دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی برق گرایش کنترل

پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی تصادفی به فرم زنجیره‌ای

توسط

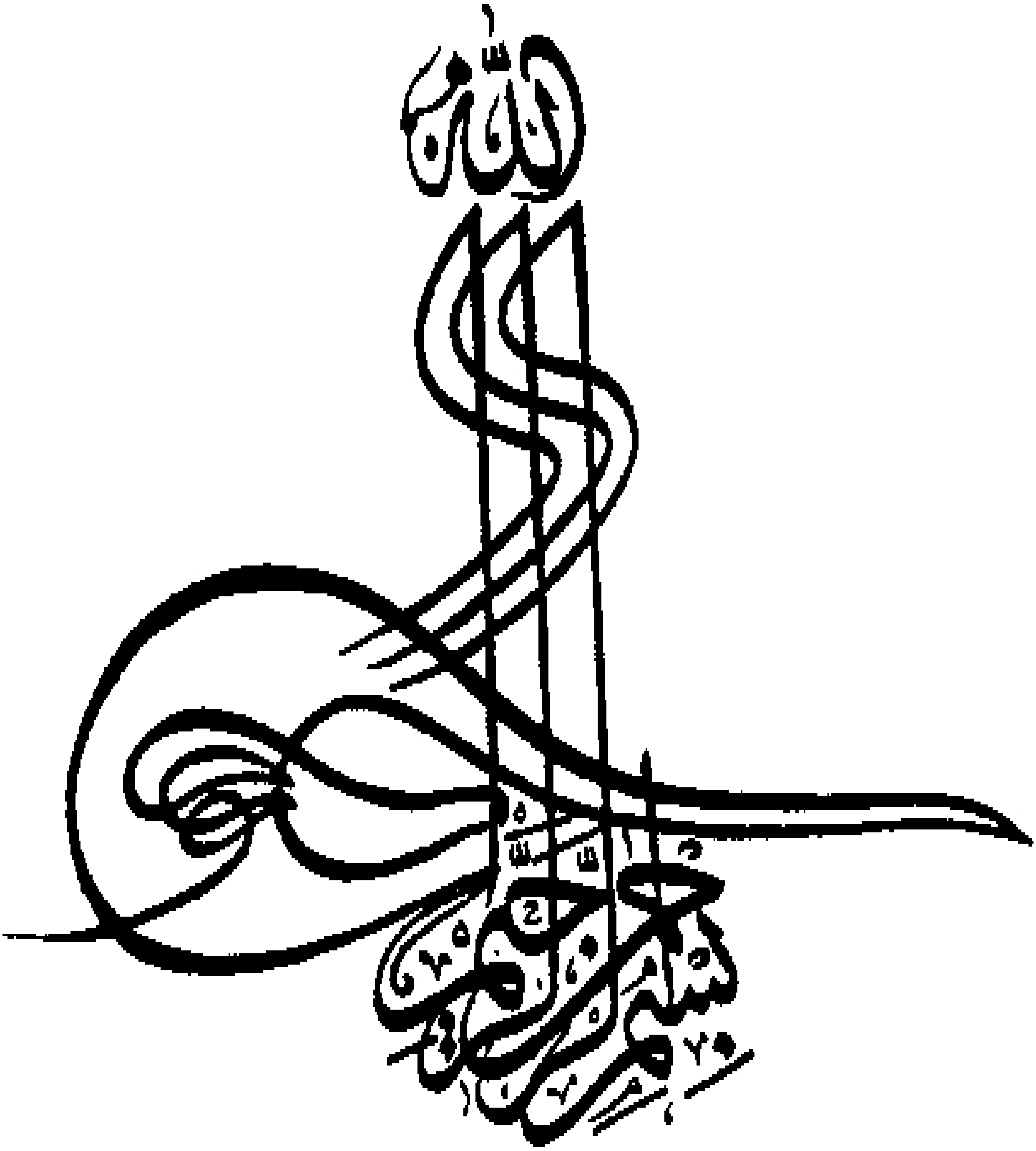
محمد سلطانی

استاد راهنما

دکتر علیرضا خیاطیان

دکتر مریم دهقانی

بهار ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب محمد سلطانی (۸۸۰۶۸۶) دانشجوی رشته‌ی برق-کنترل دانشکده‌ی برق و کامپیوتر اظهار می‌کنم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که پایان‌نامه و موضوع پایان‌نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه‌ی حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامه‌ی مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی : محمد سلطانی

تاریخ و امضاء: ۱۳۹۱/۳/۲۷

به نام خدا

پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی تصادفی به فرم زنجیره‌ای

به کوشش

محمد سلطانی

پایان نامه

ارائه شده به دانشکده تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

مهندسی برق - کنترل

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته‌ی پایان‌نامه، با درجه‌ی عالی

دکتر علیرضا خیاطیان، دانشیار بخش کنترل و قدرت (رییس کمیته) ....

دکتر مریم دهقانی، استادیار بخش کنترل و قدرت (رییس کمیته) ....

دکتر پاکنوش کریم آقایی، دانشیار بخش کنترل و قدرت ....

دکتر مجتبی محزون، دانشیار دانشکده مکانیک ....

بهار ۱۳۹۱

تقدیم به

تمام کلمات وجودم را چون شعری ناتمام به تو تقدیم می‌کنم

به تو که تمام حروف زندگی‌ات کلمه‌ای شد

و در دفتر زندگی من نقش بست

به تو که اشکهای مضطرب و گریزان مرا

با شادی و بوسه ترانه‌ی جاودانه‌ات آراستی

به تو که غبار دلهره و پاشنگی‌های بی‌وا در دهکده قلب تنهایم به شبنم آرزو مبدل ساختی

به تو ای مادر و بر تو ای پدر درود

بر آستان مهترینم نگاهتان بوسه می‌زنم

سپاسگزاری

از همه کسانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. به‌ویژه از اساتید گرامی، جناب آقای دکتر علیرضا خیاطیان و سرکار خانم مریم دهقانی که با همراهی، راهنمایی و حمایت‌های صادقانه و بی‌دریغشان مرا در انجام این پایان‌نامه مدد رساندند. از ایشان سپاسگزارم به خاطر راهنمایی‌های عالمانه و به خاطر همه‌ی آن‌چه که در طول این مدت به من آموختند. همچنین سپاس و تشکر از اساتید مشاور، جناب آقای دکتر پاکنوش کریم آقایی و جناب آقای مجتبی محزون که با راهنمایی‌های خود باعث بهبود این پایان‌نامه گردیده‌اند. در پایان نیز از تمامی دوستان دانشجو مخصوصاً جناب آقای مهندس نوید نوروزی و جناب آقای مهندس احسان زراعت‌کار که با کمک‌های صمیمانه‌ی خود مرا یاری نموده‌اند، سپاسگذاری می نمایم.

چکیده

پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی تصادفی به فرم زنجیره‌ای

به کوشش

محمد سلطانی

این گزارش حاوی خلاصه تلاشی است که برای پایدارسازی فراگیر و طراحی فیدبک برای دسته‌ای از سیستم‌های تصادفی به فرم زنجیره‌ای صورت گرفته است.

در این پایان‌نامه سیستم‌های به فرم زنجیره‌ای که تحت تاثیر نویز تصادفی قرار گرفته‌اند و پارامترهای نامعلوم دارند و همچنین توابع غیرخطی که در این پارامترها و نویز ضرب شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای این سیستم‌ها طراحی وفقی انجام پذیرفته است و با استفاده از توابع لیاپانف مورد استفاده در سیستم‌های تصادفی و قضایای لیاپانف و لاسال بسط داده شده به سیستم‌های تصادفی، پایداری فراگیر آن‌ها نشان داده شده است.

در تلاشی دیگر سیستم تشریح شده در بالا در حضور نویز با کوواریانس نامعلوم بررسی شده است و نشان داده شده است که تنها با تخمین نرم بینهایت کوواریانس نویز می‌توان به طراحی قانون کنترلی پایدارساز پرداخت. بار دیگر قانون کنترلی بر اساس کنترل وفقی طراحی شده است که این طراحی دارای دو قانون به روز رسانی یکی برای تخمین پارامترهای نامعلوم و دیگری برای تخمین نرم بینهایت کوواریانس نویز است. با استفاده از تئوری لیاپانف پایداری فراگیر این دسته از سیستم‌ها نیز نشان داده شده است. در پایان سیستم به فرم زنجیره‌ای تصادفی در حضور نامعینی‌های غیرخطی کلی قرار گرفته است و با استفاده از روش گام‌به‌عقب، بار دیگر قانون کنترلی پایدارساز برای سیستم طراحی شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها برای نشان دادن عملکرد قانون کنترلی طراحی شده ارائه گردیده است که این شبیه‌سازی‌ها نیز نتایج ریاضیاتی به‌دست آمده را تایید می‌کند.

ذکر این نکته ضروری است که نتایج منتشر شده قبلی تنها پایداری فراگیر تقریبی سیستم‌های زنجیره‌ای تصادفی را نشان می‌داد و تا آن‌جایی که نگارنده اطلاع دارد این پژوهش اولین اثبات پایداری فراگیر سیستم‌های زنجیره‌ای تصادفی می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل هشتم. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

ضمایم

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

فهرست تعاریف و نشانه‌ها

نرم اقلیدسی برای بردار $x \in \mathbb{R}^n$	$\lvert x \rvert = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$
نرم فربینیوس[1] برای ماتریس $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$	$\lvert X \rvert = \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} X_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left(Tr\{X^T X\} \right)^{\frac{1}{2}}$
نرم بینهایت برای یک تابع محدود $X : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}^{n \times m}$	$\lVert X \rVert_\infty \equiv \sup_{t \in \mathbb{R}_+} \lvert X(t) \rvert$
مشتق لی[2] برای یک تابع هموار[3] $V(x) : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ و یک تابع برداری $f(x) : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$،	$L_f V = \frac{\partial V}{\partial x} f$
$\mathcal{L} V$ [4] برای سیستم غیر خطی تصادفی $dx = f(x,t)dt + g(x,t)\Sigma(t)dw$	$\mathcal{L} V(x,t) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x,t) + \frac{1}{2} Tr\left\{ g(x,t)^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} g(x,t) \right\}$
لی براکت[5] برای دو میدان برداری f و g	$ad_f g = [f,g] = \frac{\partial g}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g$

[1] - Frobenius
[2] - Lie-derivative
[3] - Smooth
[4] - Infinitesimal generator
[5] - Lie bracket

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

یکی از شاخه‌های مهم علم کنترل، کنترل سیستم های تصادفی است که به تحلیل پایـداری و پایدارسازی این سیستم‌ها می‌پردازد. مدل های تصادفی نقش مهمی در بسیاری از شاخه‌هـای دانش و صنعت بازی می‌کنند.

زمینه کنترل سیستم‌های غیر خطی تصادفی یک زمینه تحقیقاتی است که توجه بسـیاری را به خود جلب کرده است. موضوع این زمینـه، پایدارسـازی (بـه‌صـورت احتمـالی) سیسـتم‌هـای غیرخطی در حضور نویز می‌باشد. می‌دانیم که سیستم‌های وفقی دارای مدل غیرخطی می‌باشند و اگر دامنه وسیعی از کارکرد مدنظر باشـد خاصـیت غیـر خطـی آن‌هـا خـود را بیشـتر نشـان می‌دهد. از طرف دیگر، اینگونه سیستم‌ها در معرض اغتشاشات مختلف هسـتند از آن‌جـایی کـه مقدار دقیق اغتشاش‌های وارد به سیستم قابل پیش‌بینی نیست و فقـط اطلاعـات آمـاری کلـی آن‌ها ممکن است در دسترس باشد، بنـابراین لـزوم تحلیـل سیسـتم‌هـا بـا معـادلات غیرخطـی تصادفی مشخص می‌شود.

۱-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

در ایـن قسـمت بـه مـروری برتحقیقـات انجـام شـده در زمینـه سیسـتم هـای تصـادفی و سیستم‌های غیرهولونومیک می‌پردازیم

۱-۲-۱ سیستم‌های تصادفی

علم کنترل در طراحی کنترل کننده برای سیستم های معین پیشرفت هـای زیـادی داشـته

است؛ ولیکن هنوز مسایل زیادی در طراحی کنترل کننده برای سیستم های تصادفی غیرخطی وجود دارند و تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. شروع تئوری پایدارسازی تصادفی به دهه ۶۰ [۱] برمی‌گردد. تکنیک‌های لیاپانف برای پایدارسازی سیستم‌های تصادفی در کتاب خاس مینسکی[1] وجود دارد. مساله پایدارسازی با نویز در مقالات بسیاری وجود دارد [۵-۲] و حجم قابل توجهی از تحقیقات در [۶] بررسی شده‌اند.

به‌خاطر سختی موجود در آنالیز لیاپانف (معادله دیفرانسیل ایتو علاوه بر گرادیان شامل جمله‌های هسین[2] نیز است) تحقیقات از پایدارسازی به بهینه‌سازی تغییر جهت داد [۱۲-۷]، سایر تحقیقات مساله لیاپانف را با یک مساله سخت‌تر جایگزین کردند (حل یک معادله مشتق جزئ همیلتون-جاکوبی-بلمن [۱۴-۱۳]).

پیشرفت در زمینه پایدار سازی سیستم‌های قطعی نیز تا پیشرفت در نظریات ریاضی در دهه ۸۰ [۱۵] و کشف یک فرمول ساده برای پایدارسازی لیاپانف [۱۶] بسیار کند بود. این کشفیات پیشرفت بسیاری را در زمینه‌های کنترل وفقی، مقاوم و بهینه به وجود آورد[۱۹-۱۷].

این دستاوردها در زمینه کنترل سیستم‌های غیرخطی قطعی[3]، باعث شد که دوباره تحلیل سیستم‌های غیرخطی تصادفی مد نظر دانشمندان این زمینه قرار گیرد. فلورچینگر[4] [۲۳-۲۰] اولین کسی بود که زمینه پایدارسازی سیستم‌های تصادفی را سروسامان داد اگر چه پن[5] و باشار[6] اولین کسانی بودند که مساله پایداری را برای دسته‌ای از سیستم‌های فیدبک قطعی [۲۴] حل کردند. نتایج آن‌ها پایداری مجانبی فراگیر را تضمین می‌کرد. تسینیاس[7] شرایط کافی را برای پایداری فراگیر دسته‌ای از سیستم‌های مثلثی فیدبک قطعی و فیدبک قطعی با نویز با شدت واحد به‌دست آورد [۲۶-۲۵].

کرستیک[8] و دنگ[9] از تابع لیاپانف با توان مرتبه چهار[10] استفاده کردند و برای سیستم های فیدبک قطعی تصادفی طراحی کنترل گام به عقب انجام دادند، سپس نتایج کار خود را به

---

[1] - Khas'minskii
[2] - Hessian
[3] - Deterministic
[4] - Florchinger
[5] - Pan
[6] - Basar
[7] - Tsinias
[8] - Krstic
[9] - Deng
[10] - Quartic

مساله معکوس بهینه سازی سیستم های تصادفی گسترش دادند [۲۸-۲۷]. آن‌ها همچنین پایداری سیستم های فیدبک خروجی تصادفی غیرخطی زمان پیوسته را نشان دادند، کلاس سیستم هایی که آنها در نظر گرفتند از کلاس سیستم های فیدبک قطعی خروجی گسترده تر بود [۳۱-۲۹].

لیو[1] و مو[2] پایدارسازی را برای دسته ای از سیستم‌های تصادفی فیدبک خروجی انجام دادند که جمله غیر خطی فقط به خروجی وابسته بود. آن‌ها ابتدا یک مشاهده‌گر با بهره بالا طراحی کردند که بهره آن با استفاده از معادله ریکاتی به دست می‌آمد سپس با استفاده از کنترل گام به عقب یک کنترلر فیدبک خروجی به دست آوردند و پایداری سیستم و رسیدن حالت های سیستم به مبدا را با احتمال یک نشان دادند[۳۲].

وو[3] و همکارانش با استفاده از تئوری بهره کوچک تصادفی به طراحی کنترلر به روش کنترل گام به عقب پرداختند آنها دسته ای از سیستم های غیر خطی با دینامیک های مدل نشده و توابع غیرخطی نامعین که دارای پایداری ورودی به حالت[4] بودند را در نظر گرفتند و قضیه بهره کوچک را به حالت تصادفی گسترش دادند و پایداری سیستم مورد نظر را نشان دادند [۳۳].

ژیا[5] و همکارانش مساله‌ی پایداری و کنترل لغزشی را برای یک کلاس از سیستمهای خطی پیوسته با پرش‌های تصادفی حل کردند که سیستم به صورت تصادفی بین چند زیر سیستم سوییچ می‌کرد دینامیک‌های سیستم پرشی نمی‌تواند در هیچ سطح کنترل لغزشی برای همیشه باقی بماند بنابراین اثبات این که سیستم پایدار است یا نه مشکل است. این آقایان با استفاده از تکنیک کنترل گام عقب ، پایداری این سیستم‌ها را که دارای پرش مارکف هستند نشان دادند به شرطی که یک مجموعه از نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI) که به هم وابسته اند قابل حل باشند[۳۴].

چن[6] و همکارانش مساله‌ی کنترل فیدبک خروجی وفقی را برای دسته‌ای از سیستمهای فیدبک خروجی قطعی غیرخطی با تاخیر متغیر با زمان با استفاده از شبکه عصبی حل کردند ،

---

[1] - Liu
[2] - Mu
[3] - Wu
[4] - Input to state stability
[5] - Xia
[6] - Chen