بسم الله الرحمن الرحيم

٣١٠٤
ضرز ٥ ٢٠١٦

٢٧٣٤٢

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق (کنترل)

طراحی یک کنترل کننده فازی برای سیستم تعلیق فعال خودرو

بابک توانا

۱4515

استاد راهنما:

دکتر وحید مجد

استاد مشاور:

دکتر حمیدرضا مؤمنی

تیر ۷۸

۲۷۳۴۲

۱۳۷۸ /۱۰/ ۱۶

مرکز اطلاعات علمی ایران
ثبت مدارک

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای بابک توانا پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان طراحی یک کنترل‌کنندهٔ فازی برای سیستم تعلیق فعال خودرو در تاریخ ۷۸/۴/۱۲ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق باگرایش کنترل پیشنهاد می‌کنند. ۶ب۴

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر مجد	
۲ـ استاد مشاور :	آقای دکتر مؤمنی	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر بهشتی	
	آقای دکتر جلالی	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر بهشتی	
(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)		

این نسخه به عنوان نسخه نهائی پایان‌نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

بسمه تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ برق - کنترل است که در سال ۱۳۷۸ در دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر وحید محمد ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمدرضا سرّشتی و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ——— از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب نابک توانا دانشجوی رشته برق - کنترل مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: نابک توانا

تاریخ و امضا: نابک

۱۳۷۸/۴/۱۵

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

سپاس و ستایش تنها شایسته ذات اقدس حق، پرورنده جسم و جان انسان می‌باشد. این حمد و ثنا پذیرفته نخواهد شد مگر آنکه انسان از کسانی که او را به هر نوع و شکل ممکن یاری کرده‌اند سپاسگذاری نماید. حال که با لطف و عنایتش پایان‌نامه حاضر را به پایان رسانیده‌ام بر خود واجب می‌دانم از کلیه کسانی که مرا در این امر یاری نمودند تقدیر و تشکر کنم. هر چند که ادای کامل این دین از محالات است، اما تلاش می‌کنم با زبان قاصر خود بخشی از آنرا به انجام برسانم.

در این راستا ابتدا باید از استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر وحید مجد و استاد مشاور خود جناب آقای دکتر حمید رضا مؤمنی قدردانی نمایم. ذکر این نکته ضروری است که زحمات جناب آقای دکتر مجد در کار حاضر ستودنی است. ایشان با صبر و شکیبائی فراوان کوتاهی‌های مرا ندیده گرفتند، خطاهایم را به من یادآوری کردند و با راهنمائیهای خود گرهگشای بسیاری از مشکلات من بودند. پس از آن لازم است از برادر خود جناب آقای ساسان توانا تشکر کنم چرا که علی‌رغم گرفتاریهای فراوان خود هیچگاه مرا در تایپ و ویرایش متن این پایان‌نامه تنها نگذاشتند. در پایان از کلیه کسانی که به هر نحو (چه معنوی و چه مادی) مرا یاری نمودند سپاسگذاری می‌نمایم باشد که مورد قبول حق تعالی قرار گیرد.

چکیده

در تحقیقاتی که پیش از این انجام شده، ثابت شده که منطق فازی در کنترل و شناسائی دینامیکهای غیرخطی از کارآیی بالایی برخوردار می‌باشد. بهمین منظور در کار تحقیقی حاضر سعی شده که با استفاده از منطق فازی یک کنترل‌کننده سیستم تعلیق فعال برای مدل یک چهارم خودرو که در آن عملگر هیدرولیک، فنر و کمک فنر غیرخطی لحاظ شده‌اند، طراحی شود.

در ابتدا با استفاده از تجربیات بدست آمده از نحوه عملکرد سیستم تعلیق خودرو یک کنترل‌کننده فازی تجربی طراحی می‌شود. در این کنترل‌کننده سه متغییر شتاب و سرعت بدنه خودرو جابجایی سیستم تعلیق به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و خروجی آن ولتاژ اعمال شده به موتور جابجا کننده عملگر شیر قرقره‌ای هیدرولیک می‌باشد. اطلاعات ورودی تنها با استفاده از دو حس‌گر بدست می‌آیند. سپس به روش سعی و خطا پارامترهای کنترل‌کننده فوق تا حد امکان به گونه‌ای تغییر داده می‌شوند که بهترین پاسخ بدست آید.به منظور برآوردن دو خواسته ناسازگار (سرعت مطلوب بدنه خودرو و محدودیتهای سیستم تعلیق) یک مدل مرجع غیرخطی طراحی شده است که تنها دارای یک خروجی می‌باشد. پس از آن با استفاده از روش آموزش تخصصی پارامترهای کنترل‌کننده فوق اصلاح می‌شوند تا جائی‌که خطای خروجی به حداقل ممکن کاهش یابد. از آنجایی که فرض می‌شود اطلاعی از معادلات ریاضی سیستم در دست نیست برای اصلاح پارامترها از جاکوبین مدل فازی سیستم تعلیق خودرو استفاده می‌گردد.این مدل فازی که در مرحله آموزش به موازات سیستم تعلیق خودرو قرار گرفته و از خطای حاصل از اختلاف خروجیها برای اصلاح پارامترهای مدل فازی استفاده گردیده است، به خوبی رفتار دینامیکی فرآیند را تعقیب می‌کند.

یکی از ویژگیهای مهم این روش عدم نیاز به مدل ریاضی اجزاء سیستم تعلیق است. از جمله این اجزاء می‌توان از عملگر هیدرولیک، فنر و کمک فنر که همگی غیر خطی هستند نام برد. ویژگی دیگر این روش اینست که می‌توانیم تنها با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی، مدل فازی و کنترل‌کننده فازی را تولید کرده و سپس آموزش دهیم. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اهداف خواسته شده با وجود ناسازگاری با یکدیگر، برای موقعیت‌های مورد نظر در نقاط کار مختلف سیستم تعلیق برآورده شده‌اند. در انتهای کار تحقیقی حاضر نتایج عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده با کنترل‌کننده LQR که برای مدل خطی شده سیستم تعلیق طراحی شده و در مقالات معتبر ارائه گردیده، مقایسه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که در دست‌اندازهای ضربه‌ای عملکرد کنترل‌کننده فازی به مراتب بهتر از کنترل‌کننده LQR می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیستم تعلیق فعال، کنترل فازی، آموزش تخصصی، الگوریتمهای بهینه‌سازی و مدل مرجع.

فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه

۱-۱ پیشگفتار ۱
۱-۲ تاریخچه ۳
۱-۳ سیستم‌های تعلیق پیشرفته ۵
۱-۴ روشهای کنترلی به کار گرفته شده ۶
۱-۵ محتوی پایان نامه حاضر ۸

فصل دوم - سیستمهای تعلیق خودرو

۲-۱ مقدمه ۱۱
۲-۲ طبقه بندی انواع سیستم های تعلیق خودرو ۱۲
۲-۳ مدلسازی سیستم تعلیق خودرو ۱۷
۲-۳-۱ مدل یک چهارم خودرو ۱۸
۲-۳-۲ مدل یک دوم خودرو ۱۹
۲-۳-۳ مدل کامل خودرو ۲۲
۲-۴ دینامیک سیستم هیدرولیک ۲۵
۲-۵ بررسی انواع اغتشاش جاده ۳۲
۲-۶ نحوه ارزیابی کنترل کننده‌ها ۳۴

فصل سوم - روشهای کنترلی بکار گرفته شده

۳-۱ مقدمه ۳۷
۳-۲ قانون کنترل پیش‌بین ۳۸
۳-۳ روش‌های پیش‌بینی رو به جلوی سطح جاده ۴۰
۳-۴ روش های کنترل پیش بین ۴۳
۳-۴-۱ کنترل بهینه ۴۳
۳-۴-۲ کنترل فازی ۴۵
۳-۴-۳ کنترل عصبی ۵۰
۳-۵ کنترل غیر پیش‌بین ۵۶
۳-۵-۱ کنترل غیر خطی ۵۶
۳-۵-۲ کنترل فازی ۵۹
۳-۵-۳ کنترل بهینه ۶۴

فصل چهارم - الگوریتمهای یادگیری و بهینه‌سازی در منطق فازی

۴-۱ مقدمه ۶۶
۴-۲ الگوریتمهای بهینه‌سازی ۶۷
۴-۲-۱ روش حداقل مربعات ۶۷
۴-۲-۲ الگوریتمهای بی نیاز از مشتق ۶۹
۴-۲-۳ الگوریتمهای بر مبنای بکارگیری مشتق ۷۰
۴-۲-۳-۱ تندترین شیب فرود ۷۰
۴-۲-۳-۲ روش حداقل مربعات غیرخطی ۷۳
۴-۳ الگوریتمهای یادگیری برای سیستمهای فازی ۷۵
۴-۳-۱ سیستم فازی TSK مرتبه اول ۷۶
۴-۳-۲ کنترل کننده فازی اولیه ۷۸
۴-۳-۳ مدل مرجع ۷۹
۴-۳-۴ طراحی مدل فازی ۸۰
۴-۳-۵ آموزش کنترل کننده فازی ۸۲

فصل پنجم - طراحی کنترل‌کننده فازی

۵-۱ مقدمه ۸۴
۵-۲ شبیه سازی سیستم تعلیق خودرو ۸۵
۵-۳ کنترل کننده فازی اولیه ۸۷
۵-۴ طراحی مدل مرجع غیر خطی ۹۰
۵-۵ طراحی مدل فازی ۹۴
۵-۶ آموزش کنترل کنندهٔ فازی ۹۹
۵-۷ مقایسه نتایج ۱۰۸

فصل ششم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۵

مراجع ۱۲۰

فهرست جداول

جدول (۲-۱) مقادیر کمیتهای معرفی شده در سیستم هیدرولیک ۲۸
جدول (۳-۱) پایگاه قواعد کنترل کننده فازی ۶۲
جدول (۵-۱) مقادیر کمیتهای معرفی شده در سیستم هیدرولیک ۸۶
جدول (۵-۲) مقادیر کمیتهای معرفی شده در سیستم تعلیق خودرو ۸۶
جدول (۵-۳) پارامترهای خروجی کنترل کننده فازی اولیه ۸۹
جدول (۵-۴) مشخصات کامل مدل فازی آموزش دیده ۹۶
جدول (۵-۵) مشخصات کامل کنترل کننده فازی آموزش دیده ۱۰۳
جدول (۵-۶) مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای سیستم تعلیق در آزمون پایداری کنترل کننده فازی ۱۰۷

فهرست شکلها

شکل (۲-۱) سیستم تعلیق نیمه فعال (مدل یک چهارم خودرو) ۱۵
شکل (۲-۲) چند ترکیب مختلف سیستم تعلیق فعال ۱۶
شکل (۲-۳) چند ترکیب مختلف سیستم تعلیق فعال با پهنای باند محدود ۱۷
شکل (۲-۴) مدل یک چهارم سیستم تعلیق فعال خودرو ۱۸
شکل (۲-۵) مدل یک دوم سیستم تعلیق فعال خودرو ۱۹
شکل (۲-۶) نمائی از یک خودرو در حال شتاب ۲۱
شکل (۲-۷) نیروی غیر خطی کمک فنر (سمت راست) و نیروی غیر خطی فنر (سمت چپ) ۲۲
شکل (۲-۸) مدل کامل تعلیق فعال خودرو ۲۴
شکل (۲-۹) نمای کلی یک سیستم هیدرولیک ۲۶
شکل (۲-۱۰) پاسخ پله سیستم تعلیق فعال بدون در نظر گرفتن سیستم هیدرولیک ۲۷
شکل (۲-۱۱) نمایی از عملگر هیدرولیکی به همراه شیر سرو ۲۸
شکل (۲-۱۲) نمایی از عملگر هیدرولیک (رسم شده در نرم افزار Simulink) ۲۹
شکل (۲-۱۳) پاسخ پله سیستم تعلیق فعال با در نظر گرفتن سیستم هیدرولیک (K_f=.0005) ۳۰
شکل (۲-۱۴) پاسخ پله سیستم تعلیق فعال با در نظر گرفتن سیستم هیدرولیک (K_f=.005) ۳۱
شکل (۲-۱۵) منحنی وزنی فرکانس برای شتاب عمودی، پیشنهاد شده به وسیله سازمان جهانی استاندارد ۳۵
شکل (۲-۱۶) منحنی وزنی فرکانس برای شتابهای چرخش حول محور عرضی و طولی خودرو پیشنهاد شده به وسیله استاندارد انگلستان ۳۵
شکل (۳-۱) نمای یک چهارم سیستم تعلیق خودرو ۳۸
شکل (۳-۲) نحوه عملکرد کنترل کننده پیش بین برای چرخهای جلو و عقب ۴۱
شکل (۳-۳) نحوه عملکرد کنترل کننده پیش بین برای چرخ عقب ۴۱
شکل (۳-۴) پاسخ فرکانسی سرعت عمودی جرم چرخ ۴۲

شکل (۳-۵) درصد بهبود کیفیت سواری (راحتی سفر) نسبت به سیستم غیرفعال ۴۳
شکل (۳-۷) تابع پنجره‌ای Blackman ۴۸
شکل (۳-۸) نمای جعبه‌ای طرح کنترل پیش‌بین فازی ۴۹
شکل (۳-۹) توابع عضویت در نظر گرفته شده برای کنترل کننده فازی ۴۹
شکل (۳-۱۰) ساختار سیستم حلقه بسته خودرو ۵۲
شکل (۳-۱۱) نحوه آموزش مدل عصبی خودرو. A- روش پیش‌رو B- روش بازگشتی ۵۳
شکل (۳-۱۲) کنترل‌کننده مدل مرجع A- روش پیش‌رو B- روش بازگشتی ۵۴
شکل (۳-۱۳) کنترل‌کننده بهینه ساز تابع هزینه A- روش پیش‌رو B- روش بازگشتی ۵۵
شکل (۳-۱۴) تابع غیر خطی ϕ ۵۸
شکل (۳-۱۵) نمای کلی سیستم حلقه بسته ۶۰
شکل (۳-۱۶) محدوده جابجائی سیستم تعلیق بر حسب سانتیمتر ۶۳
شکل (۴-۱) نحوه بکارگیری مدل مرجع در فرآیند آموزش ۷۹
شکل (۴-۲) نحوه آموزش مدل فازی ۸۱
شکل (۵-۱) نیروی فنر و کمک فنر غیرخطی ۸۵
شکل (۵-۲) نمای جعبه‌ای عملگر هیدرولیک (ساده شده) ۸۶
شکل (۵-۳) نمای جعبه‌ای سیستم تعلیق خودرو به همراه عملگر هیدرولیک ۸۷
شکل (۵-۴) توابع عضویت در نظر گرفته شده برای کنترل کننده فازی اولیه ۸۸
شکل (۵-۵) پاسخ سیستم حلقه بسته اولیه به دست انداز پله ۸۹
شکل (۵-۶) پاسخ سیستم حلقه بسته اولیه به دست‌انداز Bump ۹۰
شکل (۵-۷) نمای جعبه‌ای مدل مرجع ۹۳
شکل (۵-۸) توابع عضویت ورودی مدل فازی آموزش دیده ۹۷
شکل (۵-۹) پاسخ مدل فازی آموزش دیده (پاسخ به شرایط اولیه) ۹۸
شکل (۵-۱۰) پاسخ مدل فازی آموزش دیده (پاسخ به یک اغتشاش تصادفی) ۹۸
شکل (۵-۱۱) نمودار گردشی مربوط به نحوه آموزش کنترل کننده ۱۰۱
شکل (۵-۱۲) توابع عضویت کنترل کننده اولیه و آموزش دیده ۱۰۲
شکل (۵-۱۳) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز پله، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق غیر فعال ۱۰۴
شکل (۵-۱۴) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز Bump به ارتفاع ۵ سانتیمتر، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق غیر فعال ۱۰۵
شکل(۵-۱۵) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز Bump به ارتفاع ۱۱ سانتیمتر، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق غیر فعال ۱۰۵
شکل (۵-۱۶) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به یک دست‌انداز تصادفی، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق غیر فعال ۱۰۶

شکل (۵-۱۷) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز پله، در آزمون مقاومت کنترل کننده فازی طراحی شده ۱۰۷
شکل (۵-۱۸) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز Bump ، در آزمون مقاومت کنترل کننده فازی طراحی شده ۱۰۸
شکل (۵-۱۹) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به یک دست‌انداز تصادفی، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق فعالی که بوسیله کنترل کننده LQR کنترل می‌شود ۱۱۲
شکل (۵-۲۰) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز پله، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق فعالی که بوسیله کنترل کننده LQR کنترل می‌شود ۱۱۳
شکل (۵-۲۱) پاسخ سیستم تعلیق فعال خودرو (کنترل شده بوسیله کنترل‌کننده فازی آموزش دیده) به دست‌انداز Bump ، در مقایسه با پاسخ سیستم تعلیق فعالی که بوسیله کنترل کننده LQR کنترل می‌شود ۱۱۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

سیستم تعلیق[1] خودرو به منظور کاهش و یا حذف لرزش‌های ناشی از ناهمواریهای سطح جاده به کار گرفته می‌شود تا به این وسیله معیار راحتی سفر[2] در یک حد مطلوب باقی بماند. در ابتدا سیستم تعلیق خودرو با استفاده از عناصر غیرفعال[3] ساخته می‌شد. این عناصر غیرفعال همان فنر[4] و کمک فنر[5] می‌باشند که انرژی را به ترتیب ذخیره و تلف می‌کنند. ولی با وجود گذشت سالیان دراز از زمان بکارگیری اولین سیستم تعلیق غیرفعال، استفاده از این عناصر در ساخت سیستم تعلیق خودروها بدلایل اقتصادی همچنان مرسوم است.

کارآیی سیستم‌های تعلیق غیرفعال در خودروها چندان مطلوب نیست چرا که عملکرد

1- Suspension system
2- Ride comfort
3- Passive
4- Spring
5- Damper