم. شیر مناسب دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱- مشخصه شبه‌خطی دبی

۲- ثابت زمانی کوچک

۳- نشت داخلی کم

۴- توانایی تنظیم هر دو مخزن با استفاده از یک سیگنال کنترل

۵- هیستریزیس کم

۶- اصطحاک داخلی ناچیز

قرقره با استفاده از دو سیم‌پیچ در حالت تعادل قرار می‌گیرد که باعث ایجاد تعادل در فشار می‌شود. اگر قرقره در جهت مثبت حرکت کند یکی از مخازن سیلندر به منبع فشار متصل شده و هوای متراکم وارد محفظه سیلندر می‌شود. در این حالت محفظه دیگر سیلندر به محیط اتصال پیدا کرده و جریان هوا به سمت خارج از سیلندر منتقل می‌شود.

دینامیک قرقره شیر در حال تعادل به صورت زیر می‌باشد:

$$M\ddot{X}_v = -C_s\dot{X}_v - F_f + K_f(X_{v0} - X_v) - K_v(X_{v0} + X_v) + F_c \quad (12 - 3)$$

\dot{X}_v جابه‌جایی قرقره، X_{v0} نقطه تعادل قرقره، M جرم ماسوره، C_s ضریب اصطحکاک ویسکوزیته، F_f نیروی اصطحکاک کلومی، K_f ثابت فنر و F_c نیروی تولید شده توسط سیم‌پیچ می‌باشد. البته در معادله فوق می‌توان از F_f صرف نظر کرد. به شرط آن که توسط لرزاندن (دیتر کردن) تاثیر آن در دینامیک سیستم خنثی شود. البته باید در نظر داشت که اگر دینامیک شیر به خوبی مدل نشود، باعث ایجاد خطای بزرگ و یا نوسان دائم در سیستم بشود. می‌توان مدل دینامیک شیر را به صورت زیر بیان کرد:

$$M\ddot{X}_v = -C_s\dot{X}_v - 2K_fX_v - K_{fc}\dot{I}_c + F_c \quad (13 - 3)$$

\dot{I}_c جریان سیم‌پیچ و K_{fc} ضریب سیم پیچ می‌باشد.

افت فشار هوا در هنگام عبور از شیر بسیار زیاد است و رفتار آن همراه با اشفتگی می‌باشد. اگر نسبت فشار بالا و پایین شیر از مقدار p_{cr} بیشتر باشد، شار عبوری دارای سرعت معادل صوت در لوله خواهد بود. در غیر این صورت این شار رابطه‌ی غیرخطی با فشار دو ظرف شیر خواهد داشت.

به طور کلی معادلات غیرخطی جریان دبی گذرنده از هر یک از روزنه‌های شیرهای کنترلی به صورت زیر است [۵۷]:

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{C_1 K_f x_v P_u}{\sqrt{T}} & \frac{P_d}{P_u} \leq P_{cr} \\ \frac{C_1 K_f x_v P_u}{\sqrt{T}} \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{P_d}{P_u} - P_{cr} \right)}{1 - P_{cr}} \right)^2} & \frac{P_d}{P_u} > P_{cr} \end{cases} \quad (14 - 3)$$

که در آن $C_1 = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ ، P_d اندازه فشار پایین دستی، P_u اندازه فشار بالا دستی، P_{cr} نسبت فشار بحرانی^۲ و K_f بهره شیر نامیده می‌شود. توجه کنید که منظور از فشار بالادستی و پایین دستی در حالت شارژ و دشارژ متفاوت می‌باشد. در حالت شارژ فشار بالادستی فشار مخزن و فشار پایین دستی فشار سیلندر می‌باشد. در حالت دشارژ فشار بالادستی فشار مخزن و فشار پایین دستی فشار منبع دشارژ و یا فشار اتمسفر می‌باشد.

این رابطه را می‌توان به کمک سری تیلور حول نقطه‌ی کار خطی سازی کرد. اگر از جملات مرتبه دوم و بالاتر به بهانه در نظر گرفتن نشتی هر شیر کنترلی صرف نظر شود، جریان دبی را در هر یک از محفظه‌ها، می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\Delta \dot{m}_1 = C_{f1} \Delta x_v - C_{p1} \Delta P_1 \quad (15 - 3)$$

$$\Delta \dot{m}_2 = C_{f2} \Delta x_v - C_{p2} \Delta P_2 \quad (16 - 3)$$

¹ Orifice

² Critical Pressure ratio

که در آن Δ بیان کننده اختلال و انحراف از مقدار نقطه کار است. به طوری که $\Delta x_v = x_v - x_{v0}$ است. همچنین C_{pi} و C_{fi} به عنوان بهره جریان شیر^۱ و ضریب فشار جریان^۲ هستند. گفتنی است P_{i0} و x_{v0} به ترتیب مقادیر نقطه کار فشار محفظه‌ها و جابه‌جایی قرقره شیر است. در ادامه، جدول (۱-۳) مقادیر پارامترها به همراه بازه تغییرات و نایقینی‌های آنها مطابق با [۵۳، ۵۴، ۵۵] آورده شده است.

جدول-۱: مقادیر عددی مدل‌سازی یک عملگر نیوماتیک به همراه شیر ۲ به [۵۳، ۵۴، ۵۵]

مقدار حداکثر	مقدار نامی	مقدار حداقل	واحد	نماد	پارامتر
2.01	1.91	1.81	kg	M	جرم کل ^۳
80	70	60	N.sec/m	b	ضریب میرایی ویسکوز
—	0.1	—	m	L	طول کورس پیستون
—	0.00011304	—	m^2	A_r	سطح مقطع میله پیستون
—	0.00080384	—	m^2	A	سطح مقطع پیستون
0.0060288	0.0040192	0.00020096	m^3	V_{0_1}	حجم محفظه اول
0.0060288	0.0040192	0.00020096	m^3	V_{0_2}	حجم محفظه دوم
—	0.25	—	mm/V	k_v	بهره مکان قرقره شیر ^۴
5	4.2	3.4	msec	τ_v	ثابت زمانی شیر
—	287	—	J/kg.K	R	ثابت گاز ایده‌آل
—			bar	P_{atm}	فشار هوا
—	300	—	K	T	دمای منبع هوا
—	1.4	—	Const.	γ	نسبت گرمایی ویژه
—	0.9	—	Const.	A	فاکتور کارکرد فشار-حجم ^۵
5.4	4.4	4.4	bars	P_{0_1}	فشار محفظه اول
5.4	4.4	2.7	bars	P_{0_2}	فشار محفظه دوم

¹ Valve Flow Gain

² Flow Pressure Coefficient

^۳ جرم کل = جرم پیستون + جرم میله سنسور موقعیت جرم + جرم اتصالات + جرم بار اعمالی خارجی

⁴ Valve Spool Position Gain

⁵ Pressure-Volume Work Correction Factor

۱۷	نسبت فشار بحرانی شیر ^۱	P_{cr}	$Const.$	—	0.2	—
۱۸	جابجایی قرقره شیر	x_{vo}	mm	0	0	0.125
۱۹	بهره مکان محفظه اول ^۲	C_{f1}	$kg / sec.m$	8.0	13.6	13.6
۲۰	بهره جریان محفظه دوم	C_{f2}	$kg / sec.m$	8.0	13.6	13.6
۲۱	ضریب فشار-جریان ^۳ محفظه اول	C_{p1}	$kg / Pa.sec$	0	0	118.6×10^{-10}
۲۲	ضریب فشار-جریان محفظه دوم	C_{p2}	$kg / Pa.sec$	0	0	51.8×10^{-10}

۳-۲-۳- رویکرد مدل سازی خطی

به کمک تبدیلات لاپلاس می توان معادلات دیفرانسیل خطی طرح شده در بخش قبل را به صورت رابطه (۳-۹) در نظر گرفت [۵۳]:

$$X_p(s) = G(s)U(s) - G_d(s)F_d(s) \quad (17 - 3)$$

که در آن

$$G(s) = \frac{\gamma RT k_v A \{ C_{f1} (\gamma RT C_{p2} + V_{02} s) + C_{f2} (\gamma RT C_{p1} + V_{01} s) \}}{(\tau_v s + 1) D(s)} \quad (18 - 3)$$

و

$$G_d(s) = \frac{(\gamma RT C_{p1} + V_{01} s)(\gamma RT C_{p2} + V_{02} s)}{D(s)} \quad (19 - 3)$$

و در نهایت

$$D(s) = s(Ms + b)(\gamma RT C_{p1} + V_{01} s)(\gamma RT C_{p2} + V_{02} s) + \alpha \gamma A^2 s [\gamma RT (P_{01} C_{p2} + P_{02} C_{p1}) + (P_{10} V_{02} + P_{20} V_{01}) s] \quad (3 - 20)$$

¹ Valve Critical Pressure Ratio

² Flow Gain

³ Flow-Pressure Coefficient

همچنین $U(s)$ سیگنال کنترلی است. به این ترتیب اگر ورودی بار صفر باشد، $F_d(s) = 0$ ، تابع تبدیل مکان پیستون به سیگنال کنترلی و اگر ورودی کنترلی صفر باشد، $U(s) = 0$ ، تابع تبدیل مکان پیستون به ورودی بار خواهد بود.

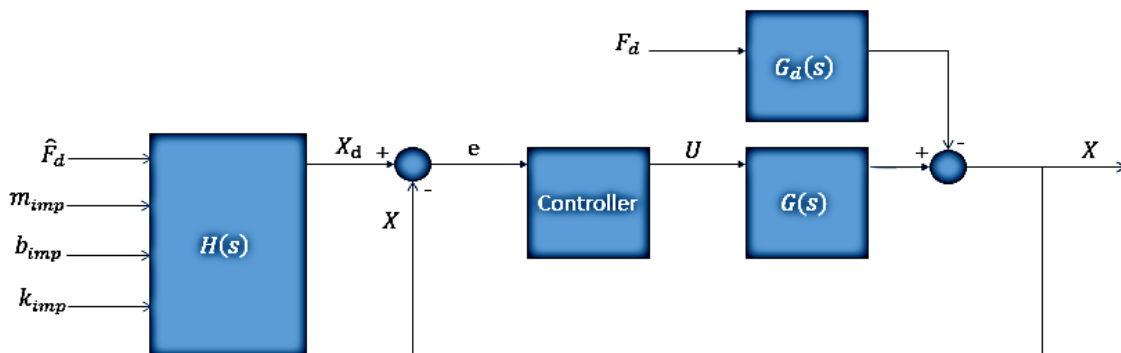
با توجه به سیستم جسم- فنر- دمپر استاندارد، می‌توان رفتار امیدانسی مطلوب را مطابق با رابطه (۳-۱۳) در نظر گرفت.

$$m_{imp}(\ddot{x}_d) + b_{imp}(\dot{x}_d) + k_{imp}(x_d) = F_d \quad (21 - 3)$$

که در آن m_{imp} ، b_{imp} و k_{imp} به ترتیب اینرسی، میرایی و سختی مورد انتظار است. تابع تبدیل مکان پیستون نسبت به ورودی بار F_d برابر است با:

$$\frac{X_d}{F_d} = \frac{1}{m_{imp}s^2 + b_{imp}s + k_{imp}} = H(s) \quad (22 - 3)$$

حال می‌توان این مکان را ورودی مطلوب سیستم نیوماتیک در نظر گرفت. به این ترتیب شمای کلی روند را می‌توان به صورت شکل (۳-۲) متصور بود.



شکل ۳-۲: شمای کلی روند رویکرد خطی سازی

با توجه به مقادیر عددی نامی داده شده در جدول ۱، روابط (۳-۱۸) و (۳-۱۹) به صورت (۳-۲۳) و (۳-۲۴) خواهد بود:

$$G = \frac{2.648}{0.0001296s^4 + 0.00478s^3 + 0.001131s^2 + 0.0000000288s^1} \quad (23 - 3)$$

$$G_d = \frac{0.00001615}{0.0000308s^2 + 0.001131s^1 + 0.00000002888} \quad (24 - 3)$$

قطب‌های تابع تبدیل G عبارتند از: $\{0, -0.2381, -36.6446, -0.000025467\}$ و قطب‌های G_d عبارتند از: $\{-0.00005535, -36.7208\}$.

۳-۲-۴- رویکرد کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم

اگر به طور کلی داشته باشیم:

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + f(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)})u \quad (25 - 3)$$

که بردار X به صورت

$$X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \vdots \\ x^{(n-1)} \end{bmatrix}$$

در نظر گرفته می‌شود.

هدف کنترلی: $X \rightarrow X_d$

که X_d به صورت

$$X_d = \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ \ddot{x}_d \\ \vdots \\ x_d^{(n-1)} \end{bmatrix}$$

X_d می‌باشد [۶۰].

زمانی که مدل دقیق سیستم را در اختیار نداشته باشیم آنرا تخمین می‌زنیم و در قانون کنترل قرار می‌دهیم:

$$x_d^{(n)} + K_1(x_d^{(n-1)} - x^{(n-1)}) + \dots + k_n(x_d - x) = \hat{f}(X) + \hat{g}(X)u$$

$$u = \frac{x_d^{(n)} + K_1(x_d^{(n-1)} - x^{(n-1)}) + \dots + k_n(x_d - x) - \hat{f}(X)}{\hat{g}(X)} \quad (26 - 3)$$

معادله سیستم حلقه بسته به صورت زیر خواهد شد.

$$x_d^{(n)} + k_1(x_d^{(n-1)} - x^{(n-1)}) + \dots + k_n(x_d - x) = \hat{f}(X) - f(X) + (\hat{g}(X) - g(X))u$$

(27 - 3)

در این معادله \hat{g} و \hat{f} سیستم‌های فازی می‌باشند.

$$\hat{f}(x) = \frac{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i) \bar{y}^l}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (28-3)$$

$$\hat{g}(x) = \frac{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i) \bar{g}^l}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (29-3)$$

اگر داشته باشیم:

$$\hat{f}(x) = \sum_{l=1}^m \zeta^l \bar{y}^l \quad (30-3)$$

آن‌گاه می‌توان نتیجه گرفت:

$$\zeta = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (31-3)$$

$$\hat{f}(x) = [\bar{y}^1 \ \bar{y}^2 \ \bar{y}^3 \ \dots \ \bar{y}^m] \begin{bmatrix} \zeta^1 \\ \vdots \\ \zeta^m \end{bmatrix} = \hat{p}^T \zeta \quad (32-3)$$

که بردار \hat{p} بردار پارامترها و بردار ζ مربوط به متغیرها می‌باشد.

$$f(x) = p^T \zeta + \varepsilon_1 \quad (33-3)$$

که ε_1 خطای تقریب می‌باشد. با جایگذاری در معادله خواهیم داشت:

$$x_d^{(n)} + k_1(x_d^{(n-1)} - x^{(n-1)}) + \dots + k_n(x_d - x) = \hat{F}(X) - f(X) + (\hat{g}(X) - g(X))u - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (34-3)$$

در ادامه معادلات مرتبط به خطای سیستم را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\begin{cases} e_1 = e_2 \\ e_2 = e_3 \\ \vdots \\ e_n = -k_1 e_n - k_2 e_2 - \dots - k_n e_n + (\hat{p}^T - p^T)\zeta + (\hat{q}^T - q^T)\zeta \cdot U - \varepsilon \end{cases} \quad (35-3)$$

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad \dot{E} = AE + bw - b\varepsilon \quad (36 - 3)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \dots & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & k_1 \end{bmatrix}$$

$$w = (\hat{p}^T - p^T)\zeta + (\hat{q}^T - q^T)\zeta \cdot U \quad (37 - 3)$$

هدف ما رساندن ماتریس خطای E به سمت صفر می‌باشد. به این منظور یک تابع V به منظور ایجاد پایداری لیاپانوف در نظر گرفته می‌شود.

$$V = E^t S E + \frac{1}{2\alpha} (\hat{p}^T - p^T) (\hat{p} - p) + \frac{1}{2\gamma} (\hat{q}^T - q^T) (\hat{q} - q) \quad (38 - 3)$$

که باید در این حالت شرایط زیر فراهم شود.

$$V(0) = 0$$

$$\dot{V}(0) < 0$$

$$\dot{V} = \dot{E}^t S E + E^t S \dot{E} + \frac{1}{\alpha} \hat{p}^T (\hat{p} - p) + \frac{1}{\gamma} \hat{q}^T (\hat{q} - q) \quad (39 - 3)$$

$$\dot{E}^T = E^T A^T + w b^T - \varepsilon b^T \quad (40 - 3)$$

در نهایت خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -E^T Q E + (\hat{q}^T - q^T) \left[2E^t S b \zeta U + \frac{1}{\alpha} \hat{q} \right] + (\hat{p}^T - p^T) \left[2E^T S b \zeta + \frac{1}{\gamma} \hat{p} \right] - 2E^T S b \varepsilon \quad (41 - 3)$$

که در آن Q مثبت معین متقارن می‌باشد.

$$Q = -(A^T S + S A) \quad (41 - 3)$$

حال برای این که Q مثبت معین متقارن باشد. ماتریس A را به نحوی انتخاب می‌کنیم تا هر ویتز باشد و ماتریس S را از رابطه فوق محاسبه می‌کنیم.

$$\hat{q} = -\alpha 2E^T S b \zeta u \quad (42 - 3)$$

$$\hat{p} = -\gamma 2E^T S b \zeta \quad (43 - 3)$$

$$\hat{q} = -\int_0^t \alpha 2E^T S b \zeta U dt + \hat{q}(0) \quad (44 - 3)$$

$$\hat{p} = -\int_0^t \gamma 2E^T S b \zeta dt + \hat{p}(0) \quad (45 - 3)$$

در این صورت خواهیم داشت:

$$\dot{V} = -E^T Q E - 2E^T S b E$$

$$\dot{A} \leq -\gamma_{\min}(Q) \|E\|^2 + 2 \|S b\| \varepsilon \|E\|$$

که این یعنی E محدود نهایی یکنواخت است. ($u \cup B$) [۶۰].

۳-۳- طراحی کنترل کننده

۳-۳-۱- مقدمه

پس از مدل سازی سیستم که در بخش اول انجام گرفت، در این بخش، چگونگی طراحی کنترل کننده تشریح می شود. در بخش گذشته، پس از مدل سازی ریاضی دستگاه مورد نظر، ایده کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم مطرح گردید. همان گونه که مشخص است، به کمک سنسور موقعیت، مکان لحظه ای پیستون در اختیار خواهد بود. با مشتق گیری از مکان، سرعت پیستون و با مشتق مجدد شتاب پیستون را خواهیم داشت.

۳-۳-۲- ساختار کنترلی

همانگونه که در قسمت پایانی بخش قبل بیان شد، هدف، رویکرد کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم است. روند کار به این صورت است که ابتدا متغیرهای حالت سیستم را به صورت متغیرهای فازی در می آوریم. برای این کار از توابع گوسی استفاده می کنیم. به منظور فازی سازی متغیرها از فازی ساز گوسین استفاده می کنیم.

$$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-x^*}{\sigma}\right)^2} \quad (47-3)$$

در این معادله x^* محل تاثیر تابع گوسی را تعیین می کند و σ دامنه ی تاثیر تابع گوسی را تعیین می کند.

معادلات حالت سیستم را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\dot{x}_p = v_p \quad (48-3)$$

$$\dot{x} = \dot{v}_p = \frac{1}{M} (-b v_p + A P_1 - A P_2 - F_d) \quad (49-3)$$

$$\ddot{x} = -\frac{b}{M} \dot{x}_p + \frac{A}{M} (\dot{P}_1 - \dot{P}_2) - \frac{\dot{F}_d}{M} \quad (50-3)$$

با وارد کردن معادلات مربوط به مشتق فشار دو محفظه سیلندر خواهیم داشت:

$$\ddot{x} = -\frac{b}{M} \dot{x} + \frac{A}{M} \left(\frac{\gamma R T}{V_1} \dot{m}_1 + \frac{\gamma R T}{V_2} \dot{m}_2 \right) + \left(\frac{\alpha \gamma P_2 A}{V_2} v_p - \frac{\alpha \gamma P_1 A}{V_1} v_p \right) - \frac{\dot{F}_d}{M} \quad (51-3)$$

همانطور که مشاهده میکنید عبارت اول وسوم تحت تاثیر ورودی نبوده و مستقیماً تحت تاثیر متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. در عبارت دوم که متغیر \dot{m} ظاهر شده است، اثر ورودی نیز در این عبارت وجود دارد. معادله (۳-۵۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\ddot{x} = f(x_p, \dot{x}_p, \ddot{x}_p) + g(x_p, \dot{x}_p, \ddot{x}_p)x_v + d(t) \quad (52 - 3)$$

در این معادله $d(t)$ اثر اغتشاش یا بار خارجی و x_v مکان قرقره شیر می‌باشد.

حال سیستم را به فرم فضای حالت برده و روند طراحی کنترلر را شروع می‌کنیم:

$$X = \begin{bmatrix} x_p \\ \dot{x}_p \\ \ddot{x}_p \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{X} = AX + B(f(X) + g(X)x_v) + d(t) \quad (54 - 3)$$

دامنه تغییر X_p برابر با ۰ تا ۱۰ سانتی متر (برابر با طول جک به کار برده شده در سیستم عملی) در نظر گرفته شده است. بازه تغییرات این متغیر حالت را با سه فازی گوسی با متوسط ۰ و سیگما ۲، متوسط ۵ و سیگما ۱.۵، متوسط ۱۰ و سیگما ۲ پوشش داده ایم. برای متغیر حالت \dot{X}_p بازه تغییر -1m/s تا 1m/s در نظر گرفته شده است. این متغیر حالت نیز با سه فازی ساز گوسی با متوسط -۱ و سیگما ۰.۳۵ ، متوسط ۰ و سیگما ۰.۳ ، متوسط ۱ و سیگما ۰.۳۵ پوشش داده شده است. \ddot{X}_p نیز دارای بازه تغییرات -4m/s^2 تا 4m/s^2 در نظر گرفته شده است. این متغیر حالت نیز با سه فازی ساز گوسی با متوسط -۴ و سیگما ۱.۵ ، متوسط ۰ و سیگما ۱.۲ ، متوسط ۴ و سیگما ۱.۵ به صورت فازی درآمده است. با نگاه به شیوه فازی سازی بالا متوجه می‌شویم که کنترل کننده دارای ۲۷ قانون فازی خواهد بود.

اولین هدف ما در طراحی این کنترل کننده به دست آوردن تقریبی از تابع $F(X)$ و $G(X)$ می‌باشد. تا بتوان با استفاده از آن‌ها مقادیر برای مکان قرقره شیر و در نهایت سیگنال کنترل، به دست آورد.

$$\hat{f}(X) = \frac{\sum_{L=1}^{27} \prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i) \bar{y}^L}{\sum_{L=1}^{27} \prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (56 - 3)$$

$$\hat{g}(X) = \frac{\sum_{L=1}^{27} \prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i) \bar{g}^L}{\sum_{L=1}^{27} \prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (57 - 3)$$

در قدم بعدی برای ساخت قوانین فازی در هر فاصله زمانی و طبق معادله باید خروجی تمامی این توابع فازی در هم ضرب شود. پس از ایجاد این حاصلضربها به منظور نرمال سازی آنها هر یک از آنها بر مجموع کل این مقادیر تقسیم می‌شود. ماتریس ζ با ابعاد ۱ در ۲۷ از چیده شدن این ۲۷ مقدار نرمال شده در کنار یکدیگر ساخته خواهد شد.

$$\zeta = \frac{\prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i)}{\sum_{L=1}^{27} \prod_{i=1}^3 \mu_{l_{A_i}}(x_i)} \quad (58-3)$$

اگر ماتریس \hat{g} و \hat{p} را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} \bar{y}^1 \\ \bar{y}^2 \\ \vdots \\ \bar{y}^{27} \end{bmatrix}$$

$$\hat{q} = \begin{bmatrix} \bar{q}^1 \\ \bar{q}^2 \\ \vdots \\ \bar{q}^{27} \end{bmatrix}$$

آن‌گاه خواهیم داشت:

$$\hat{f}(X) = \hat{p}^T * \zeta$$

$$\hat{g}(X) = \hat{q}^T * \zeta$$

قانون کنترل پیشنهادی برای استفاده در کنترل کننده به صورت زیر می‌باشد:

$$x_d^{(3)} + K_1(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + \dots + k_3(x_d - x) = \hat{f}(X) + \hat{g}(X)u \quad (59-3)$$

$$u = \frac{x_d^{(3)} + k_1(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + \dots + k_3(x_d - x) - \hat{f}(X)}{\hat{g}(X)} \quad (60-3)$$

سیستم حلقه بسته نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$x_d^{(3)} - x^{(3)} + k_1(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + \dots + k_3(x_d - x) = \hat{f}(X) - f(X) + (\hat{g}(X) - g(X))u \quad (61-3)$$

حال اگر خطای تقریب $\tilde{f}(X)$ و $\tilde{g}(X)$ را به قانون کنترل وارد کنیم:

$$x_d^{(3)} - x^{(3)} + k_1(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + \dots + k_3(x_d - x) = \tilde{f}(X) - f(X) + (\tilde{g}(X) - g(X))u - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (62-3)$$

حال در ادامه $e_1 = x_d - x$ و معادلات حالت را تشکیل می‌دهیم:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \dot{e}_3 = -k_1 e_3 - k_2 e_2 - k_3 e_1 + (\hat{p}^T - p^T)\zeta + (\hat{q}^T - q^T)\zeta \cdot U - \varepsilon \end{cases} \quad (63 - 3)$$

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad \dot{E} = AE + bw - b\varepsilon$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_3 & -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}$$

$$w = (\hat{p}^T - p^T)\zeta + (\hat{q}^T - q^T)\zeta \cdot u \quad (64 - 3)$$

هدف ما در این قسمت آن است که اولاً خطای سیستم را به سمت صفر برده و پایداری آن را تضمین کنیم. برای این کار از روش پایداری لیاپانوف استفاده می‌کنیم. به این منظور در ابتدا یک تابع V برای سیستم پیشنهاد می‌دهیم، سپس پارامترها را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که سه شرط زیر برقرار گردد.

$$V(0) = 0 \quad -1$$

$$V > 0 \quad -2$$

$$\dot{V} < 0 \quad -3$$

تابع پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

$$V = E^t S E + \frac{1}{2\alpha} (\hat{p}^T - p^T)(\hat{p} - p) + \frac{1}{2\gamma} (\hat{q}^T - q^T)(\hat{q} - q) \quad (65 - 3)$$

طبق روندی که در بخش قبل توضیح داده شده است، برای برقراری شرایط ذکر شده خواهیم داشت:

$$\hat{q} = -\alpha 2E^t S b \zeta u \quad (65 - 3)$$

$$\hat{p} = -\gamma 2E^t S b \zeta \quad (66 - 3)$$

$$\hat{q} = -\int_0^t \alpha 2E^t S b \zeta u dt + \hat{q}(0) \quad (67 - 3)$$

$$\hat{p} = -\int_0^t \gamma 2E^t S b \zeta dt + \hat{p}(0) \quad (68 - 3)$$

ماتریس A پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -90 & -38 & -15 \end{bmatrix}$$

ضرایب K به گونه‌ای محاسبه شده که ماتریس A هورویتز باشد، یعنی ریشه‌های آن در سمت

چپ محور موهومی قرار بگیرد.

ماتریس Q به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

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

آنگاه با توجه به رابطه (۳-۴۱) ماتریس S به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S = \begin{bmatrix} 10.2892 & 3.7552 & 0.0056 \\ 3.7552 & 3.2245 & 0.1120 \\ 0.0056 & 0.1120 & 0.408 \end{bmatrix}$$

با در نظر گرفتن $\alpha = 29$ و $\gamma = 67$ سیستم بهترین شرایط پاسخ را خواهد داشت. با تنظیم این دو پارامتر فرایند طراحی کنترل کننده تمام است. لازم به ذکر است که تا این مرحله x_{pp} یا مکان فرقره توسط کنترل کننده به دست آمده است. این سیگنال توسط یک سیستم غیر تطبیقی درجه اول به سیگنال u تبدیل خواهد شد.

فصل چهارم:
شبه‌سازی و تحلیل نتایج

در فصل گذشته مفصلاً به مدل‌سازی و طراحی کنترل‌کننده برای سیستم شامل پیستون و شیر پرداخته شد. نحوه مدل‌سازی یک پیستون که ورودی‌های آن، خروجی یک شیر دو به پنج است، به صورت تحلیلی و به کمک روابط ریاضی تشریح شد. سپس با معرفی استراتژی کنترل پسگام، طراحی کنترل‌کننده به روش مطرح شده برای سیستم مورد مطالعه انجام گرفت.

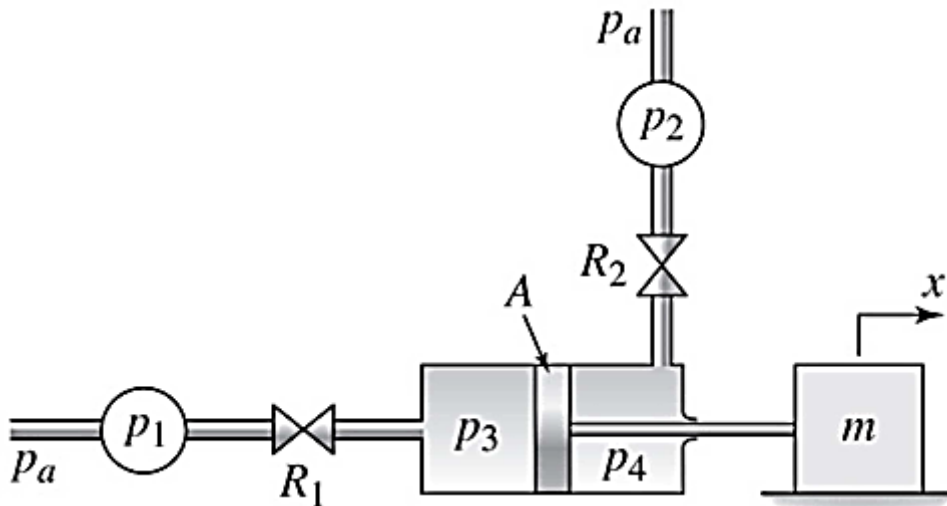
طراحی هر کنترل‌کننده شامل سه گام است. گام اول، مدل‌سازی، انتخاب کنترل‌کننده مناسب بر اساس مواردی همچون پلنت مدل‌شده، شرایط موجود، میزان حساسیت کار، بحث اقتصادی و ... و طراحی کنترل‌کننده که هم خواسته‌های کنترلی را برآورده کند و هم پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین نماید. در گام دوم لازم است با شبیه‌سازی کامپیوتری، ادعاهای گام نخست مبنی بر پایداری و کارایی مطلوب اثبات گردد. نرم‌افزارهای مختلفی جهت شبیه‌سازی انواع سیستم‌ها وجود دارد که هر کدام قابلیت منحصر به فردی دارد و دست طراح را برای استفاده از هر کدام باز گذاشته است. انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی وابسته به پلنت و کنترل‌کننده طراحی شده است و البته با نظر طراح تعیین می‌گردد. در نهایت، گام سوم به پیاده‌سازی عملی اختصاص دارد. در این گام و پس از انجام دو گام قبلی، کنترل‌کننده طراحی شده در گام نخست و تایید شده در گام دوم، به سیستم مورد نظر اعمال می‌گردد. از آنجایی که هیچ مدل‌سازی به صورت کاملاً صددرصد مطابق با سیستم اصلی نیست، لذا احتمالاً پاسخ‌های عملی کاملاً منطبق بر نتایج شبیه‌سازی نیست. اگر گام اول و دوم با دقت بالا و به درستی انجام گرفته باشد، معمولاً با تغییر اندک در ساختار کنترل‌کننده (اضافه کردن بهره در مسیر سیگنال کنترلی، جمع کردن سیگنال کنترلی با عدد ثابت، تغییر در ضرائب طراحی شده کنترل‌کننده، کاهش ریپل سیگنال کنترلی با افزودن فیلترهای پایین‌گذر در مسیر آن و ...) مشکل مرتفع خواهد شد.

گام نخست به صورت کامل در فصل قبل بحث و تشریح شد. ادامه این فصل، به شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی اختصاص دارد. بخش بعدی، نحوه شبیه‌سازی سیستم به همراه کنترل‌کننده بیان می‌شود. در بخش دوم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذکر خواهد شد. از آنجایی که پایان‌نامه حاضر شامل پیاده‌سازی عملی نیز هست، لذا به جهت مقایسه نتایج عملی نیز در بخش دوم آورده می‌شود و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد.

۲-۴- تشریح شبیه‌سازی

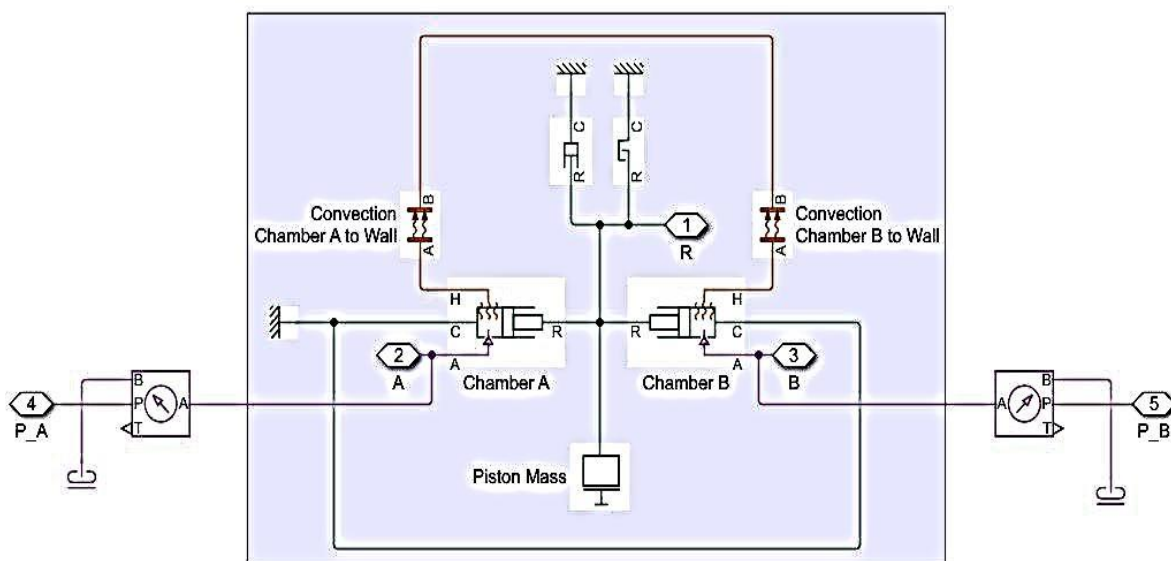
۱-۲-۴- پیستون

شماتیک ساده شده یک پیستون به صورت شکل (۴-۱) است. با اعمال میزان دبی از دو طریق R_1 و R_2 ، موقعیت تعیین می‌شود.



شکل ۴-۱: شماتیک ساده یک پیستون به همراه بار به جرم m

از آنجایی که نرم‌افزار MATLAB بلوکی برای پیستون فوق ندارد، لذا لازم است با بلوک‌های موجود، پیستون فوق را طراحی نمود. شماتیک طراحی که در نرفزار انجام شده به صورت شکل (۴-۲) است. همانگونه که از شکل (۴-۲) ملاحظه می‌شود، شبیه‌سازی شامل دو پیستون یک طرفه با نام‌های chamber A و chamber B، جرم پیستون با نام Piston Mass و خاصیت ویسکوزیته و سختی که در شکل مشخص هستند. هر کدام از دو پیستون که یک طرف آنها به یکدیگر وصل شده است و یک پیستون دو طرفه را تشکیل داده است و طرف دیگر آنها به مرجع (زمین) متصل شده است. دو بلوک خارج از کادر نیز مربوط به سنسور فشار و دما است (البته در اینجا فقط از فشار دو محفظه استفاده می‌شود) که در طراحی کنترل-کننده به کار گرفته خواهد شد.

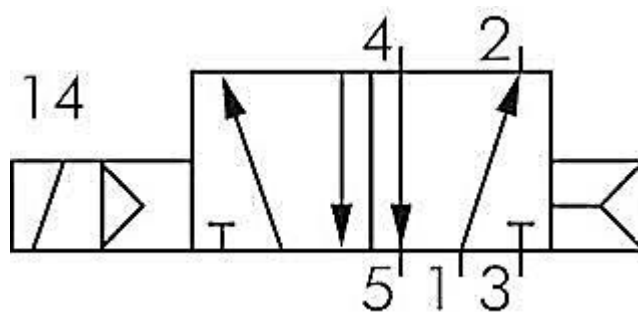


شکل ۴-۲: شماتیک پیستون شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB

میزان دبی که از طرف شیر به پیستون دو طرفه اعمال می‌شود به ترتیب به نقاط مشخص شده با علائم A و B اعمال می‌گردد. برای تعیین موقعیت پیستون نیز با اعمال خروجی مشخص شده با R به یک سنسور موقعیت، موقعیت پیستون را تعیین کرد.

۴-۲-۲- شیر (Valve)

یک شماتیک بسیار ساده از یک شیر ۲ به ۵ (مورد استفاده در شبیه‌سازی) در شکل (۳-۴) آورده شده است. خروجی‌های مشخص شده با اعداد ۲ و ۴، به پیستون دوطرفه که در قسمت قبل تشریح شد اعمال می‌گردد. ورودی ۱ به کمپرسور وصل است و خروجی‌های ۳ و ۵ در هوای آزاد رها هستند. همچنین سیگنال کنترلی نیز به ورودی ۱۴ اعمال می‌گردد.

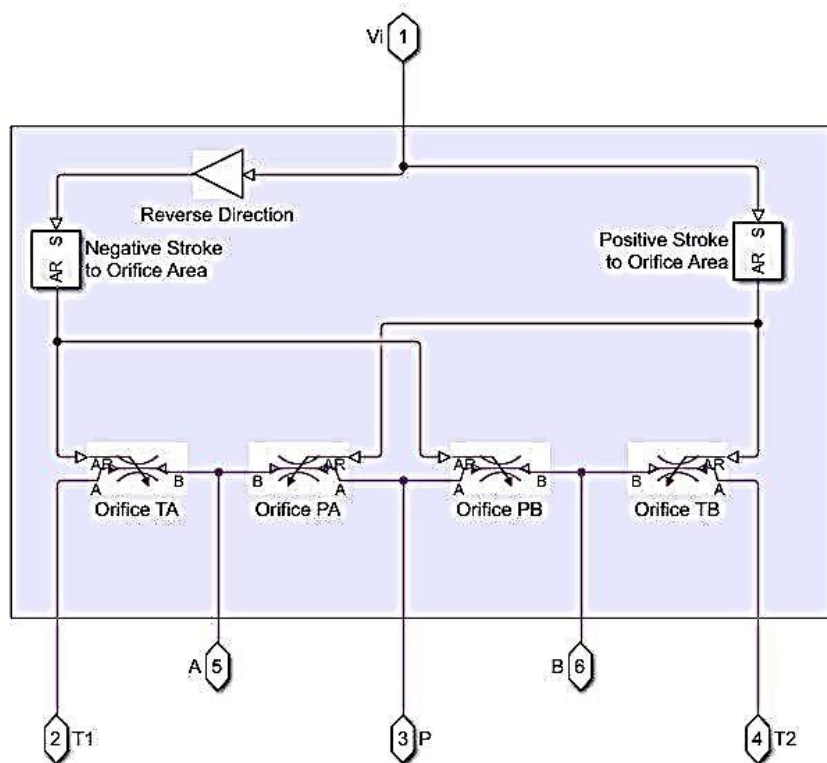


شکل ۳-۴: شماتیک ساده یک شیر ۲ به ۵

نحوه عملکرد آن به این صورت است که بسته به سیگنال کنترلی که به شیر اعمال می‌شود و قرقره شیر در چه موقعیتی قرار می‌گیرد، میزان دبی خروجی‌های ۲ و ۴ تعیین می‌شود. شیر مورد استفاده در این

پروژه از نوع شیر mpye است که سیگنال کنترلی از نوع جریان در بازه ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر را گرفته و موقعیت قرقه را تعیین می‌کند. به عنوان مثال اگر سیگنال کنترلی در کمترین مقدار باشد، یعنی قرقه در مکان صفر قرار دارد و میزان فلو عبوری از خروجی ۴ صفر بوده و فلو خروجی ۲ بیشترین مقدار خواهد بود. همچنین اگر سیگنال کنترلی در بیشترین مقدار باشد، یعنی قرقه در مکان انتهایی قرار دارد و میزان فلو عبوری از خروجی ۲ صفر بوده و فلو خروجی ۴ بیشترین مقدار خواهد بود. در این حالت پیستون در انتهایی‌ترین مکان خود (که در این پروژه بیشترین مقدار ۱۰ سانتی‌متر است) قرار می‌گیرد. هر سیگنال کنترلی بین این دو مقدار باعث می‌شود که دبی عبوری بین دو محفظه طبق رابطه ای که از قبل بیان شده است تغییر بکند.

از آنجایی که بلوک مربوط به این شیر نیز جزء بلوک‌های نرم‌افزار MATLAB نیست، لذا مجدداً لازم است با بلوک‌های موجود رفتار آن به ازای ورودی‌های مختلف شبیه‌سازی شود. شکل (۴-۴) شماتیک شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد.

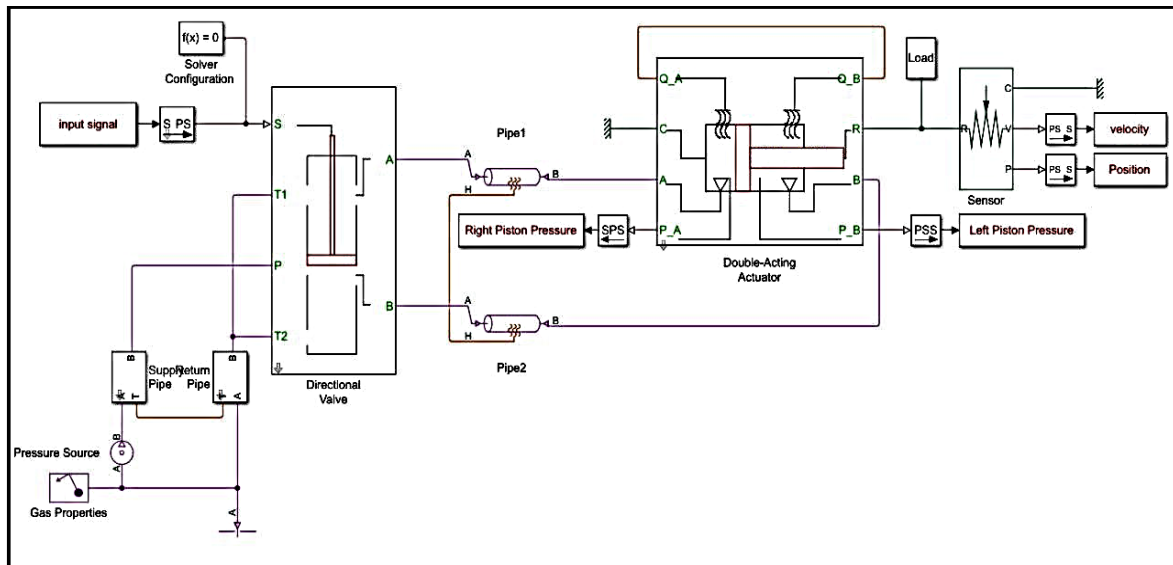


شکل ۴-۴: شماتیک شیر ۲ به ۵ شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB

این شماتیک دارای دو ورودی (P و V_i) و چهار خروجی (T_1 ، T_2 ، A و B) است. چهار بلوک که نام آنها با کلمه Orifice آغاز می‌شود از ورودی فرمان گرفته و خروجی را تعیین می‌کنند. در واقع، این بلوک‌ها فلو متغیر از خود عبور می‌دهند (بسته به مقدار سیگنال کنترلی). لذا سیگنال کنترلی V_i پس از عبور از بلوک‌های Negative Stroke to Orifice Area (بلوکی که سیگنال کنترلی را آماده اعمال به بلوک‌های

Orifice می‌کند) به چهار بلوک معرفی شده اعمال می‌شود و خروجی‌های A و B تعیین می‌گردند (البته با این سازوکار خروجی‌های T1 و T2 نیز کنترل می‌شود که چون برای کنترل پیستون بی‌تاثیر است ذکر نشده است).

به این ترتیب، شبیه‌سازی دو قسمت سیستم معرفی گردید. نمای کلی شبیه‌سازی سیستم که از دو قسمت معرفی شده تشکیل شده است به صورت شکل (۴-۵) است.



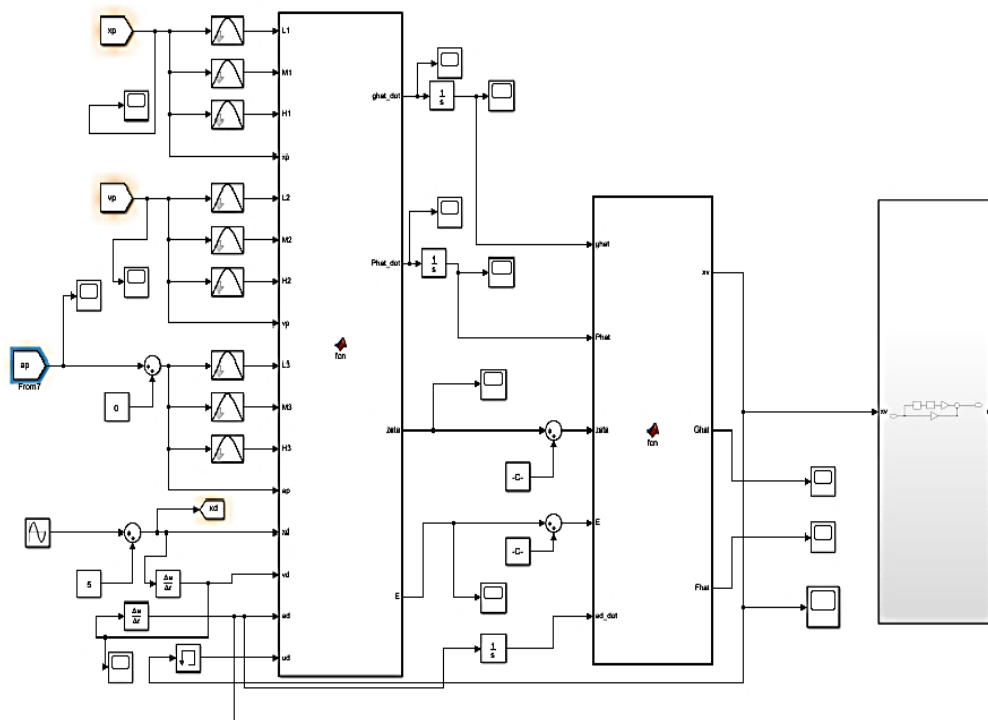
شکل ۴-۵: شماتیک سیستم شامل شیر و پیستون شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB

این شبیه‌سازی علاوه بر بلوک‌های Directional Valve و Double-Acting Actuator که به ترتیب مربوط به شیر و پیستون‌اند و قبلاً معرفی شدند، شامل چند بلوک دیگر است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. بلوک با نام input signal ورودی سیستم است که به خروجی کنترل‌کننده متصل می‌شود. دو بلوک Pressure Source و Gas Properties مربوط به کمپرسور و گاز می‌باشد. همچنین بلوک با نام Sensor نیز سنسور موقعیت و سرعت قسمت متحرک پیستون است. همچنین، شبیه‌سازی فوق شامل دو بلوک Pipe1 و Pipe2 می‌باشد که شبیه‌سازی حفره محفظه چپ و راست پیستون را به عهده دارد.

۴-۲-۳- کنترل کننده

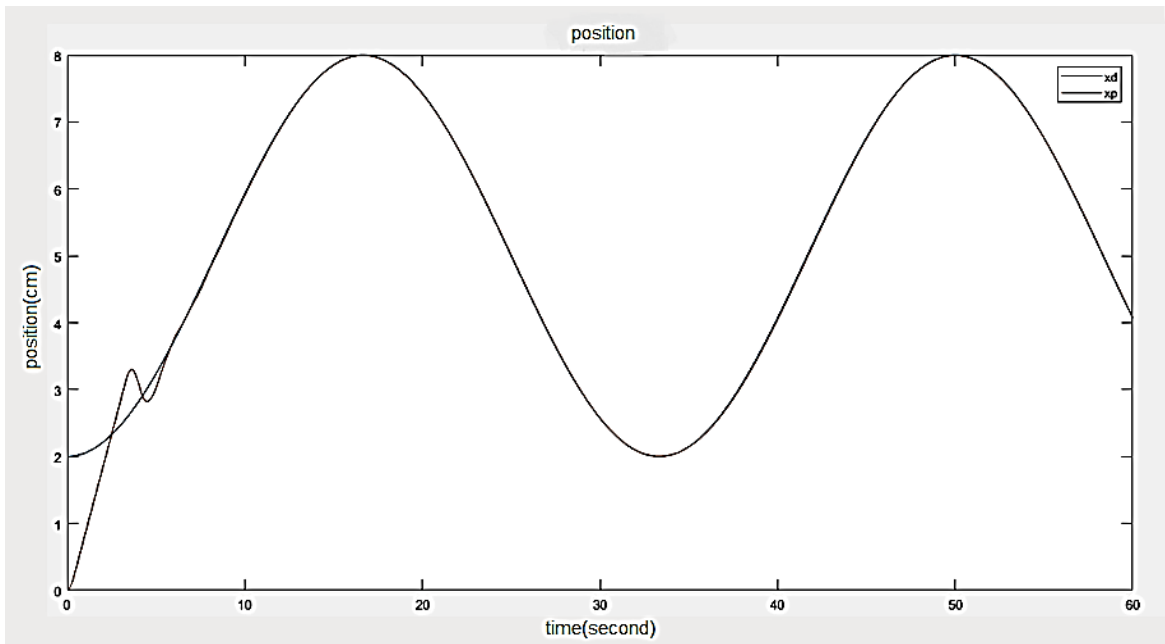
احتمالاً چالش برانگیزترین قسمت شبیه‌سازی، قسمت کنترل کننده است. طراحی این قسمت شامل سه بخش اصلی می‌باشد. در قسمت اول فازی سازی انجام شده و ماتریس zeta ساخته می‌شود. پس از آن دو انتگرال \tilde{q} و \tilde{p} می‌شوند. در قسمت دوم از کنترل کننده مقدار $\hat{F}(X)$ و $\hat{G}(X)$ محاسبه می‌شود و سیگنال کنترل نیز ساخته می‌شود. در قسمت سوم نیز این سیگنال که x_{vv} با تمهیداتی به سیگنال u و ورودی دستگاه تبدیل می‌شود.

همچنین لازم به ذکر است که وزن کل سیلندر و میله و دستگاه نگهدارنده بار مجموعاً ۱.۸۲ کیلوگرم می‌باشد. منظور از میزان اغتشاشات که به صورت درصدی بیان شده است نیز درصدی از این بار است که به صورت اغتشاش در هر لحظه ممکن است به سیستم وارد شود. البته ممکن است باری به اندازه پیش فرض بر روی سیستم قرار بگیرد؛ به عنوان مثال یک وزنه دو کیلوگرم از ابتدا روی سیستم باشد. در این صورت میزان اغتشاش درصدی از مجموع ۳.۸۲ کیلوگرم خواهد بود. همچنین همانطور که در معادله (۳-۵۱) ذکر شده است، مشتق اول نیروی اغتشاش در معادله مربوط به مشتق سوم موقعیت ظاهر شده است. در شبیه سازی به جای نیروی اغتشاش از بلوک اعداد تصادفی به هم پیوسته با دامنه ی مشخص استفاده شده است. به منظور جلوگیری از نامحدود شدن مشتق اعداد تصادفی پیوسته از یک فیلتر پایین گذر درجه اول استفاده شده است.

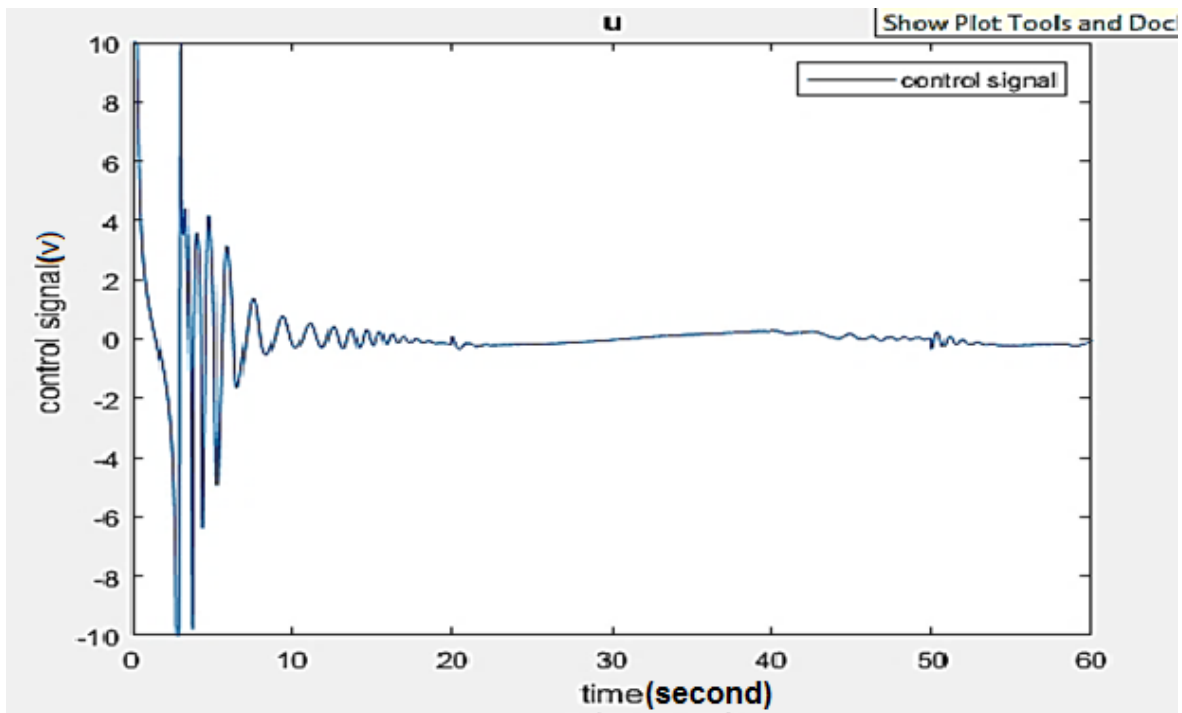


شکل ۴-۶: شماتیک کنترل کننده طراحی شده برای سیستم شامل شیر و پیستون شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB

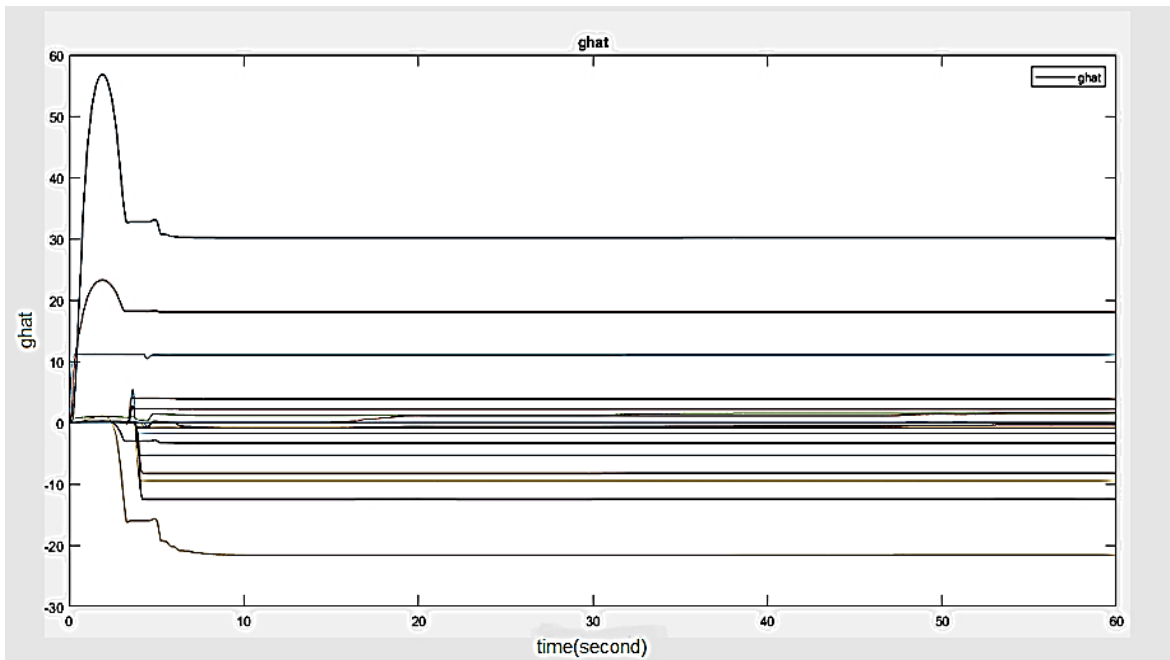
در ادامه با چند ورودی مختلف و در نظر گرفتن اغتشاشات مختلف نتایج را مشاهده می کنیم.



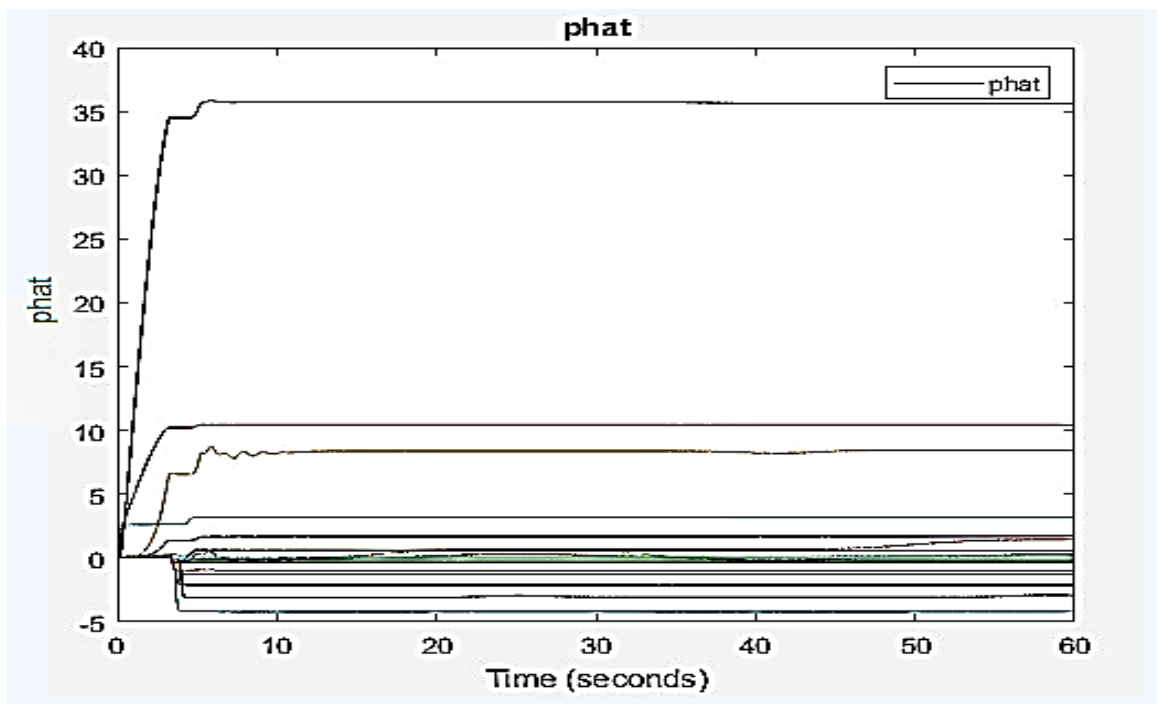
شکل ۴-۷: $y=6\sin(0.06\pi t)$ با اغتشاش ۱٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه



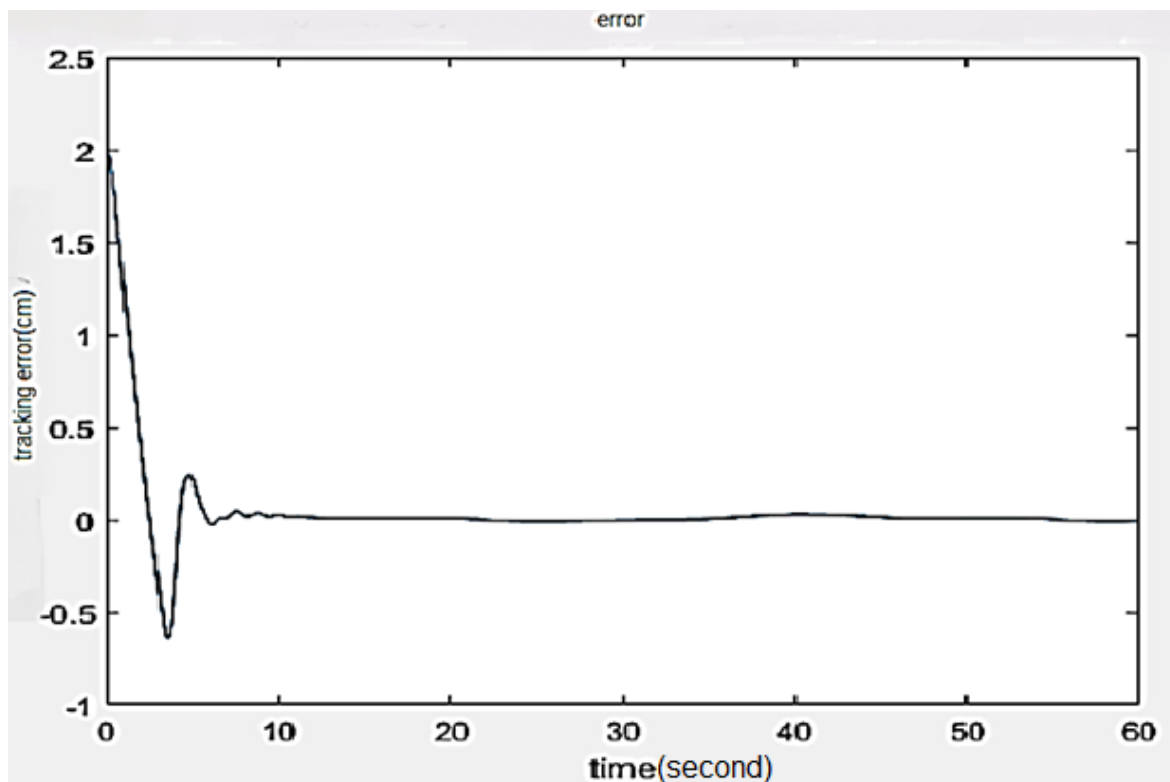
شکل ۴-۸: سیگنال کنترل تولید شده برای ردیابی مسیر



شکل ۴-۹: تنظیم پارامترهای ghat در طول زمان اجرای شبیه سازی

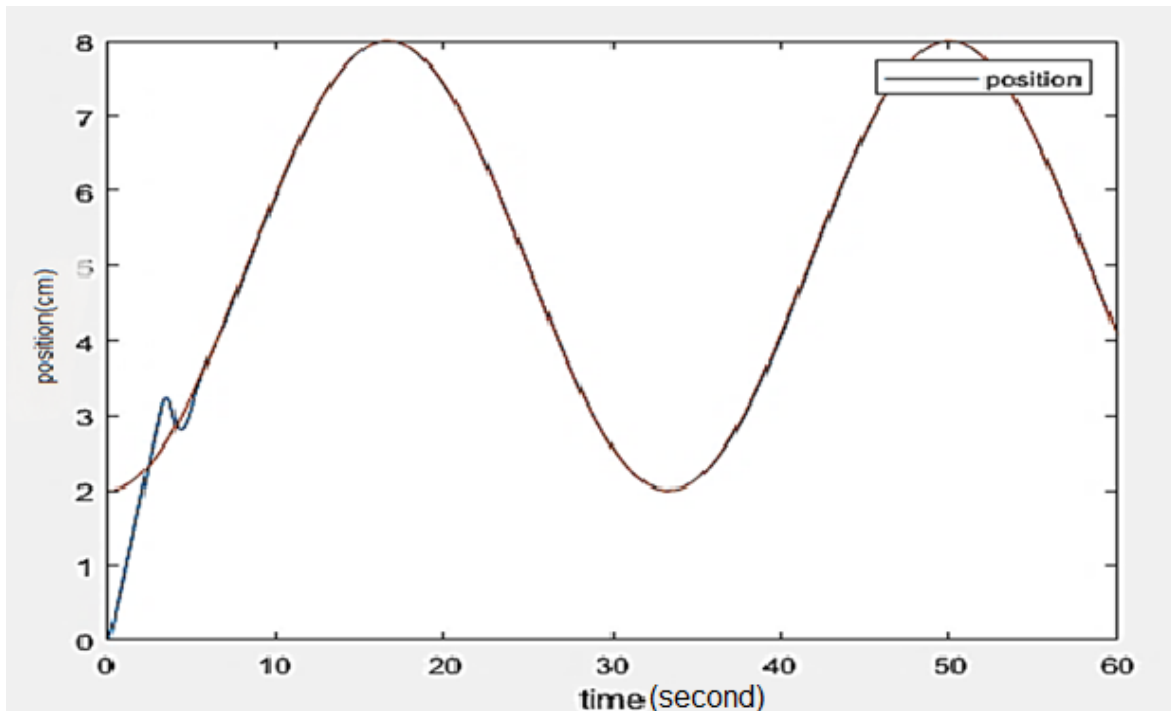


شکل ۴-۱۰: تنظیم پارامترهای phat در طول اجرای شبیه سازی

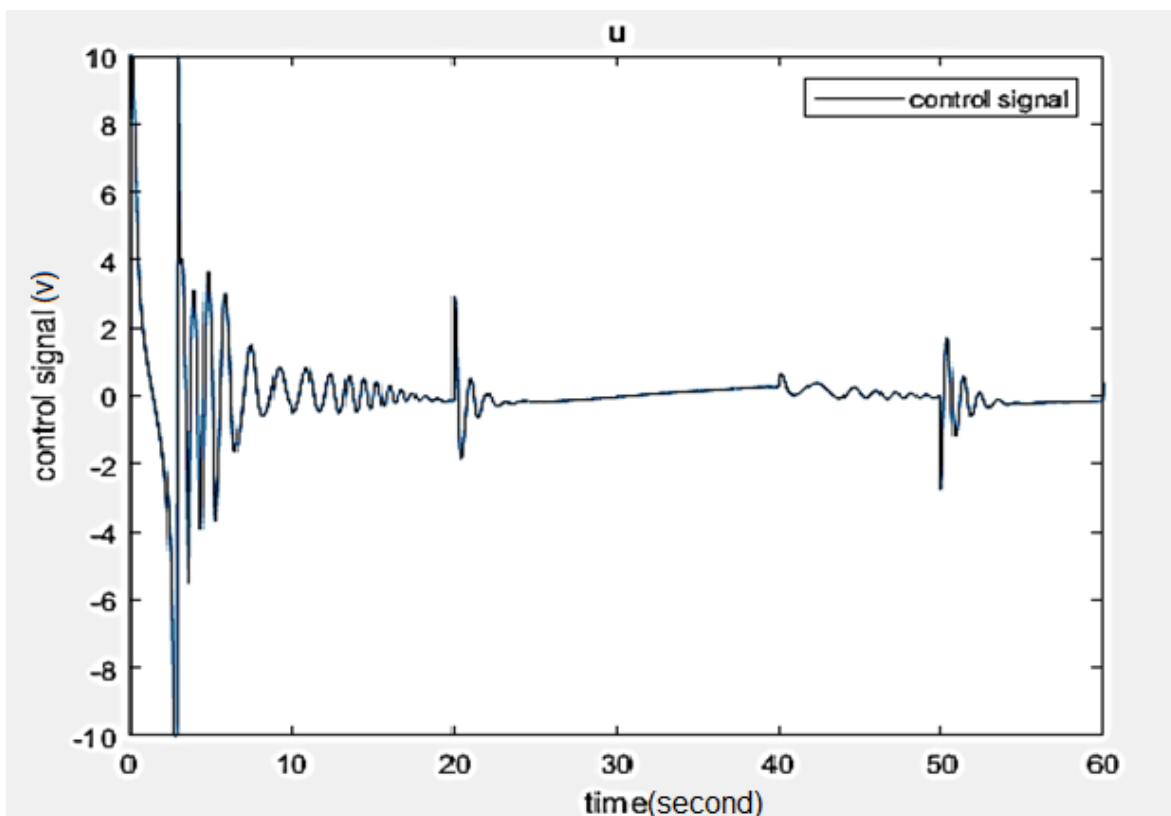


شکل ۴-۱۱: خطای ردیابی سیستم به وسیله کنترل فازی تطبیقی غیر مستقیم

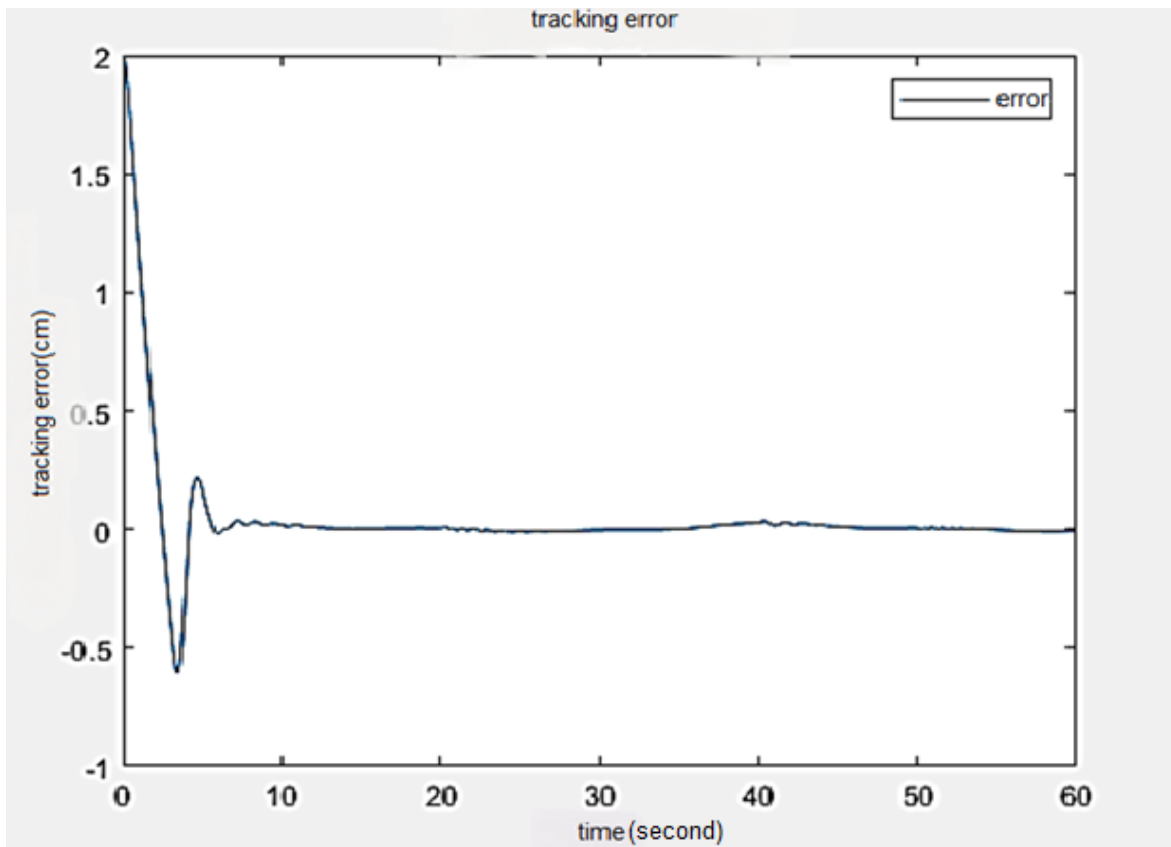
همانطور که مشاهده کردید ردیابی تابع سینوسی به خوبی انجام شده است. تغییرات ناگهانی در سیگنال کنترل اثر اغتشاش را نشان می‌دهد که به صورت اعداد تصادفی یکنواخت می‌باشد که هر ده ثانیه یکبار تغییر می‌کند. که نشان می‌دهد سیستم در برابر تغییر بار مقاوم است. خطای اولیه در ردگیری وابسته به موقعیت اولیه است که برای جک در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب، پارامترهای طراحی سیستم کنترل به روش سعی و خطا تنظیم شده است. بنابراین ممکن است بتوان پاسخ بهتر و دقیق‌تر نیز به دست آورد.



شکل ۴-۱۲: $y=6\sin(0.06\pi t)$ با اغتشاش ۱۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه

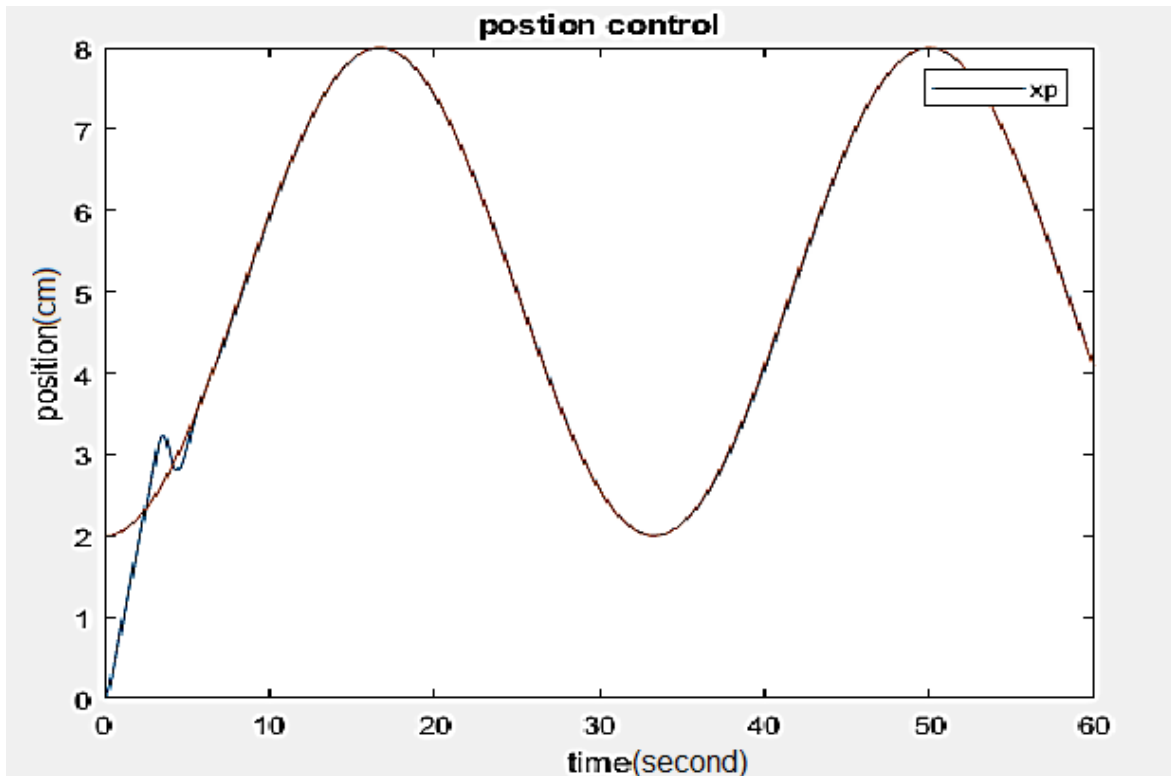


شکل ۴-۱۳: سیگنال کنترل برای ردیابی مسیر

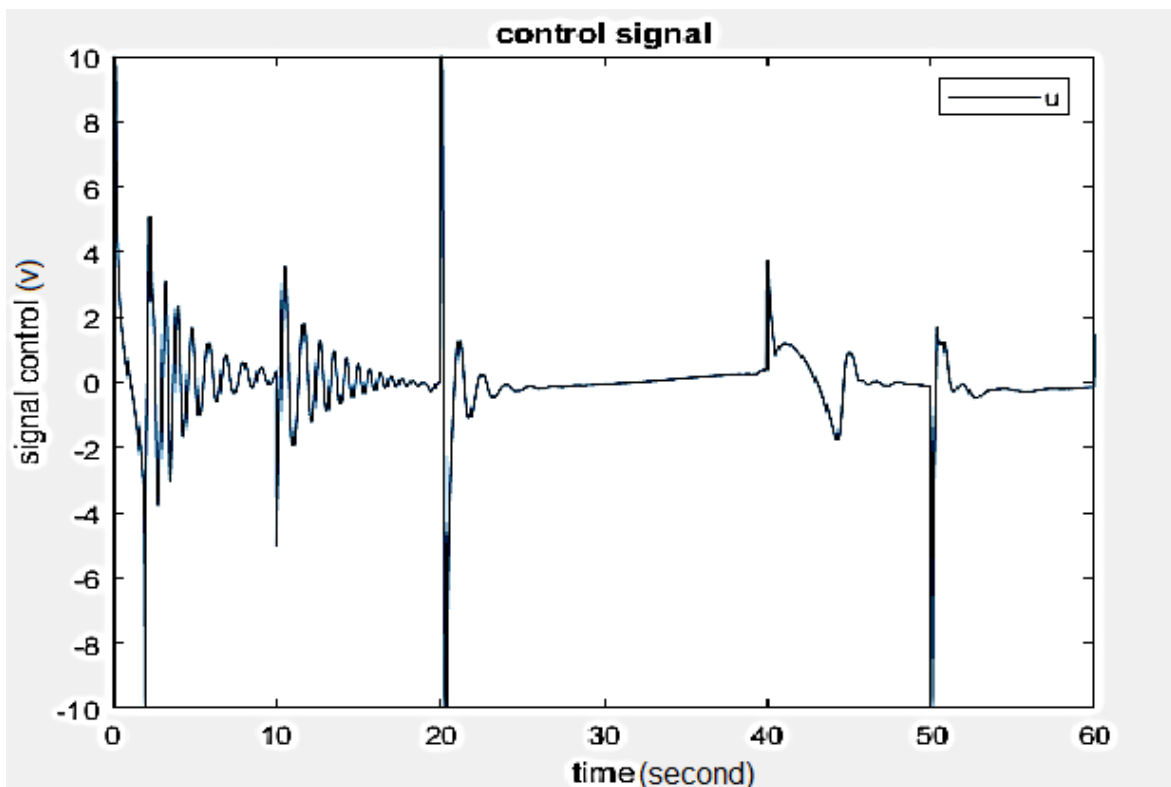


شکل ۴-۱۴: خطای سیستم

همان طور که در نمودار خطا مشخص است در زمان‌هایی که اغتشاش وارد می‌شود، کمی خطای سیستم بالا رفته و مجدداً به سمت صفر میل می‌کند. البته تاثیر اغتشاش را می‌توان به وضوح در سیگنال کنترل دید. هنگامی که اعداد تصادفی پیوسته که هر ده ثانیه یک‌بار تغییر می‌کنند به سیستم اعمال می‌شود سیگنال کنترل به یکباره شروع به نوسان کرده تا تاثیرات این اغتشاش از بین برود و سیستم بتواند نسبت به این اغتشاش خارجی مقاوم باشد. در مرحله بعدی ورودی قبلی به سیستم اعمال می‌شود ولی اغتشاش ۵۰٪ به سیستم اعمال می‌شود.

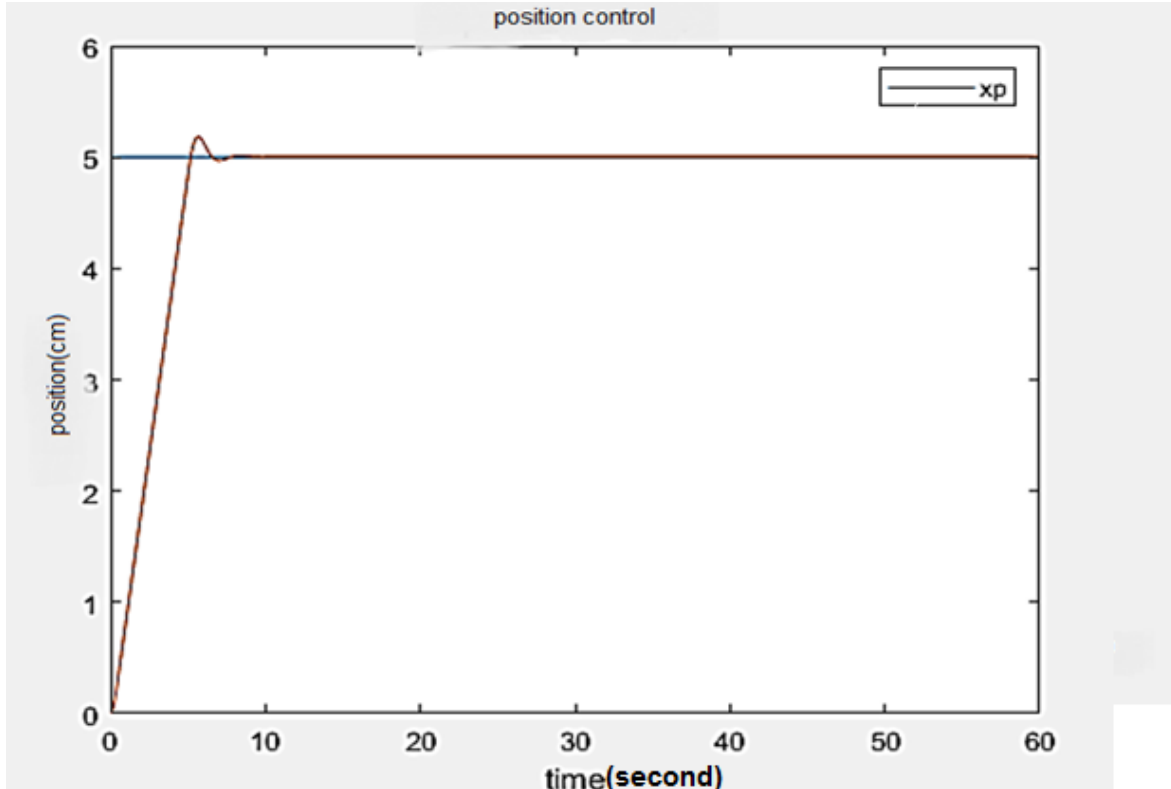


شکل ۴-۱۵: $y=6\sin(0.06\pi t)$ همراه با اغتشاش ۵۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه

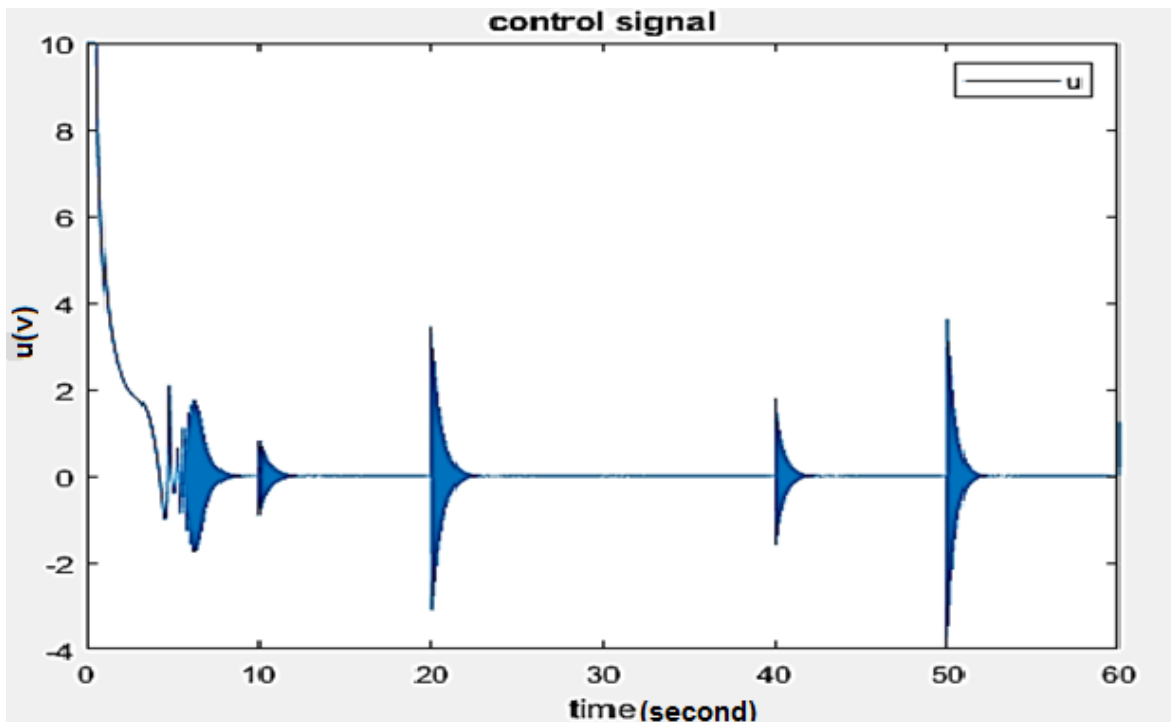


شکل ۴-۱۶: سیگنال کنترل ردیابی

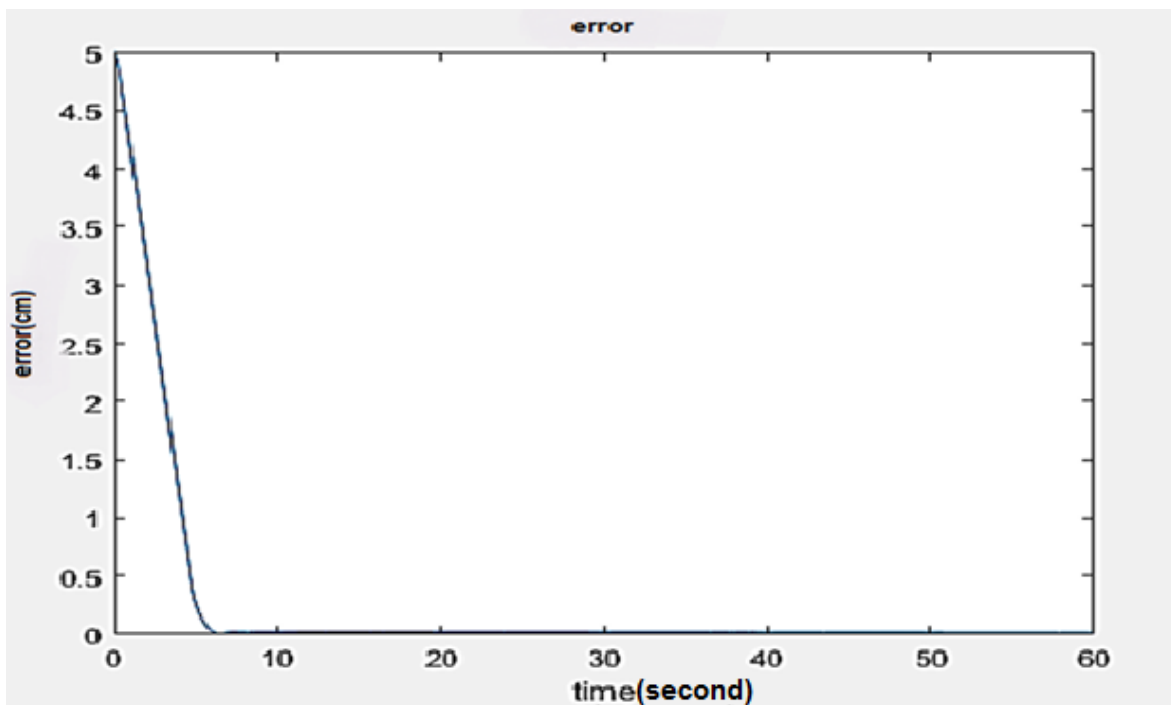
با اغتشاش ۵۰٪ تأثیر آن در خطای سیستم و سیگنال کنترل کاملاً مشهود می‌باشد و هنگام تغییر بار روی سیستم برای لحظاتی خطای ردیابی افزایش پیدا کرده سپس به سمت صفر میل می‌کند. این امر نشان از آن دارد که سیستم نسبت به این تغییر بار نیز مقاوم است و ردیابی را به درستی انجام می‌دهد. ورودی بعدی که به سیستم اعمال می‌شود ورودی پله خواهد بود. این ورودی را با دو اغتشاش ۱٪ و ۵۰٪ مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۴-۱۷: $y=5\text{cm}$ همراه با اغتشاش ۱۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه

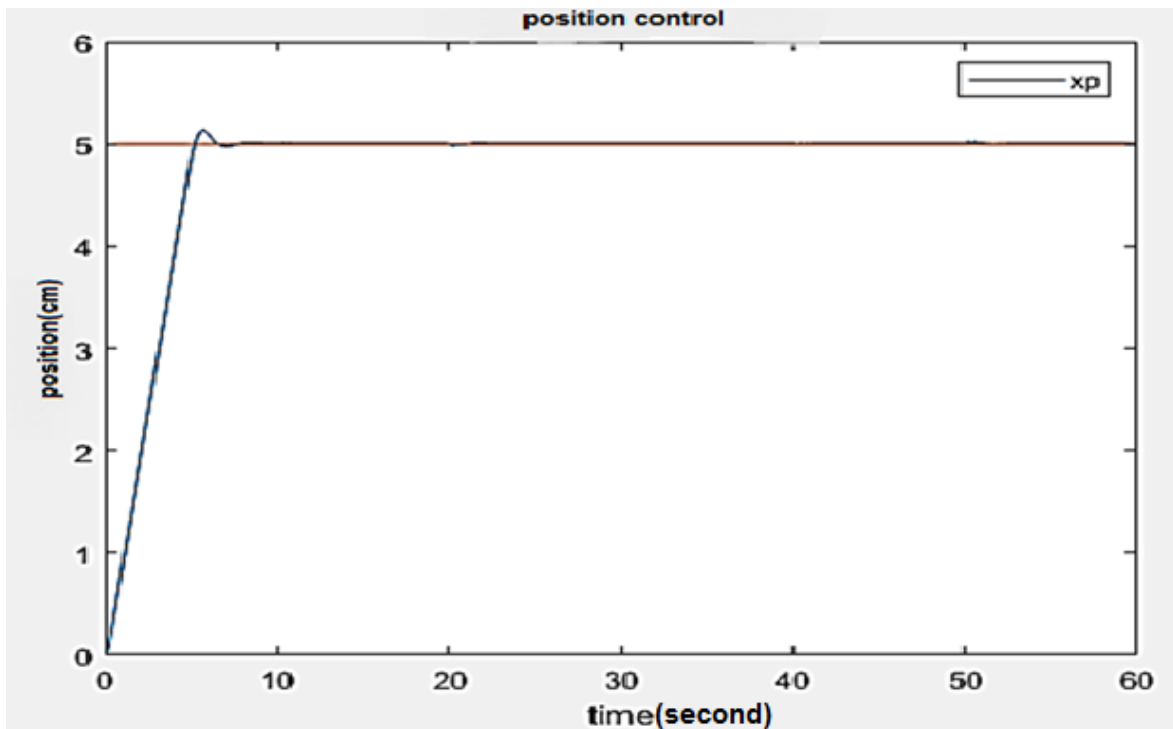


شکل ۴-۱۸: سیگنال کنترل

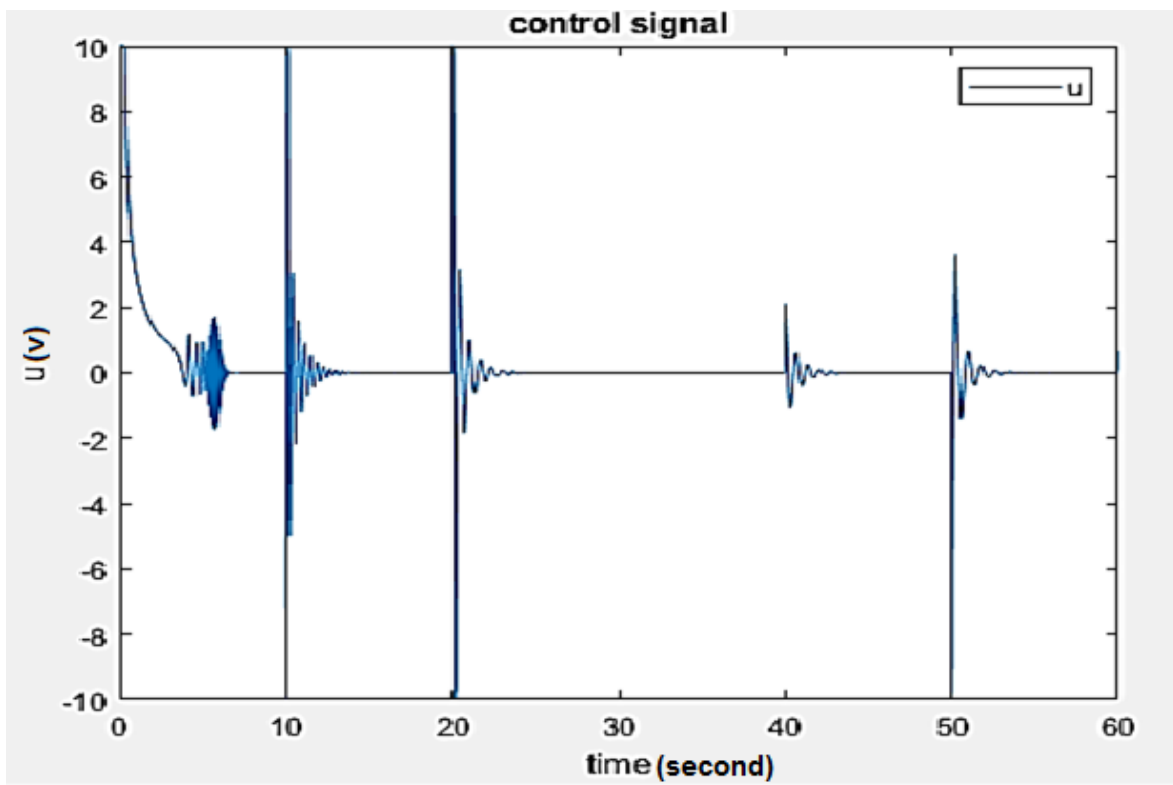


شکل ۴-۱۹: خطای ردیابی موقعیت

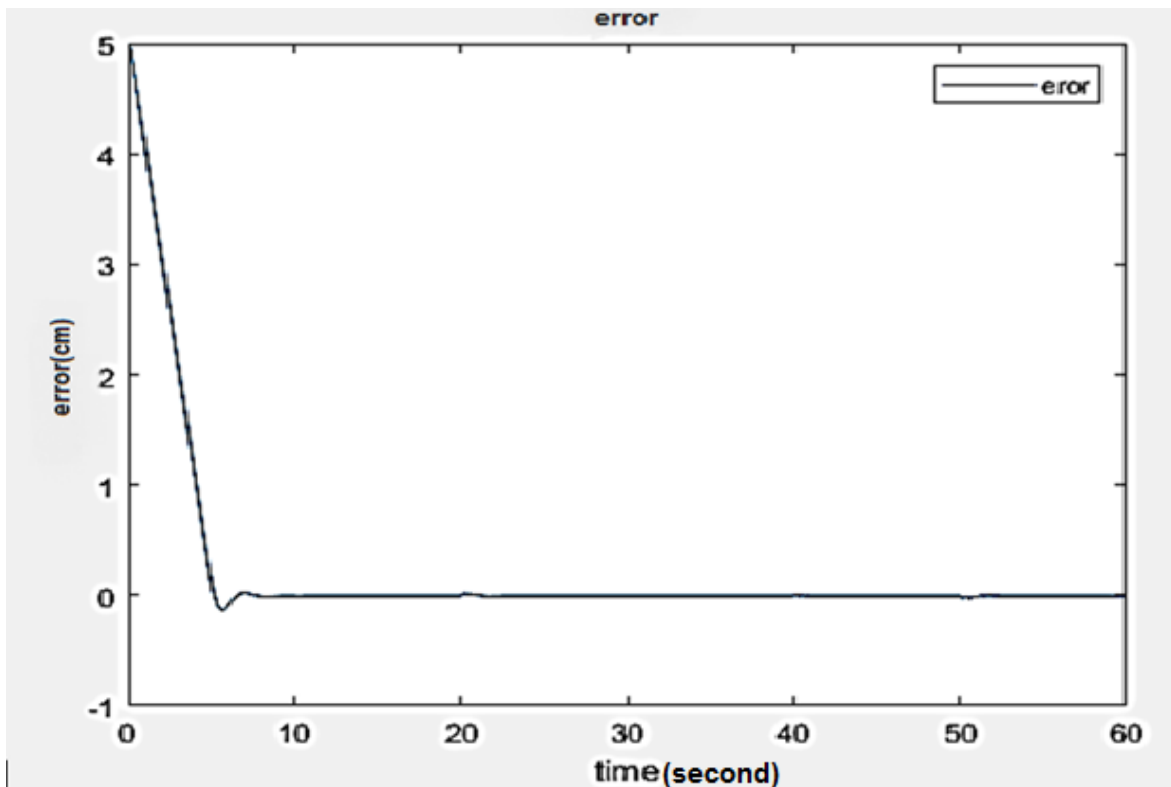
همانند ورودی قبلی سیستم به خوبی ردیابی موقعیت را انجام داده است. اغتشاش یک در صدی نیز تأثیری در روند ردیابی نداشته است. البته این اغتشاش باعث ایجاد نوسانات شدیدی در سیگنال کنترل شده است.



شکل ۴-۲۰: $y=5\text{cm}$ همراه با اغتشاش ۵۰٪

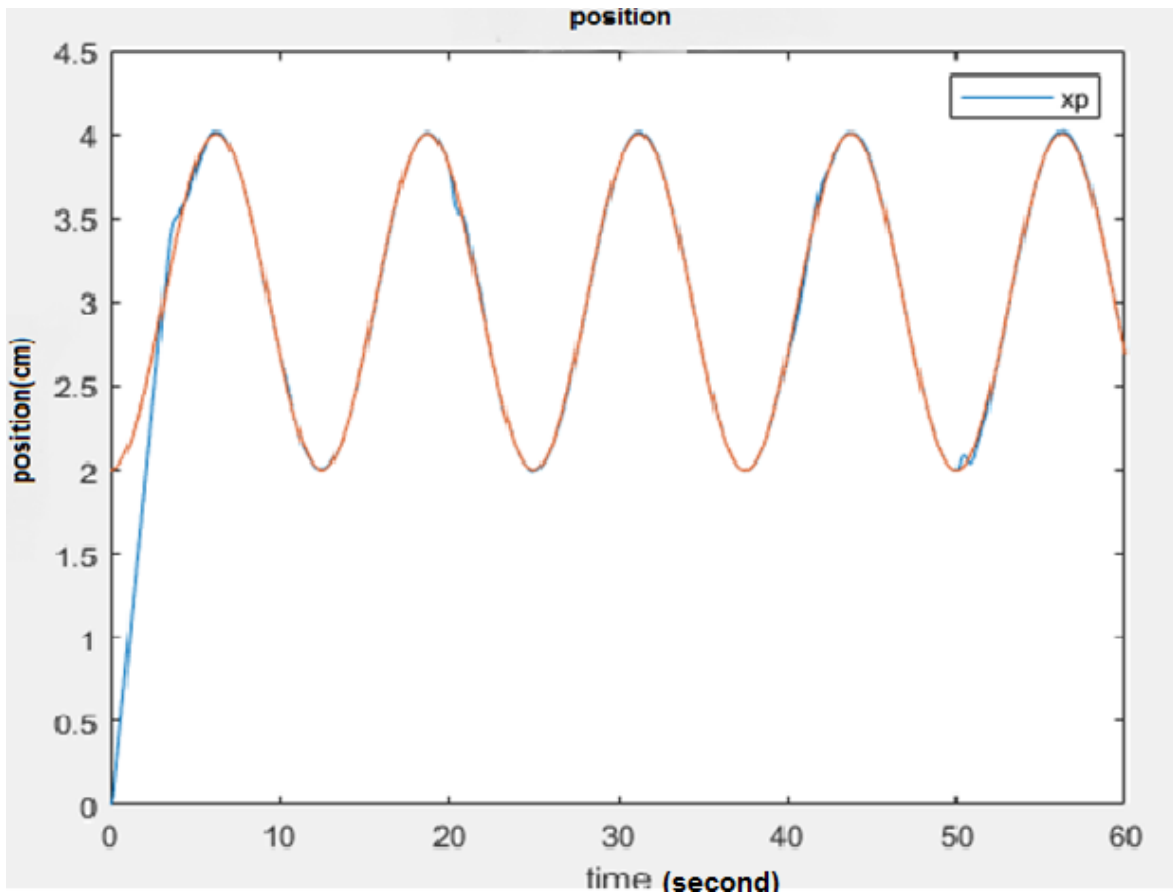


شکل ۴-۲۱: سیگنال خروجی از کنترل کننده

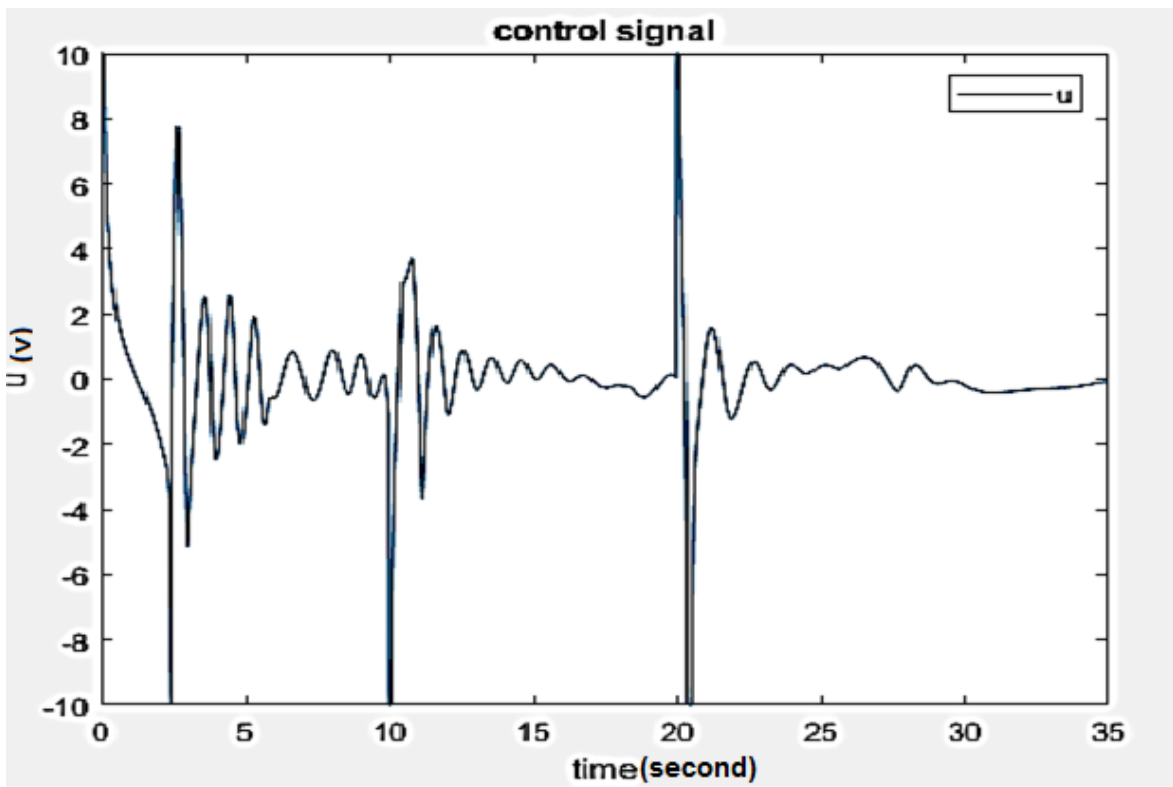


شکل ۴-۲۲: خطای ردیابی سیستم همراه با اغتشاش ۵۰٪

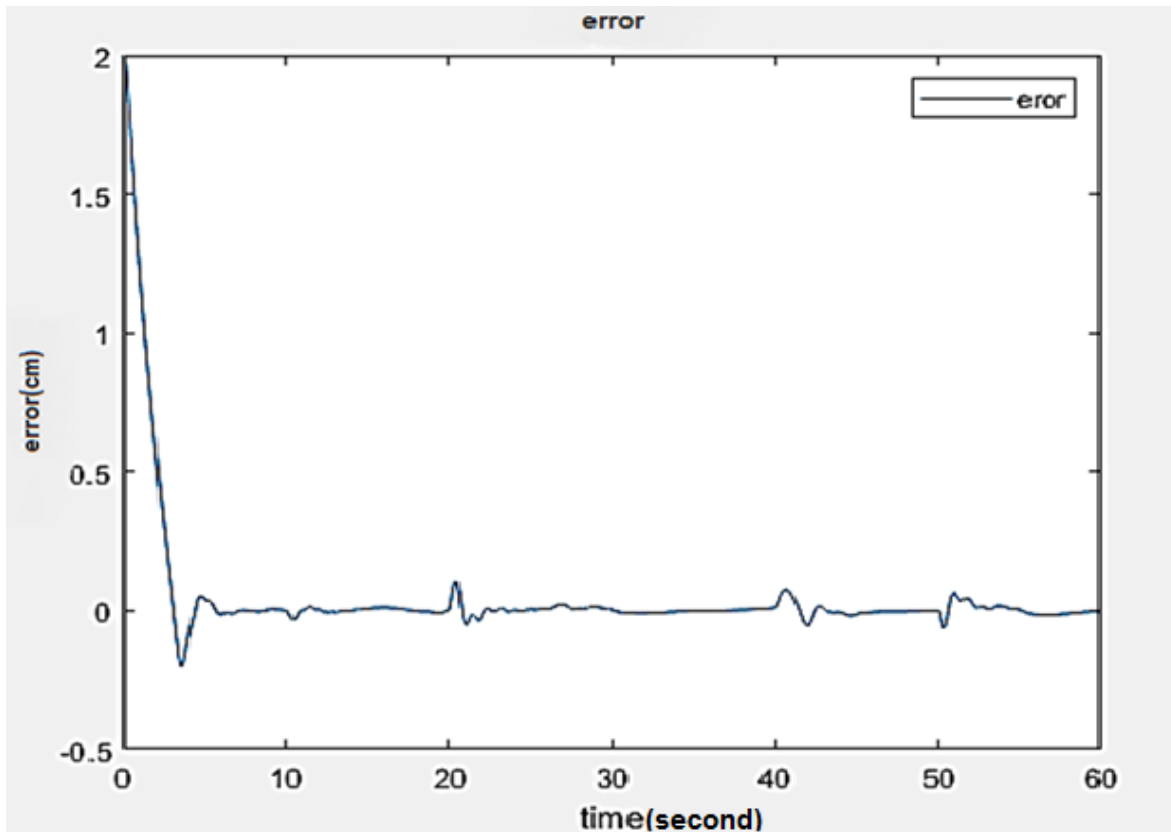
همانند ورودی قبلی در مورد این ورودی نیز اثر تغییرات ۵۰٪ بار را می‌توان در سیگنال کنترل و ردیابی موقعیت مشاهده کرد. البته سیستم با ارسال سیگنالهای کنترل سریع اثر اغتشاش را برطرف کرده و نسبت به آن مقاوم است. ورودی بعدی که به عنوان ورودی آخر مطرح شده در گزارش می‌باشد. سیگنال سینوسی با دامنه ۴ سانتی‌متر و فرکانس 0.16π با اغتشاش ۵۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه می‌باشد. در مورد این سیگنال نیز حذف اثر خارجی به خوبی صورت گرفته و سیستم نسبت به این تغییرات مقاوم می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در ردیابی پاسخ پله، به جز لحظات ابتدایی و لحظاتی که اغتشاش به سیستم وارد می‌شود، خروجی کنترلر ۰ می‌باشد. علت این موضوع آن است که هنگام ورود اغتشاش موقعیت سیستم از مسیر تعیین شده خارج خواهد شد، پس سیستم به ناچار با ارسال سیگنال‌هایی سیستم را به حالت تعادل در خواهد آورد. در این لحظه برای برقراری این تعادل با ارسال سیگنال‌هایی هوا با همان فشار لحظه‌ای قبل در دو محفظه‌ی سیلندر محبوس خواهد شد و سیستم در حالت تعادل خواهد ماند. البته این حالت تنها در تئوری مسئله قابل قبول است و در عمل به دلیل نشتی‌هایی که وجود دارد این حالت صادق نیست.



شکل ۴-۲۳: $y=4\sin(0.167\pi t)$ با اغتشاش ۵۰٪ و ثابت زمانی ۱۰ ثانیه



شکل ۴-۲۴: سیگنال کنترل مرتبط با ورودی مطرح شده



شکل ۴-۲۵: خطای ردیابی موقعیت

۴-۳- سیستم آزمایشگاهی

در این بخش از پایان نامه به معرفی سیستم آزمایشگاهی و تمامی وسایل مورد استفاده در آن می پردازیم. سیستم مورد نظر از یک جک پنوماتیک ساخت شرکت festo با طول کورس ۱۰۰mm و قطر پیستون ۳۲mm، یک شیر کنترل جریان ۵/۳ ساخت شرکت festo برای کنترل جریان و جهت آن، مبدل تبدیل ولتاژ به جریان و پتانسیومتر خطی با طول کورس ۱۰۰ میلی متر و دقت اندازه گیری ۰.۰۵ میلی متر برای اندازه گیری موقعیت پیستون سیلندر استفاده شده است.



شکل ۴-۲۶: تصویر سیلندر نیوماتیک استفاده شده در سیستم

یک کامپیوتر به عنوان کنترل کننده و یک کارت واسط I/O ساخت شرکت Advantech جهت برقراری ارتباط با شیرها و سنسورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های اندازه‌گیری شده (خروجی سنسور) از طریق ورودی‌های آنالوگ به کامپیوتر ارسال شده و در محیط simulink نرم‌افزار Matlab پردازش می‌شوند. همچنین در این محیط مقادیر مرجع تعیین شده و قوانین کنترلی برنامه‌نویسی می‌شوند. بدین ترتیب سیگنال کنترلی به صورت ولتاژی بین ۰ تا ۱۰ ولت در خروجی آنالوگ کارت دیتا قرار می‌گیرد. این سیگنال توسط یک مبدل ولتاژ به جریان به صورت جریان ۴ تا ۲۰ میلی آمپر به شیر کنترل جریان اعمال می‌شود. این مجموعه دارای یک منبع تغذیه 24v برای تغذیه شیر و مبدل و یک منبع تغذیه 10v برای سنسو موقعیت می‌باشد. در این طراحی از شیرهای سرونیوماتیک ۵/۳ استفاده شده است که شماتیک و ساختار

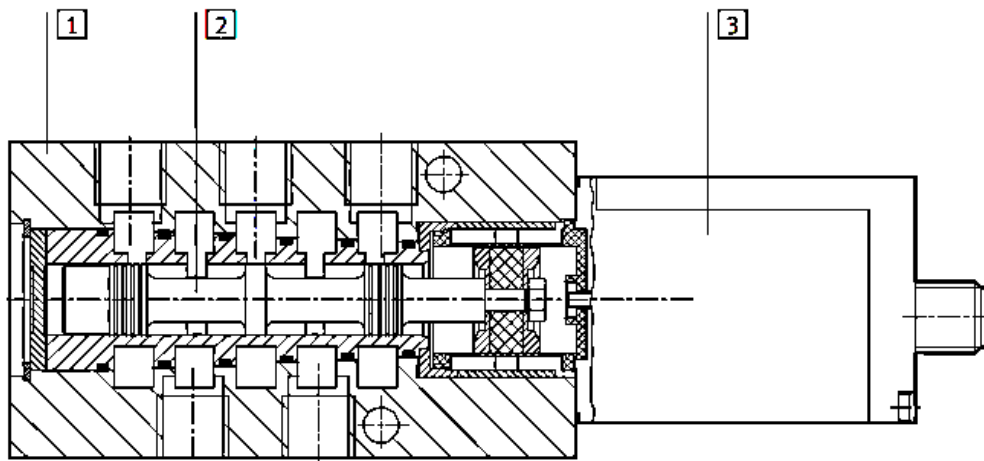
آن در ادامه نمایش داده شده است. دلیل استفاده از این نوع شیرها به جای استفاده از شیرهای on/off قابلیت‌های بیشتر این شیرها می‌باشد.

کنترل جریان و کنترل جهت هوا به صورت همزمان

کنترل سرعت عملگر بر اساس کنترل میزان جریان خروجی هوا

اثر نوسانات جریان هوا در این شیرها وجود ندارد.

بازشدن دریچه‌های خروجی شیر با توجه به میزان جریان مورد نیاز



شکل ۴-۲۷: ساختار داخلی شیر سرونوماتیک

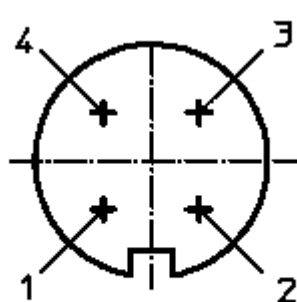
همانطور که در تصویر بالا مشاهده می‌شود شیر کنترلی از سه قسمت کلی تشکیل شده است که در زیر معرفی می‌شوند.

۱- بدنه آلومینیومی شیر

۲- اسپول آلومینیومی شیر

۳- بدنه قسمت الکترونیکی شیر

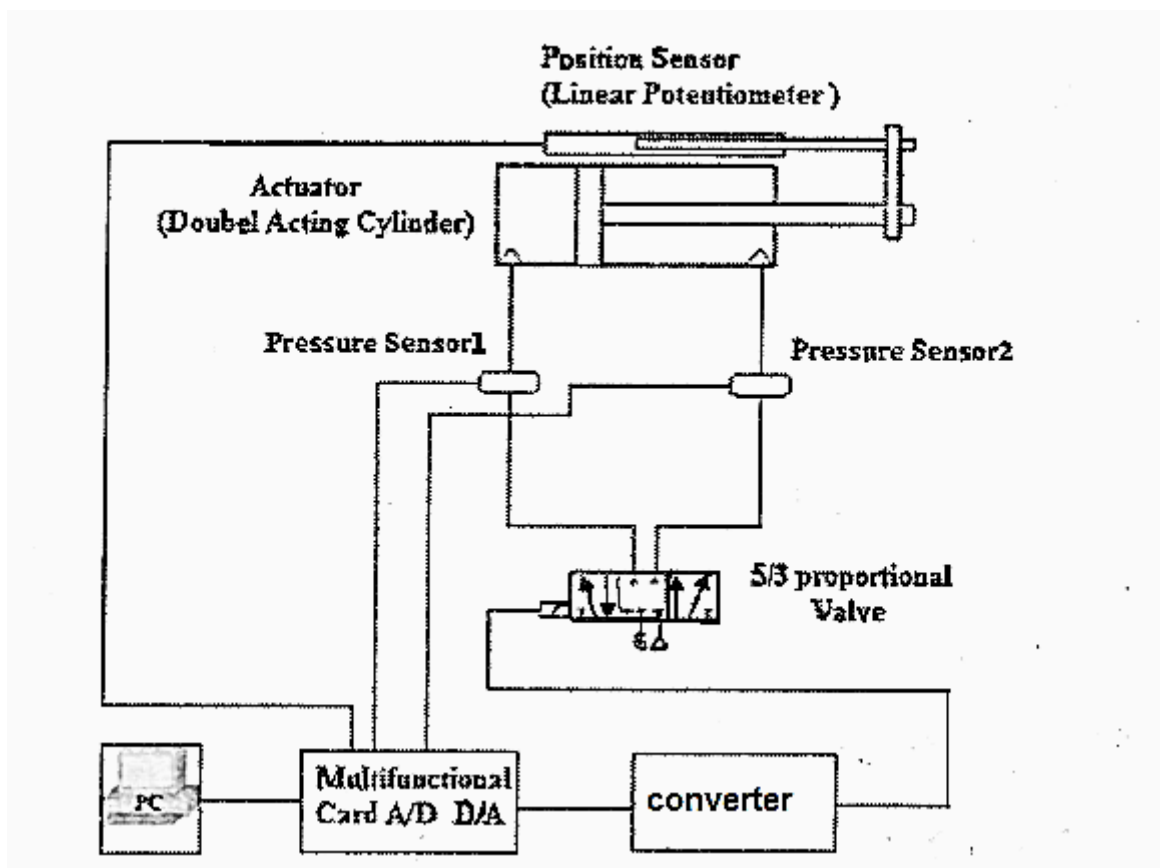
شیرهای مورد نظر سلونوئیدی می‌باشند. یعنی تحریک آن‌ها با سیگنال الکتریکی بوده است. در این نوع شیرها سیگنال الکتریکی محرک شیر از نوع جریان می‌باشد. اگر بخواهیم از کارت دیتا برای انتقال سیگنال به شیر استفاده کنیم، ناگزیر به تولید سیگنال کنترلی از نوع ولتاژ خواهیم بود. از این رو از یک مبدل جریان به ولتاژ در مسیر سیگنال کنترلی استفاده می‌کنیم.



- 1 24 V DC, supply voltage
- 2 GND
- 3 U_w/h_w , setpoint input
- 4 GND

شکل ۴-۲۸: نحوه اتصال پورت‌های شیر

این شیرها قابلیت کنترل دبی و کنترل جهت را به طور همزمان دارد، که در مسیر ورود و خروج محفظه‌های سیلندر استفاده می‌شود. کنترل جریان به نحوی انجام می‌شود که متناسب با سیگنال کنترلی میزان جریان خروجی از شیر تغییر می‌کند.



شکل ۴-۲۹: شماتیک سیستم نیوماتیک

کارت multifunction دارای ۱۶ ورودی آنالوگ ۱۲ بیتی است که سرعت ۱۰۰ کیلو نمونه بر ثانیه را دارد، همچنین دارای دو خروجی آنالوگ و ۳۲ ورودی خروجی دیجیتال می‌باشد. کارت‌های DAQ زیردسته

multifunction شرکت Advantech مصرف عمومی دارند. به عبارت دیگر شامل ورودی خروجی آنالوگ و دیجیتال می‌باشند که می‌توان به مدل‌های زیر اشاره کرد.

سری PCI-1710 از جمله کارت‌های چند منظوره برای PCI-BUS می‌باشند. طراحی مدار پیشرفته‌ی آن‌ها کیفیت بالاتر و عملکرد بهتری را نسبت به مبدل A/D ۱۲ بیتی، ورودی دیجیتال، خروجی دیجیتال، مبدل D/A ارائه می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمایی از کارت دیتا PCI-1710

کارت‌های نمونه برداری Digital و counters تنها شامل ورودی و خروجی دیجیتال و شمارنده می‌باشند. سری کارت‌های Analog نیز شامل ورودی خروجی‌های آنالوگ می‌باشند و ورودی خروجی دیجیتال در آن‌ها وجود ندارد.

جدول ۴-۱: معرفی قطعات مورد استفاده در سیستم

STANDARD NOMINAL FLOW RATE=350LIT/MIN	FESTO MPYE-5-1/8-LF-420-B	شیرکنترلی ۵/۳
Inside diameter:32mm Piston stroke:100mm Piston rod diametr:12mm	FESTO dsnu-32-100-ppv-A	سیلندر دوطرفه نیوماتیک
Infinite resolution Repeatability=0.01mm Independent linearity=0.05%	OPKON LPC 100D 5K	سنسور موقعیت
accuracy $\leq 0.05\%$ Rang 0-10bar Supply10-32VDC Sample time:0.01s	BCI-110-10B-VG4-S	سنسور فشار

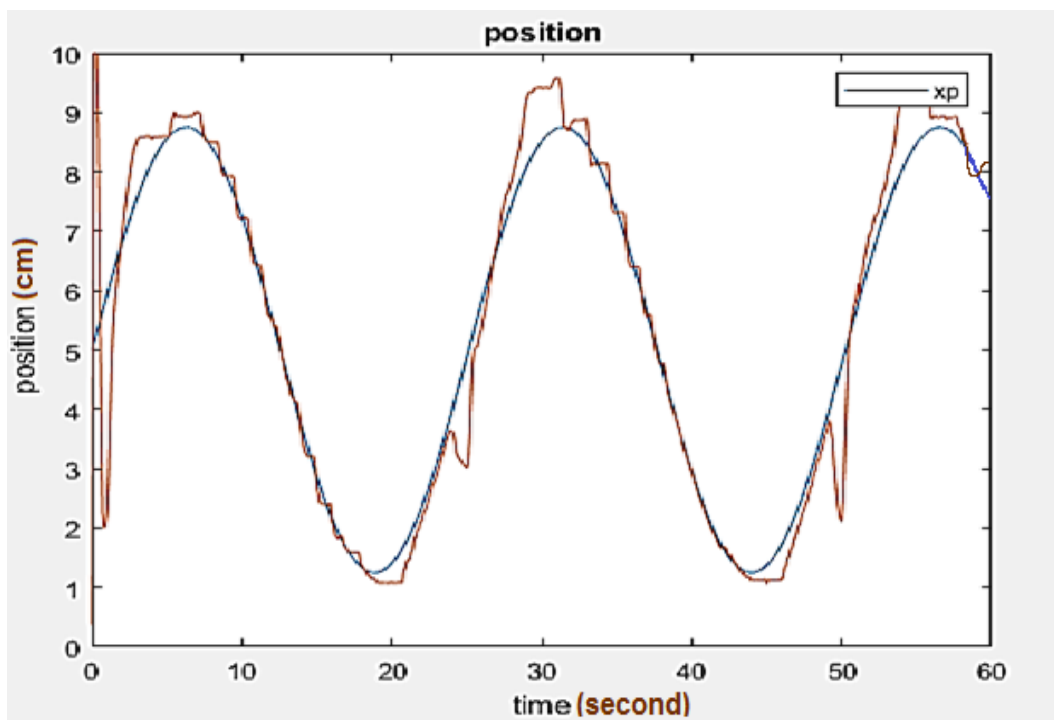
Resolution:12bit Linearity error:1LSB	Avdantech multifunction card PCI-1710HG	کارت اکتساب داده
Made in iran	V/I converter	مبدل ولتاژ به جریان ایزوله

۴-۴-۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملی و تحلیل آنها

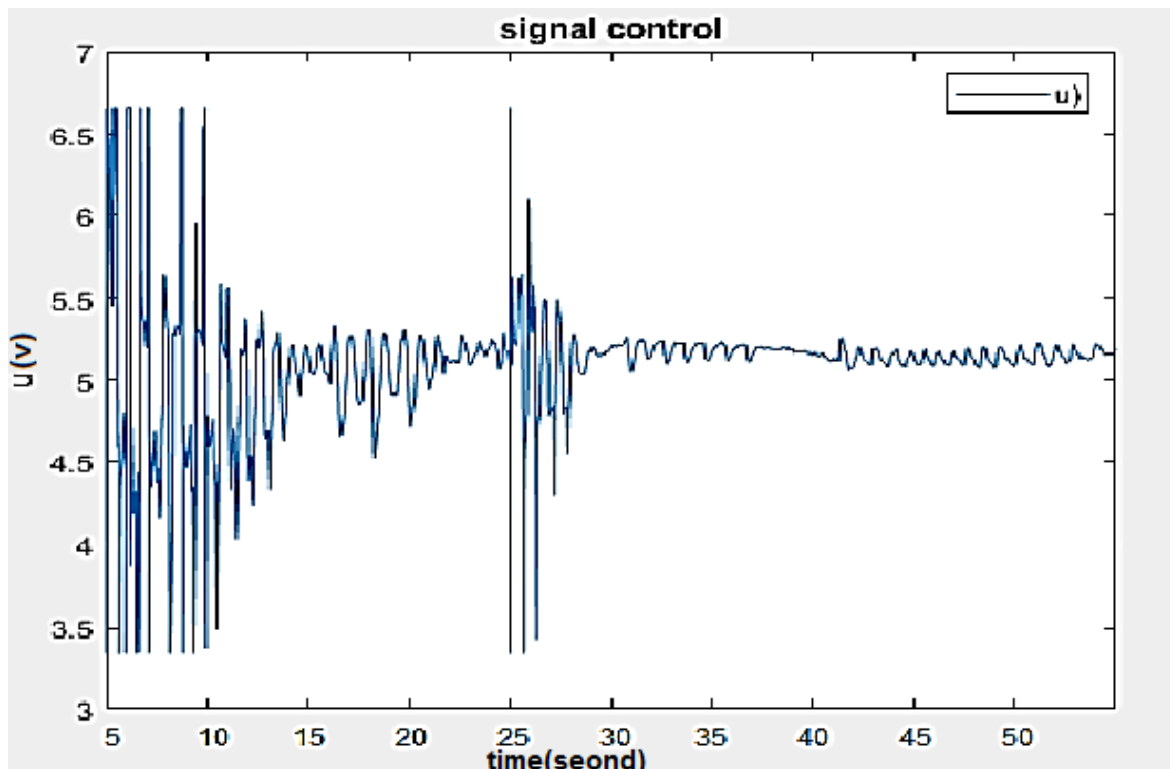
حال پس از طراحی کنترل‌کننده و تشریح چگونگی شبیه‌سازی، در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیان می‌شود. در هر بار اجرای برنامه، مسیر مطلوبی برای پیستون بین صفر تا ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته خواهد شد.

۴-۴-۴-۱- آزمایش اول: ورودی سینوسی

در گام نخست، ورودی سینوسی به عنوان موقعیت مطلوب به سیستم حلقه بسته اعمال می‌شود. ورودی سینوسی در دو حالت مختلف به سیستم اعمال می‌شود. حالت نخست، دامنه ۵ سانتی‌متر و با طول موج ۱۲/۵ ثانیه. در حالت دوم، دامنه ۳/۷۵ سانتی‌متر و طول موج ۲۵ ثانیه فرض شده است. موقعیت پیستون (به عنوان خروجی سیستم) حاصل شده از شبیه‌سازی و آزمایش عملی به ازای این دو ورودی به صورت زیر می‌باشد.

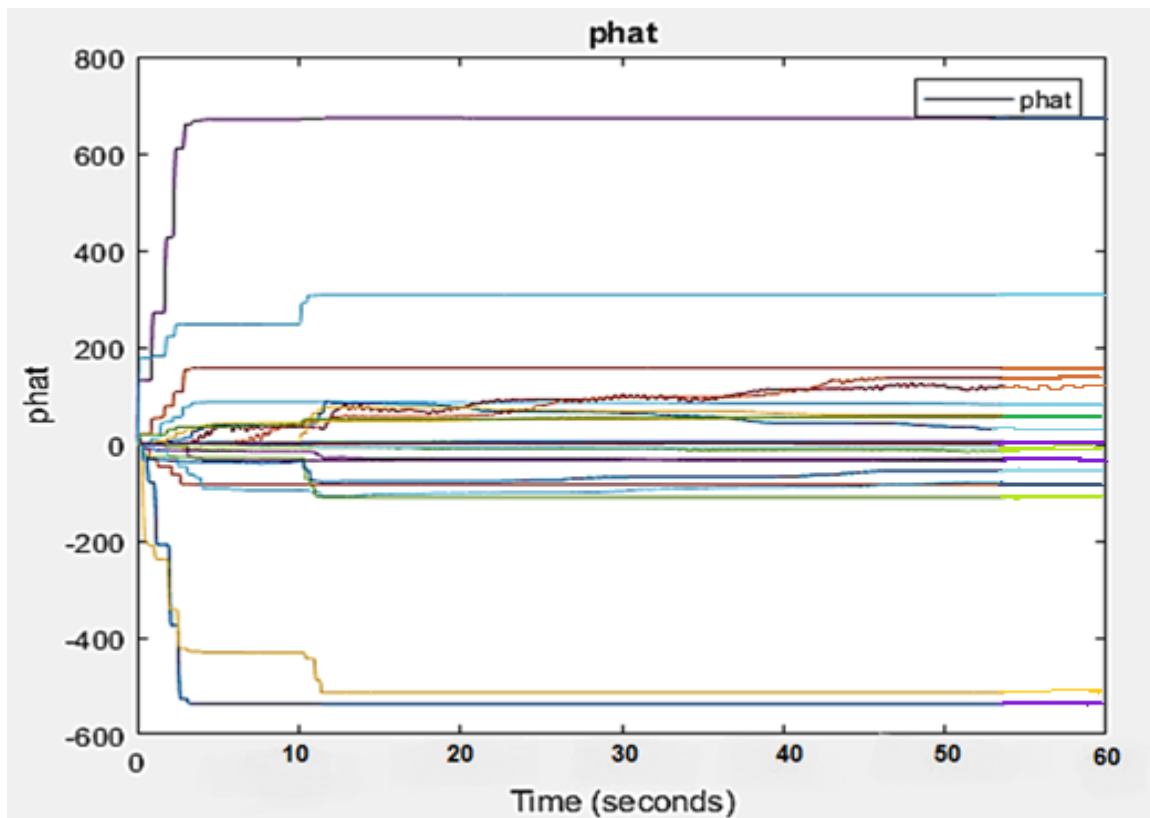


شکل ۴-۳۱: خروجی حاصل از ورودی سینوسی همراه با ورود اغتشاش ۵۰٪ در ۲۵ ثانیه

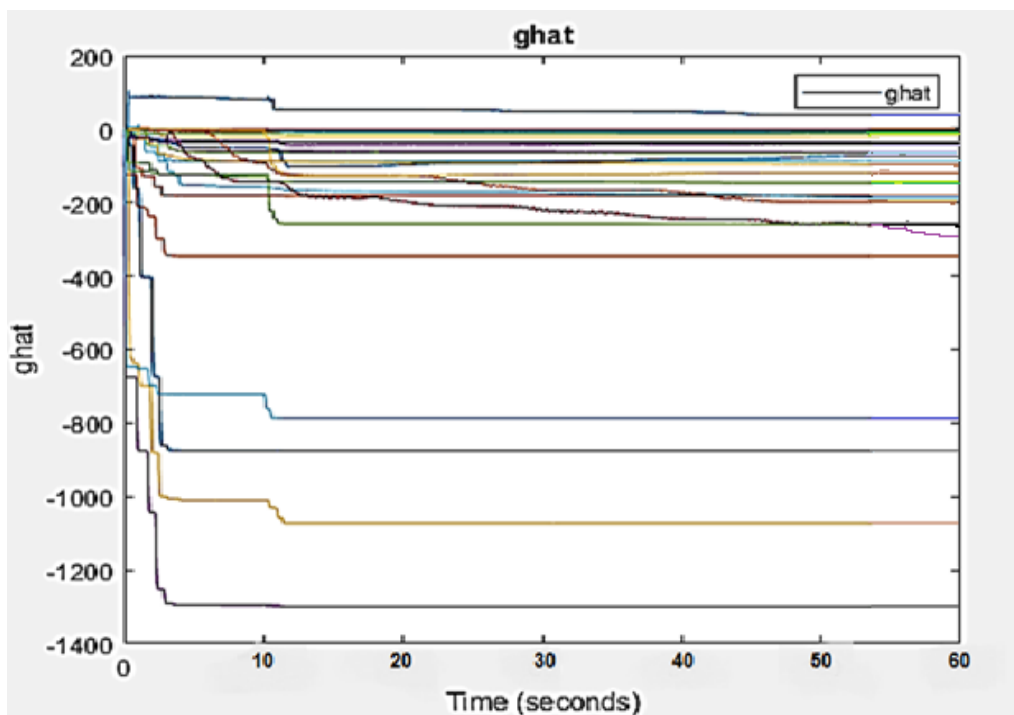


شکل ۴-۳۲: سیگنال کنترل مرتبط با ورودی مورد نظر

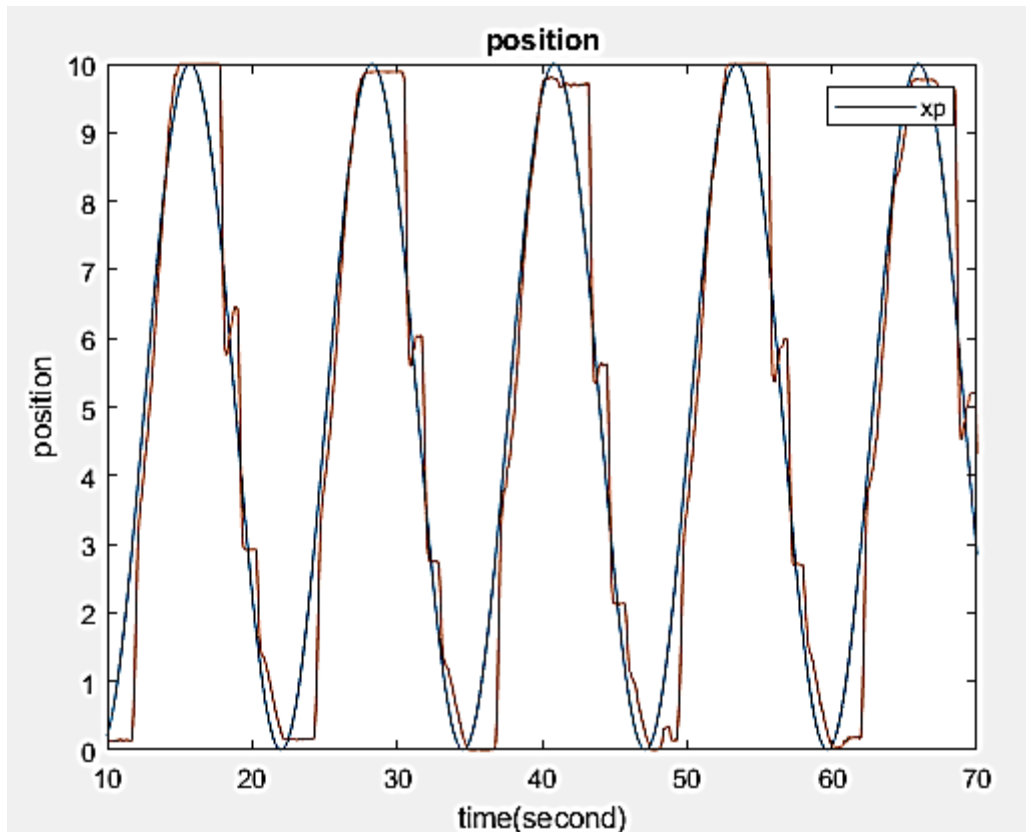
همانگونه که در شکل مشخص است، خروجی مورد نظر در فاز عملی با ریپل معقول، ورودی مطلوب را دنبال می‌کند. از آنجایی که ثبت نتایج آزمایشگاهی دارای مشکلاتی از قبیل نویز سیگنال دریافتی از پتانسیومتر، مشتق‌گیری از این سیگنال که باعث تشدید تاثیرات منفی نویز خواهد شد، در نظر نگرفتن مدل مبدل و تاخیر و خطای ناشی از استفاده از آن، مشکلات حاصل از کوپل شدن جک و پتانسیومتر که باعث بروز خطاهایی در سیستم خواهد شد، لذا داشتن چنین ریپلی در پاسخ دور از انتظار نخواهد بود. همچنین، طی دو مرحله به سیستم ذکر شده اغتشاش وارد می‌شود، اغتشاش اول در ثانیه ۲۵ و اغتشاش دیگر در ثانیه ۵۰ اعمال شده است که در این حالت نیز تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. به عبارتی، می‌توان گفت بار متغیر تاثیر چندانی در عملکرد سیستم نمی‌گذارد. البته تاثیر این اغتشاش ۵۰٪ را به خوبی می‌توان در سیگنال کنترلی مشاهده کرد. همانطور که در اشکال بالا مشخص است در ثانیه‌های اول به دلیل این که پارامترهای سیستم هنوز به درستی تنظیم نشده است، سیستم پاسخ منتسبی نداشته ولی بعد از تنظیم پارامترها ردیابی به درستی صورت گرفته است.



شکل ۴-۳۳: تنظیم پارامترهای phat



شکل ۴-۳۴: تنظیم پارامترهای ghat

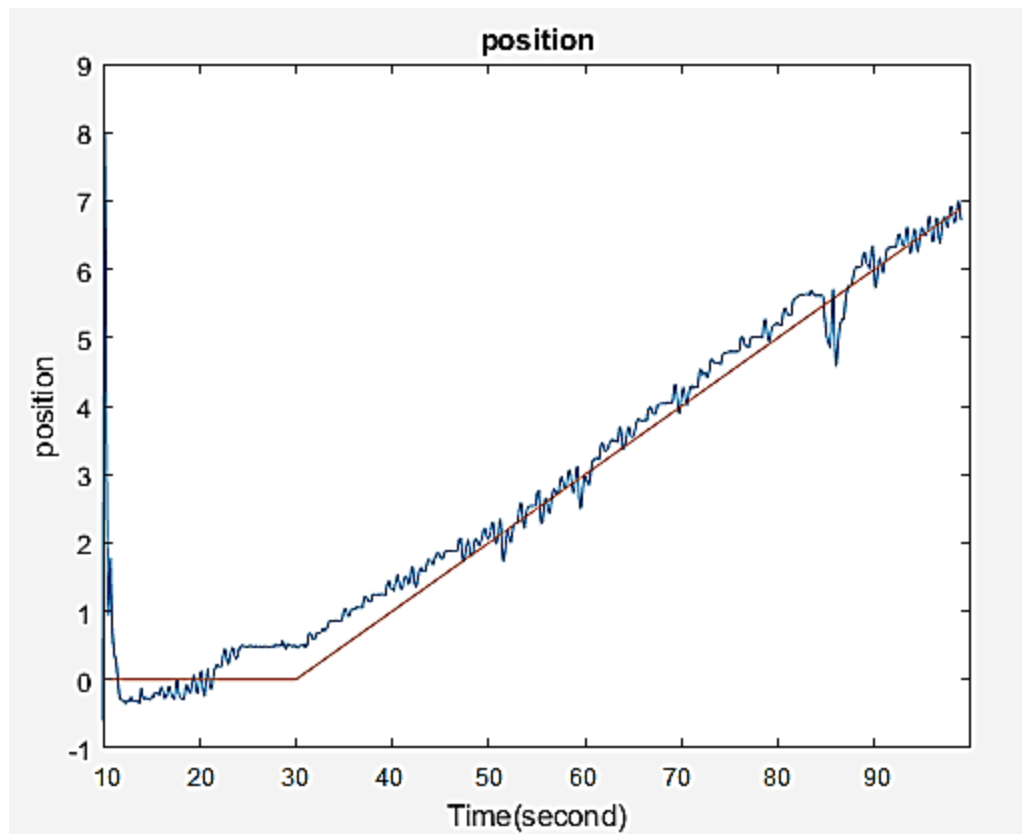


شکل ۴-۳۵: خروجی حاصل از ورودی سینوسی و اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۶۶

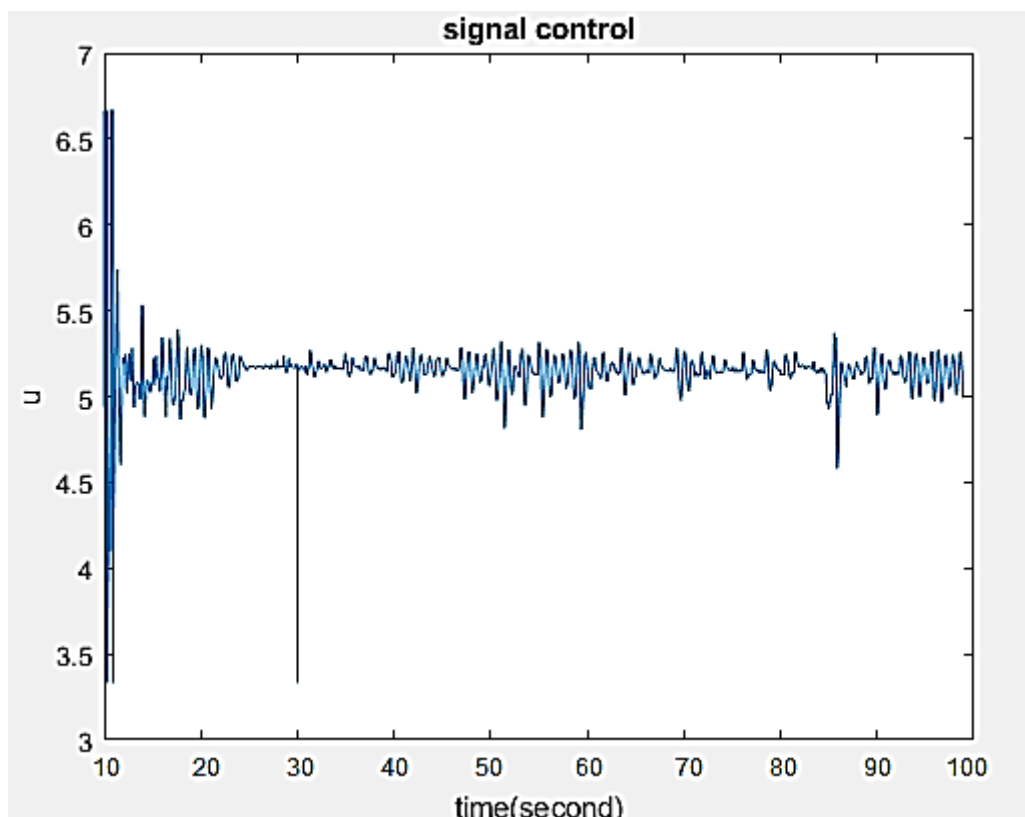
همان‌طور که در نمودار ردیابی مشخص است، ردیابی در سیستم به خوبی صورت گرفته است و سیستم در برابر اغتشاش وارد شده در ثانیه ۶۶ که تا پایان نیز بر سیستم وارد شده مقاوم است. البته در ثانیه ۲۷ و ثانیه ۴۵ اغتشاش ۱۰٪ و ۲۰٪ وارد شده است که تاثیر مشهودی بر ورودی نداشته است.

۴-۴-۲- آزمایش دوم: ورودی شیب

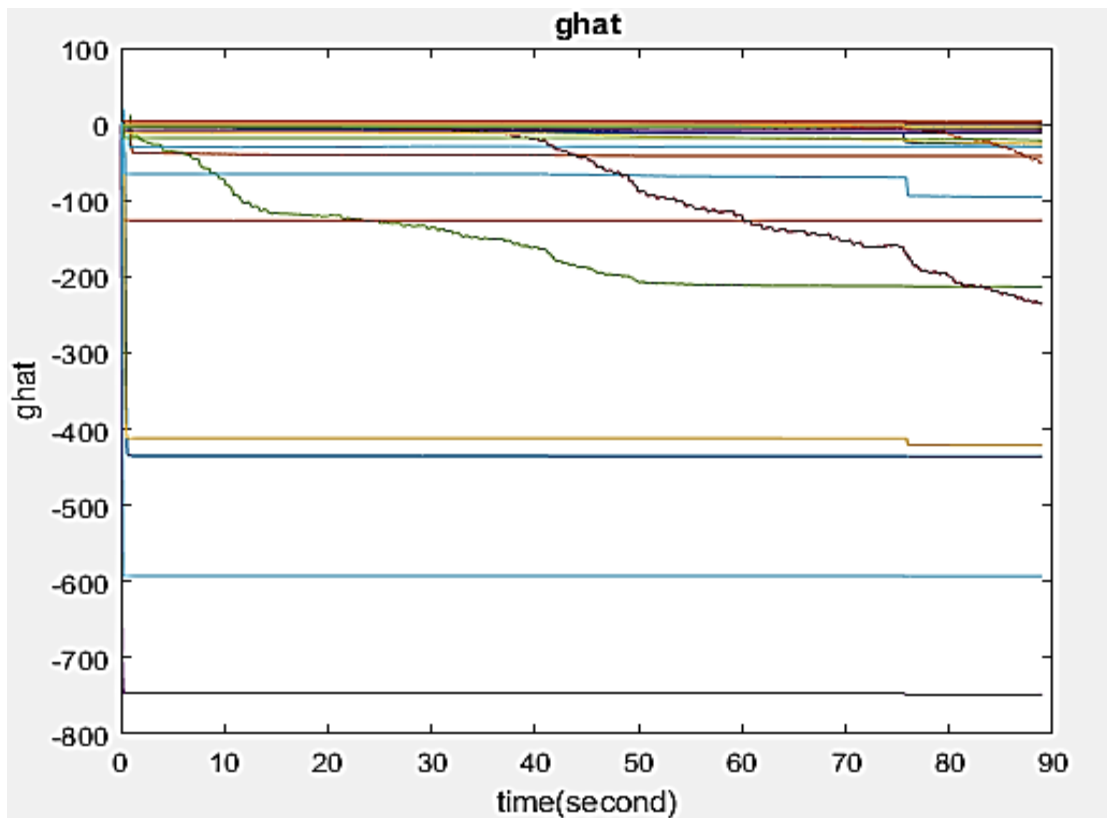
به عنوان ورودی مرجع بعدی از یک سیگنال شیب با شیب ۰.۲ استفاده شده است و در ثانیه ۸۵ به سیستم اغتشاش ۵۰٪ وارد شده است و تا پایان نیز این بار بر روی سیستم قرار دارد. همان‌طور که در اشکال مشخص است نمودارهای ردیابی موقعیت از ثانیه ۱۰ به بعد قرار داده شده‌اند. قبل از تنظیم پارامترها ردیابی به درستی صورت نمی‌گیرد و پاسخ سیستم با خطای زیاد مواجه است. البته راه حلی برای حل این مشکل وجود دارد و می‌توان تنظیم پارامترهای سیستم را به عنوان شرایط اولیه بلوک‌های انتگرال‌گیر که fhat و ghat را تولید می‌کند، قرار داده و از آن‌ها در مراحل بعدی به عنوان شرایط اولیه استفاده کنیم.



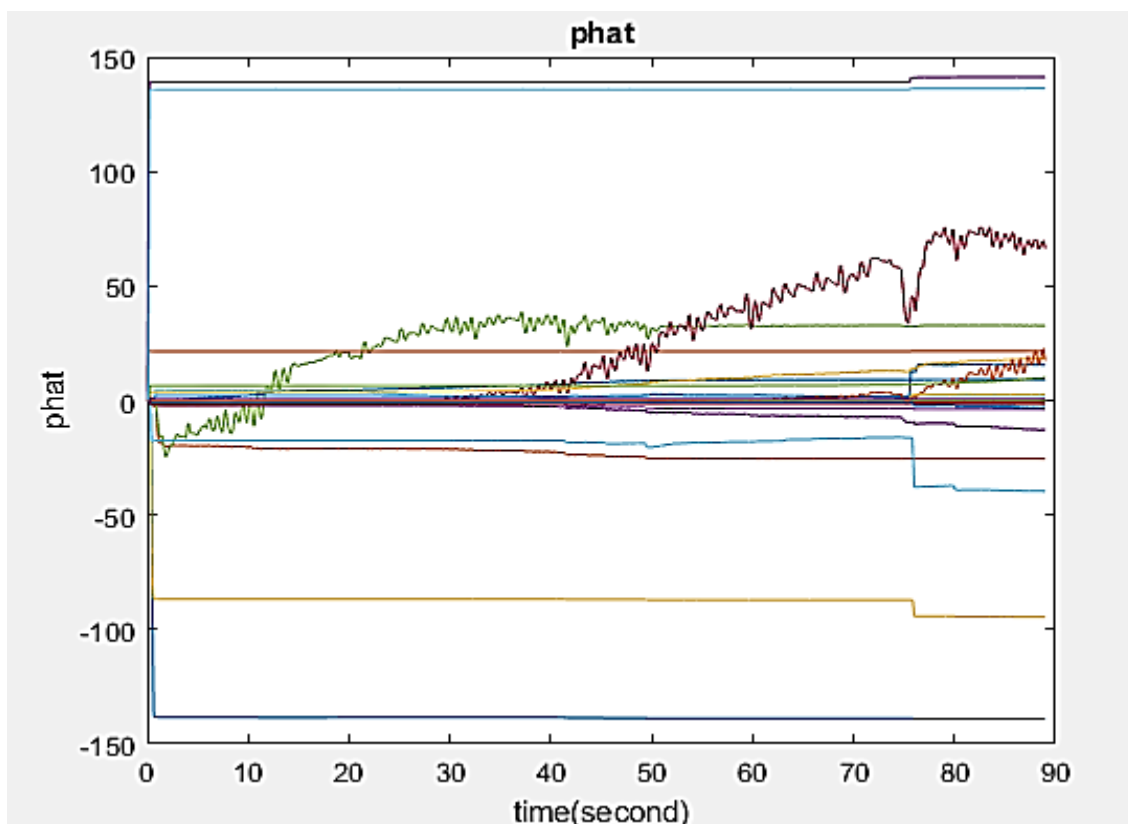
شکل ۴-۳۶: ورودی شیب با اعمال اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۸۵



شکل ۴-۳۷: سیگنال کنترل مربوط به ورودی شیب



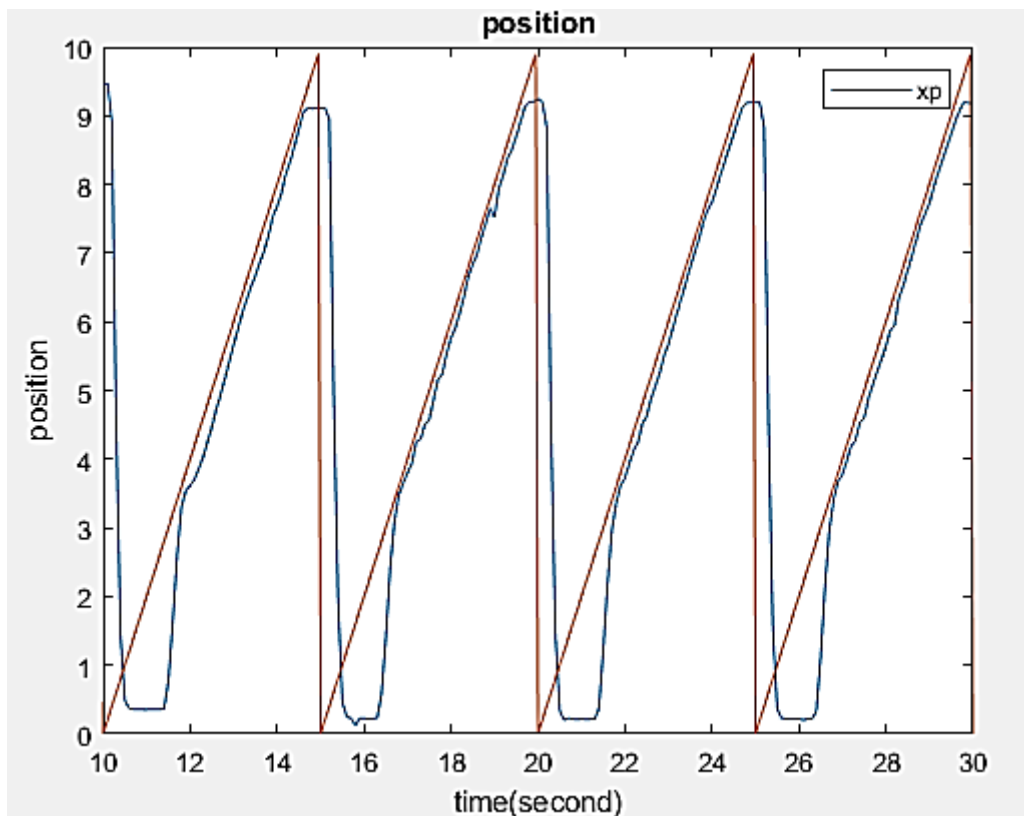
شکل ۴-۳۸: تنظیم پارامتر ghat



شکل ۴-۳۹: تنظیم پارامترهای ghat

۳-۴-۴- آزمایش سوم: ورودی دندان اره ای

به عنوان ورودی سوم از سیگنال دندان اره ای به عنوان ورودی سیستم استفاده می کنیم. همانطور که مشخص است ورودی دندان اره ای در هنگام بازگشت دارای شیب بی نهایت می باشد و سیستم آزمایشگاهی دارای تأخیر ذاتی و محدودیت در سرعت و شتاب می باشد. همچنین به سیستم در ثانیه ۱۹ اغتشاش ۵۰٪ وارد شده است که تا پایان بر روی سیستم قرار دارد.



شکل ۴-۴: پاسخ سیستم به ورودی پله همراه با اغتشاش ۵۰٪ در ثانیه ۱۹

۴-۵- تحلیل نتایج سیستم آزمایشگاهی

همانطور که می بینیم روش کنترل فازی تطبیقی دارای معایبی می باشد که بزرگترین آن ها برطرف نشدن ارتعاشات موجود در پیستون می باشد. همانطور که مشاهده کردیم ریپل در خروجی همواره وجود دارد. از جمله دلایل به وجود آمدن این ارتعاش می توان به: اصطکاک بین پیستون و سیلندر، باند مرده در فرایند کنترل به دلیل تراکم پذیری هوا و... اشاره کرد. البته دلیل دیگری که می توان به آن اشاره کرد این است که در فرایند کنترل در هر لحظه تنها یک سیگنال کنترل ساخته می شود، این بدان معناست که در هر لحظه تنها یکی از محفظه های سیلندر تحت کنترل می باشد. در این صورت زمانی که جک به سمت بالا در حرکت است، محفظه پایین سیلندر تحت کنترل می باشد و محفظه بالا به فشار اتمسفر متصل می باشد. حال مسیر

برگشت پیستون را در نظر بگیرید: محفظه بالای سیلندر تحت کنترل می‌باشد. این بدان معناست که فشار محفظه ی پایین با فشار اتمسفر برابر است. همراه شدن نیروی حاصل از فرمان بسته شدن، بار حدود 3kg موجود بر روی پیستون و وزن خود پیستون با هم هم‌جهت می‌شوند. همراه شدن این سه نیرو و باند مرده موجود در فرایند کنترل باعث شده است که سیستم در هنگام بسته شدن ریپل زیادی داشته باشد.

فصل پنجم:

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

۵-۱- جمع بندی

تا به اینجا، در دو فصل اول مقدماتی راجع به کلیت موضوع بیان شد. توانبخشی و ربات‌های توانبخش تا حد امکان شرح و بسط داده شد. از سیستم‌های نیوماتیک و مزایا و معایب آنها مطالبی بیان شد و این نتیجه حاصل شد که این سیستم‌ها علی‌رغم چند عیبی که دارند، مزیت‌های گوناگونی نیز دارند و استفاده از آنها چه از لحاظ کارکرد و چه از لحاظ اقتصادی معقولانه است. کنترل فازی تطبیقی، دیدگاه متفاوتی به کنترل اینگونه عملگرها می‌دهد. در این دیدگاه به بار خروجی به چشم اغتشاش نگاه می‌شود و سعی می‌شود تا سیستم در مواجهه با این تغییرات مقاوم بوده و بتواند ردیابی موقعیت را به درستی انجام دهد. از آنجایی که در پروژه حاضر، هدف کنترل فازی تطبیقی عملگر نیوماتیکی است، لذا در انتهای فصل شرح مختصری از آن بیان گردید.

با بیان این مقدمات، فصل سوم به مدل‌سازی و طرح ایده کنترلی اختصاص یافت. از آنجایی که لازمه کنترل، داشتن مدل دقیق ریاضی سیستم است، لذا در فصل سوم مدلی برای مجموع شیر و پیستون به عنوان سیستم مورد مطالعه فراهم شد. مدل بدست آمده بر اساس دبی عبوری بین شیر و پیستون است. سپس از روی مدل بدست آمده و ساز و کار کنترل فازی تطبیقی، فرایند کنترلی شرح و بسط داده شد. همچنین شبیه‌سازی پلنت به همراه کنترل‌کننده معرفی شده در فصل گذشته انجام گرفت. با بیان چکیده اقدامات انجام شده در این پایان‌نامه، در ادامه فصل ابتدا نتیجه‌گیری و سپس بیان پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی مطرح خواهد شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از سه سیگنال مرجع در فصل قبل بیان شد. بنا به نتایج حاصل شده، مشخص شد که رفتار سیستم مستقل از بار و تغییرات بار حین کار سیستم است. هرکدام از حالت‌ها، در حین اجرا بار سیستم تغییر یافت، ولیکن تغییر قابل مشاهده‌ای در خروجی حاصل نشد و نسبت به این تغییرات مقاوم بود.

پیاده‌سازی کنترل فازی تطبیقی با دقت بالا در عمل با یک شیر کنترل میسر نیست، چون در هر لحظه تنها یکی از محفظه‌های سیلندر تحت کنترل خواهد بود. بنابراین هم سیگنال کنترل و هم موقعیت پیستون همراه با ریپل خواهند بود. البته در شبیه‌سازی کامپیوتری به دلیل آنکه سیگنال کنترل به دلیل سرعت بالای پردازش می‌تواند به سرعت تغییر کند، ریپل در خروجی سیستم به چشم نمی‌خورد و تنها در سیگنال کنترل قابل مشاهده است. اما در عمل به دلیل کند بودن فرایند انتقال داده بین سیستم آزمایشگاهی و کامپیوتر این ریپل و خطا در ردیابی سیستم نیز قابل مشاهده است.

البته ذکر این نکته در مورد سیستم‌های نیوماتیکی خالی از لطف نیست که این سیستم‌ها شدیداً غیرخطی، دارای نامعینی و تاخیر نسبتاً زیاد هستند که همین مسئله کار را برای طراح بسیار مشکل می‌کند. ولیکن مزیت مثبتی که برای این سیستم‌ها می‌توان لحاظ کرد این است که در حین کار احتمال آسیب رسیدن به سیستم وجود نخواهد داشت.

۵-۳- پیشنهادات

- ۱- استفاده از دو شیر کنترلی به منظور کنترل هر دو محفظه‌ی سیلندر و کاهش ریپل خروجی
- ۲- تغییر پارامترهای تنظیم کنترل کننده برای دستیابی به دقت بیشتر
- ۳- استفاده از متغیرهای ورودی بیشتر برای به دستیابی به دقت بیشتر

منابع و مأخذ

[1] Festo. "99 example of pneumatic applications" 2000 by festo AF&Co. federal republic of Germany

[2] Van Varseveld, Robert B., and Gary M. Bone. "Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves." *IEEE/ASME Transactions on mechatronics* 2.3 (1997): 195-204.

[3] <http://www.stroke.org>

[4] Kozo kyoizumi, Yulishige fujita, Iko Mizumoto, zenta Iwai, " simple adaptive control for positioning of a pneumatic cylinder with stick-slip" IFAC workshop on adaptation and learning in control and signal processing, august 30- september1, 2004

[5] Lunenburger, Lars, et al. "Clinical assessments performed during robotic rehabilitation by the gait training robot Lokomat." *Rehabilitation Robotics*, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on. IEEE, 2005.

[6] Zanotto, Damiano, Paul Stegall, and Sunil K. Agrawal. "ALEX III: A novel robotic platform with 12 DOFs for human gait training." *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.

[7] Banala, Sai K., Suni K. Agrawal, and John P. Scholz. "Active Leg Exoskeleton (ALEX) for gait rehabilitation of motor-impaired patients." *Rehabilitation Robotics*, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on. IEEE, 2007.

[8] Veneman, Jan F., et al. "Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 15.3 (2007): 379-386.

[9] Kong, Kyoungchul, et al. "Impedance compensation of SUBAR for back-drivable force-mode actuation." *IEEE Transactions on Robotics* 25.3 (2009): 512-521.

[10] Yoon, Jungwon, and et al. "A 6-DOF gait rehabilitation robot with upper and lower limb connections that allows walking velocity updates on various terrains." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 15.2 (2010): 201-215.

[11] Schmidt, Henning, et al. "Gait rehabilitation machines based on programmable footplates." *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 4.1 (2007): 2.

[12] Krause, Jeremy, and Pranav Bhounsule. "A 3D Printed Linear Pneumatic Actuator for Position, Force and Impedance Control." *Actuators*. Vol. 7. No. 2. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018.

[13] Kim, Y., and A. Cook. "Manipulation and Mobility Aids, Electronic Devices for Rehabilitation, Webster et al, Eds." (1985).

[14] Allen, J. R., A. Karchak Jr, and E. L. Bontrager. "Design and fabricate a pair of Rancho anthropomorphic manipulator arms." (1972).

- [15] Paeslack, V., and H. Roesler. "Design and control of a manipulator for tetraplegics." *Mechanism and Machine Theory* 12.5 (1977): 413-423.
- [16] Seamone, W., and G. Schmeisser. "Early clinical evaluation of a robot arm/worktable system for spinal-cord-injured persons." *Journal of rehabilitation research and development* 22.1 (1985): 38-57.
- [17] Chen, Shoupu, William Harwin, and Tariq Rahman. "The application of discrete-time adaptive impedance control to rehabilitation robot manipulators." *Robotics and Automation*, 1994. Proceedings. 1994 IEEE International Conference on. IEEE, 1994.
- [18] Mason, C. P., and E. Peizer. "Medical Manipulator for Quadriplegic." *Proc Int'l Conf. on Telemanipulators for the Physically Handicapped*. 1978.
- [19] Fengler, M., and W. M. Cameron. "Clinical testing of a low cost robotic arm for the severely physically disabled." *Proc. First Int'l Workshop on Robotic Applications in Medical and Healthcare*. 1988.
- [20] Krebs, H. I., et al. "Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neuro-rehabilitation." *Journal of rehabilitation research and development* 37.6 (2000): 639-652.
- [21] Amirabdollahian, Farshid, et al. "Error correction movement for machine assisted stroke rehabilitation." *Integration of Assistive Technology in the Information Age 9* (2001): 60-65.
- [22] Ken'ichi Koyanagi, et al. "3-D Rehabilitation Robot System for Upper Limbs and its Force Display Techniques." *ICAT*. 2003.
- [23] Harwin, William S., James L. Patton, and V. Reggie Edgerton. "Challenges and opportunities for robot-mediated neurorehabilitation." *Proceedings of the IEEE* 94.9 (2006): 1717-1726.
- [24] Shearer, J. L. "Study of Pneumatic Processes in the Continuous Control of Motion with Compressed Air. Part I and II." *Trans. ASME* 78.1 (1956): 233-249.
- [25] Liu, S., and J. E. Bobrow. "An analysis of a pneumatic servo system and its application to a computer-controlled robot." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 110.3 (1988): 228-235.
- [26] Kunt, C., and R. Singh. "A linear time varying model for on-off valve controlled pneumatic actuators." *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 112.4 (1990): 740-747.
- [27] Jihong wang, Jungsheng Pu, Philip Moore. "Accurate position control of servo pneumatic actuator systems: an application to food packaging" *Mechatronics Research Group, Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, De Montfort University, Leicester LE1 9BH, UK* Received 14 May 1998; accepted 22 February 1999
- [28] Mohannad farag, Norsinnira Zainul Azlan. " Adaptive Backstepping Position Control Of Pneumatic Anthropomorphic Robotic Hand" *IEEE International On Robotics and intelligent sensor (IRIS 2015)*

- [29] Roberto Carracciolo, Paolo Gallina, Alessandro Gaspareto. "fuzzy control of a pneumatic actuator" IFAC Robot Control, Nantes, France, 1997
- [30] H.Keller, R.Isermann, "model-based nonlinear adaptive control of a pneumatic actuator" Control Eng.practice vol1, No.3, pp.505-511, 1993, pinned in great Britain. All rights reserved
- [31] Ming-chang Shih, Ming-An Ma. "position control of a pneumatic cylinder using fuzzy pwm control method" Department of mechanical engineering, national cheng-kung university, received 19 september 1995; revised 2 april 1997; accepted 4 december 1997
- [32] Krebs, H. Igo, et al. "Robot-aided neurorehabilitation." IEEE transactions on rehabilitation engineering 6.1 (1998): 75-87.
- [33] Browning, Raymond C., et al. "The effects of adding mass to the legs on the energetics and biomechanics of walking." Medicine & Science in Sports & Exercise 39.3 (2007): 515-525..
- [34] Aguirre-Ollinger, Gabriel, et al. "Inertia compensation control of a one-degree-of-freedom exoskeleton for lower-limb assistance: Initial experiments." IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 20.1 (2012): 68-77.
- [35] Van Asseldonk, Edwin HF, et al. "The effects on kinematics and muscle activity of walking in a robotic gait trainer during zero-force control." IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering 16.4 (2008): 360-370.
- [36] Hussain, Shahid, Sheng Q. Xie, and Prashant K. Jamwal. "Robust nonlinear control of an intrinsically compliant robotic gait training orthosis." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems 43.3 (2013): 655-665.
- [37] Vallery, Heike, et al. "Compliant actuation of rehabilitation robots." IEEE Robotics & Automation Magazine 15.3 (2008).
- [38] Kong, Kyoungchul, Joonbum Bae, and Masayoshi Tomizuka. "Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human-robot interaction applications." IEEE/ASME transactions on mechatronics 14.1 (2009): 105-118.
- [39] Colgate, Edward, and Neville Hogan. "An analysis of contact instability in terms of passive physical equivalents." 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1989.
- [40] Park, Jaeheung, and Oussama Khatib. "A haptic teleoperation approach based on contact force control." The International Journal of Robotics Research 25.5-6 (2006): 575-591.

- [41] Wolbrecht, Eric T., David J. Reinkensmeyer, and James E. Bobrow. "Pneumatic control of robots for rehabilitation." *The International Journal of Robotics Research* 29.1 (2010): 23-38.
- [42] Aoyagi, Daisuke, et al. "A robot and control algorithm that can synchronously assist in naturalistic motion during body-weight-supported gait training following neurologic injury." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 15.3 (2007): 387-400.
- [43] Ying, Chen, et al. "Design and hybrid control of the pneumatic force-feedback systems for Arm-Exoskeleton by using on/off valve." *Mechatronics* 17.6 (2007): 325-335.
- [44] Richardson, R., et al. "Pneumatic impedance control of a 3-dof physiotherapy robot." *Advanced Robotics* 20.12 (2006): 1321-1339.
- [45] Tzafestas, Costas S., Nacer K. M'sirdi, and N. Manamani. "Adaptive impedance control applied to a pneumatic legged robot." *Journal of Intelligent and Robotic systems* 20.2-4 (1997): 105-129.
- [46] Wait, Keith W., and Michael Goldfarb. "A pneumatically actuated quadrupedal walking robot." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 19.1 (2014): 339-347.
- [47] Shen, Xiangrong, and Michael Goldfarb. "On the enhanced passivity of pneumatically actuated impedance-type haptic interfaces." *IEEE Transactions on Robotics* 22.3 (2006): 470-480.
- [48] Kokotovic, P., Arkac, M., "Constructive nonlinear control: a historical perspective", *Automatica.*, Vol. 37, pp. 637–662, 2001
- [49] S. Liu and J. E. Bobrow, "An analysis of a pneumatic servo system and its application to a computer-controlled robot," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 110, no. 3, pp. 228-235, 1988.
- [50] E. Richer and Y. Hurmuzlu, "A high performance pneumatic force actuator system: Part I - Nonlinear mathematical model," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 122, no. 3, pp. 416-425, 2000
- [51] Wang, L.-X., "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 146–155, 1993.
- [52] Tong, S.C., Li, H.X., "Direct Adaptive fuzzy output tracking control of nonlinear systems", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 128, pp. 107–115, 2002.
- [53] Karpenko, M., & Sepethri, N. (2006). QFT synthesis of a position controller for a pneumatic actuator in the presence of worst-case persistent disturbances. 2006 American Control Conference. <http://dx.doi.org/10.1109/acc.2006.1657203>
- [54] Wang C. C., Chen J. Y, and Huang B. C,"Rulr regulation of indirect adaptive fuzzy controller design", *IEE proc. Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 6, pp. 513-518.

November 1998

[55] Wolbrecht, Eric T., et al. "Optimizing compliant, model-based robotic assistance to promote neurorehabilitation." *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 16.3 (2008): 286-297.

[56] Zhu, Yong, and Eric J. Barth. "Impedance control of a pneumatic actuator for contact tasks." *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on.* IEEE, 2005.

[57] F. E. Sanville, "A new method of specifying the flow capacity of pneumatic fluid power valves," in *BHRA 2 International Fluid Power Symposium*, 1971, pp. D3:37-D3:47.

[58] Festo, "Round cylinders DSNU/ESNU," DSNU-32-100-PPV-A datasheet, Mar. 2015.

[59] Festo, "Proportional pressure regulators and valves VPPM VPPE, MPPE MPPEs, MPYE and the new VPPM-MPA for correct pressure and precise regulation," MPYE datasheet, Jul. 2008

[60] Wang, L-x, *adaptive fuzzy system and control: design and stability analysis*, Prentice-hall, Englewood cliffs, NJ,1994

Abstract:

Nowadays, in industrial applications, the use of pneumatic actuators due to their many advantages is of increasing interest and despite the weaknesses like that air compressibility and its nonlinear characteristics, they are used in many cases. In most cases, pneumatic cylinders are used for moving objects. Since the amount of load on the actuators is variable, it is necessary to design a controller that in addition to precise control, changing the load on the cylinder does not make any pores. Therefore, in this thesis, an adaptive fuzzy controller has been tried. This controller in addition to controlling the position, it has the ability to adapt the system during the process. This feature causes that factors like that variable non-linear properties with time and load variations do not make any pores on system performance. A flow control valve is used for cylinder control that provides the ability to control the flow on the two sides of the cylinder. In order to achieve the control objectives use of three state variables, position, speed and acceleration as fuzzy inputs which are ultimately used from output as signal control for the simulated system in matlab and equipped system in the laboratory.

Keyword: Pneumatic Actuator, control valve, Adaptive-Fuzzy, Controller, industrial, automation



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Robotics Engineering

**Adaptive fuzzy control design and implementation
of a pneumatic operator subject to variable load**

By:

Mehrdad Motavalizadeh

Supervisors:

Dr. Ali Akbarzadeh

Dr. Mahdi Bamdad

July 2019