

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مکانیک

گروه مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

استفاده از روش کنترلی پسگام در سیستم EGR

موتور احتراق داخلی

ماجد صدفی

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

زمستان ۱۳۹۳

شماره: ۲۵۱/۲۹۳
تاریخ: ۲۰/۱۲/۹۲
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ماجد صدقی رشته مهندسی مکانیک گرایش مکترونیک تحت عنوان " استفاده از روش کنترلی پسگام در سیستم egr موتور احتراق داخلی " که در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (یا درجه: خوب امتیاز: ۱۷۸)
--------------------------------	------------------------------------	---

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	حبیب احمدی	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	احمد مددی	مربی	
۴- استاد ممتحن	علی رضا الفی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	مهدی بامداد	استادیار	

رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان
امضاء:

تشکر و قدردانی

از دکتر احمدی، که دلسوزانه و صبورانه بنده را راهنمایی نموده‌اند؛ کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌-
آورم. همچنین از تمام عزیزانی که در طول این مدت با همدلی‌شان بستر انجام هر چه بهتر این پایان نامه
را فراهم نموده‌اند تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب ماجد صدفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه " استفاده از روش کنترلی پسگام در سیستم EGR موتورهای احتراق داخلی " تحت راهنمایی دکتر

احمدی 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 های 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 هست 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 یافته های آن ها) 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.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های 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

با کاهش منابع سوخت و افزایش روزافزون استفاده از موتورهای درون‌سوز به خصوص موتور دیزل در جهان، کنترل و بهسازی موتور دیزل به امری مهم و حیاتی تبدیل شده است. اقدامات زیادی برای بهبود عملکرد موتورهای دیزل انجام گرفته است که از جمله این اقدامات می‌توان به اضافه کردن سیستم EGR و سیستم VGT اشاره کرد. هدف اصلی از بهسازی و کنترل دقیق موتور دیزل کاهش میزان آلاینده‌گی، کاهش مصرف سوخت و افزایش راندمان موتور می‌باشد. سیستم EGR باعث کاهش آلاینده‌گی و سیستم VGT باعث افزایش راندمان موتور می‌شود.

اضافه کردن این دو سیستم به موتور موجب بهبود عملکرد موتور می‌شود، اما کنترل پارامترها و عملکرد موتور را بسیار پیچیده‌تر می‌کند. زیرا موتور یک سیستم چند ورودی- چندخروجی (MIMO) است که معادلات آن در هم کوپل شده است. همین امر موجب پیچیده‌تر شدن کنترل این سیستم می‌شود.

در گذشته روش‌های مختلفی برای کنترل این سیستم انجام گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش خطی سازی حول نقطه کار، روش کنترل تطبیقی، روش شناسایی سیستم، روش H_{∞} و ... نام برد. در این تحقیق از روش خطی سازی فیدبک، کنترل مد لغزشی و روش گام به عقب یا همان روش پسگام استفاده شده است. ابتدا مدل سازی و سپس معادلات و نتایج شبیه‌سازی آمده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل، موتور دیزل، خطی سازی، پسگام.

فصل اول مقدمه.....	۱
۱-۱ تاریخچه	۲
۲-۱ موتور یک سیستم مکاترونیکی	۳
۳-۱ مزایا و معایب موتور دیزل توربو شارژر	۳
۳-۱-۱ مزایا	۴
۳-۱-۱-۱ کاهش مصرف سوخت	۴
۳-۱-۱-۲ کاهش صدای موتور	۴
۳-۱-۱-۳ کاهش وزن و سایز موتور	۴
۳-۱-۴ جبران افت قدرت موتور در ارتفاعات	۵
۳-۱-۲ معایب	۵
۳-۱-۲-۱ آلودگی هوا	۵
۳-۱-۲-۲ کمبود منابع سوخت	۶
۳-۱-۲-۳ آلودگی صوتی	۶
۴-۱ برخی اقدامات تکمیلی انجام شده	۷
۴-۱-۱ توربو شارژر	۷
۴-۱-۱-۱ ساختار توربو شارژر	۷
۴-۱-۱-۲ تفاوت توربو شارژر و سوپر شارژر	۸
۴-۱-۲ سیستم EGR	۹

۱۰	.....	۳-۴-۱ سیستم VGT
۱۲	.....	۱-۵-۱ کنترل مدرن
۱۴	.....	۶-۱ مروری بر کارهای گذشته
۱۴	.....	۱-۶-۱ پیش‌بینی مدل خطی و غیرخطی کنترل
۱۵	.....	۲-۶-۱ خطی سازی حول نقطه کار
۱۵	.....	۳-۶-۱ مود لغزشی
۱۶	.....	۴-۶-۱ شناسایی سیستم
۱۷	.....	۵-۶-۱ روش LPV
۱۸	.....	۶-۶-۱ روش EGO
۱۹	.....	۷-۶-۱ روش H
۲۳	.....	فصل دوم سنسورها و محرکه‌ها
۲۴	.....	۱-۲ شیرها و محرکه‌ها
۲۴	.....	۱-۲ شیرهای پروانه‌ای
۲۵	.....	۲-۱-۲ شیر الکتروپنیوماتیک
۲۷	.....	۳-۱-۲ محرکه EGR والوو
۳۰	.....	۲-۲ سنسورها
۳۰	.....	۱-۲-۲ سنسور اکسیژن:
۳۲	.....	۲-۲-۲ سنسور NOx
۳۳	.....	۳-۲-۲ سنسور دوده
۳۴	.....	۳-۲ مقدمه‌ای بر تکنولوژی شیرهای سروو

۳۵	۱-۳-۲ تعریف هیدرولیک سروو.....
۳۵	۲-۳-۲ فرق بین کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته
۳۵	۱-۲-۳-۲ کنترل حلقه باز
۳۷	۲-۲-۳-۲ کنترل حلقه بسته.....
۳۸	۳-۳-۲ طراحی مراحل
۴۱	فصل سوم معادلات و مدل سازی.....
۴۲	۱-۳ ساختمان کنترلی موتورهای درون سوز.....
۴۳	۲-۳ مدل سازی دینامیکی موتور.....
۴۳	۱-۲-۳ معادلات حلقه هوا رسانی
۴۳	۱-۲-۳ معادلات منی فولد خروجی
۴۴	۲-۱-۲-۳ معادلات حاکم بر سیستم توربو شارژر به همراه خنککن داخلی:
۴۶	۳-۱-۲-۳ معادلات حاکم بر منی فولد ورودی:
۴۸	۳-۳ اعتبار سنجی مدل.....
۵۵	فصل چهارم خطی سازی فیدبک.....
۵۷	۱-۴ مقدمه.....
۵۸	۲-۴ خطی سازی.....
۵۸	۳-۴ روش خطی سازی فیدبک
۶۲	۴-۴ شبیه سازی:.....
۶۱	فصل پنجم مدل غزشی.....

۶۸.....	۵-۱ مقدمه.....
۶۹.....	۵-۲ سطح لغزش.....
۷۳.....	۵-۳ شبیه سازی:.....
۸۱.....	فصل ششم روش پسگام.....
۸۲.....	۶-۱ مقدمه.....
۸۳.....	۶-۲ روش گام به عقب.....
۸۳.....	۶-۳ تاریخچه و روند تکاملی گام به عقب.....
۸۷.....	۶-۴ نتیجه گیری.....

صفحه

فهرست اشکال

۲.....	شکل (۱-۱) نمونه‌ای از یک موتور دیزل.....
۳.....	شکل (۲-۱) نمونه‌ای از موتور دیزل بزرگ.....
۸.....	شکل (۳-۱) توربو شارژر برش خورده.....
۹.....	شکل (۴-۱) نمونه‌ای از سوپرشارژر.....
۱۰.....	شکل (۵-۱) سیستم EGR و VGT.....
۱۱.....	شکل (۶-۱) سیستم VGT.....
۱۲.....	شکل (۷-۱) شماتیک موتور دیزل مجهز به سیستم EGR و VGT.....

شکل (۸-۱) روند کلی شناسایی سیستم.....	۱۷
شکل (۹-۱) بلوک دیاگرام کنترلی روش H_2	۲۱
شکل (۱-۲) شیر پروانه‌ای با محرکه مغناطیسی.....	۲۵
شکل (۲-۲) شیر الکتروپنیوماتیکی.....	۲۶
شکل (۳-۲) مراحل انجام کار قسمت EPC محرک مغناطیسی.....	۲۷
شکل (۴-۲) شمتاتیک یک شیر والوو.....	۲۸
شکل (۵-۲) شفت فیکس شده درون شیار شیر والوو.....	۲۹
شکل (۶-۲) مشخصه شیر والوو.....	۳۰
شکل (۷-۲) مشخصه سنسورهای EGO و UEGO.....	۳۲
شکل (۸-۲) سنسور NO_x	۳۳
شکل (۹-۲) کنترل حلقه باز شیر سروو.....	۳۶
شکل (۱۰-۲) کنترل حلقه باز شیر سروو.....	۳۸
شکل (۱-۳) ساختمان کنترلی ساده شده یک موتور دیزل مجهز به توربوشارژ.....	۴۲
شکل (۲-۳) مقادیر فشار ورودی در حالت اول.....	۴۹
شکل (۳-۳) مقادیر دمای ورودی در حالت اول.....	۵۰
شکل (۴-۳) مقادیر نسبت اکسیژن در حالت اول.....	۵۰
شکل (۵-۳) مقادیر فشار ورودی در حالت دوم.....	۵۱

- شکل (۳-۶) مقادیر دمای ورودی در حالت دوم..... ۵۲
- شکل (۳-۷) مقادیر نسبت اسپژن در حالت دوم..... ۵۲
- شکل (۴-۱) کنترلر EGR ۶۴
- شکل (۴-۲) کنترلر W_f ۶۵
- شکل (۴-۳) کنترلر VGT ۶۵
- شکل (۴-۴) فشار ورودی در برابر فشار مطلوب..... ۶۶
- شکل (۴-۵) فشار خروجی در برابر فشار مطلوب..... ۶۶
- شکل (۴-۶) توان کمپرسور در برابر توان مطلوب..... ۶۷
- شکل (۵-۱) لرزش ناشی از تاخیر سوئیچینگ کنترل..... ۷۵
- شکل (۵-۲) کنترلر EGR ۷۸
- شکل (۵-۳) کنترلر W_f ۷۹
- شکل (۵-۴) کنترلر VGT ۷۹
- شکل (۵-۵) فشار ورودی در برابر فشار مطلوب..... ۸۰
- شکل (۵-۶) فشار خروجی در برابر فشار مطلوب..... ۸۰
- شکل (۵-۷) توان کمپرسور در برابر توان مطلوب..... ۸۱
- شکل (۶-۱) میزان خطای ردگیری فشار ورودی..... ۹۳
- شکل (۶-۲) میزان خطای ردگیری فشار خروجی..... ۹۴

شکل (۳-۶) میزان خطای ردگیری توان کمپرسور..... ۹۴

شکل (۴-۶) میزان خطای ردگیری ورودی EGR..... ۹۵

شکل (۵-۶) میزان خطای ردگیری ورودی VGT..... ۹۵

شکل (۶-۶) میزان خطای ردگیری ورودی W_f ۹۶

فصل اول:
مقدمه

۱-۱ تاریخچه

موتور دیزل توسط رودولف دیزل^۱ اختراع و ساخته شد. در سال ۱۸۹۳ بود که اولین موتور دیزل ساخت او شروع به کار کرد. همچنین او در سال ۱۸۹۶ موتور دیگری ارائه کرد که بازده نظری آن ۷۵ درصد بود که در مقایسه با ۱۰ درصد راندمان ماشین بخار راندمان بالایی بود و در نوع خود یک اختراع موفق به حساب می‌آمد.

در کاربردهای ابتدایی از موتور دیزل در کارهای درجای سنگین مانند تولید برق، تلمبه کردن آب و تولید قدرت جهت رفع بعضی نیازهای کارخانه‌ها استفاده می‌شد؛ اما در سال ۱۹۳۰ با توسعه‌ی پمپ‌های سوخت پاش که توسط شرکت رابرت بوش^۲ به تولید انبوه رسیده بود حجم موتورهای دیزل کمتر و برای استفاده‌های کوچک و سریع‌تر مانند خودرو قابل استفاده شد.



شکل (۱-۱) یک نمونه موتور دیزل

از موتورهای دیزل در کاربردهای گوناگونی استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد و لزوم استفاده از موتور، طراحی و ساخت آن به شکل‌های مختلف صورت می‌گیرد. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از یک موتور بزرگ را مشاهده می‌شود.

^۱ Diesel

^۲ Bosh



شکل (۱-۲) نمونه‌ای از یک موتور دیزل بزرگ

۱-۲ موتور یک سیستم مکاترونیکی

یک موتور احتراق داخلی با یک مرکز سازمان دهی دیجیتال را می‌توان یک سیستم مکاترونیکی نامید. این سیستم شامل فرآیندهای ترمودینامیکی، الکترومکانیکی، هیدرولیکی و پنوماتیکی می‌شود که توسط سنسورهای الکترونیکی و یک واحد کنترل دیجیتال کنترل می‌شود. لذا موتور احتراق داخلی را می‌توان به عنوان یک سیستم مکاترونیکی پیچیده به حساب آورد که برای بهبود عملکرد آن در هر کدام از فرآیندهای یادشده باید اقدامات مخصوص به خود انجام گیرد.

۱-۳ مزایا و معایب موتور دیزل توربو شارژر

در صنعت امروز از موتورهای دیزل استفاده‌های گسترده‌ای می‌شود. از مزایای این موتورها می‌توان به تولید توان بالا، فقیر سوز بودن، انتشار آلاینده‌گی کمتر نسبت به موتورهای دیگر، دوام بیشتر، مصرف سوخت کمتر و قابلیت استفاده از سوخت‌های مختلف اشاره کرد؛ اما موتورهای احتراق داخلی که

موتور دیزل هم جزئی از آنهاست معایبی هم دارند. از جمله این معایب می‌توان به آلاینده‌گی، منابع سوخت محدود، هزینه‌ی بالا و ایجاد آلودگی صوتی نام برد. البته این معایب در تمام موتورهای احتراق داخلی مشترک بوده و مخصوص موتور دیزل نیست. از جمله این مزایا و معایب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱-۳-۱ مزایا

۱-۳-۱-۱ کاهش مصرف سوخت

وجود توربو شارژر باعث افزایش قدرت می‌گردد پس در موتورهای توربو شارژر دار با مقدار سوخت کمتر (دور کمتر موتور) می‌توان قدرت بیشتر را ایجاد کرد. در نتیجه این امر مقدار مصرف سوخت اضافه برای تأمین قدرت بالاتر حذف می‌شود و مصرف سوخت کاهش می‌یابد.

۱-۳-۱-۲ کاهش صدای موتور

با افزایش مقدار هوا در مرحله تراکم، دما هوای متراکم شده افزایش یافته و با تزریق سوخت به داخل آن با کمترین تأخیر در احتراق، منفجر می‌شود. در نتیجه کاهش تأخیر احتراق، صدای موتور تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. پس توربو شارژر با ایجاد افزایش فشار در هوای ورودی و پرخوران کردن موتور و تأمین هوای اضافی باعث کاهش تأخیر احتراق و در نتیجه کاهش صدای موتور می‌شود. به همین دلیل موتورهای توربو شارژر دارای صدای کمتری نسبت به موتورهای معمولی هستند.

۱-۳-۱-۳ کاهش وزن و سایز موتور

یک موتور معمولی برای آنکه قدرت خروجی مساوی با یک موتور توربو شارژر دار مشابه را فراهم کند، نتیجتاً باید دارای ساختمانی بزرگ تر باشد چرا که موتور توربو شارژر دار با همین اندازه دارای تقریباً ۵۰ اسب بخار، قدرت بیشتر است. پس در موتورهای مجهز به توربو شارژر نسبت توان به وزن و حجم موتور بیشتر است.

۱-۳-۱-۴ جبران افت قدرت موتور در ارتفاعات

می‌دانیم که مقدار فشار هوا در کنار یا سطح دریا 1 atm اتمسفر است. با بالا رفتن از سطح دریا به تدریج از فشار و مقدار هوا کاسته می‌شود. این موضوع بدین معنی است که در ارتفاعات بالاتر از سطح دریا مقدار هوای کمتری نسبت به سطح دریا وجود دارد.

در موتورهای احتراقی با مکش پیستون در کورس مکش، هوا وارد سیلندر می‌شود، حال اگر مقدار فشار هوا در منطقه‌ای زیاد باشد (سطح دریا) هنگام مکش پیستون هوای بیشتری وارد سیلندر می‌شود؛ اما در مناطقی که فشار هوا کمتر است (بالاتر از سطح دریا) مقدار هوای ورودی به سیلندر کمتر می‌شود، چرا که در این مناطق هوا دارای فشار کمتری است. به همین دلیل موتورهای با مکش طبیعی در ارتفاعات بالاتر از سطح دریا هوای کمتری تنفس می‌کنند که نتیجه آن افت راندمان حجمی و قدرت موتور است.

با استفاده از توربو شارژر در موتور این نقیصه جبران می‌شود. موتورهای مجهز به توربو شارژر هنگامی که در مناطق دارای فشار هوای زیاد کار می‌کنند، مقدار هوای اضافه را برای موتور تأمین می‌کنند. با کاهش فشار هوا (کار در مناطق بالاتر از سطح دریا) مقدار فشار در سمت مکشی کمپرسور توربو شارژر کاسته شده و در نتیجه محور شارژر سریع تر دوران می‌کند. نتیجه این امر مکش و تأمین هوای بیشتر به موتور است و باعث می‌شود مقدار هوای تحویلی به موتور در این مناطق کاهش نیافته و قدرت موتور دچار افت قدرت نگردد.

۱-۳-۲ معایب

۱-۳-۲-۱ آلودگی هوا

آلودگی هوا یکی از مشکلات مهم امروز جوامع است؛ زیرا آلودگی هوا از عوامل مضر بر سلامتی انسان، حیوان و گیاه است و موجب خسارت به اماکن و لوازم می‌شود. عوامل اصلی آلودگی هوا عبارت‌اند از: دی‌اکسید گوگرد، منواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن و

خروجی اگزوز موتورهای احتراق داخلی یکی از عوامل مهم این آلاینده‌گی‌هاست. آلاینده‌گی‌های خروجی از اگزوز موتورها به پارامترهای متعددی از قبیل نوع طراحی موتورها، سیستم‌های کنترل آلاینده‌گی و سوخت موتور، نوع سوخت، مواد افزودنی به سوخت و عمر موتور بستگی دارد.

اما با پیشرفت علم کنترل و به‌کارگیری سیستم‌های کنترل دقیق و مناسب می‌توان مقدار این آلاینده‌ها را به حداقل رساند و آلودگی هوا و محیط را کاهش داد. استفاده از کاتالیزورها، کنترل نسبت هوا به سوخت، کنترل پاشش چند مرحله‌ای از عوامل موثر در این زمینه است.

۱-۳-۲-۲-۲ کمبود منابع سوخت

کمبود منابع سوخت یکی دیگر از معایب موتور دیزل است. استفاده از سوخت‌های جایگزین یکی از راه‌های حل این مشکل است. بیودیزل به عنوان یک راه جایگزین برای گازوئیل و بنزین است. در بیودیزل از روغن و سوخت‌های گیاهی برای این موتورها استفاده می‌شود. رودولف دیزل ۱۱۰ سال پیش این کار را برای اولین بار انجام داد. در بین سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۴۰ سوخت‌های گیاهی در موتورها مورد استفاده قرار گرفت. امروزه با افزایش قیمت سوخت و افزایش آلودگی هوا استفاده از بیو دیزل ابعاد جدیدی به خود گرفته و روزه‌روز در حال پیشرفت است.

۱-۳-۲-۳-۱ آلودگی صوتی

سر و صدا و آلودگی صوتی یکی دیگر از معایب موتورها است. علت هر نویزی یک لرزش و ارتعاش است. سر و صدای منتشرشده از هر سیستمی یک فرکانس دارد. برای یک سیستم پیچیده مانند موتور پارامترهای متعددی باعث لرزش و نویز می‌شود. به طور مثال کوچک‌ترین تغییر فشار در سیلندر موتور که تغییرات جزئی در قدرت آن وارد می‌کند می‌تواند باعث سروصدای زیادی شود. برای کنترل نویز اقدامات مختلفی باید انجام داد.

یکی از این اقدامات می‌تواند کاهش نیروی مکانیکی موتور و جلوگیری از احتراق‌های بزرگ در موتور باشد [۱]. راه دیگر استفاده از دمپ‌های مناسب در راه مسیره‌های انتقال نیرو است. شکل ظاهری موتور نیز در کاهش نویز و کنترل نویز تأثیر بسزایی دارد. البته با استفاده از سپرها و عایق‌ها می‌توان مقدار نویز را تا حد زیادی کاهش داد.

۴-۱ برخی اقدامات تکمیلی انجام شده

معایب مذکور در کنار استفاده فراوان از این موتورها در کنار هم باعث شده تا محققان همواره در حال بهسازی و اعمال تغییرات روی این موتورها باشند. به جرات می‌توان گفت که تا کنون هیچ نوع موتور درون‌سوزی به اندازه موتورهای دیزل مورد بازنگری و بهینه‌سازی قرار نگرفته است.

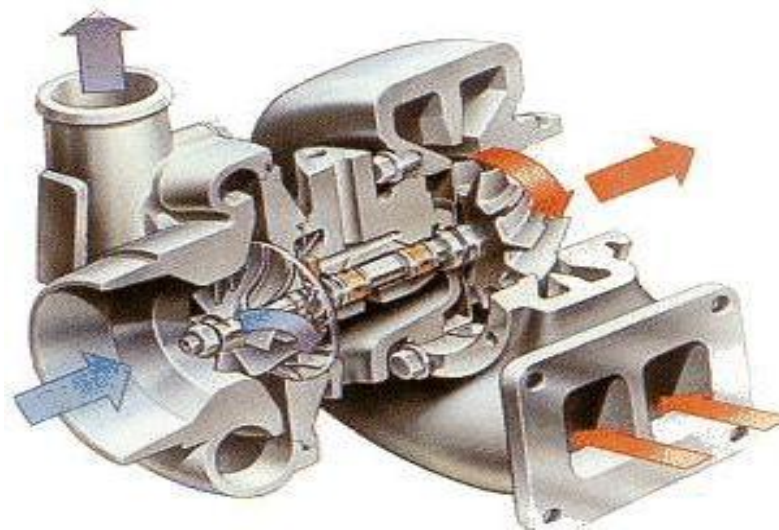
۱-۴-۱ توربو شارژر

از جمله این بهسازی‌ها می‌توان به اضافه کردن یک کمپرسور اشاره کرد. اگر این کمپرسور به همراه یک توربین گازی مورد استفاده قرار گیرد تشکیل توربو شارژر و اگر به صورت منفرد مورد استفاده قرار گیرد سوپر شارژر را تشکیل می‌دهند.

۱-۴-۱-۱ ساختار توربو شارژر

یک توربوشارژر از یک کمپرسور گریز از مرکز و یک توربین گازی تشکیل شده است که توربین گازی به منیفولد دود متصل می‌شود و گازهای خروجی از موتور باعث چرخش توربین گاز شده و به سبب آن کمپرسور که توسط یک شفت به توربین گازی متصل است شروع به چرخش نموده و هوای محیط را مکش می‌کند و سپس آن را متراکم و به سمت موتور می‌فرستد. هوای ورودی بیشتر به موتور به معنی سوخت بیشتر به داخل موتور و هوا و سوخت بیشتر به معنی انرژی و قدرت خروجی بیشتر موتور است. سرعت چرخش توربین با توجه به استفاده توربوشارژر می‌تواند متفاوت باشد و اکثراً دارای

سرعت‌های چرخش بالا هستند به همین دلیل باید از یاتاقان‌های مخصوصی استفاده گردد. در شکل (۳-۱) نمونه‌ای از نمای برش خورده یک توربو شارژر را مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۱) توربوشارژر برش خورده

۱-۴-۲ تفاوت توربو شارژر و سوپر شارژر

ساختار موتورهای سوپر شارژر مشابه توربو شارژر است با این تفاوت که در سوپر شارژرها توربین وجود ندارد و کمپرسور قدرت خود را مستقیماً (با استفاده از تسمه یا زنجیر) از موتور گرفته و هوای ورودی به سیلندر را فشرده می‌کند.

استفاده از سوپر شارژرها مقداری از قدرت موتور را می‌گیرد. اما در موارد خاص که ایجاد سروصدای کمتر مهم بوده یا قیمت تمام‌شده از اهمیت بیشتری برخوردار است یا فضای کمی در محفظه موتور موجود می‌باشد از سوپر شارژر استفاده می‌کنند. در مجموع با توجه به این که توربو شارژرها از انرژی گاز خروجی که بلا استفاده است، استفاده می‌کنند از بازده بهتری برخوردار می‌باشند.

در شکل (۴-۱) نمونه‌ای از یک سوپرشارژر را مشاهده می‌کنیم.



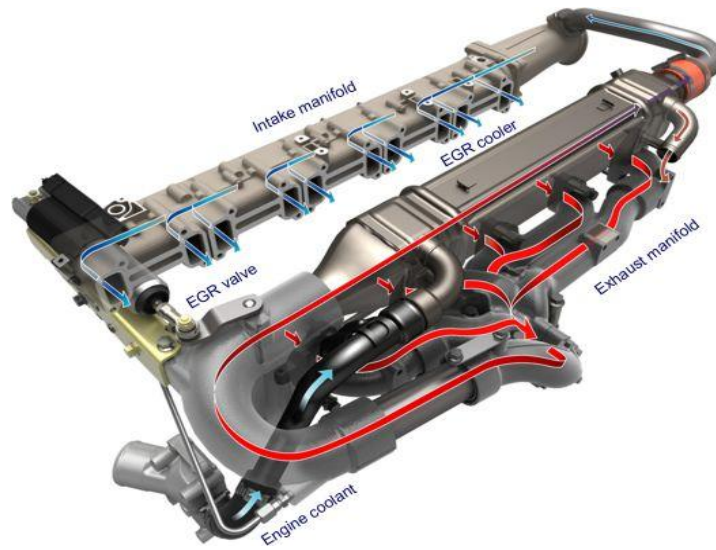
شکل (۱-۴) نمونه‌ای از سوپرشارژر

۱-۴-۲ سیستم EGR^۱

از دیگر کارهای انجام شده بر روی موتورهای دیزل می‌توان به سیستم EGR (بازخورانی گاز سیلندر به داخل سیلندر) اشاره کرد. استفاده از این روش در موتورهای دیزل باعث کاهش آلاینده‌گی NO می‌شود. روش بازگشت دود با کاهش تمرکز اکسیژن در محفظه احتراق باعث کاهش دمای شعله شده و ترکیبات نیتروژن را در خروجی کاهش می‌دهد. [۲]

این سیستم با استفاده از یک فرآیند چرخشی گاز خروجی را به منیفولد ورودی باز می‌گرداند. در منیفولد ورودی این گاز با هوای ورودی تازه ترکیب شده و وارد موتور می‌شود. این عمل باعث کاهش دمای احتراق در محفظه می‌شود. کاهش این دما خود موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها به خصوص ترکیبات نیتروژنی می‌شود. [۳] گاز بازگشتی از موتور قبل از رفتن به منیفولد ورودی باید خنک شود. این امر باعث افزایش بازده حجمی و توان ترمزی موتور می‌شود [۴]. شکل (۱-۵) نمونه‌ای از سیستم EGR و VGT را مشاهده می‌شود.

^۱ - exhaust-gas recirculation

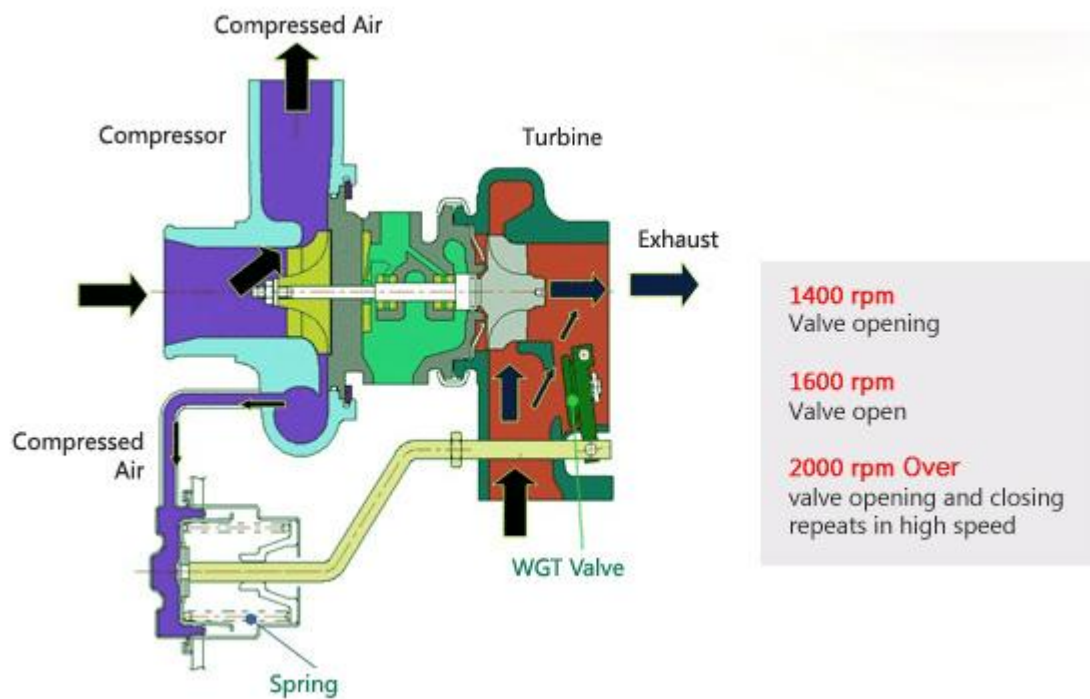


شکل (۵-۱) سیستم EGR و VGT

۱-۴-۳ سیستم VGT^۱

امروزه استفاده از VGT در موتورهای دیزل پیشرفته به یک امر مرسوم تبدیل شده است. زمانی که مقدار دود خروجی برای به حرکت در آوردن توربوشارژر کافی نباشد با VGT با کاهش سطح مقطع نازل باعث افزایش انرژی سیال خروجی از توربین می‌شود. یک دیافراگم فشار منفی برای نازل VGT تعبیه شده است که کنترل آن توسط یک تنظیم‌کننده فشار معکوس مغناطیسی است [۵]. شکل (۶-۱) یک نمای برش خورده از سیستم را نشان می‌دهد.

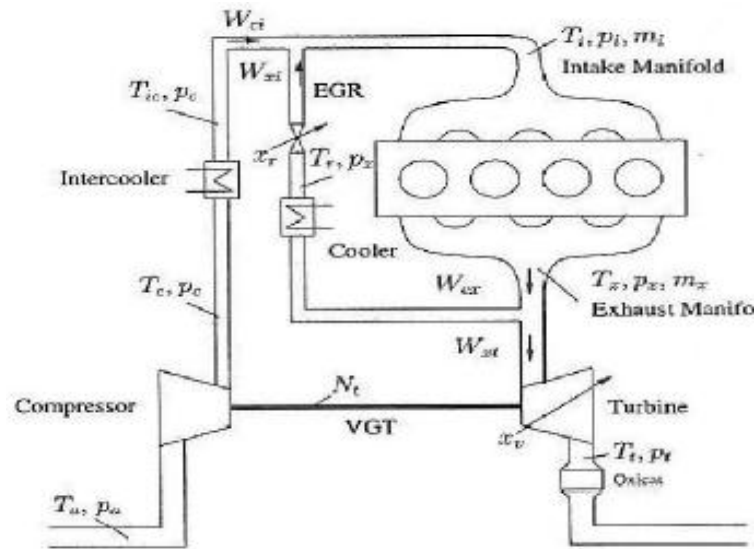
^۱-variable geometry turbine



شکل (۶-۱) سیستم VGT [۵]

پیچیدگی و کاربرد زیاد موتورهای دیزل و محدود بودن منابع سوخت و آلاینده‌گی این موتورها نیاز به کنترل دقیق این سیستم‌ها را بیش از پیش مهم و حیاتی می‌کند. هدف اصلی از کنترل موتورهای دیزل این است که گشتاور مورد نیاز موتور با حداقل مصرف سوخت و میزان آلاینده‌گی و کمترین آلودگی صوتی تولید شود. [۶]

در شکل (۷-۱) نمونه‌ای از موتور دیزل با سیستم EGR و VGT را مشاهده می‌شود.



شکل (۷-۱) یک موتور دیزل مجهز به سیستم EGR و VGT [۹]

۴-۴-۱ کنترل مدرن

اگر چه بعضی از کارهایی که بعد از جنگ جهانی دوم انجام شد نشأت گرفته از دیدگاه‌هایی بود که در طول جنگ مطرح شده بود، مسیر اصلی پیشرفت‌ها را در دو فاکتور مشخص کرد:

- اولی مسائلی که دولت‌ها مهم می‌دیدند مانند پرتاب، مانور، ردیابی موشک‌ها و...

- دومی با ظهور کامپیوتر دیجیتال.

اولین مسئله ظهور موشک‌های بالستیک بود. مهندسانی که در صنایع نظامی و هوافضا کار می‌کردند شروع کردند به فرموله کردن معادلات دیفرانسیلی که به صورت جملاتی از معادلات درجه اول و بنابراین رویکردی را شروع کردند که به فضای حالت شهرت یافت.

یک گام مهم دیگر، تئوری کالمن^۱ برای مسئله کنترل بهینه سیستم‌های خطی چند متغیره بود. با کارهای کالمن بر روی مفاهیم کنترل‌پذیری و روئیت‌پذیری و ایده کنترل مودال مطرح‌شده توسط روزنبرگ^۲، علاقه‌مندی به مباحث فضای حالت بیشتر شد.

موفقیت آخر روش‌های پاسخ زمانی وقتی حاصل شد که کالمن مسئله فیلترینگ را مورد بررسی قرار داد. کارهای او همانند فیلتر کالمن نقش اصلی فیدبک را در تئوری فیلترینگ نشان داد. همچنین دوگانی که میان مسئله کنترل چند متغیره و فیلترینگ چند متغیره فیدبک دار موجود است به تصویر کشید.

این پیشرفت‌ها در حوزه کنترل برای تولید سیستم‌های پیچیده لازم بود. زیرا در سیستمی مانند موتور باید به طور هم زمان چندین پارامتر را کنترل کرد که امری پیچیده و مهم است.

هدف اصلی کنترل موتور دیزل ایجاد گشتاور مورد نیاز با به حداقل رساندن مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی مطابق قوانین و مقررات موجود و کاهش مقدار نویز است. مشکل اصلی در طراحی یک روش کنترلی مناسب چند متغیره بودن، غیرخطی بودن و وجود محدودیت در ورودی و متغیرهای سیستم است [۷].

در کنترل موتورهای دیزل سه حلقه کنترلی وجود دارد:

- سوخت رسانی؛
- هوا رسانی؛
- EGR [۶].

^۱ Kalman

^۲Rosenbrock

برای کنترل هوا رسانی باید توربوشارژر را کنترل کرد درحالی که برای کنترل سیستم EGR باید از شیر EGR استفاده کرد. مسیر سوخت رسانی هم معمولاً به عنوان یک سیگنال خروجی معین در نظر گرفته می شود.

روش های کنترلی متفاوتی برای کنترل این موتورها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش ها می توان به پیش بینی مدل خطی و غیرخطی کنترل [۸] روش خطی سازی حول نقطه ی کار [۹] روش مود لغزشی [۱۰] روش کنترل تطبیقی [۱۱] روش $H \infty$ [۱۲] و روش پساگام [۱۳] اشاره کرد.

تمام این روش ها دارای خصوصیات مختلفی هستند که نمی توانند به طور مستقیم تمام محدودیت ها را در نظر بگیرند و هر کدام از این شیوه ها دارای مزایا و معایبی هستند. لذا بستگی به نوع موتور و اهداف کنترل شیوه مناسب کنترل انتخاب می شود.

۱-۵-۵ مروری بر تحقیقات گذشته

در ادامه به تحقیقات انجام شده و روش های مختلف برای کنترل موتورهای دیزل توربوشارژر اشاره می شود.

۱-۵-۱-۱ پیش بینی مدل خطی و غیرخطی کنترل

هرسگ^۱ و همکارانش [۸] برای کنترل موتور دیزل EGR به همراه VGT روش پیش بینی مدل غیرخطی کنترل^۲ را اتخاذ کردند. هدف آن ها در این تحقیق آن بود که مقدار هوا به سوخت و مقدار EGR مورد نظر را برای کاهش آلاینده های و کاهش مصرف سوخت در نقاط کار^۳ مختلف تنظیم کنند.

^۱ -Martin Herceg

^۲ -NMPC

^۳ - set points

ایده اصلی NMPC^۱ این است که در هر لحظه در منطقه‌ای محدود برای نقاط کار مختلف، مساله کنترل را حل کند. این روش بار محاسباتی بالایی دارد و باید در یک زمان محدود حل شود.

در تحقیق فوق دو موضوع مورد بررسی قرار گرفت. اول بررسی عملکرد به لحاظ تئوری و قابل استفاده بودن برای موتورهای دیزل. دوم اینکه از موتورهای دیزل به عنوان یک معیار برای کنترل سیستم‌هایی با دینامیک سریع دراز مدت استفاده شود.

در این تحقیق برای متغیرهای حالت خطی و غیرخطی کنترل کننده فیدبک حالت ارائه شده است. در کنترل فیدبک حالت خطی از کنترلر LQR^۲ استفاده کرده و معادله فضای حالت را خطی سازی کرده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برای زمانی که دود خروجی متغیر حالت خطی در نظر گرفته می‌شود، کنترلر مورد نظر عملکرد مناسبی ندارد. در مورد مقدار EGR نیز همین گونه است.

۱-۵-۲ خطی سازی حول نقطه کار

در تحقیق کیریستيو و همکارانش مدل دینامیکی موتورهای EGR به همراه VGT مورد بررسی قرار داده شد. در این تحقیق خروجی موتور، فشار ورودی به منیفولد و دبی کمپرسور در نظر گرفته شد. مدل سازی نیز انجام شده و معادلات حاکم بر این موتورها استخراج می‌شود. سپس پارامترها و ورودی و خروجی‌ها شناسایی شده و معادلات فضای حالت استخراج گردیده و نقطه کار را به دست آورده شد. ماتریس‌های A, B و C فضای حالت بدست آورده شد. سپس با استفاده از روش LQR و معادله ریکاتی کنترلر مورد نظر طراحی شد.

۱-۵-۳ مود لغزشی^۳

^۱ -Nonlinear model predictive control

^۲ Linear Quadratic Regulation

^۳ - Sliding mode control

^۲ -Sofiane Ahmed Ali

احمد علی^۱ و همکارانش در این تحقیق به بررسی و توضیح اجمالی بر روش مود لغزشی یکی از شاخه‌های کنترل مقاوم است می‌پردازند. هدف اصلی از این مقاله طراحی یک کنترلر ساده تر برای سیستم هوا رسانی موتور نسبت به [۱۴] بوده است. مقدار EGR و نرخ اکسیژن به سوخت به جای نرخ هوا به سوخت باید کنترل شود. در این تحقیق دبی کمپرسور و فشار خروجی از منی‌فولد خروجی سیستم است. فشار ورودی و خروج را به عنوان سطوح لغزش (s) در نظر گرفته‌شد. s یک تابع دینامیکی از خطا و مشتقات آن است که سطح لغزش نامیده می‌شود. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی بر اساس عدم قطعیت‌های یک درصد و ده درصد نشتن داده شده‌است.

۱-۵-۴ شناسایی سیستم

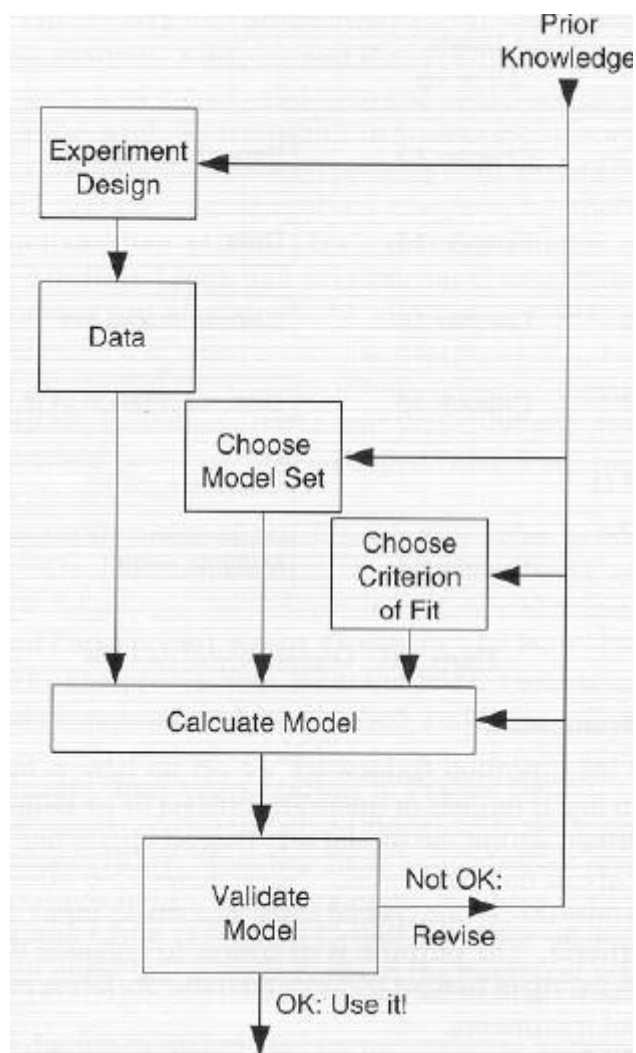
کیرستو^۲ و همکارانش روش دیگری را برای کنترل موتور دیزل ارائه کردند [۱۵]. آن‌ها ابتدا معادلات تجربی حاکم بر موتورهای EGR به همراه VGT را ملاک قرار داده و با در نظر گرفتن نقاط مطلوب در فضای محدود به کنترل موتور دیزل پرداختند.

در این تحقیق موتور دیزل یک سیستم غیرخطی متغیر با زمان در نظر گرفته‌شد. سپس به جای استفاده از فرمول‌های تجربی از شناسایی سیستم استفاده کردند. روش‌های مختلفی برای شناسایی سیستم‌ها وجود دارد که می‌توان به روش‌های ARMA، ARMAX، subspace method و Box-Jenkins اشاره کرد. در سیستم‌های غیرخطی هم می‌توان به روش هم‌رشتاین^۳ و شبکه عصبی اشاره کرد [۱۵]. اما در این تحقیق از روش CLOE^۴ استفاده شده است. در شکل (۱-۸) یک روند کلی از فرآیند شناسایی سیستم را مشاهده می‌کنید.

^۳ -matlab

^۴-closed loop output error

^۳ - Hammerstein model



شکل (۱-۱) روند کلی شناسایی سیستم [۱۵]

آن‌ها در این مقاله در این مقاله در دور موتورهای ۱۰۰۰rpm، ۱۶۰۰rpm و ۲۰۰۰rpm و نرخ سوخت ورودی ۴ kg/h و ۵ kg/h و ۶ kg/h در فاصله‌های زمانی ۰,۵ ثانیه نمونه برداری‌های خود را انجام دادند. بعد از بررسی‌های مختلف به یک مدل مطوب رسیدند و با روش قرار دادن قطب‌ها، کنترلر مورد نظر را طراحی کردند.

۱-۵-۵ روش LPV

محمد پور و همکارانش^۱ [۱۶] روش LPV^۲ را ارائه کردند. این روش برای سیستم های چند متغیره با شرایط متغیر چند ورودی چند خروجی (MIMO) که رفتار غیرخطی دارند مناسب است. این روش برای کاهش اثر کوپلینگ ارائه می شود.

به طور خاص، در این روش از پارامترهای دینامیکی و استاتیکی و تجزیه ماتریس انتقال از روش SVD برای به حداقل رساندن اثرات ترم های خارج از قطر ماتریس انتقال در سیستم برای به حداقل رساندن اثرات ترم های خارج از قطر ماتریس انتقال در سیستم MIMO استفاده می شود. در عین حال پارامترهای وابسته ماتریس دکوپله را طوری انتخاب کردند تا کنترلر LPV مناسبی داشته باشیم. آنها برای سیستم هوارسانی مدل سازی موتور دیزل از یک معادله دیفرانسیل غیرخطی مرتبه سه بهره بردند. شرایط شیر EGR و موقعیت VGT به عنوان ورودی انتخاب شد.

هدف کلی روش LPV در موتور دیزل دو چیز است:

- روش سیستماتیک برای تطبیق هم زمان ماتریس دکوپله و مقادیر طراحی شده در نوع و سرعت های مختلف سوخت.

- استفاده از روش LPV برای سیستم های دکوپله به منظور تضمین عملکرد سیستم حلقه بسته.

همچنین روش LPV یکی از روش های کنترل مقاوم است که هم تغییر عملکرد موتور وهم دینامیک مدل نشده و عدم قطعیت ها را نیز در نظر می گیرد.

۱-۵-۶ روش EGO

روش دیگری که آموستوز^۳ و همکارانش برای کنترل موتورهای دیزل در نظر گرفتند روش EGO^۱ است [۱۷].

^۱ -Javad Mohammadpour

^۲ - Linear parameter varying

^۳ - Alois Amstutz

در این روش با استفاده از یک سنسور میزان اکسیژن دود خروجی را اندازه‌گیری می‌کنند. آن‌ها به تأخیر موجود میان فرایند احتراق و اندازه‌گیری توجه نمودند. این روش متکی بر داده‌های قبل از عمل احتراق است؛ اما به هر گونه تغییر رفتار موتور حساس نیست که این نیز خود یک مشکل است. برای حل این مشکل نیاز به فیدبک دارد. فیدبک از اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی به دست می‌آید؛ اما از آنجایی که اندازه‌گیری تمام کمیت‌ها امکان‌پذیر نیست می‌توان آن‌ها را با روابط و کمیت‌های اندازه‌گیری شده به دست آورد. اندازه‌گیری میزان اکسیژن دود خروجی یک فرایند بسیار پیچیده است و در عملکرد موتور بسیار مهم است.

دو قابلیت مهم است که سنسور باید توانایی آن را داشته‌باشد:

- مقدار دقیق اکسیژن را در دود خروجی بتواند اندازه بگیرد.
- تا حد امکان این زمان اندازه‌گیری کوتاه باشد.

نکته مهم دیگر در رابطه با این سنسورها این است که باید در برابر دمای بالا مقاوم باشند.

این تحقیق به این نکته اشاره می‌کند که موتورهای رفتاری به شدت غیرخطی دارند؛ اما می‌توان آن‌ها را به سادگی حول یک نقطه خطی کرد به جای آنکه از کنترل تطبیقی و یا فازی استفاده کرد. نکته مهم در استفاده از این روش این است که باید موتور به خوبی کالیبره باشد.

در این تحقیق به این نکته اشاره می‌شود که روش متنی بر داده‌های پیش از عمل بهتر از روش فیدبک است. چون در فیدبک ما تأخیر زیادی داریم؛ اما می‌توانیم تغییرات عملکردی موتور را در نظر بگیریم. با اعمال همزمان این دو می‌توان انتظار داشت که در کوتاه‌ترین زمان عدم تطابق‌ها کاهش یابد.

۱-۵-۷ روش H □

¹ - Exhaust gas oxygen

این روش یک متد در تئوری کنترل برای به دست آوردن یک کنترلر پایدار است. در این روش مساله به عنوان یک مساله بهینه‌سازی ریاضی بیان و حل می‌شود. سپس کنترلر بهینه طراحی می‌شود. عیب این روش این است که نیاز به یک مدل دقیق و کامل به همراه اطلاعات ریاضی بالا دارد.

باید توجه داشته باشیم که کنترلر بدست‌آمده الزما بهترین و یکتا نیست؛ زیرا این کنترلر با توجه به تابع هزینه^۱ تعیین شده، بدست‌آمده است. همچنین در این روش محدودیت‌های غیر خطی به طور کلی گرفته شده است.

جانگ^۲ و همکارانش از روش $H \infty$ برای یک موتور دیزل استفاده کردند [۱۸]. در این تحقیق ابتدا از یک کنترلر خطی استفاده شد به طوری که معادلات را حول یک نقطه ثابت که همان نقطه کار باشد خطی سازی شد و معادلات فضای حالت را به دست آورده شد. این روش در یک بازه مشخص به خوبی جواب می‌دهد.

اما این روش ضعف خود را زمانی نشان می‌دهد که نیاز باشد با تغییر یک پارامتر، پاسخ متناظر با آن را بدست‌آید. در این صورت است که این روش پاسخ مناسبی از خود نشان نمی‌دهد و باید از روش دیگری استفاده کرد.

روشی که آن‌ها برای طراحی کنترلر در نظر گرفتند شامل پنج مرحله است:

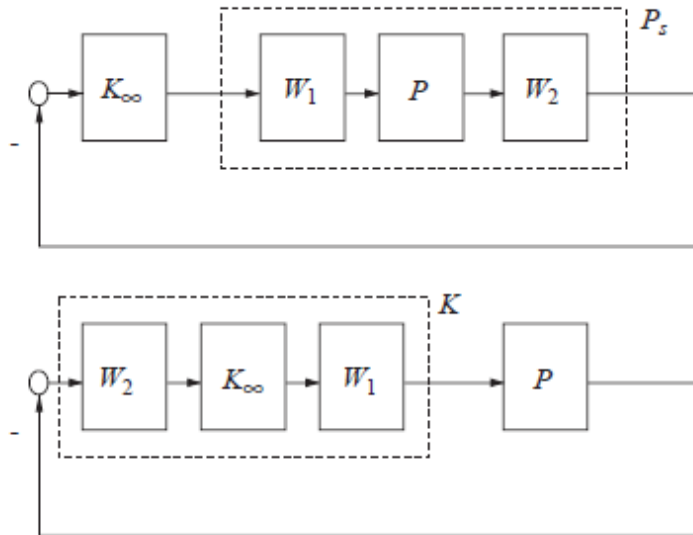
- مقادیر خروجی با ورودی مقایسه شود. اندازه‌گیری‌های سیگنالی باید به اندازه کافی باهم متفاوت باشند.
- از جبران سازهای w_1 و w_2 استفاده شود.
- پایداری بهینه محاسبه می‌شود.
- جداسازی کنترلر k با استفاده از روش $H \infty$.

¹ -cost function

² -Merten Jung

- ترکیب نتایج روش کنترلر H_∞ با W_1 و W_2 برای بدست آوردن کنترلر نهایی.

در شکل (۹-۱) بلوک دیاگرام روش H_∞ مشاهده می شود.



شکل (۹-۱) بلوک دیاگرام کنترلی روش H_∞

فصل دوم

سنسورها و محرک‌ها

۱-۲ شیرها و محرکه‌ها

امروزه در صنعت شیرهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیرها و محرکه‌های متفاوتی در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود که در این فصل به چند نمونه از آنها اشاره شده است. اهمیت این شیرها و محرکه‌ها از آن جهت است که تاثیر مستقیمی در مدل سازی و کنترل سیستم دارد.

۱-۱-۲ شیرهای پروانه‌ای

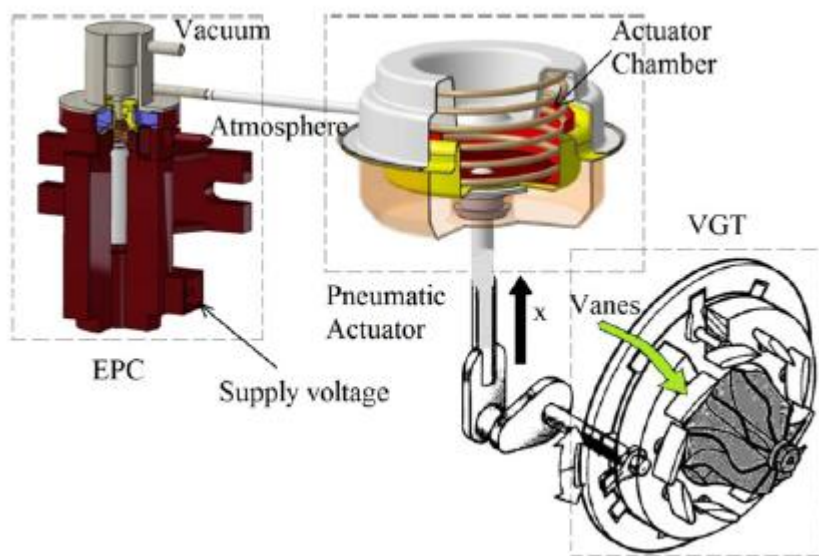
شیرهای پروانه‌ای شامل یک سیم‌پیچ استوانه‌ای برای ایجاد میدان مغناطیسی است که با یک ولتاژ AC یا DC به حرکت در می‌آید. این سیم‌پیچ استوانه‌ای توسط ولتاژ اعمال شده به شیر جابه‌جا می‌شود. سیم‌پیچ استوانه به وسیله یک چرخ و پینیون به شیر پروانه‌ای متصل است. نیروی الکترومغناطیسی باعث می‌شود استوانه توسط چرخنده پینیون جابجا شود.

رفتار تمام این شیرها غیرخطی است؛ اما معمولاً این مدل‌های غیرخطی را اطراف نقطه کار خطی می‌نمایند؛ همچنین اکثر سیستم‌های کنترل با اعمال ضریبی به این شیر، شیر را خطی در نظر می‌گیرند؛ اما در این حالت ممکن است نمودار موقعیت شیر بر حسب جریان در بعضی دماها غیرخطی شود [۱۹]. برای مدل‌سازی این سیستم‌ها زواری^۱ و همکارانش و همچنین رحمان^۲ و همکارانش تحقیقات گسترده‌ای را انجام دادند.

در شکل (۱-۲) دیاگرام آزاد یک شیر پروانه‌ای با محرک الکترومغناطیسی را می‌بینیم.

^۱- Zavarehi

^۲- Rahman



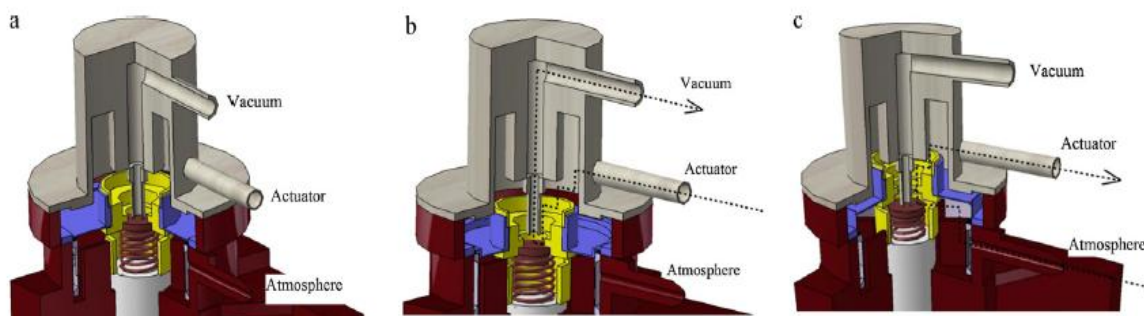
شکل (۲-۲) شیر الکتروپنیوماتیکی [۲۰]

مراحل انجام کار قسمت EPC به صورت زیر می باشد که در شکل (۳-۲) آورده شده است.

۱- پیستون غوطه‌ور در حال سکون است.

۲- نیروی مغناطیسی اعمال می شود.

۳- نیروی مغناطیسی برداشته می شود.



شکل (۳-۲) مراحل انجام کار قسمت EPC محرکه الکترو مغناطیسی [۲۰]

برای مدل‌سازی این محرکه فرضیاتی را باید در نظر گرفت. از جمله این فرضیات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- هوا گاز کامل است.

۲- هوا به طور یکنواخت در محفظه پخش می‌شود.

۳- فرآیند هم دما است.

۴- هیچ اتلاف انرژی از دیواره محرکه وجود ندارد.

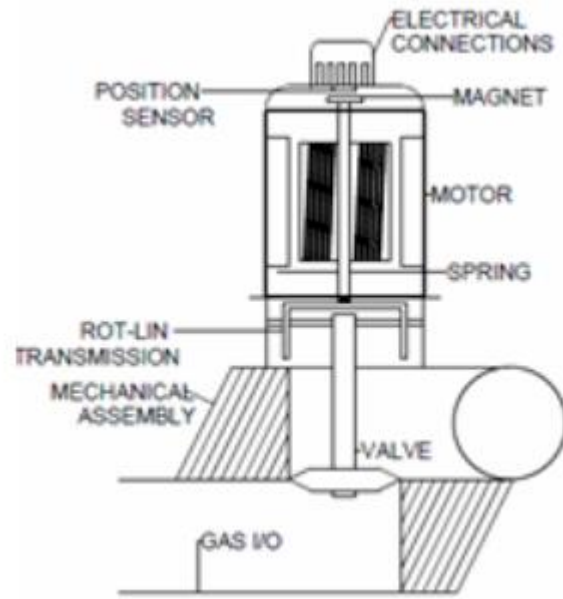
با در نظر گرفتن این فرضیات برای داخل محفظه این محرکه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dm}{dt} + mRT \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{V} \right] \quad (1-2)$$

۲-۱-۳ محرکه EGR والوو^۱

این محرکه از دو قسمت اصلی مجموعه موتور و مجموعه مکانیکی تشکیل شده است [۲۱]. قسمت موتور شامل موتور، فنر و سنسور موقعیت است. مجموعه مکانیکی هم شامل اتصالات شیر است. شفتی که در داخل محفظه اتصالات مکانیکی قرار گرفته است داخل یک شیار جا گرفته و باعث بالا و پایین رفتن مجموعه حول محور، زمان گردش می‌شود. شماتیک این سیستم را در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود.

1- Valeo



شکل (۲-۴) شماتیک یک شیر والوو [۲۱]

همچنین سیستم مکانیکی این محرکه را در شکل (۲-۵) مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که شفت درون شیر فیکس شده است.

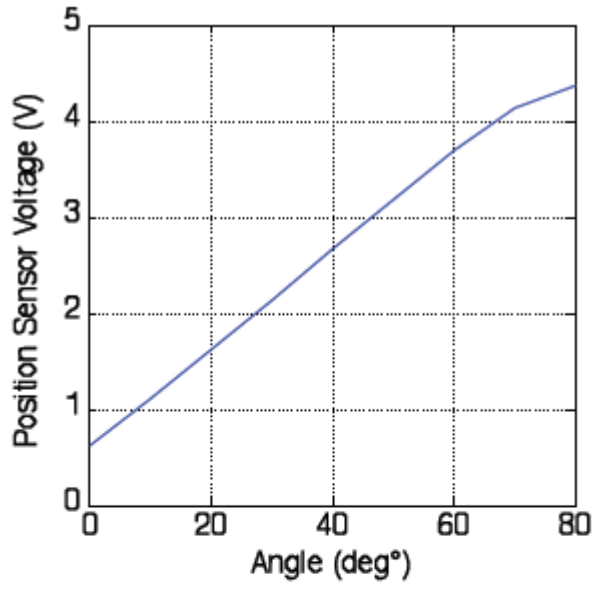


شکل (۲-۵) شفت فیکس شده درون شیر [۲۱]

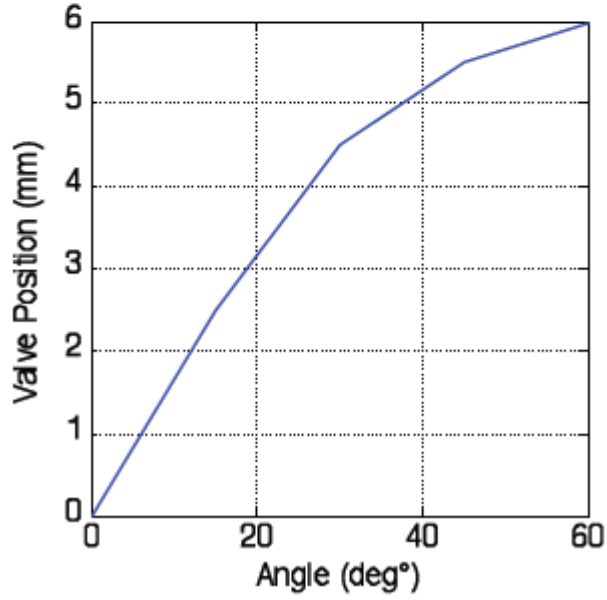
برای مدل‌سازی این سنسور نیز باید رابطه‌ای بین ولتاژ سنسور و موقعیت خطی شیر L و رابطه‌ای که با جریان دارد را به دست آورد؛ زیرا تنها کمیتی که می‌توان به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد. معادله زیر رابطه بین ولتاژ u و موقعیت خطی شیر L را توصیف می‌کند.

$$L = 0.05493u^4 - 0.05455u^3 + 1.475u^2 + 0.9962u - 1.06 \quad (۲-۲)$$

در شکل (۲-۶) که زاویه چرخش شیر بر حسب ولتاژ و جابجایی خطی شیر است را نشان می‌دهد. در نمودارهای فوق جابجایی خطی با حرکت چرخشی شیر متناسب نیست. همچنین همان طور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌کنید حداکثر حرکت چرخشی شیر حدود ۶۲ درجه و حداکثر حرکت خطی آن در حدود ۶ میلیمتر است.



(a)



شکل (۲-۶) مشخصه شیر والوو [۲۱]

۲-۲ سنسورها

۱-۲-۲ سنسور اکسیژن:

در سال ۱۹۶۸ زمانی که دوکر^۱ و همکارانش سنسور اکسیژن (EGO)^۲ را کشف کردند جرقه‌ای برای استفاده از سیستم کاتالیز سه راهه^۳ در موتورهای بنزینی (SI) زده شد. این سنسور غلظت اکسیژن را اندازه‌گیری می‌کند و در نتیجه می‌تواند نسبت هوا به سوخت معادل آن را به دست آورد [۲۲].

اما در اواخر دهه ۹۰ بود که سنسور UEGO تولید شد. از این نوع سنسور هم در موتورهای دیزلی و هم در موتورهای بنزینی استفاده می‌شود. این نوع سنسورها به سنسور سوئیچ نیز شناخته می‌شوند و به منظور سوئیچ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش متداول استفاده از این نوع سنسورها استفاده از مشخصه λ است. در موتورهای دیزل از λ به عنوان مشخصه‌ای برای تنظیم پاشش سوخت استفاده می‌شود.

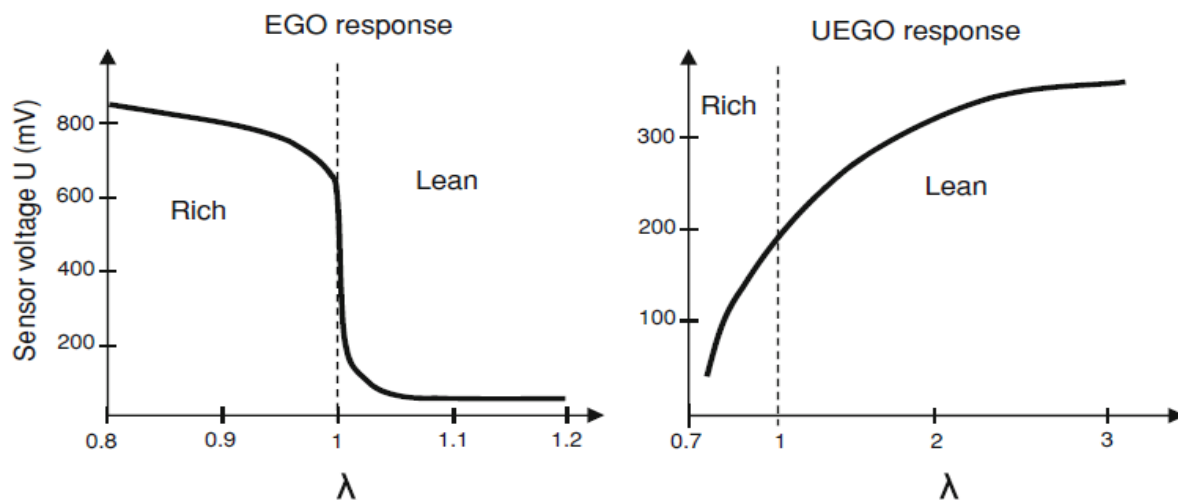
ابتدا λ از شکل (۷-۲) به دست می‌آید. سپس می‌توان با رابطه (۳-۲) λ را به نسبت هوا به سوخت تبدیل کرد.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \frac{1}{14.5} \quad (3-2)$$

¹- Dueker

²- exhaust gas oxygen

³- three way catalyst



شکل (۷-۲) مشخصه سنسورهای EGO و UEGO [۲۲]

۲-۲-۲ سنسور NO_x:

پیشرفت در تولید این نوع سنسورها توسط کاتو^۱ و ماکونوچی^۲ اتفاق افتاد؛ زیرا سنسورهای ساخته شده توسط آنها قادر به اندازه گیری در شرایطی بود که بخار هوای گاز خروجی را از بین نبرد [۲۲].

این سنسورها در یک فرآیند پانزده ساله تکمیل شدند تا در حال حاضر که به صورت فن آوری چند لایه ای مسطح ذرات ZrO₂ که توسط موس تولید شد، مورد استفاده قرار می گیرد.

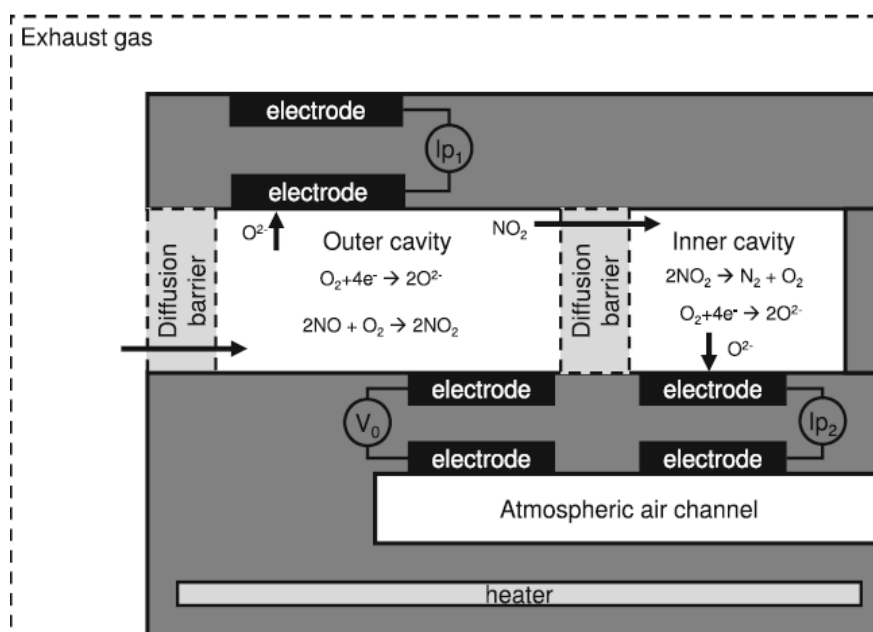
نسخه مدرن ارائه شده از این سنسورها قابلیت های قابل توجهی دارد. از جمله این قابلیت ها می توان به کاهش زمان اندازه گیری، ابعاد کوچک تر، جرم کمتر و تولید مقرون به صرفه تر به طوری که برای موتورهای تجاری هم قابل استفاده باشد نیز اشاره کرد. مزیت دیگر این سنسور این است که می تواند نسبت هوا به سوخت و غلظت NO_x را به طور همزمان اندازه گیری کند.

^۱-Kato

^۲-Makunouchi

به دلیل اهمیت این سنسورها محدودیت این سنسورها نیز موضوع مهمی است. مطالعات زیاد و دقیقی برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری و زمان پاسخ‌دهی این سنسورها توسط اسمیت^۱ و گالیندو^۲ انجام شده است. این سنسورها باید در زمان متعارف ۷۰ ms با دقت کافی به جواب برسند.

در شکل (۸-۲) نمایی از این سنسور را مشاهده می‌شود.



شکل (۸-۲) سنسور NO_x [۲۲]

۳-۲-۲ سنسور دوده

دوده از مخرب‌ترین مواد خروجی از اگزوز موتور است. تأثیر مخرب آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست بر کسی پوشیده نیست. با توجه به بررسی‌های کاسپر^۱ در سال ۲۰۰۴ ذرات با قطر کمتر تأثیر مخرب‌تری بر سلامتی افراد دارد [۲۲].

^۱ -Smith

^۲ -Galindo

پارامترهای مهم در این سنسورها علاوه بر استحکام و بسته‌بندی، محدودیت‌های دینامیکی و اندازه‌گیری دقیق است. مساله مهم دیگر در این سنسورها انتخاب معیار مناسب برای اندازه‌گیری است که به پارامترهایی مانند تعداد ذرات، اندازه آن‌ها و یا خواص جذب نور آن‌ها بستگی دارد.

یکی از راه‌های متداول در اندازه‌گیری دوده، اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی جز کربن دار موجود در دود خروجی است. این کربن نقش مقاومت بین دو الکتروود موجود در سنسور را ایفا می‌کند. اما در مجموع می‌توان گفت این سنسورها به اندازه سنسورهای قبلی تکامل نیافته‌اند و چند شرکت تولیدی کار ساخت و تولید آن را برای مصارف تجاری سال ۲۰۱۳ آغاز کردند.

۳-۲ مقدمه‌ای بر تکنولوژی شیرهای سروو

شیرهای سروو در ابتدا در صنعت هوانوردی برای کنترل دقیق یک هواپیما از طریق سیگنال‌های الکتریکی طراحی شده بود، استفاده شد. امروزه در صنعت از این تکنولوژی استفاده شده و تکنولوژی این شیرها هر روز جهت رسیدن به دقت مورد نیاز، اصلاح می‌شود [۲۳].

شیرهای سروو همانند دیگر شیرهای صنعتی گسترش پیدا کرده‌اند. شیرهای سروو دارای مزایایی می‌باشند که عبارت‌اند از:

- امکان مونتاژ قطعات با مدل‌های مختلف برای تمامی سایزها بر اساس استاندارد DIN ۲۴۳۴۰.
- قابل تعویض بودن موتور ،
- قابل تنظیم بودن به صورت خارجی و
- قابل تعویض بودن فیلتر شیر.

¹- Kasper

در سیستم‌های سروو، یک سیگنال ورودی کوچک در داخل آمپلی فایر به یک سیگنال خروجی بزرگ تبدیل می‌شود.

بهترین نمونه برای کاربرد سیستم‌های سروو، سیستم فرمان خودروها است، جایی که با کوچک‌ترین نیرو به غربالک فرمان، یک نیروی بزرگ روی چرخ‌ها به وجود می‌آید. شیر سروو با استفاده از آمپلی فایر، در مدارهای کنترل حلقه بسته، استفاده می‌شود. این سیستم نه تنها سیگنال ورودی را به حجم جریان تبدیل می‌کند بلکه میزان خطا را به صورت الکترونیکی اندازه‌گیری می‌کند و جهت تصحیح به شیر سروو فرمان می‌دهد.

۲-۳-۱ تعریف هیدرولیک سروو

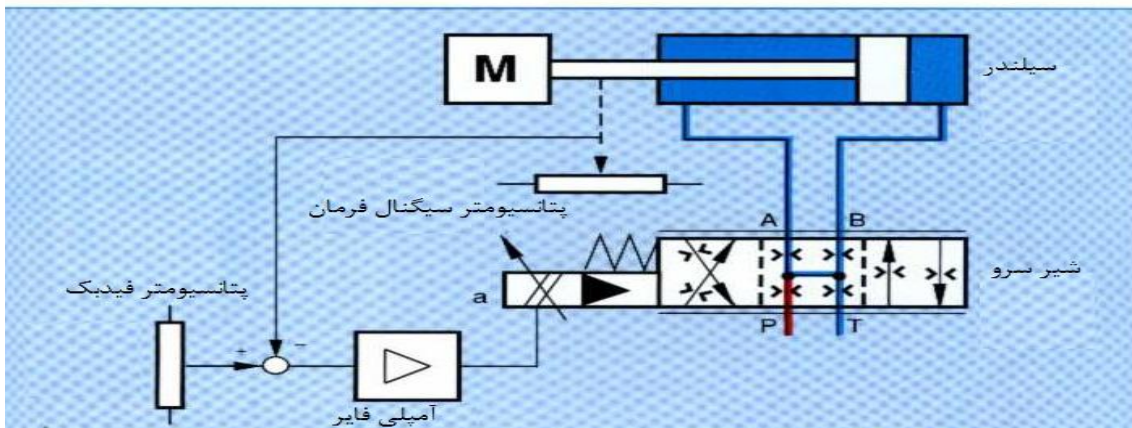
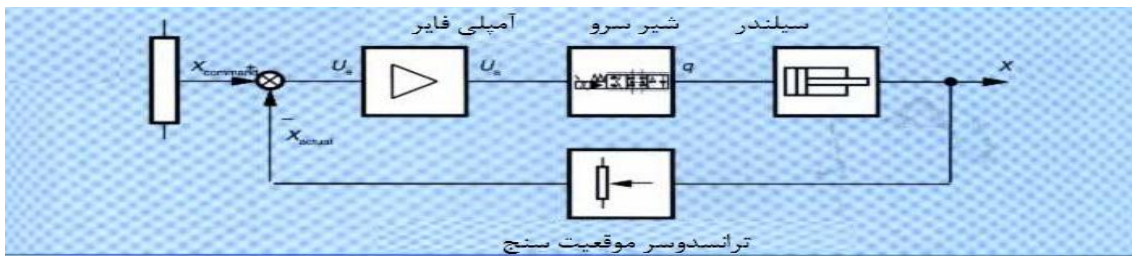
هیدرولیک سروو واژه‌ای است که هنوز هم نظرات مختلفی در خصوص معنی آن وجود دارد. به عنوان مثال یکی از معانی آن عبارت از: کنترل الکتروهیدرولیکی حلقه بسته. در کنترل حلقه بسته، عملکرد مجموعه به طور ثابت تحت کنترل است. این کار از طریق اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. مواردی که می‌توان آن‌ها را اندازه‌گیری کرد پارامترهای مکانیکی و یا هیدرولیکی می‌باشند. موارد مکانیکی عبارت‌اند از: جابجایی یا زاویه چرخش، سرعت یا سرعت دورانی، نیرو یا گشتاور و موارد هیدرولیکی شامل جریان و فشار است.

۲-۳-۲ فرق بین کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته شیرهای سروو

۲-۳-۲-۱ کنترل حلقه باز

همان طور که در شکل (۲-۹) مشاهده می‌شود زمانی که سوئیچ a بسته می‌شود، آمپلی فایر b یک سیگنال فرمان برای شیر کنترل جهت پروپرشنال می‌فرستد و باعث می‌شود که شیر باز شود در نتیجه جریان می‌تواند راه پیدا کند. این جریان به طرف سیلندر می‌رود و پیستون را در سیلندر حرکت می‌دهد.

همان طور که در شکل (۲-۹) مشاهده می‌شود، ولتاژ فرمان از طریق پتانسیومتر فرمان وارد آمپلی فایر می‌شود. این ولتاژ موقعیت پیستون را مشخص می‌کند؛ اما موقعیت واقعی پیستون از طریق پتانسیومتر فیدبک اندازه‌گیری می‌شود. این پتانسیومتر یک ولتاژ فیدبک به طرف آمپلی فایر ارسال می‌کند. در آمپلی فایر این دو ولتاژ (ولتاژ فرمان و ولتاژ فیدبک) با هم مقایسه می‌شوند و یک سیگنال خطا تولید می‌شود. این سیگنال خطا باعث می‌شود شیر سروو دوباره تحریک شود. در نتیجه شیر سروو باز می‌شود و سیلندر حرکت می‌کند. هنگامی که موقعیت واقعی پیستون تغییر می‌کند، ولتاژ واقعی که به وسیله پتانسیومتر فیدبک به وجود می‌آید نیز تغییر می‌کند. به تدریج ولتاژ واقعی به ولتاژ فرمان نزدیک می‌شود تا این که بالأخره مساوی هم می‌شوند. در این فرآیند، سیگنال خطا، کم و کمتر می‌شود. این بدان معنا است که به تدریج شیر سروو بسته می‌شود در نتیجه سرعت پیستون کمتر می‌شود. هنگامی که پیستون به موقعیت مورد نظر رسید، سیگنال خطا صفر می‌شود و در نهایت شیر سروو بسته می‌شود.



شکل (۲-۱۰) کنترل حلقه بسته شیر سرو

موتور گشتاوری، یک جریان الکتریکی کوچک را به یک جابجایی مکانیکی تناسبی تبدیل می‌کند. در بیشتر شیرهای سرو، موتور گشتاوری یک واحد مجزا است که به صورت جداگانه بر روی شیر نصب می‌شود. یک موتور گشتاوری خشک در مقابل قسمت هیدرولیکی، کاملاً آب بندی است.

۳-۳-۲ طراحی مراحل شیرهای سرو

شیرهای سرو در طرح‌های یک، دو و سه مرحله‌ای وجود دارند. شیر تک مرحله‌ای یک شیر عملیاتی مستقیم هست. شیر دو مرحله‌ای، ترکیبی از یک مرحله‌ی هدایتی و مرحله‌ی اصلی نهایی می‌باشد. شیرهای سه مرحله‌ای نیز مشابه دو مرحله‌ای می‌باشند، با این تفاوت که مرحله‌ی هدایت شامل دو شیر سرو است. شیرهای سرو سه مرحله‌ای زمانی کاربرد دارند که جران بالا مد نظر باشد.

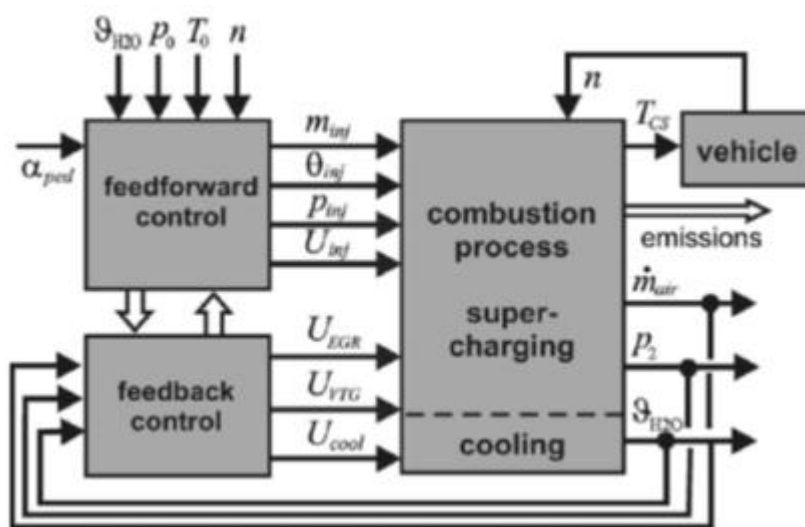
- اولین مرحله‌ی شیرهای سروو تقویت‌کننده‌ی آبی و هوایی است. این مرحله یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی است. نازل فلپر، لوله جت، موتور نیرو یا دینام، این مراحل همان چهار مرحله‌ی مهم طراحی می‌باشند.
- نازل‌های فلپر از یک ناحیه‌ی استوانه‌ای شکل که توسط یک صفحه‌ی تخت که در امتداد یک ارفیس با نوک‌تیز حرکت می‌کند شکل می‌گیرند تا سرعت جریان را افزایش دهند.
- لوله‌های جت فشار سیال را به مومنتوم توسط یک نازل قابل تحرک تبدیل می‌کند.
- موتورهای سروو از جمله مراحل هدایتی مستقیم هستند که از یک موتور مغناطیسی تفاضلی پایدار برای افزایش جریان استفاده می‌کند.
- شیرهای سیم‌پیچ شده‌ی سروو از یک سیم‌پیچ مغناطیسی کافی برای کنترل جریان استفاده می‌کند.

فصل سوم

معادلات و مدل سازی

۱-۳ ساختمان کنترلی موتورهای درون سوز

هر روز بر شمار اجزاء تشکیل دهنده موتورهای درون سوز افزوده می‌شود. پارامترهای کنترل موتورهای دیزلی تا سال ۱۹۸۷ تنها منحصر به جرم سوخت پاششی و زاویه شروع پاشش بود؛ اما امروزه شاهد افزایش پارامترهای کنترلی همچون وضعیت شیر EGR، هندسه توربین و فشار ریل سوخت و ... هستیم [۲۴]. در شکل (۱-۳) ساختمان کنترلی یک موتور دیزل را می‌بینیم.



شکل (۱-۳) ساختمان کنترلی ساده شده یک موتور دیزل مجهز به توربوشارژر [۲۴]

بنابراین سیستم‌های کنترل موتور باید بر اساس ۵ تا ۱۰ پارامتر ورودی و ۵ تا ۸ پارامتر خروجی طراحی شوند، که این خود منجر به یک سیستم کنترلی چند ورودی-چند خروجی پیچیده خواهد شد. از آنجا که اکثر توابع کنترلی به صورت پیش خور طراحی می‌گردد، لذا لازم است تا مدل‌های بسیار دقیق مورد استفاده قرار گیرد.

اصولاً در ادبیات موضوع به منظور کنترل موتور از سه راه کلی استفاده شده است [۲۵]:

- کنترل مسیر سوخت؛

- کنترل مسیر هوا؛

- کنترل مسیر EGR.

برای کنترل همزمان شیر EGR، مقدار هوا به سوخت و همچنین موقیت شیر توربوشارژر از کنترل مسیر هوا استفاده می‌شود. زیرا از کنترلرهای مسیر سوخت و کنترل EGR در موتورهای دور آرام استفاده می‌شود.

۲-۳ مدل‌سازی دینامیکی موتور

در این قسمت مدل‌سازی سیستم هوا رسانی یک موتور توربوشارژر دیزل به همراه EGR و VGT انجام شده است. مدل ساده‌شده از هدایت هوا در موتور را که از یک معادله غیرخطی درجه سوم برای توصیف این سیستم استفاده شده است، در این قسمت آمده است [۸]. در مدل ساده‌شده غیرخطی سیستم هوا رسانی، دینامیک چند راهه‌ها با فرض ایده‌آل بودن هوا برای هر یک از چندراهه‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است؛ زیرا می‌توان هوا را با یک تقریب مناسب گاز ایده‌آل در نظر گرفت. معادلات این مدل‌سازی اولین بار توسط جانگ^۱ مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. در [۲۴] و [۲۵] مقایسه بین سیستم مدل ساده‌سازی شده و مدل کامل، انجام شده و نتایج مطلوبی بدست آمده است که در قسمت اعتبار سنجی مدل به آن‌ها اشاره شده است.

۱-۲-۳ معادلات حلقه هوا رسانی

۱-۱-۲-۳ معادلات منیفولد خروجی

معادلات منیفولد خروجی با فرض ایده‌آل بودن هوا و با استفاده از دینامیک گازها، رابطه بین دبی و انتقال انرژی را توصیف می‌کند [۲۴].

^۱ - Jang

$$\dot{P}_3 = \frac{\gamma R}{V_3} [(W_e + W_f)T_{c,evo} - W_{egr}T_3 - W_t T_3] \quad (1-3)$$

$$\dot{F}_3 = \frac{RT_3}{P_3 V_3} (W_e + W_f)(F_{eo} - F_3) \quad (2-3)$$

$$T_3 = \frac{RT_3}{P_3 V_3} [(W_e + W_f)(\gamma T_{c,evo} - T_3) + W_t(\gamma T_3 - T_t) + W_{egr}(T_3 - \gamma T_{egr})] \quad (3-3)$$

که در معادلات فوق هر کدام از متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

V_3 = حجم منیفولد خروجی. W_{egr} = نرخ گاز عبوری از شیر EGR.

W_t = نرخ گاز عبوری از توربین. W_f = نرخ سوخت عبوری.

W_e = نرخ گاز عبوری از سیلندر γ = ثابت مخصوص گازها.

F_{eo} = اصطکاک اکسیژن خروجی از سیلندر. T_t = دمای گاز عبوری از توربین.

T_{egr} = دمای گاز عبوری از شیر EGR.

۳-۲-۱-۲ معادلات حاکم بر سیستم توربو شارژر به همراه خنک‌کن داخلی

سیستم توربوشارژر یک موتور دیزل را می‌توان با یک معادله مرتبه اول توصیف کرد که توان کمپرسور و توربوشارژر را به هم مرتبط می‌کند.

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} (P_t - P_c). \quad (4-3)$$

$$P_t = W_T C_p T_3 \eta_t \left(1 - \left(\frac{p_t}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad (5-3)$$

$$P_c = W_c C_p T_{amb} \frac{1}{\eta_c} \left(\left(\frac{p_t}{P_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (6-3)$$

که هر کدام از متغیرهای معادلات فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند.

W_c = نرخ گاز عبوری از کمپرسور. p_t = فشار گاز خروجی از توربین.

η_t = راندمان توربین. P_c = توان کمپرسور.

η_c = راندمان کمپرسور. P_t = توان توربین.

P_{amb} = فشار محیط. T_{amb} = دمای محیط.

τ_c = ثابت زمانی.

همچنین معادله انبقال حرارت خنک کن داخلی نیز طبق معادله (7-3) بیان می‌شود.

$$T_{ht} = \eta_{ic} T_{coolant} + (1 - \eta_{ic}) T_c \quad (7-3)$$

که در معادله فوق هر کدام از متغیرها به صورت زیر توصیف می‌شود:

T_c = دمای قبل از خنک کن.

T_{ht} = دمای بعد از خنک کن.

η_{ic} = راندمان خنک کن.

$T_{coolant}$ = دمای داخل خنک کن.

را نشان می دهند.

۳-۲-۳ معادلات حاکم بر منیفولد ورودی:

معادله گاز ورودی منیفولد نیز با مقدار دمای ورودی و دبی توصیف می شود. این معادلات هم با فرض ایده-آل بودن هوا به دست آمده است.

$$\dot{P}_1 = \frac{\gamma R}{V_1} [W_C T_{th} + W_{egr} T_{egr} - W_e T_1] \quad (۸-۳)$$

$$\dot{T}_1 = \frac{RT_1}{P_1 V_1} [W_C (\gamma T_{th} - T_1) + W_{egr} (\gamma T_{egr} - T_1)]. \quad (۹-۳)$$

$$\dot{F}_1 = \frac{RT_1}{P_1 V_1} (W_C F_{amb} - F_1) + W_{egr} (F_3 - F_1). \quad (۱۰-۳)$$

که در معادلات بالا: V_1 حجم منیفولد ورودی است.

حال باید در معادلات بالا مقادیر دبی ها را جایگزین کرد. دبی کمپرسور، دبی توربین و دبی EGR مواردی می باشند که باید در معادلات جایگزین شوند.

$$W_c = \frac{\eta_c}{C_p T_a} \left(\frac{P_c}{\left(\frac{P_1}{P_3}\right)^\gamma} \right) \quad (11-3)$$

$$W_{egr} = \frac{X_{egr} P_3}{\sqrt{RT_3}} \sqrt{2 \frac{P_1}{P_3} \left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)} \quad (12-3)$$

$$W_{ie} = \frac{\eta_v P_1 V_d N}{120 RT_1} \quad (13-3)$$

$$W_{ie} = W_{egr} + W_c \quad (14-3)$$

که در معادلات فوق متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شود:

X_{egr} = سطح موثر شیر EGR. R = ثابت جهانی گازها که برابر $\frac{J}{kgK} 287$ است.

V_d = حجم جابجایی سیلندر. N = سرعت موتور.

با جای گذاری معادلات دبی در معادلات فشار منیفولد ورودی و خروجی هم می‌توان به معادلات (3-15) و (3-16) و (3-17) رسید.

$$\dot{P}_1 = \frac{RT_1 \eta_c P_c}{V_1 C_p T_a \left(\left(\frac{P_1}{P_a} \right)^\gamma - 1 \right)} - \eta_v \frac{P_1 V_d N}{120 V_1} \quad (15-3)$$

$$+ \frac{RT_1 P_3}{V_1 \sqrt{RT_3}} \sqrt{2 \frac{P_1}{P_3} \left(1 - \frac{P_1}{P_3} \right)} A_r$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\eta_v T_3 P_1 V_d N}{T_1 V_3 120} + \frac{W_f RT_3}{V_3} \quad (16-3)$$

$$- \frac{RT_3 P_3}{\sqrt{RT_3} V_3} \sqrt{2 \frac{P_1}{P_3} \left(1 - \frac{P_1}{P_3} \right)} A_r$$

$$- \frac{RT_3 P_3}{\sqrt{T_3} V_3} \sqrt{2 \frac{P_a}{P_3} \left(1 - \frac{P_a}{P_3} \right)} A_{vgt}$$

$$\dot{P}_c = -\frac{P_c}{\tau_c} + \frac{\eta_t \eta_m C_p T_3}{\tau_c} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_3} \right)^\mu \right) \frac{P_3}{\sqrt{T_3}} \quad (15-3)$$

$$\times \sqrt{2 \frac{P_a}{P_3} \left(1 - \frac{P_a}{P_3} \right)} A_{vgt}$$

۳-۳ اعتبارسنجی مدل

به منظور طراحی کنترلر به یک مدل دقیق و تا حد امکان ساده نیاز است. چنان که بررسی شد، مدل مورد استفاده با استفاده از روش مقدار میانگین طراحی شد. به منظور اطمینان از صحت مدل، لازم است تا مدل ایجاد شده تحت ورودی‌های مختلف آزمایش شود و نتایج با نتایج حاصل از آزمون موتور مقایسه گردد.

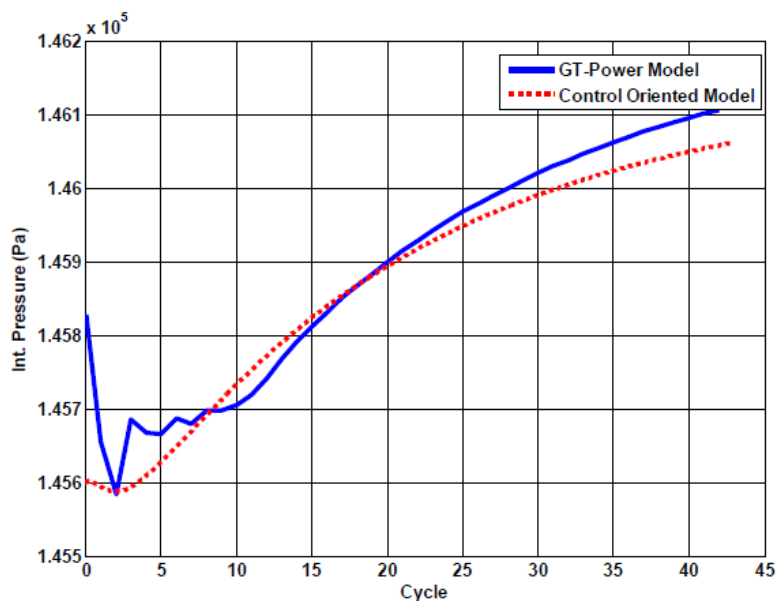
چنین عملی را اعتبارسنجی مدل می‌نامیده می‌شود [۲۴].

یان^۱ و همکارانش که در دانشگاه اهیو^۲ به منظور بررسی صحت مدل، نتایج حاصل از مدل سازی گرفته شده را با مقادیر واقعی را مقایسه نمودند. نتایج بدست آمده مطلوب به نظر می رسد.

برای این کار از نرم افزار^۳ GT-Power که یک موتور تک سیلندر که شامل یک حلقه پر فشار EGR و توربو شارژر است استفاده می شود. شرایط موتور نیز در حالت دور موتور ثابت 1500rpm و حالت ثابت شیر EGR و پره های ثابت توربین در نظر گرفته شده است.

دو حالت را در نظر می گیریم:

۱- زمان بندی پاشش با گام های ۱۰ درجه تغییر کند. در این حالت دما و فشار ورودی و کسر اکسیژن را بر حسب تعداد سیکل بررسی می شود. در نمودارهای (۳-۴)، (۳-۵) و (۳-۶) مقایسه ای بین نمونه آزمایش شده و نتایج به دست آمده از نرم افزار GT-Power ارائه شده است.

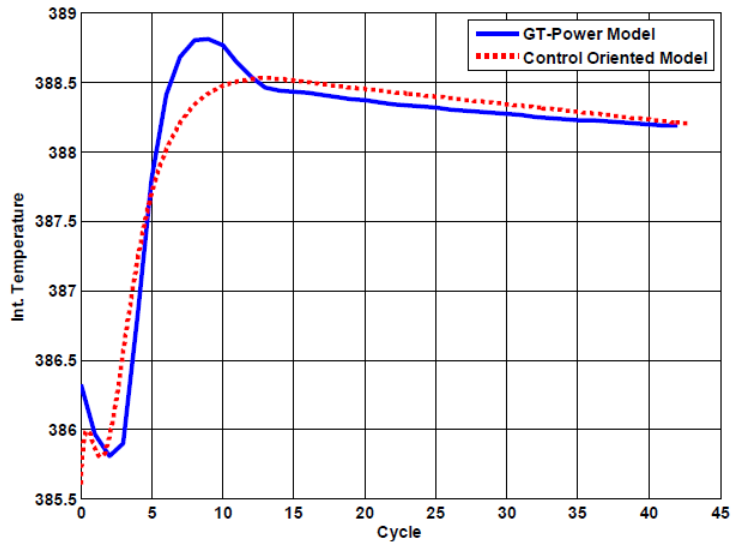


شکل (۳-۲) مقایسه فشار ورودی در حالت اول [۲۴]

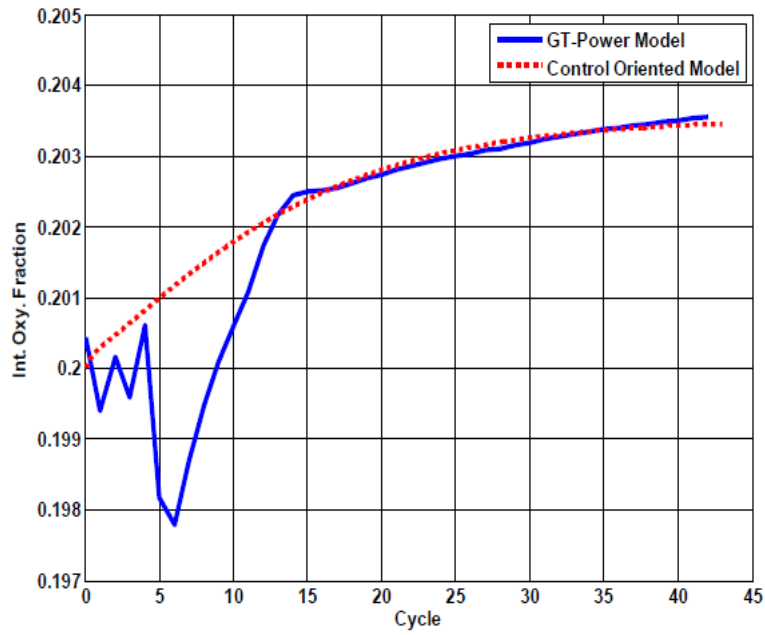
¹ -Yan

² -ohio

³ - GT Power Diesel engine model

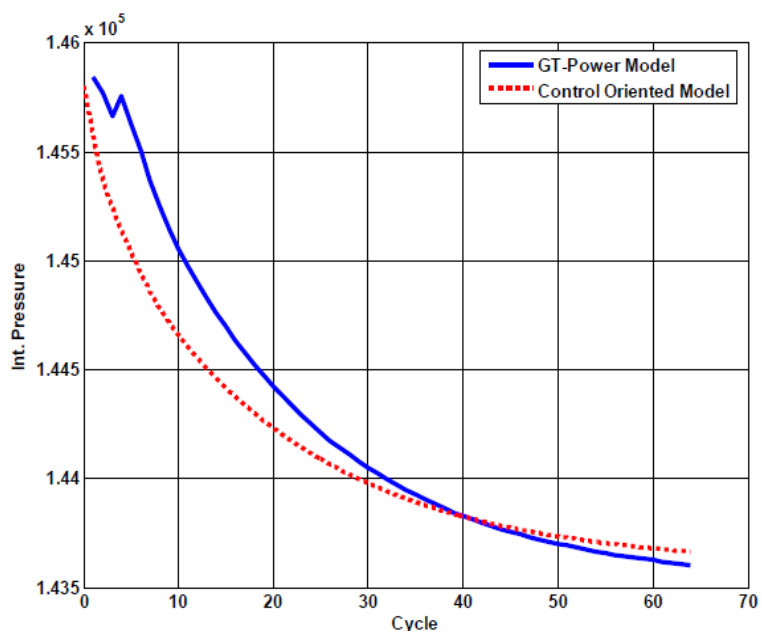


شکل (۳-۳) مقایسه دمایی ورودی در حالت اول [۲۴]

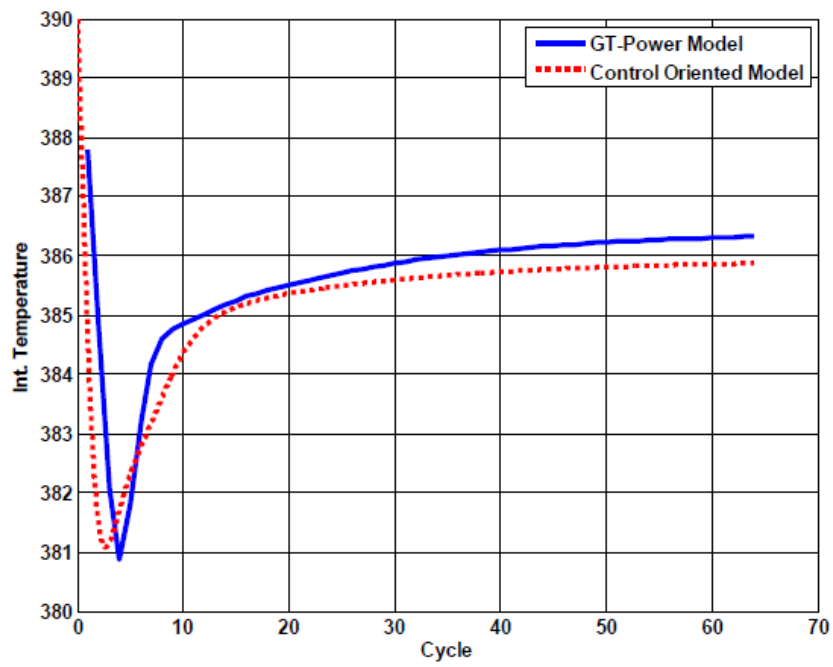


شکل (۳-۴) مقایسه نسبت اکسیژن در حالت اول [۲۴]

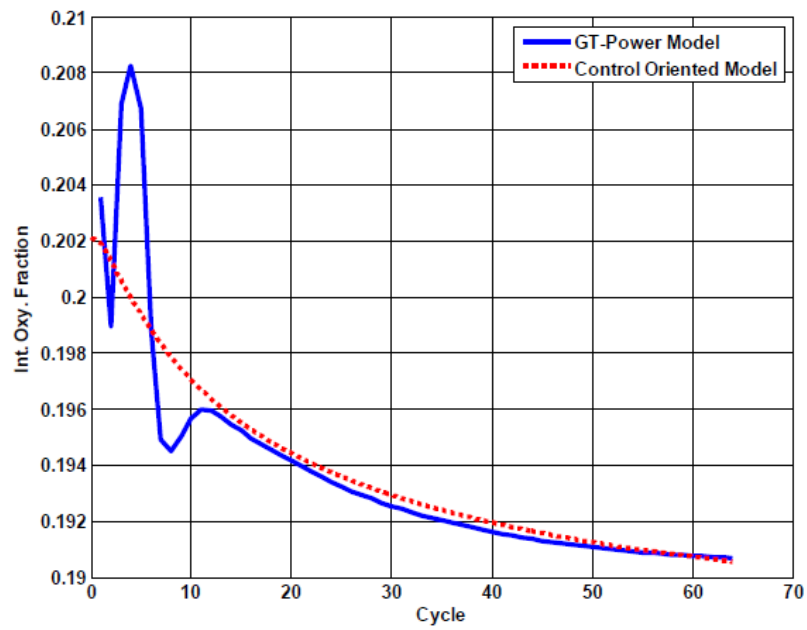
۲- برای حالت دوم مقدار سوخت پاشش شده را از 70mg/cyc به 80mg/cyc رسانده می شود . مشابه حالت قبل مقایسه مدسازی با مقادیر واقعی را در نمودارهای زیر مشاهده می شود.



شکل (۳-۵) مقایسه فشار ورودی در حالت دوم [۲۴]



شکل (۳-۶) مقایسه دمای ورودی در حالت دوم [۲۴]



شکل (۳-۷) مقایسه نسبت اکسیژن در حالت دوم [۲۴]

همان‌طور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود نتایج به‌دست آمده در نرم‌افزار با مدل گفته شده هم-
خوانی مطلوبی دارد. مشاهده می‌شود که بعد از انجام چند سیکل خطوط ردگیری بر هم منطبق شده و
خطای ناشی از تفاضل شبیه‌سازی و مدل به صفر نزدیک می‌شود [۲۴]

فصل چهارم
روش خطی سازی فیدبک

۴-۱ مقدمه

بعد از مطالعه دینامیک و مدل‌سازی سیستم در فصل قبل در این فصل به مبحث کنترل سیستم موتورهای احتراق داخلی پرداخته شده است. از آنجایی که موتور دیزل یک سیستم کاملاً غیرخطی با چند ورودی و چند خروجی است باید از روش کنترل غیر خطی بهره برد. کنترل پس‌خورد یکی از شاخه کنترل غیرخطی است که در این فصل مورد توجه قرار گرفت.

سیستم های زیادی وجود دارد که مستلزم استفاده از کنترل پس‌خورد است. علاوه بر این بسته به هدف طراحی، فرمول‌بندی‌های مختلفی برای مسائل کنترل وجود دارد. مواردی مانند پایدارسازی، ردیابی، حذف و یا تضعیف اغتشاشات موجب پدید آمدن مسائل گوناگونی در حوزه کنترل غیرخطی می‌شود.

علاوه بر این در مسائل کنترل اهداف دیگری برای طراح مد نظر است. از جمله این اهداف می‌توان به برآورده شدن خواسته‌های ویژه در پاسخ گذرا و یا تأمین قیود خاص بر ورودی نام برد. ممکن است این خواسته‌ها با هم در تضاد باشند که در این حالت لازم است طراح مصالحه‌ای بین آن‌ها به وجود آورد [۲۷، ۲۶].

تلاش برای طراحی کنترل پس‌خورد که توانایی مقابله با محدوده وسیعی از عدم قطعیت‌های مدل را داشته باشد، موجب بروز فرمول‌بندی‌های خاص در کنترل مقاوم و تطبیقی می‌گردد. در کنترل مقاوم عدم قطعیت مدل را به عنوان آشفتگی نسبت به مدل نامی در نظر گرفته می‌شود.

کنترل مقاوم در پی آن است که بتواند برای مدل‌هایی که دارای عدم قطعیت است، هدف کنترل را برآورده کند. این در حالی است که در کنترل تطبیقی عدم قطعیت را به صورت جمله‌هایی از پارامترهای

معین اما مجهول پارامتریزه نموده و تلاش می‌کند که به کمک پسخور این پارامترها را به صورت one line و در حین عمل سیستم به روز آوری نماید. مبحث مقابله با عدم قطعیت‌های مدل در فصل بعد مورد توجه قرار گرفته و در ادامه کنترل به روش خطی سازی پسخورد ارائه شده است.

۲-۴ خطی سازی

روش‌های طراحی در کنترل بر اساس فرض اصلی عملکرد در محدوده کوچک برای مدل خطی استوار است. هنگامی که محدوده عملکرد مورد نیاز بازه وسیعی از فرکانس‌ها را در بر می‌گیرد کنترلر خطی عملکرد ضعیفی خواهد داشت؛ زیرا قادر به جبران اثرات غیرخطی سیستم به طور کامل نیست. از این رو نیاز به روش‌های غیر خطی دیگری نیز می‌باشد.

در ادامه با ارائه مطالبی در ارتباط با روش خطی سازی فیدبک و کنترل مد لغزشی که در فصل آینده مورد بررسی قرار می‌گیرد، شرایط لازم جهت طراحی با هر یک از روش‌ها را عنوان کرده و در پایان به بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده با استفاده از دو روش مذکور پرداخته خواهد شد.

۳-۴ روش خطی سازی فیدبک

ایده اصلی روش خطی سازی فیدبک مبتنی بر تغییر مختصات یک سیستم غیرخطی به نحوی است که با تبدیل کل دینامیک‌های سیستم غیرخطی یا بخشی از آن‌ها به دینامیک‌های خطی، روش کنترل خطی در سیستم قابل اجرا باشد.

البته این روش مقاوم بودن سیستم در برابر تغییر پارامترهای نامعین و یا اغتشاشات را تضمین نمی‌کند. همچنین با توجه به حجم محاسباتی زیاد این روش، کاربرد عملی آن محدود است.

سیستم غیرخطی خودگردان به صورت معادله (۱-۴) را در نظر بگیرید:

$$x^n = f(x) + g(x)u \quad (1-4)$$

$$Y = h(x) \quad u \in R^m \quad x \in R^n$$

که در آن $f(x)$ و $g(x)$ توابعی خطی و هموار می‌باشند. از آنجایی که بررسی عملکرد یک سیستم غیرخطی در نقطه تعادل آن انجام می‌گیرد، بدون از بین رفتن کلیت مساله می‌توان در روش‌های مختلف طراحی نقطه تعادل را برابر (۰ و ۰) در نظر گرفت.

خطی سازی ورودی-حالت

خطی سازی ورودی-حالت با ترکیبی از تبدیل حالت و تبدیل ورودی و به کارگیری فیدبک هر دو به دست می‌آید. مساله طراحی ورودی u در یک سیستم غیرخطی از روش خطی سازی ورودی-حالت به دو بخش تقسیم می‌شود.

مرحله اول پیدا کردن یک تبدیل حالت $Z(x)$ و یک ورودی $u(x,v)$ است که قادر به تبدیل دینامیک‌های سیستم غیرخطی به دینامیک خطی متغیر با زمان به فرم $Z=az+bv$ باشد. به این ترتیب می‌توان در مرحله دوم از روش‌های استاندارد خطی برای طراحی کنترل کننده سیستم غیرخطی استفاده کرد.

برای پیاده‌سازی این قانون کنترل، مؤلفه‌های حالت جدید در دسترس بوده و از نظر فیزیکی معنادار باشند. اگر عدم قطعیت در مدل وجود داشته باشد این امر باعث ایجاد اشتباه در محاسبات حالت جدید و هم در کنترل کننده می‌شود [۲۶].

۴-۴ شبیه‌سازی:

برای شبیه‌سازی این سیستم ابتدا باید تابع کنترلر را از روی روابط بدست آورد. در روش خطی‌سازی فیدبک ابتدا باید معادله فضای حالت به صورت معادله (۲-۴) نوشته شود:

$$\dot{x} = fx + gu \quad (۲-۴)$$

مقدار خطا هم به صورت معادله (۳-۴) است:

$$\begin{aligned} e &= x_d - x \\ \dot{e} &= \dot{x}_d - \dot{x} \end{aligned} \quad (۳-۴)$$

ابتدا باید u را از معادله (۳-۴) مستقل کرد تا بتوان شکل تابع کنترلر را حدس زد:

$$\dot{x} - fx = gu \rightarrow u = g^{-1}(\dot{x} - fx) \quad (۴-۴)$$

با توجه به معادله (۴-۴) u به شکل معادله (۵-۴) پیشنهاد می‌شود:

$$u = g^{-1}(\dot{x}_d + k_p e - fx) \quad (۵-۴)$$

با جایگذاری u در معادله (۲-۴) داریم:

$$\dot{x} = fx + g(g^{-1}(\dot{x}_d + k_p e - fx)) \quad (۶-۴)$$

با ساده‌سازی معادله (۶-۴) داریم:

$$\dot{x} = fx + g g^{-1}(\dot{x}_d + k_p e - fx) \quad (۷-۴)$$

$$\dot{x} = f\dot{x} + \dot{x}_d + k_p e - f\dot{x} \quad (۸-۴)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_d + k_p e \quad (۹-۴)$$

$$\dot{e} + k_p e = 0 \quad (۱۰-۴)$$

با انتخاب ماتریس قطری و مثبت k_p با توجه به معادله (۱۰-۴) و با گذشت زمان مقدار خطا به صفر میل می‌کند.

مقادیر پارامترها را به صورت زیر در نظر گرفته میشود:

$$R=۲۹۸ \text{ J/KgK}$$

$$V_1=۰,۰۰۱ \text{ m}^3$$

$$\eta_i=۰,۷۶$$

$$V_2=۰,۰۰۶ \text{ m}^3$$

$$\eta_m=۰,۹۸$$

$$T_1=۲۹۸ \text{ K}$$

$$\eta_c=۰,۸$$

$$T_2=۵۰۹ \text{ K}$$

$$\eta_v=۰,۸۷$$

$$P_a=۱۰۱,۳ \text{ KPa}$$

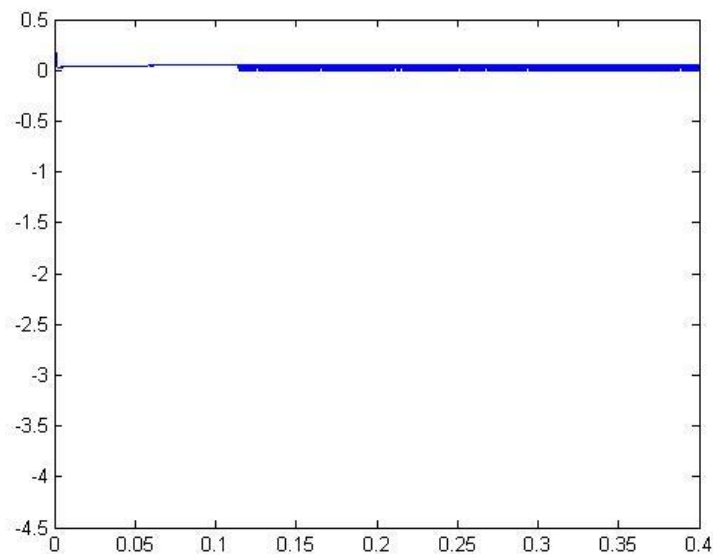
$$N=۲۰۰۰ \text{ rpm}$$

$$C_p=۱۰۱۴,۴ \text{ J/KgK}$$

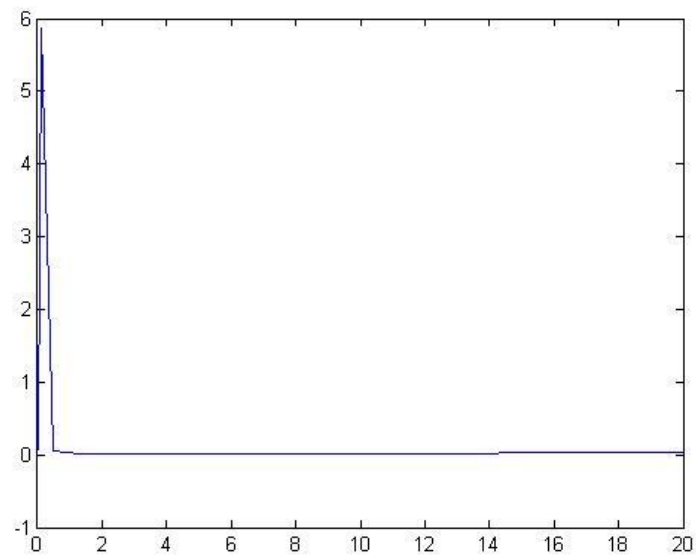
$$C_v=۷۲۷,۴ \text{ J/Kgk}$$

با توجه به معادلات ذکر شده در فصل قبل و اعمال کنترلر طبق روابط فوق نتایج شبیه‌سازی سیستم

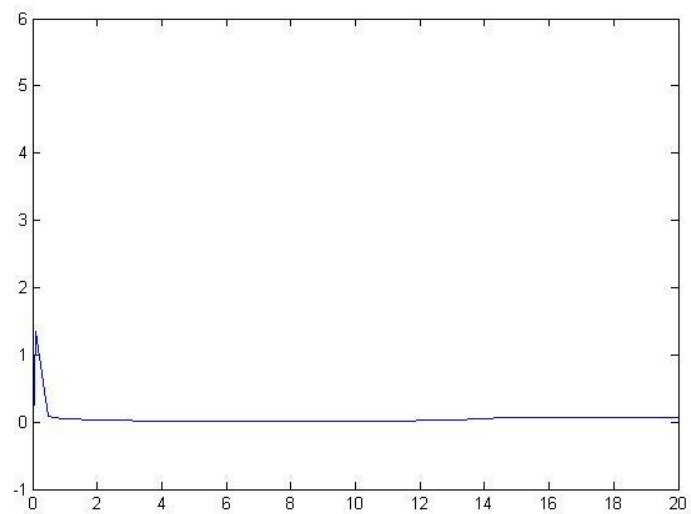
مورد نظر در نرم‌افزار متلب در شکل‌های (۲-۴) تا (۷-۴) ترسیم شده‌است:



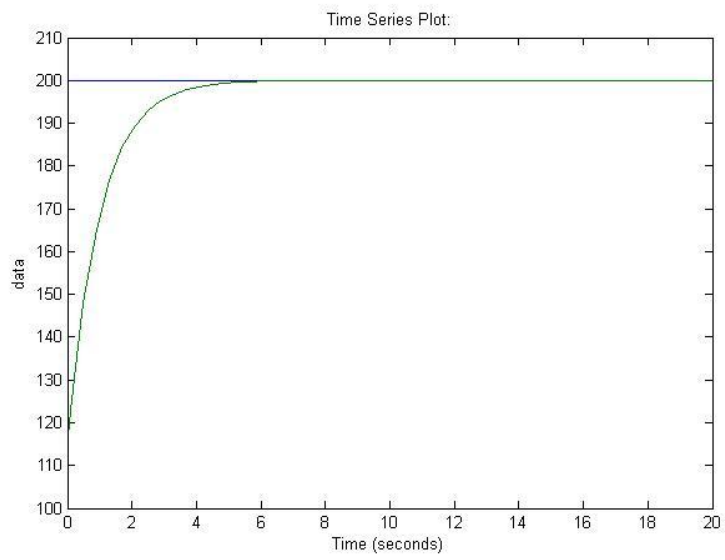
شکل (۴-۱) کنترلر EGR



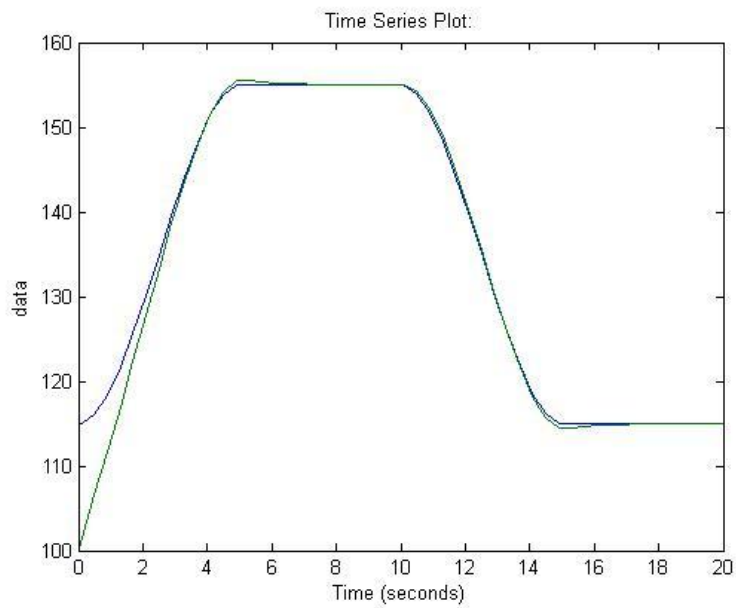
شکل (۴-۲) کنترلر W_f



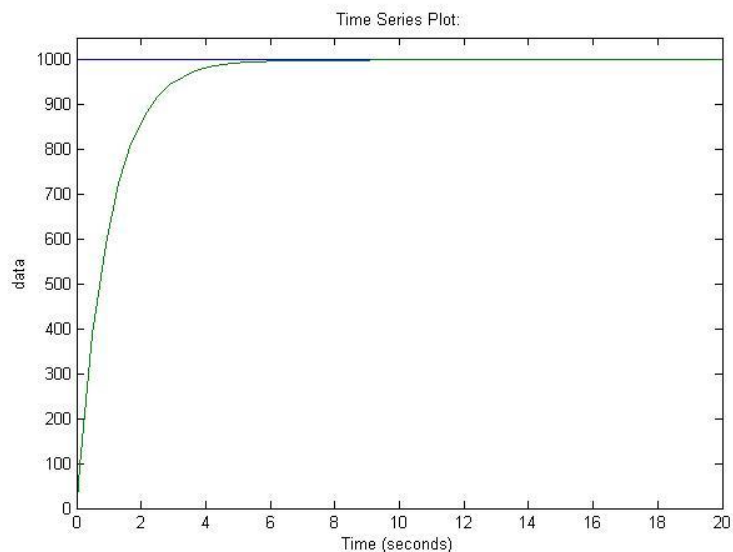
شکل (۴-۳) کنترلر VGT



شکل (۴-۴) فشار ورودی در برابر فشار مطلوب



شکل (۵-۴) فشار خروجی در برابر فشار خروجی مطلوب



شکل (۴-۶) توان کمپرسور در برابر توان مطلوب کمپرسور

همانطور که در نمودارهای بالا مشاهده می شود ردگیری از مقادیر مطلوب قابل قبول می باشد و بعد از گذشت زمان اندک نمودار مقادیر واقعی شبیه سازی به مقادیر مطلوب منطبق شده است.

باید در نظر داشت با افزایش بازه کاری سیستم های غیر خطی، روش های طراحی بر اساس خطی سازی معتبر نمی باشد. از این رو لازم است تا طراحی کنترل کننده سیستم بر مبنای روش های غیر خطی انجام گیرد. طراحی به روش کنترل لغزشی یکی از انواع روش های کنترل مقاوم است که طراحی کنترل کننده را با وجود ترم نامعین در سیستم غیر خطی انجام می دهد. در فصل بعد نمونه ای از این کار را می بینیم.

فصل پنجم
کنترل مد لغزشی

۵-۱ مقدمه

وجود مدل مشخص و دقیق برای کنترل سیستم‌های غیر خطی امری واجب و ضروری است. اما اگر سیستم مورد نظر سیستمی باشد که مدل آن با دقت کافی مشخص نشده باشد، کنترل آن به دو روش صورت می‌گیرد:

۱- روش‌های کنترل مقاوم.

۲- روش‌های کنترل تطبیقی.

در دیدگاه کنترلی عدم قطعیت در مدل‌سازی به دو نوع تقسیم می‌شود:

۱- عدم قطعیت در پارامترهای موجود در مدل.

۲- تخمین مرتبه پایین‌تر برای سیستم و وجود دینامیک‌های مدل نشده در مدل تقریبی.

کنترل مد لغزشی به طور وسیعی به عنوان یک روش موثر برای کنترل سیستم‌های غیرخطی که در آن‌ها عدم قطعیت در مدل را شاهد هستیم، مطرح است. با ارائه یک تبدیل ویژه مساله ردگیری مرتبه n به یک مساله پایداری مرتبه یک تبدیل می‌شود. این حالت به مراتب خیلی ساده‌تر از مساله کنترل مرتبه n است. کنترل مد لغزشی توانایی رساندن سیستم به عملکرد مطلوب را با وجود منابع اغتشاش خارجی دارا است. در این روش با استفاده از سوئیچ کردن سریع قسمتی از سیگنال کنترل، کنترل‌کننده پایدار مقاوم را می‌-

توان طراحی کرد. از طرفی عمل سوئیچ کردن موجب نوسانات نامطلوب در سیستم می‌شود که برای حذف این نوسانات یک روش مناسب، استفاده از لایه مرزی است.

اگر چنانچه پهنای باند لایه مرزی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود، نوسانات کاهش پیدا می‌کند. ولی چنانچه پهنای باند کنترل محدود باشد، رسیدن به یک دقت مطلوب ردگیری، تضمین نمی‌شود.

دستیابی همزمان به شرایط کاهش نوسانات و دقت مطلوب ردگیری با وجود عدم قطعیت پارامترها روش-های جبران‌سازی مختلفی نظیر کنترل انتگرالی و یا کنترل لغزش با لایه مرزی متغیر با زمان، مطرح شده است.

۵-۲ سطح لغزش^۱

مدل سیستم غیرخطی معادله (۵-۱) را در نظر بگیرید:

$$\dot{X}^n = f(x) + b(x)u \quad (۵-۱)$$

تابع $f(x)$ یک تابع غیرخطی است که کران بالای آن بر حسب تابعی از X معین است. $b(x)$ تابعی پیوسته است که کران بالا و پایین آن به وسیله توابعی از X مشخص می‌شود. هدف، تعیین حالت X به نحوی است که با وجود عدم قطعیت در توابع $f(x)$ و $b(x)$ حالت‌های مطلوب دنبال می‌شود.

$$\tilde{X} = X - X_d = [\tilde{X}, \dots, \tilde{X}^{n-1}]^T \quad (۲-۵)$$

$$\tilde{X} \equiv 0$$

در این صورت معادله سطح لغزش به صورت معادله (۵-۳) تعریف می‌شود:

^۱ - Sliding surface

$$S(x,t) = (d/dt + \lambda)^{n-1} \tilde{X} \quad (3-5)$$

به این ترتیب مساله دنبال کردن بردار n بعدی X_d به مساله پایدارسازی مرتبه یک در سیستم S تبدیل می‌شود. از این رو کلیه محدودیت‌هایی که با توجه به شرایط مساله روی بردار \tilde{X} اعمال شده است، به طور مستقیم در S تأثیر خواهد داشت.

برای آنکه سیگنال‌های کنترل به دست آمده از این روش طراحی دارای انرژی محدود باشد، لازم است تا $X_d(0) = X(0)$ شود و رابطه (4-5) برقرار باشد:

$$S(x,t) \equiv 0 \quad (4-5)$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} \frac{ds^2}{dt} \leq \eta |S|$$

قانون کنترلی که متغیرهای حالت را روی سطح لغزش نگه می‌دارد، از دو بخش تشکیل شده است:

۱- ترم کنترل معادل: متغیرهای لغزش را روی سطح نگه می‌دارد.

۲- ترم کنترل مقاوم: شرایط لغزش را با اعمال پارامترهای نامعین در سیستم برقرار می‌سازد.

بنابراین ایده اصلی طراحی سطح لغزش و کنترل سیستم غیرخطی به این طریق تعیین تابع خوش‌رفتار از خطای ردیابی و سپس تعیین قانون کنترل u به نحوی است که s^2 با وجود غیر دقیق بودن مدل، یک تابع لیاپانوف مانند برای سیستم حلقه بسته باقی بماند.

یکی از ویژگی‌های کنترل مد لغزشی، مقاومت آن نسبت به عدم قطعیت است. برای درک بهتر این مطلب باید تفاوت‌های میان عدم قطعیت سازگار و عدم قطعیت ناسازگار را مورد توجه قرار داد، علاوه بر این لازم است تفاوت میان فازهای رسش و لغزش را نیز بررسی کنیم.

در طی فاز رسش، وظیفه کنترلر رساندن مسیرهای حالت به منحنی لغزشی و نگاهداری آن‌ها روی منحنی (به هنگام اولین برخورد)، بر عهده کنترل سوئیچینگ است. این مساله هم از عدم قطعیت‌های سازگار و هم از عدم قطعیت‌های ناسازگار تأثیر می‌پذیرد.

کنترلر مد لغزشی شامل جمله غیر خطی ناپیوسته $\text{sgn}(Z_i)$ است. کنترل‌های پس‌خورد ناپیوسته، مسائل نظری و عملی مختلفی را در پی دارد. برای بررسی مسائل نظری، مانند وجود و یکتایی پاسخ‌ها و اعتبار تحلیل لیاپانوف، باید آن‌ها را در چارچوبی تحلیل کرد که در آن نیازی نباشد توابع سمت راست معادله حالت، لپ شیتز محلی باشد.

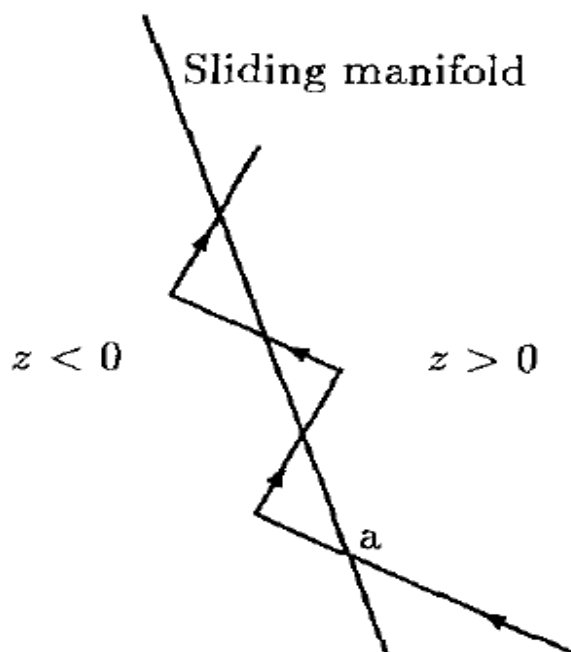
علاوه بر این یکی از مشکلات عملی این موضوع، پدیده لرزش^۱ ناشی از نقص افزارهای سوئیچینگ^۲ و تأخیرها است. شکل (۵-۱) نشان‌دهنده چگونگی تأخیرهاست. این شکل نشان می‌دهد چگونه تأخیر موجب بروز لرزش می‌شود. در این شکل یکی از مسیرهای حالت واقع در ناحیه $z > 0$ به سمت خمینه لغزش، $z=0$ ، نمایش داده شده است.

این مسیر نخست با خمینه برخورد می‌کند، در حالت ایده‌آل، باید مسیر حالت از همین نقطه، لغزش روی خمینه را آغاز کند اما در واقعیت تأخیر میان تغییر علامت Z و زمان سوئیچینگ کنترلر وجود دارد و به هنگام این تغییر، مسیر حالت از خمینه گذشته، وارد ناحیه $z < 0$ می‌شود. زمانی که کنترل سوئیچ می‌-

¹ - chattering

² - switching

کند، مسیر حالت جهت خود را به سمت خمینه تغییر می‌دهد و بار دیگر آن را قطع می‌کند. تکرار این فرایند سبب ایجاد حرکتی زیگزاگ^۱ مطابق شکل می‌گردد که به نام لرزش خوانده می‌شود.



شکل (۵-۱) لرزش ناشی از تاخیر سویچینگ^۲ کنترل [۲۷]

وزوز موجب کاهش دقت کنترل، تلفات گرمایی فراوان در مدارهای الکتریکی و ساییده شدن اجزای متحرک مکانیکی می‌گردد. علاوه بر این ممکن است دینامیک‌های مدل نشده با فرکانس زیاد سیستم را تحریک کند و عملکرد سیستم را تخریب نماید و یا حتی سبب ناپایداری شود.

^۱- Zigzag

^۲- switching

یکی از روش‌های حذف وزوز استفاده از تقریبی پیوسته از کنترلر ناپیوسته کنترل مد لغزشی است. با استفاده از این تقریب می‌توان از مشکلات نظری ناشی از کنترلگرهای ناپیوسته احتراز نمود. روش‌های دیگر حذف وزوز استفاده از روئیتگر [۲۸] و توسعه دینامیک سیستم به کمک انتگرال‌گیر است [۲۹].

در روند طراحی قانون کنترل بر روی $s(t)$ به صورت ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود تا عدم دقت موجود در مدل در سطح لغزش لحاظ شده باشد و اثر پدیده لرزش کاهش یابد.

وجود لرزش باعث می‌شود دقت کنترل پایین بیاید و امکان دارد که دینامیک‌های فرکانس بالایی که در مدل‌سازی صرف‌نظر شده‌اند، تحریک شوند. البته قانون کنترل ناپیوسته u به طور مناسبی هموار می‌شود تا تعادل بهینه‌ای بین پهنای باند کنترل و دقت ردیابی به دست آید [۲۷].

۳-۵ شبیه‌سازی:

برای شبیه‌سازی سیستم مورد نظر ابتدا باید تابع کنترلر را به طور تئوری بدست آورد:

ابتدا تابع لیاپانوف را حدس می‌زنیم و سپس کنترلر مود لغزشی را طوری طراحی می‌شود که مشتق تابع لیاپانوف منفی شود؛ بدین ترتیب همگرایی حالت‌ها به سمت حالت مطلوب تضمین خواهد شد.

$$\dot{x} = fx + gu \quad (۵-۵)$$

تابع لیاپانوف را به صورت معادله (۶-۵) پیشنهاد داده می‌شود:

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (۶-۵)$$

با مشتق گرفتن از تابع لیاپانوف داریم:

$$\dot{V} = \dot{S}^T S \quad (7-5)$$

$$\dot{S}^T S \leq -\eta |S| \quad (8-5)$$

برای اینک مشتق تابع لیاپانوف فوق منفی شود بایستی s در شرایط معادله (8-5) صدق کند. حال متغیر s را به صورت رابطه (9-5) تعریف می‌شود.

$$S_i = X_d - X_1 \quad (9-5)$$

$$\dot{S}_i = \dot{X}_d - \dot{X}_1$$

با جایگذاری (8-5) در (9-5) داریم:

$$(\dot{x}_d - \dot{x})^T \left(\frac{S}{|S|} \right) \leq -\eta \quad (10-5)$$

تابع sgn را به صورت (11-5) تعریف می‌کنیم:

$$\frac{S}{|S|} = \text{sgn}(s) \quad (11-5)$$

با جایگذاری (11-5) در (10-5) خواهیم داشت:

$$(\dot{x}_d - \dot{f}x - gu)^T \text{sgn}(s) \leq -\eta \quad (12-5)$$

اگر f را تخمین و Δf خطای تخمین باشد داریم:

$$f = \hat{f} + \Delta f \quad (12-5)$$

$$(\dot{x}_d - \hat{f} - \Delta f - gu)^T \text{sgn} \leq -\eta$$

حال کنترلر با رابطه (13-5) پیشنهاد می شود :

$$gu = \dot{x}_d - \hat{f} - V \text{sgn}(s) \quad (13-5)$$

$$\dot{x}_d - \hat{f} - \Delta f - \dot{x}_d + \hat{f} - V \text{sgn}(s) \leq -\eta \quad (14-5)$$

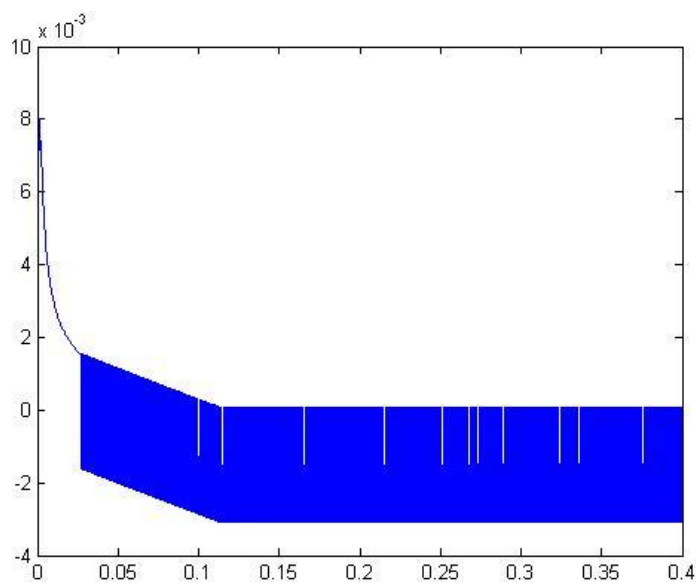
$$-\Delta f - V \text{sgn}(s) \leq -\eta$$

$$|\Delta f| \leq F$$

$$V = \eta + F$$

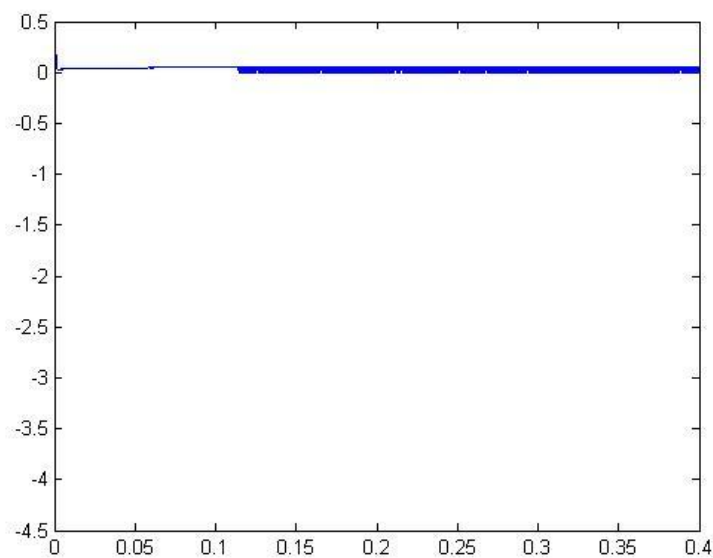
$$gu = \dot{x}_d - \hat{f} + (\eta + F) \text{sgn}(s) \quad (15-5)$$

در ادامه با اعمال کنترلر (15-5) به سیستم نتایج شبیه سازی در شکل های (2-5) تا (7-5) ارائه می شود.



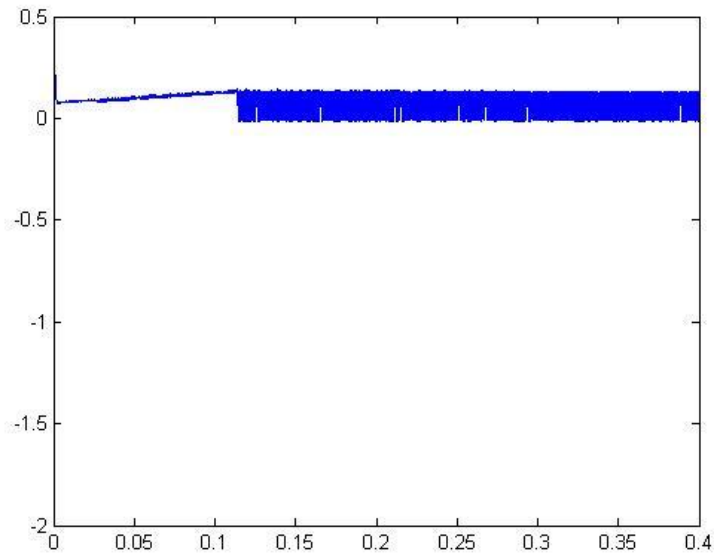
شکل (۲-۵) کنترلر EGR

شکل (۲-۵) نمودار تغییرات کنترلر EGR به روش کنترلر مود لغزشی را نشان می‌دهد.



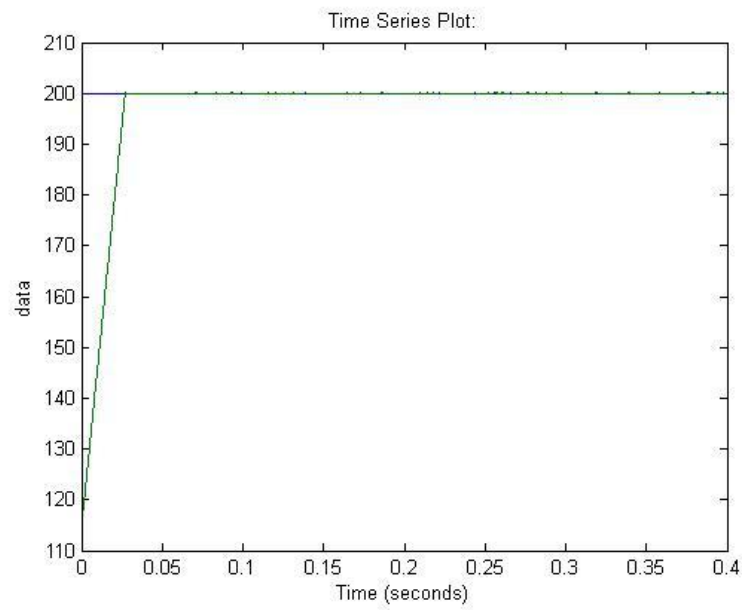
شکل (۳-۵) کنترلر W_f

شکل (۳-۵) نمودار تغییرات کنترلر W_f به روش کنترلر مود لغزشی را نشان می‌دهد.

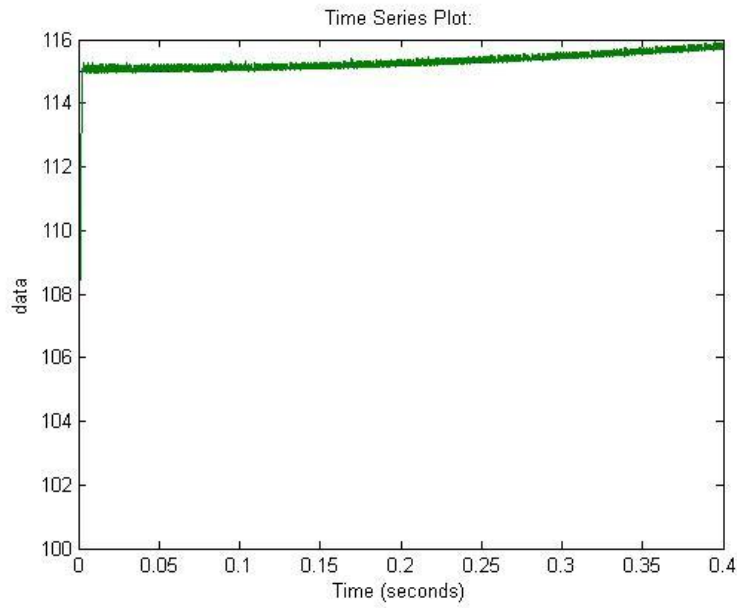


شکل (۴-۵) کنترلر VGT

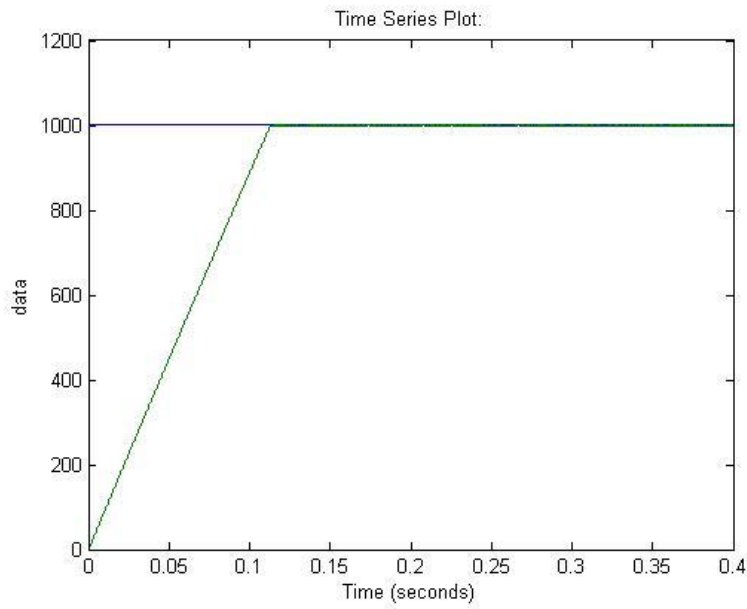
شکل (۳-۵) نمودار تغییرات کنترلر VGT به روش کنترلر مود لغزشی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵) فشار ورودی در برابر مقدار مطلوب



شکل (۵-۶) فشار خروجی در برابر مقدار مطلوب



شکل (۵-۷) توان کمپرسور در برابر مقدار مطلوب

این نمودارها تلاش کنترلی را نشان می‌دهد که باعث می‌شود خطای حالت ماندگار به صفر میل می‌کند. اما وجود نوسانات زیاد در کنترلرها، پدیده مطلوبی نیست. اما همانطور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود منحنی‌ها، ردگیری مناسبی از مقادیر مطلوب دارد.

فصل ششم
روش کنترل پسگام

۶-۱ مقدمه

روش گام به عقب یک روش کنترلی جدید، در حوزه کنترل غیرخطی در سه دهه اخیر می‌باشد. این تکنیک طراحی، به دلیل مزایایی که نسبت به سایر روش‌های کنترل غیرخطی دارد، از زمان پیدایش آن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. این تکنیک، با شکستن سیستم‌های غیرخطی پیچیده، به زیر سیستم‌های کوچک‌تر و سپس طراحی کنترل لیاپانوف، برای این زیرسیستم‌ها، کار طراحی کنترلر را انجام می‌دهد.

روش گام به عقب در اواخر دهه ۱۹۸۰ به طور همزمان در چندین پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. منصفانه است اگر بگوییم روش گام به عقب به خاطر کارهای پروفیسور کوکوتوویک و همکارانش^۱ [۳۰، ۳۱] به خود جلب کرده است [۳۲، ۳۳].

در بخش‌های زیر تکنیک گام به عقب معرفی و توضیح داده شده و سپس به تاریخچه گام به عقب پرداخته می‌شود و برخی کاربردهای این روش در علوم مختلف ذکر می‌شود. در نهایت در بخش آخر جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ذکر می‌گردد. بعد از شبیه‌سازی نتایج این فصل با دو فصل گذشته بررسی می‌شود.

^۱ -Kokotovic

۲-۶ روش گام به عقب

ایده اصلی در روش گام به عقب این است که به حالت‌های مشخصی اجازه می‌دهد به عنوان کنترل‌های مجازی سیستم عمل می‌کنند. روش گام به عقب، روشی سیستماتیک در طراحی کنترل غیرخطی است که قابلیت اعمال در گستره وسیعی از سیستم‌ها را دارد.

در ابتدا این روش فقط یک زیر سیستم کوچک در نظر گرفته شده و سپس طراحی در چندین گام گسترش می‌یابد تا یک قانون کنترل برای کل سیستم ساخته شود. تحقق گام به عقب روش بازگشتی برای پایدارسازی مبدأ یک سیستم در فرم پس‌خورد اکید^۱ فراهم می‌کند [۳۲].

۳-۶ تاریخچه و روند تکاملی گام به عقب

معمولاً روش گام به عقب با تحقیقات بارمیش^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۲ [۳۴] شناخته می‌شود [۳۵،۳۳]. آن‌ها به مساله طراحی یک کنترلر پایدار ساز برای یک کلاس از سیستم‌های دینامیکی نامعین پرداختند. این ویژگی نسبت به تحقیقات قبلی انجام‌شده در آن زمان، دارای یک امتیاز برجسته داشت و آن این که زمانی که سیستم نامی خطی و نامتغیر با زمان باشد، کنترلرهای پایدار ساز توصیف‌شده، شامل کنترلرهای خطی هستند، بر خلاف اکثر نوشته‌های قبلی که سیستم خطی از طریق کنترل غیرخطی پایدارسازی می‌شود. ویژگی دیگر کار آن‌ها این بود که روش‌های تحلیل و طراحی، نیازی به انتقال سیستم به نوع کانونیکال نداشت. نکته جالب توجه این است که گاهی اوقات یک کنترلر پایدار ساز خطی، حتی وقتی دینامیک‌های سیستم غیرخطی هستند هم می‌تواند ایجاد شود [۳۵].

پس از آن در ژوئن ۱۹۹۱ در سخنرانی پروفیسور کوکوتوویک روش گام به عقب ارائه شد [۳۰]. وی ابتدا بیان کرد که برای یک طراحی محافظه‌کارانه، تحلیل غیر خطی نیاز است. سپس چند ابزار غیرخطی که به تازگی ظهور کرده بودند، ارائه شد و نشان داده شد که چگونه با آن‌ها می‌توان بر محدودیت‌های طراحی

¹ - strict-feedback

² - Barmish

خطی غلبه کرد. در مرحله سوم نشان داده شد که بعضی از این ابزارها می‌توانند به صورت تطبیقی ساخته شوند و به سیستم‌های غیرخطی با پارامترهای نامشخص اعمال شوند.

در ادامه بحث وی پدیده غیرخطی به نام قله‌زدن را انتخاب کرد. در میان راه‌هایی که برای خنثی کردن قله‌زدن توسعه یافته‌اند، به استهلاک غیرخطی اشاره کرد که کاربرد بازگشتی چنین ابزارهایی به روش‌های گام به عقب، منجر می‌شوند. همچنین در مورد دو روش جدید گام به عقب که یکی برای طراحی غیرخطی تطبیقی و دیگری برای طراحی غیرخطی بر اساس مشاهده‌گر بود هم اشاره شد.

مسائل ازدحام ترافیک در بزرگراه‌ها باعث ایجاد انگیزه برای تحقیقات زیادی در سیستم‌های اتوماسیون بزرگراه‌ها شد. جایی که هدف افزایش ایمنی در رانندگی با کنترل اتوماتیک وسایل در نقلیه است. در سال ۱۹۹۵، چن^۱ و همکارانش در مورد کاربرد روش گام به عقب در طراحی کنترل فرمان در وسایلی مانند تراکتور و تریلر به مطالعه پرداخت [۳۶]. آن‌ها کنترل بهینه خطی درجه دو را برای طراحی کنترلر این سیستم‌ها استفاده کردند. همچنین برای افزایش امنیت رانندگی، پیشنهاد استفاده از نیروی ترمزی نا وابسته در تریلرها را به عنوان ورودی کنترل دیگر ارائه نمودند. کنترلر ترکیبی ترمز و فرمان با استفاده از خطی سازی ورودی خروجی و تکنیک‌های گام به عقب طراحی شدند. روش‌های گام به عقب، برای تعیین گشتاور ترمزی و پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته به کار گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی شده، نشان داد که کنترل خطی سازی ورودی خروجی عملکرد ردیابی بهتری دارد. زیرا از اطلاعات سرعت انحراف مطلوب برای محاسبه ورودی استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۷ از روش گام به عقب در کنترل ربات‌های متحرک استفاده شد [۳۷]. روش کنترل ردیابی از طریق فیدبک حالت متغیر با زمان بر اساس تکنیک گام به عقب برای مدل سینماتیک و مدل دینامیک

¹ - Chen

ساده شده ربات‌های متحرک استفاده شد. جیانگ^۱ و همکارانش از روش مستقیم لیاپانوف برای به‌دست‌آوردن مسائل کلی ردیابی برای ربات‌های متحرک استفاده کنند.

سپس در سال ۲۰۰۲ مقاله‌ای [۳۸] توسط باسکوویچ^۲ و همکارانش به چاپ رسید. در این مقاله یک قانون کنترل فیدبک محدود با پایداری کلی، برای گسسته سازی مدل PDE غیرخطی یک راکتور لوله‌ای شیمیایی ارائه شد. هدف کلی این مقاله، پایدارسازی حالت ماندگار این سیستم با استفاده از کنترل محدود دما و تمرکز بر سیستم داخلی راکتور است.

مدل PDE غیرخطی اصلی در فضا، با استفاده از تقریب دیفرانسیلی محدود و به دست‌آوردن یک سیستم مرتبه بالا از ODE های غیرخطی کوپل شده، گسسته‌سازی شدند. سپس با طراحی گام به عقب برای PDE های سهموی، سیستم کوپله شده اصلی به دو زیر سیستم هدف غیر کوپل، تبدیل شدند و در ادامه گروهی از پژوهشگران طراحی گام به عقب را برای سرورهای الکتروهایدرولیک غیرخطی نیرو و موقعیت مورد بررسی قراردادند. [۳۹]. در این مقاله امکان تبدیل یک سرووی موقعیت به یک سرووی نیرو تنها با تغییرات اندک، ایجاد می‌شود.

روش گام به عقب تطبیقی جدیدی برای کنترل غیرخطی یک شیر بخار توربین در سال ۲۰۰۷ توسط فو^۳ و همکارانش مطرح شد [۴۰]. این روش علاوه بر حفظ غیرخطی مفید و تخمین زمان واقعی پارامترهای نامعین دارای عملکرد بهتری بر اساس پاسخ و سرعت تطبیق است.

پس از آن در سال تحقیقی در مورد ترکیب روش گام به عقب با شبکه عصبی توسط لئو^۴ و همکارانش به چاپ رسید [۴۱]. در این تحقیق روش گام به عقب توسط یک نوار باریک^۱ برای یک کلاس از سیستم-

¹ - Jiang

² -Boskovic

³ Fu

⁴ -leo

های غیرخطی چند متغیره مطرح شد. طرح کنترل فوق، تکنیک طراحی گام به عقب را با شبکه عصبی نوار باریک که برای تخمین دینامیک‌های سیستم به کار می‌رود، ترکیب می‌کند.

سیستم کنترل پرواز بر اساس گام به عقب تطبیقی با استفاده از فیلترهای انتگرالی، روش کنترلی است که برای سیستم کنترل پرواز غیرخطی نامعین ارائه شده است. روش ارائه‌شده در ترکیب با تکنیک مد لغزشی، امکان اجتناب از مساله پارامتر زیاد^۲ موجود در پروسه‌های گام به عقب کلاسیک را تحت مفروضات مناسب مشخص، فراهم می‌کند. در شبیه‌سازی‌ها، پارامترهای کنترل، به طور بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تنظیم می‌شود.

در سال ۲۰۰۹ صالحی^۳ و همکارانش یک کنترلر فازی تطبیقی بر اساس تکنیک گام به عقب را برای کنترل دمای یک کلاس عمومی از راکتورهای CSTR به کار گرفتند [۴۲]. در ضمن یک سیستم منطقی فازی برای تخمین جملات وابسته متمرکز و سایر پارامترهای ناشناخته سیستم که در قانون کنترل ظاهر می‌شوند، به کار برند. سپس نشان دادند که سیستم حلقه بسته پایدار مجانبی است و از خطای تقریب حداقل تأثیر می‌پذیرد. عملکرد کنترلر ذکر شده برای کنترل دمای یک راکتور ناپایدار امتحان شده و تاثیر مثبت آن با شبیه‌سازی نشان داده شد.

در سال ۲۰۱۰ چن و همکارانش به مساله کنترل ردیابی فیدبک خروجی گام به عقب تطبیقی پایدار کلی برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی با بهره فرکانس بالای نامعلوم پرداختند [۴۳]. آن‌ها سیستم‌های فازی را به عنوان جبران‌گرهای پیش‌خوراند، برای مدل‌کردن بعضی توابع سیستم وابسته به سیگنال مرجع، به کار برند؛ بنابراین پایداری کلی سیستم حلقه بسته تحت مفروضاتی که توابع سیستم نامعلوم محدود هستند، تضمین شده است.

¹ B-Spline

²-over parametrization

³- Salehi

از کنترلر گام به عقب غیرخطی برای هلیکوپترها با استفاده از ماتریس چرخش هم استفاده شده است [۴۴]. هدف کنترلر در هلیکوپتر، ردیابی خودگردان موقعیت و مسیرهای مرجع انحراف زاویه است. ترکیب توابع فیدبک اشباع تودرتو در طراحی گام به عقب، حرکت هلیکوپتر و محدودیت‌های فیزیکی قدرت را حفظ می‌کند.

۴-۶ نتیجه گیری

روش گام به عقب یک روش کنترلی نسبتاً جدید است. یکی از مزایای این روش این است که در هر جایی قطع نظر از نقطه کار، می‌تواند به کار رود. این تکنیک با شکستن سیستم‌های غیرخطی پیچیده دارای فرم خاص به زیر سیستم‌های کوچک و سپس طراحی توابع لیاپانوف و کنترل‌های مجازی برای این سیستم‌ها کار طراحی کنترلر را انجام می‌دهد. موارد ذکر شده از کاربردهای این روش در قسمت قبل، تنها گوشه‌ای از کاربردهای این روش در حوزه‌های مختلف علوم است. در ادامه از این روش برای طراحی کنترلر سیستم مورد نظر که همان موتور دیزل است استفاده شده است.

۵-۶ شبیه‌سازی

سیستم غیر خطی را در نظر بگیرید که مدل آن را بتوان به فرم معادله (۱-۶) نوشت:

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi \quad (۱-۶)$$

$$\dot{\xi} = u \quad (۲-۶)$$

که در آن $u \in R$ ورودی کنترل است. توابع $f: D \rightarrow R^n$ و $g: D \rightarrow R^n$ در قلمرو $D \subset R^n$ هموار و شامل مبدهای $f(0) = 0$ و $\eta = 0$ هستند. می‌خواهیم کنترل پس‌خورد را چنان طراحی کنیم که مبدا پایدار گردد. فرض کنیم معادله اول را بتوان به کمک کنترل پس‌خورد حالت و هموار $\xi = \phi(\eta)$ و $\phi(0) = 0$ پایدار نمود.

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) \quad (3-6)$$

پایدار مجانبی باشد، علاوه بر این تابع لیاپانوف $V(\eta)$ را چنان بشناسیم که در نامعادله زیر صدق کند:

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] \leq -W(\eta) \quad (7-6)$$

که تابع $W(\eta)$ معین می‌باشد. با افزودن و کاستن $g(\eta)\phi(\eta)$ به سمت راست معادله به نمایش هم‌ارز زیر مطابق با رابطه (7-6) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] \leq -W(\eta) \quad (7-6)$$

$$\dot{\eta} = [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + g(\eta)[\xi - \phi(\eta)] \quad (8-6)$$

$$\dot{\xi} = u$$

تغییر متغیر $z = \xi - \phi(\eta)$ سیستم را به شکل زیر در می‌آورد:

$$\dot{\eta} = [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + g(\eta)z \quad (۹-۶)$$

$$z = u - \dot{\phi}$$

مشتق $\phi(\eta)$ را می‌توان به کمک رابطه زیر بدست آورد:

$$\dot{\phi} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] \quad (۱۰-۶)$$

انتخاب $v = u - \dot{\phi}$ سیستم به فرم معادله (۱۰-۶) می‌شود:

$$\dot{\eta} = [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + g(\eta)z \quad (۱۰-۶)$$

$$\dot{z} = v$$

از این ساختار می‌توان برای طراحی v به منظور پایدارسازی کل سیستم استفاده کرد؛ با استفاده از معادلات (۱۱-۶) و (۱۲-۶) داریم:

$$\dot{\phi} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] \quad (۱۱-۶)$$

$$V_a(\eta, \xi) = V(\eta) + \frac{1}{2}z^2 \quad (۱۲-۶)$$

به عنوان نامزد تابع لیاپانوف طبق معاله (۱۳-۶) داریم:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta)z + zv \leq -W(\eta) + \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta)z + zv \quad (۱۳-۶)$$

بنابراین با انتخاب (۱۴-۶) نتیجه می‌شود:

$$v = -\frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta) - kz \quad (۱۴-۶)$$

$$\dot{V}_a \leq -W(\eta) - kz^2 \quad (۱۵-۶)$$

رابطه (۱۴-۶) و (۱۵-۶) نشان می‌دهد که سیستم در مبدا پایدار مجانبی است. با جایگزینی v ، $\dot{\phi}$ و z قانون کنترل پس‌خورد به صورت معادله (۱۶-۶) در می‌آید:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial V}{\partial \eta} g(\eta) - k[\xi - \phi(\eta)] \quad (۱۶-۶)$$

چنانچه فرضیات به طور جامع برقرار باشد و $V(\eta)$ نیز کراندار شعاعی باشد، می‌توان نتیجه گرفت مبدا پایدار مجانبی جامع است.

حال باید روند بازگشت به عقب را به سیستم‌های چند ورودی، اعمال نمود. روند کاربردی در این سیستم‌ها را بازگشت به عقب بلوکی^۱ می‌نامند.

سیستم غیر خطی با چند ورودی معادله (۱۷-۶) را در نظر بگیرید:

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi \quad (۱۷-۶)$$

$$\dot{\xi} = f_a(\eta, \xi) + G_a(\eta, \xi)u$$

^۱- Block backstepping

که $\eta \in R^n$ ، $\xi \in R^n$ و $u \in R^n$ است و m می‌تواند بزرگتر از واحد باشد. فرض شود f ، f_a ، G و G توابعی هموار روی قلمرو مورد بحث باشند.

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] \leq -W(\eta) \quad (18-6)$$

که $W(\eta)$ یک تابع معین و مثبت است. با توجه به معادله (19-6) داریم:

$$V_a = V(\eta) + \frac{1}{2} [\xi - \phi(\eta)]^T [\xi - \phi(\eta)] \quad (19-6)$$

معادله (20-6) به عنوان نامزد تابع لیاپانوف برای کل سیستم، نتیجه می‌شود:

$$\dot{V}_a = \frac{\partial V}{\partial \eta} (f + G\phi) + \frac{\partial V}{\partial \eta} G(\xi - \phi) + [\xi - \phi(\eta)]^T \left[f_a + G_a u - \frac{\partial \phi}{\partial \eta} (f + G\xi) \right] \quad (20-6)$$

و تابع کنترلر به صورت معادله (21-6) در می‌آید:

$$u = G^{-1}_a \left[\frac{\partial \phi}{\partial \eta} (f + G\xi) - \left(\frac{\partial V}{\partial \eta} G \right)^T - f_a - k(\xi - \phi) \right] v \quad (21-6)$$

برای شبیه‌سازی موتور دیزل به روش گام به عقب معادلات بدست‌آمده در فصل سه و مقادیر ذکر شده در فصل چهار داریم:

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi$$

$$\dot{\xi} = f_a(\eta, \xi) + G_a(\eta, \xi)u$$

با تطبیق معادلات موتور با روش گام به عقب هر کدام از ماتریس های معادله فوق به صورت زیر تعریف

می شود:

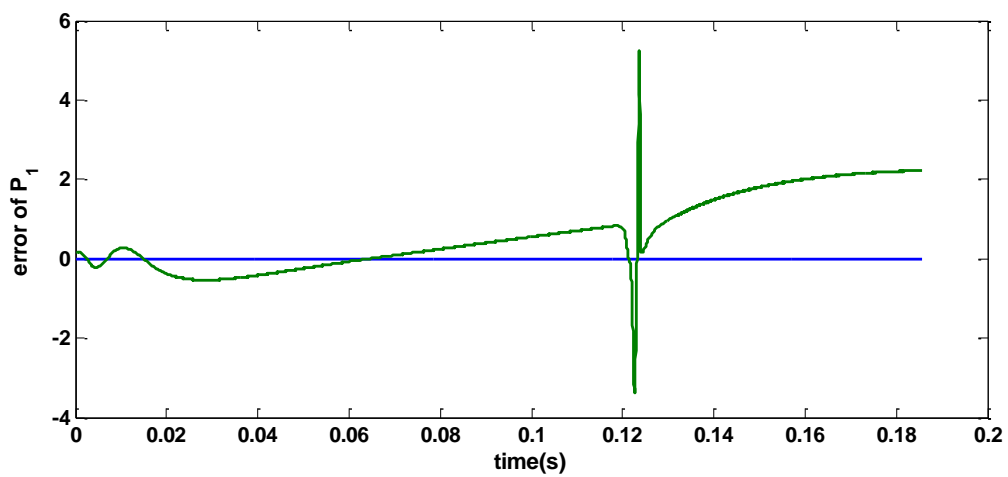
$$\eta = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_c \end{bmatrix}$$

$$f = \begin{bmatrix} -\eta_v \frac{V_d N}{120 V_1} & 0 & \frac{RT_1 \eta_c}{V_1 C_p T_a \left(\left(\frac{P_1}{P_a} \right)^\gamma - 1 \right)} \\ \frac{\eta_v T_3 V_d N}{T_1 V_3 120} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_c} \end{bmatrix}$$

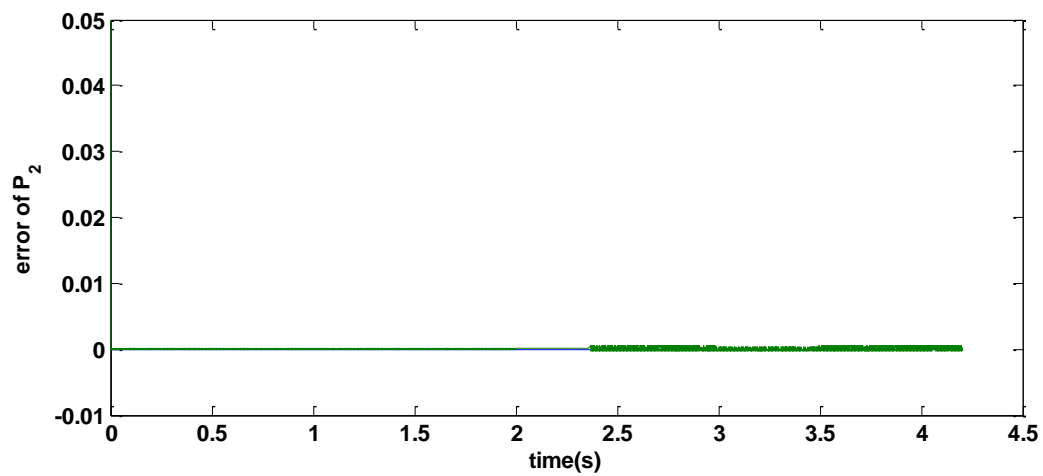
$$g = \begin{bmatrix} \frac{RT_1 P_3}{V_1 \sqrt{RT_3}} \sqrt{2 \frac{P_1}{P_3} \left(1 - \frac{P_1}{P_3} \right)} & 0 & 0 \\ -\frac{RT_3 P_3}{\sqrt{RT_3} V_3} \sqrt{2 \frac{P_1}{P_3} \left(1 - \frac{P_1}{P_3} \right)} & -\frac{RT_3 P_3}{\sqrt{T_3} V_3} \sqrt{2 \frac{P_a}{P_3} \left(1 - \frac{P_a}{P_3} \right)} & \frac{RT_3}{V_3} \\ 0 & \frac{\eta_i \eta_m C_p T_3}{\tau_c} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_3} \right)^\mu \right) \frac{P_3}{\sqrt{T_3}} \times \sqrt{2 \frac{P_a}{P_3} \left(1 - \frac{P_a}{P_3} \right)} & 0 \end{bmatrix}$$

با توجه به و معادلات فوق و طراحی کنترلر و با جایگذاری مقادیر عددی نتایج شبیه سازی به صورت

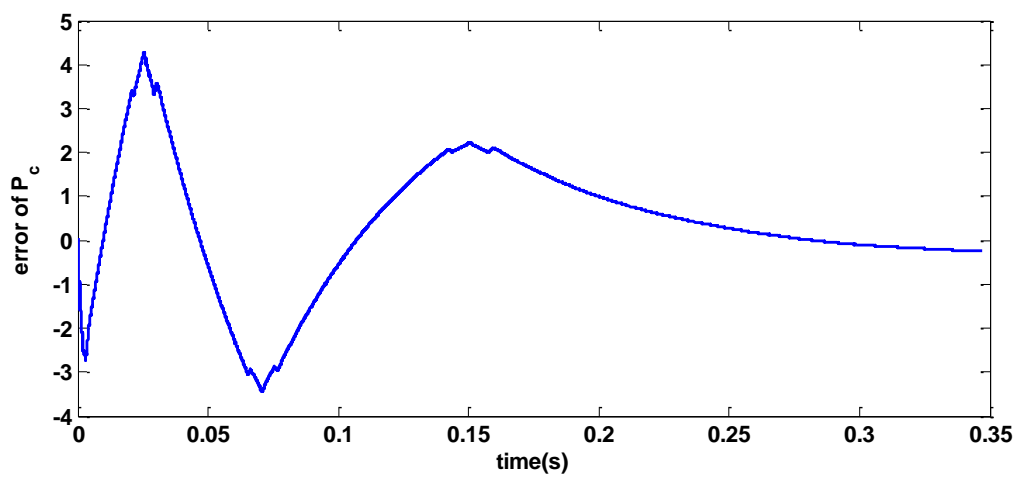
شکل های (۱-۶) تا (۶-۶) حاصل می شود.



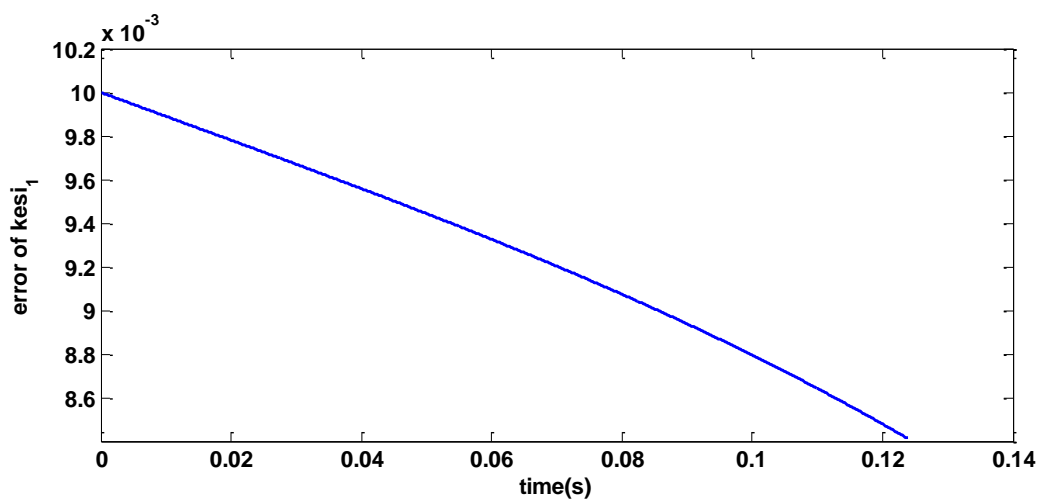
شکل (۶-۲) میزان خطای ردگیری فشار ورودی



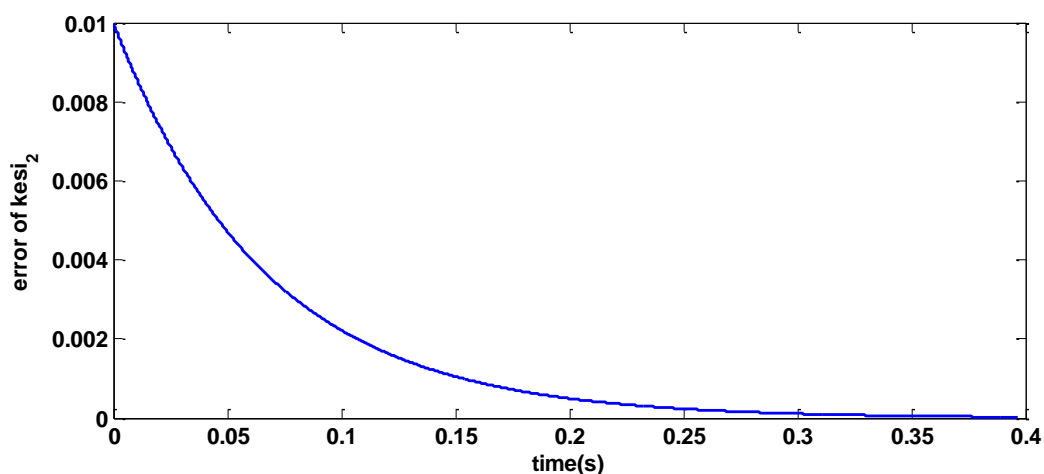
شکل (۶-۳) میزان خطای ردگیری فشار



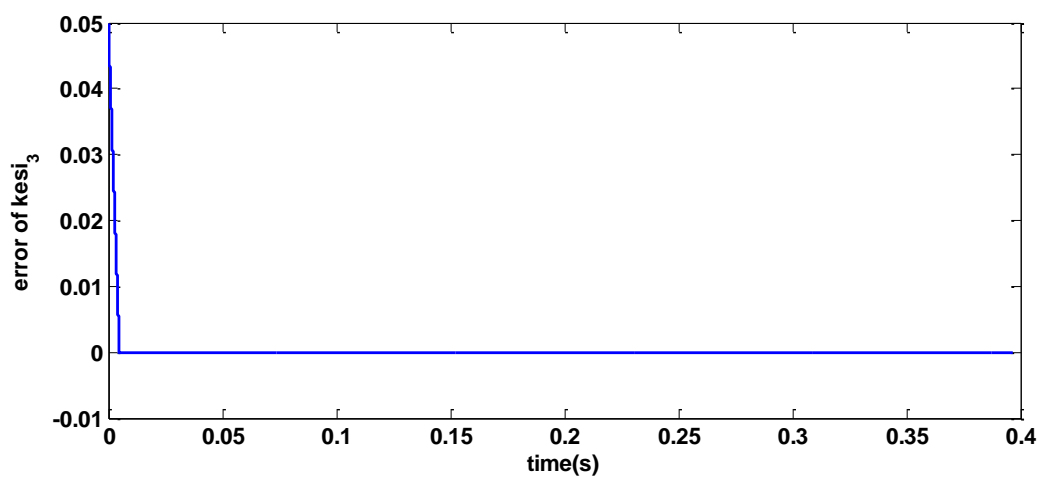
شکل (۴-۶) میزان خطای ردگیری توان کمپرسور



شکل (۵-۶) میزان خطای ردگیری ورودی EGR



شکل (۶-۶) میزان خطای ردگیری ورودی VGT



شکل (۶-۷) میزان خطای ردگیری ورودی W_f

شکل‌های (۱-۶) تا (۳-۶) مقادیر خطای ردگیری فشار ورودی، فشار خروجی و توان کمپرسور را نشان می‌دهند. همان طور که در نمودارها مشاهده می‌شود میزان خطا حول نقطه صفر نوسان می‌کند. با توجه به فشار مطلوب در خروجی و ورودی (۱۱۰ کیلو پاسکال و ۱۱۵ کیلو پاسکال) میزان خطا مقادیر قابل قبولی می‌باشد. میزان خطا در بیشترین مقدار خود به حدود ۴ کیلو پاسکال می‌شود که در مقابل ۱۱۵ کیلو پاسکال مقدار ناچیزی می‌باشد.

در شکل‌های (۴-۶) تا (۶-۶) مقادیر خطای ورودی‌ها مشاهده می‌شود که در هر سه شکل این مقادیر به سمت صفر میل می‌کنند. این نشان دهنده این است خطای ردگیری بسیار کم و به صفر میل میکند.

نتایج حاصله در این بخش نشان می‌دهد که از روش پسگام هم می‌توان برای کنترل موتور دیزل استفاده کرد؛ اما این امر مستلزم استفاده از شیرهای مناسب برای ورودی‌ها است. شیر الکترو پنیوماتیکی که در این بخش از آن‌ها استفاده شد، معادلات ورودی را تشکیل می‌دهند. در حالی که در دو فصل گذشته نیازی به این معادلات نبود. مزیت این روش در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها طوری است که هم خطای ردیابی حالت‌های سیستم و محرک‌ها را همزمان به سمت مقدار محدود قابل قبولی سوق می‌دهد. البته انتخاب شیر مناسب در این روش امری مهم و حیاتی است.

- [1] E.C.Glover, N.Lalor, A review of low noise diesel engine, Institute of sound and vibration research, university of Southampton, England, 1973.
- [2] Ming Zheng, Graham T. Reader, J. Gary Hawley, "Diesel engine exhaust gas recirculation- a review on advanced and novel concepts", *Energy conversion & Management*, 45 (2004) 883–900
- [3] PrabhuKumar G, Swaminathan S, Nagalingam B, Gopalakrishnan KV. "Water induction studies in a hydrogen diesel dual-fuel engine" In: International symposium on hydrogen systems. Beijing, China 7–11 May 1985, Beijing: China Academic Publishers, Oxford: Pergamon Press; 1985. p. 69–81.
- [4] N. Saravanan, G. Nagarajan, K.M. Kalaiselvan, C. Dhanasekaran, An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique, Internal Combustion Engineering Division, Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Guindy, Anna University, Chennai 600025, India, March 2007
- [5] T. Shirakawa, H. Itoyama, H. Miwa, Study of strategy for model-based cooperative control of EGR and VGT in a diesel engine, Powertrain Research Laboratories, Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Ltd., Natsushima-cho 1, Yokosuka, Kanagawa 237-8523, Japan, 31 August 2000.
- [6] L. Guzzella. and Amstutz A. Control of diesel engines. *Control Systems Magazine, IEEE* 18(5):53–71, Oct. 1998
- [7] L. Guzzella and C.H. Onder, Introduction to Modelling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Springer Verlag, 2004.

- [8] M. Herceg, T.Raff, R. Findeisen, Nonlinear Model Predictive Control of a Turbocharged Diesel Engine, Department of Information Engineering and Process Control, Slovak University of Technology, Slovakia
- [9] S. Cirstoiu, O. Pages, Modeling and Control Solutions for the Turbocharged Diesel Engines, 2nd International Conference on Systems and Computer Science (ICSCS) Villeneuve d'Ascq, France, August 26-27, 2013
- [10] S.A. Ali, Bada, N'doye, L.Nicolas, Sliding mode control for Turbocharged Diesel Engine, Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) Barcelona, Spain, July 3-6, 2012.
- [11] M. Ammann, N.P. Fekete, L. Guzella, and A.H. Glattfelder. Model-based control of VGT and EGR in a turbocharged common-rail diesel engine: theory and passenger car implementation. Society of Automotive Engineers, Paper 2003-01-0357, 2003.
- [12] M. Van Nieuwstadt, P.E. Moraal, I.V. Kolmanovsky, A. Stefanopoulou, P. Wood, and M. Criddle. Decentralized and multivariable designs for EGR-VGT control of a diesel engine. In Proceedings IFAC Workshop, Advances in Automotive Control, pages 191–196, Mohican State Park, Loudenville, Ohio, USA, 1998.
- [13] J. Fredriksson and Bo Egart, Backstepping control with local LQ performance applied to a turbocharged diesel engine, In Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, December 2001.
- [14] D.Upadhyay, Vutkin, G. Rizzoni. Multivariable Control design for intake flow regulation of a Diesel engine using sliding mode, In Proc 15th IFAC World Congress, Barcelona, 2002.
- [15] S.Cirstoiu, D.Popescu, Multi model adaptive control for turbocharged diesel engines, Dept.of Automation, University Politehnica of Bucharest, Romania, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 1, 2013.
- [15'] L.Ljung, System identification for the user, Linköping university, Sweden, pp 1-16.

- [16] J. Mohammadpour, C. Grigoriadis, M. Franchek, Y. Wang, I. Haskara, LPV Decoupling and Input Shaping for Control of Diesel Engines, 2010 American Control Conference Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA June 30-July 02, 2010.
- [17] A. Amstutz, L. Del Re, EGO Sensor Based Robust Output Control of EGR in Diesel Engines, IEEE Transaction on control systems technology, VOL. 3. NO. 1, MARCH 1995.
- [18] M.Jung, K.Gliver, U.Christen, Comparison of uncertainty parameterisations for HN robust control of turbocharged diesel engines, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge, CB2 1PZ, UK, Germany, 19 December 2003.
- [19] P. Naseradinmousavi, C. Nataraj, Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators, Villanova University, Mechanical Engineering Department, 800 Lancaster Avenue, Villanova, PA 19085, United States, 25 November 2010.
- [20] A. Mehmood, S. Laghrouche, M. El Bagdouri, Modeling identification and simulation of pneumatic actuator for VGT system, Universite de Technologie de Belfort-Montbeliard, Belfort, France, 2 December 2010.
- [21] S. Laghrouche, F. S. Ahmed, M. El Bagdouri, M. Wack, J. Gaber, M. Becherif, Modeling and Identification of a Mechatronic Exhaust Gas Recirculation Actuator of an Internal Combustion Engine, 2010 American Control Conference Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA , 30-July 02, 2010.
- [22] D.Blanco Rodriguez, Modeling and observertion of exhaust gas concentratons for diesel engine control.2013, pp 13-40.
- [23] J. S.Cundiff, Servo valves Fluid Power Circuits and Controls, 2001.
- [24] F.Yan, Diesel engine advanced multi-mode combustion control and generalized nonlinear transient trajectory shaping control methods, graduate program in mechanical engineering, the Ohio State university, 2012.

- [25] M. Jankovic, M. Jankovic, and I.V. Kolmanovsky, "Constructive Lyapunov Control Design for Turbocharged Diesel Engines," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 8(3): 288299, 2000.
- [26] Slotin, J.J.E, W.Li, *applied nonlinear control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [27] H.Khalil, *nonlinear systems*, Macmillan Publishing Company, New York, 1996.
- [28] V. I. Utkin. *Sliding mode control design principles*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40:23-36, February 1993.
- [29] H. Sira-Ramirez. *A dynamical variable structure control strategy in asymptotic output tracking problem*. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 38:615-620, April 1993.
- [30] Petar v.Kokotovic, *The Joy of feedback: nonlinear and adaptive*, Bode prize lecture, June 1992.
- [31] J.Yu, and B.Chen, and other, *Adaptive fuzzy tracking control for the chaotic permanent magnet synchronous motor drive system via backstepping*, *Nonlinear analysis*, Vol.12, pp:671-681, Feb 2011.
- [32] O.Harkegerd, *Backstepping and control allocation with application to flight control*, Linköping studies in science and technology. Dissertations No.820, 2003.
- [33] P.Kokotovic, M.Aracak, *Constructive nonlinear control, A historical perspective*; 14th World Congress of IFAC, Beijing, July 1999.
- [34] B.R.Barmish, and M.corless, and G.Leitmann, *A new class of stabilizing controllers for uncertain dynamical systems*; *IEEE Trans*, pp 228-233, 1982.
- [35] Krstic and, Kanellakopoulos, and Kokotovic, *Nonlinear and adaptive control design*, John Wiley & sons, INC.1995.
- [36] Ch.Chen, and M.Tomizuka, *Steering and braking control of Tractor-Semi trailer vehicles in Automated highway systems*, *American control conference*, Washington, pp:658-662, June 1995.

- [37] ZH.Jiang, and H.Nijmeijer, Tracking control of mobile robot: a case study in backstepping, *Automatica*, VOL.33, NO.7, PP:1393-1399; 1997.
- [38] D.Boskovic, and M. Krstic, Backstepping control of chemical tubular reactors, *Computers and Chemical Engineering* 26 , pp:1077–1085, Elsevier 2002.
- [39] I.Ursu, and F.Ursu, and F.Popescu, Backstepping design for controlling electrohydraulic servos, *Journal of franklin Institute*, vol 343, Jan 2006.
- [40] J.Fu, and J.Zhao, A new adaptive backstepping method for nonlinear control of turbine main steam valve, *Journal of control theory and applications*, 2007.
- [41] Y.Leu, and CH.Chen, B-spline backstepping control with derivative matrix estimation and its applications, *neucomputing*74,pp:499-508,Elsevier 2010.
- [42] 10-Sh.Salehi, and M.Shahrokhi, Adaptive fuzzy backstepping approach for temperature control of continuous stirred tank reactors, *fuzzy sets and systems*, vol 160, pp: 1804-1818, June 2009.
- [43] W.Chen, Z.Zhang, Globally stable adaptive backstepping fuzzy control for output-feedback systems with unknown high-frequency gain sign, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.161, pp:821-836,march 2010.
- [44] I.A.Rapits, and K.P.Valavanis, and W.A.Moreno, A novel nonlinear backstepping controller for helicopters using the rotation matrix, *IEEE trans. control system technology*, vol 19,pp:465-473,Feb 2011.
- [45] H.Yu, and J.Wang, and other, Adaptive backstepping sliding mode control for chaos synchronization of two coupled neurons in the external electrical stimulation, *communication in nonlinear science & numerical simulation*, July 2011.

Abstract

With diminishing resources and increasing fuel internal combustion engines, especially diesel engine in the world, control and improvement of the diesel engine has become vital. There have been many efforts to improve the performance of diesel engines, including the measures that can be added to the system, EGR and VGT system's.

The main objective of upgrading and precise control to reduce diesel engine emissions, reduced fuel consumption and engine efficiency is increased. EGR system to reduce emissions and increase engine efficiency is VGT system.

Add the engine system to improve the performance of engine, but the engine control parameters and performance is much more complex. Because the engine is a multi-Input Multi-Output (MIMO) has been coupled equations in time. This leads to more complex control system.

In the past, several methods have been used to control the system. Among these methods are the method of linearization point, the adaptive control method, system identification methods, H and ... named. In this thesis we use the backstepping method.

Key words: diesel engine, control, feedback, backstepping.



Shahrood University

Faculty of Mechanical Engineering

**Using Backstepping control method for EGR
system in internal combustion engines**

Majed Sadafi

Supervisor:

Dr.Habib Ahmadi

2015