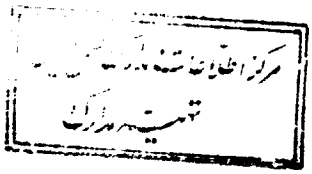
بنام خدا

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

۱۳۷۶ /۷/ ۱۹



پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل

کنترل تطبیقی مقاوم در حضور دینامیک مدل نشده بر اساس شناسایی بهمراه باندسکوت خودتنظیم

نگارنده: سید احمد عابدی

استاد راهنما: دکتر علی خاکی صدیق

استاد مشاور: دکتر کارو لوکس

اسفند ۱۳۷۵

۱۲۰۸۲

کنترل تطبیقی مقاوم در حضور دینامیک مدل نشده با استفاده از باند سکوت خودتنظیم

نگارنده : سید احمد عابدی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق، گرایش کنترل

از این پایان‌نامه در تاریخ ۷۵/۱۲/۱۴..... در مقابل هیأت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر خسروبرگی

مدیر گروه آموزشی : دکتر محمود کمره‌ای

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی گروه : دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی

استاد راهنما : دکتر علی خاکی صدیق

استاد مشاور : دکتر کارو لوکس

عضو هیأت داوران : دکتر علی اکبر گوی آبادی

عضو هیأت داوران : دکتر علی محمد زاده عسگرشاهی

عضو هیأت داوران :

۱۲۰۸۲

تشکر و قدردانی

خدا را ستایش می‌کنم بخاطر آنکه علم‌آموزی را وسیله‌ای برای شناخت خویشتن قرار داد.
انجام این پروژه با یاری دوستان و بزرگوارانی میسر شد که بر خود لازم می‌دانم از یکایک آنان تشکر کنم.
در ابتدا از جناب آقای دکتر صدیق بخاطر یاری و پیگیری دوستانه در اجرای مراحل مختلف کار، کمال تشکر را دارم.
از جناب آقای دکتر لوکس بخاطر یاری در فهم صحیح مطلب و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاه کنترل در جهت توسعه‌ی نرم‌افزار آزمایشگاه کنترل کامپیوتری، سپاسگزارم.
از جناب آقای دکتر گوی‌آبادی از دانشگاه تربیت مدرس، بخاطر آشنا کردن من با بسته‌ی نرم‌افزاری SIMULINK که سبب پیشرفت سریع و مطمئن مراحل شبیه‌سازی شد، صمیمانه قدردانی می‌کنم.
از جناب آقای دکتر مشیری بخاطر مقالاتی سودمندی که در اختیار من گذاشتند، صمیمانه تشکر می‌کنم.
از آقایان مهندس رمضانی‌تبار و ثابت بخاطر یاری در راه‌اندازی سیستم لئونارد صمیمانه تشکر می‌کنم.
از سرکار خانم قادری بخاطر تایپ متن پایان‌نامه صمیمانه تشکر می‌کنم.

سیداحمد عابدی

اسفند ۱۳۷۵

چکیده

مقاوم‌سازی در روش‌های کنترل تطبیقی طی دو دهه‌ی اخیر مهم‌ترین زمینه‌ی تحقیقات در این عرصه بوده و اثبات پایداری سیستم حلقه‌بسته با حداقل فرض‌های ممکن در رابطه با مدل فرآیند بسیار مورد توجه بوده است.

در این پایان‌نامه الگوریتم کنترل تطبیقی مستقیمی ارائه شده است که در برابر دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاشات نامعلوم برای دسته‌ای از فرآیندها مقاومت قابل قبولی دارد. در این روش با تلفیق یک الگوریتم شناسایی RLS مقاوم‌شده با باندسکوتِ خودتنظیم ویک الگوریتم کنترل یک‌پله‌ای بر مبنای مدل مرجع، شیوه‌ای جدید برای اثبات پایداری در حضور دینامیک مدل‌نشده ارائه شده است و شرطی کافی و دو شرط لازم برای تحقق پایداری بصورت محدودیتی بر روی دامنه‌ی خطاهای مدل‌سازی بدست آمده‌اند. فرض‌های محدودکننده حتی‌الامکان حذف شده‌اند و کنترل‌کننده‌ی حاصله قابلیت اعمال به فرآیندهای غیر مینیمم‌فاز را دارا است.

مدت‌زمان اجرای الگوریتم شناسایی به دو فاز تطبیق سریع و تطبیق مقاوم تقسیم شده است. در ابتدای کار شناسایی در فاز تطبیق سریع، یک RLS معمولی است و بر اساس معیاری که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن تخمین‌هاست، شناسایی وارد فاز تطبیق مقاوم می‌شود. در فاز تطبیق مقاوم یک الگوریتم شناسایی RLS با اثر(Trace) ثابت بهمراه باندسکوت برای ردیابی تغییرات فرآیند اعمال می‌شود. باندسکوت تغییرات زمانی پارامترهای مدل را محدود می‌کند و مؤثر بودن الگوریتم شناسایی با اثر ثابت، با وجود آن ممکن می‌شود. مهم‌ترین ویژگی باندسکوت، ثابت نگاه‌داشتن پارامترها و در نتیجه ثابت نگاه‌داشتن ساختار کنترل‌کننده در اکثر لحظات است.

برای دریافتن تأثیر مقاومت قانون کنترل، ابتدا با الگوریتم کنترل یک‌پله‌ای شروع کرده و عدم توانایی آن در حضور خطاهای مدل‌سازی با وجود باندسکوت در شناسایی‌کننده نشان داده می‌شود. سپس با ارائه‌ی اصلاحاتی بر روی آن، دامنه‌ی خطاهای قابل تحمل افزایش یافته و کنترل مقاوم‌تری بدست می‌آید. در نهایت ساختاری مشابه کنترل‌کننده‌ی Clark-Gawthrop حاصل می‌شود. روشی نیز برای حذف خطای ماندگار بر مبنای نتایج شناسایی ارائه شده است.

با انتخاب وزن کنترل بصورت تابعی از پارامترهای شناسایی‌شده در تابع هزینه، قانون کنترل تطبیقی پیشنهادی در مقابل تأخیر زمانی متغیر مقاومت قابل توجهی نشان می‌دهد.

تقلیل درجه‌ی کنترل‌کننده بر مبنای تقلیل درجه‌ی شناسایی‌کننده و وجود مصالحه‌ای بین کارایی از دست رفته و مقاومت بدست‌آمده در تخمین پارامترها از دیگر مباحث مطرح‌شده است.

در انتها مؤثر بودن الگوریتم کنترل تطبیقی پیشنهادی برای کنترل سیستم لئونارد در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

فهرست

- چکیده

۱- مقدمه ۱

۲- شناسایی سیستم و کنترل تطبیقی ۹

۲-۱ نکات اساسی در شناسایی سیستم ۱۰

۲-۱-۱ شرایط آزمایشی ۱۱

۲-۱-۲ تعیین ساختار مدل ۱۴

۲-۱-۳ گنجاندن تأخیرهای زمانی در مدل ۱۶

۲-۱-۴ شرایط اولیه پارامترهای مدل ۱۶

۲-۱-۵ انتخاب روش شناسایی ۱۷

۲-۱-۶ مقاومت درتخمین پارامترها ۱۹

۲-۱-۷ نرم‌افزار پیاده‌سازی ۲۰

۲-۲ شناسایی فرآیندهای تغییرپذیر با زمان ۲۰

۲-۳ همگرایی الگوریتم شناسایی RLS با اثر ثابت ۲۲

۲-۴ همگرایی با درنظرگرفتن اغتشاشات محدود و معرفی باندسکوت ۲۵

۲-۵ همگرایی با درنظرگرفتن دینامیک مدل‌نشده و معرفی نرمالیزه‌کردن ۲۸

۳- مقاومت در شناسایی سیستم ۳۱

۳-۱ انحراف پارامترهای مدل در اثر دینامیک مدل‌نشده ۳۴

۳-۲ انحراف پارامترهای مدل در اثر اغتشاشات نامعلوم ۴۳

۳-۳ انحراف پارامترهای مدل در اثر تأخیر نادرست در مدل‌سازی ۴۹

۳-۴ تأثیر پریود نمونه‌برداری در انحرافات ایجادشده ۵۱

۳-۵ انحراف پارامترها در حضور توأم دینامیک مدل نشده و اغتشاشات نامعلوم ۵۲

۳-۶ تغییرات زمانی پارامترها در اثر عوامل تولید خطا در شناسایی با اثر ثابت ۵۶

۴- روش‌های مقاوم‌سازی شناسایی سیستم ۵۸
۴-۱ خطاهای مدل‌سازی و باندسکوت و مشاهدات حاصله از اعمال آن ۶۰
۴-۲ تغییر آستانه‌ی باند سکوت به یک مقدار ثابت و معرفی بهره‌ی شناسایی ۶۵
۴-۳ مقادیر ویژه‌ی یک شناسایی‌کننده‌ی RLS ۷۰
۴-۴ مقاومت شناسایی‌کننده و رابطه‌ی آن با سرعت تطابق ۷۲
۴-۵ باند سکوت گسسته و پیوسته و مقایسه‌ی آنها ۷۳
۴-۶ ارائه روشی برای تعیین باندسکوت بصورت خودکار ۷۴
۴-۶-۱ تقسیم مدت‌زمان شناسایی به دو فاز ۷۵
۴-۶-۲ معیاری برای تغییر فاز در شناسایی ۷۷
۴-۶-۳ باندسکوت خودتنظیم ۷۸
۴-۷ فیلترکردن داده‌ها پیش از ورود به شناسایی و تأثیر آن در مقاومت ۸۱
۴-۸ روش‌های دیگر در مقاوم‌سازی شناسایی سیستم ۸۴
۵- کنترل تطبیقی مقاوم ۸۷
۵-۱ کنترل‌کننده‌ی ساده‌ی یک پله‌ای و اثبات پایداری فرم تطبیقی آن ۸۹
۵-۲ اصلاح قانون کنترل ۹۴
۵-۲-۱ اضافه‌کردن وزن برروی سیگنال کنترل ۹۴
۵-۲-۲ اضافه‌کردن مدل مرجع ۹۷
۵-۲-۳ حذف خطای ماندگار با قرار دادن وزن برروی تغییرات کنترل ۱۰۲
۵-۲-۴ حذف خطای ماندگار با استفاده از نتایج شناسایی ۱۰۴
۵-۳ قانون کنترل Clark-Gawthrop ۱۰۶
۵-۴ اثبات پایداری الگوریتم تطبیقی معرفی‌شده در حضور دینامیک مدل‌نشده ۱۰۷
۵-۵ کاهش مرتبه‌ی کنترل‌کننده بوسیله‌ی کاهش درجه‌ی شناسایی‌کننده ۱۱۷
۵-۶ بررسی مؤثربودن الگوریتم شناسایی پیشنهادی با شبیه‌سازی ۱۱۹
۵-۷ بررسی مقاومت الگوریتم کنترل تطبیقی پیشنهادی در مقابل تأخیر ۱۲۳

۶- نتایج پیاده‌سازی بر روی سیستم لئونارد ۱۲۵
۶-۱ شناسایی تابع تبدیل سیستم لئونارد ۱۲۶
۶-۲ اعمال کنترل تطبیقی برروی سیستم لئونارد ۱۳۴
۶-۳ اعمال باندسکوت ۱۳۹
۶-۴ افزایش درجه‌ی مدل ۱۴۰
۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۴۲
- ضمیمه آ ۱۴۴
- ضمیمه ب ۱۴۸
- مراجع ۱۴۹

فصل اول

مقدمه

در مسائل طراحی بسیاری از سیستم‌های کنترل، طراح مدل دقیقی از فرآیند تحت کنترل را مورد استفاده قرار نمی‌دهد. این موضوع ممکن است بخاطر عدم اطلاع دقیق از رفتار دینامیکی فرآیند و یا بخاطر جلوگیری از پیچیده شدن کنترل‌کننده‌ای باشد که بر اساس مدل طرح می‌شود. اغلب کنترل‌کننده با مرتبه‌ی کوچکتر در پیاده‌سازی ترجیح داده می‌شود و با وجود اطلاع از یک مدل مرتبه‌بالا و پیچیده برای یک فرآیند، طراحی براساس مدل ساده‌شده‌ای انجام می‌شود تا کنترل حاصله حتی‌الامکان ساده باشد. اصولاً با بالا رفتن مرتبه‌ی کنترل‌کننده و اضافه شدن محاسبات آن، امکان پیاده‌سازی کمتر می‌شود.

با توجه به رشد روزافزون کاربرد سیستم‌های کامپیوتری در کنترل سیستم‌ها، پیاده‌سازی با کامپیوتر دیجیتال مورد نظر است که به موازات آن باید مسائل عددی، خطاهای محاسباتی و دقت A/D و D/A در نظر گرفته شوند. بطور نمونه انتخاب پریود نمونه‌برداری[1] در پیاده‌سازی یک الگوریتم کنترل از اهمیت فوق‌العاده‌ی برخوردار بوده و درصورت انتخاب غیراصولی آن، مشکلات عددی در محاسبات کنترل بوجود آمده و حساسیت الگوریتم کنترل در مقابل انحرافات کوچک بسیار زیاد می‌شود.

هنگامیکه یک الگوریتم کنترل بر مبنای مدلی از فرآیند تحت کنترل استوار شده است، توانایی مدل در بیان رفتار دینامیکی فرآیند، تحقق اهداف کنترلی مورد نظر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یک سیستم فیزیکی دارای مُدهای فرکانس‌بالایی است که تلاش برای مدل‌سازی آنها بیهوده بوده و در نتیجه بخشی از رفتار دینامیکی فرآیند در مدل گنجانده نمی‌شود و از اینرو مدل در فرکانس‌های بالا رفتاری متفاوت با فرآیند از خود نشان می‌دهد. این اختلاف خصوصاً در منحنی فاز پاسخ فرکانسی قابل مشاهده است.

۱- Sampling Time

بعبارت دیگر، مدل تخمینی از رفتار فرآیند در فرکانس‌های پائین (فرکانس کار) بدست می‌دهد.

در شرایطی که مدل براساس اطلاعات ورودی- خروجی بصورت روی‌خط[۱] شناسایی می‌شود، مسأله‌ی فوق سبب می‌شود که پارامترهای شناسایی‌شده وابسته به طیف فرکانسی ورودی اعمال‌شده به فرآیند باشند. در صورتیکه ورودی فرکانس‌های بالا را تحریک کند، از آنجائیکه مدل درجات آزادی لازم برای بیان رفتار فرآیند در فرکانس‌های بالا را ندارد، پارامترهای مورد شناسایی به مقادیر غیرمطلوبی منحرف می‌شوند که در واقع تخمینی از رفتار فرآیند در باند فرکانسی تحریک‌شده توسط ورودی هستند. در اینگونه موارد الگوریتم کنترلی که مبتنی بر مدل است، براساس پارامترهای نامطلوب محاسبه شده و درنتیجه انحرافاتی در الگوریتم و سیگنال کنترل حاصله ایجاد می‌شود که تحت تأثیر انحرافات موجود در مدل ایجاد شده‌اند.

در کنترل مقاوم از این انحرافات بعنوان نامعینی یاد می‌شود. دینامیک‌های مدل‌نشده نیز همان مُدهای فرکانس‌بالا هستند که در صورت عدم تحریک، تأثیر آنها در خروجی فرآیند ناچیز است. مدل ساده‌شده‌ای که در طراحی الگوریتم کنترل مورد استفاده واقع می‌شود شامل دینامیک‌های اصلی فرآیند است که رفتار سیستم عُمدتاً متأثر از آنهاست.

یک ویژگی مهم از هر الگوریتم کنترل، فراهم آوردن و حفظ پایداری با وجود نامعینی‌هاست. این ویژگی بعنوان مقاومت[۲] تعریف شده است. یک اشکال عُمده در تعریف مقومت، وابستگی به مسأله و شرایط خاص آن است. بدیهی است الگوریتم کنترلی که توان تحمل هیچگونه نامعینی حتی با دامنه‌ی بسیار کوچک را ندارد، مقاوم نیست. در عمل اگر محدوده‌ی نامعینی‌های قابل تحمل در یک سیستم کنترل از نامعینی‌های واقعی موجود کوچکتر باشد، باز هم سیستم غیرمقاوم به حساب می‌آید. بعلاوه ممکن است یک الگوریتم کنترل در یک کاربرد مقاوم باشد ولی در کاربرد دیگر اینگونه نباشد [35].

مجموعه مشاهداتی که بوسیله‌ی Rohrs, et.al. از طریق شبیه‌سازی الگوریتم‌های کنترل تطبیقی زمان‌پیوسته و زمان‌گسسته بهمراه در نظر گرفتن شرایط غیرایده‌ال انجام گرفته است، نشان می‌دهند که اغلب الگوریتم‌های کنترل تطبیقی بصورت‌های ابتدائی خود که در شرایط ایده‌ال اثبات پایداری برای آنها وجود دارد، هنگام پیاده‌سازی چشم‌بسته بر روی سیستم‌های واقعی، ممکن است مسبب تولید ناپایداری باشند [34].

رفتارهای نامطلوب ذکرشده علاوه برآنکه تحت تأثیر دینامیک‌های مدل‌نشده مشاهده شده‌اند بلکه با وجود اغتشاشات غیرقابل اندازه‌گیری[۳] (نامعلوم) در فرآیند نیز بدست آمده‌اند. از آنجائیکه در الگوریتم

۱- On-line

۲- Robustness

۳- Unkown Disturbances

کنترل تطبیقی پارامترهایی از سیستم کنترل بصورت روی‌خط شناسایی می‌شوند، اغتشاشات نامعلوم در تخمین‌های بدست‌آمده تأثیر گذاشته و پارامترهای مورد شناسایی را از مقادیر صحیح خود منحرف می‌کنند. اغتشاشات فرکانس‌بالا در سیگنال کنترل فرآیند نفوذ کرده و دینامیک‌های فرکانس‌بالای مدل‌نشده را تحریک می‌کنند و ممکن است ناپایداری سیستم حلقه‌بسته را سبب شوند.

دینامیک‌های فرکانس‌بالا در طراحی‌های غیرتطبیقی سبب محدود شدن فرکانس گذر از صفر[۱] شده و لازم می‌کنند که سیستم کنترل، حدود بهره و فاز[۲] کافی و مناسبی داشته باشد [34]. یک الگوریتم کنترل باید قادر باشد که بدون ایجاد ناپایداری، یک فرآیند را با وجود اغتشاشات نامعلوم کنترل کند. در کنترل خطی غیرتطبیقی، کنترل‌کننده‌های حاصله دارای ویژگی ذکرشده هستند و بعلاوه می‌توان ملاحظاتی را در طراحی کنترل درنظر گرفت که اغتشاشات شناخته‌شده تضعیف شوند.

Rohrs و همکاران او باب جدیدی را در نحوه‌ی نگرش به الگوریتم‌های تطبیقی مدل‌مرجع گشودند و نشان دادند که دو مکانیزم برای ناپایداری در حضور دینامیک‌های مدل‌نشده وجود دارد. آنها نتیجه‌ی معروف زیر را مطرح کردند [34]:

" نتیجه‌ی بدست‌آمده آن است که الگوریتم‌های کنترل تطبیقی آنگونه که در نوشتجات آمده‌اند، هنگامیکه بطور مستقیم و بدون تغییر برای کنترل یک فرآیند واقعی بکار روند، احتمال دارد که باعث ایجاد ناپایداری شوند."

نکته‌ی قابل توجه در کاربردهای تطبیقی آن است که الگوریتم های کنترل تطبیقی موجود هنگام اعمال برای کنترل یک فرآیند خطی تغییر ناپذیر با زمان منجر به یک سیستم کنترل حلقه‌بسته تغییر پذیر با زمان با ضرایبی که بصورت غیرخطی به اطلاعات ورودی- خروجی وابسته هستند، می‌شوند. در این شرایط پایداری سیستم کنترل، وابسته به ورودی‌های خارجی (ورودی مبنا و اغتشاشات معلوم و نامعلوم) و همچنین دینامیک‌های مدل‌نشده است. بنابراین آنالیز پایداری سیستم کنترل تطبیقی و پیدا کردن شرایط تحقق پایداری کار دشواری بوده و از اهمیت برخوردار است [1].

در سال‌های پایانی دهه‌ی ۷۰ پیشرفت زیادی در تئوری کنترل تطبیقی حاصل شد و علاوه برآنکه اثبات‌های پایداری مجانبی عمومی[۳] براساس روش‌های گرادیان، توابع لیاپانوف و تئوری سیستم‌های پسیو[۴] برای الگوریتم‌های مدل‌مرجع[۵] اعمال‌شده به یک فرآیند خطی مینیمم‌فاز و از درجه‌ی معلوم در

۱- Crossover Frequency

۲ - Gain and Phase Margins

۳- Global Asymptotic Stability

۴- Passivity Theory

۵- Model Reference

شرایط ایده‌ال بدست آمد، الگوریتم‌های کنترل تطبیقی که بسیار پراکنده و گوناگون بودند، فرم واحدتری گرفتند.

اثبات‌های پایداری الگوریتم‌های تطبیقی مدل‌مرجع براساس فرض‌های بعضاً محدودکننده‌ای استوار شده‌اند. برای حالت زمان‌پیوسته اغلب فرض می‌شود که درجه‌ی نسبی[۱] فرآیند (تفاوت تعداد قطب و صفر تابع تبدیل) از قبل معلوم است. فرض معادل برای سیستم زمان‌گسسته آن است که تأخیر خالص بین ورودی و خروجی مضرب صحیحی از پریود نمونه‌برداری بوده و این مقدار صحیح معلوم باشد. همچنین در هر دوی الگوریتم‌های زمان‌پیوسته و گسسته فرض می‌شود که حد بالایی برای درجه‌ی فرآیند تحت کنترل معلوم است و در نهایت مهمترین فرض آن است که ورودی فرآیند به اندازه‌ی کافی تحریک‌کننده و غنی[۲] باشد تا همگرایی عمومی پارامترهای مورد تخمین تضمین شود [34].

فرض محدودکننده‌ی درجه‌ی نسبی فرآیند در حالت زمان‌پیوسته به نوبه‌ی خود این امکان را برای طراح فراهم می‌کند که برای الگوریتم تطبیقی یک تابع تبدیل خطای مثبت حقیقی[۳] بدست آورد که اثبات همگرایی وابسته به آن است. مثبت حقیقی بودن به این معناست که فاز سیستم نمی‌تواند از محدوده‌ی ۹۰± درجه به ازای تمام فرکانس‌ها خارج شود. این در حالیست که مدل سیستم‌های فیزیکی در فرکانس‌های بالا برای بدست آوردن فاز پاسخ فرکانسی مناسب نبوده و با مقدار واقعی تفاوت دارد [34]. در نتیجه مدل رفتار واقعی سیستم فیزیکی در فرکانس‌های بالا را نمی‌تواند بیان کند. بعلاوه همانگونه که در قبل مؤکداً اشاره شد برای معقول نگاه‌داشتن درجه‌ی پیچیدگی الگوریتم کنترل تطبیقی، اغلب طراحی براساس مدلی که تمامی دینامیک‌های فرآیند را در برنمی‌گیرد، انجام می‌شود.

ملاحظات فوق‌الذکر انگیزه‌ای شد تا محققین در عرصه‌ی کنترل تطبیقی از اوایل دهه‌ی ۸۰ به سمت کار در رابطه با مقاوم سازی کنترل‌کننده‌های تطبیقی کشیده شوند و همچنین در جهت حذف فرض‌های محدودکننده از قبیل مینیمم‌فاز بودن فرآیند، اطلاع از درجه‌ی فرآیند و درجه‌ی نسبی آن و مهمتر از همه، فرض غیرعملی مثبت حقیقی بودن تابع تبدیل فرآیند، تلاش بعمل آورند.

برای بهبود مقاومت کنترل‌کننده‌های تطبیقی اصلاحات مختلفی پیشنهاد شده و بکار گرفته شده‌اند. در [10] برای اولین بار یک الگوریتم خودتنظیم برای یک سیستم با وجود اغتشاشات با دامنه‌ی محدود[۴] پیشنهاد شد و پایداری آن مورد بررسی قرار گرفت. در [12] باندهای خطایی برای شناسایی کننده‌ها درحضور دینامیک‌های مدل‌نشده بدست آمد و نشان داده شد که نسبت ثابت‌زمانی دینامیک‌های

۱- Relative Degree

۲- Persistent Exciting

۳- Positive Real Transfer Function

۴- Bounded Disturbances

مدل‌نشده به ثابت‌زمانی دینامیک‌های اصلی فرآیند، مستقیماً در اندازه‌ی ناحیه‌ی همگرایی تأثیرگذار است. نتایج پایداری محلی بدست‌آمده در [12] هنگامی برقرار هستند که نسبت ثابت‌زمانی ذکرشده کوچک باشد، یعنی دینامیک‌های مدل‌نشده بسیار سریعتر از دینامیک‌های اصلی فرآیند باشند. نمونه‌هایی هم مثل [18] سعی در یافتن کلاسی برای اغتشاشات نامعلوم در یک فرآیند کرده‌اند طوریکه همگرایی الگوریتم کنترل تطبیقی را تحت تأثیر قرار ندهند. نتایج بدست‌آمده در کار آنها، فرض‌هایی بسیار محدودکننده بر روی ورودی- خروجی فرآیند تحمیل می‌کند.

نتایجی مشابه [10] در مقالات بسیاری مطرح شده است [9]، [11]، [12]، [18]، [20]، [22]، [23]، [25] و [32]. در آنها برای الگوریتم تطبیقی پیشنهادشده، پایداری BIBO سیستم حلقه‌بسته بهمراه محدود بودن خطای ردیابی اثبات شده است ولی محدودیت مینیمم‌فاز بودن برای فرآیند تحت کنترل وجود دارد. فرض مینیمم‌فاز بودن در الگوریتم کنترل ساده‌ای مثل کنترل‌کننده‌ی یک‌پله‌ای[1] نیز نقش تعیین‌کننده‌ای داشته و برای اثبات پایداری سیستم کنترل تطبیقی با قانون کنترل ذکرشده، لم معروفی بنام لم کلیدی تکنیکی[2] با فرض مینیمم‌فاز بودن، اساس اثبات را تشکیل می‌دهد [14].

راه‌حل‌های متعددی برای توسعه‌ی اثبات پایداری الگوریتم‌های کنترل تطبیقی برای فرآیندهای غیرمینیمم‌فاز ارائه شده است. برای مثال استفاده از ورودی تحریک کننده [11]، محدود کردن فضای پارامترهای مورد شناسایی به یک ناحیه‌ی محدب و محدود [14] و [20] و جستجو در فضای پارامترها برای یافتن نقاط مناسب [23] در شرایط ایده‌ال بعنوان راه‌حل پیشنهاد شده‌اند.

در [26] آنالیز پایداری سیستم غیر مینیمم‌فاز با وجود اغتشاشات نامعلوم و محدود و همچنین دینامیک‌های مدل‌نشده، با استفاده از تکنیک نرمالیزه‌کردن داده‌های ورودی- خروجی و باندسکوت[3] و با معرفی توابع دربرگیرنده‌ی[4] دینامیک‌های مدل‌نشده انجام شده است ولی هیچگونه صحبتی از خطای ردیابی به میان نیامده است و فرض‌های محدودکننده و محافظه‌کارانه‌ی زیادی در روش آنها وجود دارد. بعلاوه روش آنها در حوزه‌ی پیوسته ارائه شده و ادعا شده است که با استفاده از نمونه‌برداری سریع، پیاده‌سازی گسسته نیز خصوصیات کارایی حالت پیوسته را حفظ می‌کند.

دامنه‌ی انحرافات ناشی از دینامیک‌های مدل‌نشده در مدل وابسته به اندازه‌ی ورودی- خروجی فرآیند بوده و بدون اطلاع از محدود بودن دامنه‌ی ورودی- خروجی نمی‌توان کران بالایی برای آن در نظر گرفت. در [32] برای اولین بار تکنیک نرمالیزه کردن داده‌های ورودی- خروجی پیش از وارد شدن به

۱- One Step Ahead Control

۲- Key Technical Lemma

۳- Deadzone

۴- Overbounding

شناسایی‌کننده بعنوان راه‌حلی برای مقابله با دینامیک‌های مدل‌نشده پیشنهاد شده است. بوسیله‌ی تکنیک نرمالیزه‌کردن، با دینامیک‌های مدل‌نشده نیز همانند اغتشاشات با دامنه‌ی محدود برخورد می‌شود و مشکل احتمالی بروز انحرافات نامحدود در شناسایی‌کننده بخاطر عدم اطلاع قبلی از محدود بودن دامنه‌ی ورودی- خروجی برطرف می‌شود.

در [6] با اعمال قانون کنترل Clark-Gawthrop [8] که معادل قانون کنترل یک‌پله‌ای بهمراه وزن بر روی سیگنال کنترل و مدل مرجع[1] است، اثبات پایداری برای سیستم غیرمینیمم‌فاز در حضور اغتشاشات با دامنه‌ی محدود و با استفاده از باندسکوت از قبل تعیین‌شده، انجام شده است. فرض‌هایی که در [6] برای اثبات در نظر گرفته شده‌اند چندان محدودکننده نیستند. همچنین براساس نتایج شبیه‌سازی‌های بسیار ساده ادعا شده است که قانون کنترل اعمال‌شده در مقابل تغییرات تأخیر بین ورودی و خروجی فرآیند مقاوم است

اضافه کردن وزن بر روی سیگنال کنترل و یا تغییرات آن علاوه بر آنکه سبب ایجاد قابلیت برای اعمال قانون کنترل به سیستم غیرمینیمم‌فاز می‌شود و دامنه‌ی خطاهای مدل‌سازی قابل تحمل را بزرگتر می‌کند، برای فرآیندهایی که صفرهای کندی دارند، ضروری است. در اینگونه فرآیندها اعمال قانون کنترل یک‌پله‌ای پیش‌بین سبب حذف صفر و قطب کُند می‌شود و نوسانی‌شدن سیگنال کنترل را در پی دارد. این رفتار نوسانی در سیگنال کنترل سبب تحریک دینامیک‌های فرکانس‌بالا شده و در کاربردهای تطبیقی ممکن است سبب ایجاد انحراف در پارامترهای شناسایی‌شده گشته و اختلالاتی در پایداری سیستم کنترل حلقه‌بسته بهمراه داشته باشد. بنابراین در کاربردهای تطبیقی لازم است با اعمال اصلاحاتی در قانون کنترل از حذف صفر و قطب جلوگیری کرد. بعبارت دیگر قانون کنترل شرایطی را بر مسأله تحمیل می‌کند که چون برقرار نیست. باید براساس اهداف موردنظر و شرایط مسأله، اصلاحاتی در آن بعمل آورده شود.

مرجعی که ایده‌ی شروع این کار از آن بدست آمد [4] است که در آن اثبات همگرایی الگوریتم تطبیقی با قانون کنترل یک‌پله‌ای پیش‌بین در حضور دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاشات نامعلوم (عوامل تولید خطا در مدل‌سازی) برای فرآیند مینیمم‌فاز ارائه شده است و بوسیله‌ی نرمالیزه‌کردن داده‌های ورودی- خروجی و باندسکوت از قبل تعیین‌شده، همگرایی الگوریتم شناسایی تضمین شده است. بعلاوه باندسکوت پیوسته و گسسته با هم مقایسه شده‌اند و نشان داده شده که باندسکوت بصورت پیوسته، محدودیت کمتری برای اثبات همگرایی بهمراه دارد. قانون کنترل بسیار ساده‌ای که در [4] مورد استفاده قرار گرفته است، اثبات همگرایی سیستم کنترل تطبیقی را بسیار آسان می‌کند ولی از لحاظ

۱- Weighted One Step Ahead Control with Reference Model

عملی مشکل‌ساز است. در واقع قانون کنترل بکاررفته در [4] به هیچ وجه مقاوم نیست و تنها بخاطر سادگی آن، کران بالایی برای خطاهای مدل‌سازی قابل تحمل بدست آمده است که در عمل مفید نیست. برای برطرف شدن مشکلات پیاده‌سازی و حذف فرض مینیمم‌فاز بودن فرآیند، لازم است وزنی بر روی سیگنال کنترل و یا تغییرات آن قرار داده شود و یا آنکه اصلاحات بنیادی در ساختار کنترل‌کننده ایجاد شود که این امر به نوبه‌ی خود سبب پیچیده شدن اثبات همگرایی می‌شود.

در این پایان‌نامه الگوریتم کنترل تطبیقی مستقیم[1] اصلاح‌شده‌ای ارائه شده است که در برابر دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاشات نامعلوم برای دسته‌ای از فرآیندها مقاومت قابل قبولی دارد. اثبات تئوری و تأیید بوسیله شبیه‌سازی و پیاده‌سازی نیز از اجزاء اساسی هستند. اثبات پایداری سیستم کنترل تطبیقی با کنترل‌کننده‌ی Clark-Gawthrop در حضور دینامیک مدل‌نشده با تلفیقی از [6] و[4] بصورت تعمیمی برای هر دو، همراه با ایده‌های جدید ارائه شده است و فرض‌های محدودکننده حتی‌الامکان حذف شده‌اند. الگوریتم شناسایی مورد استفاده تعمیمی برای [4] است و دامنه‌ی باندسکوت از پیش معلوم فرض نشده و الگوریتمی برای تعیین خودکار باندسکوت براساس خطای پیش‌بینی شناسایی‌کننده ارائه شده است.

مدت‌زمان اجرای الگوریتم شناسایی به دو فاز تطبیق سریع و تطبیق مقاوم تقسیم شده است. در ابتدای کار شناسایی در فاز تطبیق سریع، یک RLS معمولی است و بر اساس معیاری که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن تخمین‌هاست، شناسایی وارد فاز تطبیق مقاوم می‌شود.

در فاز تطبیق مقاوم یک الگوریتم شناسایی RLS با اثر(Trace) ثابت بهمراه باندسکوت برای ردیابی تغییرات اعمال می‌شود. باندسکوت تغییرات زمانی پارامترها را محدود می‌کند و مؤثر بودن الگوریتم شناسایی با اثر ثابت، با جود آن ممکن می‌شود. مهم‌ترین ویژگی باندسکوت، ثابت نگاه‌داشتن پارامترها و در نتیجه ثابت نگاه‌داشتن ساختار کنترل‌کننده در اکثر لحظات است.

ابتدا براساس نتایج شبیه‌سازی با بسته نرم‌افزاری SIMULINK نقصان مقاومت شناسایی‌کننده در حضور عوامل تولید خطا نشان داده خواهد شد. سپس روش‌های مقاوم سازی شناسایی‌سیستم بررسی شده و الگوریتمی برای تعیین خودکار باندسکوت ارائه می‌شود.

در قسمت بعد کنترل‌کننده‌ی تطبیقی یک‌پله‌ای مورد بررسی قرار گرفته و روش‌هایی برای مقاوم سازی آن ارائه می‌شود. سپس با انجام شبیه‌سازی الگوریتم تطبیقی متشکل از قانون کنترل اصلاح‌شده که دارای ساختار کنترل‌کننده‌ی Clark-Gawthrop است و شناسایی‌کننده‌ی RLS اصلاح‌شده بر روی یک سیستم درجه‌ی ۲ کنترل مکان موتور dc شامل دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاشات نامعلوم، مؤثر

۱- Direct Adaptive Control Algorithm

بودن روش ارائه‌شده نشان داده خواهد شد و در ادامه راه‌حل‌هایی برای افزودن مقاومت به الگوریتم در حضور تأخیر زمانی متغیر ارائه خواهد شد.

مراجع [1] و [14] همواره بعنوان مراجع تصمیم‌گیری در پیاده‌سازی کنترل تطبیقی مورد نظر بوده‌اند و ایده‌های عملی براساس آنها بدست آمده‌اند. نوع فرمول‌بندی مطابق [14] است. از آنجائیکه درنهایت هدف پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی است، اصلاحات بعمل آمده حتی‌الامکان ساده بوده و پریود نمونه‌برداری با توجه به محدودیت زمانی محاسبات انتخاب شده است. البته از نتایج قابل‌توجه آن است که انتخاب درست پریود نمونه‌برداری، مقاومت کنترل تطبیقی در برابر اغتشاشات فرکانس‌بالا را بهبود می‌بخشد.

برای مقابله با دینامیک‌های مدل‌نشده، مقدار تأخیر مدل در بعضی موارد متفاوت با مقدار واقعی درنظر گرفته شده است و این کار سبب مدل‌سازی بهتر فرآیند شده است، به این ترتیب که فاز اضافی ناشی از دینامیک‌های مدل‌نشده بوسیله‌ی فاز اضافی ناشی از تأخیر، مدل شده است. از نتایج مهم این کار، مقاومت قانون کنترل تطبیقی پیشنهادی در مقابل تأخیر زمانی متغیر است.

تقلیل درجه‌ی کنترل‌کننده بر مبنای تقلیل درجه‌ی شناسایی‌کننده و وجود مصالحه‌ای بین کارایی از دست رفته و مقاومت بدست‌آمده در تخمین پارامترها از دیگر نتایج است. از آنجائیکه مدل تخمینی برای رفتار فرآیند است، می‌توان با تقلیل درجه‌ی شناسایی‌کننده به نتایجی با حساسیت کمتر دست پیدا کرد و در بعضی موارد به نتایج قابل قبولی رسید. البته باید توجه داشت که درجه‌ی آزادی حذف‌شده نقش اساسی در کنترل نداشته باشد. بعنوان مثال ممکن است برای کنترل یک فرآیند مرتبه ۲، کنترل‌کننده با درجه‌ی ۳ طراحی شود که بیش از درجه‌ی فرآیند بوده و تقلیل هوشمندانه‌ی درجه‌ی آن کاری موجه است.

در انتها مؤثر بودن الگوریتم کنترل تطبیقی پیشنهادی برای کنترل سیستم لئونارد[۲،۱] در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱- سیستم لئونارد از رایجترین سیستم‌های کنترل دور موتور dc است که از دو ماشین دیگر برای تنظیم ولتاژ آرمیچر موتورdc و در نتیجه تنظیم دور آن استفاده می‌شود. یکی از ماشین‌ها یک موتور سه‌فاز است که یک ژنراتور dc را با دور ثابت می‌چرخاند. دامنه‌ی ولتاژ تولید شده توسط ژنراتور dc بوسیله‌ی تنظیم ولتاژ سیم‌پیچی میدان آن قابل کنترل بوده و آرمیچر موتور dc را تغذیه می‌کند.

۲- سیستم لئونارد موجود در آزمایشگاه پس از حدود بیست سال که از نصب آن گذشته بود، با تلاش نگارنده و کمک مهندس رمضانی‌تبار و مهندس ثابت، بدون داشتن متن مفیدی راجع به آن، بر اساس سعی و خطا و جسارت، در بهار سال ۷۵ مورد بهره‌برداری قرار گرفت.