بسم الله الرحمن الرحيم

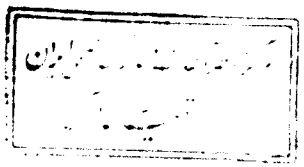
٢٤٢٦٣

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق - گرایش کنترل

۱۳۷۸/۶/۲۹



موضوع:

کنترل تطبیقی مدل مرجع مقاوم و اثبات پایداری آن

توسط:
پژمان علی بیگی بنی

3730 ۱۲

استاد راهنما:
دکتر بهزاد مشیری

استاد مشاور:
دکتر علی خاکی صدیق

شهریور ۱۳۷۸

۲۶۲۶۳

موضوع :
کنترل تطبیقی مدل مرجع مقاوم و اثبات پایداری آن

توسط : پژمان علی‌بیگی‌بنی

پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد
رشته مهندسی برق – گرایش کنترل

از این پایان‌نامه در تاریخ ۱۳۷۸/۶/۱۷ مقابل هیأت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرارگرفت.

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر محمدعلی بنی‌هاشمی

مدیر گروه آموزشی : دکتر محمود کمره‌ای

مدیر تحصیلات تکمیلی گروه : دکتر محمود کمره‌ای

استاد راهنما : دکتر بهزاد مشیری

استاد مشاور : دکتر علی‌خاکی صدیق

عضو هیأت داوران : دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی

عضو هیأت داوران : دکتر محمدجواد یزدان‌پناه

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه اساتید گرامی؛ جناب آقای دکتربهزاد مشیری و جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق که راهنماییهای ایشان راهگشای انجام این تحقیق بوده است، تشکر می‌نمایم. همچنین از خانم مهندس لبیبی بخاطر راهنمایی ارزنده‌شان سپاسگزارم.

چکیده

در این پایان‌نامه، مسأله مقاومت سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع مستقیم در برابر اغتشاشات کراندار و دینامیکهای مدل نشده برای سیستم‌های تک ورودی - تک خروجی موردنظر قرار گرفته است. برای مقاوم‌سازی سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع استاندارد در برابر نامعینی‌های سیستم از الگوریتم شناسایی مقاوم set-membership که علیرغم حضور نامعینی‌های مخرب، شرایط لازم برای اثبات پایداری جامع سیستم کنترل تطبیقی را داراست، استفاده شده است. برای ارائه اثبات پایداری و به منظور برخورد با اثر دینامیکهای مدل نشده که سیگنالهایی بالقوه بی‌کران می‌باشند، از سیستم نرمالیزه شده در الگوریتم تخمین پارامترها استفاده شده است. ابتدا یک شرط کافی تحت عنوان شرط پایداری جامع ارائه شده است. سپس با تلفیق سیستم نرمالیزه شده و الگوریتم شناسایی set-membership، یک سیستم کنترل تطبیقی مقاوم در برابر دینامیکهای مدل نشده و اغتشاشات کراندار در خروجی سیستم بدست آمده است که به منظور اثبات پایداری جامع آن، ابتدا چند لم اثبات شده و به کمک آنها قضیه نهایی ارائه شده است که در نتیجه آن تمام سیگنالهای ورودی - خروجی موجود در سیستم کراندار خواهند بود و نتیجه تخمین پارامترها به مقدار محدودی همگرا شده و از انحراف پارامترها به سوی بی‌نهایت جلوگیری می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که الگوریتم کنترل تطبیقی پیشنهاد شده، رفتار سیستم را بسیار بهبود می‌بخشد.

فهرست مطالب

عنوان ——— صفحه

۱- مقدمه ۱

۲- شناسایی روی خط سیستم‌های یقینی ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- خواص الگوریتم‌های تخمین پارامترها ۱۴

۲-۳- بررسی اثر اغتشاشات محدود و دینامیکهای مدل نشده بر تخمین پارامترها ۲۳

۳- شناسایی برای سیستم‌های با نویز کراندار ۲۹

۳-۱- مقدمه ۳۰

۳-۲- الگوریتم شناسایی set-membership با یک ضریب وزنی قابل تنظیم ۳۱

۳-۳- تحلیل همگرایی الگوریتم set-membership ۳۴

۴- کنترل تطبیقی مدل مرجع مقاوم ۴۵

۴-۱- مقدمه ۴۶

۴-۲- کنترل تطبیقی مدل مرجع زمان گسسته با تطبیق مدل دقیق (برای سیستم‌های حداقل فاز) ۴۹

۴-۳- کنترل تطبیقی زمان گسسته برای سیستم‌های با صفرهای دلخواه ۵۲

۴-۴- نحوهٔ اثبات پایداری الگوریتم‌های کنترل تطبیقی مدل مرجع مستقیم ۵۵

۴-۵- تأثیر دینامیکهای مدل نشده و اغتشاشات خروجی بر عملکرد کنترل کنندهٔ تطبیقی مدل مرجع مستقیم ۵۹

۴-۶- اثبات پایداری جامع برای کنترل تطبیقی مدل مرجع با الگوریتم تطبیق set-membership ۶۵

۴-۶-۱- توصیف فرآیند ۶۵

۴-۶-۲- شرط پایداری جامع ۶۶

۴-۶-۳- اثبات پایداری جامع ۷۱

۵- نتیجه‌گیری ۷۴

مراجع ۷۹

فصل اول :

مقدمه

مقدمه

ایدهٔ اساسی که در عمل موجب روی آوردن به طراحی فیدبک می‌شود، بدست آوردن سطوحی از عملکرد در هنگام مواجهه با نامعینی‌های[1] فرآیند می‌باشد. سیستم‌های فیدبک بطور ذاتی قدرت مقابله با اغتشاشات و عدم حساسیت نسبت به تغییرات دینامیکهای فرآیند را دارا هستند.

بطورکلی مسألهٔ کنترل فرآیندهایی که بطور قطع و یقین شناخته شده نیستند را می‌توان این گونه بیان نمود که مجموعه‌ای از فرآیندها داده شده است، کنترل کننده‌ای بیابید که عملکرد رضایت‌بخشی برای همهٔ این فرآیندها بدست دهد. یک جنبهٔ ضروری این مسأله انتخاب یک نمایش ریاضی ساده از خطای مدل‌سازی است، یعنی تعریف ریاضی مجموعهٔ فرآیندهای ذکر شده در بالا، که باید یک توصیف با دقت کافی از فرآیندهایی که می‌خواهیم کنترل کنیم باشد. جنبهٔ دیگر تعریف عملکرد مطلوب می‌باشد.

در یک طرح خیلی کلی می‌توانیم سه کلاس مشخص از خطاهای مدل سازی را که منجر به مسائل ریاضی مختلفی می‌شوند، تشخیص دهیم [۳۹]:

۱) کنترل بهینهٔ مدل‌های اتفاقی[2]، هنگامی که اغتشاشات دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی مستقل از هم باشند. تحقیقات وسیعی در رابطه با کنترل مدل‌های اتفاقی با نامعینی پارامتری انجام شده است. طرح‌های بهینه‌سازی تک - پله‌ای[3] برای سیستم‌های LTI معکوس‌پذیر، به شرط اینکه دینامیکهای نویز سیستم یک شرط مثبت بودن را برآورده سازند، تحت فرضیات نسبتاً قابل قبولی پایداری جامع را تضمین می‌کنند.

۲) تئوری کنترل مقاوم، که در آن یک مدل نامی کاملاً مشخص در نظرگرفته می‌شود و یک کنترل‌کنندهٔ ثابت بگونه‌ای طراحی می‌شود که، به مفهومی، اندازهٔ مجموعهٔ پایداری‌پذیر - مجموعهٔ فرآیندهایی که به دلیل وجود نامعینی و با توجه به مدل نامی معرفی شده‌اند - را بهینه کند. در این

---

1 - Uncertainty
2 - Stochastic
3 - Single - Step

حال درجه و پیچیدگی کنترل کننده خیلی بالاست. عملکرد قابل دستیابی نیز به اندازهٔ مجموعه و درجهٔ کنترل کننده بستگی دارد.

۳) کنترل تطبیقی، در هنگامی که خطای مدل‌سازی پارامتری باشد. یعنی پارامترهای مدلی که برای سیستم در نظر می‌گیریم، مثلاً یک مدل LTI مناسب، معین نباشند. دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد.

سیستم کنترل تطبیقی، سیستمی است که بطور پیوسته عملکرد خود را با یک عملکرد مطلوب و یا بهینه مقایسه کرده و پارامترهای خود را تنظیم می‌کند تا به این عملکرد مطلوب نزدیک شود [۳۸]. این عملیات با استفاده از یک الگوریتم تخمین روی خط[1] پارامترهای سیستم (در روش غیرمستقیم) یا کنترل کننده (روش مستقیم) انجام می‌شود. این گونه سیستم‌ها، اولین بار در اواخر دههٔ ۵۰ میلادی و برای طراحی اتوپایلوت[2] برای هواپیماهایی که درگستره وسیعی از سرعت و ارتفاع کار می‌کردند، استفاده شد. در دههٔ ۶۰، پیشرفتهای تئوری کنترل (فضای حالت و تئوری پایداری، پیشرفت در تئوری کنترل اتفاقی، معرفی برنامه‌ریزی پویا، پیشرفتهای عمده در شناسایی سیستم) به کمک کنترل تطبیقی آمدند. در دههٔ ۷۰، یک شکوفایی برای کنترل تطبیقی رخ داد. روشهای مختلف شناسایی با روشهای مختلف طراحی ترکیب شدند. نتایج تئوری خیلی محدود بودند امّا کاربردهای زیادی به ثبت رسید. در اواخر دههٔ ۷۰ و اوایل دههٔ ۸۰، اثبات پایداری سیستم‌های تطبیقی، هرچند با قیدهای محدودکنندهٔ زیاد ارائه شد [۱].

دلایل کلیدی استفاده از کنترل تطبیقی عبارتنداز: تغییرات در دینامیکهای فرآیند، تغییرات در خصوصیات اغتشاشات و سادگی استفاده و بازده مهندسی. فرآیندهای صنعتی نوعاً آنقدر پیچیده هستند که تغییرات پارامترها را نمی‌توان از اصول اولیهٔ حاکم بر سیستم تعیین نمود. این دلیل و تغییرات خصوصیات اغتشاش، دلایل قوی برای استفاده از تطبیق می‌باشند [۱].

در اواخر دههٔ ۷۰ با ارائه اثبات پایداری جامع علیرغم نامعینی پارامترها، پیشرفتهای زیادی

---

1 - On - Line 2 - Autopilot

در سیستم‌های تطبیقی پارامتری حاصل شد امّا نامعینی ساختار نیافته[1] (دینامیکهای مدل نشده[2]) و اغتشاشات فراموش شدند. یعنی اینکه اولین اثباتهای پایداری جامع، شدیداً به شرایط ایده‌آل وابسته شد. بعداً شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که انحراف اندکی از فرضهای گفته شده می‌تواند اکثر الگوریتم‌های کنترل تطبیقی را ناپایدار سازد. در واقع در بسیاری از مسائل طراحی سیستم‌های کنترل، طراح مدل دقیقی از فرآیند تحت کنترل را مورد استفاده قرار نمی‌دهد. این موضوع ممکن است به خاطر عدم اطلاع دقیق از رفتار دینامیکی فرآیند و یا به خاطر جلوگیری از پیچیده شدن کنترل کننده‌ای باشد که براساس مدل طرح می‌شود. این یکی از دلایل موفقیت کنترل خودکار در کاربردهای کنترلی بوده است که در آن کنترل کننده معمولاً با استفاده از مدل ساده‌شدهٔ فرآیند واقعی طراحی می‌شود. این مشکل علاقهٔ بررسی ایده‌های مقاومت، یعنی حفظ پایداری یا خواص کراندار ماندن وقتی که شرایط ایده‌آل برآورده نمی‌شوند، را در دههٔ ۸۰ برانگیخت. یک شرط لازم برای اینکه یک طراحی مقاوم باشد، این است که برخی از انواع پایداری فقط با این شرط که خطای مدل‌سازی به اندازهٔ کافی کوچک باشد (با توجه به برخی مفاهیم معنی‌دار عملی)، تضمین شوند. متأسفانه دریافته شد که الگوریتم‌های پایدار کنترل تطبیقی، لزوماً پایدار مقاوم نیستند که این مطلب در مقالات [۲]، [۴۳] و [۴۴] نشان داده شده است [۴۱].

تا به حال دو روش برای مطالعهٔ مقاومت کنترل کننده‌های تطبیقی دنبال شده است: یکی تئوری محلی است که تحت فرضیات PE[3] و تطبیق آهسته، خواص مقاومت عملکرد نزدیک به یک پاسخ مطلوب یا نامی را مورد بررسی قرار می‌دهد و دیگری یک روش جامع است که تمرکز آن بر روی کراندار بودن پاسخ می‌باشد و به منظور تحقق این امر اصلاحاتی را در تخمینگر معرفی می‌کند. این اصلاحات عموماً به سه طریق به تخمینگر اعمال می‌شوند: استفاده از منطقهٔ مرده[4]، تصویر کردن[5] پارامترها به درون ناحیه‌ای مشخص از فضای پارامترها و بالاخره جلوگیری از رانده شدن[6]

---

1 - Unstructured Uncertainty
2 - Unmodeled Dynamics
3 - Persistent Excitation
4 - Dead Zone
5 - Projection
6 - Drift

پارامترها با اضافه کردن یک جملهٔ نشتی[1] به معادلهٔ به روز درآوردن پارامترها.

نتایجی که از تئوریهای ارائه شده جهت پایداری و همگرایی الگوریتم‌های تطبیقی به دست آمده است (تئوری جامع)، اجازهٔ بررسی جزئیات رفتار این الگوریتم‌ها را نمی‌دهد. تحلیل عملکرد سیستم‌های تطبیقی که غیرخطی و متغیر با زمان می‌باشند اغلب به کمک تحلیل نقطه تعادل و بررسی رفتار محلی در همسایگی نقطه تعادل امکان‌پذیر است و از این طریق می‌توان جزئیات رفتار سیستم‌های تطبیقی، بخصوص در هنگام مواجهه با اغتشاشات و دینامیکهای مدل نشده، را بررسی نمود (برای مطالعه جزئیات این روش به [۳۸] مراجعه شود).

مجموعهٔ مشاهدات به عمل آمده در [۴۴-۴۳] دو نوع مکانیزم ناپایداری در سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع زمان پیوستهٔ ایده‌آل را نشان دادند. یکی در حضور اغتشاش خروجی و دیگری به هنگام دنبال روی ورودیهای مرجع با فرکانس بالا به دلیل غفلت در مدل کردن دینامیکهای فرکانس بالا. این پدیدهٔ آخر که در تئوری فیدبک کلاسیک دیده نمی‌شود در حلقه‌های تطبیقی با بهرهٔ پایین یعنی تطبیق آهسته و بدون اغتشاشات رخ می‌دهد.

در [۱۱] نشان داده شده است که می‌توان اغتشاشات محدود و ورودیهای مرجع را بگونه‌ای یافت که یک سیستم تطبیقی مدل مرجع زمان گسسته پایدار را ناپایدار کند. سیگنالهایی که Egardt در نظر گرفت عبارت بودنداز:

$$u_c(t) = \left[\sqrt{t(t-1)} - (t-1)\right]\left(1 - \frac{1}{t-1}\right) ; \; V(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{(t-1)}} + u_c(t)$$

که در نتیجهٔ اعمال این سیگنالها، $\tilde{\theta} = \theta - \theta^*$ و $y(t)$ بی‌کران می‌شوند. $u_c(t)$ ورودی مرجع و $V(t)$ سیگنال اغتشاش است.

تحلیل نقطهٔ تعادل نشان می‌دهد که نقطهٔ تعادل با روابط پیچیده‌ای به طبیعت سیگنال ورودی وابسته است. اگر سیگنال ورودی PE از درجهٔ منطبق با تعداد پارامترهای در حال تغییر نباشد، بجای

---

1 - Leakage

یک نقطه تعادل مجموعه‌ای از نقاط تعادل (چندین نقطهٔ تعادل[1]) خواهیم داشت که این امر به سبب این است که در صورت غنی نبودن سیگنال ورودی نمی‌توان پارامترهای نامعلوم را به طور منحصر بفرد مشخص نمود بلکه برخی از پارامترها یک ترکیب خطی از پارامترهای دیگر می‌باشند. اگر سیستم نسبت به پارامترها خطی باشد، مجموعهٔ نقاط تعادل یک مجموعهٔ الحاقی[2] خواهد بود. مقادیر کوچک نویز اندازه‌گیری یا اغتشاشات دیگر ممکن است شرایط تعادل را برهم بزنند و با توجه به وجود رابطهٔ خطی بین برخی از پارامترها ممکن است نوعی فیدبک مثبت بین آنها برقرار شود و منجر به انحراف پارامترها تا بی‌نهایت شود. در اثبات پایداری سیستم کنترل تطبیقی حلقه بسته، کراندار بودن تخمین پارامترها یکی از ارکان اصلی اثبات پایداری را تشکیل می‌دهد. بنابراین در هنگام کمبود تحریک کنندگی سیگنال ورودی و حضور اغتشاشات، تضمینی برای پایداری سیستم حلقه بسته وجود نخواهد داشت. به هنگام وجود تحریک کافی، در [۴۶] با انجام یک تحلیل آماری نشان داده شده است که اگر اغتشاش جمع شونده در خروجی سیستم از نوع نویز سفید باشد، امید ریاضی تخمین حداقل مربعات از پارامترهای سیستم با افزایش تعداد نمونه‌ها به سمت مقادیر واقعی میل خواهد کرد. در این تحلیل صفر بودن میانگین نویز جمع شونده با خروجی اهمیت اساسی دارد، امّا اگر اغتشاش خروجی از نوع نویز رنگی با میانگین آماری غیرصفر باشد، تخمین حاصل یک تخمین بایاس شده خواهد بود.

نکته‌ای که در رابطه با اغتشاش نباید فراموش شود این است که هنگامی که اغتشاش یک معادلهٔ دیفرانسیل (تفاضلی) همگن از یک درجهٔ معلوم است (مدل داخلی[3] آن)، می‌توان مستقیماً ساختار کنترل‌کننده را بگونه‌ای اصلاح کرد که خطای ردیابی به طور جامع همگرا شود، یعنی حذف نمایی تطبیقی اغتشاش. از زمان انتشار [۴۵]، این حقیقت توسط عده‌ای از محققان اشاره شده است: [۱۲]، [۱۴]، [۱۹] و [۲۱].

در تئوری ورودی - خروجی [۱۵] و [۳۹]، SPR[4] بودن یکی از الزامات پایداری است. نوع

---

1 - Manifold
2 - Affine
3 - Internal Model
4 - Strictly Positive Real

پایداری عبارت است از صفر شدن خطای ردیابی به طور مجانبی و محدودیت همهٔ سیگنالها. شرط اکیداً مثبت حقیقی (SPR) بودن یعنی این که $ReG(i\omega)>0$ و این بیان می‌دارد که منحنی نایکوئیست G در نیم صفحهٔ راست قرار دارد. چنین سیستمی با فیدبک تناسبی و با بهرهٔ به اندازهٔ دلخواه بالا پایدار است. این فرض خیلی محدود کننده است و ارزش عملی کمی دارد.

برای بررسی اثر دینامیکهای مدل نشده ملاحظه می‌شود که عموماً (به طور مشخص در سیستمهای زمان پیوسته) به هنگام بررسی پایداری سیستم حلقه بسته از طریق معادله مشخصهٔ حلقه بسته، پارامترهای کنترل کننده در ضرایب معادله مشخصه وارد می‌شوند. اگر دینامیک مدل نشده وجود نداشته باشد و فرآیند SPR باشد ممکن است این پارامترها هر قدر هم که بزرگ باشند با مشاهدهٔ مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه به این نتیجه برسیم که سیستم حلقه بسته همواره پایدار خواهد ماند امّا اگر دینامیک مدل نشده وجود داشته باشد و تحریک کافی نباشد، به دلیل وجود مجموعهٔ نقاط تعادل و ترکیب خطی پارامترهای در حال تغییر (در حالت کنترل مستقیم این پارامترها همان پارامترهای کنترل کننده هستند)، پارامترهای کنترل کننده ممکن است در تعدادی از نقاط خیلی بزرگ باشند و یا این که به دلیل وجود اغتشاش پارامترها به بی‌نهایت منحرف شوند و از آنجاییکه وجود دینامیکهای مدل نشده معمولاً شرط SPR بودن را برهم می‌زند دیگر نمی‌توان نتیجه گرفت که به ازای مقادیر به اندازهٔ دلخواه بزرگ پارامترهای کنترل کننده سیستم حلقه بسته پایدار خواهد ماند. اگر با وجود دینامیک مدل نشده تحریک کافی باشد موضوع فرق می‌کند. در این حال پایداری سیستم حلقه بسته به فرکانس سیگنال تحریک کننده بستگی خواهد داشت، زیرا هرچه فرکانس بالاتر باشد تحریک مودهای مدل نشده، که بر روی میزان انحراف مجاز پارامترها از مقادیر صحیح محدودیتهایی را اعمال می‌کنند، بیشتر شده، امکان ناپایداری وجود دارد.

در حالت دینامیکهای مدل نشده نیز مانند حالت اغتشاشات، تحلیل عملکرد با استفاده از تئوری محلی و بررسی پایداری نقطه تعادل بهتر صورت می‌گیرد و اثر این نامعینی‌ها بیشتر مشخص می‌شود. ابزار ریاضی این تحلیل، متوسط گیری خطی[1] است که در [۱] به خوبی تشریح شده است.

---

1 - Linear Averaging

همانطورکه گفته شد تا به حال دو روش برای مطالعه و بهبود مقاومت کنترل کننده‌های تطبیقی دنبال شده است. برای افزایش مقاومت در عملکرد محلی سیستم تطبیقی، تنها عامل معرفی شده، برآورده شدن شرایط PE برای سیگنالهای رگرسور یا به طور معادل برای سیگنال ورودی مرجع است [۳۸]. امّا این روش یک نقص دارد: در بسیاری ازکاربردهای عملی، ورودی مرجع، PE نیست و مطلوب هم نیست که سیگنال خارجی تزریق کنیم.

برای افزایش مقاومت در روش جامع، که هدف آن حفظ کراندار بودن همهٔ سیگنالهاست (کراندار بودن به معنای پایدار بودن نیست)، اصلاحاتی در تخمینگر معرفی شده است. این اصلاحات از رانده شدن پارامترها جلوگیری می‌کنند و شرایط کراندار بودن همه سیگنالها را مهیا می‌کنند. این اصلاحات عبارتنداز: نرمالیزاسیون، منطقهٔ مرده، تصویرسازی پارامترها و افزودن جملهٔ نشتی به پارامترها.

یک روش ساده در برخورد با مسألهٔ ناپایداری به وجود آمده بر اثر عدم تحریک کنندگی کافی سیگنال ورودی این است که اگر سیگنال ورودی مناسب نبود تخمین پارامترها قطع شود. این تکنیک که به استفاده از منطقهٔ مرده مشهور است در مقالات متعددی از قبیل [۱]، [۵]، [۶]، [۸]، [۹]، [۱۱]، [۱۵]، [۱۶]، [۲۰]، [۳۲]، [۳۳]، [۳۸] و [۴۱] اشاره شده است. روشهای متعددی برای تعیین زمان قطع تخمین پارامترها وجود دارد امّا یک روش استاندارد که در بسیاری ازکاربردها به آن اشاره شده است این است که هنگامی که خطای پیش‌بینی در مقایسه با اندازهٔ معلوم یک عبارت نویز کراندار، که برای نویز اندازه‌گیری و عدم دقت در مدل‌سازی و خطای گردکردن کامپیوتر و غیره در نظر گرفته می‌شود، کوچک باشد الگوریتم را خاموش کنیم. با انجام این کار می‌توان نشان داد که تطبیق همیشه در جهت کاهش خطای تخمین پیش می‌رود و همهٔ سیگنالها کراندار هستند.

در روش اصلاح تخمین مقید یا تصویرکردن پارامترها در ناحیه‌ای معلوم از فضای پارامترها، مثلاً، [۲۲]، [۲۹] و [۳۸] هنگامی که اندازهٔ پارامترهای تخمین زده شده از یک مقدار مشخص تجاوز نمود، تطبیق متوقف می‌شود. در این روش فرض می‌شود که یک کران M_0 برای اندازهٔ پارامترهای صحیح معلوم است و مراحل جستجو به مجموعهٔ $S = \left\{\hat{\theta}(t) : \left\|\hat{\theta}(t)\right\| \le M_0\right\}$ منحصر می‌شود.

در روش افزودن جملهٔ نشتی به پارامترها، مثلاً [۱]، [۲۳]، [۲۴]، [۲۶] و [۳۸]، نیز کراندار بودن تمام سیگنالها در حلقهٔ تطبیقی تضمین می‌شود.

اثر دینامیکهای مدل نشده بصورت اغتشاشی در خروجی سیستم ظاهر می‌شود و از آنجاییکه این اغتشاش به سیگنالهای ورودی و خروجی بستگی دارد ممکن است اندازه‌اش نامحدود باشد و عمل تخمین پارامترها به کمک تخمینگرهای استاندارد را مختل نماید. با استفاده از تکنیک نرمالیزاسیون [۱] و [۵]، می‌توان اثر دینامیکهای مدل نشده را به یک عبارت اغتشاش محدود تبدیل نمود و با استفاده از روشهای ذکر شده در قبل، مقاومت سیستم را افزایش داد.

در این پایان‌نامه، روش جامع مورد نظر قرارگرفته است که در آن یک سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع مقاوم به همراه اثبات پایداری جامع آن ارائه شده است. برای مقاوم‌سازی کنترل کنندهٔ تطبیقی، از یک تخمینگر مقاوم در برابر اغتشاشات، الگوریتم شناسایی **set-membership**، استفاده شده است. الگوریتم شناسایی **set-membership** روشی است برای شناسایی سیستم‌های با نویز کراندار. در فصل دوم، شناسایی سیستم‌های یقینی به عنوان مبنایی برای فصلهای بعدی معرفی شده است. دو روش معروف که در کنترل تطبیقی کاربرد بسیار فراوانی دارند، یعنی الگوریتم حداقل - مربعات بازگشتی[1] و تصویرسازی[2]، با قضایای مربوط به خواص مهم آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در انتهای فصل رفتار این الگوریتم‌ها در حالت ایده‌آل، بدون حضور دینامیکهای مدل نشده و اغتشاشات خروجی، و غیرایده‌آل، در حضور نامعینی‌های ذکر شده، به کمک شبیه‌سازی‌هایی نشان داده شده است. در فصل سوم، الگوریتم شناسایی **set-membership** بطور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. قضایایی در رابطه با کراندار بودن و همگرایی تخمین پارامترها در حضور اغتشاشات خروجی ارائه شده‌اند که خواص مهم این الگوریتم شناسایی را بیان می‌کنند [۴۷]. در انتهای فصل، با انجام چند شبیه‌سازی رفتار این الگوریتم بررسی شده است. فصل چهارم، ابتدا به بیان کنترل تطبیقی مدل مرجع می‌پردازد و با معرفی کنترل تطبیقی مدل مرجع زمان گسستهٔ

1 - Recursive Least - Squares 2 - Projection