بسم الله الرحمن الرحيم

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل

طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم به روش QFT با استفاده از نظریه سیستم‌های مرتبه کسری

نگارش :

بهمن کشت‌پور

استاد راهنما :

دکتر علی خاکی صدیق

زمستان ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تأییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان :

طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم به روش QFT با استفاده از نظریه سیستم‌های مرتبه کسری

توسط آقای بهمن کشت‌پور، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱۴ مورد تأیید قرار می‌دهند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ – استاد راهنما	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
۲ – استاد ممتحن داخلی	دکتر علیرضا فاتحی	دانشیار	
۳ – استاد ممتحن خارجی	دکتر محمد صالح تواضعی	دانشیار	
٤ – نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علیرضا فاتحی	دانشیار	

اظهارنامه دانشجو

اینجانب بهمن کشت‌پور دانشجوی کارشناسی ارشد رشته برق گرایش کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان :

طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم به روش QFT با استفاده از نظریه سیستم‌های مرتبه کسری

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده‌است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو :

تاریخ :

حق طبع و نشر و مالکیت مطالب

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.

قدردانی و تشکر

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر علی خاکی صدیق که در مدت زمان انجام پایان‌نامه با راهنمایی‌های خود اینجانب را همراهی کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. در این مدت اینجانب علاوه بر راهنمایی‌های علمی از سجایای اخلاقی ایشان همچون صبر، مناعت طبع و تعمق نیز درس گرفته‌ام. از خداوند بزرگ برای ایشان آرزوی توفیق روز افزون در تمام مراحل زندگی را خواستارم.

چکیده

نظریه‌ی فیدبک کمّی (QFT) یکی از روش‌های عملی در زمینه طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم است. ویژگی بارز این روش طراحی در حوزه فرکانسی، وضوح و روشنی است که در فرآیند طراحی کنترل‌کننده بین پایداری و مشخصات عملکرد مطلوب و پیچیدگی کنترل‌کننده در حضور نامعینی و اغتشاشات وجود دارد. اصلی‌ترین مراحل طراحی در این روش بدست‌آوردن باندهای فرکانسی مرکب و شکل‌دهی سیستم حلقه باز به منظور برآورده‌شدن این باندهای فرکانسی مرکب است. در این پایان‌نامه دو ساختار کنترل‌کننده بهینه مورد بررسی قرارگرفته شده‌است. ساختار اول مربوط به کنترل‌کننده‌هایی است که دارای تابع تبدیل از مرتبه صحیح هستند که به منظور برآوردن پایداری و مشخصات عملکرد مقاوم نیاز به پیچیدگی بالایی دارند. در ساختار دیگر با بکارگیری کنترل‌کننده‌هایی‌که دارای تابع تبدیل از مرتبه کسری هستند، می‌توان با وجود داشتن ساختار با پارامترهای کمتر، به حالت بهینه بیشتر و بهتر نزدیک شد. ساختارهای مختلف کنترل‌کننده‌ها از مرتبه کسری مورد بررسی قرارگرفته و مقایسه شده‌اند. روش‌های بهینه‌سازی تصادفی برای بدست‌آوردن کنترل‌کننده بهینه بکارگرفته شده‌است. در قسمت پایانی، نتایج شبیه‌سازی و مقایسه بین کنترل‌کننده‌ها از مرتبه صحیح وکسری برای سیستم‌های می‌نیمم فاز و غیرمی‌نیمم فاز ارائه شده‌است تا تاییدی بر انعطاف و توانایی ساختارهای کسری باشد.

کلید واژه : روشQFT، شکل‌دهی سیستم حلقه باز، کنترل‌کننده از مرتبه کسری، بهینه‌سازی تصادفی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه ۱

فصل ۲- نظریه فیدبک کمّی ۷

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- بررسی ساختارهای سیستم‌های کنترلی بر اساس درجه آزادی ۸

۲-۲-۱- ساختار یک درجه آزادی ۸

۲-۲-۱- ساختار دو درجه آزادی ۹

۲-۳- نامعینی و نگاره‌های سیستم ۱۱

۲-۴- تعیین مشخصه‌های عملکردی ۱۱

۲-۴-۱- سیستم پایدار و نامطلوب و حاشیه پایداری مقاوم ۱۱

۲-۴-۲- مدل حذف اغتشاش ۱۳

۲-۴-۳- مدل ردیابی مطلوب ۱۳

۲-۴-۴- بدست‌آوردن باندهای فرکانسی مرکب ۱۴

۲-۵- شکل‌دهی تابع تبدیل حلقه باز (طراحی کنترل‌کننده اصلی) ۱۵

۲-۶- طراحی پیش‌فیلتر ۱۶

۲-۷- تاثیر نویز حسگر در ورودی سیستم تحت کنترل (هزینه فیدبک) ۱۷

۲-۸- بهینگی ۱۸

۲-۸-۱- مقدمه‌ای بر متغیرهای مختلط و کاربردهای آن ۱۸

۲-۸-۲- تساوی مساحت‌های مثبت و منفی در تابع حساسیت ۱۹

۲-۸-۳- رابطه بین اندازه و فاز تابع تبدیل حلقه‌باز ۲۱

۲-۸-۴- بهینگی در سیستم حلقه باز ۲۲

۲-۹- طراحی بر اساس نظریه‌ی فیدبک کمّی برای سیستم‌های غیرمی‌نیمم فاز و ناپایدار ۲۶
۲-۹-۱- رابطه مهم بین فاز و اندازه شیب در نمودار بودی ۲۶
۲-۹-۲- سیستم ناپایدار و محدودیت فاز تاخیری.....۲۷
۲-۹-۳- سیستم با صفر ناپایدار (غیرمی‌نیمم فاز) و محدودیت در برآوردن مشخصات عملکرد...۲۸
۲-۹-۴- تحلیل کمّی سیستم‌های غیرمی‌نیمم فاز نامعین.....۳۰
۲-۹-۵- برآورده شدن مشخصات عملکرد در سیستم غیرمی‌نیمم فاز نامعین.....۳۳

فصل ۳- حسابان کسری ۳۵

۳-۱- مقدمه ۳۵
۳-۲- توابع ویژه در حسابان کسری.....۳۵
۳-۳- مشتق و انتگرال از مرتبه کسری.....۳۷
۳-۳-۱- روش گرانوالد-لتنیکوف.....۳۷
۳-۳-۲- روش ریمان-لیوویل.....۳۸
۳-۳-۳- روش کپوتو.....۳۸
۳-۳-۴- روش میلر-رس.....۳۹
۳-۴- تبدیل لاپلاس در حساب‌دیفرانسیل از مرتبه کسری.....۴۰
۳-۵- معادلات دیفرانسیل کسری.....۴۰
۳-۶- تقریب تابع تبدیل از مرتبه کسری با تابع تبدیل از مرتبه صحیح.....۴۱
۳-۶-۱- روش کارلسون.....۴۱
۳-۶-۲- روش استالوپ.....۴۱
۳-۷- حل معادلات دیفرانسل خطی تغییرناپذیر با زمان از مرتبه کسری با روش تبدیل لاپلاس ...۴۲
۳-۸- پایداری سیستم‌های از مرتبه کسری.....۴۳

فصل ۴- نظریه‌ی فیدبک کمّی مرتبه کسری ۴۶

۴-۱- مقدمه ۴۶
۴-۲- معرفی ساختار پیشنهادی کنترل‌کننده و مقایسه آن با ساختارهای مختلف دیگر ۴۷
۴-۳- شبیه‌سازی و نتایج حاصل از بکارگیری ساختار پیشنهادی.....۵۰
۳-۴-۱- مثال اول ۵۱

۳-۴-۲- مثال دوم ۶۱

فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۷۱

پیوست ۷۳

۱- روش‌های بهینه‌سازی تصادفی ۷۳

۲- بدست‌آوردن معیار پایداری نایکوئیست از مکان هندسی ریشه‌ها ۷۶

مقالات ارائه شده ۷۸

فهرست مراجع ۷۹

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: ساختار یک درجه آزادی..... ۸
شکل ۲-۲: ساختار دو درجه آزادی..... ۹
شکل ۲-۳: محدودیت قطب‌های سیستم حلقه بسته با تعریف ضریب میرایی می‌نیمم..... ۱۲
شکل ۲-۴: افزایش محدوده نامعینی در فرکانس‌های بالا به منظور برآوردن شرایط عملی..... ۱۴
شکل ۲-۵: وضعیت معمول در سیستم‌های کنترلی..... ۱۶
شکل ۲-۶: تاثیر نویز اندازه‌گیری در ورودی سیستم تحت کنترل..... ۱۶
شکل ۲-۷: مسیر نایکوئیست..... ۲۰
شکل ۲-۸: مسیر اصلاح شده نایکوئیست..... ۲۱
شکل ۲-۹: انواع باندهای فرکانسی در QFT..... ۲۳
شکل ۲-۱۰: منحنی نایکوئیست سیستم ناپایدار..... ۲۷
شکل ۲-۱۱: نمایش محدودیت سیستم‌های غیرمی‌نیمم فاز بر اساس باندهای فرکانسی مرکب جابجاشده..... ۳۳
شکل ۳-۱: مسیر نایکوئیست تصحیح شده برای تابع تبدیل مرتبه گویا..... ۴۵
شکل ۴-۱: مقایسه کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (نمودار خط‌چین) و کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (نمودار توپر) (مثال اول)..... ۵۲
شکل ۴-۲: حاشیه پایداری سیستم حلقه بسته نامعین از مرتبه صحیح (مثال اول)..... ۵۳
شکل ۴-۳: حاشیه پایداری سیستم حلقه بسته نامعین از مرتبه کسری (مثال اول)..... ۵۳
شکل ۴-۴: نمودار بودی سیستم نامعین از مرتبه صحیح که در محدوده فرکانسی مورد نظر که با نقطه‌چین نشان داده شده است قرار گرفته‌است (مثال اول)..... ۵۴
شکل ۴-۵: نمودار بودی سیستم نامعین از مرتبه کسری که در محدوده فرکانسی مورد نظر که با نقطه‌چین نشان داده شده است قرار گرفته‌است (مثال اول)..... ۵۵
شکل ۴-۶: سیستم نامی حلقه باز از مرتبه کسری (نمودار نقطه‌چین) و نمودار سیستم نامی حلقه باز از مرتبه صحیح (نمودار توپر) (مثال اول)..... ۵۶

شکل ۴-۷ نمودار بودی کنترل‌کننده از مرتبه کسری (نمودار توپر) و نمودار بودی کنترل‌کننده تقریبی با پیچیدگی بالا(نمودار نقطه‌چین) (مثال اول)..... ۵۷
شکل ۴-۸: سیگنال کنترلی کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (ورودی پله) (مثال اول)..... ۵۸
شکل ۴-۹: پاسخ پله کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (مثال اول)..... ۵۸
شکل ۴-۱۰: سیگنال کنترلی کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (ورودی پله) (مثال اول)..... ۵۹
شکل ۴-۱۱: پاسخ پله کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (مثال اول)..... ۵۹
شکل ۴-۱۲ سیگنال کنترلی کنترل‌کننده تقریبی (ورودی پله) (مثال اول)..... ۶۰
شکل ۴-۱۳: پاسخ پله کنترل‌کننده تقریبی (مثال اول)..... ۶۰
شکل ۴-۱۴: مقایسه کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (نمودار خط‌چین) و کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (نمودار توپر) (مثال دوم)..... ۶۲
شکل ۴-۱۵: حاشیه پایداری سیستم حلقه بسته نامعین از مرتبه صحیح (مثال دوم)..... ۶۳
شکل ۴-۱۶: حاشیه پایداری سیستم حلقه بسته نامعین از مرتبه کسری (مثال دوم)..... ۶۳
شکل ۴-۱۷: نمودار بودی سیستم نامعین از مرتبه صحیح که در محدوده فرکانسی مورد نظر که با نقطه‌چین نشان داده شده است قرار گرفته‌است (مثال دوم)..... ۶۴
شکل ۴-۱۸: نمودار بودی سیستم نامعین از مرتبه کسری که در محدوده فرکانسی مورد نظر که با نقطه‌چین نشان داده شده است قرار گرفته‌است (مثال دوم)..... ۶۵
شکل ۴-۱۹: سیستم نامی حلقه باز از مرتبه کسری (نمودار نقطه‌چین) و نمودار سیستم نامی حلقه باز از مرتبه صحیح (نمودار توپر) (مثال دوم)..... ۶۶
شکل ۴-۲۰ نمودار بودی کنترل‌کننده از مرتبه کسری (نمودار توپر) و نمودار بودی کنترل‌کننده تقریبی باپیچیدگی بالا(نمودار نقطه‌چین) (مثال دوم)..... ۶۷
شکل ۴-۲۱: سیگنال کنترلی کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (ورودی پله) (مثال دوم)..... ۶۸
شکل ۴-۲۲: پاسخ پله کنترل‌کننده بهینه از مرتبه صحیح (مثال دوم)..... ۶۸
شکل ۴-۲۳: سیگنال کنترلی کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (ورودی پله) (مثال دوم)..... ۶۹
شکل ۴-۲۴: پاسخ پله کنترل‌کننده بهینه از مرتبه کسری (مثال دوم)..... ۶۹
شکل ۴-۲۵ سیگنال کنترلی کنترل‌کننده تقریبی (ورودی پله) (مثال دوم)..... ۷۰
شکل ۴-۲۶: پاسخ پله کنترل‌کننده تقریبی (مثال دوم)..... ۷۰

شکل پ-۱ ارتباط مکان هندسی ریشه‌ها با منحنی نایکوئیست.....۸۳
شکل پ-۲ ارتباط منحنی نایکوئیست با منحنی در نمودار نیکولز.....۸۳

فصل اول

مقدمه

یکی از مسائل مهم در مهندسی‌کنترل، شناسایی سیستم‌ها و مدل‌سازی آنها است. در سیستم‌ها دینامیک‌هایی وجود دارند که برای مدل‌سازی آنها نیاز به هزینه بالا و بکارگیری روش‌هایی است که مقرون به صرفه نبوده و می‌تواند بسیار وقت‌گیر باشد. همچنین با پیچیده‌کردن مدل سیستم نمی‌توان بطور کامل دینامیک‌های سیستم را مدل‌سازی‌کرد و همیشه عدم آگاهی وجود دارد. در واقع می‌توان گفت یکی از مسائل مهم در مهندسی کنترل عدم آگاهی از برخی از دینامیک‌های سیستم تحت کنترل است. بنابراین در طراحی کنترل‌کننده باید تمهیداتی برای لحاظ‌کردن نامعینی و دستیابی به پاسخ مطلوب و بهینه در حضور آن اندیشیده شود.

روش‌های طراحی که نامعینی سیستم تحت کنترل را درنظرمی‌گیرند اصطلاحاً روش‌های طراحی مقاوم نامیده‌می‌شوند و درطراحی سیستم‌های عملی پیچیده بسیار مورد توجه هستند. از مهمترین روش‌های کنترل مقاوم می‌توان به نظریه‌ی H_∞، سنتز μ[1] و نظریه فیدبک کمّی[2] (QFT) اشاره‌کرد.

روش طراحی H_∞ برای اولین بار توسط زیمس[3] در اوایل دهه‌ی ۶۰ مطرح شد. در این روش، با در نظرگرفتن یک کران بالا برای نامعینی سیستم در حوزه‌ی فرکانس، کنترل‌کننده بگونه‌ای طراحی می‌شود که به ازای بدترین حالت نامعینی دستیابی به پاسخ بهینه را ممکن سازد. در این روش نامعینی سیستم به صورت غیرساختاریافته[4] مدل می‌شود. روش طراحی سنتز μ برای اولین بار توسط دویل[5] دراوایل دهه‌ی ۸۰ مطرح شده‌است و حالت خاصی از نظریه‌ی H_∞ است که برای انحرافات و نامعینی‌های ساختاریافته[6] گسترش یافته‌است. چهارچوب محکم ریاضی از مزایای مهم این دو روش طراحی محسوب می‌شود.

---

[1] μ Synthesis
[2] Quantitative Feedback Theory
[3] Zames
[4] Unstructured uncertainty
[5] Doyle
[6] Structured uncertainty

در این پایان‌نامه نظریه فیدبک کمّی مورد بررسی و استفاده قرارگرفته‌است. در سال ۱۹۶۰ براساس کارهایی که بود[۱] انجام داده بود[۱]، اسحاق هروویتز[۲] یک روش طراحی فرکانسی پیشنهاد کرد که در سال‌های بعد یعنی در سال ۱۹۷۰به شکل کنونی خود که نظریه‌ی فیدبک کمّی نامیده می‌شودتصحیح شد [۱۳]. این روش یک روش طراحی عملی و کاربردی مهندسی است که در سیستم‌های کنترلی بکار برده می‌شود.

در طراحی سیستم‌های کنترلی واقعی مهمترین مسئله‌ای که باید در نظر داشت دستیابی به مشخصه‌های عملکرد در حضور نامعینی سیستم تحت کنترل و اغتشاشات (که می‌توان آنرا بعنوان نامعینی بیرونی در نظرگرفت) است. درQFT مهمترین هدف طراحی کنترل‌کننده‌ای است که مشخصه‌های عملکرد مزبور را برآورده کرده با این وجود از نظر ساختاری ساده ، از درجه پایین[۳] و با حداقل باند عبور[۴] باشد. در عمل می‌نیمم بودن باند عبور کنترل‌کننده بدلیل این است که از مشکلاتی مانند تقویت نویز[۵] و دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالا[۶] اجتناب شود.

شکل‌دهی بهره حلقه باز یکی از مهمترین مراحل طراحی است. هر چند این مرحله بطور دستی انجام می‌شود و به تجربه و مهارت طراح بستگی دارد ولی استفاده از محیط نرم افزاری و جعبه ابزارQFT طراحی بطور دستی را سهل‌تر کرده است [۲].

در بیشتر طراحی‌های واقعی تکرار[۷] طراحی به منظور رسیدن به هدف مورد نظر اجتناب‌ناپذیر است.QFT این امکان را فراهم می‌کند که در طی تکرار طراحی، دید درست و روشنی از موازنه[۸] بین پیچیدگی کنترل‌کننده و برآورده شدن مشخصات عملکرد حاصل شود. می‌توانQFT را صورت بسط داده شده روش‌های کلاسیک طراحی در حوزه فرکانسی بشمارآورد.

برای سیستم‌های نامعینی که ناپایدار و (یا) غیرمی‌نیمم فاز هستند طراحی کنترل‌کننده بطور دستی برای برآورده شدن پایداری و مشخصات عملکرد کار دشواری است بنابراین الگوریتم‌های

---

۱ Bode
۲ Isaac Horowitz
۳ Low order controller
۴ Minimum bandwidth
۵ Noise amplification
۶ Unmodeled high frequency dynamics
۷ Iteration
۸ Trade-off

شکل‌دهی خودکار[۱] مخصوصاً در دو دهه اخیر بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از نخستین روش‌های شکل‌دهی خودکار سیستم حلقه باز که توسط هروویتز و گرا[۲] گسترش داده شده است [۱۲]، از انتگرال فاز و بهره بودی برای شکل‌دهی بهره حلقه باز با یک شیوه تکراری استفاده می‌کند. روش دیگری که در این زمینه می‌توان به آن اشاره کرد استفاده از برنامه‌نویسی غیرخطی است [۲۴]. الگوریتم‌های تصادفی که در این پایان‌نامه بکارگرفته شده است، شیوه دیگری است که از آن در بدست آوردن کنترل‌کننده بهینه استفاده می‌شود [۸ و ۱۰].

QFT بر این مهم تاکید دارد که فیدبک زمانی بکاربرده می‌شود که سیستم تحت کنترل نامعین است و (یا) ورودی نامعین دیگری وجود دارد که بر روی سیستم تحت کنترل اعمال می‌شود. ویژگی‌های خاصی که می‌توان در مورد QFT به آنها اشاره کرد عبارتند از :

- مقدار فیدبک به مقدار نامعینی سیستم تحت کنترل، مقدار نامعینی اغتشاش اعمال شده و مشخصات عملکرد سیستم مرتبط است. با افزایش نامعینی و سخت‌گیرانه‌تر شدن مشخصات عملکرد سیستم، مقدار فیدبکی که مورد نیاز است نیز افزایش پیدا می‌کند.
- موازنه در حین طراحی در هر فرکانسی بین پایداری، مشخصه عملکرد و نامعینی و پیچیدگی و باند عبور کنترل‌کننده در حد بالایی شفاف است.

این روش طراحی فرکانسی برای انواع مختلف از مسائل عملی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، مناسب است. QFT در ابتدا برای سیستم نامعین LTI که شامل یک حلقه کنترلی است، بیان شده است. در مراحل بعدی این روش به سیستم‌هایی که دارای چند حلقه‌ی کنترلی و سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی[۳] گسترش داده شده است.

سیستم‌های زیادی وجود دارند که دارای دینامیک‌های پیچیده هستند که مدل‌سازی تحلیلی آنها را دشوار می‌کند. در مورد این سیستم‌ها تنها دانستن مجموعه پاسخ فرکانسی کفایت می‌کند تا با روش QFT بتوان فرآیند طراحی کنترل‌کننده را انجام داد بدون آنکه نیازی به تابع تحلیل سیستم باشد.

---

[۱] Automatic loop shaping algorithm
[۲] Gera
[۳] Multi Input Multi Output(MIMO)

در مورد سیستم‌های غیرخطی و (یا) تغییرپذیر با زمان با روشی که توسط هروویتز ارائه داده شده است سیستم مزبور با مجموعه‌ای از سیستم‌های خطی و تغییرناپذیر با زمان جایگزین شده و عملیات طراحی کنترل‌کننده را می‌توان با موفقیت انجام داد [۱۱].

در بسیاری از مسائل طراحی چندین مشخصه عملکرد وجود دارد و آنچه که از سیستم کنترلی انتظار می‌رود برآورده کردن همزمان تمامی این مشخصات عملکرد است. در این روش هر یک از این مشخصات عملکرد تبدیل به باندهای فرکانسی می‌شود که در نهایت باند فرکانسی مرکب حاصل می‌شود که تضمینی بر برآورده شدن همزمان این مشخصات عملکرد است [۱۱و ۱۵].

مسئله مهم دیگری که در عمل اجتناب‌ناپذیر است محدودیت سخت‌افزاری است. توسط QFT می‌توان براحتی یک کنترل‌کننده خاص را به منظور مناسب‌بودن آن با شرایط و محدودیت‌های اعمال شده سخت‌افزاری، آزمایش کرد.

آنچه که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است، ساختاری است که برای کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود. ساختار مرسوم کنترل‌کننده استفاده از توابع تبدیلی است که دارای توان‌های صحیح برای متغیر مختلط s هستند. روش پیشنهادی که می‌توان برای ساختار کنترل‌کننده ارائه داد مبتنی بر یک مفهوم دیگری در ریاضیات است که حساب دیفرانسیل و انتگرال از مرتبه کسری[۱] نامیده می‌شود.

حساب‌دیفرانسیل از مرتبه کسری را می‌توان بعنوان تعمیمی از حساب‌دیفرانسیل کلاسیک دانست که در آن مرتبه مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری لزوماً صحیح نیستند. نظریه‌ی حسابان کسری برای اولین بار در سال ۱۶۹۵ مطرح شده است و به یادداشت‌های لایبنیز[۲] و بحث‌های وی با هوپیتال[۳] برمی‌گردد که در آن مشتق‌گیری از مرتبه ۱/۲ مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳].

برای سه قرن نظریه‌ی حسابان کسری اساساً در حوزه ریاضیات محض بوده است، با این وجود در چند دهه گذشته محققین پی برده‌اند که مشتق و انتگرال از مرتبه کسری در توصیف مشخصات گوناگون سیستم‌ها در زمینه‌های مختلف بسیار مناسب است و نشان داده شده‌است که مدل‌سازی‌های کسری مناسب‌تر و موثرتر از مدلسازی‌های مرسوم هستند [۱۷].

---

[۱] Fractional calculus
[۲] Leibniz
[۳] L' Hospital

درجه‌آزادی بیشتر و انعطافی که ساختار از مرتبه‌کسری داراست را می‌توان در طراحی کنترل‌کننده بکاربرد تا با توجه به اینکه ساختار با پارامترهای کمتری ارائه می‌دهد، در مسائلی که با بهینه سازی مرتبط است سیستم را به نقطه بهینه، بیشتر نزدیک کند [۱۸]. به منظور استفاده بهینه از توانایی کنترل‌کننده‌های کسری سعی شده‌است تا ساختار از مرتبه کسری پیشنهادی در این پایان‌نامه با ساختارهای از مرتبه کسری مختلف دیگر مقایسه شود [۳، ۱۹، ۲۰ و۲۱]. کنترل‌کننده‌های بهینه از مرتبه کسری با کنترل‌کننده‌های بهینه از مرتبه صحیح مقایسه شده‌اند تا مزیت آنها در ساختار با پارامترهای کمتر و نزدیکی بیشتر به نقطه بهینه نشان داده شود.

از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنیتکی[۱] که یکی از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی[۲] است استفاده شده است که توضیح جامعی از این روش در ضمیمه۱موجود است.

فصل‌بندی و ترتیب ارائه‌ی مطالب این پایان‌نامه به شرح زیر است:

در فصل دوم، به بررسی نظریه‌ی فیدبک کمّی پرداخته شده‌است و ساختارهای مختلف طراحی مورد اشاره قرارگرفته‌اند. نحوه نمایش نامعینی سیستم تحت کنترل که همان نگاره‌ها هستند عنوان شده‌است. در ادامه مشخصات عملکردی مهمی که درQFT مطرح هستند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل‌دهی سیستم حلقه باز نامی که یکی از مهمترین مراحل طراحی است تحلیل شده و طراحی پیش‌فیلتر برای دستیابی به پاسخ فرکانسی مطلوب بیان شده‌است. بهینگی در این روش طراحی و تابع هزینه مناسب ارائه شده و محدودیت‌هایی که در سیستم‌های نامعین غیرمی‌نیمم فاز و ناپایدار وجود دارد بررسی شده‌است.

در فصل سوم، حسابان کسری که بعنوان تعمیمی از حساب‌دیفرانسیل معمولی است، مورد بررسی قرار گرفته‌است. چندین نوع مختلف مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری معرفی شده و تبدیل‌لاپلاس آنها بیان شده‌است. معادلات دیفرانسیلی که از مفهوم حسابان‌کسری برای نمایش دینامیک سیستم‌های مختلف بکار برده‌می‌شود، معرفی‌شده‌است و توابع تبدیل کسری بدست آورده شده‌است. روش‌های تقریب توابع تبدیل از مرتبه کسری بررسی شده و همچنین از تبدیل لاپلاس برای حل معادلات دیفرانسیل از مرتبه کسری استفاده شده‌است. در انتها پایداری سیستم‌های مرتبه کسری بررسی شده‌است.

---

[۱] Genetic algorithm
[۲] Random optimization

در فصل چهارم، کنترل‌کننده‌هایی که با روش QFT طراحی می‌شوند و دارای ساختاری از مرتبه کسری هستند معرفی شده و همچنین ساختارهای مختلف دیگر با ساختار پیشنهادی کسری مقایسه شده‌اند. توانایی و انعطاف‌کنترل‌کننده از مرتبه کسری مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای بدست آوردن دید بهتر در زمینه فوائد بکارگیری کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری، شبیه‌سازی برای سیستم‌های نامعین می‌نیمم فاز و غیرمی‌نیمم فاز انجام شده و ساختار کسری پیشنهادی با ساختار مرتبه صحیح مقایسه شده‌اند.