۹۶۲۵۵

دانشگاه مازندران
مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی

کنترل موتور القایی به روش مدلغزشی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی برق- گرایش قدرت

واحد اطلاعات و مدارک علمی

استاد راهنما:
دکتر ابوالفضل رنجبر نوعی

۱۳۸۷/۱۶/۲۵

نگارش:
میثم اقتداری بروجنی

۱۳۸۷

۹۶۲۵۵

باسمه تعالی

دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل

تحصیلات تکمیلی

ارزشیابی پایان نامه در جلسه دفاعیه

نام و نام خانوادگی دانشجو: میثم اقتداری بروجنی — شماره دانشجوئی: ۸۴۵۱۳۶۱۰۰۳

رشته تحصیلی: مهندسی برق – قدرت — مقطع: کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه:

«کنترل موتور القایی به روش مد لغزشی»

تاریخ دفاع: ۸۷/۳/۲۶

نمره پایان نامه (به عدد): ۱۹٫۵

نمره پایان نامه (به حروف): نوزده ونیم

هیات داوران:

استاد راهنما: دکتر ابوالفضل رنجبر نوعی

استاد مشاور: دکتر عبدالحسین طحانی

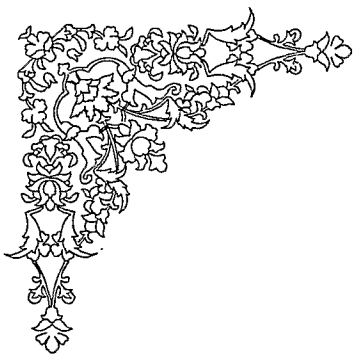
استاد مشاور: مهندس شعبانعلی گل

استاد مدعو: دکتر عبدالرضا شیخ الاسلامی

استاد مدعو: دکتر سعید لسان

نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی: دکتر محمد میرزائی

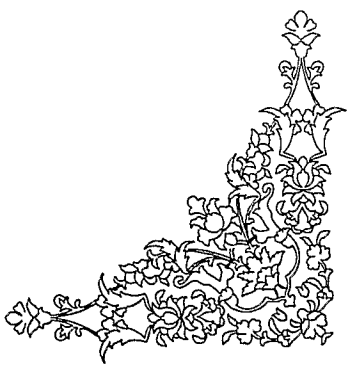
امضا
امضا
امضا
امضا
امضا



تقدیم به

پدر و مادر

ارجمندم



قدردانی

حمد و سپاس شایسته پروردگاریست که بشر را قدرت تفکر و تحصیل علم بخشید.

اینک که در سایه پرتو الطاف و عنایات خداوند سبحان، موفق به انجام پروژه پایان دوره شده‌ام، بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌شائبه جناب آقای دکتر رنجبر که استاد راهنما و مشوق من در انجام پایان‌نامه بوده‌اند و همچنین افتخار کسب فیض در محضر درس ایشان را داشته‌ام، و نیز اساتید مشاور آقای دکتر طحانی و آقای مهندس گل، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. از خداوند سبحان، سلامتی و موفقیت روزافزون ایشان، در راه خدمت به جامعه علمی ایران را خواهانم.

چکیده

یکی از مهمترین چالش‌ها در استفاده از موتورهای القایی عملکرد ضعیف آن‌ها در کاربردهای با سرعت پایین است. در این شرایط تغییر پارامترهای داخلی موتور مانند تغییر مقاومت‌ها و ثابت زمانی رتور تأثیرات نامطلوبی بر پاسخ خروجی سرعت موتور داشته و کنترل این موتورها را در محدوده وسیعی از تغییرات فرمان سرعت غیرممکن ساخته است. یکی از بهترین پیشنهاداتی که برای غلبه بر این مشکل می‌توان مطرح نمود، استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی بجای کنترل‌کننده مرسوم PI در ساختار کنترلی است. کنترل‌کننده مد لغزشی، از نوع کنترل‌کننده‌های غیرخطی می‌باشد که نسبت به تغییر شرایط و پارامترهای سیستم کنترلی مقاومت بسیار خوبی داشته و امکان کاربرد موتور القایی در سرعت‌های پایین را فراهم می‌سازد.

در این پایان‌نامه از کنترل‌کننده مد لغزشی بجای کنترل‌کننده مرسوم تناسبی- انتگرالی در ساختار روش کنترل برداری استفاده شده است. در ابتدا، کنترل‌کننده مد لغزشی طراحی شده و سپس تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته و سپس عملکرد آن در شرایط تغییر گشتاور بار در شرایطی که از پدیده اشباع مغناطیسی صرفنظر شده و همچنین در شرایطی که این پدیده در نظر گرفته شده است مورد بررسی قرار گرفته و در تمامی موارد نتایج حاصل از شبیه‌سازی با شبیه‌سازی‌هایی که در آن‌ها از کنترل‌کننده PI استفاده شده است، مقایسه شده و مزیت بکارگیری کنترل‌کننده مد لغزشی نشان داده شده است. در نهایت، عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی با کنترل‌کننده PI در سرعت‌های پایین مقایسه شده و این برتری به وضوح در شبیه‌سازی‌هایی که گشتاور بار، مقاومت استاتور و مقاومت رتور تغییر داده شده‌اند، بخصوص در شرایطی که پدیده اشباع مغناطیسی درنظر گرفته شده، نشان داده شده است.

سپس به عنوان یک پیشنهاد، از تئوری مد لغزشی به منظور طراحی رویتگر استفاده شده و جریان استاتوری که بدین شکل تخمین زده شده است در شرایط تغییر گشتاور بار مورد محک قرار گرفته و عملکرد رضایت‌بخش این رویتگر مورد تصدیق قرار گرفته است.

فهرست مطالب

چکیده I

فهرست مطالب III

فهرست شکل‌ها V

فهرست جداول VII

فصل۱- آشنایی با کنترل مد لغزشی ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- چرا کنترل غیرخطی ۲

۱-۲-۱- بهبود سیستم‌های کنترلی موجود ۲

۱-۲-۲- تحلیل غیرخطی‌های شدید ۳

۱-۲-۳- رفتار با عدم قطعیت‌ها ۳

۱-۲-۴- سادگی طراحی ۴

۱-۳- سیستم‌های خطی ۴

۱-۴- تحلیل سیستم‌های غیرخطی ۵

۱-۴-۱- تحلیل صفحه فاز ۶

۱-۴-۲- تئوری لیپانوف ۶

۱-۴-۳- توابع توصیفی ۷

۱-۴-۴- تحلیل ریاضی ۸

۱-۵- کنترل مد لغزشی ۸

۱-۶- اساس تئوری مد لغزشی ۱۲

۱-۶-۱- شرط وجود ۱۳

۱-۶-۲- شرط برخورد ۱۴

۱-۶-۳- شرط پایداری ۱۴

۱-۷- کاربرد کنترل مد لغزشی در کنترل موتور القایی ۱۵

فصل۲- معرفی کنترل برداری موتور القایی ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۹

۲-۲- اصول عملکرد ۱۹

۲-۳- تبدیل چارچوب مرجع ۲۰

۲-۴- کنترل سرعت ۲۳

۲-۴-۱- کنترل "ولتاژ به فرکانس" ثابت ۲۳

۲-۴-۲- کنترل سرعت در لغزش ثابت ۲۴
۲-۴-۳- کنترل میدان‌گرا ۲۵
۲-۵- درایو موتور القایی کنترل برداری شده ۲۶
۲-۵-۱- اصول کنترل میدان‌گرا ۲۸
۲-۵-۲- کنترل میدان‌گرای مستقیم (DFOC) ۲۹
۲-۵-۳- کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم (IFOC) ۳۰

فصل۳- بکارگیری کنترل‌کننده مد لغزشی ۳۱

۳-۱- مقدمه ۳۲
۳-۲- طراحی کنترل‌کننده ۳۳
۳-۳- قانون کنترل مد لغزشی و انتخاب خط لغزش ۳۵
۳-۴- بهبود کنترل‌کننده مد لغزشی ۳۶
۳-۵- تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده ۳۷
۳-۶- مقاومت در برابر تغییرات بار ۳۸
۳-۷- عملکرد در سرعت‌های پایین ۴۰
۳-۷-۱- تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده ۴۱
۳-۷-۲- مقاومت در برابر تغییرات بار ۴۳
۳-۷-۳- مقاومت در برابر دو برابر شدن مقاومت‌های استاتور و رتور ۴۶

فصل۴- طراحی رویتگر جریان ۵۰

۴-۱- مقدمه ۵۱
۴-۲- مدل موتور القایی بکار رفته به منظور طراحی رویتگر جریان ۵۱
۴-۳- طراحی رویتگر جریان برای مدل مطرح شده ۵۲
۴-۴- بررسی تأثیر پارامترهای رویتگر بر عملکرد آن ۵۶
۴-۵- عملکرد رویتگر در شرایط تغییر بار ۵۹

فصل۵- طراحی رویتگر جریان ۶۱

۵-۱- نتیجه‌گیری ۶۲
۵-۲- پیشنهاد ۶۳

منابع و مراجع ۶۴

واژگان انگلیسی به فارسی ۶۶

واژگان فارسی به انگلیسی ۶۹

ABSTRACT ۷۲

شکل(۴-۳): تأثیر پارامتر m بر مؤلفه محور طولی جریان؛ (ـــ : جریان واقعی) (ـ ـ ـ : $m = ۰/۰۵$) (..... : $m = ۰/۱۲$) (ـ ـ ـ ـ : $m = ۰/۱۵$) (ـــ : $m = inf$ (تابع لغزش دومقداره)) ۵۷

شکل(۴-۴): تأثیر پارامتر m بر مؤلفه محور عرضی جریان؛ (ـــ : جریان واقعی) (ـ ـ ـ : $m = ۰/۰۵$) (..... : $m = ۰/۱۲$) (ـ ـ ـ ـ : $m = ۰/۱۵$) (ـــ : $m = inf$ (تابع لغزش دومقداره)) ۵۸

شکل(۴-۵): مؤلفه محور طولی جریان؛ (..... : جریان واقعی) (ـــ : جریان تخمین‌زده شده) ۵۸

شکل(۴-۶): مؤلفه محور عرضی جریان؛ (..... : جریان واقعی) (ـــ : جریان تخمین‌زده شده) ۵۹

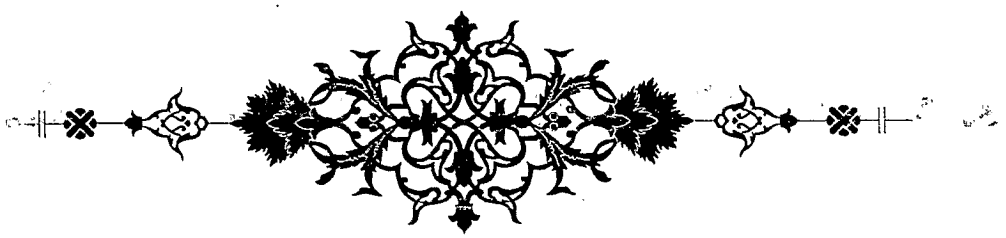
شکل(۴-۷): قابلیت تخمین مؤلفه محور طولی جریان در شرایط افزایش گشتاور بار؛ (..... : جریان واقعی) (ـــ : جریان تخمین‌زده شده) ۵۹

شکل(۴-۸): قابلیت تخمین مؤلفه محور طولی جریان در شرایط کاهش گشتاور بار؛ (..... : جریان واقعی) (ـــ : جریان تخمین‌زده شده) ۶۰

فهرست جداول

جدول ۱: پارامترهای موتور ۳۴

فصل اول



آشنایی با کنترل مدلغزشی

۱-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا با کنترل غیرخطی[۱] و دلایل استفاده روزافزون از آن آشنا شده و در ادامه اصول اولیه کنترل مد لغزشی[۲] به عنوان یکی از مهمترین روش‌های مطرح در کنترل غیرخطی تشریح شده و مفاهیم بنیادی آن تا حد امکان بصورت ساده و با کمک گرفتن از تصاویر بیان شده است.

۱-۲- چرا کنترل غیرخطی

هر چند که کنترل خطی دارای تاریخچه‌ای طولانی و روش‌های متنوعی بوده و دارای کاربردهای صنعتی موفقی نیز می‌باشد، ولی به دلایل گوناگونی مهندسین و طراحان در زمینه‌های متنوعی همچون کنترل هواپیما و فضاپیما، رباتیک، کنترل فرایندها، مهندسی پزشکی و ... علاقه شدیدی به روش‌های کنترل غیرخطی نشان داده‌اند. مهمترین این دلایل عبارتند از [۱]:

۱-۲-۱- بهبود سیستم‌های کنترلی موجود

روش‌های کنترلی خطی با تکیه بر فرض کلیدی محدوده کاری کوچک برای مدل خطی معتبر می‌باشند. هنگامی که محدوده کاری مورد نیاز بزرگ است، کنترل‌کننده خطی احتمالاً بسیار ضعیف عمل کرده و یا ناپایدار می‌شود. زیرا ویژگی‌های غیرخطی سیستم نمی‌توانند بطور مناسبی جبران شوند. اما کنترل‌کننده‌های غیرخطی قادر خواهند بود با ویژگی‌های غیرخطی و در محدوده کاری گسترده‌ای کار کنند. این مورد در مسائل کنترل حرکت روبات به خوبی قابل مشاهده است. در کنترل‌کننده خطی نیروهای غیرخطی مرتبط با حرکت بازوهای روبات نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین دقت کنترل‌کننده و همچنین سرعت عمل آن کاهش می‌یابد. درحالی که یک کنترل‌کننده غیرخطی

۱- Non-Linear Control
۲- Sliding Mode Control

که معمولاً کنترل‌کننده گشتاور می‌باشد، می‌تواند بطور کامل نیروهای غیرخطی را در حرکت روبات جبران کرده و منجر به کنترل با دقت بالایی و در یک محدوده وسیعی از عملکرد روبات گردد.

۱-۲-۲- تحلیل غیرخطی‌های شدید

فرض دیگری که در کنترل خطی انجام می‌شود این است که مدل سیستم قابل خطی سازی است. اما در سیستم‌های کنترلی، حالت‌های زیادی وجود دارد که طبیعت غیرخطی آنها اجازه تقریب‌زنی را نمی‌دهد. چون چنین حالت‌های غیرخطی مرتباً موجب رفتارهای نامطلوب همانند ناپایداری یا حلقه‌های محدودکننده نادرست می‌شوند، تأثیر آنها می‌بایست پیش‌بینی شده و بطور مناسب جبران شود.

۱-۲-۳- رفتار با عدم قطعیت‌ها

در طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی معمولاً لازم است فرض کنیم که پارامترهای سیستم به درستی شناخته شده‌اند؛ اما بسیاری از مسائل کنترلی شامل عدم قطعیت‌هایی در پارامترهای مدل هستند. این امر ممکن است ناشی از تغییرات زمانی آهسته پارامترها (مثلاً فشار هوای اطراف هواپیما در هنگام پرواز آن) و یا تغییرات ناگهانی پارامترها (مثلاً پارامترهای داخلی یک روبات هنگامی که یک شی جدیدی را بر می‌دارد) باشد. یک کنترل‌کننده خطی برمبنای مقادیر غیرصحیح یا غیرقابل استفاده از پارامترهای مدل، ممکن است تنزل عملکرد قابل توجهی از خود نشان دهد و یا حتی ناپایدار شود. حالت‌های غیرخطی عمدتاً در قسمت کنترل‌کننده یک سیستم کنترلی مطرح می‌شوند، بطوری که عدم قطعیت‌های مدل قابل تحمل شوند. دو دسته از کنترل‌کننده‌های غیرخطی برای نیل به این هدف، کنترل‌کننده‌های مقاوم و کنترل‌کننده‌های تطبیقی می‌باشند.

۱-۲-۴- سادگی طراحی

طراحی‌های خوب کنترل‌کننده‌های غیرخطی ساده‌تر و شهودی‌تر از همتاهای خطی‌شان می‌باشند. این نتیجه ظاهراً متناقض از این حقیقت نشأت می‌گیرد که طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی اغلب عمیقاً در فیزیک طرح‌ها ریشه دوانده است.

در قدیم، کاربرد روش‌های کنترل غیرخطی به دلیل دشواری محاسبات مرتبط با طراحی و تحلیل کنترل‌کننده غیرخطی بسیار محدود می‌شد. اما در سال های اخیر به خاطر پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه پردازنده‌های سریع و قدرتمند این مشکل تا حدود زیادی مرتفع شده است. بنابراین اشتیاق زیادی برای کار در این زمینه وجود دارد. زیرا از یک سو ظهور میکروپروسسورهای قدرتمند تحقق یک کنترل‌کننده غیرخطی را به موضوعی نسبتاً ساده تبدیل کرده است و از سوی دیگر تکنولوژی‌های مدرن همانند روبات‌های با سرعت و دقت بالا نیازمند سیستم‌های کنترلی با ویژگی‌های خاصی می‌باشند.

۱-۳- سیستم‌های خطی

تئوری سیستم‌های خطی ارتباط عمیقی با مطالعه سیستم‌های کنترل خطی غیروابسته به زمان (LTI[۱]) دارد.

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} \qquad (۱-۱)$$

که $\mathbf{x}$ بردار حالت و A ماتریس سیستم می‌باشد. سیستم‌های LTI دارای خصوصیات کاملاً ساده‌ای می‌باشند:

- یک سیستم خطی یک نقطه تعادل منفرد دارد اگر که ماتریس A غیرمنفرد باشد.
- نقطه تعادل پایدار است اگر همه مقادیر ویژه A دارای قسمت‌های حقیقی منفی باشند. (بدون درنظر گرفتن شرایط اولیه)

۱- Linear Time Independent

- پاسخ گذرای یک سیستم خطی از مدهای طبیعی سیستم ساخته شده است و حل عمومی می‌تواند به صورت تحلیلی انجام شود.

در حضور ورودی خارجی $\mathbf{u}(t)$، یعنی:

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u} \qquad (۲-۱)$$

پاسخ سیستم دارای خصوصیاتی جالب توجه است. مثلاً دارای خاصیت جمع آثار است؛ پایداری جانبی سیستم با رابطه (۱-۱) پایداری از نوع ورودی محدود- خروجی محدود را در حضور $\mathbf{u}$ ایجاب می‌کند؛ ورودی سینوسی منجر به خروجی سینوسی با فرکانس مشابه می‌شود.

۱-۴- تحلیل سیستم‌های غیرخطی

مطالعه تکنیک‌های تحلیل غیرخطی به چند دلیل مهم است. اولاً، تحلیل تئوری معمولاً ارزان‌ترین راه برای توصیف خصوصیات یک سیستم می‌باشد. ثانیاً، اصول شبیه‌سازی که در کنترل غیرخطی بسیار مهم است، بر مبنای تحلیل تئوری استوار است. شبیه‌سازی کور سیستم‌های غیرخطی منجر به نتایج ضعیف و یا حتی گمراه‌کننده می‌شود. ثالثاً، طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی همیشه بر مبنای تکنیک‌های تحلیلی است. چون روش‌های طراحی اغلب بر مبنای روش‌های تحلیلی هستند، تقریباً غیرممکن است که بتوانیم بدون مطالعه ابزار تحلیل بر روش‌های طراحی تسلط پیدا کنیم.

هیچ روش قابل اعتماد جامعی برای تحلیل همه سیستم‌های غیرخطی وجود ندارد. در کنترل خطی، سیستم را می‌توان در حوزه زمان و یا فرکانس تحلیل نمود. ولی در سیستم‌های کنترلی غیرخطی، هیچ یک از این روش‌های استاندارد قابل استفاده نمی‌باشند؛ زیرا حل مستقیم معادلات غیرخطی در حالت کلی غیرممکن است و تبدیلات حوزه فرکانس نیز معتبر نمی‌باشند. چون تحلیل سیستم‌های غیرخطی مشکل است، تلاش‌های بسیاری انجام شده و روش‌های مختلفی برای تحلیل سیستم‌های کنترل غیرخطی پیشنهاد شده است [۱].

۱-۴-۱- تحلیل صفحه فاز

تحلیل صفحه فاز روشی گرافیکی برای مطالعه سیستم‌های غیرخطی مرتبه دوم می‌باشد. ایده اصلی آن حل یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم بصورت گرافیکی، بجای جستجوی حل تحلیلی می‌باشد. نتیجه حاصله، یک خانواده از مسیرهای حرکت سیستم روی یک صفحه دوبعدی، که صفحه فاز[۱]، نامیده می‌شود، می‌باشد. این امر به ما این امکان را می‌دهد که بطور بصری الگوی حرکت سیستم را ملاحظه نماییم. هرچند که این روش دارای مزایای بسیاری است، ولیکن متأسفانه تنها برای سیستم‌هایی قابل اعمال است که امکان تقریب‌زنی آنها با دینامیک مرتبه دوم وجود داشته باشد. به‌هرحال، به خاطر طبیعت گرافیکی آن، کراراً برای ارائه دید بصری پیرامون اثرات غیرخطی کاربرد دارد.

۱-۴-۲- تئوری لیپانوف

تئوری اصلی لیاپانوف شامل دو روش مستقیم و غیرمستقیم، پیشنهاد شده توسط لیاپانوف[۲]، می‌باشد. روش غیرمستقیم (روش خطی‌سازی) بیان می‌کند که خواص پایداری یک سیستم غیرخطی در مجاورت نزدیک یک نقطه تعادل، در اصل همانند تقریب‌های خطی شده آن است. از این روش برای توجیه استفاده از کنترل خطی برای سیستم‌های فیزیکی، که در اصل غیرخطی می‌باشند، استفاده می‌شود.

روش مستقیم تئوری لیاپانوف ابزاری نیرومند برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی است و عموماً منظور از تحلیل لیاپانوف نیز همین روش است. روش مستقیم، تعمیمی از مفاهیم انرژی مرتبط با یک سیستم مکانیکی می‌باشد: "حرکت یک سیستم مکانیکی پایدار است، اگر انرژی مکانیکی کل آن در همه زمان‌ها کاهش یابد." برای استفاده از این روش می‌بایست ابتدا یک تابع شبه انرژی اسکالر[۳] (تابع لیاپانوف) ساخته و سپس بررسی نماییم که آیا این تابع کاهش می‌یابد یا نه. قدرت این روش در

۱- Phase Plant
۲- Lyapunov
۳- Scalar Energy-like Function

عمومیت آن است. این روش برای همه انواع سیستم‌های کنترلی متغیر و یا نامتغیر با زمان، با دیمانسیون محدود و یا نامحدود، کاربرد دارد. محدودیت این روش در پیدا کردن تابع لیاپانوف می‌باشد، که اغلب پیدا کردن چنین تابعی برای یک سیستم داده شده مشکل است.

هرچند که روش مستقیم لیاپانوف عموماً یک روش تحلیل پایداری است، اما برای دیگر مسائل کنترل غیرخطی نیز قابل کاربرد است. یکی از کاربردهای مهم آن طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی است. روش کار بدین صورت است که بطریقی یک تابع مثبت اسکالر از متغیرهای سیستم بدست آورده و سپس با انتخاب یک قانون کنترلی این تابع را مجبور به کاهش می‌نماییم. بدین طریق یک سیستم کنترل غیرخطی طراحی شده است که پایداری را نیز تضمین می‌نماید. چنین روش طراحی برای بسیاری از مسائل پیچیده طراحی، مثلاً در روباتیک و کنترل تطبیقی[1]، برای تخمین عملکرد یک سیستم کنترلی و مطالعه مقاومت[2] کنترل‌کننده استفاده می‌شود.

۱-۴-۳- توابع توصیفی

روش توابع توصیفی یک روش تقریبی برای مطالعه سیستم‌های غیرخطی است. در این روش مؤلفه‌های غیرخطی در سیستم‌های کنترلی غیرخطی با معادل‌های خطی تقریب زده شده و از روش حوزه فرکانس برای تحلیل سیستم‌های حاصله استفاده می‌شود. این روش برخلاف روش صفحه فاز، محدود به سیستم‌های مرتبه دوم نمی‌باشد و برخلاف روش لیاپانوف که قابلیت آن برای یک سیستم خاص وابسته به موفقیت جستجو برای یافتن تابع لیاپانوف است، کاربرد آن برای سیستم‌های غیرخطی سرراست و برای برخی حالات سهل الامتحان راضی‌کننده است. این روش عموماً برای پیش‌گویی سیکل‌های محدود در سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌شود. کاربرد دیگر آن شامل پیش‌گویی تولید زیرهارمونیک[3] و تعیین پاسخ سیستم برای تحریک سینوسی است. این روش دارای مزایای خوبی نیز می‌باشد. این روش برای سیستم‌های با مرتبه پایین و یا مرتبه بالا با یک

۱- Adaptive Control
۲- Robustness
۳- Subharmonic

دستورالعمل ساده قابل استفاده است. این روش به خاطر سادگی تحلیل در حوزه فرکانس سیستم‌های خطی، از لحاظ مفهومی ساده است و از لحاظ فیزیکی جذاب می‌باشد و به طراح امکان می‌دهد تا دید فیزیکی و مهندسی‌اش را روی سیستم‌های کنترلی اعمال نماید. عیب این روش مربوط به طبیعت تقریبی بودنش و داشتن پیش‌گویی غلط و عدم جامعیت این روش برای همه سیستم‌های غیرخطی می‌باشد.

۱-۴-۴- تحلیل ریاضی

حل معادلات و تحلیل سیستم‌های غیر خطی با استفاده از روش‌های ریاضی در اغلب موارد بسیار مشکل است. روش‌های مطرح شده جدید بوده و متأسفانه تضمینی برای درستی جواب بدست آمده ندارند و نهایتاً قادرند مسئله را تنها با شرایط اولیه خاص و برای محدوده معینی از ورودی‌ها حل نمایند. مهمترین این روش‌ها عبارتند از:

- روش آشفتگی هموتپی[۱]
- روش تحلیل هموتپی[۲]
- روش تکرار متغیر[۳]
- روش تجزیه آدمیان[۴]
- روش تابع نمایی[۵]

۱-۵- کنترل مد لغزشی

به دلیل عدم دقت در پارامترها یا دینامیک مدل نشده سیستم، نیازمند کنترل‌کننده‌ای می‌باشیم که نسبت به این عدم دقت‌ها مقاوم باشد. یک روش ساده برای کنترل مقاوم روشی موسوم به کنترل مد

۱- Homotopy Perturbation Method (HPM)
۲- Homotopy Analysis Method (HAM)
۳- Variational Iteration Method (VIM)
۴- Adomian's Decomposition Method (ADM)
۵- Exp-function Method

لغزشی است. کنترل مد لغزشی یک تکنیک کنترلی بر مبنای ساختار متغیر (VSS[1]) می‌باشد. یعنی سیستم‌هایی که به منظور بهبود رفتار سیستم، توپولوژی[2] سیستم به پیروی از قانون معینی بطور هوشمند تغییر می‌کند. یک VSS، برمبنای تعداد تعریف شده‌ای از توپولوژی‌های مستقل که با حالت‌های عناصر غیرخطی تعریف می‌شوند، می‌باشد. ولی دینامیک کلی سیستم، در واقع متفاوت از هر یک از توپولوژی‌ها به تنهایی است. تئوری VSS دستورالعملی سیستماتیک برای تحلیل این سیستم‌ها و برای انتخاب و طراحی قوانین کنترلی فراهم می‌کند. برای معرفی کنترل مد لغزشی، یک مثال ساده از سیستم مرتبه دوم تحلیل می‌شود. دو زیرساختار متفاوت معرفی شده و یک عمل ترکیبی که مد لغزشی را ارائه می‌نماید، معرفی می‌شود.

اولین زیرساختار با معادلات زیر داده می‌شود [۲]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -Kx_1 \end{cases} \qquad (۱-۳)$$

که مقادیر ویژه[3] اعدادی مختلط با قسمت حقیقی صفر می‌باشند؛ پس برای این زیرساختار، همان گونه که در شکل(۱-۱-الف) نشان داده شده است، مسیرهای فاز بصورت دایره‌هایی متحدالمرکزند و سیستم بصورت مرزی[4] پایدار است. دومین زیرساختار را با معادلات زیر تعریف می‌نماییم:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = +Kx_1 \end{cases} \qquad (۱-۴)$$

در این حالت مقادیر ویژه، حقیقی و با علامت مثبت هستند؛ مسیرهای فاز حاصله در شکل(۱-۱-ب) نشان داده شده‌اند و سیستم ناپایدار است. تنها یک مسیر فاز با نام $x_2 = -qx_1$ $(q = \sqrt{K})$ به مبدا همگراست؛ درحالی که سایر مسیرها واگرا می‌باشند.

۱- Variable Structure Systems
۲- Topology
۳- Eigen-values
٤- Marginally