بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق– کنترل

طراحی کنترلگر مقاوم مرتبه مشخص با معیار H_2 برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی

محمد زادی

استاد راهنما:

دکتر سجاد ازگلی

استاد مشاور:

دکتر آرش صادق زاده

زمستان ۱۳۹۰

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای محمد زادی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **طراحی کنترل کننده مقاوم مرتبه ثابت با معیار H_2 برای سیستم های دارای نامعینی پرامتری بیضوی** در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد کنترل پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر سجاد ازگلی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر آرش صادق زاده	استادیار	
استاد ناظر	دکتر کامران اکبری مورنانی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر کامران اکبری مورنانی	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تائید است
امضای استاد راهنما:
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه تربیت مدرس

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب محمد رادی دانشجوی رشته مهندسی برق - کنترل ورودی سال تحصیلی ۸۹-۸۸ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:

تاریخ: ۹۱/۱/۲۶

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند 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 ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمد رادی دانشجوی رشته مهندسی برق - کنترل مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد رادی

تاریخ و امضا: ۹۱/۱/۲۶

تقدیم

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که با حمایت‌های فراوان مادی و معنوی خود در همه لحظات زندگی یاری گر من بودند.

تشکر و قدردانی

از همه دوستان و عزیزانی که مستقیم و غیرمستقیم در به ثمر نشستن این پایان نامه با حقیر همراهی کرده اند مخصوصا اساتید گرامی دکتر سجاد ازگلی و دکتر آرش صادق زاده کمال تشکر و قدردانی را دارم و امیدوارم این پایان نامه زمینه همکاری‌های بیشتر علمی با ایشان باشد.

چکیده

در این پایان نامه به مسئله طراحی کنترلگر مقاوم مرتبه مشخص با جایگذاری قطب و قید عملکردی بهینه سازی نرم H_2 برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی پرداخته شده است. مسائل کنترل مقاوم با نامعینی بی‌ساختار به علت موجود بودن ابزارهای تحلیل و طراحی مورد نیاز و سادگی نسبی آنها توسعه بسیار بیشتری نسبت به مسائل با نامعینی ساختارمند و پارامتری داشته اند. با این وجود به علت محافظه کاری بالا در روش‌های مبتنی بر نامعینی بی‌ساختار، نیاز و تمایل به سمت مواجهه با نامعینی پارامتری افزایش یافته و در حال گسترش است. از سوی دیگر پیچیده تر شدن سیستم‌ها مسیر مدل سازی آنها را از قوانین پایه به سمت شناسایی منحرف ساخته که به علت وجود نویز، مدل حاصل از شناسایی، مدلی نامعین خواهد بود که می‌توان آن را با ساختاری بیضوی درنظر گرفت.

نقطه قوت اساسی حل مسئله در این گزارش، مرتبه مشخص بودن کنترلگر است. با توجه به اینکه عموم روش‌های کنترل مقاوم کنترلگرهای لااقل هم مرتبه با مرتبه سیستم نتیجه می‌دهند، طراحی کنترل برای سیستم‌های گسترده نیازمند توسعه روش‌های طراحی کنترلگر مرتبه پایین و مشخص از قبل است. این روش‌ها منجر به مسائل غیرمحدب می‌شوند که حل آنها در حالت کلی امکان پذیر نیست و می‌بایست راه حلی مانند تقریب به یک مسئله محدب برای آنها ارائه کرد که مسلماً موجب محافظه کاری است. در این پایان نامه نیز با اتخاذ همین راه حل سعی در کاهش اثر محافظه کارانه قید کارایی با نرم H_2 بر روی طراحی کنترلگر مقاوم داشته ایم.

نتایج حاصل از شبیه سازی، ارائه شده در فصل ۵-، کارآمدی روش بکار رفته را نشان می‌دهد.

کلید واژه: کنترلگر مرتبه مشخص، کنترل مقاوم، نامعینی پارامتری‌بیضوی، کنترل H_2، LMI

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ج
فهرست شکل‌ها ..... د

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۲
۱-۲-۱- شناسایی و کنترل ۲
۱-۲-۲- کنترلگر مرتبه مشخص ۳
۱-۲-۳- شیوه‌های نوین ۴
۱-۳- توصیف مسئله و نوآوری‌های پژوهش ۵
۱-۴- ساختار گزارش ۶

فصل ۲- بررسی نامعینی بیضوی و مسئله نامحدب بودن کنترل مرتبه مشخص ۸
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- انواع نامعینی ۸
۲-۲-۱- نامعینی بی‌ساختار ۸
۲-۲-۲- نامعینی ساختارمند ۹
۲-۳- نامعینی پارامتری بیضوی ۱۰
۲-۳-۱- شناسایی PE با ساختار مدل بدون بایاس ۱۰
۲-۳-۲- شناسایی PE با ساختار مدل بدون بایاس ۱۲
۲-۳-۳- نواحی نامعینی حاصل از شناسایی PE ۱۳
۲-۳-۴- ساختار کلی نواحی نامعینی حاصل از شناسایی PE ۱۵
۲-۴- غیرمحدب بودن مسئله کنترل مرتبه مشخص ۱۶

فصل ۳- طراحی کنترلگر مرتبه مشخص برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی ۱۸
۳-۱- مقدمه ۱۸
۳-۲- روش چندجمله‌ای‌های مثبت ۱۹
۳-۲-۱- توصیف مسئله ۱۹
۳-۲-۲- جایابی ناحیه ای قطب‌ها ۲۰
۳-۲-۳- طراحی کنترل کننده H_∞ مقاوم ۲۱
۳-۳- روش قسمت حقیقی اکیداً مثبت ۲۳
۳-۳-۱- پیش نیازها ۲۳
۳-۳-۲- طراحی کنترل کننده H_∞ ۲۴

۳-۴- روش پارامتریزاسیون سیستم و کنترلگر ۲۵
۳-۴-۱- توصیف مسئله ۲۶
۳-۴-۲- پارامتریزاسیون کنترل کننده ۲۷
۳-۴-۳- ویژگی‌های عملکردی ۲۸
۳-۴-۳-۱- مسئله طراحی کنترلگر به فرم یک مسئله بهینه سازی محدب ۲۸
۳-۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده H_2 ترکیبی با جایابی قطب ۲۹
۳-۴-۳-۳- طراحی کنترلگر H_∞ ترکیبی با جایابی قطب ۳۰
۳-۵- جمع بندی و نتیجه گیری ۳۱

فصل ۴- بهبود عملکرد H_2 با استفاده از توابع لیاپانف پارامتری ۳۳
۴-۱- مقدمه ۳۳
۴-۲- توصیف مسئله و پیش نیازها ۳۴
۴-۳- طراحی کنترلگر ۳۶
۴-۴- پارامتریزاسیون محدب با بعد محدود ۳۹
۴-۵- جمع بندی و نتیجه گیری ۴۲

فصل ۵- شبیه سازی نتایج ۴۳
۵-۱- مقدمه ۴۳
۵-۲- طراحی کنترل مقاوم برای سیستم با نامعینی پارامتری بیضوی ۴۳
۵-۲-۱- چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف مشترک ۴۶
۵-۲-۲- چندجمله‌ای پارامتری و ماتریس لیاپانف مشترک ۴۷
۵-۲-۳- چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف پارامتری ۴۷
۵-۲-۴- چندجمله‌ای و ماتریس لیاپانف پارامتری ۵۰
۵-۲-۵- چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف ثابت، بدون فرمولاسیون LPD ۵۱

فصل ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات ۵۴
۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری ۵۴
۶-۲- پیشنهادات ۵۴

فهرست مراجع ۵۶

واژه نامهٔ فارسی به انگلیسی ۵۹

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۶۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱: γ_{opt} و کنترلگر برای انتخاب متفاوت چندجمله‌ای مشخصه مطلوب و ماتریس لیاپانف..... ۵۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: مدلسازی عدم قطعیت بی‌ساختار به صورت ضربی ۹
شکل ۲-۲: ساختار حلقه بسته مورد استفاده در روش شناسایی حلقه بسته ۱۴
شکل ۲-۳: ساختار کنترلی عمومی ۱۶
شکل ۳-۱: شماتیک سیستم استاندارد حلقه بسته ۲۱
شکل ۴-۱: شماتیک سیستم استاندارد حلقه بسته ۳۴
شکل ۵-۱: جایگذاری قطب‌های حلقه بسته برای حالت چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف مشترک... ۴۶
شکل ۵-۲: نرم H_2 صد نمونه از سیستم نامعین برای حالت چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف مشترک ۴۷
شکل ۵-۳: جایگذاری قطب‌های حلقه بسته برای حالت چندجمله‌ای پارامتری و ماتریس لیاپانف مشترک ۴۸
شکل ۵-۴: نرم H_2 صد نمونه از سیستم نامعین برای حالت چندجمله‌ای پارامتری و ماتریس لیاپانف مشترک ۴۸
شکل ۵-۵: جایگذاری قطب‌های حلقه بسته برای حالت چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف پارامتری ۴۹
شکل ۵-۶: نرم H_2 صد نمونه از سیستم نامعین برای حالت چندجمله‌ای ثابت و ماتریس لیاپانف پارامتری ۴۹
شکل ۵-۷: جایگذاری قطب‌های حلقه بسته برای حالت چندجمله‌ای و ماتریس لیاپانف پارامتری ۵۰
شکل ۵-۸: نرم H_2 صد نمونه از سیستم نامعین برای حالت چندجمله‌ای و ماتریس لیاپانف پارامتری.. ۵۱
شکل ۵-۹: جایگذاری قطب‌های حلقه بسته برای روش قسمت ۳-۴- ۵۲
شکل ۵-۱۰: نرم H_2 صد نمونه از سیستم نامعین برای روش قسمت ۳-۴- ۵۲

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

انسان برای مواجهه با محیط مصنوع یا طبیعی اطراف خود نیاز به منطقی مناسب با ساختار خودش و محیط دارد. از سال‌های بسیار دور این منطق با یا بدون نام کنترل، همراه انسان بوده است. در سال‌های پسین با پیشرفت ابزارها، از یک سو علم کنترل به شکل ساختارمندی پیشرفت کرده و توانسته است در سیستم‌های پیچیده تر و با مقیاس‌های وسیع تری بکار گرفته شود و از سوی دیگر با پیچیده تر شدن سیستم‌ها، علم شناسایی برای شناخت دقیق تر و به دست آوردن مدلی مناسب تر برای کنترل آنها به وجود آمده و توسعه یافته است.

مسائل مختلف کنترل قابل تبدیل به یک مسئله بهینه سازی هستند. مسئله ای که هدف آن به دست آوردن بهترین انتخاب با توجه به هزینه‌های موجود است. مسائل بهینه سازی به دو دسته محدب و غیر محدب قابل تقسیم هستند. یک مسئله بهینه سازی محدب با توجه به ابزارهای موجود مانند نابرابری ماتریسی خطی[1] به یقین قابل حل است و همچنین دارای یک نقطه و یا انتخاب بهینهٔ سراسری است. در عوض یک مسئله غیرمحدب فاقد این دو ویژگی بوده و همین مسئله موجب دشواری کار با آن می‌گردد. اغلب مسائل کنترل را می‌توان به یک مسئله بهینه سازی محدب فرموله کرد اما برخی از مسائل نیز وجود دارند که به یک مسئله غیر محدب تبدیل می‌شوند که در حالت کلی حل جامعی برای آنها وجود ندارد بنابراین می‌توان گفت که آینده علم کنترل به سمت مواجهه با مسائل غیر محدب پیش می‌رود.

یکی از مسائل مهم قابل تبدیل به یک مسئله بهینه سازی، مسئله طراحی کنترلگر با توجه به شروط کارایی و پایداری در کنار عدم اطمینان یا نامعینی[2] است. نامعینی در سیستم‌ها را می‌توان به طرق مختلفی اعم از ساختارمند و بی‌ساختار مدل کرد. مثلاً در شناسایی سیستم به علت وجود نویز در حسگرها نامعینی به وجود می‌آید که نوع خاصی از نامعینی ساختارمند به اسم نامعینی پارامتری بیضوی است. روش‌هایی مانند کنترل مقاوم، کنترل تطبیقی و کنترل پیش بین برای مواجهه با نامعینی در سیستم‌ها بکار می‌روند. کنترل مقاوم به علت سادگی طراحی و ثابت بودن الگوریتم کنترل دارای مزیت نسبت به بقیه شیوه‌هاست که روش مد نظر در این پژوهش نیز می‌باشد و این در حالی است که کنترل تطبیقی در صورت نیاز به کنترل برخط[3] کاربرد خواهد داشت.

طراحی کنترل مقاوم در حالت کلی یک مسئله محدب است اما در سیستم‌های پیچیده و مقیاس وسیع که مرتبه بالایی دارند، کنترلگری به مرتبه بالا و حداقل برابر مرتبه خود سیستم طراحی می‌شود

[1] Linear Matrix Inequality (LMI)
[2] Uncertainty
[3] Online

که از لحاظ هزینه و قابلیت ساخت گاه امکان پذیری خود را از دست می‌دهد. لذا ضروری است که روش‌هایی برای ثابت و پایین نگاه داشتن مرتبه کنترلگر لحاظ گردد. این روش‌ها ممکن است موجب غیر محدب شدن مسئله و یا کاهش کارایی کنترلگر گردند.

۱-۲- تاریخچه

۱-۲-۱- شناسایی و کنترل

در گذشته روش‌های شناسایی سیستم قلمرو ریاضی دانان، آماردانان، آنالیز کننده‌های سری‌های زمانی و اقتصاددانان بوده است. تاریخچه شناسایی سیستم به کارهای گاوس و لژاندر در قرن هجده و نوزده باز می‌گردد. تئوری کنترل نیز قلمرو مهندسین بوده است. تا ۱۹۲۰ طراحی کنترل بر پایه نمایش‌های بود[۱]، نایکوئیست[۲] و زیکلرنیکولز[۳] بود. این روش‌ها در زمینه‌هایی از مهندسی که مدل‌های قابل اطمینان بر پایه تئوری‌های پایه ای به دست می‌آیند مانند کاربردهای الکتریکی، مکانیکی و هوافضا، کاربرد دارند.[۱] شناسایی مدل‌های جعبه سیاه[۴] در جامعه کنترل از ۱۹۶۵ آغاز شد. در [۲] تئوری تحقق فضای حالت مطرح می‌شود که اساس روشی است که امروزه با نام شناسایی زیر فضا نامیده می‌شود. در [۳] چارچوب ML[۵] برای شناسایی مدل‌های ورودی - خروجی مطرح گردید، که باعث به وجود آمدن چارچوب خطای پیش‌بینی (PE)[۶] گردید که روش کارامدی است. برای سیستم‌هایی که در آنها بر اساس قوانین پایه ای نمی‌توان مدل سیستم را به دست آورد، ظهور تئوری شناسایی سیستم باعث توسعه کاربرد روش‌های طراحی بر پایه مدل در زمینه‌های کاربردی گوناگونی شده است. به این ترتیب از سال ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۰ کنترل بر پایه مدل به سیستم‌های دینامیکی و فرایندها، که مدل آنها با استفاده از تکنیک‌های جدید شناسایی به دست می‌آمدند، اعمال شد [۱]. تا بدین جا هیچ گونه نامعینی برای سیستم‌ها درنظر گرفته نمی‌شد و در واقع مدل شناسایی شده معادل قطعی مدل واقعی تلقی گردیده و به منظور طراحی کنترلگر مورد استفاده قرار می‌گرفت.

از دهه ۸۰ تئوری‌های کنترل مقاوم شکل گرفتند و طراحی کنترل مقاوم با وجود نامعینی‌های ساختارمند و بی‌ساختار مورد توجه قرار گرفت. تئوری‌های کنترل مقاوم با درنظر گرفتن نامعینی‌های بی‌ساختار رشد و پیشرفت بیشتری داشتند ولی طراحی کنترل کننده مقاوم با درنظر گرفتن نامعینی ساختارمند و پارامتری هنوز جای‌کار بسیاری دارد و این امر باعث گردیده است که فاصله ای میان طراحی

[1] Bode
[2] Nyquist
[3] Ziegler–Nichols
[4] Black box
[5] Maximum likelihood
[6] Prediction Error

کنترل مقاوم و شناسایی سیستم ایجاد گردد. چرا که مجموعه‌های نامعینی حاصل از شناسایی سیستم به روش متداول خطای پیش‌بینی به صورت نامعینی پارامتری (بیضوی) می‌باشند.

روش‌های اندکی برای طراحی کنترل کننده مقاوم با وجود نامعینی بیضوی وجود دارند. در [۴] مسئله پایداری مربعی[1] برای سیستم‌ها با نامعینی پارامتری مورد توجه قرار گرفته است که شامل طراحی کنترلگر فیدبک حالت و فیدبک خروجی می‌شوند. در [۵] نشان داده می‌شود که مسئله جایابی مقاوم قطب‌ها برای سیستم‌ها با نامعینی پارامتری بیضوی می‌تواند به فرم یک مسئله بهینه سازی min - max محدب مطرح گردد. در [۶] ویژگی مطلوب، پایدار سازی مقاوم است. هدف یافتن کنترل کننده ای است که حجم مجموعه مدل بیضوی را بیشینه نماید.

در [۷] مسئله طراحی کنترلگر فیدبک حالت H_∞ مورد بررسی قرار گرفته است. یک ایراد این روش آن است که پارامترهای نامعین تنها می‌توانند در یکی از ماتریس‌های A و یا C از تحقق فضای حالت سیستم نامعین قرار گیرند. علاوه بر این، از آنجا که نتایج ارائه شده در این مقاله بر پایه درنظر گرفتن یک ماتریس لیاپانوف مشترک برای تمامی‌سیستم‌ها در مجموعه مدل می‌باشد، محافظه کارانه خواهد بود. در [۸] یک فرایند تکرار شونده[2] برای طراحی کنترلگر برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی ارائه شده است. در گام اول یک مجموعه از کنترل کننده‌ها برای سیستم نامی‌با عملکردی کمی‌بهتر از عملکرد مطلوب بر روی کل مجموعه مدل بیضوی طراحی می‌شود. سپس با آنالیز کنترلگر بر روی کل مجموعه سیستم‌ها در مجموعه مدل مطلوبیت عملکردی آن بررسی می‌شود. در [۹] یک روش طراحی کنترل کننده فیدبک خروجی H_∞ بر پایه پارامتریزاسیون با بعد نامحدود یولا-کوچرا[3] آورده شده است. که کنترلگری برابر یا بالاتر از مرتبه مدل ارائه می‌نماید.

۱-۲-۲- کنترلگر مرتبه مشخص

از اواسط دهه ۸۰ به طراحی کنترلگر مرتبه مشخص توجه بیشتری شد. لازم به ذکر است این مسائل سخت NP[4] می‌باشند به این معنی که زمان محاسبات بسیار سریعتر از یک عبارت چند جمله‌ای از متغیرها افزایش می‌یابد [۱۰]. همچنین باید گفت که منظور از طراحی کنترلگر مرتبه مشخص غیر از استفاده از روش‌های کاهش مرتبه سیستم یا کنترلگر است بلکه کنترلگر مرتبه مشخص کنترلگریست که مرتبه آن پیش از طراحی تعیین شده باشد.

از جمله نخستین کارهای انجام شده در این زمینه در [۱۱] مشاهده می‌شود. در این مقاله الگوریتم تصویرسازی جایگزین[5] برای فرمول بندی شرایط نابرابری ماتریسی دوخطی و رتبه ماتریس ظاهر شده در

[1] Quadratic stability
[2] Recursive procedure
[3] Youla-Kucera
[4] NP Hard (Non-deterministic polynomial-time Hard)
[5] Alternative projection algorithm

مسئله طراحی مرتبه مشخص، استفاده می‌شود. همچنین [۱۲] روشی برای حل مسئله کمینه سازی رتبه ماتریس ارائه شده است.

برخی پژوهش‌ها نیز سعی در حل مسئله نابرابری ماتریسی دو خطی[1] ایجاد شده در این مسئله داشته اند. نابرابری ماتریسی دوخطی برای اولین بار در[۱۳] معرفی شده است. در [۱۴] نشان داده می‌شود که این مسئله نیز مانند مسائل غیرمحدب سخت NP بوده و در زمانی چندجمله‌ای از متغیرها قابل حل نیست. روش‌های محاسباتی مطالعه شده برای حل این مسائل به دو دسته الگوریتم‌های شاخه و قید[2] [۱۵] و روش‌های برنامه ریزی مخروطی[3] [۱۶] تقسیم می‌شوند.

از جمله روش‌های طراحی کنترلگر مرتبه مشخص استفاده از روش معادلات چندجمله‌ای است که در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ توسعه یافته اند. ویژگی این روش تبدیل شدن مسئله طراحی کنترلگر به پاسخ معادلات خطی چند جمله‌ای است [۱۷]. نخستین استفاده‌ها از معادلات چندجمله‌ای در طراحی سامانه‌های کنترلی به [۱۸] برمی‌گردد. همچنین از این روش به منظور تحلیل و طراحی سیستم‌های زمان گسسته در [۱۹] و سیستم‌های زمان پیوسته در [۲۰] استفاده شده است. کاربرد این روش در ابتدا مسائل ساده‌ای مانند پایداری و جاگذاری قطب بود اما بعدها توسعه بیشتری یافت [۲۱]. بعنوان یکی از نخستین مقالات در زمینه طراحی کنترلگر مرتبه پایین، الگوریتمی‌با استفاده از برنامه ریزی خطی جهت طراحی کنترلگر ارائه داده است. در این روش از چندجمله‌ای مشخصه برای تعیین پایداری حلقه بسته و طراحی کنترلگر با استفاده از یک الگوریتم تکراری استفاده شده است. همچنین در [۲۲] از طریق ماتریس‌های فضای حالت، الگوریتمی‌جهت طراحی کنترلگر مرتبه مشخص پیشنهاد شده است. در این الگوریتم مرتبه کنترلگر پیش از طراحی تعیین می‌شود، سپس با استفاده از این الگوریتم تکراری مرتبه کنترلگر افزایش می‌یابد تا قطب‌های حلقه بسته جاگذاری شوند و حلقه بسته پایدار گردد. هر دو روش یاد شده تضمینی برای نقطه بهینه سراسری ندارند.

در سال‌های اخیر سعی شده است تا این مسئله با ورود مقداری محافظه کاری به یک مسئله محدب تقریب زده شود که روش مورد استفاده در این پژوهش نیز می‌باشد.

۱-۲-۳- شیوه‌های نوین

در این پژوهش از روش تقریب مسئله به یک مسئله بهینه سازی محدب استفاده می‌شود. نخستین پژوهش‌ها در زمینه طراحی کنترلگر مرتبه مشخص توسط آقای هنریون[4] و همکاران ایشان در [۲۳] انجام شده است و بعد تر با شیوه ای مشابه و جزئیات بیشتر در [۲۴] ادامه یافته است. در این مقالات با استفاده از یک چندجمله‌ای موسوم به چندجمله‌ای مرکزی مسئله طراحی کنترلگر مرتبه مشخص به یک

[1] Bilinear matrix inequality (BMI)
[2] Branch and Bound Algorithms (BB)
[3] Cone programming
[4] Henrion

مسئله محدب تبدیل می‌شود و مرتبه چندجمله‌ای مرکزی مرتبه کنترلگر را مشخص می‌کند. نامعینی درنظر گرفته شده از نوع چندوجهی است و طراحی تنها به کنترل پایدارساز محدود شده است. در [۲۴] بررسی بیشتری روی چندجمله‌ای مرکزی و ارتباط آن با قطب‌های حلقه بسته انجام گرفته است. در [۲۵] ادامه کار [۲۳] با افزودن قید کارایی H_∞ به سیستم حلقه بسته انجام گرفته است. در [۲۶] با ارائه یک پارامتریزاسیون نوین از کنترلگرهای پایدارکننده روش جدیدی برای طراحی کنترلگر مرتبه مشخص با تعیین ساختار و مرتبه کنترلگر قبل از طراحی ارائه شده است و سپس قیدهای H_∞ و H_2 به سیستم حلقه بسته اضافه شده اند. ایراد این مقاله همچون کارهای پیشین استفاده از ماتریس لیاپانف مشترک است که محافظه کاری بالایی را وارد طراحی کنترلگر می‌کند. ویژگی مثبت این روش نیز وارد کردن قید H_2 به قیود کارایی سیستم است. روش دیگری نیز در [۲۷] برای طراحی کنترلگر مرتبه مشخص H_∞ ارائه گردیده است. استفاده از ماتریس لیاپانف مشترک در این روش نیز باعث به وجود آمدن محافظه کاری علاوه بر محافظه کاری حاصل از تقریب مسئله غیر محدب به یک مسئله محدب گردیده است. روش‌های فوق همگی بر روی سیستم‌های با نامعینی چندوجهی اعمال شده اند. نخستین طراحی کنترلگر برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی در [۲۸] انجام گرفته است. در این مقاله با استفاده از تقریب بیضوی داخی[1] از حوزه پایداری در فضای ضرایب چندجمله ای (ارائه شده در [۲۹]) یک روش جهت طراحی کنترل کننده مرتبه مشخص پایدار ساز برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی ارائه شده است. در [۱] شیوه‌های استفاده شده در [۲۵،۲۳، ۲۶ و ۲۷] برای نامعینی پارامتری بیضوی تعمیم داده شده اند. در [۳۰] با دو ترفند محافظه کاری طراحی در [۲۷] کاهش یافته است. در این مقاله به جای چندجمله‌ای مرکزی ثابت از یک چند جمله‌ای پارامتری استفاده شده و به جای ماتریس لیاپانف مشترک نیز ماتریس پارامتری بکار رفته است. در ادامه روش‌های فوق در این پایان نامه نیز سعی شده تا با استفاده از دو ترفند بکار رفته در [۳۰] از محافظه کاری روش طراحی مورد استفاده در [۲۶] کاسته و این روش طراحی را برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی بکار گیریم.

۱-۳- توصیف مسئله و نوآوری‌های پژوهش

همانگونه که بیان شد، مرتبه بالای کنترلگر در سامانه‌های واقعی منجر به پیچیدگی‌های زیادی در پیاده سازی سخت افزاری و نرم افزاری می‌گردد. علاوه بر این در برخی کاربردها مانند صنایع هوانوردی نیاز به استفاده از کنترلگر مرتبه پایین است. برای نمونه از کاربردهای استفاده از کنترلگر و یا مدل‌های مرتبه پایین می‌توان به [۳۱] اشاره کرد که درآن به منظور کنترل فرایندهای شیمیایی روشی برای طراحی کنترلگرهای مرتبه پایین ارائه شده است. برای طراحی کنترلگر مرتبه پایین سه روش کلی وجود دارد. دو دسته، روش‌های مبتنی بر کاهش مرتبه هستند و دسته سوم شامل روش طراحی به گونه ای است که مرتبه کنترلگر به نحوی در حین یا پیش از روند طراحی تعیین شود[۳۲].در روش اول ابتدا یک

[1] Ellipsoidal inner approximation

مدل مرتبه پایین از سیستم به دست آورده می‌شود و سپس از سیستم کاهش مرتبه یافته برای طراحی کنترلگر استفاده می‌شود و در نهایت کنترلگر به دست آمده برای سیستم اصلی بکار می‌رود. این روش دو عیب اساسی دارد. نخست اینکه بکارگیری مدل مرتبه پایین تضمینی برای پایین بودن مرتبه کنترلگر به اندازه کافی ندارد و دیگر اینکه خطای کاهش مرتبه مدل در طراحی کنترلگر منتشر می‌شود [۳۲]. در روش دوم ابتدا برای سیستم مرتبه بالا کنترلگر طراحی شده و سپس مرتبه کنترلگر به گونه ای کاهش می‌یابد که ویژگیهای سیستم حلقه بسته نامی‌را تا حد امکان برآورده نماید. در این روش شاخص اصلی حفظ پایداری است و لذا ممکن است از کارآیی سیستم کاسته شود[۳۳]. در نهایت روش سوم تعیین مرتبه کنترلگر در ضمن طراحی است که به کنترل مرتبه مشخص مشهور است. این مسئله به یک مسئله بهینه سازی غیر محدب منجر خواهد شد که با جزئیات بیشتر در فصل بعد بررسی می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان ضمن تعیین مرتبه کنترلگر، شاخص‌های پایداری و کارایی را نیز توأمان وارد روند طراحی کرد.

سیستم مورد پژوهش در این پایان نامه یک سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان[1] تک ورودی-تک خروجی و زمان گسسته است که از طریق شناسایی به روش خطای پیش‌بینی (PE) به دست آمده و لذا دارای نامعینی پارامتری بیضوی است. هدف، طراحی کنترلگری است که اولا دارای مرتبه ثابت و مشخص باشد و ثانیا همه سیستم‌های حلقه بسته موجود در ناحیه بیضوی را پایدار سازد و ثالثا قطب‌ها تا حدامکان در مکان‌های مطلوب جایگذاری شوند و در نهایت بتوان قیود کارایی H_∞ و H_2 را در سیستم حلقه بسته اعمال نمود.

چنین کاری قبلاً انجام شده و جنبه نوآوری این پژوهش در کاهش تأثیر محافظه کارانه قیود پایداری و کارایی H_2 در طراحی کنترلگر خواهد بود

۱-۴- ساختار گزارش

در ادامه و در فصل ۲ پس از مرور مطالب زمینه ای در مورد شناسایی PE، به بررسی نامعینی پارامتری بیضوی در کنار سایر انواع نامعینی پرداخته خواهد شد و سپس مسئله غیرمحدب بودن کنترلگر مرتبه مشخص مقاوم و دلایل آن با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فصل ۳، سه روش متفاوت جهت طراحی کنترل کننده دینامیک فیدبک خروجی مرتبه مشخص برای سیستم‌هایی با نامعینی پارامتری بیضوی برای اولین بار ارائه شده است. روش‌های ارائه شده در این بخش یکی بر اساس روش چندجمله ای‌های مثبت[2]، دیگری بر اساس روش قسمت حقیقی اکیداً مثبت[3] بنا نهاده شده اند که با هدف طراحی کنترل کننده مقاوم H_∞ مرتبه مشخص به همراه جایابی قطب

[1] Linear time invarient
[2] Positive polynomials
[3] Strictly positive realness

می‌باشد. در روش سوم نیز با پارامتریزه کردن معادلات سیستم و کنترلگر شیوه ای برای طراحی کنترلگر مقاوم H_2 و/یا H_∞ به همراه جایابی قطب ارائه شده است.

روش‌های ارائه شده جهت طراحی کنترل کننده مقاوم در فصل ۳ بدلیل درنظر گرفتن توابع لیاپانوف مشترک برای تمامی‌سیستم‌ها در مجموعه مدل، همراه با محافظه کاری است. به منظور کاهش این محافظه کاری در طراحی کنترل کننده مقاوم، روشی جهت طراحی کنترل مقاوم H_2 برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی و بر اساس توابع لیاپانوف وابسته به پارامترها، در فصل۴ ارائه می‌شود.
در فصل ۵ به منظور نشان دادن کار آمدی تئوری‌های ارائه شده در این رساله، شبیه سازی روش‌های ارائه شده بر روی سیستم واقعی درنظر گرفته می‌شود و نهایتا در فصل آخر رساله جمع بندی مطالب و پیشنهادهایی برای ادامه مسیر پژوهش ارائه خواهد شد.

فصل ۲- بررسی نامعینی بیضوی و مسئله نامحدب بودن کنترل مرتبه مشخص

۲-۱- مقدمه

با پیچیده تر شدن سیستم‌ها نیاز به شناسایی آنها برای به دست آوردن مدل مناسب جهت کنترل افزایش پیدا کرد. به علت وجود نویز در حسگرها، مدل حاصل از شناسایی سیستم‌ها همراه با نامعینی خواهد بود. در این فصل پس از مرور اجمالی انواع مدلسازی نامعینی‌ها، نشان داده خواهد شد که شناسایی PE با یک ساختار مدل بدون بایاس، این امکان را فراهم می‌آورد تا یک ناحیه نامعینی پارامتری که سیستم واقعی را با یک احتمال از پیش تعیین شده در بر خواهد داشت، به دست آید. روش شناسایی خطای پیش‌بینی (PE) یک مدل تخمین زده شده از سیستم واقعی G_0 فراهم می‌آورد. اگر ساختار پارامتری درنظر گرفته شده برای مدل، بتواند سیستم واقعی را در بر داشته باشد، این ساختار مدل را ساختار مدل بدون بایاس گویند. در این صورت با استفاده از ماتریس کوواریانس پارامترهای تخمین زده شده، می‌توان یک ناحیه نامعینی پارامتری U را که ساختار ثابت بیضوی دارد و سیستم واقعی را با یک سطح احتمال از پیش تعیین شده در بر می‌گیرد (مثلاً ۹۵ درصد)، تعیین نمود [۱].

در این فصل همچنین به مسئله نامحدب بودن طراحی کنترلگر مرتبه مشخص پرداخته می‌شود. نشان داده می‌شود که مسئله طراحی کنترلگر مرتبه مشخص به یک مسئله غیرمحدب به صورت کمینه سازی رتبه ماتریس و یا مسئله نابرابری ماتریسی دو خطی منجر می‌شود و به آسانی قابل حل نیست.

۲-۲- انواع نامعینی

نامعینی یا عدم اطمینان به اختلاف سیستم حقیقی و مدل ریاضی آن اشاره دارد. نامعینی در سیستم‌ها به دو صورت کلی بی‌ساختار[1] و ساختارمند[2] یا پارامتری بیان و نمایش داده می‌شود. همانگونه که از نام آنها نیز پیداست در نمایش نامعینی بی‌ساختار، ساختار مشخصی برای آن درنظر گرفته نمی‌شود و تنها ممکن است به بیان محدود بودن نرمی از آن اشاره شود.

۲-۲-۱- نامعینی بی‌ساختار

از نظر توجه به انواع مدل‌های نامعینی در مسائل کنترل مقاوم، در دهه ۹۰ و پیش از آن هر دو نوع نامعینی ساختارمند و بی‌ساختار مورد بررسی قرار گرفته اند. نامعینی‌های بی‌ساختار به روش‌های

[1] Unstructured uncertainty
[2] Structured uncertainty