

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

مدلسازی و کنترل فازی مقاوم برای پایداری

سکوی سه درجه آزادی

نگارنده :

شهرام نجفی

استاد راهنما :

دکتر محمد حداد ظریف

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای شهرام نجفی

تحت عنوان:

مدلسازی و کنترل فازی مقاوم برای پایدارسازی سکوی سه درجه آزادی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	

اساتید داور	امضاء	نمایندگی تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	
نام و نام خانوادگی:			
نام و نام خانوادگی:			
نام و نام خانوادگی:			

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که رسم زندگی به من آموختند

برادر و خواهران مهربانم که در تمام مراحل زندگی مشوقم بوده‌اند.

سپاس گزاری:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد محترم جناب آقای دکتر محمد حداد ظریف که در تمام مراحل پایان نامه مرا یاری نمودند و از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند کمال تقدیر و تشکر را دارم.

همچنین از جناب آقای دکتر علی اکبر زاده کلات و جناب آقای دکتر امیر حسین نایبی آستانه به دلیل قبول زحمت بازخوانی و داوری این پژوهش، کمال قدردانی را دارم.

در پایان از همه دوستانی که مرا از یاری و کمک بی دریغ خویش بهره مند ساختند، به ویژه آقای مهندس مهدی دری، دکتر آصف درویشی، مهندس معین نادری، مهندس مهدی عزتی نسب، مهندس افشین افراز، مهندس منصور طیبی فر، و سرکار خانم رویا سبزی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **شهرام نجفی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی و کنترل فازی مقاوم برای پایدارسازی سکوی سه درجه آزادی تحت راهنمایی **دکتر محمد حداد ظریف** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضای دانشجو :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در

چکیده:

در این پایان نامه روش کنترل فازی مقاوم برای یک صفحه پایدار ژيروسکوپ سه محوره ارائه شده است. این صفحه پایدار تحت تأثیر اغتشاشات اعمالی به پایه حامل خود قرار دارد. روش کنترل فازی مقاوم به دلیل عملکرد ردیابی مقاوم، تضمین پایداری و پاسخ با دقت بالا مطرح شده است. کنترل کننده فازی یک کنترل کننده مؤثر برای کنترل عدم قطعیت در سیستم های غیرخطی است. در بخش اول به مدلسازی و ارائه معادلات حرکت پایدارکننده با در نظر گرفتن ژيروسکوپ های مکانیکی و غیرمکانیکی پرداخته شده است. در بخش بعد کنترل کننده PID ارائه شده است. در ادامه برای اطمینان از دستیابی به ردگیری و حذف اغتشاشات، به مقایسه کنترل کننده فازی مقاوم ارائه شده با کنترل کننده PID پرداخته شده است. این تحقیق به بررسی پایداری سیستم کنترل می پردازد و درستی روش کنترل با تحلیل پایداری و نتایج شبیه سازی تأیید می گردد.

کلمات کلیدی: پایدار کننده ژيروسکوپ، صفحات پایدار، کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی، کنترل فازی مقاوم، عدم قطعیت.

فهرست مطالب:

فصل اول	۱
1-1: مقدمه:	۲
۱-۲: دسته بندی پایدار کننده های ژيروسکوپی	۶
1-2-1: دسته بندی بر اساس تعداد درجات آزادی	۶
1-2-2: دسته بندی بر اساس نوع پایدارسازی	۸
۱-۳: موارد استفاده پایدارکننده ها	۱۰
۱-۴: مرور مراجع و کارهای انجام شده	۱۲
فصل دوم:	۱۵
۲-۱: سیستم های مختصات و روابط سینماتیکی:	۱۶
۲-۱-۱: سینماتیک پلتفرم:	۱۷
۲-۲: معادلات حرکت غیرخطی پایدار کننده ژيروسکوپی سه محوه:	۱۸
۲-۳: معادلات وضعیت سیستم قابها با وجود حرکت پایه:	۱۹
۲-۴: معادلات حرکت سیستم پایدار کننده سه محوره :	۲۰
۲-۴-۱: معادلات محور خروجی جايروها:	۲۰
۲-۴-۲: گشتاور عکس العملی جايرو به پلتفرم:	۲۱
۲-۵: معادلات دینامیکی قابهای پایدار کننده سه محوره:	۲۳
۲-۵-۱: معادلات حرکت پلتفرم:	۲۳
۲-۵-۲: معادلات حرکت قاب داخلی:	۲۴
۲-۵-۳: معادلات حرکت قاب خارجی	۲۶

فصل سوم	۲۷
۱-۳: مقدمه:	۲۸
۲-۳: طراحی کنترل کننده PID	۲۹
۳-۳: طراحی کنترل کننده PID با ضرایب جدید	۳۷
۴-۳: نتیجه گیری:	۴۲
فصل چهارم	۴۳
4-1: مقدمه:	۴۴
۲-۴: طراحی کنترل کننده فازی مقاوم	۴۵
۱-۲-۴: طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه:	۴۵
۲-۲-۴: طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی:	۵۲
۳-۲-۴: طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم:	۵۴
۳-۴: شبیه سازی کنترل کننده فازی مقاوم	۵۶
فصل پنجم:	۷۷
۱-۵: نتیجه گیری:	۷۸
۲-۵: پیشنهادات:	۷۹
مراجع	۸۱

فهرست جداول:

جدول (۱-۳): پارامترهای پایدار کننده ژيروسکوپی ۲۹

جدول (۲-۳): پارامترهای کنترل کننده PID ۳۱

جدول (۳-۳): پارامترهای کنترل کننده PID ۳۷

جدول (۱-۴): قوانین فازی ۴۹

فهرست تصاویر و نمودار:

- شکل (۱-۱): ژيروسکوپ ۲
- شکل (۲-۱): ژيروسکوپ لیزری ۳
- شکل (۳-۱): ژيروسکوپ فیبر نوری ۴
- شکل (۴-۱): سکو پایدار کننده ژيروسکوپی تک محوره [۲] ۶
- شکل (۵-۱): سکو پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره [3] ۷
- شکل (۶-۱): پایدار کننده ژيروسکوپی سه محوره [6] ۸
- شکل (۷-۱): یک جایرو آزاد در نقش یک پایدار کننده غیرفعال ۹
- شکل (۸-۱): پایدار کننده حرکت چرخش طولی قایق ۹
- شکل (۹-۱): پایدار کننده ژيروسکوپی فعال ۱۰
- شکل (۱۰-۱): چند روش استفاده از پایدار کننده های ژيروسکوپی ۱۱
- شکل (۱-۲): ساختار پایدار کننده سه محوره ۱۶
- شکل (۱-۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده PID ۲۸
- شکل (۲-۳): اغتشاش اعمالی ۳۲
- شکل (۳-۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ۳۲
- شکل (۴-۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ۳۳
- شکل (۵-۳): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو ۳۳
- شکل (۶-۳): گشتاور اعمالی به قاب خارجی ۳۴
- شکل (۷-۳): گشتاور اعمالی به قاب میانی ۳۴
- شکل (۸-۳): گشتاور اعمالی به قاب داخلی ۳۵
- شکل (۹-۳): سرعت زاویهای مطلق سکو حول محور X ۳۵

- شکل (۳-۱۰): سرعت زاویه‌های مطلق سکو حول محور Y ۳۶
- شکل (۳-۱۱): سرعت زاویه‌های مطلق سکو حول محور Z ۳۶
- شکل (۳-۱۲): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ۳۸
- شکل (۳-۱۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ۳۸
- شکل (۳-۱۴): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو ۳۹
- شکل (۳-۱۵): گشتار اعمالی به قاب خارجی ۳۹
- شکل (۳-۱۶): گشتاور اعمالی به قاب میانی ۴۰
- شکل (۳-۱۷): گشتاور اعمالی به قاب داخلی ۴۰
- شکل (۳-۱۸): سرعت زاویه‌های مطلق سکو حول محور X ۴۱
- شکل (۳-۱۹): سرعت زاویه‌های مطلق سکو حول محور Y ۴۱
- شکل (۳-۲۰): سرعت زاویه‌های مطلق سکو حول محور Z ۴۲
- شکل (۴-۱): توابع تعلق ورودی ϕ ۴۷
- شکل (۴-۲): توابع تعلق ورودی θ ۵۶
- شکل (۴-۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ۵۷
- شکل (۴-۴): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ۵۸
- شکل (۴-۵): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو ۵۸
- شکل (۴-۶): گشتاور اعمالی به قاب خارجی ۵۹
- شکل (۴-۷): گشتاور اعمالی به قاب میانی ۵۹
- شکل (۴-۸): گشتاور اعمالی به قاب داخلی ۶۰
- شکل (۴-۹): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x ۶۰
- شکل (۴-۱۰): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Y ۶۱
- شکل (۴-۱۱): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z ۶۱

- شکل (۴-۱۲): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده ϕ ۶۲
- شکل (۴-۱۳): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده ψ ۶۲
- شکل (۴-۱۴): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده θ ۶۳
- شکل (۴-۱۵): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ۶۴
- شکل (۴-۱۶): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ۶۴
- شکل (۴-۱۷): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو ۶۵
- شکل (۴-۱۸): گشتاور اعمالی به قاب خارجی ۶۵
- شکل (۴-۱۹): گشتاور اعمالی به قاب میانی ۶۶
- شکل (۴-۲۰): گشتاور اعمالی به قاب داخلی ۶۶
- شکل (۴-۲۱): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x ۶۷
- شکل (۴-۲۲): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Y ۶۷
- شکل (۴-۲۳): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z ۶۸
- شکل (۴-۲۴): اغتشاش اعمالی ۶۹
- شکل (۴-۲۵): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم ۶۹
- شکل (۴-۲۶): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ۷۰
- شکل (۴-۲۷): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم ... ۷۰
- شکل (۴-۲۸): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ۷۱
- شکل (۴-۲۹): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم ۷۱
- شکل (۴-۳۰): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو ۷۲
- شکل (۴-۳۱): گشتاور اعمالی به قاب خارجی ۷۲
- شکل (۴-۳۲): گشتاور اعمالی به قاب میانی ۷۳
- شکل (۴-۳۳): گشتاور اعمالی به قاب داخلی ۷۳

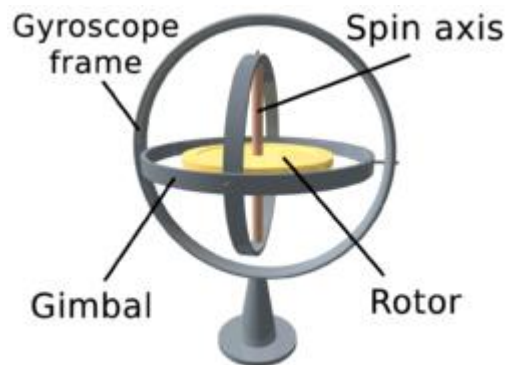
- شکل (۴-۳۴): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x ۷۴
- شکل (۴-۳۵): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Y ۷۴
- شکل (۴-۳۶): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z ۷۵
- شکل (۴-۳۷): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده ϕ ۷۵
- شکل (۴-۳۸): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده ψ ۷۶
- شکل (۴-۳۹): پارامترهای تطبیق Y برای کنترل کننده θ ۷۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه:

ژیروسکوپ وسیله ای برای اندازه گیری و یا حفظ جهت می باشد که از اصل بقای تکانه ای زاویه ای استفاده می کند. ژيروسکوپ عضو اصلی سامانه های هدایت اینرسی هست. یک ژيروسکوپ مکانیکی همیشه یک چرخ یا دیسک چرخنده با محور آزاد دارد که می تواند در هر جهتی قرار گیرد.



شکل (۱-۱): ژيروسکوپ

امروزه ژيروسکوپ ها کاربردهای متنوعی دارند که از جمله آن می توان به کاربرد آن در هدایت کشتی ها ، هواپیماها، فضاپیماها و ...، زمانی که قطب های مغناطیسی کار نمی کنند و یا به اندازه کافی دقیق نیستند، حفظ جهت در معدن و نیز تلفن های همراه اشاره کرد. تقسیم بندی ژيروسکوپ ها از جهات مختلف صورت می گیرد که از جمله آن می توان به تقسیم بندی بر اساس درجه آزادی، نوع تعلیق، نوع وظیفه و طریقه نصب بر روی متحرک ، بر اساس مکانیزم عملکرد و ... اشاره نمود. در تقسیم بندی بر اساس مکانیزم عملکرد می توان به:

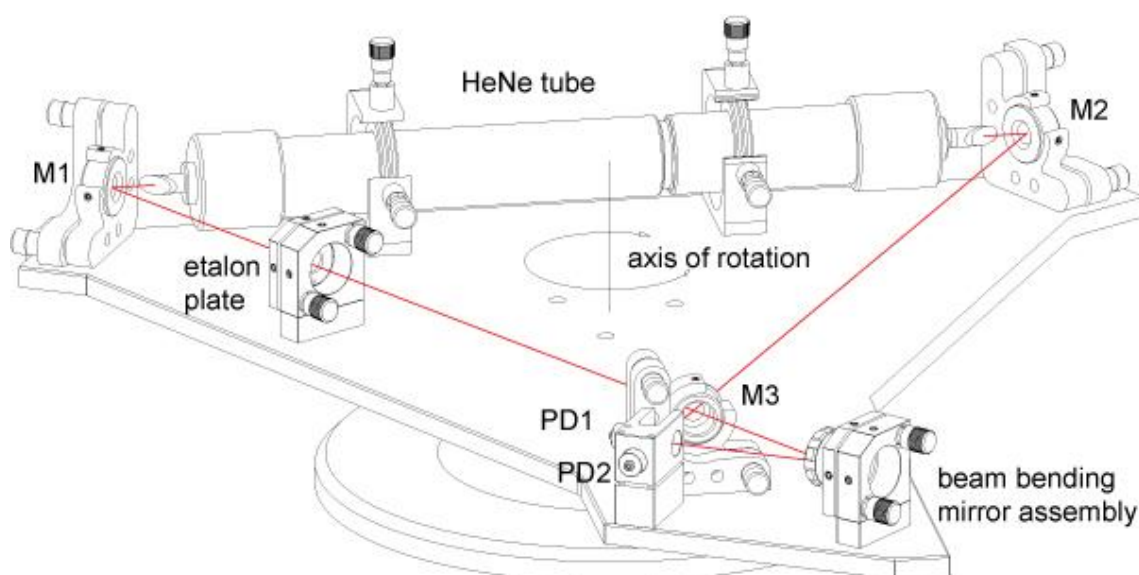
ژیروسکوپ های تنظیم دینامیکی:

این نوع ژيروسکوپ بر اساس اندازه حرکت زاویه ای عمل می کند و عامل اصلی دوران در آن یک موتور الکتریکی است. این ژيروسکوپ ها از نظر ابعاد بسیار کوچک و سبک هستند. این نوع دارای قابلیت اطمینان و دقت بالایی می باشند ولی یک اشکال کوچک در آنها، در تعیین وضعیت ایجاد اشتباه می کند

و با گذشت زمان این خطا بیشتر می‌شود.

ژیروسکوپ‌های لیزری:

در این نوع از دو پرتو نور لیزر در یک مسیر بسته و در دو جهت مخالف استفاده می‌شود و جهت ایجاد حرکت خطی یا زاویه‌ای از هیچ جسم متحرکی استفاده نمی‌شود. از مزایای آن می‌توان به قابلیت اطمینان بیشتر، دامنه دینامیکی وسیع تر، مقاومت خوب در مقابل شتاب‌های زیاد و زمان راه اندازی بسیار کوتاه اشاره کرد و در مقابل از معایب آن می‌توان به گران بودن، مشکلات مونتاژ، بزرگی آن نسبت به جایروهای مکانیکی و نیاز به ولتاژ بالا اشاره کرد. یک نمونه از آن در زیر آمده است.



شکل (۲-۱): ژیروسکوپ لیزری

ژیروسکوپ‌های فیبر نوری:

این نوع، تحقق آخرین اندیشه‌های بشر در ساخت ژیروسکوپ است. در این نوع ژیروسکوپ بر خلاف ژیروسکوپ‌های حلقه لیزری، به جای استفاده از آینه‌ها از کویل‌های فیبر نوری استفاده می‌شود. و به

علت حجم کم فیبر نوری دارای ابعادی کوچک، میزان حساسیت بالا، عمر طولانی و ارزان می باشد. در زیر نمونه ای از این نوع ژيروسکوپ را نمایش می دهیم: [1], [2]



شکل (۱-۳): ژيروسکوپ فیبر نوری

در تقسیم بندی ژيروسکوپ ها بر اساس نوع کاربرد و طیف فرکانس حرکات ورودی می توان به:

ژيروسکوپ های هدایت و ناوبری:

وظیفه این ژيروسکوپ ها ایجاد امتداد معین در فضای اینرسی است. از مزایای آن می توان به دقت بالا، حساسیت بالا در حس کردن ورودی های کم و ناچیز اشاره کرد. از کاربردهای این ژيروسکوپ می توان

به کاربرد در هواپیما، بالگرد، موشک‌های دور برد و هدایت و ناوبری اشاره کرد.

ژیروسکوپ‌های کنترل و پایداری:

وظیفه این ژیروسکوپ‌ها دریافت و کنترل حرکات زاویه‌ای متحرک است. از مزایای این نوع ژیروسکوپ می‌توان به قابلیت پاسخ مطلوب تر به فرکانس‌های بالا نسبت به نوع قبل اشاره کرد. از کاربرد این ژیروسکوپ‌ها می‌توان به استفاده از آنها در موشک‌ها و اژدرها اشاره کرد. و همچنین می‌توان به :

ژیروسکوپ‌های ردگیری و هدف‌یابی:

ژیروسکوپ‌های آنالیز اطلاعات پروازی:

و ... اشاره کرد.

بدین ترتیب در قرن حاضر علم ژیروسکوپ‌ها، که تلفیقی از تئوری و دانش ساخت آنها می‌باشد، توسعه فراوانی یافت و کاربردهای بسیار مهمی پیدا کرد. تجهیزات و وسایلی که جهت پایداری و کنترل وضعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند و در آنها از ژیروسکوپ به عنوان حسگر استفاده می‌شود پایدارکننده‌های ژیروسکوپی گفته می‌شود.

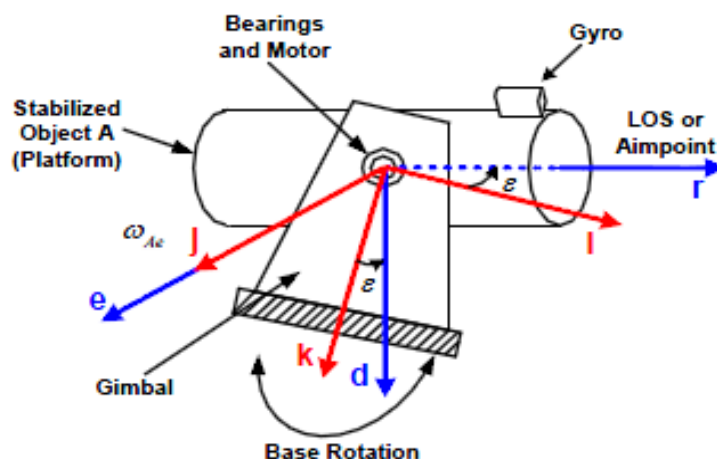
پایدارکننده‌های ژیروسکوپی در انواع یک، دو و سه محوره طراحی و تولید می‌شوند. که می‌توان کامل ترین نوع آن را پایدار کننده ژیروسکوپی سه محوره معرفی کرد که در این پایان نامه به بررسی و طراحی کنترل کننده جهت آن می‌پردازیم. این سیستم به دلیل داشتن معادلات غیرخطی ، نامعینی ساختاری و تداخل با پیچیدگی در طراحی کنترل کننده روبرو است. از کاربردهای این پایدار کننده‌های ژیروسکوپی می‌توان به پایداری سازی دوربین در فیلم برداری یا عکس برداری زمینی و هوایی، رادارها، وسایل ناوبری، پایداری سازی جهت ردگیری اهداف و آنچه روی یک حامل متحرک قرار گرفته، اشاره کرد.. [۳] و [۴].

۲-۱ دسته بندی پایدار کننده‌های ژيروسکوپی

۱-۲-۱ دسته بندی بر اساس تعداد درجات آزادی

الف- پایدار کننده ژيروسکوپی یک محوره

در پایدار کننده‌های ژيروسکوپی تک محوره کنترل و پایداری تنها حول یک محور انجام می‌شود و چرخش تنها حول یک محور صورت می‌گیرد. در مقاله [۵] با استفاده از کنترل کننده‌های تناسبی-مشتقی-انتگرالی آبشاری (Cascade PID) به بررسی و پایداری پایدار کننده ژيروسکوپی یک محوره پرداخته است. شکل زیر پایدار کننده ژيروسکوپی یک محوره را نشان می‌دهد.

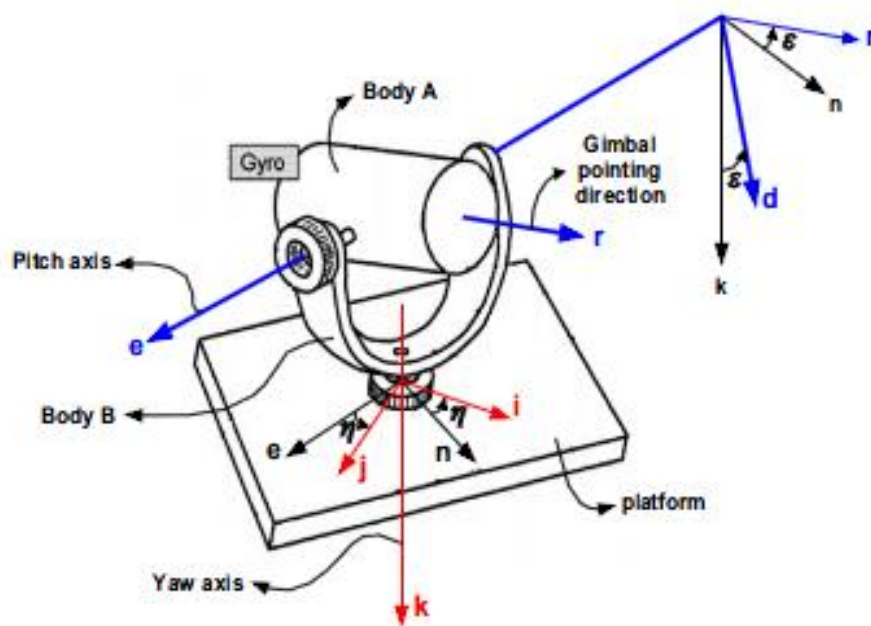


شکل (۴-۱): سکو پایدار کننده ژيروسکوپی تک محوره [۲]

ب- پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره:

در پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره به بررسی و پایداری دو محور از جسم پرداخته می‌شود. شکل زیر پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره را نشان می‌دهد. در مقاله [3] سیستم گیمبال دو درجه

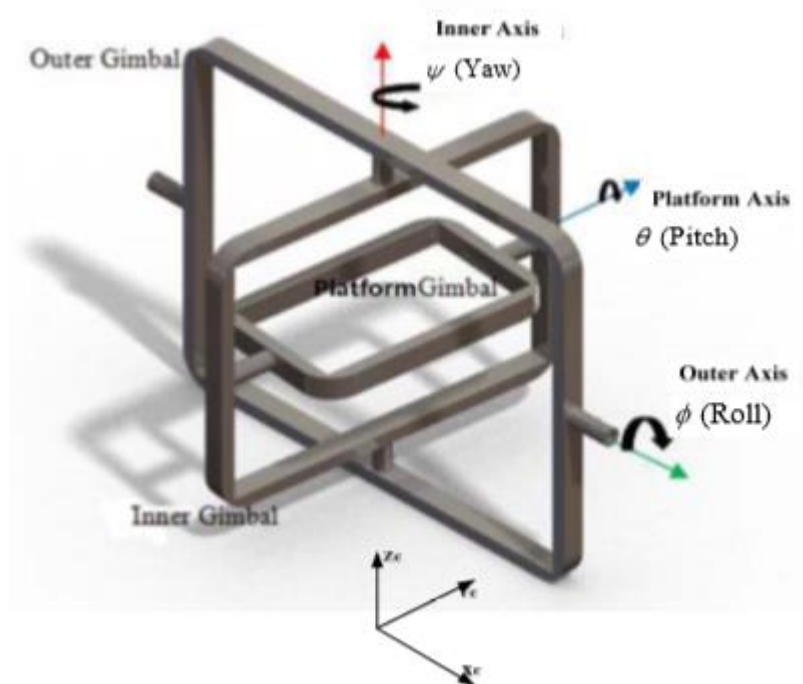
آزادی معرفی شده است. جهت بررسی و ایزوله کردن جسم از حرکت زاویه‌ای و لرزش مبنا از کنترل کننده فازی تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده شده است. در ادامه جهت مقایسه نتایج کنترل کننده اعمالی به سیستم از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی بهره گیری شده است.



شکل (۵-۱): سکوی پایدار کننده ژيروسکوپی دو محوره [3]

ج: پایدارکننده ژيروسکوپی سه محوره:

در پایدارکننده ژيروسکوپی سه محوره، به بررسی و پایداری هر سه محور از جسم در فضا می‌پردازیم. شکل زیر پایدارکننده ژيروسکوپی سه محوره را نشان می‌دهد. پایدارکننده‌های ژيروسکوپی ۳ محوره بر اساس نوع ساختار به دو دسته پایدارکننده‌های ژيروسکوپی با صفحه پایدار و پایدارکننده‌های ژيروسکوپی بدون صفحه پایدار تقسیم می‌شوند که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند.



شکل (۶-۱): پایدار کننده ژيروسکوپی سه محوره [6]

۲-۲-۱: دسته بندی بر اساس نوع پایدار سازی

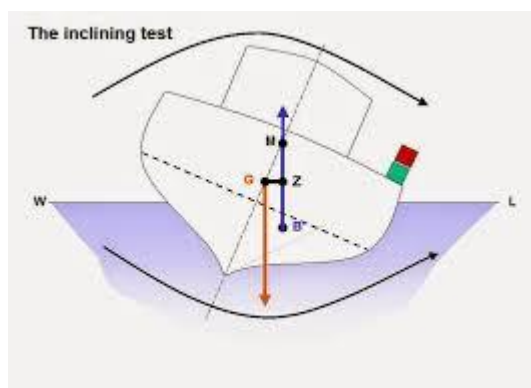
در دسته بندی پایدار کننده های ژيروسکوپی بر اساس نوع پایدار سازی می توان آنها را به دو نوع غیر فعال و فعال تقسیم بندی نمود.

الف- پایدار کننده ژيروسکوپی غیر فعال

به پایدار کننده های ژيروسکوپی که گشتاور مزاحم خود را با تولید گشتاور ژيروسکوپی خنثی می کنند یک پایدار کننده ژيروسکوپی غیر فعال گویند. که در شکل (۷-۱) و شکل (۸-۱) آمده است.



شکل (۷-۱): یک جایرو آزاد در نقش یک پایدار کننده غیرفعال



شکل (۸-۱): پایدار کننده حرکت چرخش طولی قایق

ب- پایدار کننده ژيروسکوپی فعال

جهت بهبود ژيروسکوپ نوع قبل، یک گشتاور ساز از طریق مدار فیدبک در ایجاد پایداری به ژيروسکوپ

کمک می‌کند که در این صورت یک پایدار کننده ژيروسکوپی فعال خواهیم داشت.



شکل (۹-۱): پایدارکننده ژيروسکوپی فعال

۳-۱ موارد استفاده پایدارکننده‌ها

با توجه به نیازهای به وجود آمده در تصویر برداری با زوم بالا، کیفیت و دقت تصاویر از اهمیت بسیاری برخوردار می‌شود. از این رو لزوم پایدار سازی اینرسی دوربین‌ها مطرح می‌شود. با توجه به پیشرفت صنعت سینما، فیلم برداری حرفه‌ای در آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا جهت برداشت پلان‌های خاص که در آن سوژه در حال حرکت است و جهت فیلم برداری در مسیرهای طولانی استفاده از پایدارکننده‌های ژيروسکوپی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در شکل زیر نمونه‌هایی از کاربردهای پایدارساز آمده است.



شکل (۱۰-۱): چند روش استفاده از پایدار کننده‌های ژيروسکوپی

۴-۱ مرور مراجع و کارهای انجام شده

در راستای انجام این پروژه به بررسی و مرور فعالیتهای و کارهای گذشتگان می‌پردازیم. کاربردهای زیادی برای سکوی پایدار تعریف شده است. در مقاله [7] از سکوی پایدار جهت کنترل مدولاسیون دوار قلم حفاری (MRST) استفاده شده است. روش کنترلی ارائه شده، کنترل کننده تناسبی -انتگرالی- مشتقی (PID) و کنترل کننده فازی تطبیقی می‌باشد که در انتها به مقایسه پاسخ سیستم پرداخته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش کنترلی PID فقط در نقطه کار، زمینه را برای سیستم کنترل فراهم می‌کند، اما استفاده از الگوریتم کنترل فازی می‌تواند سازگاری پارامترهای سیستم را به صورت آنلاین در پاسخ سیستم به حذف کردن شرایط تداخل گوناگون مته کاری، تطبیق با غیرخطی بودن و عدم قطعیت متغیر با زمان یک اثر کنترلی مؤثر را دار باشد. در [8] به بررسی سیستم کنترل فازی در حل مشکل کنترل سکوی پایدار پرداخته است. در این مقاله بر روی کاربردهای تکنیک کنترل فازی (فازی نوع یک و نوع دو) و فرم هیبرید آن در محدوده وسیعی از پایداری سکو توجه شده و فقط بیان نتایج و آمده است. در مقاله [9] به بررسی کنترل مقاوم برای صفحه پایدار ژيروسکوپ و کاربرد آن در حفاری پرداخته شده است. استراتژی کنترل کننده مد لغزشی -عصبی- تطبیقی معرفی شده است که کنترل کننده مد لغزشی برای تضمین مقاوم بودن سیستم مطرح شده است. که حد بالای عدم قطعیت به وسیله شبکه عصبی آر بی اف برای تقریب غیرخطی حد بالای عدم قطعیت تطبیق می‌یابد. و لرزش به وسیله روش کنترلی مد لغزشی گوسی کاهش می‌یابد. سرانجام الگوریتم بهینه ازدحام ذرات برای مشخص کردن پارامترهای کنترل به صورت بهینه شامل پارامترهای تطبیق و وزن شبکه عصبی و ... استفاده شده است. و در انتها نتایج شبیه سازی تضمین می‌کند که استراتژی کنترل مطرح شده عملکرد بهینه و مقاوم را برای صفحه پایدار به همراه دارد. در مقاله [10] کنترل کننده تناسبی -انتگرالی- مشتقی پیشرفته با استفاده از الگوریتم فازی برای صفحه پایدار ارائه شده است. رفتار دینامیکی سیستم ژيروسکوپ در برابر اغتشاش خارجی در مقاله [11] مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم کنترل تطبیقی و کنترل بنگ - بنگ برای کنترل اثر آشوبی آن مطرح شده است. و در نهایت

هماهنگ سازی آشوب در ژيروسکوپ ها مورد بررسی قرار گرفته است. در مقاله [12] به بهبود دقت سیستم اینرسی صفحه پایدار سه محوره با استفاده از تنظیم دینامیکی ژيروسکوپ و با استفاده از روش های کنترل ساختار متغیر پرداخته شده است. روش کنترلی مد لغزشی برای سیستم پایدار ساز سه محوره اعمال شده است. استراتژی کنترل مد لغزشی برای پایدار سازی صفحه اینرسی سه درجه عملکرد مطلوبی را ارائه کرده است. در مقاله [13] بر اساس مینم کردن انتگرال زمانی از شاخص قدرمطلق خطا یک کنترل کننده PI مقاوم جهت دستیابی به عملکرد و دقت مطلوب در پایدارسازی سیستم تثبیت خط دید ارائه شده است. در مقاله [14] به طراحی و کنترل حرکت صفحه دو درجه آزادی پرداخته شده است. مدل ریاضی پلتفرم ژيروسکوپی سه جزئی بر روی پلتفرم در حال حرکت به وسیله موتور در مقاله [15] بررسی شده است. کنترل نرم افزاری پلتفرم با استفاده از روش LQR مطرح شده است. در مقاله [16] مدلسازی دینامیکی یک صفحه پایدار ژيروسکوپی سه محوره با لحاظ کردن حرکات زاویه ای جسم حامل با استفاده از کنترل کننده های خطی PID و LQR شبیه سازی و بررسی شده است. در مقاله [5] مکانیزم جیمبال تک محوه مورد بررسی قرار گرفته است و جهت پایدار سازی کنترل کننده تناسبی- انتگرالی و مشتقی ارائه شده است. در مقاله [6] مدلسازی دینامیکی و کنترل صفحه پایدار برای آنتن کشتی ارائه شده است. از نرم افزار سولید وورک برای تولید قطعات مکانیکی به کار رفته شامل مکانیک سروو برای هر بخش استفاده شده است. در این مقاله در ابتدا از کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی استفاده شده است و در ادامه از کنترل کننده تاکاگی سوگونو فازی استفاده شده است. هدف مقاله [17] معرفی جیمبال دو درجه می باشد. روش کنترلی ارائه شده در این مقاله کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی نوع فازی می باشد. مرجع [18] با استفاده از روش شناسایی با روش حداقل مربعات خطای بازگشتی و خطای پیشبین به طراحی سیستم کنترل خطی برای صفحه پایدار جستجوگر دو درجه آزادی پرداخته است. مرجع [19] مسئله ردگیری جسم متحرک با استفاده از یک دوربین متحرک که نیازمند یک صفحه فوق العاده پایدار بوده و توسط یک الگوریتم کنترل مقاوم کنترل شده را بررسی نموده است. در این مقاله به مدلسازی و تخمین ۲ درجه

آزادی صفحه پایدار با استفاده از روش حداقل مربعات پرداخته شده است. در مرجع [20] برای سیستم ناوبری اینرسی بدون صفحه پایدار به بررسی و استخراج یک الگوریتم جدید برای یک ماهواره بر پرداخته است.

در مرجع [۱۲] طرح کنترل مودلغزشی برای یک صفحه پایدار سه درجه آزادی اینرسی جهت افزایش دقت آن پرداخته و با کنترل کننده‌های خطی تخمین مقایسه شده است. در مرجع [۲۱] به کنترل یک صفحه پایدار به کمک کنترل کننده تطبیقی معکوس پرداخته شده است. مرجع [۲۲] پایداری و دینامیک آشفته موجود در یک ژيروسکوپ نرخی تک محوره که شامل یک حلقه کنترلی پسخور خطی می باشد را مورد بررسی قرار داده است. در مقاله [23] حرکت گذرا و حالت ماندگار قاب‌های پایدارشونده توسط ژيروسکوپ غیرخطی کنترل پذیر که جهت پایدارسازی یک جسم خارجی مورد استفاده قرار گرفته بررسی شده است. در مرجع [24] با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی – انتگرالی یک سیستم پایدار شده ژيروسکوپی الکتریکی-نوری را تحلیل نموده است. در مرجع [25] به بررسی سیستم‌های رهگیر دوربین‌های کوچک نصب شده بر روی وسایل متحرک در یک محیط با اغتشاش پرداخته شده است. هدف سیستم دوربین رهگیر، پایداری دوربین و ردگیری هدف بصورت لحظه‌ای می باشد. در مرجع [26] سیستم کنترل زاویه‌ای جدیدی بر پایه ژيروسکوپ‌های کنترل زاویه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد این وسیله بیانگر مزیت استفاده از آن می باشد.

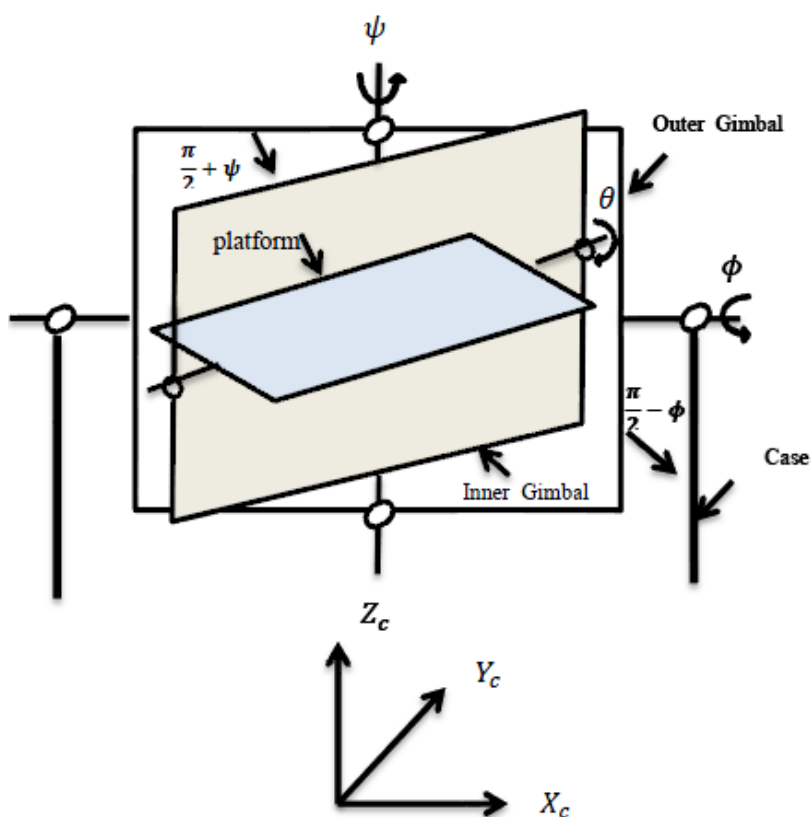
فصل دوم:

استخراج معادلات دینامیکی پایدار کننده

ژیروسکوپی سه محوره

۱-۲ : سیستم‌های مختصات و روابط سینماتیکی:

در این فصل به استخراج و بررسی معادلات دینامیکی خواهیم پرداخت و جهت دستیابی به معادلات دینامیکی سیستم از مرجع [27] و [28] استفاده شده است. پایدار کننده سه محوره دارای ساختاری شامل پلتفرم، قاب داخلی، قاب خارجی و پایه می‌باشد. شکل (۱-۲): ساختار پایدار کننده سه محوره را به صورت کلی نشان می‌دهد. [27]



شکل (۱-۲): ساختار پایدار کننده سه محوره

۲-۱-۱ : سینماتیک پلتفرم:

اگر یک سرعت زاویه‌ای دلخواه $\vec{\Omega}$ به پایه وارد شود این سرعت زاویه‌ای در مختصات پایه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{\Omega}^c = \begin{bmatrix} \omega_{cx} \\ \omega_{cy} \\ \omega_{cz} \end{bmatrix} \quad (۱-۲)$$

روابط سینماتیک زیر برای پلتفرم نوشته شده‌اند:

$$\vec{\Omega} = \omega_{cp} \quad (۲-۲)$$

$$= \vec{\omega}_{co} + \vec{\omega}_{ol} + \vec{\omega}_{lp} \quad \vec{\omega}_{cp} \quad (۳-۲)$$

$$p = \omega_{cx} = \dot{\theta}_0 \sin \psi_0 + \dot{\phi}_- \quad (۴-۲)$$

$$q = \omega_{cy} = \dot{\theta}_0 \cos \psi_0 \cdot \cos \phi_0 + \dot{\psi}_0 \sin \phi_0 \quad (۵-۲)$$

$$r = \omega_{cz} = -\dot{\theta}_0 \cos \psi_0 \cdot \sin \phi_0 + \dot{\psi}_0 \cos \phi_0 \quad (۶-۲)$$

اگر معادلات فوق بر حسب سرعت زاویه‌ای‌های اویلر حل شود، روابط زیر بدست می‌آیند که معرف نرخ سرعت‌های زاویه‌ای میان قاب‌ها هستند:

$$\dot{\phi}_0 = \omega_{cx} - \dot{\theta}_0 \sin \psi = \omega_{cx} - \left[\frac{(\omega_{cy} \cos \phi_0 - \omega_{cz} \sin \phi_0)}{\cos \psi_0} \right] * \sin \psi_0 \quad (۷-۲)$$

$$\dot{\psi}_0 = \omega_{cz} \cos \phi_0 + \omega_{cy} \sin \phi_0 \quad (۸-۲)$$

$$\dot{\theta}_0 = \frac{\omega_{cy} \cos \phi_0 - \omega_{cz} \sin \phi_0}{\cos \psi_0} \quad (۹-۲)$$

p, q, r سرعت زاویه‌ای‌های پرنده و مشتقات آنها، از اطلاعات پروازی در دستگاه بدنی بدست می‌آیند

و معلوم هستند.

۲-۲ : معادلات حرکت غیرخطی پایدار کننده ژيروسکوپي سه محوه:

معادلات حرکت غیرخطی پایدار کننده ژيروسکوپي از حل معادلات دیفرانسیل حرکت برای قابها و جابروهای سیستم به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\ddot{\phi} = \frac{MZI \cdot A_{O\psi} - MXO \cdot A_{I\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (۱۰-۲)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{MXI \cdot A_{I\phi} - MZI \cdot A_{O\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (۱۱-۲)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{A_{p\phi} [MXO \cdot A_{I\psi} - MZI \cdot A_{O\psi}]}{A_{p\theta} [A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}]} + \frac{MYP}{A_{p\theta}} \quad (۱۲-۲)$$

$$\ddot{\alpha}_x = LGX - G_{x\phi} \ddot{\phi} - G_{x\psi} \ddot{\psi} \quad (۱۳-۲)$$

$$\ddot{\alpha}_y = LGY - G_{y\phi} \ddot{\phi} - G_{y\psi} \ddot{\psi} \quad (۱۴-۲)$$

$$\ddot{\alpha}_z = LGZ - G_{z\phi} \ddot{\phi} - G_{z\psi} \ddot{\psi} \quad (۱۵-۲)$$

این معادلات شامل ترمهایی هستند که بیانگر اصطکاک ویسکوز و کولمب، گشتاور موتورها و تاثیرات اینرسی کوپل شده بر سیستم می باشند که در ادامه تعریف می شوند.

پارامترهای سیستم را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

θ : زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور Y پلتفرم (Y_p) اندازه گیری می شود.

$\dot{\theta}$: سرعت زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور Y پلتفرم (Y_p) اندازه گیری می شود.

ψ : زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور Z پلتفرم (Z_i) اندازه گیری می شود.

ψ : سرعت زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور Z پلتفرم (Z_i) اندازه گیری می شود.

ϕ : زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور X پلتفرم (X_o) اندازه گیری می شود.

$\dot{\phi}$: سرعت زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم که حول محور X پلتفرم (X_o) اندازه گیری می شود.

زوایا و سرعت زاویه ای های تعریف شده در بالا از یک ترتیب اوایلر به صورت (ϕ, ψ, θ) 1,3,2 که از پایه شروع شده و به پلتفرم ختم می گردد، تبعیت می کند. [28]

۳-۲ : معادلات وضعیت سیستم قاب ها با وجود حرکت پایه:

معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم سیستم گیمبال بر حسب متغیرهای وضعیت سیستم به صورت زیر تعریف می شوند:

$$A_{p\phi} \ddot{\phi} + A_{p\theta} \ddot{\theta} = MYP \quad (۱۶-۲)$$

$$A_{I\phi} \ddot{\phi} + A_{I\psi} \ddot{\psi} = MZI \quad (۱۷-۲)$$

$$A_{O\phi} \ddot{\phi} + A_{O\psi} \ddot{\psi} = MXO \quad (۱۸-۲)$$

$$MYP = M_{IPY}^* - MPY \quad (۱۹-۲)$$

$$MZI = M_{OIZ}^* - MIZ \quad (۲۰-۲)$$

$$MXO = M_{COX}^* - MOX \quad (۲۱-۲)$$

ضرایب بکار رفته در معادلات (۱۶-۲) الی (۲۱-۲) به صورت زیر تعریف می شوند :

$$A_{P\phi} = \sin\psi(I_{py} + I_{gxs} + I_{gyI} + I_{gzs}) \quad (۲۲-۲)$$

$$A_{p\theta} = (I_{py} + I_{gxs} + I_{gyI} + I_{gzs}) \quad (۲۳-۲)$$

$$A_{I\phi} = \cos \psi \cos \theta \sin \theta (I_{px} + I_{gxI} - I_{pz} - I_{gys} - I_{gzI}) \quad (24-2)$$

$$A_{I\psi} = [I_{IZ} + \sin^2 \theta (I_{PX} + I_{gxI}) + \cos^2 \theta (I_{PZ} + I_{gys} + I_{gzI})] \quad (25-2)$$

$$A_{O\phi} = [I_{ox} + \cos^2 \psi \{I_{IX} + \cos^2 \theta (I_{PX} + I_{gxI}) + \sin^2 \theta (I_{PZ} + I_{gzI})\} + \sin^2 \psi I_{IY}] \quad (26-2)$$

$$A_{O\psi} = \sin \theta \cos \theta \cos \psi (I_{px} + I_{gxI} - I_{pz} - I_{gys} - I_{gzI}) \quad (27-2)$$

۴-۲ : معادلات حرکت سیستم پایدار کننده سه محوره :

۱-۴-۲ : معادلات محور خروجی جابروها :

سه معادله مکانیکی جابروها بر حسب متغیرهای وضعیت، به فرم معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم زیر نوشته شده‌اند.

$$G_{x\phi} \ddot{\phi} + G_{x\psi} \ddot{\psi} - \ddot{\alpha}_x = LGX \quad (28-2)$$

$$G_{y\phi} \ddot{\phi} + G_{y\psi} \ddot{\psi} - \ddot{\alpha}_y = LGY \quad (29-2)$$

$$G_{z\phi} \ddot{\phi} + G_{z\psi} \ddot{\psi} - \ddot{\alpha}_z = LGZ \quad (30-2)$$

که داریم:

$$G_{x\phi} = \sin \theta \cos \psi$$

$$G_{x\psi} = -\cos \theta$$

$$G_{y\phi} = -\cos \theta \cdot \cos \psi$$

$$G_{y\psi} = -\sin \theta$$

$$G_{z\phi} = -\cos \theta \cdot \cos \psi$$

$$G_{z\psi} = -\sin \theta$$

که در آن داریم:

$$LGX = \frac{D_{gx0} \cdot \dot{\alpha}_x}{I_{gx0}} - \frac{H_{\omega x}}{I_{gx0}} \cdot \omega_{gxI} + \frac{(I_{gxI} - I_{gxS})}{I_{gx0}} \cdot \omega_{gxI} \cdot \omega_{gxS} +$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & - \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi] \right\} \sin \theta \\ & + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi} \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \\ & + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - \right. \\ & \left. + [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \cos \theta \end{aligned} \right\}$$

(۳۱-۲)

$$LGY = \frac{D_{gy0} \cdot \dot{\alpha}_y}{I_{gy0}} - \frac{H_{\omega y}}{I_{gy0}} \cdot \omega_{gyI} + \frac{(I_{gyI} - I_{gyS})}{I_{gy0}} \cdot \omega_{gyI} \cdot \omega_{gyS}$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi] \right\} \cos \theta \\ & + \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi} \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \\ & + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - \right. \\ & \left. + [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

(۳۲-۲)

$$LGZ = \frac{D_{gz0} \cdot \dot{\alpha}_z}{I_{gz0}} - \frac{H_{\omega z}}{I_{gz0}} \cdot \omega_{gzI} + \frac{(I_{gzI} - I_{gzS})}{I_{gz0}} \cdot \omega_{gzI} \cdot \omega_{gzS}$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi] \right\} \cos \theta \\ & + \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi} \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \\ & + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - \right. \\ & \left. + [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

(۳۳-۲)

۲-۴-۲ گشتاور عکس‌العملی جاپرو به پلتفرم:

گشتاور عکس‌العملی جاپرو که به پلتفرم اعمال می‌شود همان گشتاورهای جاپرو، با علامت منفی

می‌باشد که با یک ماتریس تبدیل، به دستگاه مختصات پلتفرم منتقل می‌شود. [28]

$$MGX = -I_{gxI}$$

$$\cdot \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}] \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \right\} \cos \theta \\ & + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \sin \theta \\ & + \dot{\alpha}_x \cdot \{ (p + \dot{\phi}) \sin \psi + (q \cos \phi - r \sin \phi) \cos \psi + \dot{\theta} \} \end{aligned} \right\}$$

$$-H_{\omega x} \cdot \omega_{gxO} - (I_{gxS} - I_{gxO}) \omega_{gxS} \cdot \omega_{gxO} + D_{gyO} \cdot \dot{\alpha}_y + D_{gzO} \cdot \dot{\alpha}_z$$

(34-2)

$$MGY = I_{gxS} \cdot$$

$$\begin{aligned} & -\{\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}\} \sin \psi - \{(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}\} \cos \psi + \{ \\ & + \dot{\alpha}_x \{ [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \cos \theta + [q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}] \sin \theta \} \} \\ & + (I_{gxO} - I_{gxI}) \omega_{gxO} \cdot \omega_{gxI} \\ & - I_{gyI} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \{\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}\} \sin \psi + \{(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}\} \cos \psi + \\ & + \dot{\alpha}_y \cdot \{ -[(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \sin \theta + [q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}] \cos \theta \} \end{aligned} \right\} \\ & -H_{\omega y} \cdot \omega_{gyO} - (I_{gyS} - I_{gyO}) \omega_{gyS} \cdot \omega_{gyO} \\ & + I_{gzS} \cdot \left\{ \begin{aligned} & -\{\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}\} \sin \psi - \{(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}\} \cos \psi + \\ & - \dot{\alpha}_z \cdot \{ -[(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \sin \theta + [q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}] \cos \theta \} \end{aligned} \right\} \\ & + (I_{gzO} - I_{gzI}) \omega_{gzO} \cdot \omega_{gzI} \end{aligned}$$

(35-2)

$$MGZ = D_{gxO} \cdot \dot{\alpha}_x +$$

$$+ I_{gyS} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}] \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \right\} \sin \theta \\ & - \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \cos \theta \\ & + \dot{\alpha}_y \cdot \{ (p + \dot{\phi}) \sin \psi + (q \cos \phi - r \sin \phi) \cos \psi + \dot{\theta} \} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + (I_{gyO} - I_{gyI}) \omega_{gyO} \cdot \omega_{gyI} + \\
& + I_{gzI} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}] \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \right\} \sin \theta \\ & - \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \cos \theta \\ & + \dot{\alpha}_z \cdot \{(p + \dot{\phi}) \sin \psi + (q \cos \phi - r \sin \phi) \cos \psi + \theta\} \end{aligned} \right\} \\
& + H_{\omega z} \cdot \omega_{gzO} + (I_{gzS} - I_{gzO}) \omega_{gzS} \cdot \omega_{gzO}
\end{aligned}
\tag{۳۶-۲}$$

۵-۲ : معادلات دینامیکی قابهای پایدار کننده سه محوره:

۱-۵-۲: معادلات حرکت پلتفرم:

$$\begin{aligned}
MPX = I_{px} \cdot & \left\{ \begin{aligned} & \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}] \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \right\} \cos \theta \\ & + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \sin \theta \end{aligned} \right\} \\
& + (I_{pz} - I_{py}) \omega_{pz} \cdot \omega_{py} - MGX
\end{aligned}
\tag{۳۷-۲}$$

در رابطه فوق MGX از رابطه (۳۴-۲) بدست می‌آید:

$$MPZ = I_{pz} \cdot$$

$$\left\{ - \left\{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi}] \sin \psi + (q \sin \phi + r \cos \phi + \dot{\psi}) \dot{\theta} \right\} \sin \theta \right. \\
\left. + \left\{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \sin \phi + (\dot{r} + q \dot{\phi}) \cos \phi - [(p + \dot{\phi}) \cos \psi - (q \cos \phi - r \sin \phi) \sin \psi] \dot{\theta} \right\} \cos \theta \right\}$$

$$+(I_{py} - I_{px})\omega_{px} \cdot \omega_{py} - MGZ$$

(۳۸-۲)

MGZ از رابطه (۳۶-۲) بدست می آید:

$$\begin{aligned} MPY = I_{py} \cdot \{ \dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi} \} \sin \psi + \{ (\dot{q} - r \dot{\phi}) \cos \phi \\ - (\dot{r} + q \dot{\phi}) \sin \phi + (p + \dot{\phi}) \dot{\psi} \} \cos \psi + (I_{px} - I_{pz}) \omega_{pz} \cdot \omega_{px} - MGY \end{aligned}$$

(۳۹-۲)

که در رابطه فوق MGY از رابطه (۳۶-۲) ((۳۵-۲) بدست می آید:

معادله حرکت پلتفرم حول محور دینامیکی Y_p به صورت زیر است: [28]

$$M_{IPY}^* = -D_{Ip} \dot{\theta} - F_{IP}(sgn \dot{\theta}) + T_{II} \quad (۴۰-۲)$$

که در آن:

D_{Ip} : اصطکاک ویسکوز بین قاب داخلی و پلتفرم

$F_{IP}(sgn \dot{\theta})$: تابع نماینده اصطکاک کولمب^۱ و اصطکاک استاتیکی^۲ (مربوط به کشش در سیم

بندی‌ها)

T_{II} : گشتاور موتور محور داخلی

۲-۵-۲: معادلات حرکت قاب داخلی:

$$MIX = I_{Ix} \{ [\dot{p} - (q \cos \phi - r \sin \phi) \dot{\psi}] \cos \psi - [(p + \dot{\phi}) \dot{\psi} + (\dot{q} \cos \phi - q \dot{\phi} \sin \phi$$

^۱ Coulomb Friction

^۲ Striction

$$-\dot{r}\sin\phi - r\dot{\phi}\cos\phi)]\sin\psi\} + (I_{Iz} - I_{Iy}).\omega_{Ix}.\omega_{Iy} + MPX\cos\theta - MPZ\sin\theta \quad (41-2)$$

در رابطه فوق MPX و MPZ به ترتیب از رابطه (۳۷-۲) و (۳۸-۲) بدست می‌آید.

$$MIY = I_{Iy}\{[\dot{p} - (q\cos\phi - r\sin\phi)\psi]\sin\psi + [(p + \dot{\phi})\psi + (\dot{q}\cos\phi - q\dot{\phi}\sin\phi - \dot{r}\sin\phi - r\dot{\phi}\cos\phi)]\cos\psi\} + (I_{Ix} - I_{Iz})\omega_{Ix}.\omega_{Iz} + M_{IPy}^* \quad (42-2)$$

که M_{IPY}^* از رابطه (۴۰-۲) بدست می‌آید.

$$MIZ = I_{Iz}.\{(\dot{q} - r\dot{\phi})\sin\phi + (q\dot{\phi} + \dot{r})\cos\phi\} + (I_{Iy} - I_{Ix})\omega_{Ix}.\omega_{Iy} + MPX\sin\theta + MPZ\cos\theta \quad (43-2)$$

MPZ , MPX قبلاً در روابط (۹۰-۲) و (۹۲-۲) بدست آمده‌اند

M_{OIZ}^* را می‌توان از رابطه ذیل بدست آورد: [28]

$$M_{OIZ}^* = -D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(sgn\dot{\psi}) + T_{mm} \quad (44-2)$$

D_{OI} : اصطکاک ویسکوز بین قاب داخلی و خارجی

$F_{OI}(sgn\dot{\psi})$: تابع نماینده اصطکاک کولمب و اصطکاک استاتیکی (مربوط به کشش در سیم بندی-ها)

T_{mm} : گشتاور موتور محور میانی

۳-۵-۲ : معادلات حرکت قاب خارجی

$$MOX = (I_{OZ} - I_{OY})\omega_{OZ}\omega_{OY} + MIX\cos\psi + MIY\sin\psi + I_{OX}\dot{p} \quad (۴۵-۲)$$

MIY, MIX از روابط ((۴۱-۲) و ((۴۲-۲) بدست می‌آیند و داریم:

$$M_{COX}^* = -D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi}) + T_{OO} \quad (۴۶-۲)$$

D_{CO} : اصطکاک ویسکوز بین قاب داخلی و پایه

$F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi})$: تابع نماینده اصطکاک کولمب و اصطکاک استاتیکی (مربوط به کشش در سیم بندی - ها)

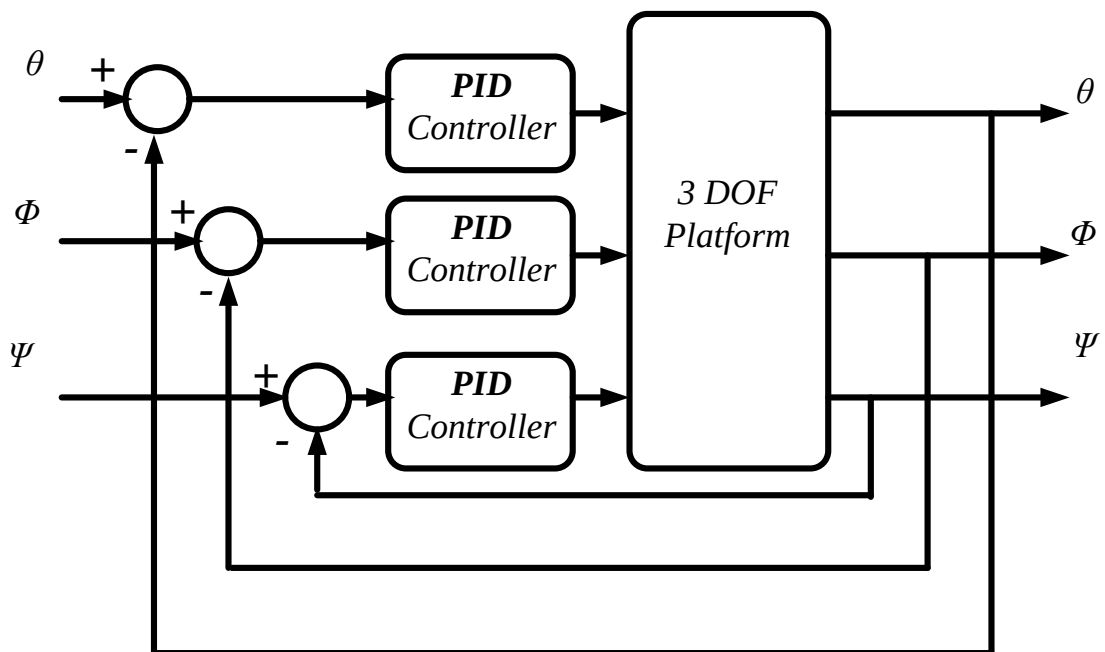
T_{OO} : گشتاور موتور محور خارجی

فصل سوم

طراحی کنترل کننده PID

۱-۳: مقدمه:

یکی از کنترل کننده‌های محبوب صنعتی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی^۱ (PID) است. در طراحی کنترل کننده ابتدا از خروجی سیستم فیدبک گرفته می‌شود و این مقدار وارد مقایسه‌گر شده و با مقدار مرجع مقایسه می‌شود. خطای حاصل از این مقایسه به عنوان ورودی، وارد تابع کنترل PID می‌شود و با اعمال ضرایب k_p, k_d, k_i مناسب، در خروجی کنترل کننده گشتاور مورد نیاز جهت ورود به سیستم تحت کنترل حاصل می‌شود. این سیگنال باعث تغییر رفتار سیستم می‌شود و خروجی را به مقدار مطلوب نزدیک و نزدیکتر می‌کند تا با آن برابری کند. بلوک دیاگرام طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی برای سیستم مورد نظر در زیر آمده است.



شکل (۱-۳): بلوک دیاگرام کنترل کننده PID

معمولاً کنترل کننده‌های PID خطی با ضرایب ثابت برای کنترل یک فرآیند فیزیکی مشخص کافی هستند. اما با وجود حرکات غیر خطی، اغتشاش و ... کنترل مناسب از توانایی آنها خارج می‌شود.

1-PID

روش‌های متفاوتی بهبود عملکرد، پایداری و سازگاری کنترلرهای PID ارائه شده از جمله آنها می‌توان به روش خود تنظیم شونده [29]، کنترل پیش بین [30]، کنترل فازی [31]، شبکه عصبی [32] و غیره اشاره کرد. در [33] با بهره‌گیری از اصول کنترل پیش بین، برای پرواز فضاپیماها به طراحی کنترل کننده غیرخطی پرداخته است. در [34, 4, 35] با استفاده از کنترل خطی PID پاسخ آزاد و سپس پاسخ حلقه بسته برای یک صفحه پایدار شبیه سازی و بررسی شده است. در مرجع [36] به طراحی کنترل کننده PID و تعیین بهره‌های تناسبی، انتگرالی، مشتقی با استفاده از روش زیگلر-نیکولز پرداخته است. در ادامه با اعمال کنترل کننده PID به بررسی پاسخ سیستم می‌پردازیم:

۲-۳ طراحی کنترل کننده PID

پارامترهای سیستم پایدار کننده ژيروسکوپی در جدول زیر آمده است.

جدول (۱-۳): پارامترهای پایدار کننده ژيروسکوپی

$I_{PX} = 0.07(kg.m^2)$	ممان اینرسی پلتفرم در راستای محور X
$I_{PY} = 0.07(kg.m^2)$	ممان اینرسی پلتفرم در راستای محور Y
$I_{PZ} = 0.07(kg.m^2)$	ممان اینرسی پلتفرم در راستای محور Z
$I_{IX} = 0.05(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب داخلی در راستای محور X
$I_{IY} = 0.05(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب داخلی در راستای محور Y
$I_{IZ} = 0.05(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب داخلی در راستای محور Z
$I_{OX} = 0.08(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب خارجی در راستای محور X

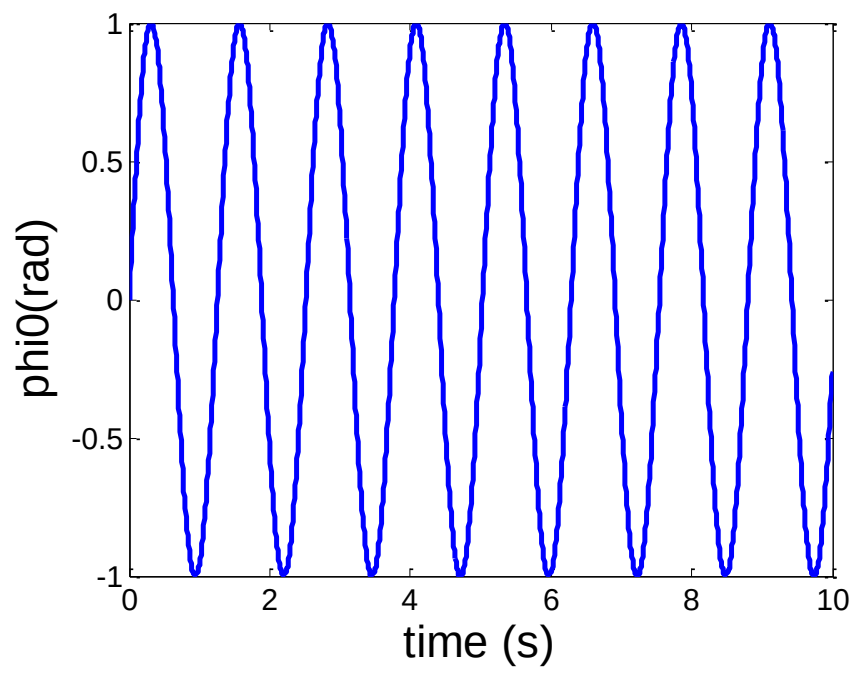
$I_{OY} = 0.08(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب خارجی در راستای محور Y
$I_{OZ} = 0.08(kg.m^2)$	ممان اینرسی قاب خارجی در راستای محور Z
$I_{gxs} = I_{gys} = I_{gzs} = 0.0002(kg.m^2)$	ممان اینرسی محور اسپین جابروهای نامقید مکانیکی
$I_{gxl} = I_{gyl} = I_{gzl} = 0.00011(kg.m^2)$	ممان اینرسی محور گیمبال داخلی جابروهای نامقید مکانیکی
$I_{gx0} = I_{gy0} = I_{gz0} = 0.00011(kg.m^2)$	ممان اینرسی محور گیمبال خارجی جابروهای نامقید مکانیکی
$H_{wx} = H_{wy} = H_{wz} = 0.0725(N.m.s)$	ممنتوم زاویه‌ای روتور جابروهای نامقید مکانیکی
$D_{gxo} = D_{gyo} = D_{gzo} = 0.04(N.m.s /rad)$	ضریب دمپینگ ویسکوز جابروهای نامقید مکانیکی
$D_{IP} = 0.1(N.m.s /rad)$	ضریب اصطکاک ویسکوز بین قاب داخلی و پلتفرم
$D_{OI} = 0.1(N.m.s /rad)$	ضریب اصطکاک ویسکوز بین قاب خارجی و قاب داخلی
$D_{CO} = 0.1(N.m.s /rad)$	ضریب اصطکاک ویسکوز بین پایه و قاب خارجی
$F_{IP} = 0.00001(N.m)$	گشتاور ناشی از اصطکاک کولمب(سیم‌بندی) بین قاب داخلی و پلتفرم
$F_{OI} = 0.0001(N.m)$	گشتاور ناشی از اصطکاک کولمب(سیم‌بندی) بین قاب خارجی و قاب داخلی
$F_{CO} = 0.001(N.m)$	گشتاور ناشی از اصطکاک کولمب(سیم‌بندی) بین پایه و قاب خارجی

همانگونه که در بلوک دیاگرام طراحی کنترل کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی بیان شد، سه کنترل کننده PID برای سه موتور قاب داخلی، قاب میانی و قاب خارجی طراحی می شود که ضرایب آن مطابق جدول زیر می باشد [4, 35]. در ابتدا با توجه ضرایب بیان شده به طراحی کنترل کننده و بررسی پاسخ سیستم می پردازیم.

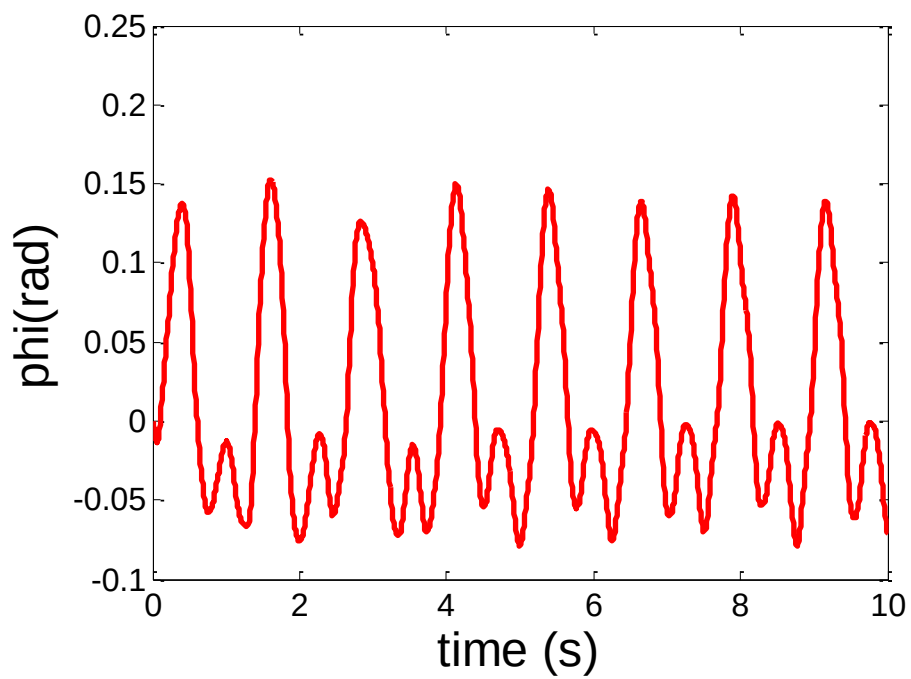
جدول (۳-۲): پارامترهای کنترل کننده PID

	T_{ii}	T_{mm}	T_{oo}
K_p	۱۰۰	۱۰۰	۶۰
K_I	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۱
K_d	.	.	۲,۷۵

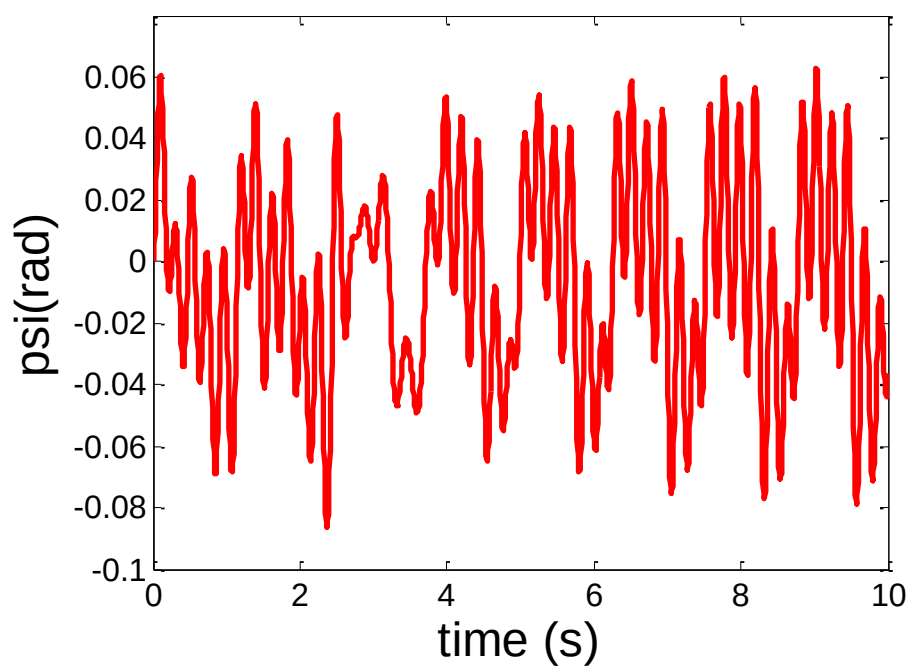
متغیرهای حالت را زوایای نسبی میان قابها و نرخ آنها در نظر گرفته $x = [\phi \ \psi \ \theta \ \dot{\phi} \ \dot{\psi} \ \dot{\theta}]$ و گشتاور تولیدی $u = [T_{oo} \ T_{mm} \ T_{II}]$ نیز به عنوان ورودی های کنترلی سیستم در نظر گرفته می شوند. لازم به ذکر است که در تمامی حالت های بیان شده، کنترل کننده های طراحی شده بایستی بتواند متغیرهای وضعیت را به وضعیت مطلوب $x_{des} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ برساند. اغتشاش اعمالی به سیستم به صورت $\phi_0 = \psi_0 = \theta_0 = \sin 5t$ می باشد که در شکل (۳-۲): اغتشاش اعمالی نشان داده شده است.



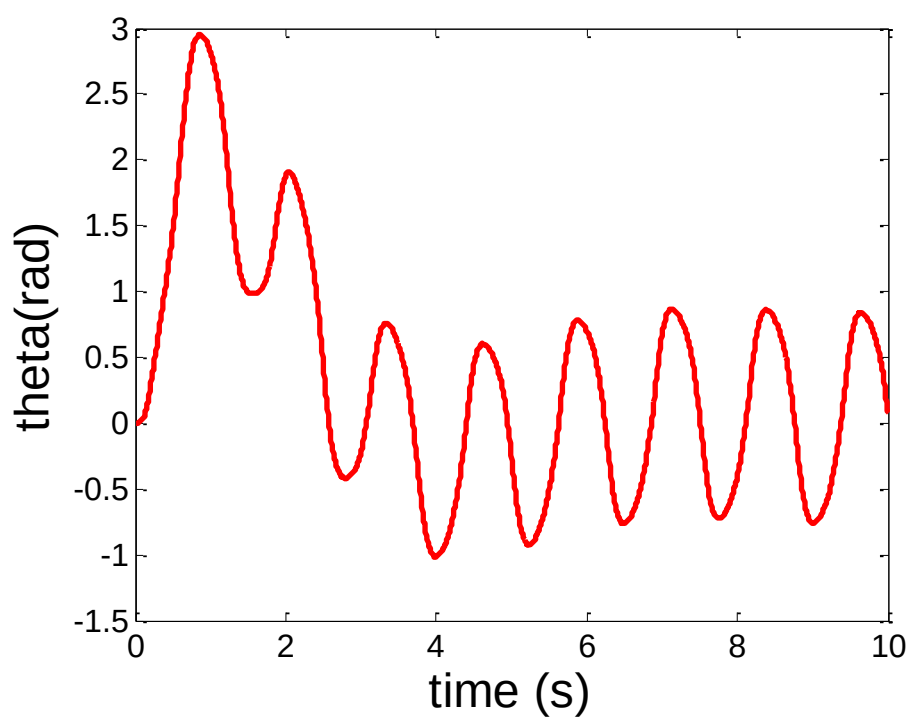
شکل (۳-۲): اغتشاش اعمالی



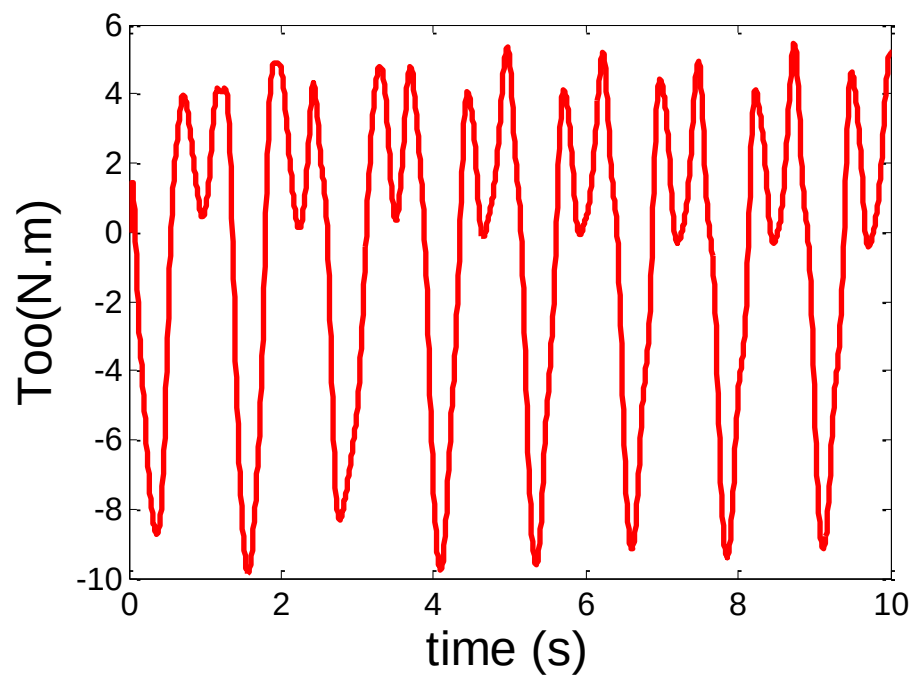
شکل (۳-۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه



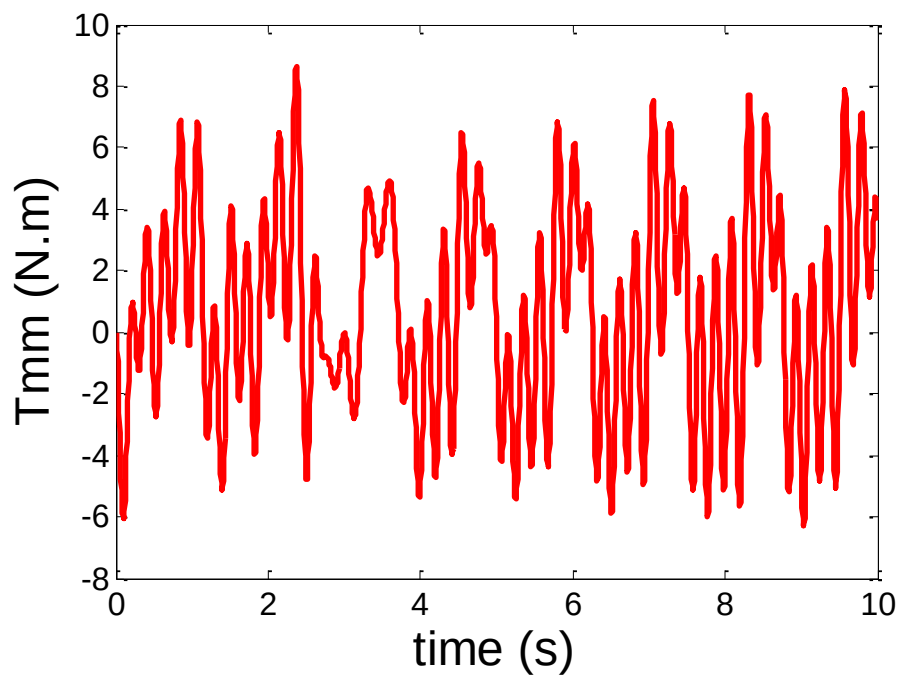
شکل (۳-۴): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی



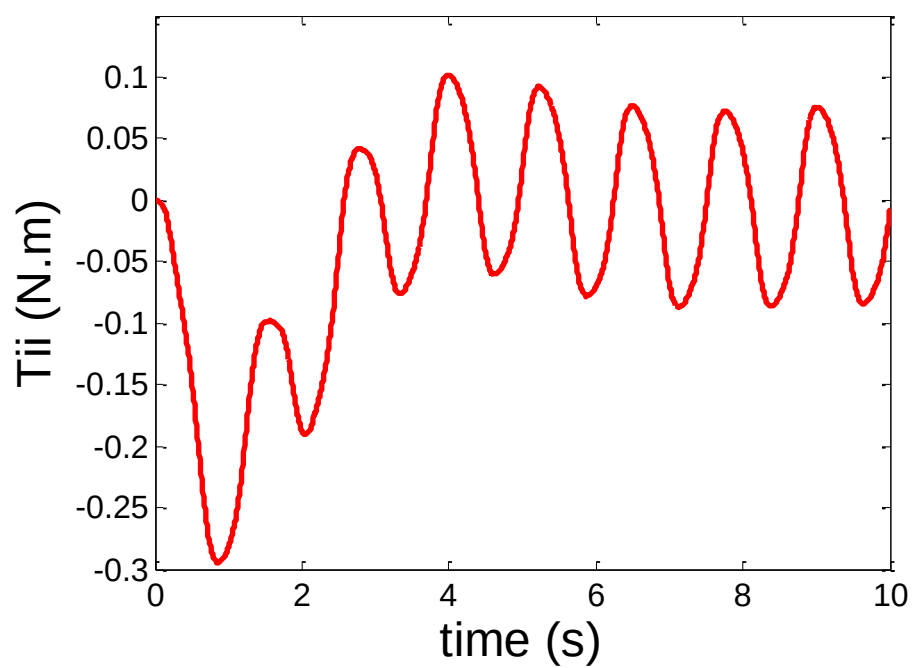
شکل (۳-۵): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو



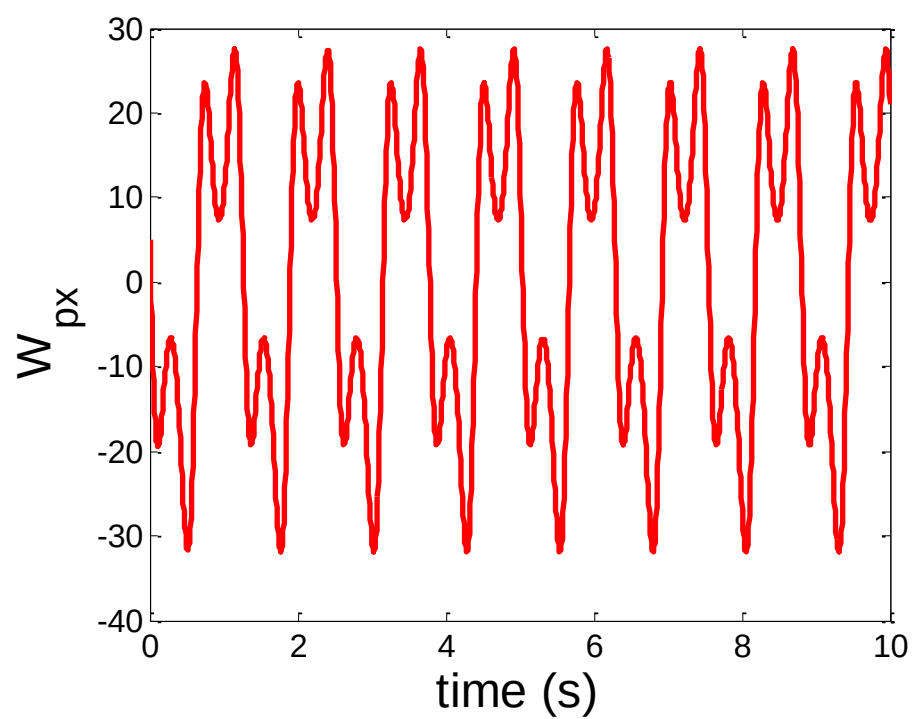
شکل (۳-۶): گشتار اعمالی به قاب خارجی



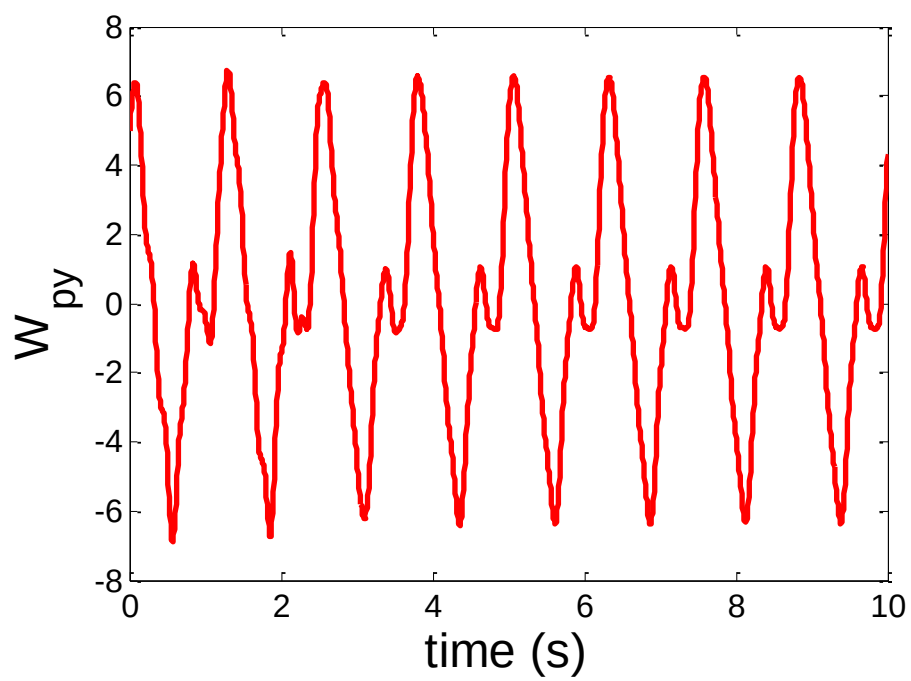
شکل (۳-۷): گشتاور اعمالی به قاب میانی



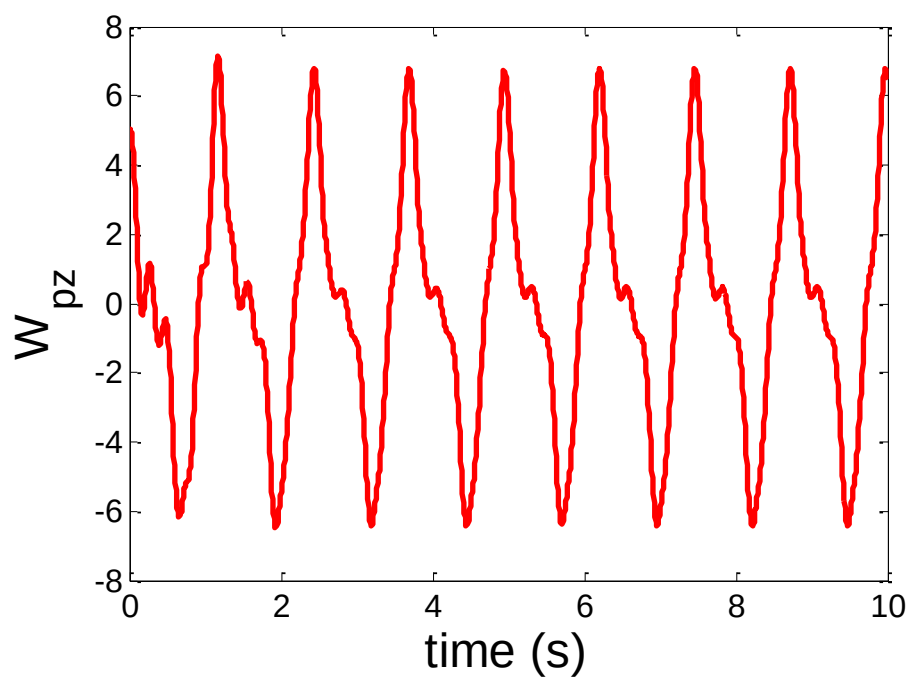
شکل (۸-۳): گشتاور اعمالی به قاب داخلی



شکل (۹-۳): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور X



شکل (۳-۱۰): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور Y



شکل (۳-۱۱): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور Z

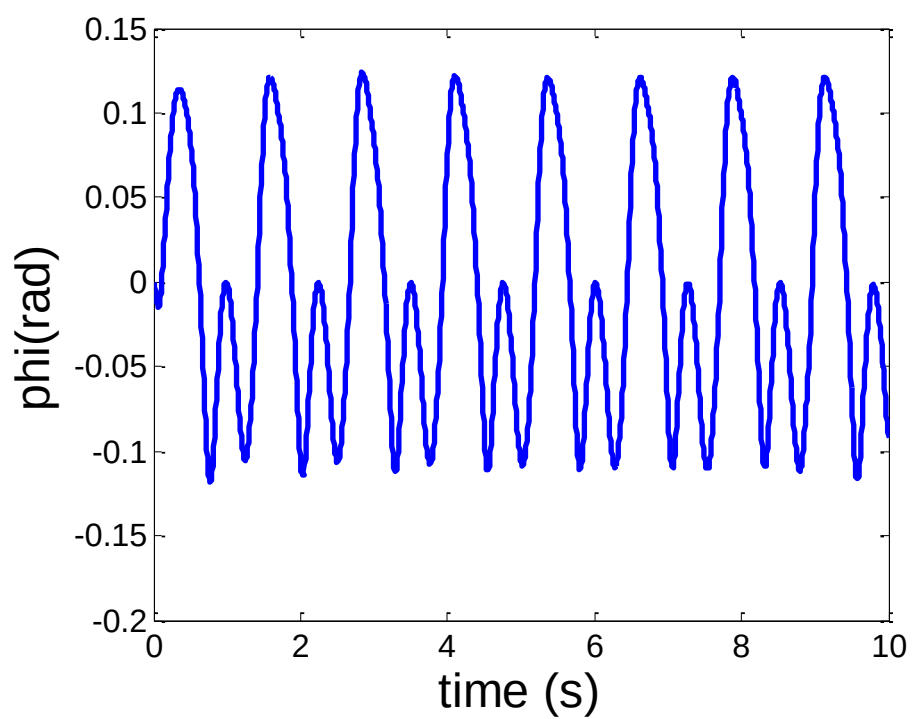
۳-۳: طراحی کنترل کننده PID با ضرایب جدید

در ادامه با تغییر ضرایب کنترل کننده PID به دنبال بهبود پاسخ سیستم هستیم. بنابراین با توجه به دانش و تجربه در تعیین ضرایب برای طراحی کنترل کننده‌های پیشین، ضرایب را به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

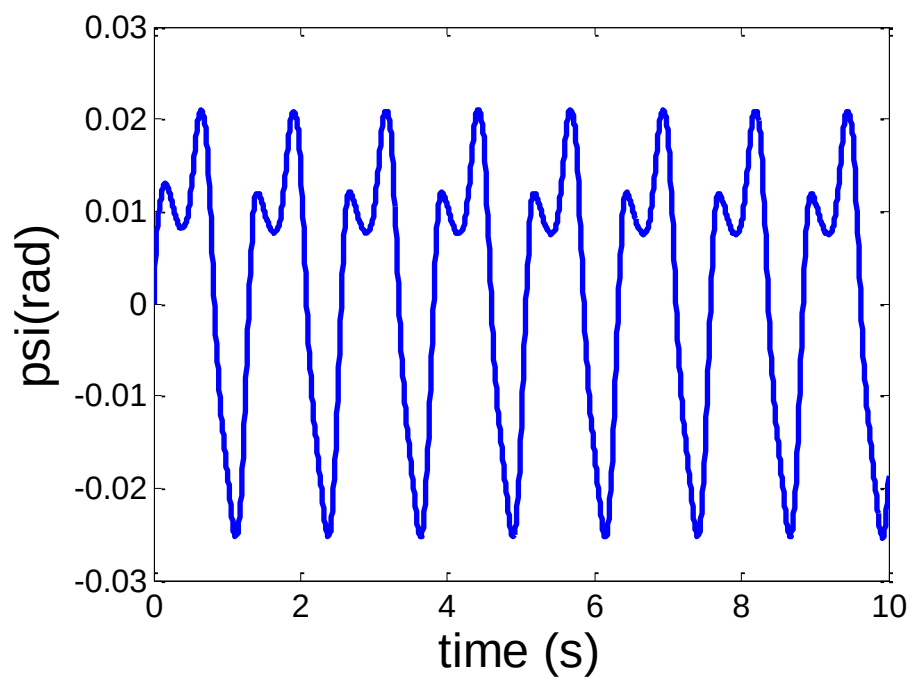
جدول (۳-۳): پارامترهای کنترل کننده PID

	T_{ii}	T_{mm}	T_{oo}
K_p	۱۰۰	۱۰۰	۶۰
K_I	۰,۰۱	۰,۰۱	۰,۱
K_d	۲۰	۲۰	۲,۷۵

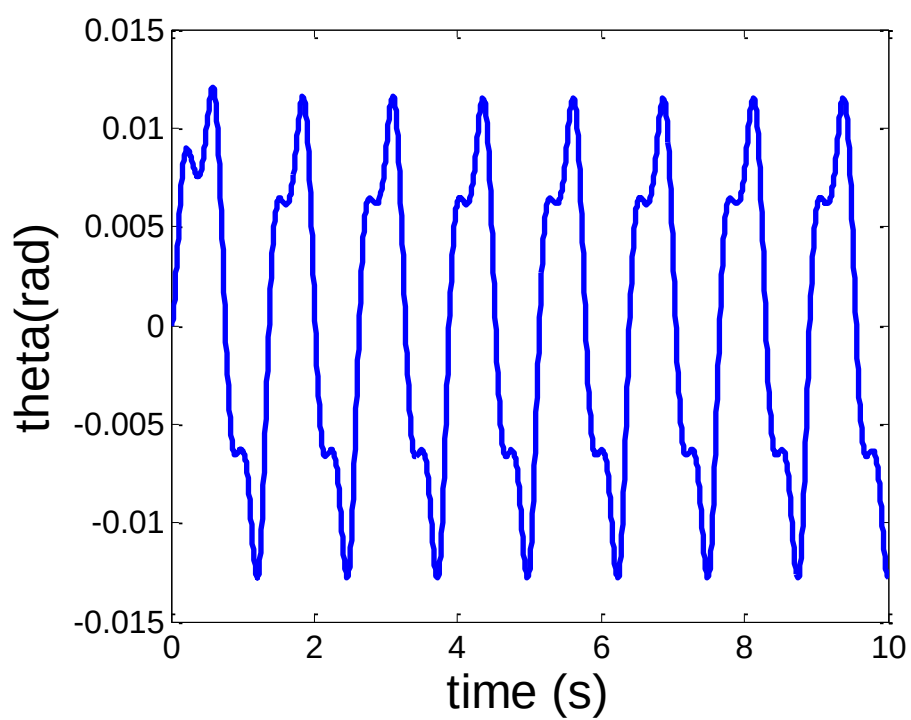
اغتشاش اعمالی به سیستم به صورت $\phi_0 = \psi_0 = \theta_0 = \sin 5t$ می‌باشد که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. در شکل (۳-۳) تا شکل (۲۰-۳) این اثرات به کمک شبیه سازی نشان داده شده است.



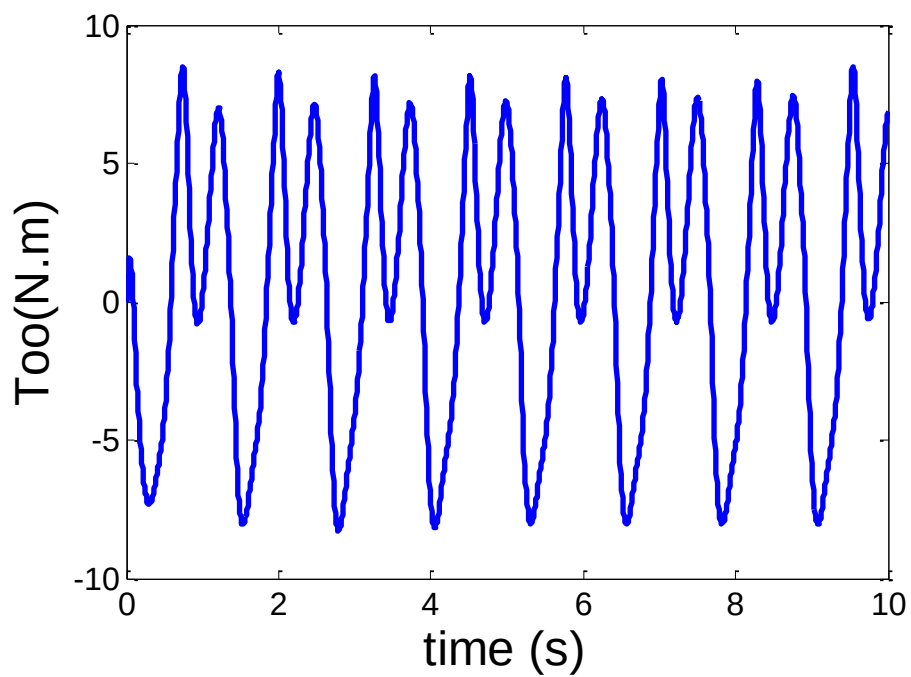
شکل (۳-۱۲): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه



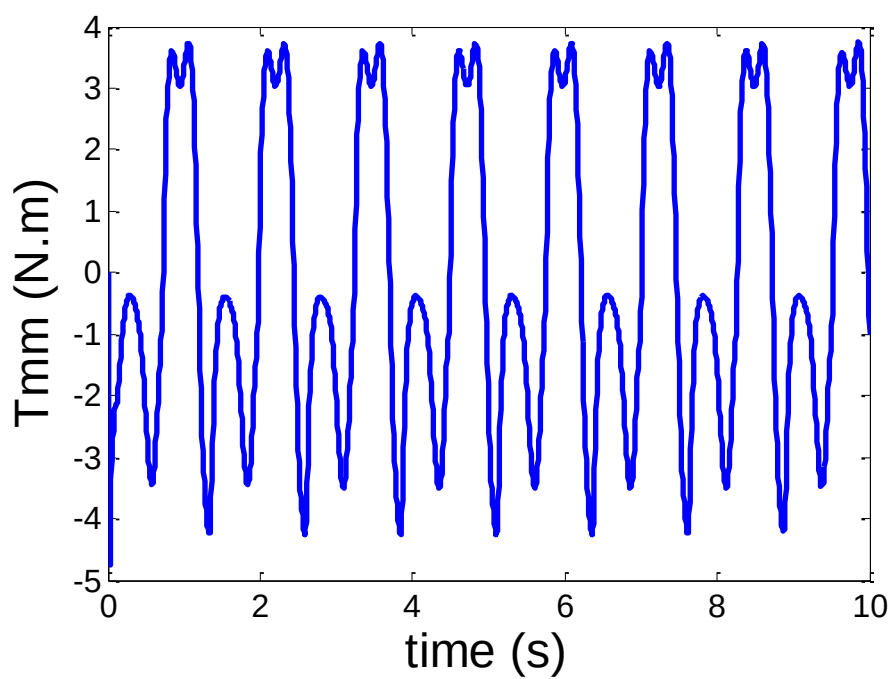
شکل (۳-۱۳): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی



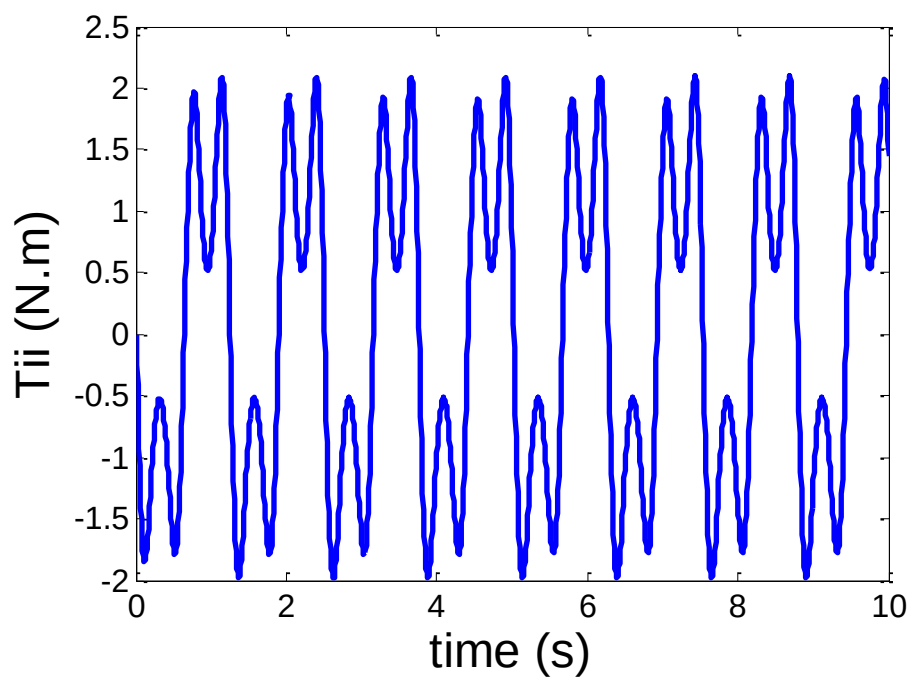
شکل (۳-۱۴): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو



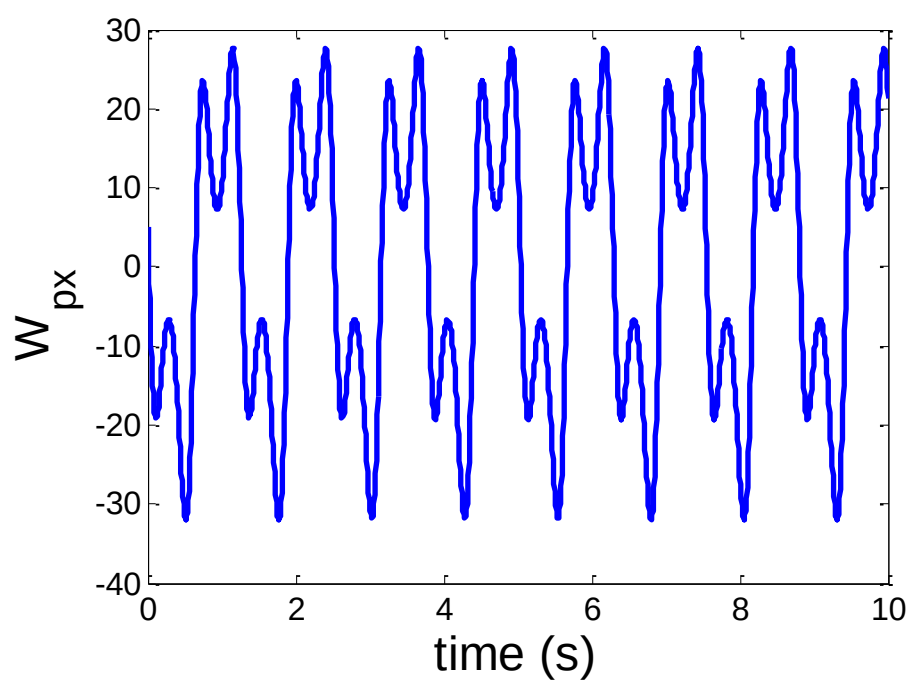
شکل (۳-۱۵): گشتار اعمالی به قاب خارجی



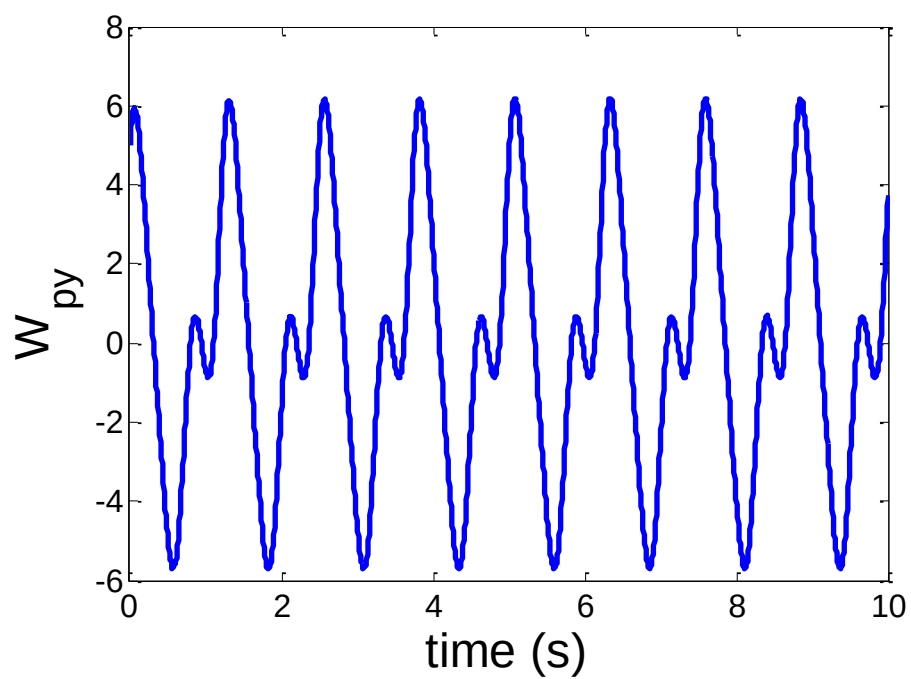
شکل (۳-۱۶): گشتاور اعمالی به قاب میانی



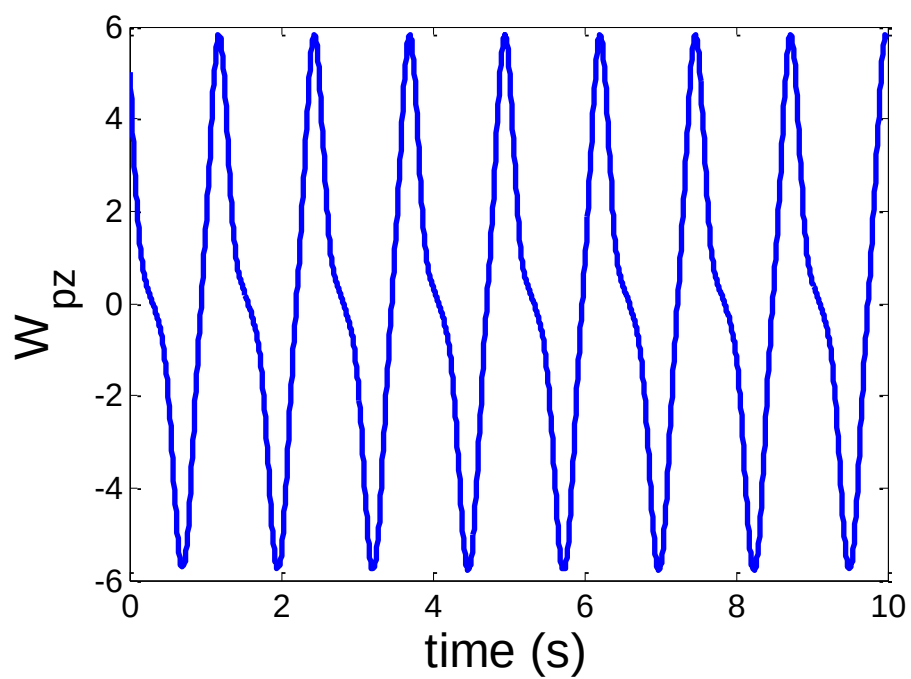
شکل (۳-۱۷): گشتاور اعمالی به قاب داخلی



شکل (۳-۱۸): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور X



شکل (۳-۱۹): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور Y



شکل (۳-۲۰): سرعت زاویه‌ای مطلق سکو حول محور Z

۳-۴ نتیجه گیری:

با استناد به نتایج فوق می‌توان استنباط نمود که طراحی کنترل کننده PID با ضرایب جدید پاسخ مطلوبی را ارائه داده است.

فصل چهارم

کنترل فازی مقاوم سیستم پایدار کننده

ژیروسکوپی سه محوره

اساساً گرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیر قطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تئوری دقیق می‌باشد. آنچه که یک سیستم فازی انجام می‌دهد آن است که دانش بشری را در چارچوبی مشابه یک فرمول ریاضی تبدیل می‌کند. سیستم‌های فازی سیستم‌هایی مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل شده است. سیستم‌های فازی امروزه در طیف وسیعی از علوم و فنون کاربرد پیدا کرده‌اند. از کنترل، پردازش سیگنال، ارتباطات، ساخت مدارهای مجتمع، بازرگانی، پزشکی و ... با این حال به عنوان یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن حل مسائل و مشکلات کنترل را می‌توان بیان کرد. با توجه به استفاده از دانش و تجربه افراد خبره در سیستم‌های فازی، این نوع سیستم نسبت به روش‌های کنترل کلاسیک برتری چشمگیری دارد [37]. با توجه به اینکه روش کنترل فازی وابسته به مدل نمی‌باشد از این جهت در بسیاری از کارهای تحقیقاتی و پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [38, 39]. سیستم فازی به عنوان تقریب گر عمومی برای تقریب هر تابع غیرخطی، نامعین، و همراه با عدم قطعیت به کار می‌رود که از ویژگی مهم و اساسی آن به حساب می‌آید. [40, 41, 42]. این توانایی سیستم‌های فازی، در کنترل-کننده‌های فازی تطبیقی که نوعی کنترل‌کننده فازی مقاوم به حساب می‌آیند، به طور مؤثری استفاده می‌شود. کنترل‌کننده‌ی فازی تطبیقی قابلیت تطبیق با تغییر در محیط و عدم قطعیت در مدل را دارد. با بهره‌گیری از روش کنترل فازی تطبیقی، کنترل ربات جهت ردگیری استفاده شده است [43]. در بررسی عوامل تأثیر گذار بر روی عملکرد کنترل‌کننده فازی تطبیقی می‌توان به: وابستگی به طراحی، شرایط اولیه و خطای تقریب سیستم فازی اشاره نمود. لذا تحلیل و بررسی پایداری با توجه به پیچیدگی سیستم فازی برای دستیابی به عملکرد مطلوب و اطمینان از نحوه عملکرد از اهمیت بسزایی برخوردار است. در مقاله [44] روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم ارائه شده است و جهت اثبات پایداری از روش مستقیم لیاپانوف استفاده شده است. در مقاله [45] بر روی ربات روش کنترل فازی تطبیقی مستقیم ارائه شده است. در این مقاله از استراتژی کنترل ولتاژ استفاده شده است. در ادامه به طراحی کنترل

کننده فازی مقاوم برای سیستم پایدار کننده ژيروسکوپی سه محوره می‌پردازیم:

۲-۴ طراحی کنترل کننده فازی مقاوم

در این بخش به طراحی سه کنترل کننده فازی مقاوم از نوع تطبیقی مستقیم برای متغیرهای حالت مورد نظر می‌پردازیم. برای طراحی سیستم کنترل ابتدا تلاش می‌کنیم اثر ضریب ورودی را حذف نماییم و سپس قانون کنترل را ارائه نماییم.

۱-۲-۴: طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه:

با استفاده از مدل دینامیکی ارائه شده در (۲-۱۰) داریم:

$$\ddot{\phi} = \frac{MZI \cdot A_{O\psi} - MXO \cdot A_{I\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (۱-۴)$$

با توجه به رابطه (۲-۲۱) داریم:

$$MXO = M_{COX}^* - MOX \quad (۲-۴)$$

و همچنین از رابطه (۲-۴۶) داریم:

$$M_{COX}^* = -D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(sgn\dot{\phi}) + T_{OO} \quad (۳-۴)$$

با مرتب سازی و جایگذاری رابطه (۳-۴) و (۲-۴) در رابطه (۱-۴) داریم:

$$\ddot{\phi} = \frac{MZI \cdot A_{O\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} - \frac{[(-D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(sgn\dot{\phi}) + T_{OO}) - MOX] \cdot A_{I\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (۴-۴)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{MZI \cdot A_{O\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} - \frac{\left[(-D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi})) - MOX \right] \cdot A_{I\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} - \frac{T_{OO}A_{I\psi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (5-4)$$

با اعمال رابطه $-\frac{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{I\psi}}$ به طرفین رابطه (5-4) داریم:

$$\begin{aligned} & -\frac{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{I\psi}} \ddot{\phi} \\ & = -\frac{MZI \cdot A_{O\psi}}{A_{I\psi}} + (-D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi})) - MOX + T_{OO} \end{aligned} \quad (6-4)$$

با اضافه و کم کردن $\ddot{\phi}$ به رابطه فوق داریم:

$$\ddot{\phi} = \ddot{\phi} + \frac{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{I\psi}} \ddot{\phi} - \frac{MZI \cdot A_{O\psi}}{A_{I\psi}} + (-D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi})) - MOX + T_{OO} \quad (7-4)$$

بنابراین داریم:

$$\ddot{\phi} = F(\phi) + T_{OO} \quad (8-4)$$

که در آن $F(\phi)$ برابر است با:

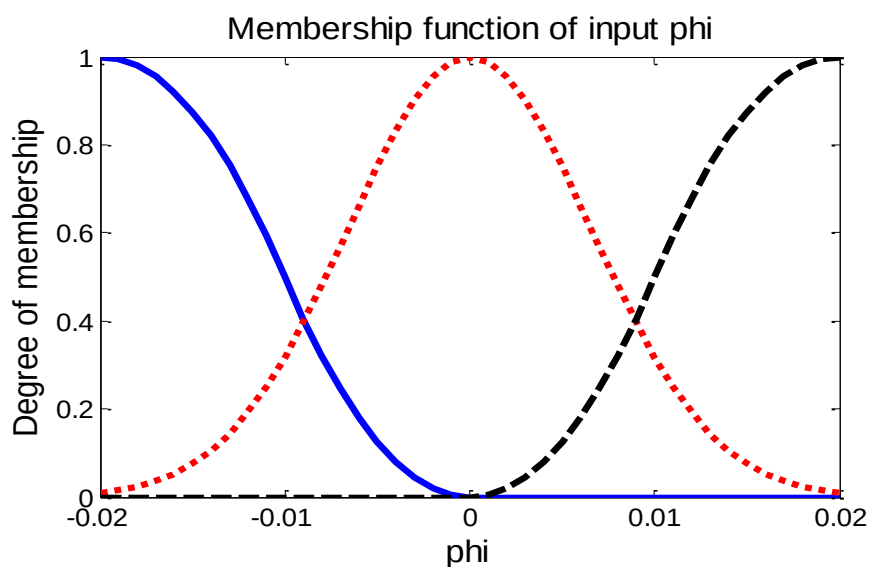
$$\begin{aligned} F(\phi) = & \ddot{\phi} + \frac{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{I\psi}} \ddot{\phi} - \frac{MZI \cdot A_{O\psi}}{A_{I\psi}} \\ & + (-D_{CO}\dot{\phi} - F_{CO}(\operatorname{sgn}\dot{\phi})) - MOX \end{aligned} \quad (9-4)$$

برای طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی مستقیم، در ابتدا لازم است بنابر دانش کنترلی یک کنترل

کننده فازی طراحی نماییم. زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه ϕ و مشتق آن $\dot{\phi}$ ورودی‌های سیستم فازی و گشتاور موتور خارجی T_{00} را به عنوان خروجی آن در نظر می‌گیریم. اگر ۳ تابع تعلق برای هر ورودی فازی در نظر گرفته شود، فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می‌شود. قوانین فازی زبانی به فرم ممدانی بدین صورت نوشته شده‌اند.

$$\text{Rule } l: \text{If } \phi \text{ is } A_l \text{ and } \dot{\phi} \text{ is } B_l \text{ Then } \hat{T}_{00} \text{ is } C_l \quad (۱۰-۴)$$

$Rule\ l$ قانون l ام را برای $l = 1, \dots, 9$ تعیین می‌نماید. A_l, B_l, C_l توابع تعلق فازی مربوط به $\phi, \dot{\phi}$ و T_{00} هستند. سه تابع تعلق Z, P و N برای متغیر ورودی ϕ مطابق شکل (۴-۱) در نظر گرفته شده است.



شکل (۴-۱): توابع تعلق ورودی ϕ

این توابع تعلق با توابع ریاضی (۴-۱۱) تا (۴-۱۳) تعریف شده‌اند.

$$\mu_P(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi \leq 0 \\ 2\left(\frac{\phi}{0/02}\right)^2 & 0 \leq \phi \leq \frac{0/02}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{\phi - 0/02}{0/02}\right)^2 & \frac{0/02}{2} \leq \phi \leq 0/02 \\ 1 & \phi \geq 0/02 \end{cases} \quad (۱۱-۴)$$

$$\mu_N(\phi) = \begin{cases} 1 & z_s \leq -0/02 \\ 1 - 2\left(\frac{\phi + 0/02}{0/02}\right)^2 & -0/02 \leq \phi \leq \frac{-0/02}{2} \\ 2\left(\frac{\phi}{0/02}\right)^2 & \frac{-0/02}{2} \leq \phi \leq 0 \\ 0 & \phi \geq 0 \end{cases} \quad (۱۲-۴)$$

$$\mu_Z(\phi) = \exp\left[-\frac{(\phi - \bar{\phi}^l)^2}{2\sigma^2}\right], \sigma = 0/0066 \quad (۱۳-۴)$$

توابع تعلق ϕ را نیز مشابه با ϕ انتخاب می‌نماییم. توابع تعلق متغیر خروجی T_{00} به صورت زیر با توابع گوسین تعریف می‌شود:

$$\mu_{C_l}(T_{00}) = \exp\left[-\frac{(T_{00} - \hat{y}^l)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (۱۴-۴)$$

که در آن $\hat{y}^l$ مرکز C_l است.

با استفاده از روابط فوق، قوانین فازی در جدول (۱-۴): قوانین فازی نوشته شده است.

جدول (۴-۱): قوانین فازی

Rule l	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
A_l	P	P	P	Z	Z	Z	N	N	N
B_l	P	Z	N	P	Z	N	P	Z	N
C_l	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9

اگر از موتور استنتاج فازی ممدانی، فازی ساز منفرد و غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده شود، [45]، جهت کنترل سیستم (۴-۱) می توان قانون کنترل فازی مقاوم زیر را پیشنهاد نمود:

$$T_{00} = \sum_{l=1}^9 \hat{y}_l \xi_l(\phi, \dot{\phi}) = \hat{y}^T \xi(\phi, \dot{\phi}) \quad (۴-۱۵)$$

که در آن $\xi = [\xi_1 \dots \xi_9]^T$ و ξ_l عبارتست از :

$$\xi_l = \frac{\mu_{A_l}(\phi) \mu_{B_l}(\dot{\phi})}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(\phi) \mu_{B_l}(\dot{\phi})} \quad (۴-۱۶)$$

در روابط فوق $\mu_{A_l}, \mu_{B_l} \in [0,1]$ هستند و پارامترهای $\hat{y}_l$ در ادامه توسط قوانین تطبیق بدست می آید.

با افزودن کنترل کننده فازی (۴-۱۵) به سیستم (۴-۱) خواهیم داشت:

$$\ddot{\phi} = F(\phi) + \hat{y}^T \xi(\phi, \dot{\phi}) \quad (۴-۱۷)$$

$\bar{y}$ تخمین $\bar{y}$ است که در ادامه تعریف خواهد شد. با توجه به ویژگی تقریب زنی سیستم های فازی می توان نوشت:

$$\ddot{\phi}_d + k_d(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + k_p(\phi_d - \phi) = F(\phi) + \bar{y}^T \xi(\phi, \dot{\phi}) + \gamma_c \quad (۴-۱۸)$$

که در آن γ_c خطای تقریب سیستم فازی و k_d و k_p پارامترهای مثبت طراحی کنترل کننده هستند. با

کم کردن دو طرف رابطه (۱۶-۴) و (۱۸-۴) داریم:

$$\ddot{\phi}_d - \ddot{\phi} + k_d(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + k_p(\phi_d - \phi) = (\bar{y} - \hat{y})^T \xi(\phi, \dot{\phi}) + \gamma_c \quad (۱۹-۴)$$

که با توجه به اینکه $\phi_d = 0$ است، داریم:

$$\ddot{\phi} = -k_d \dot{\phi} - k_p \phi + (\hat{y} - \bar{y})^T \xi - \gamma_c \quad (۲۰-۴)$$

با انتخاب متغیرهای حالت $x_1 = \phi$ و $x_2 = \dot{\phi}$ رابطه (۲۰-۴) را در فضای حالت بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (۲۱-۴)$$

$$\dot{x}_2 = -k_p x_1 - k_d x_2 + (\hat{y} - \bar{y})^T \xi - \gamma_c$$

$$\dot{X} = AX + BW \quad (۲۲-۴)$$

که در آن :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, X = [x_1 \ x_2]^T, W = (\hat{y} - \bar{y})^T \xi - \gamma_c \quad (۲۳-۴)$$

با تعریف تابع مثبت معین برای دستیابی به مکانیزم تطبیق به نحوی که خطا همگرا شود، به صورت زیر داریم:

$$V(x) = X^T S X + \frac{1}{2\alpha_c} (\hat{y} - \bar{y})^T (\hat{y} - \bar{y}) \quad (۲۴-۴)$$

در رابطه (۲۴-۴)، α_c یک مقدار ثابت بزرگتر از صفر را دارد که انتخاب آن دست طراح است و ماتریس S مثبت معین متقارن می‌باشد که در معادله‌ی ماتریسی لیاپانوف زیر صدق می‌کند.

$$A^T S + S A = -Q \quad (۲۵-۴)$$

در این رابطه Q یک ماتریس مثبت معین متقارن است.

با استفاده از روابط (۲۲-۴) تا (۲۵-۴)، $\dot{V}(x)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V}(x) = -X^T Q X + (\hat{y} - \bar{y})^T \left(2X^T S B \xi + \frac{1}{\alpha_c} \dot{\hat{y}} \right) - 2X^T S B \gamma_c \quad (۲۶-۴)$$

چنان که می‌دانیم جمله اول در رابطه (۲۶-۴) به دلیل مثبت بودن تمام مقادیر ویژه ماتریس Q ، همواره منفی معین است، ولی علامت جمله دوم نامعین است و با برابر صفر قرار دادن آن قانون تطبیق برای $\hat{y}$ به صورت زیر بدست آید:

$$\dot{\hat{y}} = -2\alpha_c X^T S B \xi \quad (۲۷-۴)$$

در نتیجه اعمال رابطه (۲۷-۴) به (۲۶-۴) بدست می‌آید:

$$\dot{V}(x) = -X^T Q X - 2X^T S B \gamma_c \quad (۲۸-۴)$$

در نتیجه پارامترهای تطبیق بدین صورت بدست می‌آید:

$$\hat{y} = - \int_0^t 2\alpha_c X^T S B \xi \, dt + \hat{y}(0) \quad (۲۹-۴)$$

برای کاهش خطای ردگیری باید $\dot{V}(x) < 0$ باشد. بنابراین:

$$-2X^T S B \gamma_c < X^T Q X \quad (۳۰-۴)$$

با در نظر گرفتن:

$$\lambda_{\min}(Q) \cdot \|X\|^2 \leq X^T Q X \leq \lambda_{\max}(Q) \|X\|^2 \quad (۳۱-۴)$$

که $\lambda_{\min}(Q)$ و $\lambda_{\max}(Q)$ حداقل و حداکثر مقادیر ویژه ماتریس Q هستند، برای تضمین (۳۰-۴) کافی است:

$$-2X^T S B \gamma_c < \lambda_{\min}(Q) \cdot \|X\|^2 \quad (۳۲-۴)$$

با توجه به نامساوی شوارتز داریم:

$$-2X^T SB\gamma_c < 2\|X\| \cdot \|S\| \cdot \|B\| \cdot |\gamma_c| \quad (33-4)$$

اگر داشته باشیم:

$$2\|X\| \cdot \|S\| \cdot \|B\| \cdot |\gamma_c| < \lambda_{\min}(Q) \cdot \|X\|^2 \quad (34-4)$$

نامساوی $\dot{V} < 0$ تضمین می‌شود. در نتیجه تا زمانی که رابطه فوق برقرار باشد $\phi \rightarrow \phi_d$ میل می‌کند.

یا به عبارت دیگر می‌توان گفت خطا وارد یک فضای کروی محدود به شعاع $\frac{2\|S\| \cdot \|B\| \cdot |\gamma_c|}{\lambda_{\min}(Q)}$ می‌شود.

بنابراین با توجه به برقراری رابطه‌ی (۳۰-۴) می‌توان نتیجه گرفت که V کاهش می‌یابد و در نتیجه آن هدف کنترلی محقق می‌گردد و پایداری سیستم اثبات می‌شود.

۲-۲-۴ طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی:

بر مبنای مدل دینامیکی سیستم پازیر (۲-۱) می‌توان نوشت:

$$\ddot{\psi} = \frac{MXI \cdot A_{I\phi} - MZI \cdot A_{O\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (35-4)$$

با توجه به رابطه (۲۰-۲) داریم:

$$MZI = M_{OIZ}^* - MIZ \quad (36-4)$$

و همچنین از رابطه (۲۰-۲) داریم:

$$M_{OIZ}^* = -D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\text{sgn}\dot{\psi}) + T_{mm} \quad (37-4)$$

با جایگذاری رابطه (۳۶-۴) و (۳۷-۴) در رابطه (۳۵-۴) و مرتب سازی داریم:

$$\ddot{\psi} = \frac{MXO \cdot A_{I\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (38-4)$$

$$- \frac{\left[(-D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\operatorname{sgn}\dot{\psi})) + T_{mm} \right] \cdot A_{O\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}$$

9

$$\ddot{\psi} = \frac{MXO \cdot A_{I\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} - \frac{\left[(-D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\operatorname{sgn}\dot{\psi})) - MIZ \right] \cdot A_{O\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}} \quad (39-4)$$

$$- \frac{T_{mm} A_{O\phi}}{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}$$

با اعمال رابطه $-\frac{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{O\phi}}$ به طرفین رابطه

(40-4) داریم:

$$- \frac{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{O\phi}} \ddot{\psi} \quad (40-4)$$

$$= - \frac{MXO \cdot A_{I\phi}}{A_{O\phi}} + \left[(-D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\operatorname{sgn}\dot{\psi})) - MIZ \right] + T_{mm}$$

با اضافه و کم کردن $\ddot{\psi}$ به رابطه فوق داریم:

$$\ddot{\psi} = \ddot{\psi} + \frac{A_{I\phi} \cdot A_{o\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{O\phi}} \ddot{\psi} \quad (41-4)$$

$$= - \frac{MXO \cdot A_{I\phi}}{A_{O\phi}} + \left[(-D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\operatorname{sgn}\dot{\psi})) - MIZ \right] + T_{mm}$$

بنابراین داریم:

$$\ddot{\psi} = F(\psi) + T_{mm} \quad (42-4)$$

که در آن $F(\psi)$ برابر است با:

$$\begin{aligned} F(\psi) &= \ddot{\psi} + \frac{A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}}{A_{O\phi}} \ddot{\psi} \\ &= -\frac{MXO \cdot A_{I\phi}}{A_{O\phi}} + [(-D_{OI}\dot{\psi} - F_{OI}(\operatorname{sgn}\dot{\psi})) - MIZ] \end{aligned} \quad (43-4)$$

برای طراحی سیستم کنترل فازی مقاوم در این بخش به مانند بخش قبل عمل می‌کنیم با این تفاوت که زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی ψ و مشتق آن $\dot{\psi}$ ورودی‌های سیستم فازی و گشتاور موتور میانی T_{mm} را به عنوان خروجی آن در نظر می‌گیریم. ۳ تابع تعلق برای هر ورودی فازی در نظر گرفته شده است و فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می‌شود. ادامه روند طراحی و اثبات پایداری مانند بخش قبل می‌باشد که نوشتن مجدد آن خودداری می‌کنیم.

۴-۲-۳ طراحی کنترل کننده برای کنترل زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم:

بر مبنای مدل دینامیکی سیستم پائیر (۱۲-۲) می‌توان نوشت:

$$\ddot{\theta} = \frac{A_{p\phi}[MXO \cdot A_{I\psi} - MZI \cdot A_{O\psi}]}{A_{p\theta}[A_{I\phi} \cdot A_{O\psi} - A_{I\psi} \cdot A_{O\phi}]} + \frac{MYP}{A_{p\theta}} \quad (44-4)$$

با توجه به رابطه (۱۹-۲) داریم:

$$MYP = M_{IPY}^* - MPY \quad (45-4)$$

و همچنین از رابطه (۴۰-۲) داریم:

$$M_{IPY}^* = -D_{IP}\dot{\theta} - F_{IP}(\operatorname{sgn}\dot{\theta}) + T_{ii} \quad (46-4)$$

با جایگذاری رابطه (۴۰-۲) و (۳۷-۴) در رابطه (۴۵-۴) و مرتب سازی داریم:

$$\ddot{\theta} = \frac{A_{p\phi}[MXO.A_{I\psi} - MZI.A_{O\psi}]}{A_{p\theta}[A_{I\phi}.A_{O\psi} - A_{I\psi}.A_{O\phi}]} + \frac{(-D_{IP}\dot{\theta} - F_{IP}(\text{sgn}\dot{\theta}) + T_{ii}) - MPY}{A_{p\theta}} \quad (47-4)$$

و

$$\ddot{\theta} = \frac{A_{p\phi}[MXO.A_{I\psi} - MZI.A_{O\psi}]}{A_{p\theta}[A_{I\phi}.A_{O\psi} - A_{I\psi}.A_{O\phi}]} + \frac{(-D_{IP}\dot{\theta} - F_{IP}(\text{sgn}\dot{\theta})) - MPY}{A_{p\theta}} + \frac{T_{ii}}{A_{p\theta}} \quad (48-4)$$

با اعمال رابطه $A_{p\theta}$ به طرفین رابطه (4-41) و با اضافه و کم کردن $\ddot{\theta}$ به آن داریم:

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta} - A_{p\theta}\ddot{\theta} + \frac{A_{p\phi}[MXO.A_{I\psi} - MZI.A_{O\psi}]}{A_{I\phi}.A_{O\psi} - A_{I\psi}.A_{O\phi}} + (-D_{IP}\dot{\theta} - F_{IP}(\text{sgn}\dot{\theta})) - MPY + T_{ii} \quad (49-4)$$

بنابراین داریم:

$$\ddot{\theta} = F(\theta) + T_{ii} \quad (50-4)$$

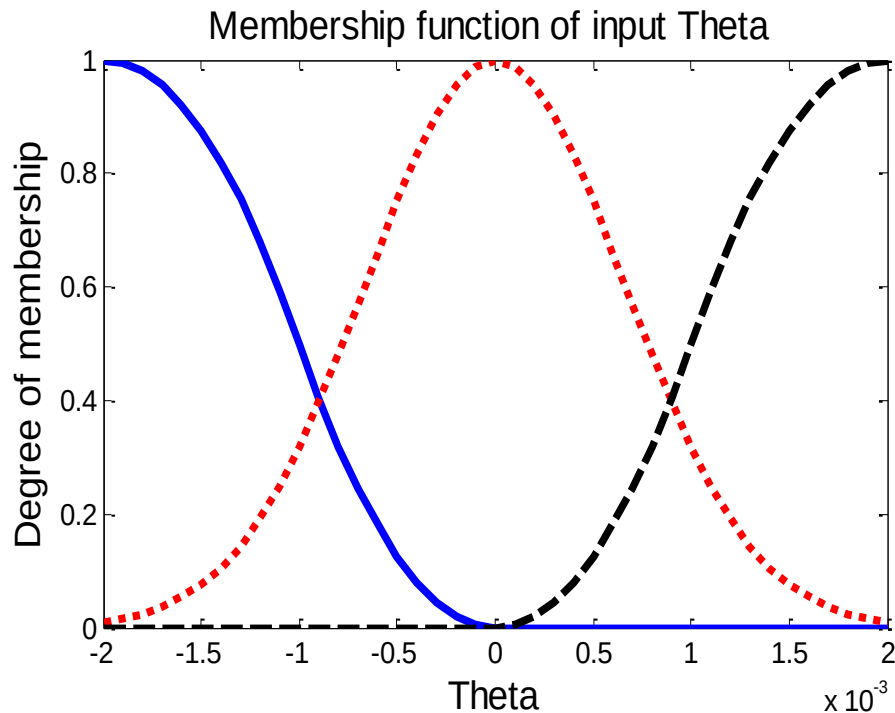
که در آن $F(\theta)$ برابر است با:

$$F(\theta) = \ddot{\theta} - A_{p\theta}\ddot{\theta} + \frac{A_{p\phi}[MXO.A_{I\psi} - MZI.A_{O\psi}]}{A_{I\phi}.A_{O\psi} - A_{I\psi}.A_{O\phi}} + (-D_{IP}\dot{\theta} - F_{IP}(\text{sgn}\dot{\theta})) - MPY \quad (51-4)$$

در این بخش برای طراحی سیستم کنترل فازی مقاوم همانند بخش ۳-۲-۱ عمل می کنیم با این تفاوت

که زاویه نسبی بین قاب داخلی و پلتفرم θ و مشتق آن $\dot{\theta}$ ورودی های سیستم فازی و گشتاور موتور

میانی T_{ii} را به عنوان خروجی آن در نظر می‌گیریم. ۳ تابع تعلق برای هر ورودی فازی در نظر گرفته شده است، که در شکل (۲-۶) نمایش داده شده است. فضای کنترل با ۹ قانون فازی پوشش داده می‌شود. ادامه روند طراحی و اثبات پایداری مانند بخش ۳-۲-۱ می‌باشد که از نوشتن مجدد آن خودداری می‌کنیم.



شکل (۲-۴): توابع تعلق ورودی θ

۳-۴- شبیه‌سازی کنترل‌کننده فازی مقاوم

پارامترهای مورد نیاز در طراحی کنترل‌کننده فازی مقاوم به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

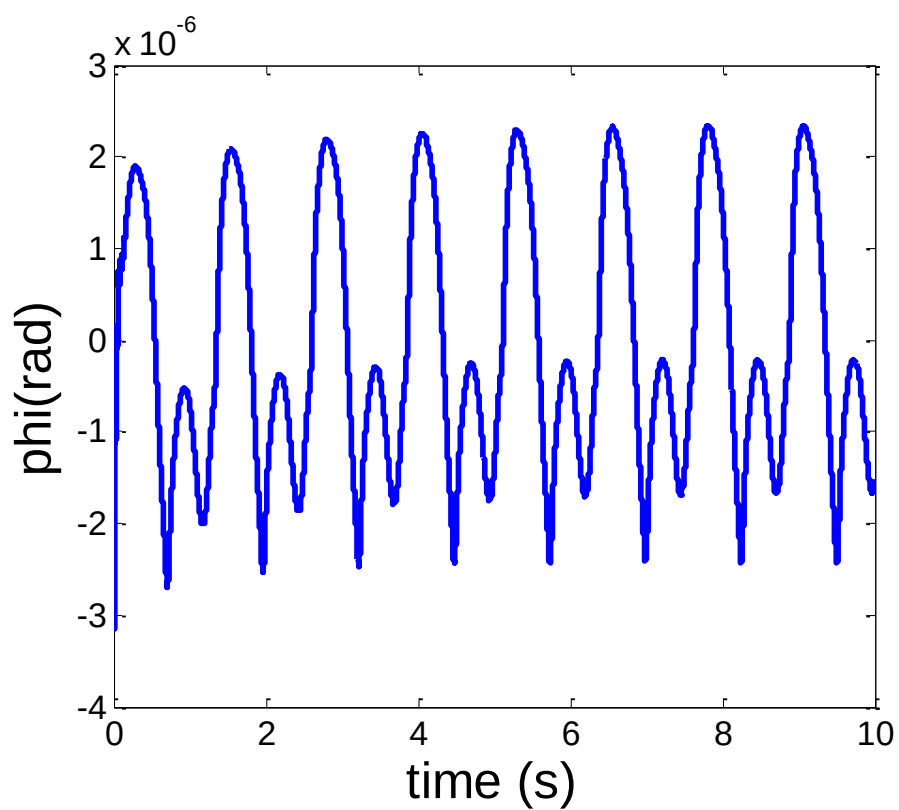
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -11 & -6 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 20000 & 0 \\ 0 & 20000 \end{bmatrix}, \quad \alpha_c = 800, \quad (52-4)$$

$$\hat{p}(0) = 0$$

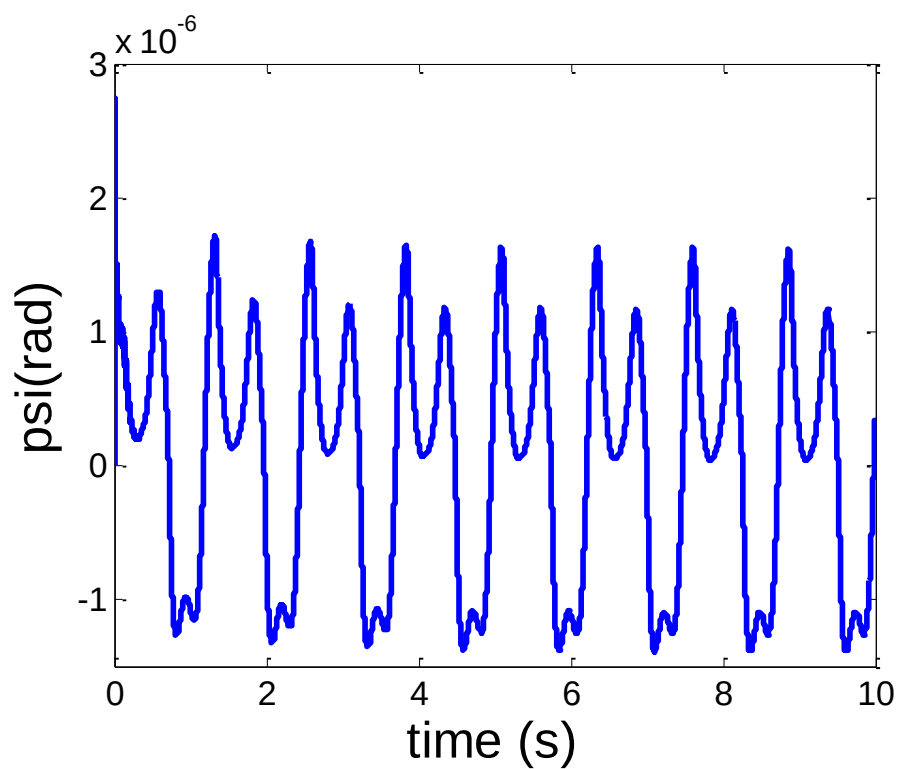
در شبیه‌سازی با انتخاب ماتریس Q مطابق فوق، ماتریس S را با استفاده از معادله لیاپانوف بیان شده در رابطه (۲۵-۴) محاسبه می‌کنیم. اغتشاش اعمالی به سیستم به صورت $\phi_0 = \psi_0 = \theta_0 = \sin 5t$

می‌باشد که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. در شکل (۳-۴) تا شکل (۴-۴) این اثرات به کمک

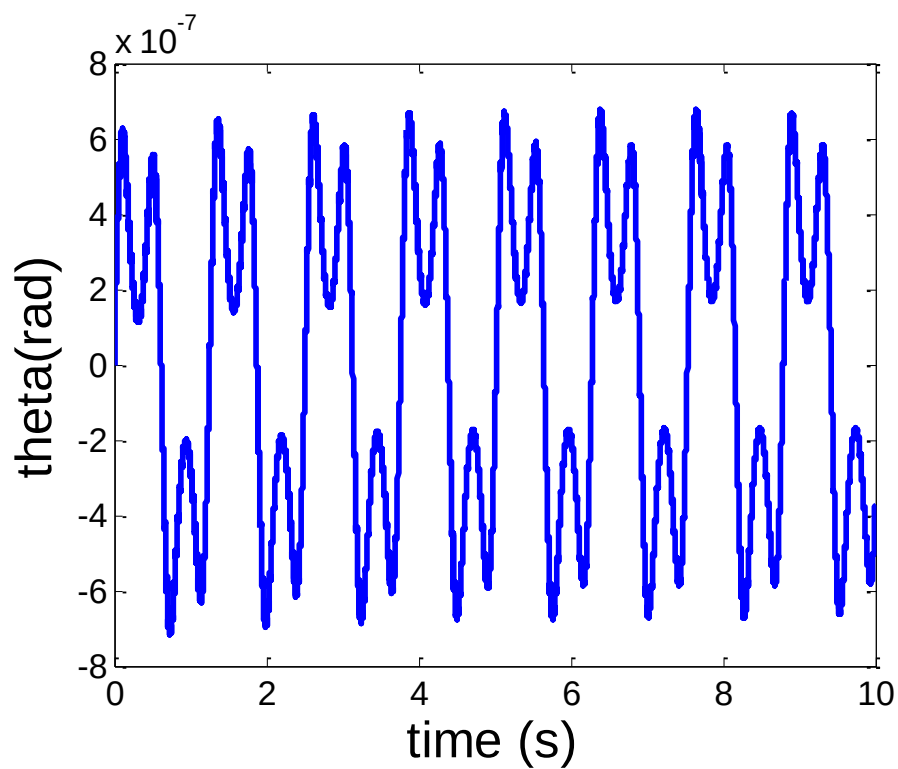
شبیه سازی نشان داده شده است



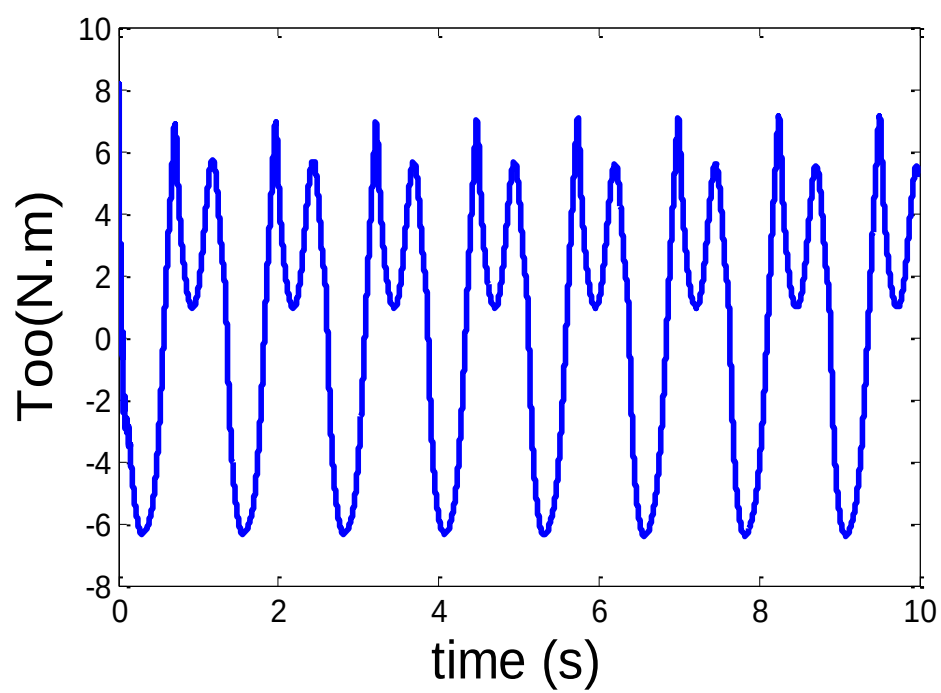
شکل (۳-۴): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه



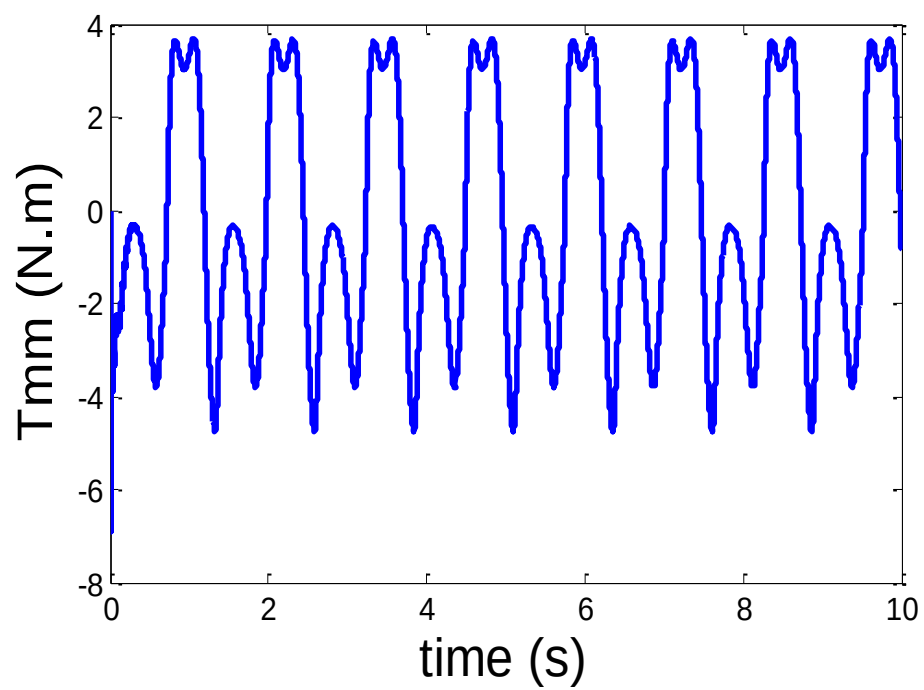
شکل (۴-۴): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی



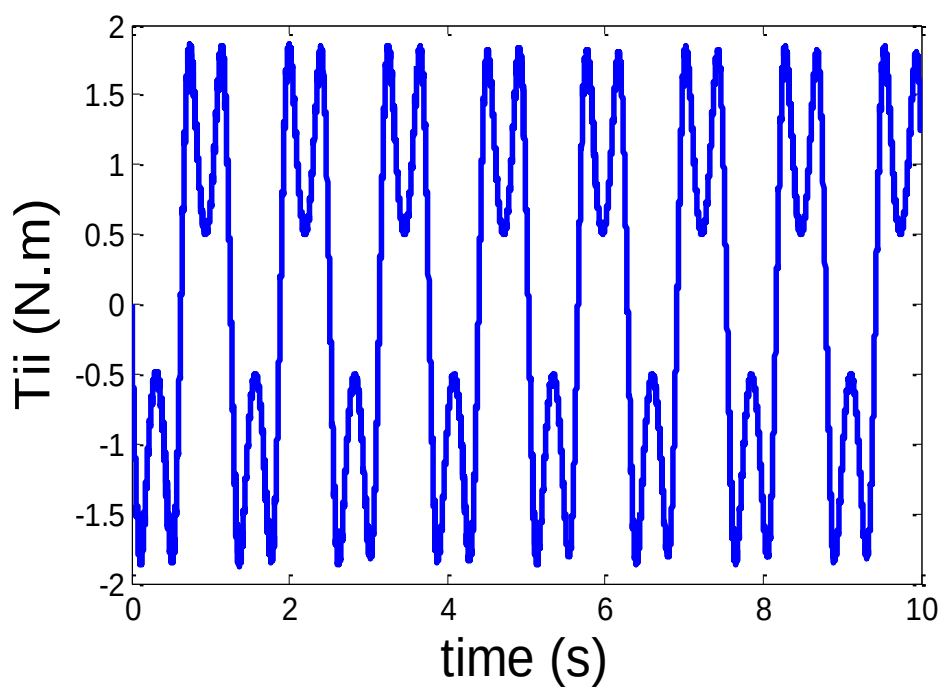
شکل (۵-۴): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو



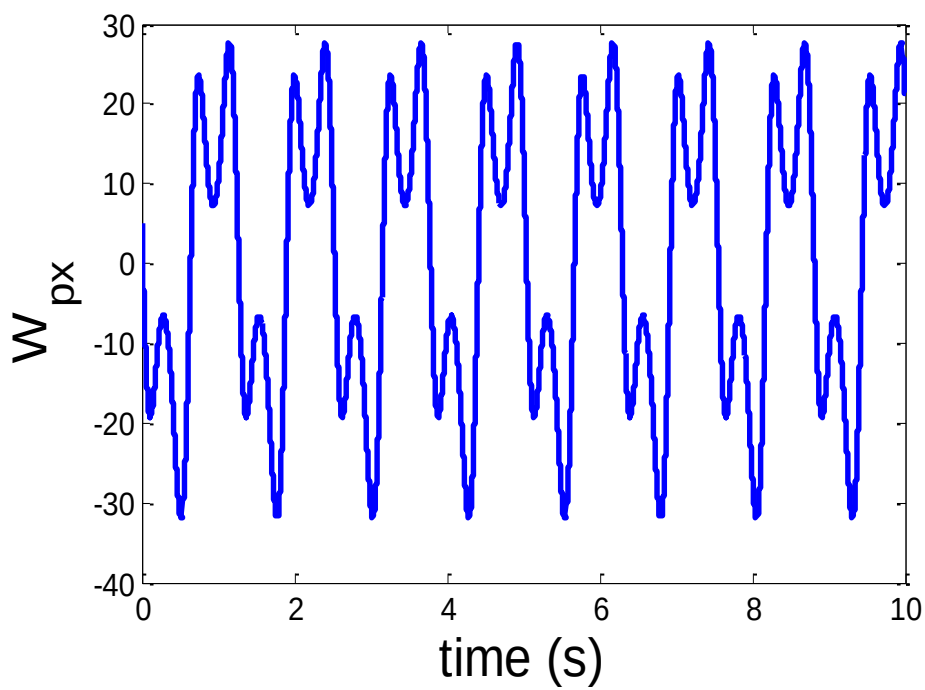
شکل (۴-۶): گشتاور اعمالی به قاب خارجی



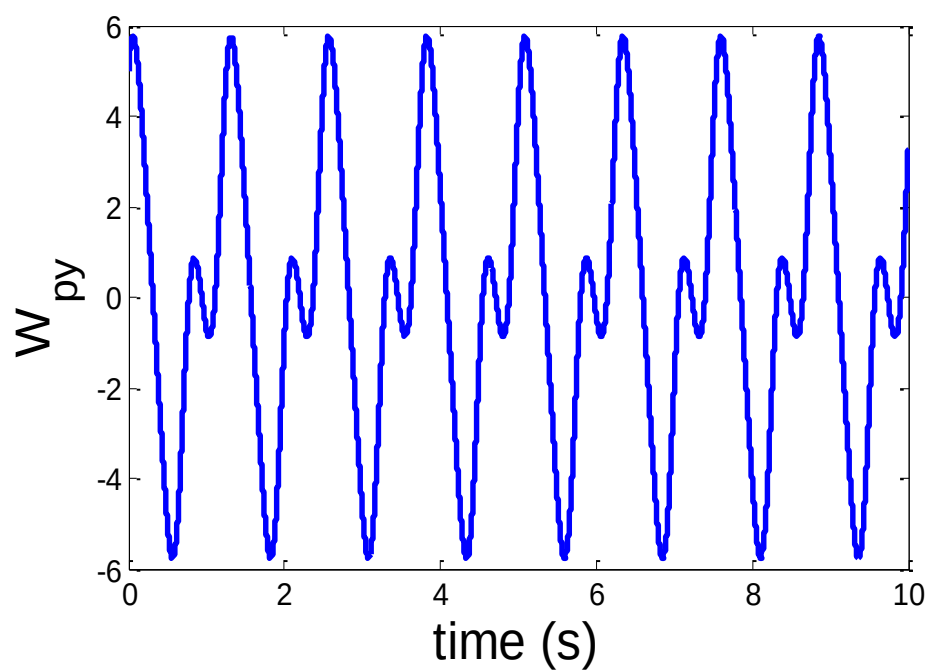
شکل (۴-۷): گشتاور اعمالی به قاب میانی



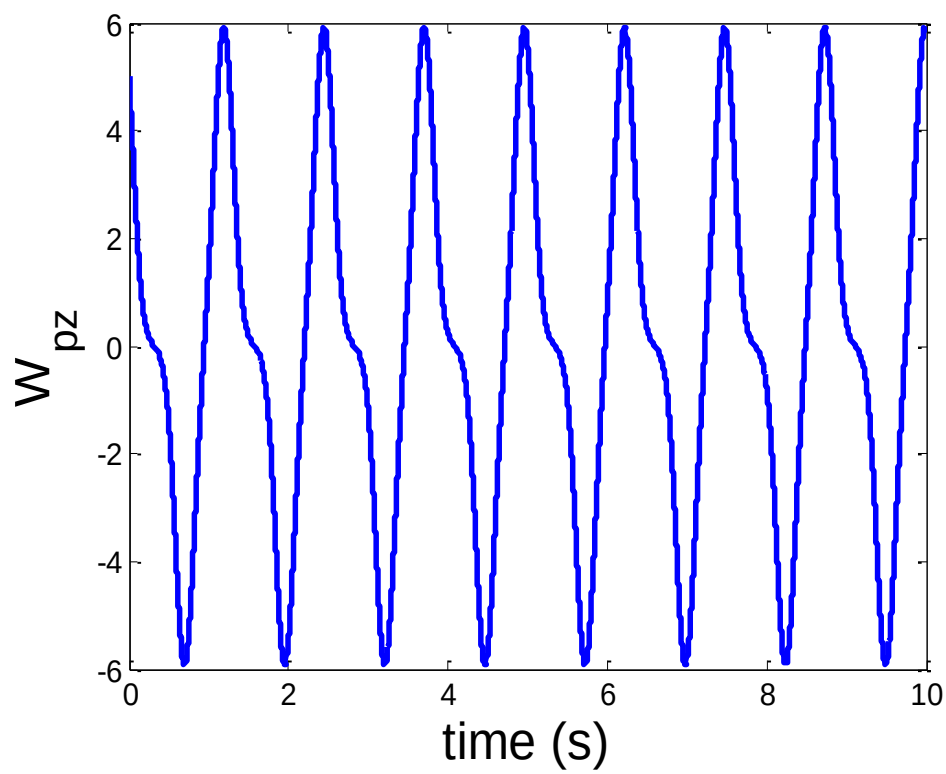
شکل (۸-۴): گشتاور اعمالی به قاب داخلی



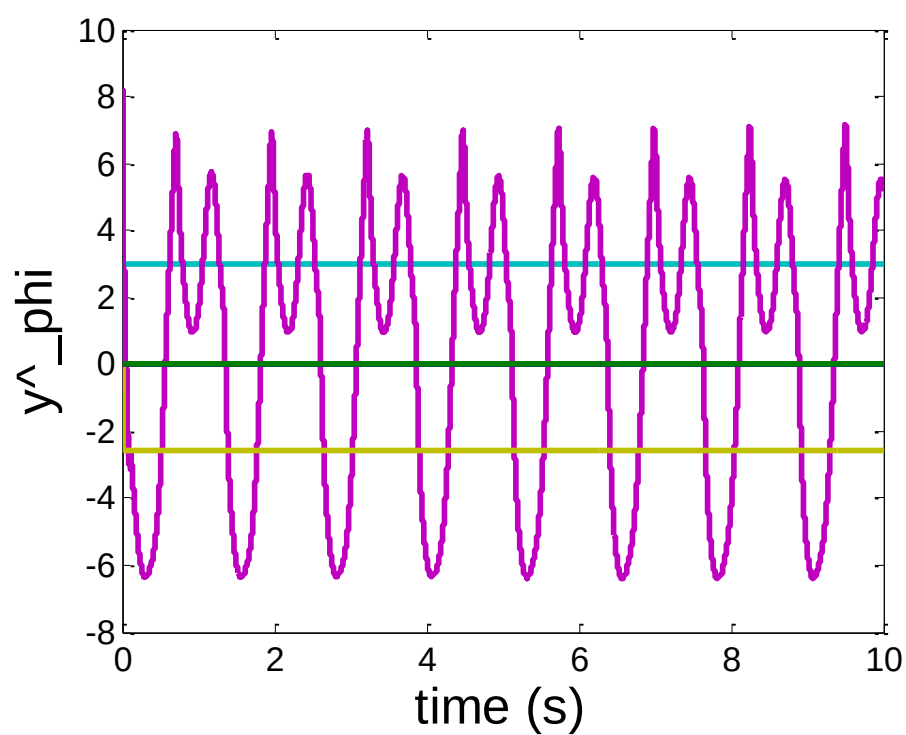
شکل (۹-۴): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x



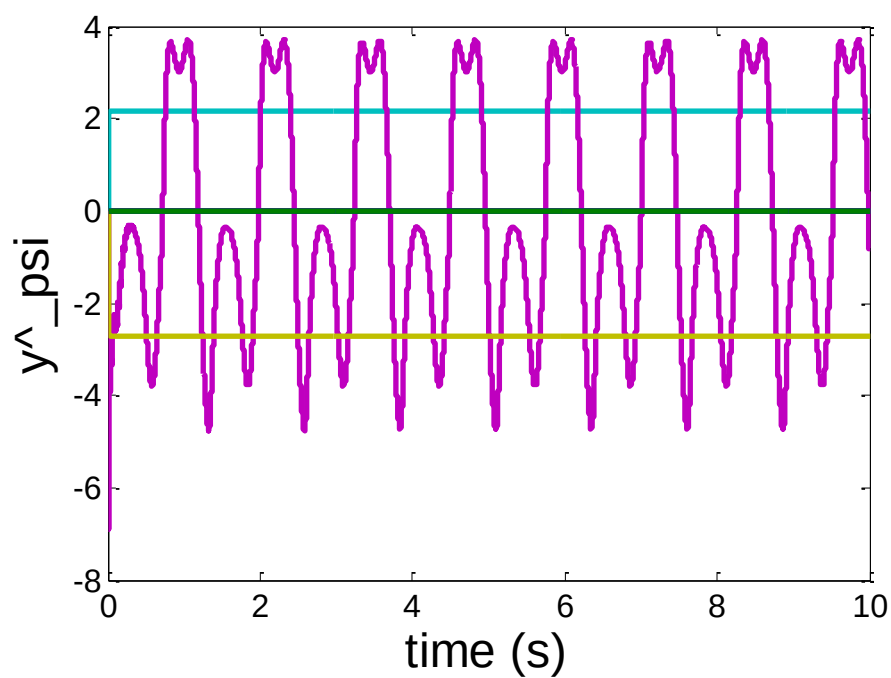
شکل (۴-۱۰): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Y



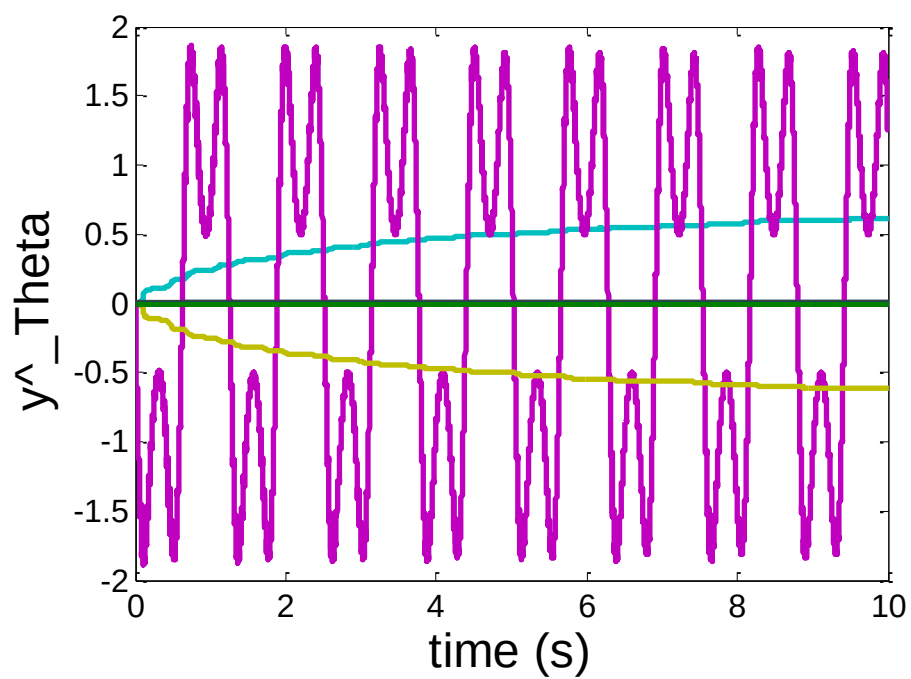
شکل (۴-۱۱): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z



شکل (۴-۱۲): پارامترهای تطبیق $\hat{Y}$ برای کنترل کننده ϕ

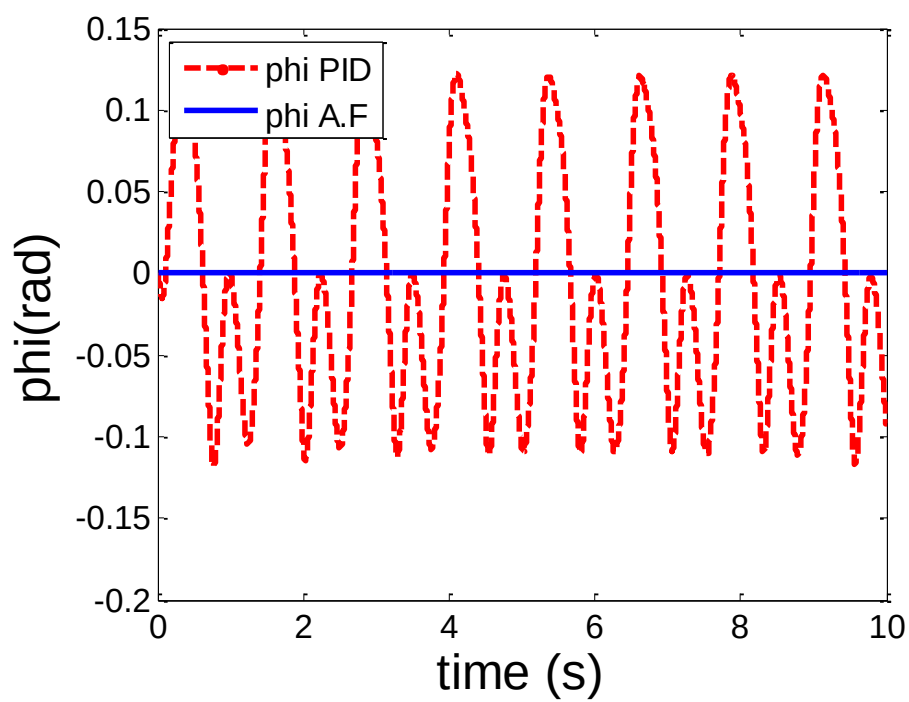


شکل (۴-۱۳): پارامترهای تطبیق $\hat{Y}$ برای کنترل کننده ψ

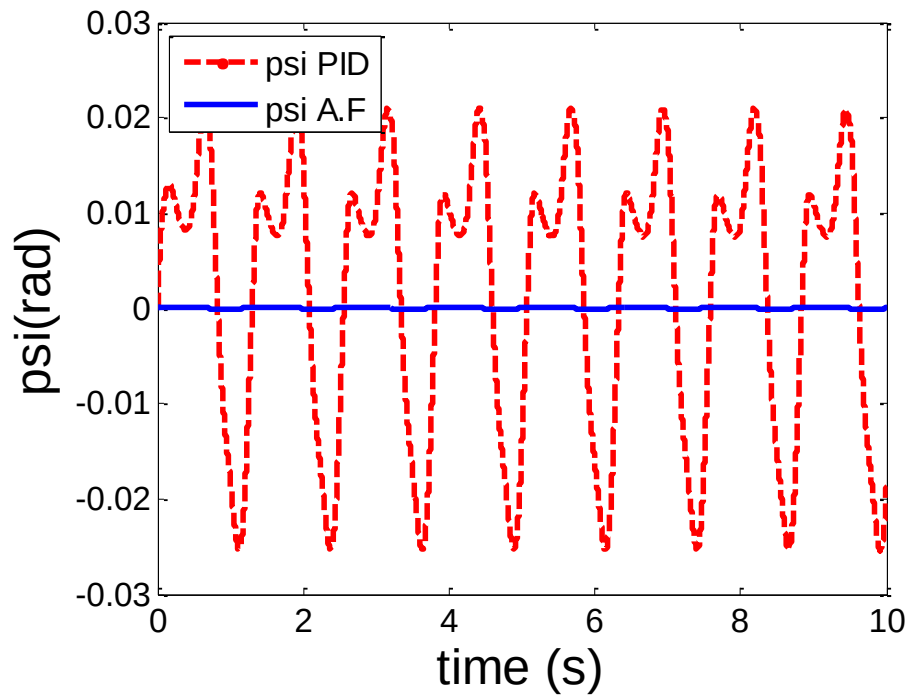


شکل (۴-۱۴): پارامترهای تطبیق $\hat{Y}$ برای کنترل کننده θ

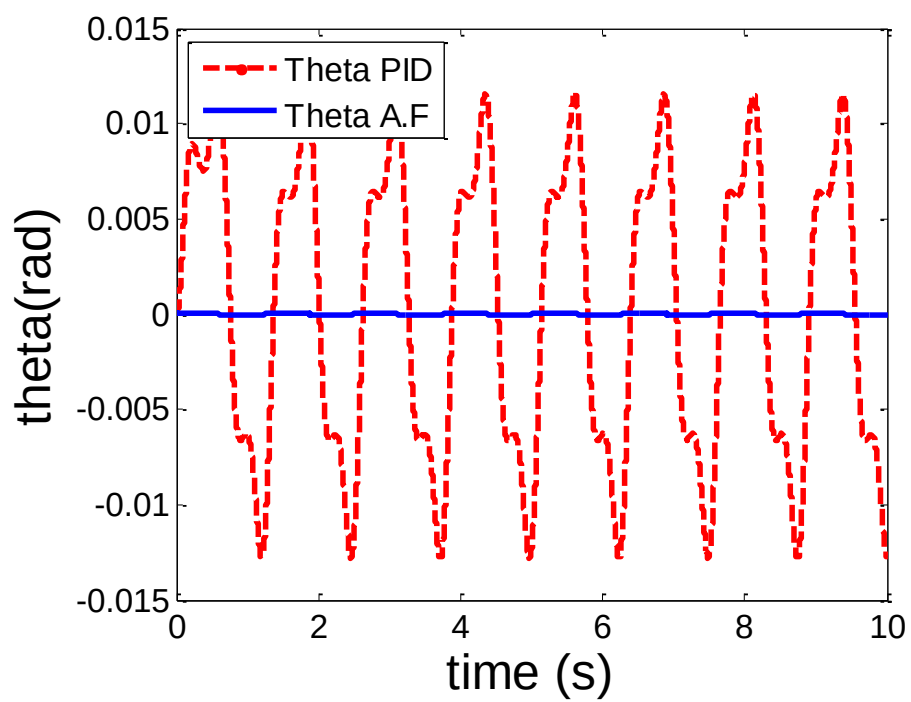
با توجه به نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که صفحه به خوبی پایدار شد. در ادامه به مقایسه پاسخ کنترل کننده های طراحی شده با یکدیگر می پردازیم.



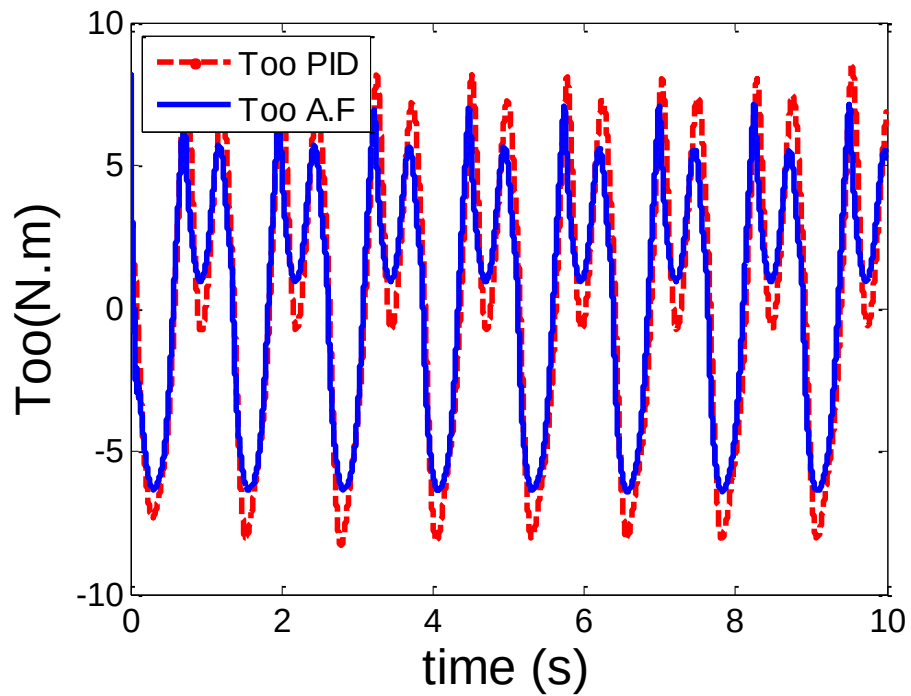
شکل (۴-۱۵): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه



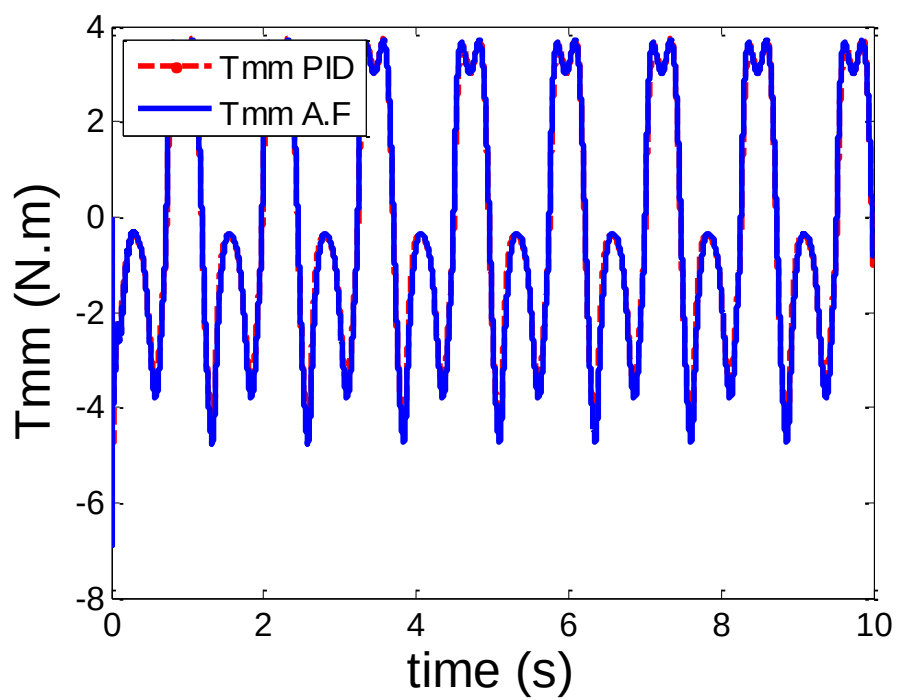
شکل (۴-۱۶): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی



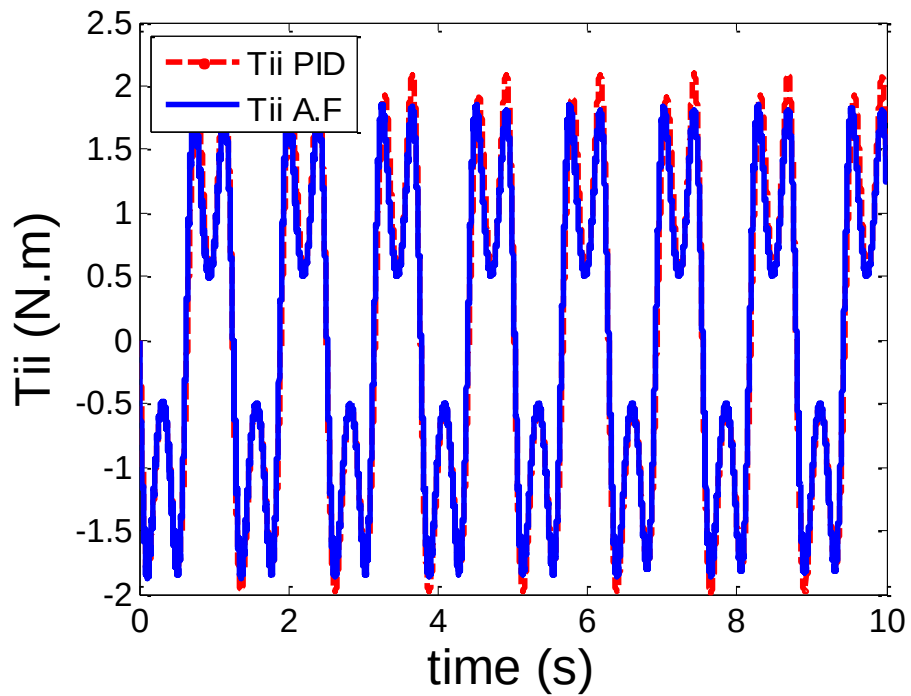
شکل (۴-۱۷): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو



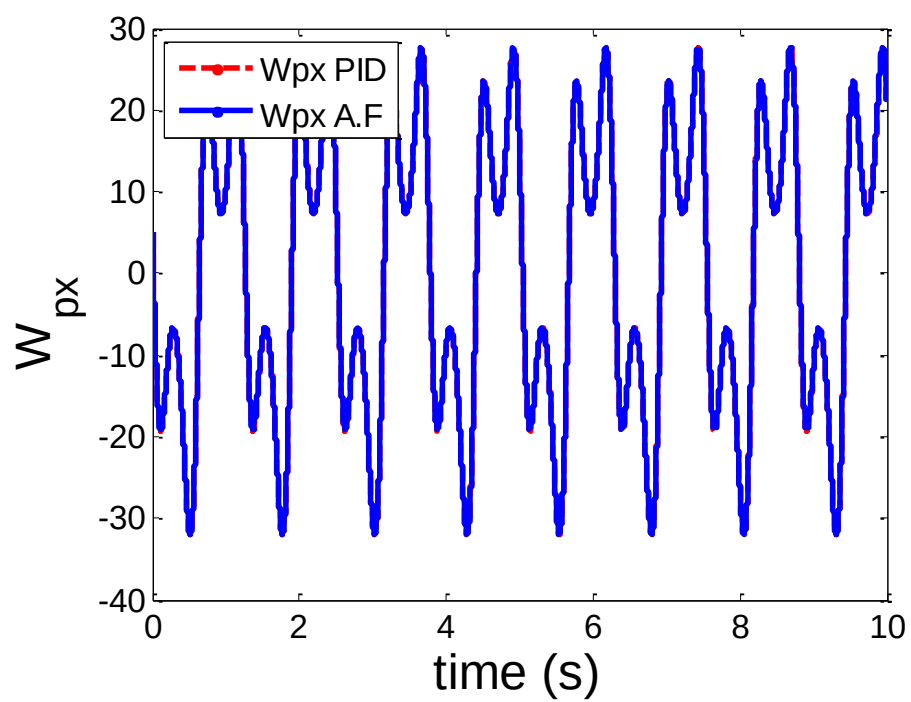
شکل (۴-۱۸): گشتاور اعمالی به قاب خارجی



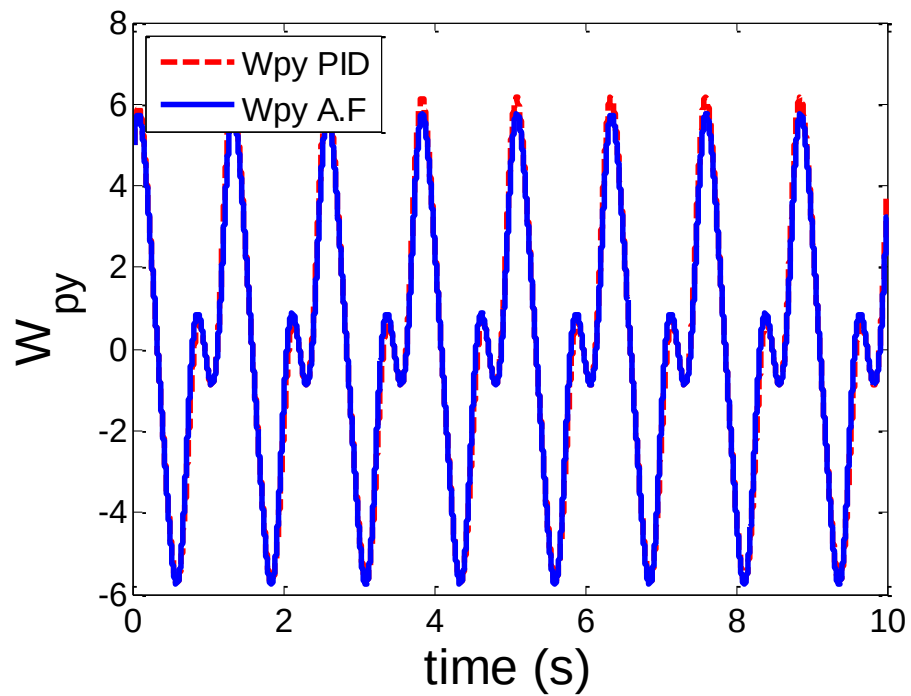
شکل (۴-۱۹): گشتاور اعمالی به قاب میانی



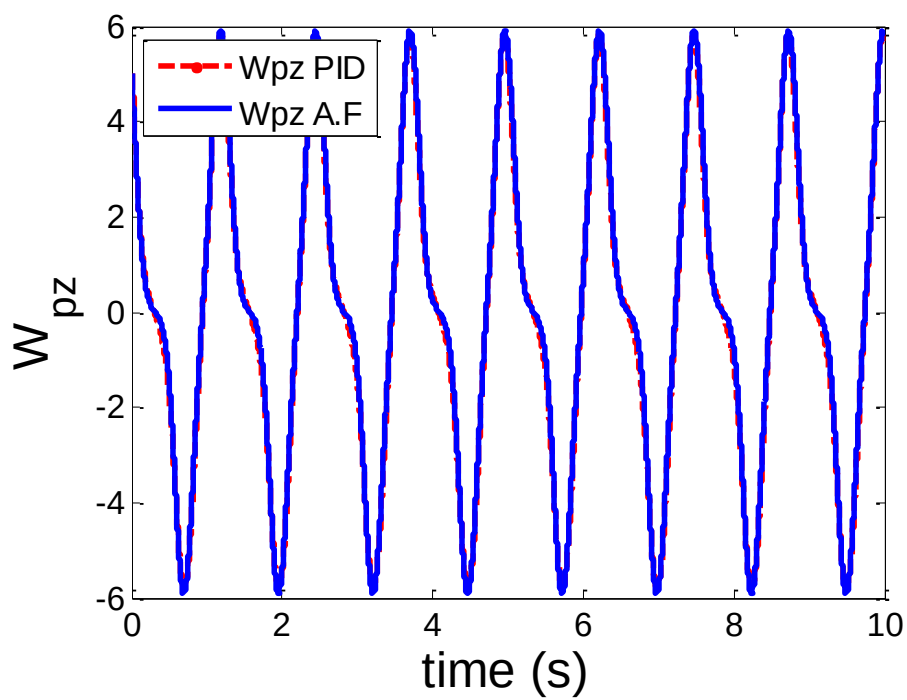
شکل (۴-۲۰): گشتاور اعمالی به قاب داخلی



شکل (۴-۲۱): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x

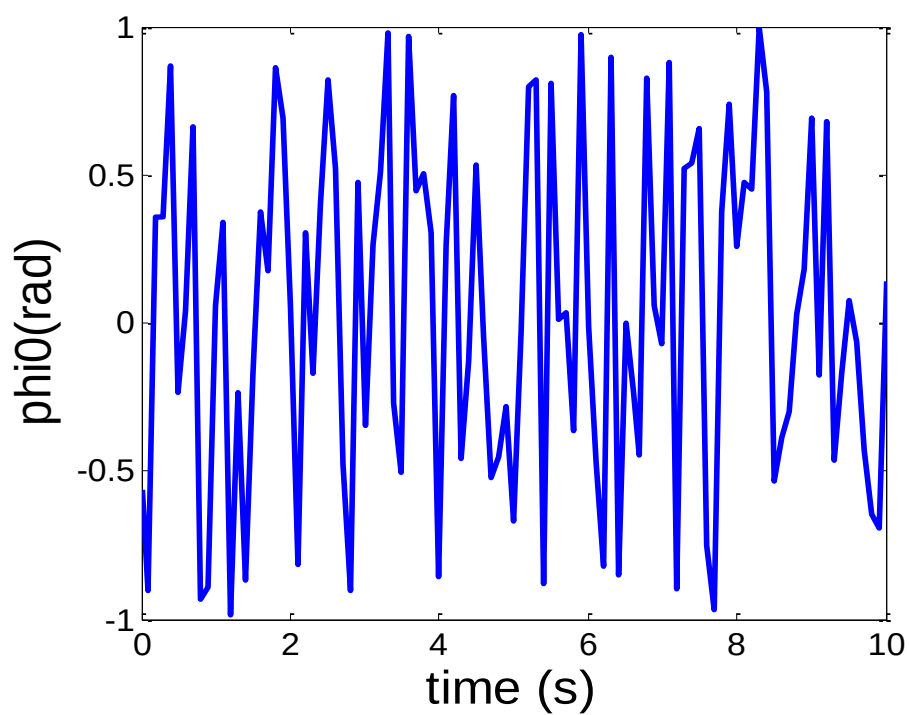


شکل (۴-۲۲): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور y



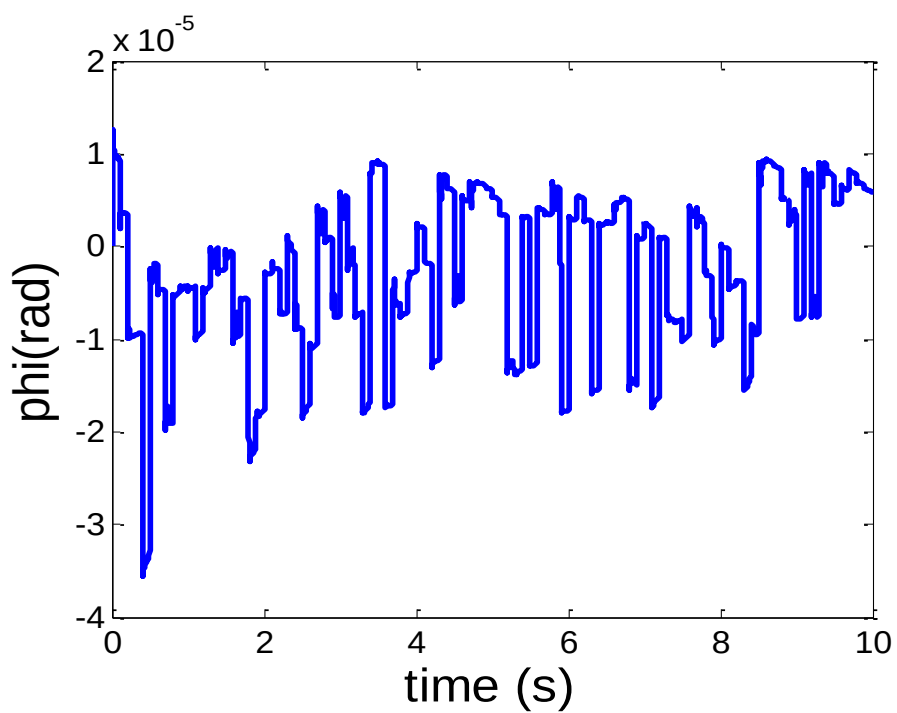
شکل (۴-۲۳): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z

با مقایسه نتایج شبیه سازی کنترل کننده PID با کنترل کننده فازی مقاوم عملکرد بسیار مطلوب این کنترل کننده مشاهده می شود. در این بخش به بررسی سیستم با اعمال اغتشاش به صورت شکل (۴-۲۴) می پردازیم.

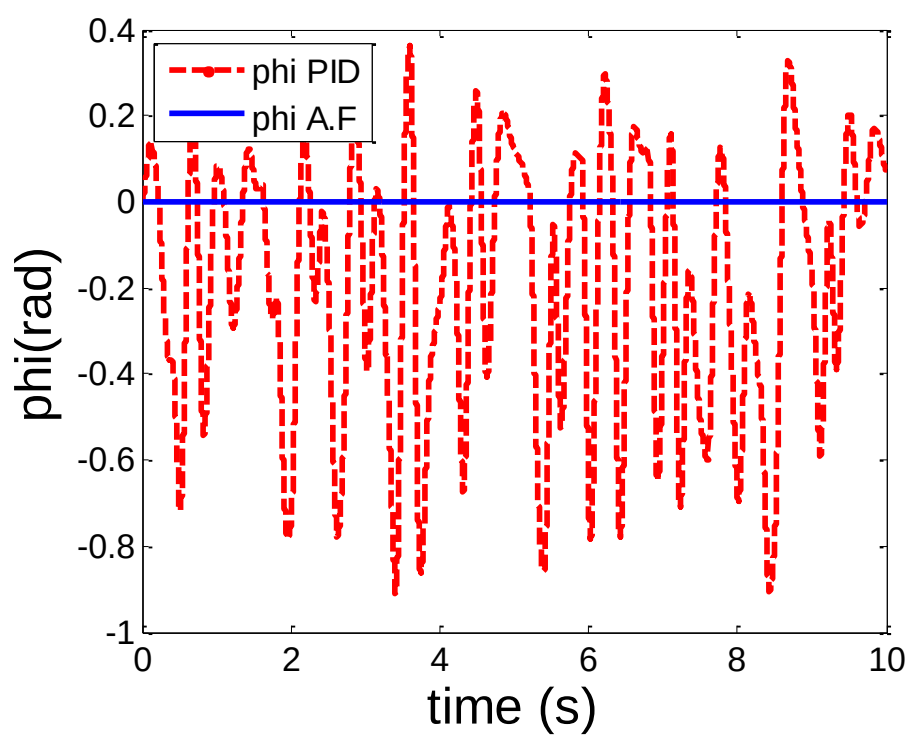


شکل (۴-۲۴): اغتشاش اعمالی

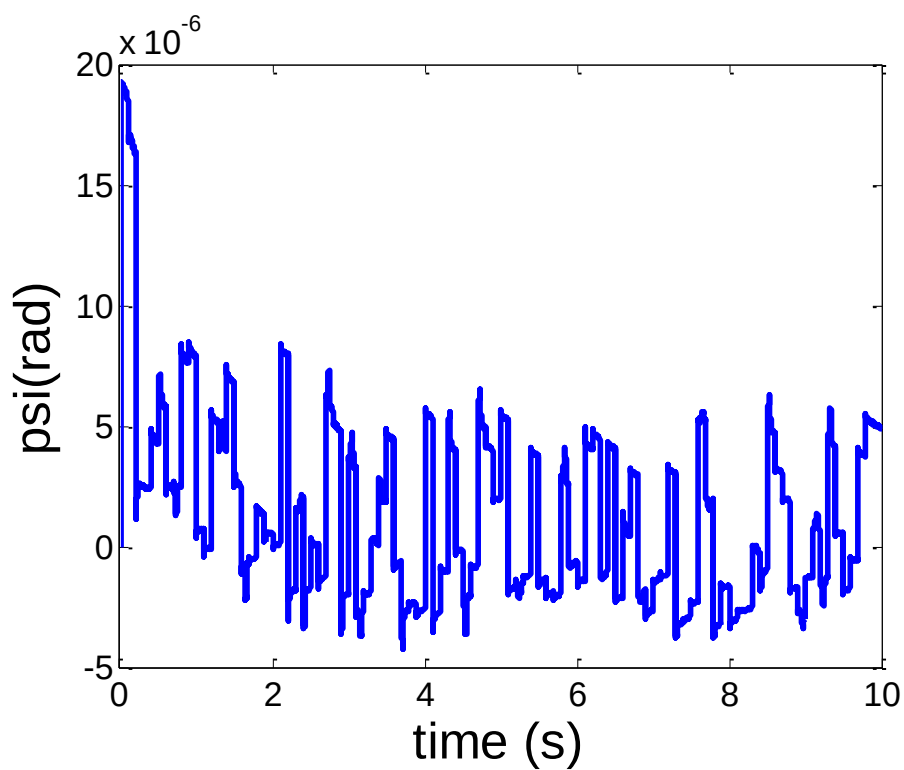
در شکل (۴-۲۵) تا شکل (۴-۳۹) این اثرات به کمک شبیه سازی نشان داده شده است



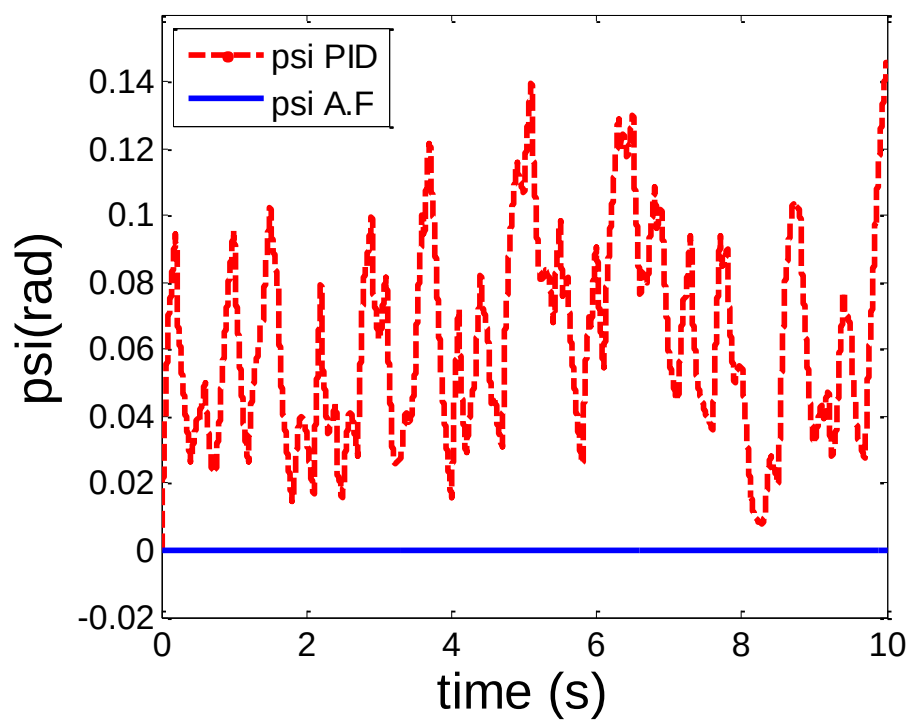
شکل (۴-۲۵): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم



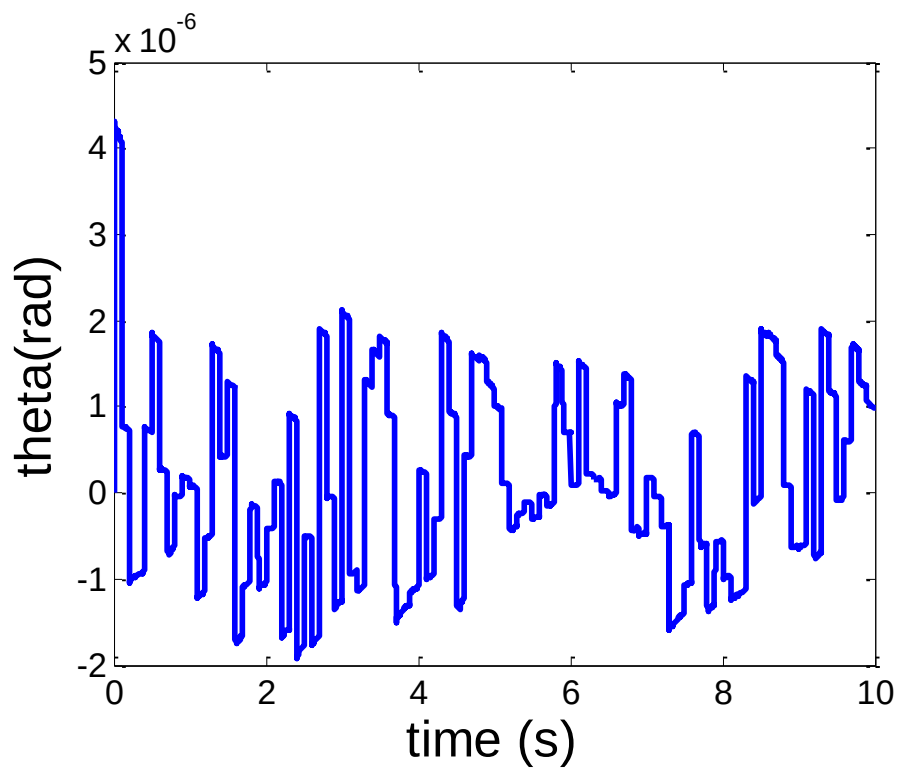
شکل (۴-۲۶): زاویه نسبی بین قاب خارجی و پایه



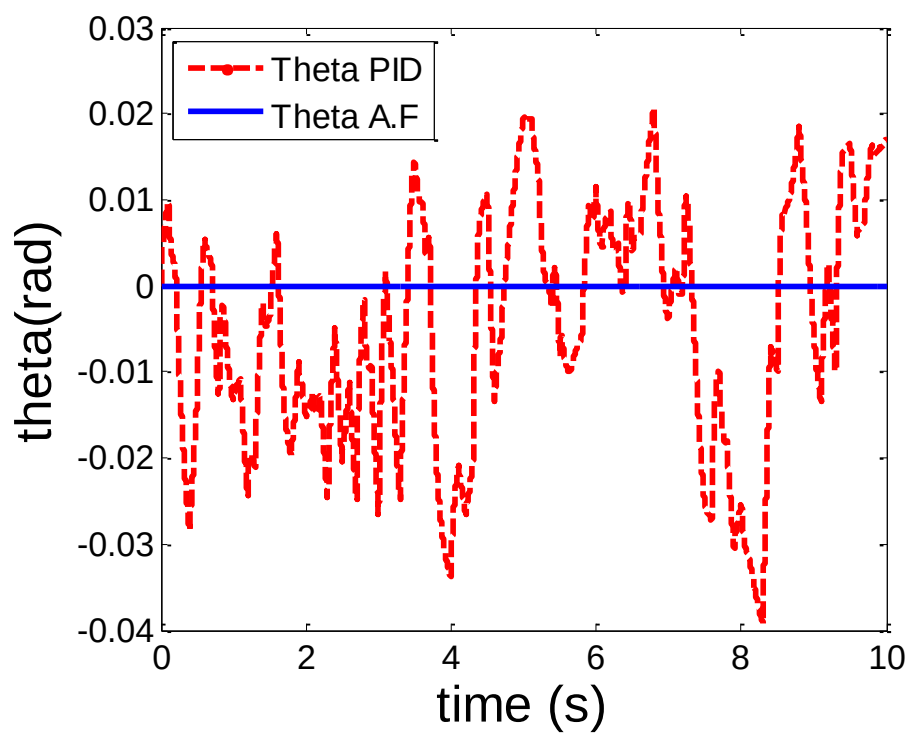
شکل (۴-۲۷): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم



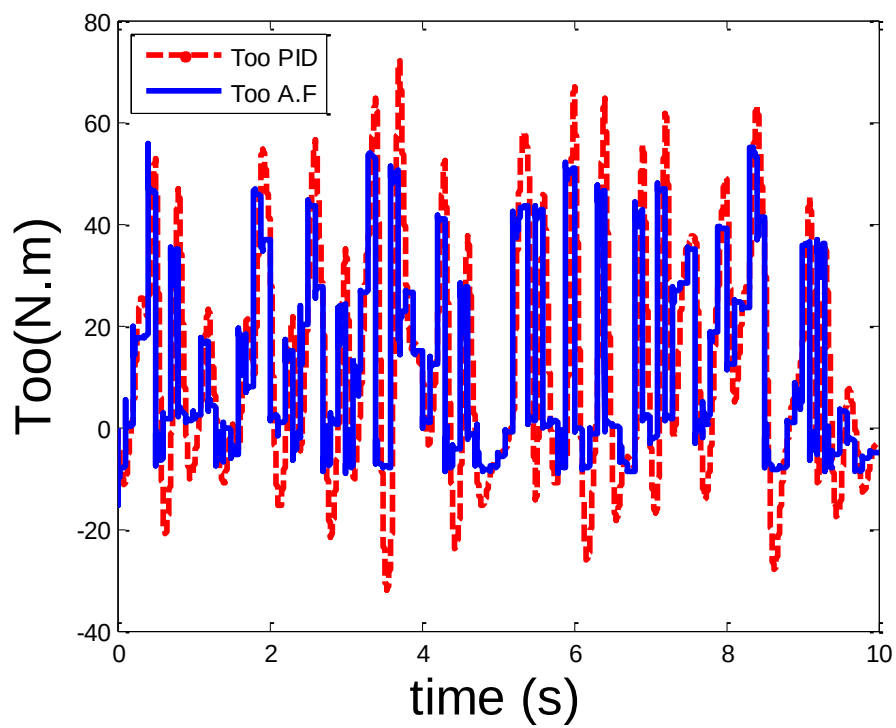
شکل (۴-۲۸): زاویه نسبی بین قاب خارجی و داخلی



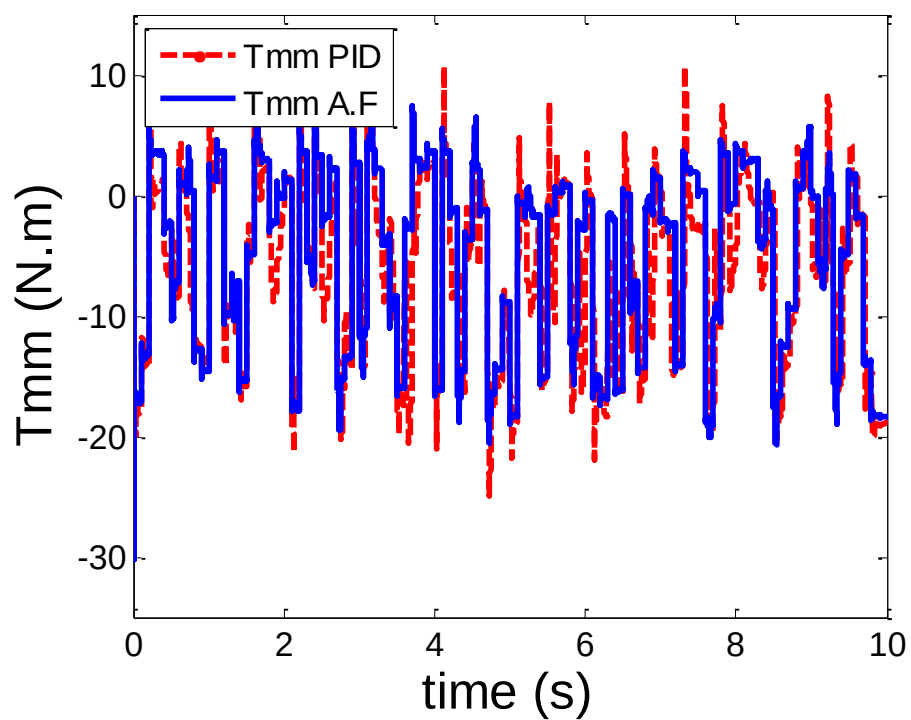
شکل (۴-۲۹): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو حاصل از اعمال کنترل کننده فازی مقاوم



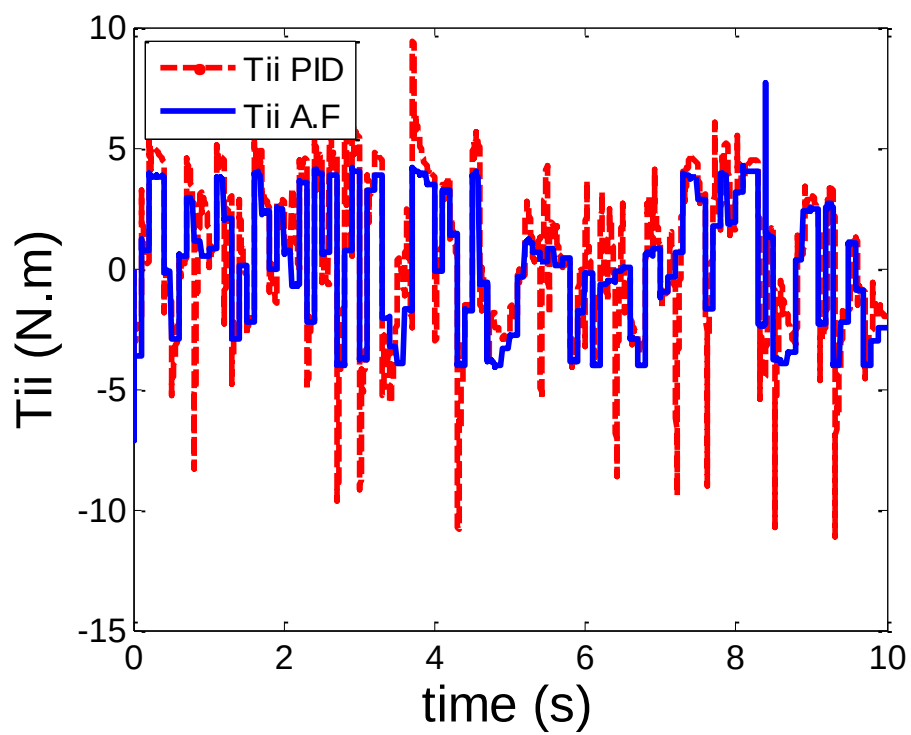
شکل (۴-۳۰): زاویه نسبی بین قاب داخلی و سکو



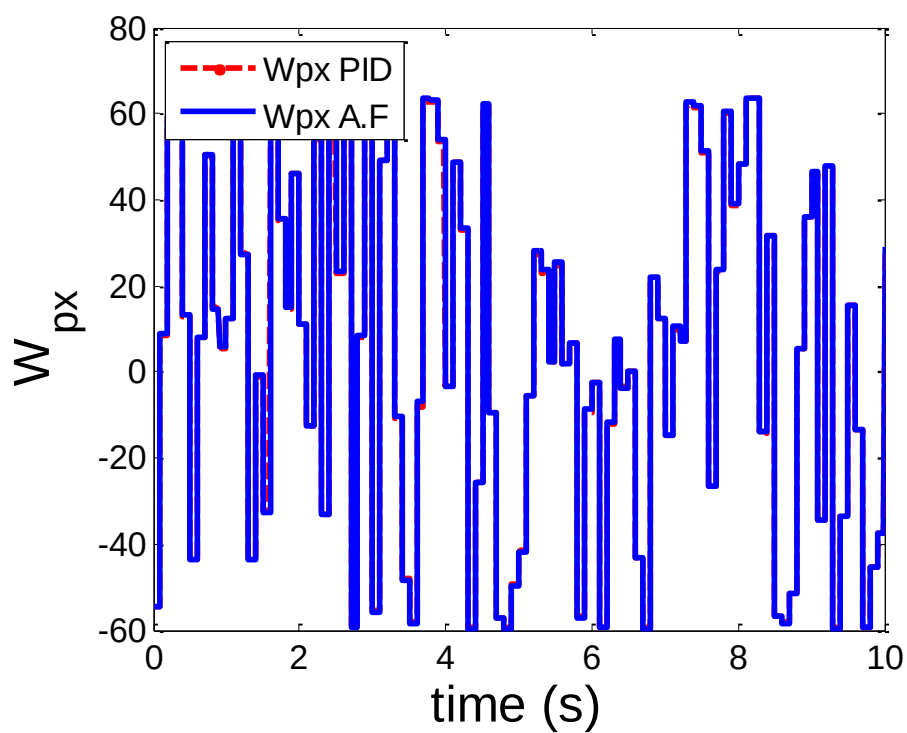
شکل (۴-۳۱): گشتاور اعمالی به قاب خارجی



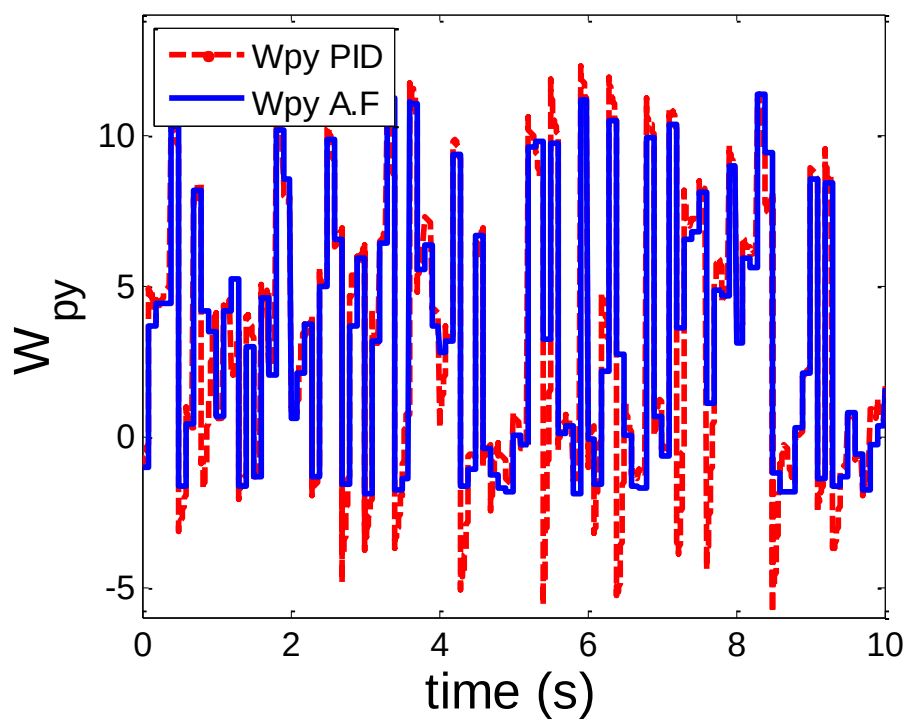
شکل (۴-۳۲): گشتاور اعمالی به قاب میانی



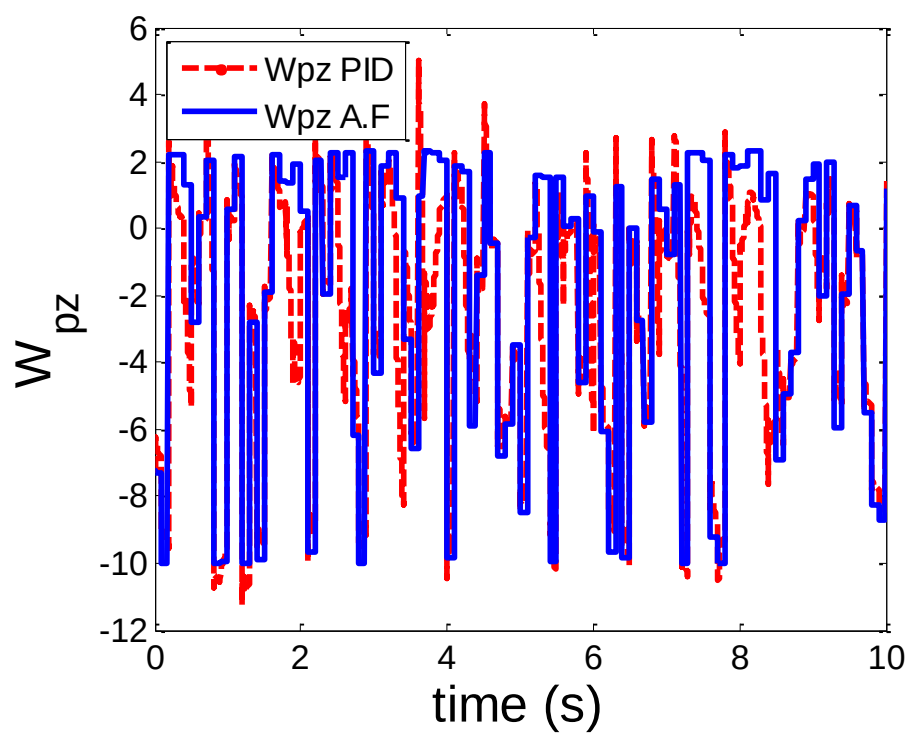
شکل (۴-۳۳): گشتاور اعمالی به قاب داخلی



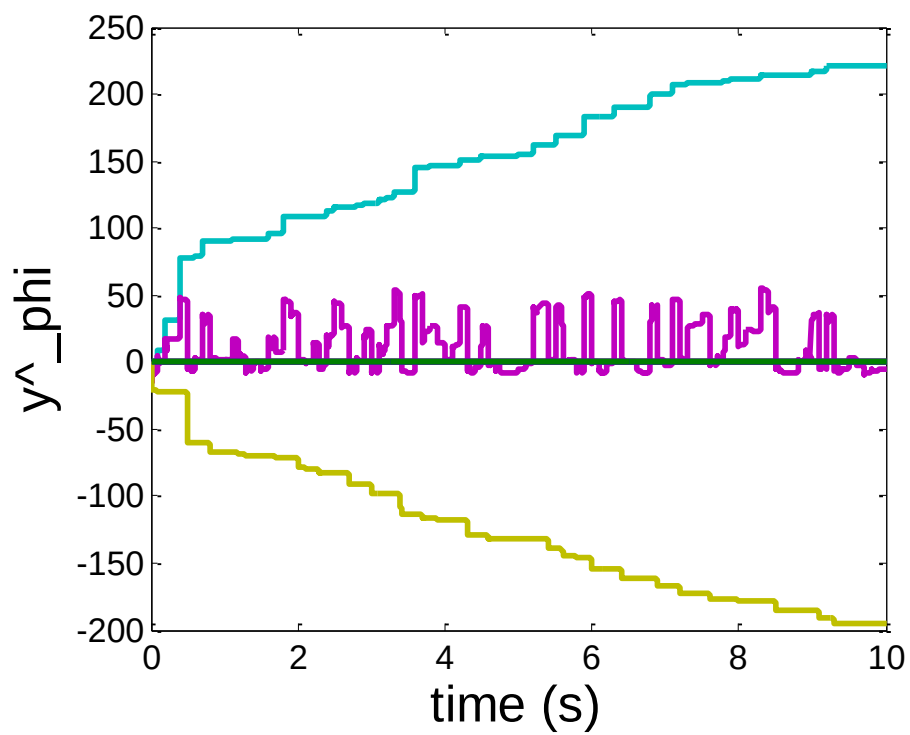
شکل (۴-۳۴): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور x



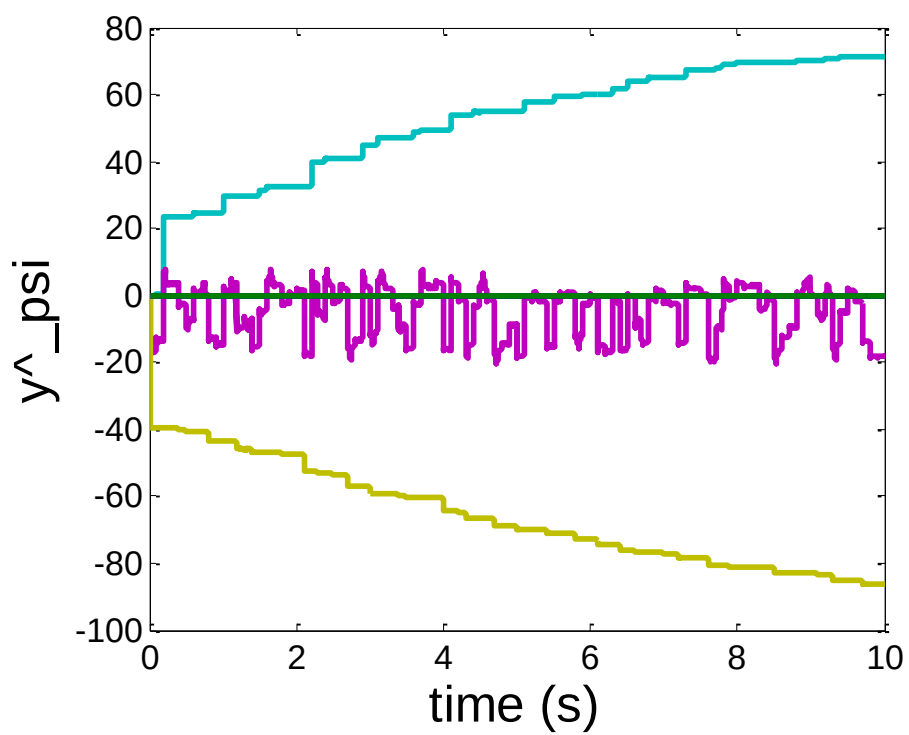
شکل (۴-۳۵): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور y



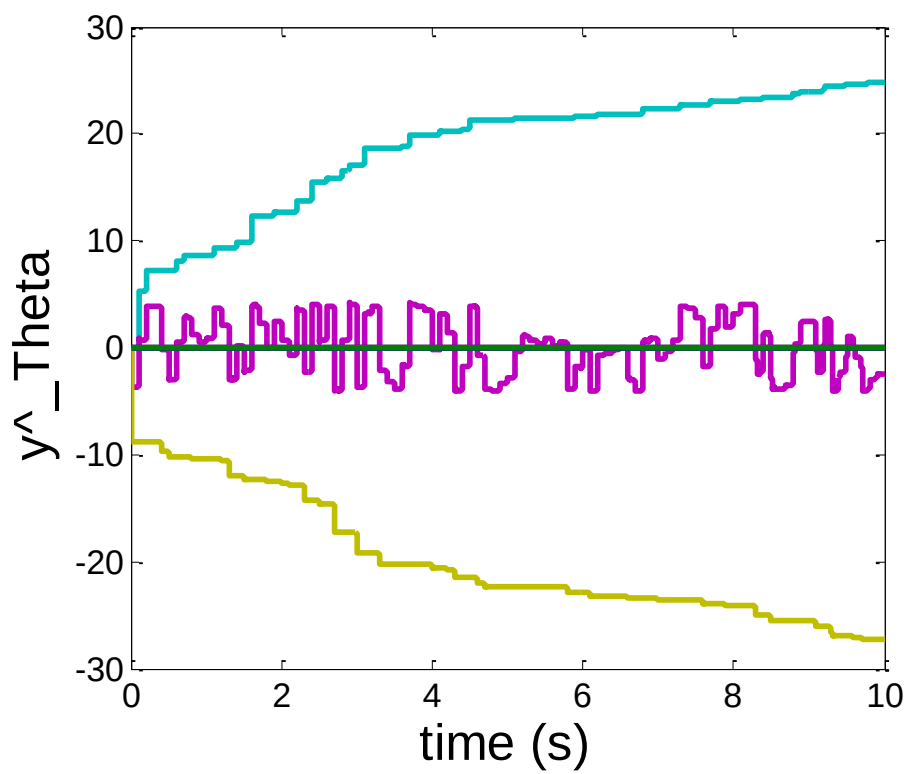
شکل (۴-۳۶): سرعت زاویه ای مطلق سکو حول محور Z



شکل (۴-۳۷): پارامترهای تطبیق $\hat{Y}$ برای کنترل کننده ϕ



شکل (۴-۳۸): پارامترهای تطبیق $\hat{\mathcal{Y}}$ برای کنترل کننده ψ



شکل (۴-۳۹): پارامترهای تطبیق $\hat{\mathcal{Y}}$ برای کنترل کننده θ

فصل پنجم :

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ : نتیجه گیری:

در این پایان نامه طرح نوینی برای کنترل پایدار کننده‌های ژيروسکوپی به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب ارائه و بررسی گردید. با توجه به وجود نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی، که برای پایدار کننده ژيروسکوپی مفروض تعیین گردیده، در فرآیند ردگیری و پایداری از کنترل کننده فازی مقاوم استفاده شده که جزو نوآوری این طرح تحقیقاتی محسوب می‌گردد. در فصل دوم به مدل سازی پایدارکننده سه محوره پرداخته شد. در فصل سوم به بیان و طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی برای سیستم پایدار کننده ژيروسکوپی و در ادامه با تغییر ضرایب به بهبود پاسخ سیستم پرداختیم. در فصل چهارم که بخش اصلی پایان نامه است، کنترل کننده فازی مقاوم با استفاده از تئوری لیپانوف طراحی شد، که یک کنترل کننده مؤثر برای کنترل عدم قطعیت در سیستم های غیرخطی است و به دلیل عملکرد ردیابی مقاوم، تضمین پایداری و پاسخ با دقت بالا مطرح شده است. پایداری آن با تحلیل ریاضی اثبات گردید.

۵-۲ : پیشنهادات:

- استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم انبوه ذرات، ژنتیک و..
- استفاده از کنترل کننده عصبی به جای کنترل کننده فازی
- پیاده سازی عملی و ساخت
- استفاده از روش کنترل کننده فازی-تناسبی-انتگرالی-مشتقی به جای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی.
- پایدار سازی سکو با بهره گیری از ربات‌های موازی.

مراجع

- [۱] Fabien Napolitano, iXSea, an iXBlue company", *Fiber-Optic Gyroscopes Key Technological Advantages*, *FIBER-OPTIC GYROSCOPES*, ۲۰۱۰, ,
- [۲] Y. Paturel et al " ,FOG Technology and FOG based systems an industrial reality at IXSEA ", *Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, ۲۰۰۴, ,
- [۳] میرزاجانی دارستانی، محمد صادق، سید زین العابدین موسوی و پرویز امیری، "ارزیابی عملکرد پایدار کننده های ژيروسکوپیک یک محوره نیرویی و اندیکاری در شرایط کاری یکسان،" *همایش یافته های نوین در هوافضا و علوم وابسته، تهران، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران*, ۱۳۹۴.
- [۴] م. ر. دارستانی، "طراحی و راه اندازی سیستم کنترل صفحه پایدار ژيروسکوپیک سه محوره روی حامل،" *رساله دکترا تخصصی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی*, ۱۳۹۲.
- [۵] M.M.Abdo, A.R.Toloei, A.R.Vali, M.R.Arvan", *Modeling, Control and Simulation of Cascade Control Servo System for One Axis Gimbal Mechanism*", *Interanational Jornal of Engineering Transactions*, ۲۰۱۴, pp. ۱۷۰-۱۵۷, جلد ۲۷, شماره ۱, ,
- [۶] Leghmizi Said, Liu Sheng, Naeim Farouk and Boumediene Latifa", *Modeling, Design and Control of a Ship Carried ۳DOF Stabilized Platform*", *Research Journal*

- of Applied Sciences, Engineering and Technology*, جلد ۴, شماره ۱۹, pp. ۳۸۵۳-۳۸۴۱, ۲۰۱۲.
- [۷] Duan Zheng Yong, Peng Yong", A Comprative Analysis to Traditional PID And Fuzzy Adaptive PI- Variable Damping Controlling System Of MRST Stabilized Platform", *International Conference on Measuring Technologyb and Mechatronics Automation* .۲۰۰۹ ,
- [۸] Saeid Leghmizi, Sheng Liu", A Survey of Fuzzy Control for Stabilized Platform ", *International Journal of Computer Science &Engineering Survey (IJCSES)*, جلد ۰۲, pp. ۵۷-۴۸, شماره ۳, ۲۰۱۱.
- [۹] Yuantao Zhang, Taifu Li, Jun Yi", Adaptive Neural Network Sliding Mode Control Based on Particle Swarm Optimization for Rotary Sreering Drilling Stabilized Platform ", *International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT)*, جلد ۰۴, شماره ۱۹, pp. ۱۱۴-۱۰۷, ۲۰۱۲.
- [۱۰.] Zhi Yu, Jian Zhong Cago, Hong Tao Yang, Hui Nan Guo, Bo Gao and Lei Yang , "Advanced Fuzzy PID Composite Control for Stabilized Platform System", *International Conference on Mechatronics and Automatica* ,pp. ۲۵۴۰-۲۵۳۶, ۲۰۱۲.
- [۱۱] Z. M. Ge , T. N. Lin", Chaos, Chaos Control and Synchronizationof a Gyrostat System", *Journal of Sound and Vibration* , جلد ۲۵۱, شماره ۰۳, pp. ۵۴۲-۵۱۹, ۲۰۰۲.
- [۱۲] Y. B. Shtessel" ,Decentralized Sliding Mode Control in Three-Axis Inertial Platform ", *by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc* .۱۹۹۵,

- [۱۳] Amr A. Roshdy, Chengzhi Su, Hany F. Mokbel, Yu zheng lin, and Tongyu Wang, "Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, جلد ۰۲, شماره ۰۲, pp. ۱۴۸-۱۴۴, ۲۰۱۲.
- [۱۴] Xiong Xianfeng, Xing Jifeng, Peng Likun, "Design and Realization of Control System of a Novel Digital Hydraulic ۲-DOF Motion Platform", *International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS ۲۰۱۲)*, pp. ۱۹۷-۱۹۴, ۲۰۱۲.
- [۱۵] Zbigniew Koruba, Zbigniew Dziopa, Izabela Krzysztofik, "DYNAMICS AND CONTROL OF A GYROSCOPE-STABILIZED PLATFORM IN A SELF-PROPELLED ANTI-AIRCRAFT SYSTEM", *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, جلد ۴۸, شماره ۰۱, pp. ۲۶-۵, ۲۰۱۱.
- [۱۶] A. A. Nikkhahi, J. Roshanian, H. R. Moghadas, H. R. jafari, "Modeling and LQR Controller Design for a three Axes Gyro stabilized platform."
- [۱۷] M.M.Abdo, A.R.Vali, A.R.Toloei, M.R.Arvan, "Stabilization Loop of a Two Axes Gimbal System Using Self-tuning PID Type Fuzzy Controller", *ISA Transaction*, pp. ۶۰۲-۵۹۱, ۲۰۱۴.
- [۱۸] بیژن سلطانی، دکتر علی خاکی صدیق، "مدلسازی، شناسایی و کنترل صفحه پایدار جستجوگر دو درجه"، ۱۳۸۲.

- [١٩] S.A. Hassan, I. Askari, M. Salman Fareed, Kh. Munawar, M. B. Malik, "Development of a ٢Degrees of Freedom Tracking System Part III: System Modeling", *IEEE International Conference on Emerging Technologies* .٢٠٠٥ ,
- [٢٠] Y. P. ANG.Liduan" ,High Performance Strapdown Inertial Navigation System Algorithms for Space Flight", *IEEE* .٢٠٠٨ ,
- [٢١] Li Ying, Ge Wen-qi, Wang Shao-Bin, Xu Zheng-Ping" ,Study of Adaptive Inverse Control to Stale Platform to Stale Platform", *International Conference on Computer Science and Software Engineering* .٢٠٠٨ ,
- [٢٢] H.-H. Chen" ,Stability and chaotic dynamics of a rate gyro with feedback control under uncertain vehicle spin and acceleration", *Journal of Sound and Vibration* جلد , ,٢٧٣pp. ٩٤٨-٩٤٩, .٢٠٠٤
- [٢٣] Manuel F. Pe´rez Polo, Manuel Pe´rez Molina" ,Chaos, Chaotic and Steady State Behavior of a Nonlinear Controlled Gyro Subjected to Harmonic Disturbances", *Solitons and Fractals* ,٣٣ جلد ,pp. ٤٤١-٤٢٣, .٢٠٠٧
- [٢٤] Yonggen Han, Yanhong Lu, Haitao Qiu" ,An Improved Control Scheme of Gyro Stabilization Electro-Optical Platform ٢٠٠٧", *IEEE International Conference on Control and Automation WeCP- ١٦Guangzhou, CHINA - May ٣.to June ٢٠٠٧* ,١
- [٢٥] T. Aruga, N. Wada, A. Ming, N. Kurakane, M. Satoh, H.Takeuchi, S.Tazoe, "Development of a Small Tracking Camera System for Mobile Platforms", *Proceedings of the ٢٠٠١IEEE International Conference on Information and*

Automation, June ۲۲-۲۵, Zhuhai/Macau, China .۲۰۰۹ ,

[۲۶] V.J.Lappas, Dr. WI-I Steyn, Dr. C.I. Underwood" ,Attitude Control for Small Satellites Using Control Moment Gyros ",*Acta Astronautica* , شماره ۱, جلد ۵۱, pp. ۱۰۱-۱۱۱, .۲۰۰۲

[۲۷] F.N.Barnes" ,Stable Member Equations of Motion for a Three-Axis Gyro Stabilized ",*IEEE Transaction On Aerospace and Electronic System* جلد ۷, Aes , شماره ۰۵, ۱۹۷۱.

[۲۸] ح. مقدس, "پایدار کننده سه محوره کنترل دوربین", "پایان نامه کارشناسی ارشد, دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, ۱۳۸۸.

[۲۹] C.Y.Jin, K.H. Ryu, S.W.Sung, J.Lee" ,PID Auto-Tuning Using New Model Reduction Method and Explicit PID Tuning Rule for a Fractional Order Plus Time Delay Model ",*Journal of Process Control* , شماره ۰۱, جلد ۲۴, pp. ۱۲۸-۱۱۳, .۲۰۱۴

[۳۰] J.Prakash, K.Srinivasan" ,Design of Nonlinear PID Controller and Nonlinear Model Predictive Controller for a Continuous Stirred Tank Reactor",*ISA Transactions* , جلد , شماره ۰۳, ۲۸۲-۲۷۳, .۲۰۰۹

[۳۱] M.El-Bardini, A.M.El-Nagar" ,Interval Type- ۲Fuzzy PID Controller for Uncertain Nonlinear Inverted Pendulum System ",*ISA Transactions* , شماره ۰۳, جلد ۵۳, pp. ۷۳۲-۷۴۳, .۲۰۱۴

[۳۲] J.Kang, W.Meng, A.Abraham, H.Liu" ,An Adaptive PID Neural Network for

- Complex Nonlinear System Control", *Neurocomputing*, جلد ۱۳۵, pp. ۸۵-۷۹, ۲۰۱۴.
- [۳۳] A.Rabiei, M.Malekzade, M.Abnili", A Nonlinear Predictive PID Controller Design for Spacecraft Formation Flying Control", *Modares Mechanical Engineering*, جلد ۱۵, شماره ۳, pp. ۳۲۱-۳۱۳, ۲۰۱۵.
- م. رضایی دارستانی، ا.ع.نیکخواه، "کنترل صفحه پایدار ژيروسکوپی سه محوره دوربین بکمک کنترلر PID غیرخطی،" *دهمین همایش/انجمن هوافضا/یران*, ۱۳۸۹.
- امیر علی نیکخواه، جعفر روشنیان، حمیدرضا مقدس، "مدلسازی و طراحی کنترلر LQR برای یک صفحه پایدار ژيروسکوپی سه محوره،" *مجله مکانیک و هوافضا (دانشگاه امام حسین)*, ۱۳۹۲.
- [۳۶] Ogata.Katsuhiko, Modern Control Engineering, ۴th Edition. Prentice – Hall, November ۲۳, ۲۰۰۱.
- [۳۷] L.X.Wong", A course in fuzzy system and control", *Pretice Hall, Englewood Cliffs*, ۱۹۹۶.
- [۳۸] C.Ham, Z.Qu, R.Johnson", Robust Fuzzy Control for Robot Manipulators", *IEEE Proc., Control Theory Appl*, جلد ۱۴۷, pp. ۲۱۶-۲۱۲, ۲۰۰۰.
- [۳۹] C.M.Lim, T.Hiyama", Application of fuzzy logic control to a manipulator", *IEEE Trans. Robot. Autom*, جلد ۱, pp. ۶۹۱-۶۸۸, ۱۹۹۱.
- [۴۰] L.X.Wong, J.M.Mendel", Fuzzy Basic Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least Squares Learning", *IEEE Trans. Neural Networks*, جلد ۳, pp. ۸۰۷-

٨١٧, .١٩٩٢

- [٤١] J.C.Wu, T.S.Liu" ,A sliding-mod approach to fuuzy control design ",*IEEE Trans. Control. System. Technology* ,جلد ٤, pp. ١٥١-١٤١, .١٩٩٦
- [٤٢] M.B.Ghalia, A.T,Alouani" ,A Sliding-Mode Approach to Fuzzy Control Synthesis Using Fuzzy Logic ",*inproc. American Control Conf.,Seattle, WA* ,pp. ١٥٣٢-١٥٢٨, .١٩٩٥
- [٤٣] E.Kim" ,Output Feedback Tracking Control of Robot Manipulator With Model Uncertainty Via Adaptive Fuzzy Logic ",*IEEE Trans.Fuzzy System* ,جلد ١٢, pp. -٣٦٨ ٣٧٦, .٢٠٠٤
- [٤٤] L.X.Wong, Adaptive fuzzy systems and control: designand stabilityanalysis. Prentice-Hall,Englewood Cliffs, .١٩٩٤
- [٤٥] M.M.Fateh, S.Fateh" ,Decentralized Direct Adaptive Fuzzy Control of Robots Using Voltage Control Strategy",*Nonlinear Dyn* ,جلد ٧٠, pp. ١٩٣٠-١٩١٩, .٢٠١٢

Abstract

In this thesis the method of a Robust fuzzy control for a three axis gyro stabilized platform is presented. This platform is under the vibration effect of its moving stand. Then, a Robust fuzzy control methods are designed to guarantee stability of closed loop system and having a good tracking performance which can overcome the parametric uncertainty. Adaptive fuzzy control efficiently controls uncertain nonlinear systems. In first section, modeling and presentation of equation of motion of gyrostabilizer with consider mechanical and non-mechanical gyros, is presented.in the next section the PID controller is presented .in the continuation for ensure to reach a tracking and emmiting disturbances to compare a Robust fuzzy control is considered with a PID control is presented. This research presents the stability analysis of control system and verifies the control method by the stability analysis and simulation results.

Keywords: Gyrostabilizer, Stabilized Platform, **PID control**, Robust Fuzzy Control, Uncertainty



Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Control Engineering

**Modeling and Robust Fuzzy Control for Stabilization
of a 3DOF Platform**

By: Shahram najafi

Supervisor:
Dr. Mohammad Hadad Zarif

February 2017