

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

عنوان رساله:

طراحی رویتگر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی

دانشجو: جواد عزیزآبادی

استاد راهنما

دکتر محمد علی صدرنیا

استاد مشاور

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار: شهریور ۱۳۹۳

کپی صورت جلسہ

تقدیم به

همه کسانی که دوستشان دارم

تقدیر و تشکر

با تقدیم احترام و سپاس

از پروردگار دادار هور و گرداننده آسمان ها و زمین ها که به من عمر مکفی داد تا بتوانم این پایان نامه را در قلم پیاده سازی کنم، را شکرگذارم. و تا آنجایی که استخوان کتفم اجازه دهد؛ دستان خالی خود را به سوی آسمانی که طراحی و ساخت آن از طراحی و ساخت بدن انسان هم پیچیده تر است، بلند می‌کنم و امید به اعتلا و ارتقای سطح ایران عزیز را دارم.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از استاد بهترین و شایسته خودم؛ جناب آقای دکتر محمد علی صدرنیا و نیز جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح سپاس و قدردانی بی اندازه ای داشته باشم، چرا که در طول این مدت در هیچ زمینه ای برای من کمبودی قرار ندادند و همیشه تکیه گاه علمی و فکری من بودند.

جواد عزیزآبادی

شهریور ۱۳۹۳

تعهد نامه

اینجانب **جواد عزیزآبادی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی رویتگر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی تحت راهنمایی دکتر محمد علی صدرنیا 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 تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده:

با افزایش روزافزون تقاضای مشتریان بزرگ و کوچک صنعتی برای تولید محصولات با کیفیت تر و پربازده تر، نوعی کنترلر ناظر تحت عنوان تشخیص و شناسایی خطا بوجود آمد. روش‌های پیشرفته تشخیص و شناسایی خطا نیز بیشتر بر مبنای ریاضیات سیگنالی و مدل‌های تحلیلی است که از راه تحلیل تئوری سیستم و گاهی شبیه‌سازی‌هایی است که از طریق افراد خبره و متخصص امر به دست می‌آید. در این پایان نامه به ترتیب به معرفی انواع خطا، روش‌های شناسایی خطا، سپس به معرفی مشاهده گر مود لغزشی و پیاده سازی آن برای تشخیص خطا روی آورده‌ایم. ایده بکار گرفته شده پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی بر روی مشاهده گر مود لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی به منظور تشخیص خطا، بدون انجام خطی سازی است. برای بررسی صحت و کارایی ایده؛ مقایسه ای بین خطای تخمین حالات، خطای تخمین خطا، تخمین حالات و تخمین خطا انجام شده است.

کلمات کلیدی: شناسایی و تشخیص خطا، مود لغزشی، مشاهده گر، شبکه‌های عصبی

فهرست مطالب

- فصل اول: مقدمه ای بر لزوم، تاریخچه و روشهای شناسایی خطا ۱
- ۱- آشنایی با خطا و اصطلاحات خطا ۲
- ۱-۱- تعریف خطا ۲
- ۱-۱-۱- تمیز دادن خطا ۲
- ۲-۱- تاریخچه خطا ۵
- ۳-۱- لزوم شناسایی خطا ۷
- فصل دوم: معرفی و مرور روش های تشخیص و جداسازی خطا ۸
- ۲-۱- نگاه اتوماسیونی به خطا و روش های اتوماسیونی تشخیص خطا ۹
- ۲-۱-۱- فرآیندهای اتوماسیونی و فرآیندهای نظارت ۹
- ۲-۱-۲- تشخیص خطا در سطح اتوماسیون صنعتی ۱۱
- ۲-۱-۳- نگاه نموداری جامع به تشخیص خطای اتوماسیونی ۱۳
- ۲-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهدات چشمی ۱۴
- ۲-۲-۱- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر بررسی تغییرات سنسورها ۱۴
- ۲-۲-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر تحلیل فرکانسی ۱۴
- ۲-۳- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مدل ها و سیگنال ها ۱۶
- ۲-۳-۱- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهده گرها ۱۹

- ۲-۳-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر معادلات برابری ۲۰
- ۲-۳-۳- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهده گر مود لغزشی ۲۱
- ۲-۳-۴- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر شبکه های عصبی ۲۱
- ۲-۳-۵- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر منطق فازی ۲۴
- فصل سوم: معرفی و طراحی مشاهده گر مود لغزشی برای تشخیص و جداسازی خطا ۲۵
- ۳-۱- تاریخچه و معرفی مشاهده گرهای مود لغزشی ۲۶
- ۳-۲- مفاهیم رایج در مشاهده گرها ۲۶
- ۳-۳- مشاهده گر اوتکین ۲۶
- ۳-۴- اصلاح مشاهده گر اوتکین ۲۹
- ۳-۵- مشاهده گر والکت و زاک ۳۰
- ۳-۶- همسان سازی مشاهده گرهای گسسته ۳۲
- ۳-۷- قالب همراه مشاهده گر والکت و زاک ۳۵
- ۳-۸- طراحی مشاهده گر برای شناسایی خطا ۴۲
- ۳-۹- الگوریتم گام به گام طراحی مشاهده گر مود لغزشی ۴۳
- ۳-۱۰- فرم همراه مشاهده گر مود لغزشی ۴۴
- ۳-۱۱- بازسازی سیگنال خطای محرک ۴۵
- ۳-۱۲- مثال پاندول معکوس ۴۶

فصل چهارم: طراحی مشاهده گر مود لغزشی، مبتنی بر شبکه های عصبی تابع پایه شعاعی برای تشخیص و	
جداسازی خطای محرک	۵۳
۱-۴- مقدمه و معرفی شبکه های عصبی	۵۴
۲-۴- تاریخچه شبکه های عصبی	۵۵
۳-۴- سلول عصبی مصنوعی	۵۵
۱-۳-۴- توابع تحریک	۵۶
۴-۴- شبکه های عصبی پایه شعاعی	۵۷
۵-۴- بیان مسئله و مقدمات لازم	۵۸
۶-۴- طراحی مشاهده گر مود لغزشی	۵۹
۱-۶-۴- پایداری مشاهده گر	۶۱
۷-۴- مثال ربات تک لینکی	۶۳
۸-۴- ایده اصلی پایان نامه، پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی PSO	۶۶
۱-۸-۴- معرفی الگوریتم بهینه سازی PSO	۶۶
۴-۸-۴- مقادیر همگرا شده بهینه سازی (در حالت خطای سینوسی- مثلثی)	۶۷
۵-۸-۴- نتایج حاصل از ایده اصلی پایان نامه، مقایسه خطای تخمین (در حالت خطای سینوسی- مثلثی)	۶۹
۹-۴- نتیجه گیری	۷۳
۱۰-۴- پیشنهادهایی برای آینده	۷۴

فهرست اشکال و جداول

- شکل (۱-۲) طرح ساده شده ای از فرآیندهای اتوماسیون ۱۰
- شکل (۲-۲) طرحی برای تشخیص خطا به همراه مدل‌های سیگنال ۱۲
- شکل (۳-۲) طرحی برای تشخیص خطا به همراه مدل‌های فرآیند ۱۲
- شکل (۴-۲) نمودار جامع روشهای تشخیص خطا ۱۳
- شکل (۶-۲) تشخیص خطا به صورت حلقه بسته در قسمت های مختلف رخدادی ۱۴
- شکل (۷-۲) شناسایی خطا مبتنی بر آستانه‌های تطبیقی در یک دستگاه سروو هیدرولیک ۱۵
- شکل (۸-۲) مکانهای بروز خطا در یک سیستم و اثرات مخرب خطا ۱۷
- شکل (۹-۲) بررسی شناسایی خطا، از دیدگاه زمان ورود به سیستم ۱۸
- شکل (۱۰-۲) بررسی شناسایی خطا از دیدگاه نوع مدلی ورودی به سیستم ۱۸
- شکل (۱۱-۲) مدل‌های قابل دستیابی به مانده در یک سیستم نامی ۱۹
- شکل (۱۶-۲) نمایش سیستم به همراه مدل ریاضی آن، به منظور تولید مانده ۲۰
- شکل (۱۸-۲) شناسایی خطا مبتنی بر شبکه عصبی ۲۲
- شکل (۱-۳) مدل بلوکی مشاهده‌گر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا ۴۶
- شکل (۲-۳) خطا محرک و خطای بازسازی شده آن ۴۸
- شکل (۳-۳) نمایش هم زمان حالات واقعی (X) و حالات تخمین زده شده (X) ۴۹
- شکل (۴-۳) نمایش هم زمان حالات واقعی (X) و حالات تخمین زده شده (X) ۵۰
- شکل (۵-۳) خطای محرک و شکل بازسازی شده آن (نقطه چین) ۵۱
- شکل (۶-۳) بلوک دیاگرام بازسازی خطا با استفاده از مشاهده‌گر مود لغزشی ۵۱

- شکل (۴-۱) نمایش یک سلول عصبی واقعی ۵۴
- شکل (۴-۲) مدل یک شبکه عصبی مصنوعی ۵۵
- شکل (۴-۳) توابع محرک (فعالساز) شبکه‌های عصبی ۵۶
- شکل (۴-۴) ساختار شبکه RBF ۵۷
- شکل (۴-۵) شکل روبات تک لینکی ۶۳
- شکل (۴-۶) موقعیت روبات و تخمین آن ۶۵
- شکل (۴-۷) سرعت لینک روبات و تخمین آن ۶۵
- شکل (۴-۸) خطا و تخمین خطا (نقطه چین) ۶۵
- شکل (۴-۹) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر اولیه انتگرال گیرها ۶۷
- شکل (۴-۱۰) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر مراکز توابع تحریک شبکه عصبی ۶۷
- شکل (۴-۱۱) نمایش همگرا شده بهینه مقدار شعاع توابع تحریک شبکه عصبی ۶۸
- شکل (۴-۱۲) نمایش همگرا شده بهینه سازی شده گام آموزش شبکه عصبی ۶۸
- شکل (۴-۱۳) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر اولیه و نهایی شبکه عصبی ۶۸
- شکل (۴-۱۴) نمایش همگرا شده بهینه سازی شده بهره مشاهده گر جهت قطبها ۶۹
- شکل (۴-۱۵) خطای تخمین بازسازی خطا در حالت خطای سینوسی - مثلثی و بدون عمل بهینه سازی ۷۰
- شکل (۴-۱۶) خطای تخمین بازسازی خطا در حالت خطای سینوسی - مثلثی و با عمل بهینه سازی ۷۰
- شکل (۴-۱۷) خطای تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی ۷۰
- شکل (۴-۱۸) خطای تخمین موقعیت روبات بدون عمل بهینه سازی ۷۱

شکل (۱۹-۴) خطای تخمین سرعت روبات با عمل بهینه سازی ۷۱

شکل (۲۰-۴) خطای تخمین سرعت روبات بدون عمل بهینه سازی ۷۱

شکل (۲۱-۴) نمایش موقعیت روبات و تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی ۷۲

شکل (۲۲-۴) نمایش سرعت روبات و تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی ۷۲

شکل (۲۳-۴) نمایش خطای رخدادی و خطای بازسازی شده با عمل بهینه سازی ۷۲

جدول (۱-۳) مقادیر پارامترهای معادلات سیستم پاندول معکوس ۴۷

جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای ربات تک لینکی ۶۴

فصل اول:

مقدمه ای بر لزوم، تاریخچه و روش‌های شناسایی خطا

۱- آشنایی با خطا و اصطلاحات خطا

قبل از وارد شدن به مقوله خطا و اصطلاحات خطا، لازم بود که برای بحث شناسایی و تشخیص خطا؛ ادبیات درخور شأنی تهیه ببینیم که اهداف ما از مفاهیم این حوزه از علم را تحت پوشش قرار دهد.

به نظر شاید کمی دشوار به نظر برسد که واقعا چه تفاوتی بین خطا، شکست، بدعمل کردن، اشتباه و نیز از نگاهی دیگر چه تفاوتی بین تشخیص، جداسازی، شناسایی و شناخت وجود دارد؟ در اینجا بود که اصطلاحات و مفاهیمی تعریف شد تا تمایزی بین این مفاهیم برقرار شود [1]

۱-۱- تعریف خطا

خطا (Fault): انحراف حداقل یک مشخصه و یا پارامتر سیستم از مقدار مطلوب یا شرایط استاندارد.

۱-۱-۱- تمیز دادن خطا

بر اساس مشخصه سیگنالی

خطا (Fault): انحراف حداقل یک مشخصه و یا پارامتر سیستم از مقدار مطلوب یا شرایط استاندارد.

شکست (Failure): وقفه دائمی یک سیستم در حال کار، که توانایی انجام یک عملکرد مطلوب در یک شرایط عملیاتی مشخص را دارد. که این نامطلوبی معمولا با خاموشی و صدای ناگهانی همراه است.

بدعمل کردن (Malfunction): بی نظمی متناوب در تحقق انجام یک عمل مطلوب در سیستم است، که این نامطلوبی معمولا همراه با صداهای آهسته و متناوب قابل شنیدن هم هست.

اشتباه (Error): به انحراف بین مقدار اندازه گیری شده یا مقدار محاسبه شده یک متغیر خروجی از میزان صحیح نظری که معمولاً حاصل محاسبات روی کاغذ یا محیط شبیه سازی است، گفته می‌شود.

اغتشاش (Disturbance): ورودی ناخواسته ای از جنس دینامیک مدل نشده که در فرکانس های پایین نمود پیدا می‌کند و غیر قابل کنترل بوده، نیز خروجی مشخصی هم ندارد.

اختلال (Perturbation): نوعی ورودی کنشی به سیستم است که موجبات خروج موقتی سیستم را از حالت جاری و فعلی خودش را رقم بزند.

مانده (Residual): به نوعی اشاره گر خطاست، که مبتنی بر میزان انحراف مقادیر عملی اندازه گیری شده و محاسبات معادلات مدلی سیستم است.

بر اساس مشخصه تابعی

تشخیص خطا (Fault detection): اشاره به وجود خطا در سیستم را دارد، و یا به نوعی معرف این مهم است که آیا در سیستم خطا رخ داده است یا نه؟

جداسازی خطا (Fault isolation): تعیین آن مکان یا قسمت از سیستم است که در آنجا خطایی رخ داده است. که این در دنباله تشخیص خطا است.

تعیین خطا (Fault determination): معرف مدت زمانی است که سیستم با خطا مواجه بوده و نیز بیانگر میزان دامنه خطای رخدادی است.

شناسایی خطا (**Fault diagnosis**): معرف نوع، مکان، میزان و زمان خطایی است که رخ داده است.

که این مرحله در امتداد تشخیص، جداسازی و تعیین خطا است.

بازسازی خطا (**Fault reconstructions**): آخرین مرحله از فرآیند این مقوله است، و شکل نموداری خطا

را که معرف تمام ویژگی‌های خطا است را به ما معرفی می‌کند.

بر اساس مشخصه مطلوبیتی

اطمینان پذیری (**Reliability**): توانایی سیستم برای انجام یک عملکرد مورد نیاز تحت شرایط معلوم، در

یک دامنه داده شده و مشخص، و نیز در طول یک دوره زمانی معین و مشخص.

ایمنی (**Safety**): توانایی سیستم از بابت این مهم که خطر و تهدیدی برای افراد انسانی، محیط و تجهیزات

نداشته باشد.

دسترس پذیری (**Availability**): امکان این مهم که سیستم یا تجهیزات مربوطه، در هر لحظه از زمان

عملکردی سیستم؛ رضایت مندی و مفید بودن را برای ما به ارمغان می‌آورد.

اعتماد پذیری (**Dependability**): در واقع نوعی از دسترس پذیری بوده که ملاک‌ها و نیازهای مورد نیاز

عملکردی معین، در طول دوره زمانی کارکرد سیستم را تأمین می‌کند.

بر اساس مشخصه زمانی خطا

خطای ناگهانی (Abrupt fault): خطای مدل شده ای است که شبیه تابع پله بوده و بیانگر خرابی در قسمتی از سیستم بوده و نیز نشان دهنده تنظیم نامناسب است.

خطای نرم (Incipient fault): خطای مدل شده ای است که شبیه تابع شیب بوده و نشان دهنده رانش در سیگنال مطلوب است.

خطای موقتی (Intermittent fault): خطای مدل شده ای که شبیه تابع پالس بوده و نیز متناوب است.

۱-۲- تاریخچه خطا

در حدود سال ۱۹۶۰، تاثیر عملکرد اتوماسیون های صنعتی و طراحی پردازنده های صنعتی به طور گسترده و روزافزونی افزایش یافت. این گسترش روند در حال توسعه ای اتوماسیونی شدن، دلیلی برای تقاضای افزایش عملکرد پردازش یا کیفیت محصولات بود، که خود خواهان استقلال انجام عملکرد پردازش از حضور انسان (پردازش بدون حضور انسان) است؛ و چون گزینه انسان به شکل مستقیم حضور نخواهد داشت؛ لذا این عدم وابستگی به انسان، هر چند که مزیت رهایی کاربرها از انجام وظایف و کارهای یکنواخت و نیز کاهش دستمزدها را در بردارد، اما موجبات وجود خطا را افزایش می داد.

پیاده سازی آنلایین (روی خط) فرآیندهای کامپیوتری عملی در سال ۱۹۶۰، راهی نوین برای بهبود و پیشرفت در روش های نظارت را باز کرد، مانند روند تجزیه و تحلیل در امر نظارت. در سال ۱۹۶۸ کنترلرهای قابل برنامه ریزی منطقی به منظور جایگزینی از رله های الکترومکانیکی به کنترلرهای سخت افزاری معرفی شدند. که این موجب تحقق سیستم های حفاظی آسان تر شد. ظهور و پیدایش میکروکنترلرها در سال ۱۹۷۱ و افزایش کارایی آنها در مرکز زدایی فرآیند سیستم های اتوماسیونی در سال ۱۹۷۵، شروعی بر محاسباتی

شدن هرچه بیشتر نرم افزارهای مبتنی بر نظارت و الگوریتم‌های تشخیص خطا بود. نخستین انتشاراتی که بر فرآیندهای مبتنی بر مدل و روش‌های تشخیص خطا منتشر شد، در خصوص ارتباطات سیستم‌های هوافضا بود، [۲] و طرح‌های دارویی و شیمیایی بود. تعدادی از این مفاهیم اولیه را می‌توان به‌عنوان روش‌های رابط برابری طبقه‌بندی کرد، که این روش‌ها می‌توانند شامل بررسی سازگاری وسایل استفاده شده و توازن مواد باشند. این توازن مواد که گاهی باعث تولید مانده وزن (عدم دقت در وزن) می‌شوند، برای مثال می‌توانند برای تشخیص نشتی در یک خط لوله استفاده شود، [۳].

روش‌های مبتنی بر مشاهده گر حالت به‌منظور تولید مانده در خروجی مانند مشاهده گر حالت توسط لوئن برگر [۴] و فیلتر کالمن [۵] به سرعت گسترش یافتند، بعدها به‌علت بروز تحلیل‌های مازاد و رو به افزونی که بین تعدادی اقدامات برای تشخیص خطای سنسورها به‌وجود آمد، بانکی از مشاهده‌گرها مورد تأیید و استفاده قرار گرفته [۶] و بعدها به‌منظور جبران ورودی‌های اندازه‌گیری نشده در یک سیستم، مشاهده‌گرهای ورودی ناشناخته یا مشاهده‌گرهای خروجی نیز گسترش یافتند، [۷].

استفاده از تخمین پارامترها، از دیگر روش‌های تشخیص خطا است، که برای اولین بار در [۸] انتشار یافت؛ که در زمینه توربین جت بود. و بعدها برای فرآیندهای عمومی مانند پمپ‌های در گردش، موتورهای DC و موتورهای الکتریکی مورد استفاده واقع شد [۹].

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا چندین کتاب ارزشمند در زمینه تشخیص خطا، و خلاصه‌هایی از کارهای انجام شده در [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که کتاب‌های یاد شده بیشتر بر زمینه روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر فرایند فعالیت داشته و عکس‌های مناسبی هم عرضه کرده‌اند.

۱-۳- لزوم شناسایی خطا

سیستم‌های واقعی، به این دلیل که عمدتاً غیرخطی و غیر قابل پیش بینی هستند؛ لذا عمل شناسایی و تشخیص خطا هم بر روی این سیستم‌ها کار دشواری است. عمل تشخیص و شناسایی خطا را بر روی سیستم و مجموعه‌ای انجام دهیم که ارزش تشخیص و شناسایی خطا را داشته باشند و سیستم‌هایی این ارزش را پیدا می‌کنند که دارای سه ویژگی خطرناک باشند، الف) اگر خطا تشخیص داده نشود امکان بروز خطر جانی برای انسان را در پی داشته باشد ب) اگر خطا تشخیص داده نشود امکان متحمل شدن هزینه گزاف برای انسان را در برداشته باشد، ج) وجود دلایل فنی مانند لقی، فرسایش، خوردگی و خلاصی. که این سه مهم در سیستم‌های دینامیکی نمود پیدا می‌کند. از برای خطرات جانی و مالی گزاف می‌توان به عوامل زیر اشاره ای داشت [۱۴]:

- انفجار در تأسیسات انرژی هسته‌ای اکرین در ۲۶ آوریل ۱۹۸۶، تلفات این حادثه بیش از ۱۵۰۰۰ کشته و ۵۰۰۰۰ مصدوم گزارش شده است به گزارش BBC تخمین زده شده است که حدود ۵ میلیون نفر بر اثر این حادثه در معرض تشعشعات رادیواکتیو قرار گرفته اند.
 - سقوط پرواز ۱۹۱ هواپیمایی آمریکا در ۲۵ می ۱۹۷۹ در شیکاگو، تلفات جانی این حادثه ۲۷۳ کشته گزارش شده است.
 - سقوط هواپیمای باربری بوئینگ ۷۴۷ در ۴ اکتبر ۱۹۹۲، این هواپیما اندکی پس از پرواز به دلیل اشکال در بال سمت راست در فرودگاه بین‌المللی آمستردام دچار سانحه گردید.
- لذا اینجاست که بر لزوم شناسایی خطا در سیستم‌های دینامیکی غیر خطی می‌توان تأکید داشت.

فصل دوم:

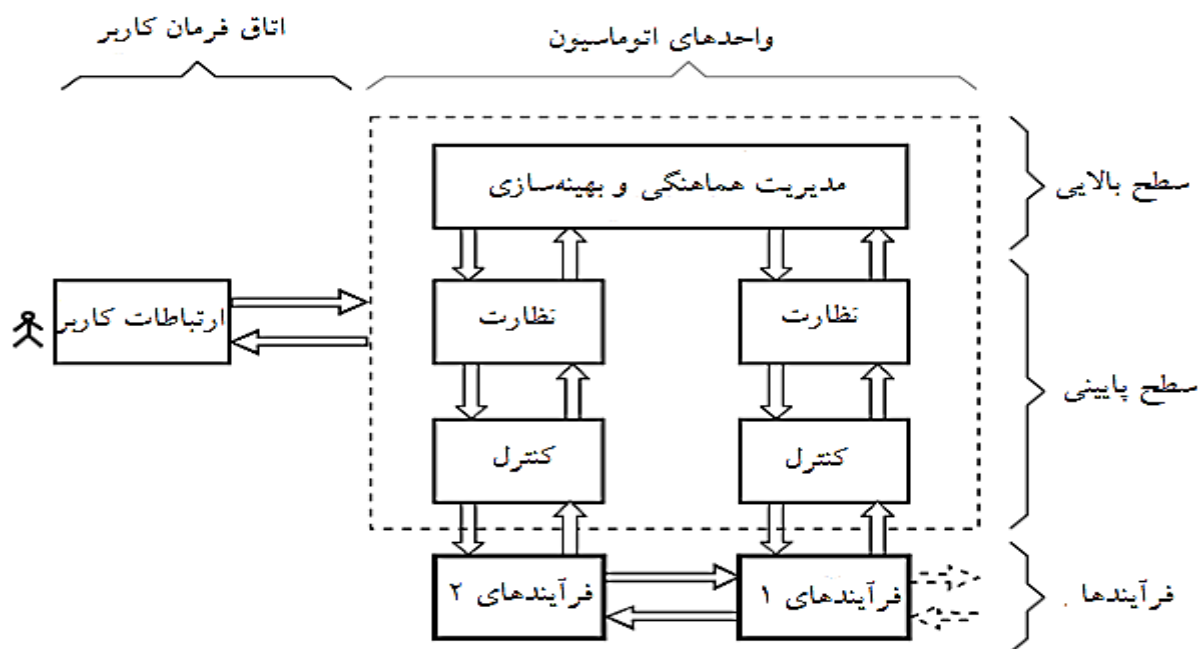
معرفی و مرور روش های تشخیص و جداسازی خطا

۲-۱- نگاه اتوماسیونی به خطا و روش های اتوماسیونی تشخیص خطا

در سال ۱۹۷۵ زمانی که میکرو کامپیوترهای ارزان و قابل اطمینان قابل دسترس بودند و توانایی حل بسیاری از مسائل و مشکلات اتوماسیون را در یک دستگاه داشتند، میزان و درجه اتوماسیون شدن به شکل فشرده و با سرعت رو به بالایی به جلو رانده شد. این روند در اکثر ناحیه‌ها مانند حس گرها، محرک‌ها، سیستم‌های ارتباطی و رابط‌های بین انسان و ماشین، به شکل موازی پیشرفت کرد، این پیچیدگی موجبات رخداد خطا در حسگرها، محرک‌ها را در پی داشته و اینجاست که مقوله علمی تشخیص خطا، شمای اتوماسیونی به خود گرفته و وارد صنعت می‌شود.

۲-۱-۱- فرآیندهای اتوماسیونی و فرآیندهای نظارت

شکل (۲-۱) یک طرح ساده شده‌ای برای فرآیند اتوماسیون را که از دو قسمت مبتنی بر فرآیند و قسمت ارتباط با کاربر تشکیل شده است، را نشان می‌دهد. سطح پایینی شامل کنترل متوالی و کنترل پیش‌خورد و پس‌خورد است. ناظرها در سطح میانی تقسیم‌بندی می‌شوند. سطوح بالاتر نیز بیشتر شامل وظایف و اعمال کلی، مانند هماهنگ‌سازی، بهینه‌سازی و مدیریت است. اطلاعات مهم راجع به فرآیندها نیز در اتاق فرمان کاربر نمایش داده می‌شود.



شکل (۱-۲) طرح ساده شده ای از فرآیندهای اتوماسیون

روش‌های تشخیص و شناسایی خطا قابل توسعه و پیشرفت خواهند بود. برای مثال اهداف این روش‌ها عبارتند از:

- کشف آسان خطاهای کوچکی که رفتار ناگهانی یا ابتدایی (تحلیل آسان) دارند؛
- شناسایی خطا در محرک‌ها، فرآیندها، اجزاء و سنسورها؛ تشخیص خطا در سیستم حلقه بسته؛
- نظارت بر حالت گذرای فرآیندها؛
- فرآیندهای نگهداری و تعمیر مبتنی بر شرایط؛
- کنترل کیفیت شدید محصولات مونتاژ شده در فرآیند تولید؛
- تشخیص و شناسایی خطا در دستگاه‌های بیسیم از راه دور؛
- مبنایی برای مدیریت خطا؛
- مبنایی برای سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا و سیستم‌های پیکره بندی؛

۲-۱-۲- تشخیص خطا در سطح اتوماسیون صنعتی

برای بهبود بخشیدن به امر نظارت، روش‌های تشخیص و شناسایی خطا در قالب اتوماسیونی به چهار بخش تقسیم می‌شود:

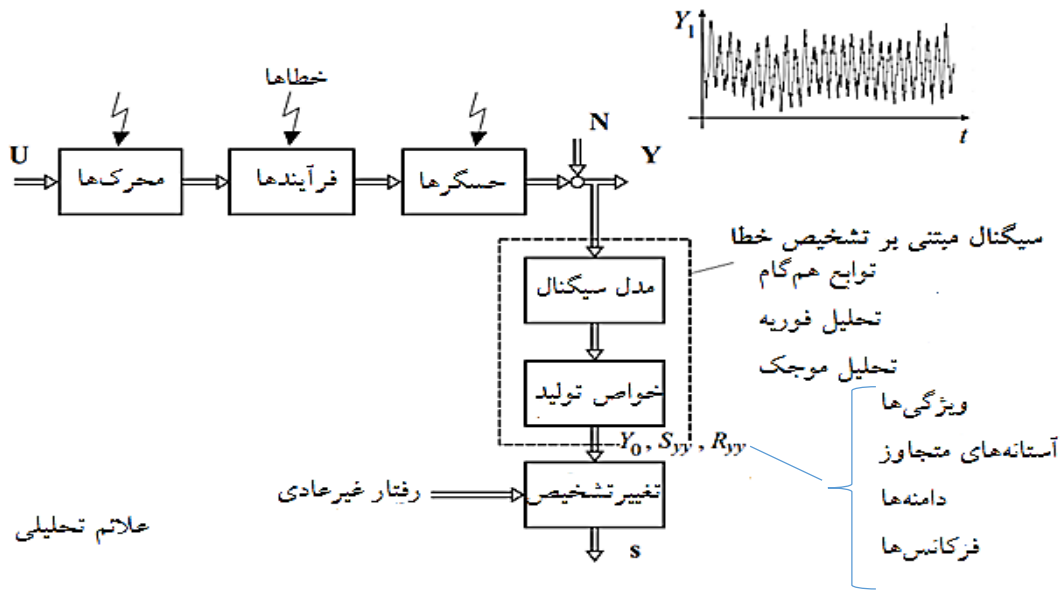
I. مبانی و اصول

II. روش‌های تشخیص خطا

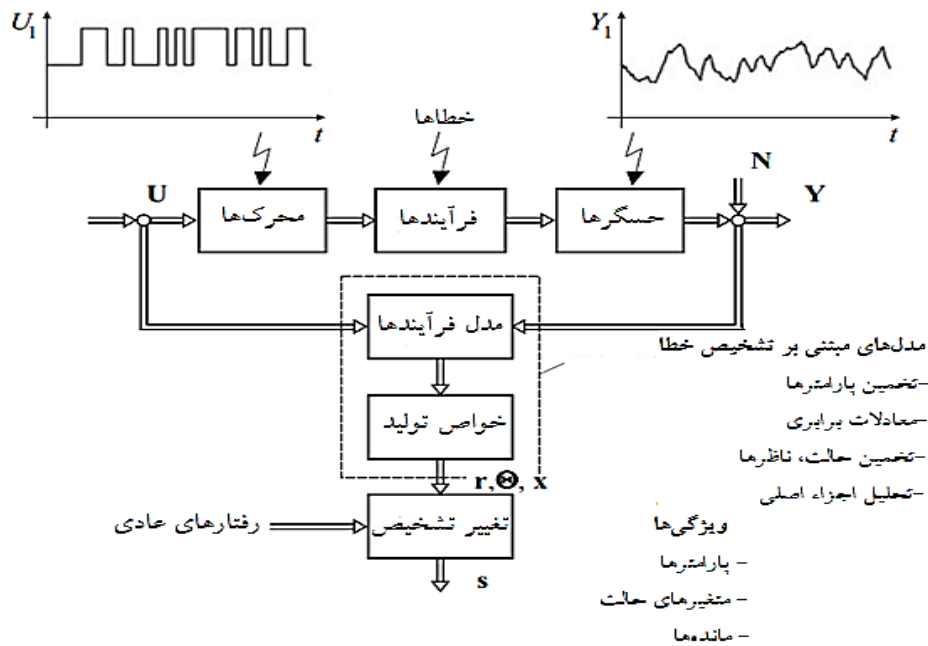
III. روش‌های شناسایی خطا

IV. روش‌های تحمل‌پذیر خطا

یکی از اهداف ناظرهای پیشرفته، بهبود قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و قابلیت تعمیر است. لذا برخی مفاهیم پایه در قسمت اول آورده می‌شود. قسمت دوم و سوم نیز شامل روش‌های رفتاری مبتنی بر تشخیص خطا است. از فرآیندهای ریاضیاتی و مدل‌های سیگنالی به‌عنوان روش‌های پیشرفته تشخیص خطا استفاده می‌شود، که شکل‌های (۲-۲) و (۳-۲) مدل‌های پایه تشخیص خطا را توصیف می‌کند. که این فرآیندهای ریاضیاتی و مدل‌های سیگنالی به‌عنوان مسئله مهم در مدل‌سازی ریاضی خطا است.



شکل (۲-۲) طرحی برای تشخیص خطا به همراه مدل‌های سیگنال



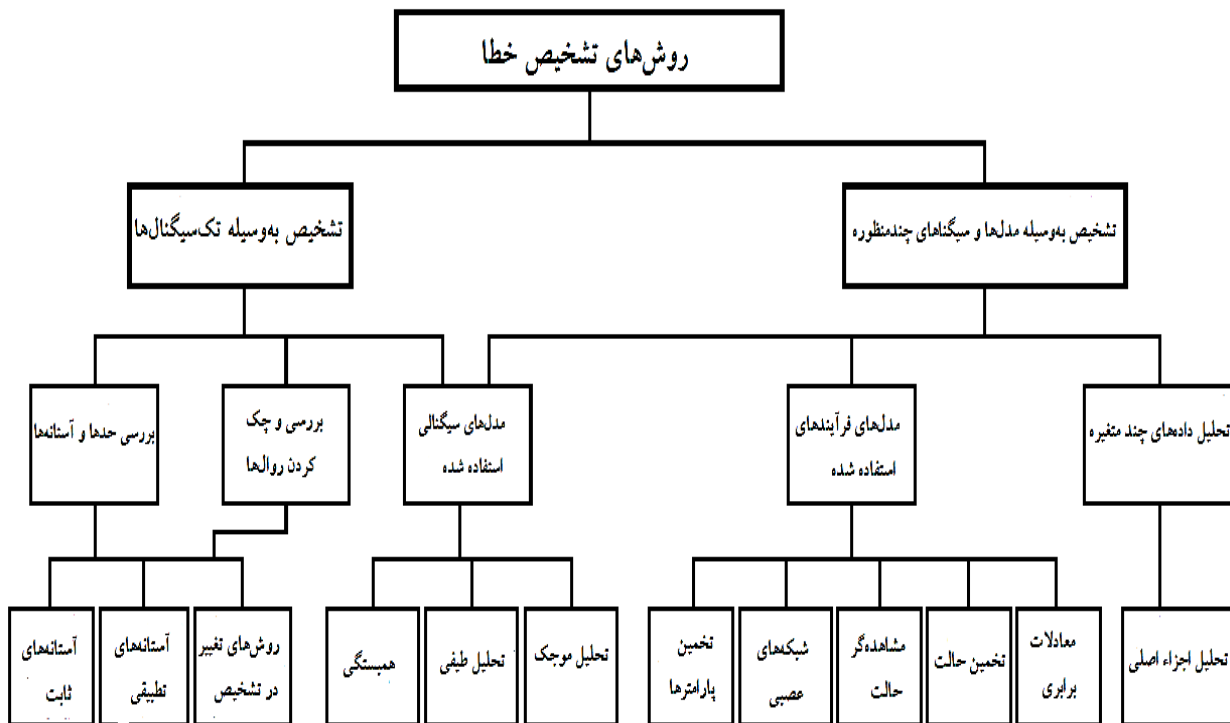
شکل (۳-۲) طرحی برای تشخیص خطا به همراه مدل‌های فرآیند

۲-۱-۳- نگاه نموداری جامع به تشخیص خطای اتوماسیونی

به منظور ساخت سیگنال مانده ی مقاوم تر و حساس تر، یا به عبارتی خطای دقیق تر؛ می توان مانده های بهبودیافته ای را به وسیله عمل جهت دهی و ایجاد ساختار دقیق تر برای مانده ها، یافت. شکل (۲-۴) خلاصه-

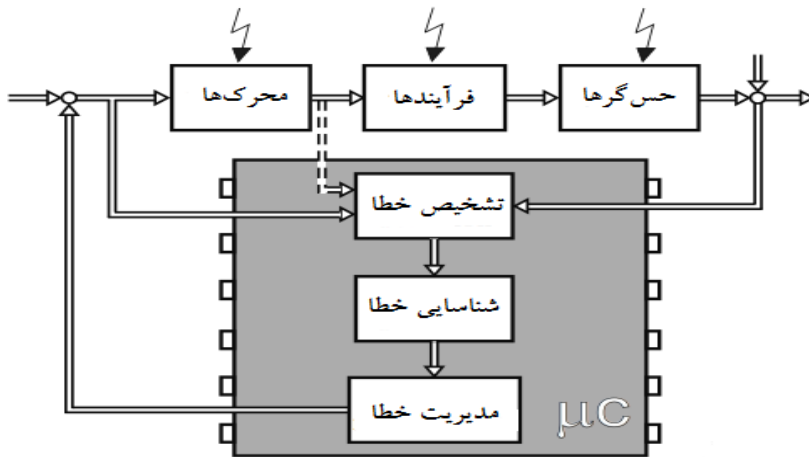
هایی از روش های رفتاری تشخیص خطا را شامل کلیه روش های تشخیص خطا است را نشان می دهد

توضیحی اجمالی در خصوص روش های معرفی شده در شکل (۲-۴) نیز در ادامه فصل بیان خواهد شد.



شکل (۲-۴) نمودار جامع روش های تشخیص خطا

پس از یک خلاصه و جمع بندی اساسی از اطمینان پذیری و ایمنی در نواحی که روش هایی اساسی برای تشخیص و شناسایی در آن توصیف شده است، شناسایی خطا و استخراج مدیریت عمومی خطا میسر خواهد بود [۱۵]. این روش ها در بسیاری از انواع مختلف محرک ها و سنسورها در مدارات حلقه باز و حلقه بسته قابل پیاده سازی خواهد بود، شکل (۲-۶) را ببینید.



شکل (۶-۲) تشخیص خطا به صورت حلقه بسته در قسمت های مختلف رخدادی

۲-۲-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهدات چشمی

در مقوله مشاهدات چشمی، با استفاده از افراد انسانی و روش های سخت افزاری و فیزیکی، که معمولاً هم با دقت بالایی انجام وظیفه نمی کنند سروکار داریم. که چون این نوع از شناسایی بیشتر فیزیکی است لذا ما مانور چندانی روی آن نمی دهیم.

۲-۲-۲-۱- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر بررسی تغییرات سنسورها

عناصر فیزیکی چون سنسورها با توجه به نوع و قیمتی که دارند، طبعاً دارای محدودیت ها و آستانه هایی هم هستند. کار بر روی این نوع از روش شناسایی در مقاله گوسل^۱ [۱۶] و مقاله جرتلر^۲ [۱۷] داده شده است.

۲-۲-۲-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر تحلیل فرکانسی

استفاده از روش تحلیل فرکانسی، بیشتر در سیستم ها و دستگاه هایی است که در محدوده فرکانس هایی پایین کار می کنند، چرا ماهیت فرکانسی خطا در فرکانس های پایین نمود پیدا می کند. اصول پردازشی آن

¹ Gossel

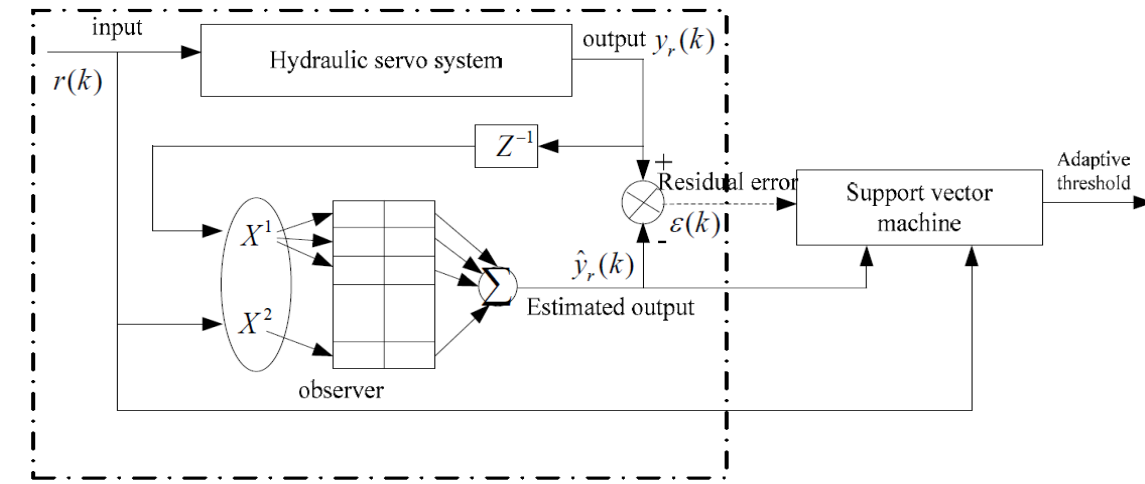
² Gertler

هم به این گونه است که اگر در فرکانس کاری سیستم، تغییری حاصل شود، یعنی خطایی رخ داده است. توضیحات بیشتر در مقالات [۱۸] و [۱۹] شرح داده شده اند.

۲-۲-۳- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر آستانه های تطبیقی

یک روش تشخیص و جداسازی خطا بر مبنای تعیین حدود آستانه تطبیقی است، که برای این منظور، در ابتدا سیستمی که قرار است عمل فوق روی آن انجام شود توسط یک مدل با تغییرات شبه پارامتری خطی شده و مورد توصیف (تشکیل معادلات حالت) قرار می گیرد. در ادامه یک مشاهده گر بر اساس مدل فوق طراحی می شود که بر اساس آن، عدم قطعیت های پارامتری توسط مشاهده گر تطبیق یافته و مؤلفه های خطا را بما می دهد.

کار بر روی این روش هم در مقاله [۲۰] آورده شده است. شکل (۷-۲) مدلی از این روش را در یک سیستم سروو هیدرولیکی با استفاده از آستانه های تطبیقی، نشان می دهد.



شکل (۷-۲) شناسایی خطا مبتنی بر آستانه های تطبیقی در یک دستگاه سروو هیدرولیک

۲-۳- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مدل‌ها و سیگنال‌ها

قبل از آنکه به بررسی تیترا فوق‌بپردازیم لازم است که بدانیم احتمال وقوع خطا در سیستم‌ها دینامیکی و وجود ایجاد خسارت‌های جانی و مالی که از تبعات خطا به‌شمار می‌آیند، موجبات این مهم را فراهم می‌کنند که اساس خطا را در شاکله سیستم نمود دهیم، و منظور از شاکله سیستم یعنی سنسورها، محرک‌ها و اجزا؛ و منظور از اساس خطا هم یعنی دیدگاه زمانی خطا و نحوه آمیختن آن با سیگنال مطلوب؛ که در زیر به تشریح آنها می‌پردازیم:

از دیدگاه ساختار فیزیکی

خطای سنسورها^۱: در شکل خطی شده معادلات حالت که به فرم (۱-۲) است [۲۱]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f_a(x, u, t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_s(x, u, t) \end{cases} \quad (1-2)$$

$f_s(x, u, t)$ معرف خطای سنسور است، و همانطور که مشاهده می‌شود در معادله خروجی ظاهر می‌شود. این خطا اگر شناسایی نشود: موجبات این پیامد را برای ما به همراه دارد که به علت نشان ندادن مقدار صحیح فرآیند منظور، سیستم از مسیر بهینه خود منحرف شود.

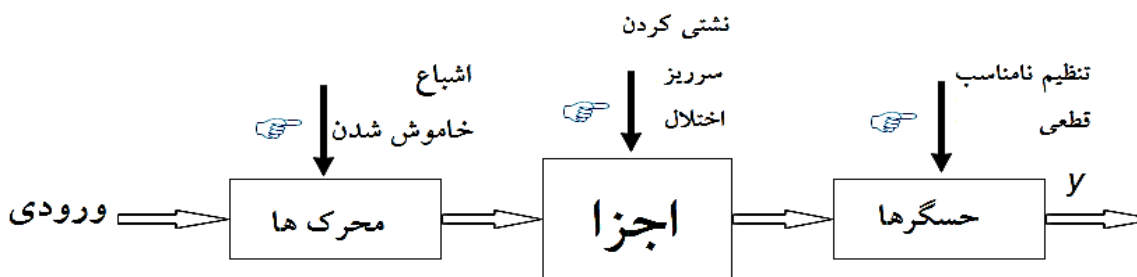
خطای محرک‌ها^۲: همانطور که از معادله (۱-۲) پیداست، $f_a(x, u, t)$ معرف خطای محرک بوده و در حالت‌های ما وارد می‌شود؛ نیز در اینجا هم اگر این گونه از خطا شناسایی نشود موجبات کم شدن و کاهش انجام فرآیند جاری سیستم شده و در برخی سیستم‌ها باعث خراب شدن قسمتی از دستگاه و یا نابود شدن کلی فرآیند کنترل می‌شود.

¹ Sensor fault

² Actuator fault

خطای اجزا^۱: دور از ذهن نیست که خطاهایی در سیستم وجود داشته باشند که نتوان آنها را در دو گروه بالا قرار داد، لذا در گروهی به عنوان خطای اجزا آنها را دسته بندی می‌کنیم. که همانطور که از نامش پیداست این خطا موجبات اثرات سوء سخت افزاری مانند تغییر اندازه کمیت های فیزیکی را حاصل می‌کنند.

شکل (۸-۲) بیانگر مکان خطاها و اثرات هر کدام را نشان می‌دهد



شکل (۸-۲) مکان های بروز خطا در یک سیستم و اثرات مخرب خطا

از دیدگاه تحلیلی زمانی:

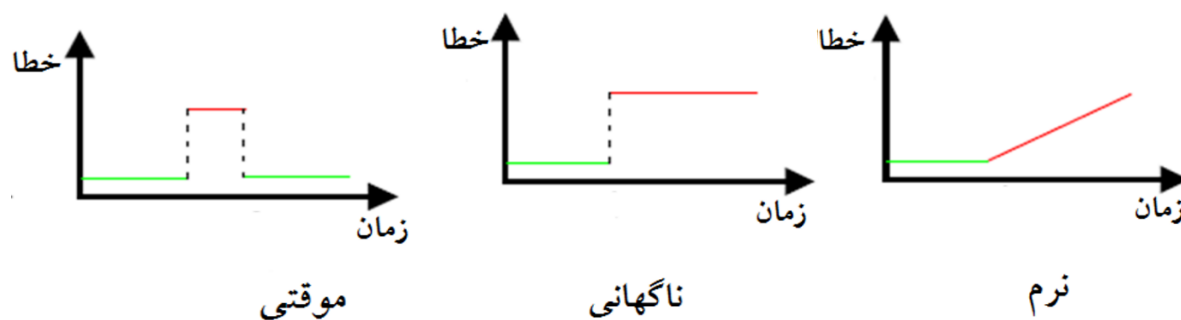
اگر بخواهیم از دید زمانی به مقوله تشخیص خطا نگاهی داشته باشیم، سه نوع زمانی ورود خطا به سیستم را خواهیم داشت

خطاهای ناگهانی: این نوع از خطا که به خطای پله معروف است، به صورت لحظه ای رخداد نموده و بصورت ممتد ادامه دارد، که اگر شناسایی نشود موجبات نقص فنی در سیستم کنترل و خارج شدن سیستم از مسیر مطلوب کاری را به دنبال خواهد داشت.

خطای موقتی: این نوع از خطا که شبیه تابع پالس بوده و معمولاً دارای تناوب هستند.

¹ Plant fault

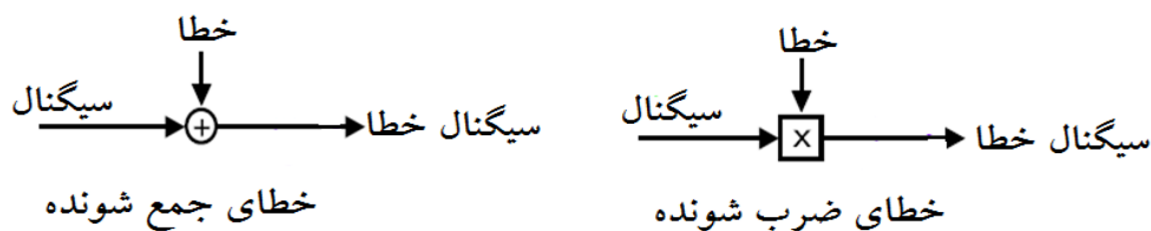
خطای نرم: این نوع از خطا بعد سپری شدن مدت زمان طولانی از کار سیستم؛ به علت عمر بالای سیستم ایجاد شده، که فرسایش و خوردگی از اثرات این نوع است. که شکل (۲-۹) بیانگر شمای نموداری این سه نوع خطاست.



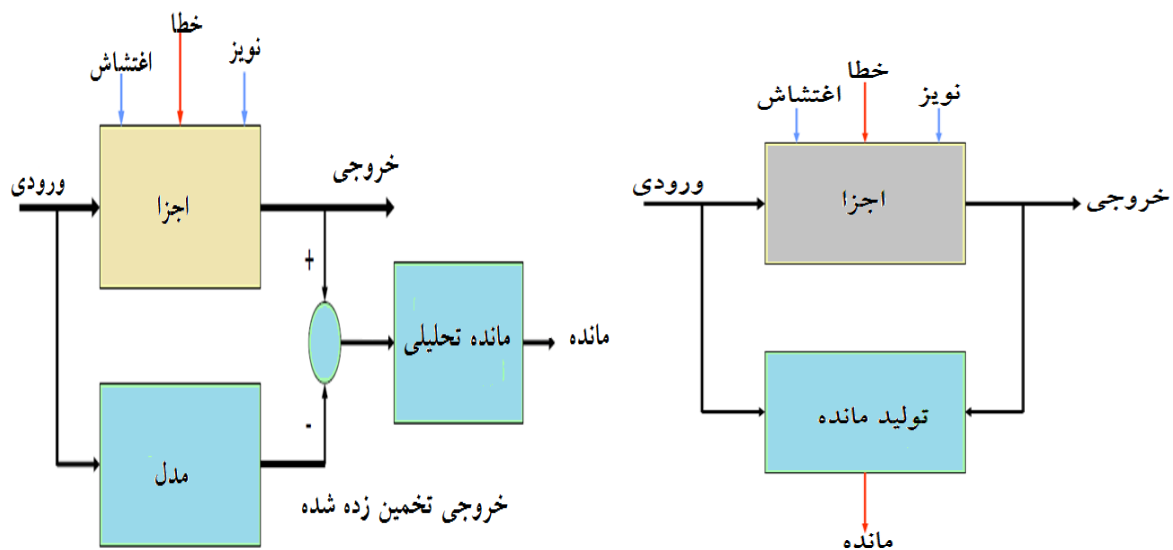
شکل (۲-۹) بررسی شناسایی خطا، از دیدگاه زمان ورود به سیستم

از دیدگاه نوع ورود و آمیختن با سیگنال:

خطاها معمولا به دو گونه ضرب شونده و جمع شونده وارد سیستم می‌شوند، و همانطور که در شکل (۲-۱۰) پیداست گونه ضرب شونده آن به مراتب خطرناک تر است



شکل (۲-۱۰) بررسی شناسایی خطا از دیدگاه نوع مدلی ورودی به سیستم



شکل (۲-۱۱) مدل‌های قابل دستیابی به مانده در یک سیستم نامی

ایده استفاده از مانده که معرف خطای سیستم است هم در [۲۲] آمده است.

۲-۳-۱ تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهده گرها

در بحث مشاهده گرها، سیستم ابتدا باید مشاهده پذیر باشد که در فصل بعد این موضوع مورد بحث قرار گرفته است، چرا که اگر سیستم مشاهده پذیر نباشد، در اینصورت طراحی مشاهده گر حالت برای آن ممکن نخواهد بود.

بعد از اولین مشاهده گر توسط لوئبرگر دومین مشاهده گری که معرفی شد، مشاهده گر اوتکین^۱ بود که با کمک گرفتن از یک پارامتر غیر خطی مشکل ناتوانی مشاهده گر لوئبرگر را در مقابله با اغتشاش حل نموده و به نوعی سیستم را مقاوم کرد. معادلات و شرح مبسوط آن در فصل بعدی ارائه خواهد شد.

در رویکرد مشاهده گر، مبنای کار بر تولید مانده چیده می‌شود که ما با استفاده از مود لغزشی به طور کامل در فصل بعدی به آن خواهیم پرداخت.

¹ Utkin

۲-۳-۲- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر معادلات برابری

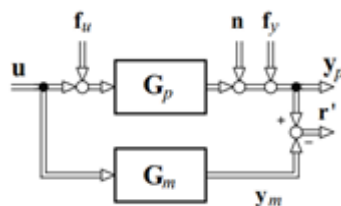
روش پیشنهادی فوق نیز بر مبنای تولید مانده عمل می‌کند، به این صورت که با ایجاد عمل مقایسه ای بین استفاده از محاسبات ریاضی با دقت بالا، با مقدارهای حاصل از اندازه گیریهای فیزیکی؛ مانده ای به وجود می‌آید که مبین خطاست، اگر مانده ای تولید نشود دال بر عدم وجود خطا دارد.

کار بر روی این عمل هم توسط کیم^۱ [۲۳] توسعه و گسترش یافت. برای معرفی مقدماتی این روش تابع تبدیل یک سیستم واقعی زیر را در نظر می‌گیریم که به صورت زیر است:

$$G_p(s) = \frac{y_p(s)}{u(s)} = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} \quad (۵-۲)$$

و تابع تبدیل ریاضی مدل شده آن هم به صورت زیر است:

$$G_m(s) = \frac{y_m(s)}{u(s)} = \frac{B_m(s)}{A_m(s)} \quad (۶-۲)$$



شکل (۲-۱۶) نمایش سیستم به همراه مدل ریاضی آن، به منظور تولید مانده

حال با محاسبه اختلاف خروجی ها با توجه به شکل (۲-۱۴)، مانده ای به قرار زیر داریم:

$$\begin{aligned} r(s) &= y_p(s) - y_m(s) = y_p(s) - G_m(s)u(s) \\ &= G_p(s)(u(s) + f_a(s)) - G_m(s)u(s) \end{aligned}$$

که در آن $f_a(s)$ خطای محرک است، حال با فرض $G_p(s) = G_m(s)$ داریم:

¹ Kim

$$r(s) = G_p(s)(f_a(s)) \quad (7-2)$$

۲-۳-۳- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر مشاهده گر مود لغزشی

مفهوم مود لغزشی حدود هفتاد سال پیش، که تاثیر کنترل کننده های گسسته بر روی سیستم های دینامیکی وجود داشت؛ در اتحاد جماهیر شوروی پدیدار شد [۲۱]. در همان دوران بود که اوتکین [۴] گونه مشاهده گر لغزشی را که از نوع گسسته بود را معرفی کرد. سپس توسط اسلوتین [۲۴] با اضافه کردن یک پارامتر خطی به خروجی مشکل بهره پایین آن را حل نمودند. بعدها والکت و زاک [۲۵] با استفاده قضیه پایداری لیاپانوف و با بهبود بخشیدن به پارامتر خطی، مشکل عدم مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت و اغتشاش را حل کردند. در اینجا از توضیحات بیشتر خودداری کرده و بحث مفصل آن را در فصل بعد ارائه خواهیم کرد.

۲-۳-۴- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر شبکه های عصبی

مشاهده گرهای عصبی پیشنهاد شده برای شناسایی خطا با استفاده از معادلات خطایی که از خروجی مشاهده گر حاصل می شود عمل تولید مانده را انجام می دهند. سیستم زیر را در نظر بگیرید [۲۶]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + g(x, u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (8-2)$$

به طوریکه

$$x(t) \in \mathbb{R}^n \text{ مبین بردار حالت}$$

$$u(t) \in \mathbb{R}^m \text{ مبین بردار ورودی}$$

$$y(t) \in \mathbb{R}^m \text{ مبین بردار خروجی}$$

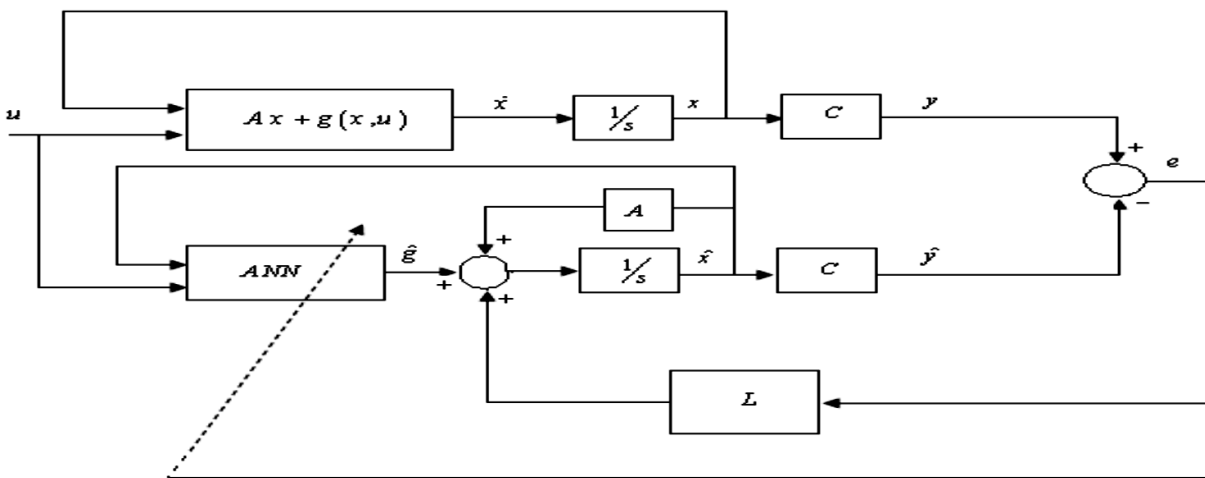
$$g(x, u) \text{ ترم غیر خطی}$$

حال با این فرض که زوج (A, C) مشاهده پذیر باشد، می توان معادلات مشاهده گر را به قرار زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \hat{g}(\hat{x}, u) + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (9-2)$$

طوریکه \hat{y} و \hat{x} دلالت بر حالات و خروجی مشاهده گر دارند، لیکن برای انتخاب L باید به این نکته عنایت داشته باشیم که طیف $(A - LC)$ در سمت چپ محور مختلط قرار گیرد.

نکته اصلی در طراحی و پیاده سازی مشاهده گر عصبی، استفاده از شبکه عصبی جهت شناسایی و بازسازی حالات مشاهده گر است؛ شکل (۱۶-۲) شمای کلی یک مشاهده گر عصبی را نمایش می دهد



شکل (۱۸-۲) شناسایی خطا مبتنی بر شبکه عصبی

از جمله مزیت های یک شبکه عصبی همراه با یک لایه مخفی، این است که به تنهایی قادر به شناسایی و مدل کردن یک سیستم غیر خطی با هر مرتبه ای است.

شاخص اصلی شبکه های عصبی استفاده شده در اینجا، به عملکرد تخمین خلاصه می شود. حال در ابتدا برای تحقق این مهم، تابع نرم $\gamma(x)$ که از $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ است را در نظر بگیرید. می توان نشان داد که تا مادامی که x متعلق به مجموعه \mathbb{R}^n باشد، وزن ها و آستانه هایی برای هر مقدار بزرگ و دلخواه لایه مخفی عصبی S وجود دارد، به طوریکه برای هر تابع پیوسته و متعلق به مجموعه فوق بتوان نشان داد که:

$$\gamma(x) = W\sigma(Vx) + \varepsilon(x) \quad (10-2)$$

به طوریکه $\varepsilon(x)$ خطای تقریب شبکه عصبی بوده و ارضا کننده شرط $\|\varepsilon(x)\| \leq \varepsilon_N$ که ε_N مبین محدود کننده تابع ناشناخته خطا به مقدار S است. نیز به علاوه برای هر مقدار مثبت ε_N تنها یک شبکه عصبی وجود دارد که $\|\varepsilon(x)\| \leq \varepsilon_N$ و برای همه x ها برقرار باشد. البته لازم است که فرض کنیم وزن های ایده آل V و W به مقادیر مشخصی محدود بوده پس لذا دارای کران هستند. به طوری که $\|W\|_F \leq W_M$ و $\|V\|_F \leq V_M$.

بر مبنای شاخص تقریب زنی شبکه های عصبی، تابع غیرخطی و نرم $g(x, u)$ در معادله (۲-۸) به فرم (۲-۱۱) در قالب شبکه های عصبی تقریب زده میشود.

$$g(x, u) = W\sigma(Vz) + \varepsilon(x) \quad (۱۱-۲)$$

که $z = [x \ u]$. بنابراین، تخمین تابعی $g(x, u)$ شبکه عصبی برای $g(x, u)$ برابر است با:

$$\hat{g}(\hat{x}, u) = \hat{W}\sigma(\hat{V}\hat{z}) \quad (۱۲-۲)$$

پس مشاهده گر عصبی پیشنهادی هم به صورت (۲-۱۳) است:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \hat{W}\sigma(\hat{V}\hat{z}) + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (۱۳-۲)$$

حال با تعریف خطای تخمین حالت $e_x = \hat{x} - x$ ، و تعریف خطای تخمین خروجی $e_y = \hat{y} - y$ ، دینامیک خطا به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) = Ax(t) + W\sigma(Vz) - A\hat{x}(t) - \hat{W}\sigma(\hat{V}\hat{z}) + L(y - \hat{y}) + \varepsilon(x) \\ e_y(t) = Ce(t) \end{cases} \quad (۱۴-۲)$$

حال با اضافه و کم کردن $W\sigma(\hat{V}\hat{z})$ به معادله (۲-۱۴)، میتوان نوشت:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ge + e_W \sigma(\hat{V}\hat{z}) + \xi(t) \\ e_y(t) = Ce(t) \end{cases} \quad (15-2)$$

به طوریکه $e_W = W - \hat{W}$ وزن خطای تخمین شبکه عصبی، $G = A - LC$ و $\xi(t) = W[\sigma(Vz) - \sigma(\hat{V}\hat{z})] + \varepsilon(x)$ به قسمی که $\|\xi(t)\| \leq \bar{\xi}$ و $\bar{\xi}$ تعیین کننده مقدار ماکزیمم محدودکنندگی است.

۲-۳-۵- تشخیص و جداسازی خطا مبتنی بر منطق فازی

طراحی مشاهده‌گرهای فازی TSK مبتنی بر مفهومی تحت عنوان PDC ^۲ انجام می‌شوند [۲۷]. در مقاله [۲۷] روشی برای شناسایی خطا با استفاده از مشاهده‌گر فازی ارائه شده، که در آن از تمامی حالات؛ توسط یک مشاهده‌گر تخمینی زده می‌شود، که این تخمین بیانگر درخت رویداد خطا است. به‌علت وجود برخی عدم قطعیت‌ها مانند اغتشاش و نیز ورودی‌های نامعین، این مسئله پیش آمد که باید سیستمی که قرار است به روش فوق شناسایی خطا را انجام دهد مقاوم بوده تا بتواند خطای واقعی را به ما نمایش دهد. اینجا بود که با ترکیب مشاهده‌گر فازی با مود لغزشی توسط برگستن^۳ در مقاله [۲۸] عمل مقاوم سازی انجام شد. روش کار هم به این صورت بود که با تعریف دو مشاهده‌گر لغزشی-فازی، یکی به‌عنوان مشاهده‌گری که با سوق دادن ترم سوئیچینگ، سعی در شناسایی خطا، و دیگری در جهت تخمین حالات انجام وظیفه می‌کند

¹ Takagi Sogno Kang

² Parallel Distributed Compensation

³ Bergsten

فصل سوم:

معرفی و طراحی مشاهده گر مود لغزشی برای تشخیص و جداسازی خطا

۳-۱- تاریخچه و معرفی مشاهده‌گرهای مود لغزشی

در ادامه توضیحاتی که در قسمت ۲-۳-۳ بیان شده بود، رویکرد مشاهده‌گر واکت و زاک به این علت که با استفاده از محاسبات ریاضی و ابزارهای جبری که در برداشت، توانست مطلوبیات مناسب و دلخواه ما را برآورده کرده و خطای سیستم را بشکل مناسب‌تری بازسازی می‌کند.

حال در ادامه، به طراحی و بیان مشاهده‌گرهای مود لغزشی اوتکین و والکت و زاک می‌پردازیم.

۳-۲- مفاهیم رایج در مشاهده‌گرها

سیستم دینامیکی نامعین (به‌خاطر وجود خطا) توصیف شده (۳-۱) را در نظر بگیرید [۲۱]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(x, u, t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (۳-۱)$$

به‌طوریکه $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{p \times n}$ نیز در حالی که $p \geq m$ ، و همچنین تابع ناشناخته

$f: R^n \times R^m \times R_+ \rightarrow R^n$ که تحت عنوان نامعینی ارائه می‌شود، و ارضاکننده شرایط زیر است:

$$\|f(x, u, t)\| \leq \rho \quad \forall x \in R^n, \quad u \in R^m, t \geq 0$$

۳-۳- مشاهده‌گر اوتکین^۱

سیستم به معادلات (۳-۱) تحت شرایط مشاهده پذیر بودن زوج (A, C) و در نظر گرفتن $f(x, u, t) \equiv 0$

را در نظر می‌گیریم. حال برای آن که بتوانیم اجزا و ترکیبات موجود در حالت را در خروجی ظاهر بکنیم؛

باید با استفاده از تغییر مختصاتی در خروجی این عمل را پیاده‌سازی بکنیم. منطقی به نظر می‌رسد که بدون

از دست دادن کلیت ماهیت در خروجی، ما ماتریس خروجی را به‌صورت زیر توزیع کنیم، [۲۱]

¹ Utkin

$$C = [C_1 \ C_2] \quad (۲-۳)$$

به طوریکه $C_1 \in R^{p \times (n-p)}$, $C_2 \in R^{p \times p}$ & $\det(C_2) \neq 0$ ، در نتیجه ماتریس انتقال نامنحصر بفرده T را به صورت

$$T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & 0 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad (۳-۳)$$

تعریف می کنیم که این مختصات جدید سیستم را می توان به صورت ماتریس توزیع جدید خروجی $CT^{-1} = [0 \ I_p]$ فرض کرد. حال دیگر ماتریس های سیستم در مختصات جدید را به صورت زیر می نویسیم:

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \ \& \ TB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

سپس سیستم نامی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \\ \dot{y}(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) \end{cases} \quad (۴-۳)$$

که در اینجا داریم:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ y \end{bmatrix} = Tx \ \& \ x_1 \in R^{n-p}$$

مشاهده گر پیشنهاد شده توسط اوتکین به فرم زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) + Lv \\ \dot{\hat{y}}(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - v \end{cases} \quad (۵-۳)$$

به طوریکه $(\hat{x}_1(t), \hat{y}(t))$ به عنوان تخمین های حالت برای $(x_1(t), y(t))$ در نظر گرفته می شود، و

$L \in R^{(n-p) \times p}$ ماتریس بهره فیدبک ثابت و بردار گسسته v توسط اجزای زیر تعریف می شود:

$$v_i = M \operatorname{sgn}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \quad M \in R_+ \quad (6-3)$$

و نیز sgn به عنوان تابع علامت در نظر گرفته می شود.

اگر بین حالات واقعی و تخمین زده شده خطای اندازه گیری وجود داشته باشد، بردار خطاهایی تحت عناوین $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ و $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ تعریف می کنیم که طبق معادلات (3-4) و

(3-5) خطای سیستم به شکل زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + Lv \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) - v \end{cases} \quad (7-3)$$

از آن جایی که زوج (A, C) مشاهده پذیر بوده و زوج (A_{11}, A_{21}) نیز مشاهده پذیر است، لذا باید L طوری انتخاب شود که طیف $A_{11} + LA_{21}$ در نیمه سمت چپ صفحه مختلط واقع شود. حال تغییر مختصات دیگری، را طبق زیر اعمال می کنیم:

$$T_s = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \quad \& \quad \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix}$$

حال با توجه به مختصات جدید فوق، خطای سیستم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\hat{e}}_1(t) = \hat{A}_{11}\hat{e}_1(t) + \hat{A}_{12}e_y(t)$$

(3-8)

$$\dot{\hat{e}}_y(t) = \hat{A}_{21}\hat{e}_1(t) + \hat{A}_{22}e_y(t) - v \quad (3-9)$$

به طوری که $\hat{A}_{11} = A_{11} + LA_{21}$ ، $\hat{A}_{12} = A_{12} + LA_{22}$ و $\hat{A}_{22} = A_{22} - A_{21}L$ & $\hat{A}_{21} = A_{21} - LA_{11}$

و این مختصات جدید را می توان با استفاده از نظریه اختلال منحصر به فرد نشان داد که برای یک M به اندازه کافی بزرگ، یک حرکت لغزشی را می توان در خروجی حالت خطا در معادله (3-9) دارا بود. که متعاقبا

بعد گذشت زمان محدود، باید $e_y(t) = 0$ و $\dot{e}_y(t) = 0$ داشته باشیم. ونیز معادله (۸) به معادله زیر تقلیل می یابد:

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) \quad (10-3)$$

که می توان با استفاده از انتخاب مناسب برای L ارائه شده سیستم را پایدار نموده و $\dot{e}_1 \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ و متعاقبا $\hat{x}_1(t) \rightarrow x_1(t)$ و حالات باقی مانده را هم می توان در مختصات اصلی سیستم بازسازی نمود، که این حالات باقی مانده عبارتند از:

$$\hat{x}_2(t) = C_2^{-1}(y - C_1)\hat{x}_1(t) \quad (11-3)$$

که البته یکی از مشکلات اصلی در این روش انتخاب مناسب بهره M برای محدود کردن زمان رسیدن به حرکت لغزشی است.

۳-۴- اصلاح مشاهده گر اوتکین

با در نظر گرفتن اضافه کردن ترم فیدبک منفی خطای خروجی به هر یک از معادلات مشاهده گر اوتکین، نتایجی جدید در سیستم خطا؛ حکم فرما می شود، که این نتایج به صورت زیر حاصل می شوند:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) + A_{12}' e_y(t) - G_I e_y(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}' e_1(t) + A_{22}' e_y(t) - G_n e_y(t) - v \end{cases} \quad (12-3)$$

با انتخاب $G_I = A_{12}'$ و $G_n = A_{22}' - A_{22}^S$ که A_{22}^S می تواند هر ماتریس پایدار با ابعاد مناسب باشد،
آنگاه

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}' e_1(t) + A_{22}^S e_y(t) - v \end{cases} \quad (13-3)$$

که در این شرایط و قالب نامی؛ برای $v \equiv 0$ به دلیل این که قطب‌های سیستم ترکیبی حاصل؛ که از $\sigma(A'_{11}) \cup \sigma A_{22}^s$ حاصل می‌شوند در نیمه سمت چپ صفحه مختلط شده و سیگنال خطای ما به شکل پایدار مجانبی خواهد بود. نیز در فرم اصلی مشاهده گر اوتکین، عمل سوئیچینگ v باعث شناسایی خطا می‌شود.

۳-۵- مشاهده گر والکت و زاک

مسئله در نظر گرفته شده توسط والکت و زاک^۱، شامل تخمین حالات سیستم توصیف شده در معادلات (۳-۱) است؛ به طوری که با علی‌رغم وجود عدم قطعیت و اغتشاش، بتوان خطا را به طور نمایی به صفر متمایل کرد. بدین صورت:

$$f(x, u, t) = B\xi(x, t) \quad (۳-۱۴)$$

که در آن تابع ناشناخته و محدود $\xi: R^n \times R_+ \rightarrow R^m$ طوری فرض می‌شود که بتوان گفت:

$$\|\xi(x, t)\| \leq \rho \quad \forall x \in R^n, t \geq 0$$

البته در اینجا فرض دیگری هم داریم و آن این که $G \in R^{n \times p}$ وجود دارد، به طوری که $A_0 = A - GC$ دارای مقادیر ویژه پایدار بوده و هم‌چنین زوج لیاپانوف (P, Q) برای A_0 وجود داشته باشد به طوری که محدودیت ساختاری

$$C^T F^T = PB \quad (۳-۱۵)$$

بتواند شرایط $F \in R^{m \times p}$ را برآورده کند.

حال با توجه به شرایط فوق، قالب مشاهده گر پیشنهادی به صورت زیر است:

¹ Wallcot & Zak

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + v \quad (۱۶-۳)$$

حال خطایی را به صورت $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ تعریف می‌کنیم، و

$$v = \begin{cases} -\rho \frac{P^{-1}C^T F^T F C e}{\|F C e\|} & \text{if } F C e \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱۷-۳)$$

با انتخاب تابع لیاپانوف پیشنهادی به صورت $V(e) = e^T(t) P e(t)$ ، به راحتی می‌توان نشان داد که از برای $e \neq 0$ خواهیم داشت: $\dot{V}(e) < 0$ & $V(e) > 0$ بنابراین، $e(t) \rightarrow 0$.

حال در اینجا مشکل مهمی که پیش رو داریم ارضای زوج (F, P) جهت برآورده کردن شرایط زیر است:

(۱) یک ماتریس لیاپانوف برای A_0 باشد، که خود وابسته به انتخاب G است.

(۲) F طوری باشد که بتواند ساختار $C^T F^T = P B$ را برآورده کند.

یک شرط کافی برای وجود چنین P این است که تابع انتقال تعریف شده و اصلاح شده زیر دارای قسمت

$$G(s) = F C (S I - A_0)^{-1}$$

حقیقی مثبت باشد.

یک الگوریتم برای طراحی P که توسط والکت و زاک (۱۹۹۸) داده شده است که می‌توان به طور خلاصه در ادامه به آنها اشاره نمود.

(۱) انتخاب یک طیفی از ماتریس A_0 وانگهی انتخاب مقدار تطبیق و صحیح G

(۲) حل نمادین محدودیت ساختاری و به دست آوردن یک عبارت متقارن برای P_F که در سرتاسر F برقرار باشد.

(۳) محاسبه نمادین $Q(P_F)$ در سرتاسر P_F با استفاده از عبارت $-(P_F A_0 + A_0^F P_F)$

(۴) انتخاب عناصر F و P_F به طوری که این یقین را پیدا کنیم که $Q(P_F)$ حتما مثبت متقارن خواهد بود.

۳-۶- همسان سازی مشاهده گرهای گسسته

سیستم دینامیکی (۱-۳) را با در نظر گرفته و فرض کنید که با اعمال ماتریس غیرتکین T تغییر مختصات به قرار زیر را دارا باشیم:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}y \\ \dot{y} = A_{21}x_1 + A_{22}y + B_2 + \xi \end{cases} \quad (۱۸-۳)$$

که $x_1 \in R^{n-p}, y \in R^p$ و ماتریس A_{11} دارای مقادیر ویژه پایدار است. تابع عدم قطعیت $\xi: R^n \times R^m \times R_+ \rightarrow R^m$ هم ناشناخته اما کراندار فرض می شود، به طوری که:

$$\|\xi(x, t)\| \leq \rho \quad \forall x \in R^n, u \in R^m, t \geq 0$$

حال مشاهده گر، به فرم زیر را تشکیل می دهیم

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{y} - A_{12}e_y \\ \dot{\hat{y}} = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{y} + B_2u - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + P_2^{-1}v \end{cases} \quad (۱۹-۳)$$

بردار گسسته v هم به قرار زیر تعریف می گردد

$$v = \begin{cases} -\rho \|P_2\| \frac{e_y}{\|e_y\|} & \text{if } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۲۰-۳)$$

که در آن $P_2 \in R^{n \times n}$ متقارن مثبت فرض می شود.

اگر خطای تخمین حالت $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ و $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ تعریف شود، پس به درستی می توان نوشت که:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 \\ \dot{e}_y = A_{11}x_1 + A_{22}^s e_y + P_2^{-1}v - \xi \end{cases} \quad (21-3)$$

اما قضیه ای اینجا مطرح می‌شود که ماتریس‌های متقارن و مثبت زیادی برای P_2 می‌توانند وجود داشته باشند که خطای دینامیکی نامعین سیستم (۲۱-۳) را به طور مجانبی پایدار کنند. لذا برای اثبات پایدار مجانبی بودن این ماتریس، اثبات زیر را مطرح می‌کنیم.

اثبات: فرض کنید که $Q_2 \in R^{(p \times p)}$ و $Q_1 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ مثبت معین و متقارن طراحی شوند، ماتریس $P_2 \in R^{(p \times p)}$ هم متقارن، مثبت و منحصر بفرد تعریف شوند، حال معادله لیاپانوف را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$P_2 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_2 = -Q_2$$

حال تعریف می‌کنیم $\hat{Q} = A_{21}^T P_2 Q_2^{-1} P_2 A_{21} + Q_1$ و با توجه به اینکه $\hat{Q} = \hat{Q}^T > 0$

ماتریس $P_1 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ را که معین مثبت متقارن است را برای حل معادله لیاپانوف تعریف می‌کنیم

$$P_1 A_{11} + A_{11}^T P_1 = -\hat{Q}$$

با در نظر گرفتن اینکه $V(e_1, e_y) = e_1^T P_1 e_1 + e_y^T P_2 e_y$ یک تابع منتخب لیاپانوف باشد؛ مشتق آن برابر است با:

$$\dot{V} = -e_1^T \hat{Q} e_1 + e_1^T A_{21}^T P_2 e_y + e_y^T P_2 A_{21} e_1 - e_y^T Q_2 e_y + 2e_y^T - 2e_y^T P_2 \xi$$

و به وضوح پیداست که:

$$\begin{aligned} (e_y - Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1)^T Q_2 (e_y - Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1) &= e_y^T Q_2 e_y - e_1^T A_{21}^T P_2 e_y - \\ e_y^T P_2 A_{21} e_1 + e_1^T A_{21}^T P_2 Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1 \end{aligned} \quad (22-3)$$

با جایگذاری معادله (۳-۲۲) در معادله \dot{V} و تساوی $\tilde{e}_y = e_y - Q_2^{-1}P_2A_{21}e_1$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -e_1^T \hat{Q} e_1 + e_1^T A_{21}^T P_2 A_{21} e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y + 2e_y^T v - 2e_y^T P_2 \xi \\ &= -e_1^T Q e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y + 2e_y^T v - 2e_y^T P_2 \xi \\ &= -e_1^T Q e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y - 2\rho \|P_2\| \|e_y\| - 2e_y^T P_2 \xi \\ &\leq -e_1^T Q e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y - 2\rho \|P_2\| \|e_y\| + 2\rho \|P_2\| \|e_y\| \\ &= -e_1^T Q e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y < 0 \text{ for } (e_1, e_y) \neq 0\end{aligned}$$

و (e_1, e_y) به طور نمایی به صفر میل می کنند.

اگر \hat{x} را به عنوان تخمین حالت برای x و $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ ، آنگاه مشاهده گر مقاوم به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + G_n v \quad (۳-۲۳)$$

که در آن

$$G_l = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{21} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix} \quad G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2^{-1} \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{cases} -\rho \|P_2\| \frac{Ce}{\|Ce\|} & \text{if } Ce \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{و}$$

حال در اینجا می توان دامنه و بهره مشاهده گر را برای پیاده سازی هر نوع سیستم پایدار کنترلی که تحت شرایط نامعینی همسان در نظر گرفته شده در رابطه برابری (۳-۲۴)

$$f(x, u, t) = B\xi(x, t) \quad (۳-۲۴)$$

که در آن $\xi(x, t)$ به عنوان تابع ناشناخته ای فرض می شود که ارضا کننده شرایط

را پیاده‌سازی کرد. $\|\xi(x, t)\| \leq \rho \forall x \in R^n, t \geq 0$

۳-۷- قالب همراه مشاهده‌گر والکت و زاک

برای هر سیستم مفروض، می‌توان نشان داد که از برای هر ماتریس لیاپانوف شناخته شده به مانند (۱۵)، مشاهده‌گر والکت و زاکی وجود دارد به‌طوری‌که بتوان این مشاهده‌گر را به هر سیستمی گسترش داد. اما تنها دو نکته را در طراحی باید به آن عنایت داشته باشیم

نکته ۱: برای سیستمی با (A_0, B, C) مشخص و A_0 پایدار، تخمین‌های $(\tilde{A}_0, \tilde{B}, \tilde{C})$ که توسط ماتریس غیرتکین T تولید شده‌اند. اگر ماتریس لیاپانوف P پایدار برای A_0 بوده و ارضا کننده شرایط محدودی $C^T F^T = PB$ ، آنگاه ماتریس ماتریس لیاپانوفی $\tilde{P} = (T^{-1})^T P T^{-1}$ ماتریسی پایدار برای \tilde{A}_0 بوده و ارضا کننده ساختار محدودیتی $C^T F^T = PB$ خواهد بود.

نکته ۲: و ماتریس پایدار A_0 که به صورت زیر تجزیه شده است:

$$A_0 = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

که در آن $A_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $A_{22} \in R^{p \times p}$. نیز فرض کنید که P ماتریس لیاپانوف برای A_0 بوده که به شکل زیر تجزیه می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$$

که در آن $A_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $A_{22} \in R^{p \times p}$. و زیرماتریس‌های A_{11} و A_{12} هم دارای مقادیر ویژه پایدار هستند.

قضیه (۱): برای سیستمی با (A_0, B, C) معلوم و زوج ماتریس (P, F) مشخص جهت مشاهده گر والکت و زاک، وجود دارد یک ماتریس انتقال غیر تکین T به طوریکه با عنایت به مختصات جدید $(\bar{A}_0, \bar{B}, \bar{C})$ ، بتوان سه ویژگی زیر را دارا بود:

الف) $\bar{A}_0 = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}$ که در آن $\bar{A}_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $\bar{A}_{22} \in R^{p \times p}$ و هر دو هم پایدار هستند.

ب) $\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{22}^* F^T \end{bmatrix}$ که در آن $P_{22}^* \in R^{p \times p}$ و $P_{22}^* = (P_{22}^*)^T > 0$

ج) $\bar{C} = [0 \ I_p]$

د) ماتریس لیاپانوف دارای تجزیه‌ای به قرار زیر است:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21}^T & P_{22} \end{bmatrix}$$

که در آن و $P_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $P_{12} \in R^{(p \times p) \times p}$ و $P_{22} \in R^{(p \times p)}$

اثبات: زوج ماتریس (P, F) ارائه دهنده قسمتی از مشاهده گر برای سیستم نامی (A_0, B, C) هستند،

که می‌توان با فرض $C = [0 \ I_p]$ ؛ ماتریس را به صورت زیر نوشت:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21}^T & P_{22} \end{bmatrix}$$

که در آن و $P_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $P_{12} \in R^{(p \times p) \times p}$ و $P_{22} \in R^{(p \times p)}$

با اعمال تغییر مختصاتی توسط ماتریس $T = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & I_p \end{bmatrix}$ که غیر تکین بوده به این علت که $\det(T) = \det(P_{11}) \neq 0$ و نیز چون $P_{11} = P_{11}^T > 0$ ، مختصات جدید سیستمی به قرار زیر خواهد بود.

$$\bar{C} = CT^{-1} = [0 \quad I_p]$$

پس مورد ج) تحقق یافت.

اگر P^{-1} به صورت $P^{-1} = \begin{bmatrix} P_{11}^* & P_{12}^* \\ P_{21}^* & P_{22}^* \end{bmatrix}$ بیان شود، و با توجه به اینکه با فرض $B = P^{-1}C^T F^T$ آنگاه

$$\bar{B} = TB = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11}^* & P_{12}^* \\ P_{21}^* & P_{22}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix} F^T = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{22}^* F^T \end{bmatrix} \quad \& \quad P_{11}P_{12}^* + P_{12}P_{22}^* = 0$$

پس مورد ب) نیز تحقق یافت.

حال باتوجه به اینکه ماتریس $\bar{P} = (T^{-1})^T P T^{-1}$ ؛ یک ماتریس لیاپانوف برای \bar{A}_0 بوده لذا با انجام محاسباتی مستقیم داریم:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ -P_{12}^T P_{11}^{-1} & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21}^T & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & -P_{11}^{-1} P_{12} \\ 0 & I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & \bar{P}_2 \end{bmatrix}$$

که $\bar{P}_2 = P_{22} - P_{12}^T P_{11}^{-1} P_{12}$ لذا این مستوجب این است که \bar{P} ساختاری بلوکی و تجزیه ای مورد نیاز را دارا باشد، لذا مورد د) هم اغنا شد.

و در آخر به این دلیل که ماتریس لیاپانوف برای \bar{A}_0 که قبلا نشان داده شده بوده و با توجه به نکته ۲ به وضوح پیداست که \bar{A}_{11} و \bar{A}_{22} پایدار بوده، و لذا مورد الف) هم محقق شد.

قضیه فوق نشان داد که برای یک سیستم داده شده (A, B, C) ، یک زوج (P, F) مشاهده‌گر والکت و یک ماتریس غیرتکین انتقال T وجود دارند، به طوری که مختصات سیستم عدم قطعیت $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ به صورت زیر نوشته شود

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}e(t) + A_{12}y(t) \\ \dot{y}(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}e_y + \bar{B}_2u(t) + \bar{B}_2\xi \end{cases} \quad (25-3)$$

که در آن ماتریس A_{11} پایدار است. حال فرض کنید ماتریس ورودی سیستم، که ماتریس B باشد را به صورت زیر تجزیه کنیم

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \& B_1 \in R^{(n-p) \times m}, B_2 \in R^{p \times m}$$

حال بنا بر این داریم که مسئله تعریفی زیر را حل کنیم:

$$B_1 + T_{12}B_2 = 0 \quad (26-3)$$

$$T_{12} \in R^{(n-p) \times p} \text{ که در آن}$$

نکته ۳) اگر یک مشاهده‌گری وجود داشته باشد که بتواند به‌طور مجانبی خطای سیستم (۱) و (۲۴) را مهیا

$$B_1 + T_{12}B_2 = 0 \text{ به طوری که } T_{12} \in R^{(n-p) \times p}$$

اثبات: قضیه (۱) نشان داد که:

$$T \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \& T = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \& F^T = (P_{22}^*)^{-1}B_2$$

که متعاقباً $P_{11}^{-1}P_{12}$ می‌تواند یک انتخاب مناسب برای T_{12} باشد.

نکته ۴) ماتریس $T_{12} \in R^{(n-p) \times p}$ ارضاکننده $B_1 + T_{12}B_2 = 0$ است، اگر و تنها اگر

$$\text{rank}(B_2) = m$$

اثبات: فرض کنید که یک ماتریس وجود دارد، به طوری که ارضاکننده باشد.

این معادله این را بما می گوید که سطرهای ماتریس B_1 باید حاصل یک ترکیب خطی از سطرهای B_2 باشند و همچنین $\text{rank}(B) = \text{rank}(B_2)$ اما با این فرض که $\text{rank}(B) = m$ لذا $\text{rank}(B_2) = m$

حال که ما فرض کردیم که $\text{rank}(B_2) = m$ پس ماتریس متعامدی مانند $T_0 \in R^{p \times p}$ وجود دارد،

$$\text{به طوری که } T_0 B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \end{bmatrix} \text{ که در آن } B_m \in R^{m \times m} \text{ و نیز } \text{rank}(B_m) = m$$

با تعریف $T_{12} = [0 \quad -B_1 B_m^{-1}] T_0$ داریم:

$$\text{پس معادله حل شد. } T_{12} B_2 = [0 \quad -B_1 B_m^{-1}] T_0 B_2 = [0 \quad -B_1 B_m^{-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \end{bmatrix} = -B_1$$

در نظر بگیرید که وجود دارد یک T_{12} به طوری که $B_1 + T_{12} B_2 = 0$ پس تعریف می کنیم:

$$T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & T_{12} \\ 0 & T_0 \end{bmatrix}$$

که در آن T_0 هر ماتریس مربعی $p \times p$ است، به طوری که $T_0 B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \end{bmatrix} = \bar{B}_2$ که در آن $B_m \in R^{m \times m}$

$$\det(B_m) \neq 0 \text{ و } R^{m \times m}$$

در اینجا $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ ارائه دهنده ماتریس انتقال یافته سیستم بوده و در آن \bar{A} به صورت زیر است:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_m & \bar{A}_{22} \\ \bar{A}_{21} & \end{bmatrix}$$

و $\bar{A}_{22} \in R^{p \times p}$, $\bar{A}_{21} \in R^{m \times (n-p)}$ و $\bar{A}_{12} \in R^{(n-p) \times p}$ و $\bar{A}_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ و $\bar{A}_m \in R^{(p-m) \times (n-p)}$

قضیه (۲) مشاهده گر والکت و زاک کاهنده مجانبی خطا هستند، اگر و تنها اگر $(\bar{A}_{11}, \bar{A}_m)$ قابل تشخیص باشند.

اثبات: فرض کنید G هر ماتریس بهره‌ای باشد، به طوری که $A_0 = A - GC$ پایدار بوده و برای هر ماتریس لیاپانوف P وجود داشته باشد یک F که ارضا کننده رابطه $C^T F^T = PB$ باشد.

حال به دنبال تغییرات مختصات داده شده توسط T در نکته (۳) و نکته (۱) $\bar{P} = (T^{-1})^T P T^{-1}$ یک ماتریس لیاپانوف برای A_0 خواهد بود. و همچنین

$$\bar{C}^T F^T = \bar{P} \bar{B} \quad (۲۷-۳)$$

حال به آسانی می توان گفت که: $\bar{B} = TB = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix}$ & $\bar{C} = CT^{-1} = [0 \quad T_0^T]$ که با تجزیه \bar{P} به صورت $\bar{P} = \begin{bmatrix} \bar{P}_{11} & \bar{P}_{12} \\ \bar{P}_{11}^T & \bar{P}_{22} \end{bmatrix}$ که با جایگذاری در رابطه (۲۷) داریم:

$$\bar{P}_{21} \bar{B}_2 = 0 \quad (۲۸-۳)$$

با تعریف انتقال مختصاتی $\tilde{T} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & \bar{P}_{11}^{-1} \bar{P}_{12} \\ 0 & I_p \end{bmatrix}$ ، اگر ارائه دهنده سیستم انتقال یافته باشند، می توان

نشان داد که $\tilde{B} = \tilde{T} \bar{B} = \bar{B}$ & $\tilde{C} = \bar{C} \tilde{T}^{-1} = [0 \quad T_0^T]$ و همچنین

$$\begin{aligned}\bar{P} &= (\tilde{T}^{-1})^T \bar{P} \tilde{T}^{-1} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & 0 \\ -\bar{P}_{12}^T \bar{P}_{11}^{-1} & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P}_{11} & \bar{P}_{12} \\ \bar{P}_{12}^T & \bar{P}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n-p} & -\bar{P}_{12}^{-1} \bar{P}_{11} \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \bar{P}_{11} & 0 \\ 0 & \tilde{P}_{22} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

که در آن $\tilde{P}_{22} = \bar{P}_{22} - \bar{P}_{12}^T \bar{P}_{11}^{-1} \bar{P}_{12}$

\tilde{P} ماتریس لیاپانوف برای \tilde{A}_0 است، پس با استفاده از نکته (۲) زیرماتریس $(\tilde{A}_0)_{11}$ نیز پایدار است. با تعریف

$$\begin{aligned}(\tilde{A}_0)_{11} &= (\tilde{A} - \tilde{G}\tilde{C})_{11} \text{ (where } \tilde{G} = \tilde{T}TG) = \tilde{A}_{11} - (\tilde{G}\tilde{C})_{11} = \tilde{A}_{11} \& (\tilde{G}\tilde{C})_{11} \\ &= 0 \forall \tilde{G} \in R^{n \times p} \text{ because } \tilde{C} = [0 \quad T_0^T]\end{aligned}$$

پس \tilde{A}_{11} متعاقبا پایدار بوده و با انجام محاسبات مستقیم، می توان نشان داد که:

$$\tilde{A}_{11} = (\tilde{T}\bar{A}\tilde{T}^{-1})_{11} = \bar{A}_{11} + \bar{P}_{11}^{-1}\bar{P}_{12} \begin{bmatrix} \bar{A}_m \\ \bar{A}_{21} \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

با یادآوری اینکه $\bar{P}_{12}\bar{B}_2 = 0$ و $\bar{B}_2 = [0 \quad B_m^T]^T$ که در آن $\det(B_m) \neq 0$ ، لذا \bar{P}_{12} باید به فرم $\bar{P}_{12} = [\bar{P}_m \quad 0]$ باشد؛ پس معادله (۲۹) به $\tilde{A}_{11} = \bar{A}_{11} + (\bar{P}_{11}^{-1}\bar{P}_{12})\bar{A}_m$ تقلیل می یابد. که در آن $(\bar{A}_{11}, \bar{A}_m)$ قابل تشخیص هستند.

فرض کنید $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ که ارائه دهنده سیستم در مختصات جدید باشد، حال با در نظر گرفتن اینکه وجود دارد یک ماتریس $L \in R^{(n-p) \times (p-m)}$ به طوری که $\bar{A}_{11} + L\bar{A}_m$ پایدار باشد، ماتریس غیرتکین

منحصر بفرده T_* را به صورت زیر تعریف می کنیم

$$T_* = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L_* \\ 0 & T_0^T \end{bmatrix}$$

که $L_* = [L \ 0]$ تغییر مختصاتی با توجه به T_* ایجاد می کند، که ماتریس توزیع انتقال خروجی جدید بصورت $C_* = \bar{C}T_*^{-1} = [0 \ I_p]$ ، حال با استفاده از تعریف $L_*\bar{B}_2 = [L \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{B}_m \end{bmatrix} = 0$ ، ماتریس

$$B_* = T_*\bar{B} = \begin{bmatrix} L_*\bar{B}_2 \\ T_0^T\bar{B}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix}$$
 انتقال توزیع ورودی هم به صورت

$$(A_*)_{11} = (T_*\bar{A}T_*^{-1})_{11} = \bar{A}_{11} + L\bar{A}_m$$
 و در آخر می توان نشان داد که:

حال در سیستم جدید (A_*, B_*, C_*) قالب همراه (۱۸) فراهم شده و ماتریس های متقارن و مثبت P_1 و

P_2 می توانند از رابطه $P_* = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$ حاصل شوند. حال با تعریف $F^T = P_2 B_2$ به راحتی می توان

یافت که:

$$C_*^T F^T = P_* B_*$$

و (P_*, F) زوج ارائه دهنده مشاهده گر والکت و زاک برای (A_*, B_*, C_*) است.

۳-۸- طراحی مشاهده گر برای شناسایی خطا

سیستم دینامیکی نامعین (به خاطر وجود خطا) توصیف شده (۱) را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Df(x, u, t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (۳-۳۰)$$

به طوری که $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{p \times n}$, $D \in R^{n \times q}$ و $q \leq p < n$ ،

همچنین تابع ناشناخته $f: R^n \times R^m \times R_+ \rightarrow R^n$ که تحت عنوان نامعینی ارائه شده و بیانگر خطای

محرک است. نیز ما چنین فرض می کنیم که حالات سیستم ناشناخته بوده و تنها $y(t)$ و $u(t)$ سیگنال-

های در دسترس هستند.

در اینجا عمل مشاهده‌گر بر این قرار است که تولید تخمین حالات \hat{x} و تخمین خروجی $\hat{y} = C\hat{x}$ نماید،
 طوری که مود لغزشی قادر باشد خطای تعریف شده خروجی

$$e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (۳۱-۳)$$

را به سمت صفر متمایل کند. ساختار مشاهده‌گر هم به قالب زیر نوشته می‌شود

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_1 e_y(t) + G_n v \quad (۳۲-۳)$$

که در آن $G_1, G_n \in R^{n \times p}$ ماتریس‌های بهره مناسب و v جز سوئیچ کننده مود لغزشی است. که این جز سوئیچ کننده برای ما تخمین‌گر خطاست.

۳-۹- الگوریتم گام به گام طراحی مشاهده‌گر مود لغزشی

گام (۱) ستون‌های ماتریس C را به گونه‌ای تغییر دهیم که داشته باشیم $C = [C_1 \ C_2]$ طوری که $C_2 \in R^{p \times p}$ ، سپس از ماتریس غیر تکین انتقال $T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & 0 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix}$ استفاده کنیم به طوری که ماتریس C به صورت $[0 \ I_p]$ حاصل شود.

گام (۲) با استفاده از ماتریس‌های T_{12} و T_0 ، ماتریس انتقال جدید $T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & T_{12} \\ 0 & T_0 \end{bmatrix}$ را حاصل کنیم که مختصات جدید سیستمی $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ را به ما بدهد.

گام (۳) استخراج زیرماتریس‌های \bar{A}_{11} و \bar{A}_m از ماتریس \bar{A} و نیز یافتن $L \in R^{(n-p) \times (p-m)}$ طوری که طیف $\bar{A}_m + L\bar{A}_{11}$ پایدار باشد.

گام (۴) تعریف ماتریس انتقال غیر تکین دیگری به صورت $T_* = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L_* \\ 0 & T_0^T \end{bmatrix}$ و نیز محاسبه مختصات جدید سیستمی (A_*, B_*, C_*) در این دستگاه مختصاتی جدید، و البته در آن $L_* = [L \ 0]$ می‌باشد.

گام ۵) محاسبه ماتریس های بهره $G_n = \|F\|T^{-1}T_*^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2^{-1} \end{bmatrix}$ و $G_I = T^{-1}T_*^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^S \end{bmatrix}$

گام ۶) تشکیل معادله مشاهده گر به صورت $\hat{x}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) +$

$$v = \begin{cases} -\rho \|P_2\| \frac{Ce}{\|Ce\|} & \text{if } Ce \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad G_n v \text{ که در آن}$$

۳-۱۰- فرم همراه مشاهده گر مود لغزشی

سیستم های دینامیکی داده شده در (۱-۳) و (۲-۳) را در نظر بگیرید که $rank(CD) = q$

طبق تغییرمختصات خطی $x \rightarrow Tx$ که در بالا داشتیم مختصات جدید سیستم عبارت است از:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t) \\ \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t) + Df(x, u, t) \\ y = x_2 \end{cases} \quad (۳۳-۳)$$

که در آن $x_1 \in R^{n-p}, x_2 \in R^p$ و ماتریس A_{11} دارای مقادیر ویژه پایدار است. مختصات جدید سیستم

بالا، به عنوان یک سنگ بنا برای طراحی مود لغزشی به کار می رود. سیستم دینامیکی مشاهده گر زیر را در

نظر بگیرید

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{x}_2(t) + B_1u(t) - A_{12}e_y(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{x}_2(t) + B_2u(t) - (A_{22} - A_{22}^S)e_y(t) + v \\ \hat{y}(t) = \hat{x}_2(t) \end{cases} \quad (۳۴-۳)$$

که در آن هر A_{22}^S ماتریس پایدار بوده و بردار گسسته v به صورت زیر قابل تعریف است

$$v = \begin{cases} -\rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\|} & \text{if } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳۵-۳)$$

که $P_2 \in R^{p \times p}$ ماتریس لیاپانوف برای A_{22}^S بوده و مقدار عددی ρ به صورت زیر انتخاب می شود:

$$\|f_i(t)\| < \rho \quad (36-3)$$

اگر بردار خطاهای تخمینی تحت عناوین $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ و $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ تعریف کنیم، به طور مستقیم می‌توان نشان داد که

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) \quad (37-3)$$

$$\dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^s e_y(t) + v - D_2 f(x, u, t) \quad (38-3)$$

۳-۱۱- بازسازی سیگنال خطای محرک

در طول لغزش $e_y(t) = 0$ و $\dot{e}_y(t) = 0$. لذا با توجه به معادله (۳۸)

$$0 = A_{21}e_1(t) + v_{eq} - D_2 f(x, u, t) \quad (39-3)$$

که در آن v_{eq} ارائه کننده میانگین جز گسسته v است، و با توجه به اینکه A_{11} پایدار است؛ لذا $e_1 \rightarrow 0$ پس

$$v_{eq} \rightarrow D_2 f(x, u, t) \quad (40-3)$$

حال با عبور دادن سیگنال حاصل از یک فیلتر پایین‌گذر، شکل خطا بازسازی می‌شود.

فرض کنید که جز گسسته معادله (۳۵) توسط رابطه زیر جایگزین شود

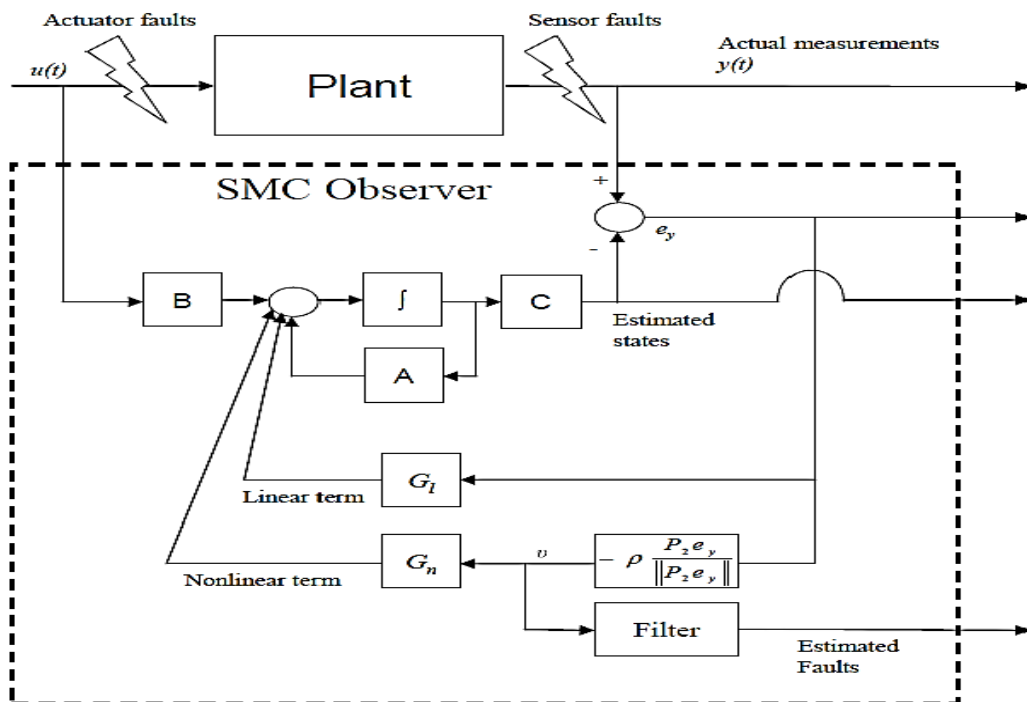
$$v_\delta = -\rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\| + \delta} \quad (41-3)$$

که در آن δ یک عدد کوچک مثبت است. می‌توان نشان داد که خطای نهایی بازسازی شده، به صورت زیر بوده و تنها به وابسته $e_y(t)$ است.

$$f(x, u, t) = -\rho \|D\| (D_2^T D_2)^{-1} D_2^T \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\| + \delta} \quad (42-3)$$

که معادله فوق سیگنال خطای محرک را برای ما بازسازی می‌کند.

و در آخر شکل (۱-۳) مدل بلوکی جهت طراحی مشاهده‌گر مد لغزشی، به منظور تشخیص و جداسازی خطا به ما نشان می‌دهد.



شکل (۱-۳) مدل بلوکی مشاهده‌گر مد لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا

۱۲-۳-مثال پاندول معکوس

پاندول معکوس [۲۱] یکی از سیستم‌های کلاسیک در دینامیک و کنترل امروزی است که به واسطه خواصی از قبیل غیر خطی بودن و ناپایداری ذاتی و نیز به‌خاطر اینکه سیستمی مبنا معرفی شده است، به عنوان یکی از مسائل مطرح در مهندسی کنترل شناخته شده است. حال ما بنا بر آن داریم که روال مشاهده‌گر مد لغزشی برای شناسایی خطا را روی آن انجام دهیم. حال معادلات غیرخطی، مقادیر پارامترها و شکل خطی شده سیستم پاندول معکوس را در ادامه به بحث و شبیه‌سازی می‌پردازیم. معادلات غیر خطی سیستم به قرار زیر است:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + F_x \dot{x} + ml(\ddot{\theta} \cos\theta - \dot{\theta}^2 \sin\theta) = u \\ j\ddot{\theta} + F_\theta \dot{\theta} - mlg \sin\theta + ml\ddot{x} \cos\theta = 0 \end{cases} \quad (43-3)$$

به طوریکه مشخصه‌های پارامترهای مربوط به سیستم در جدول (۳-۱) زیر آمده است:

جدول (۳-۱) مقادیر پارامترهای معادلات سیستم پاندول معکوس

کمیت	M	m	J	l	F_x	F_θ	G
مقدار	3.2	0.535	0.062	0.365	6.2	0.009	9.807
واحد	kg	kg	Kg m^2	m	Kg/s	Kg m^2	m/s^2

حال بعد از خطی سازی حول نقطه تعادل $\dot{\theta} = \dot{x} = x = \theta = 0$. معادلات خطی شده فضای حالت سیستم، به صورت (۴۴-۳) حاصل می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.9333 & -1.9872 & 0.0091 \\ 0 & 36.9771 & 6.2589 & -0.1738 \end{bmatrix} =$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.3205 \\ -1.0095 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (44-3)$$

حال با استفاده از روند طی شده در فصل سوم و نیز اجرای الگوریتم معرفی شده در قسمت (۳-۹)، فرم

مطلوب ماتریس‌های حالت به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$A = \begin{bmatrix} -10 & 0 & -67.6603 & 31.4960 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 9.8548 & -3.1496 \\ 0.0091 & 0 & -1.8437 & -2.0158 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.3205 \end{bmatrix}, C =$$

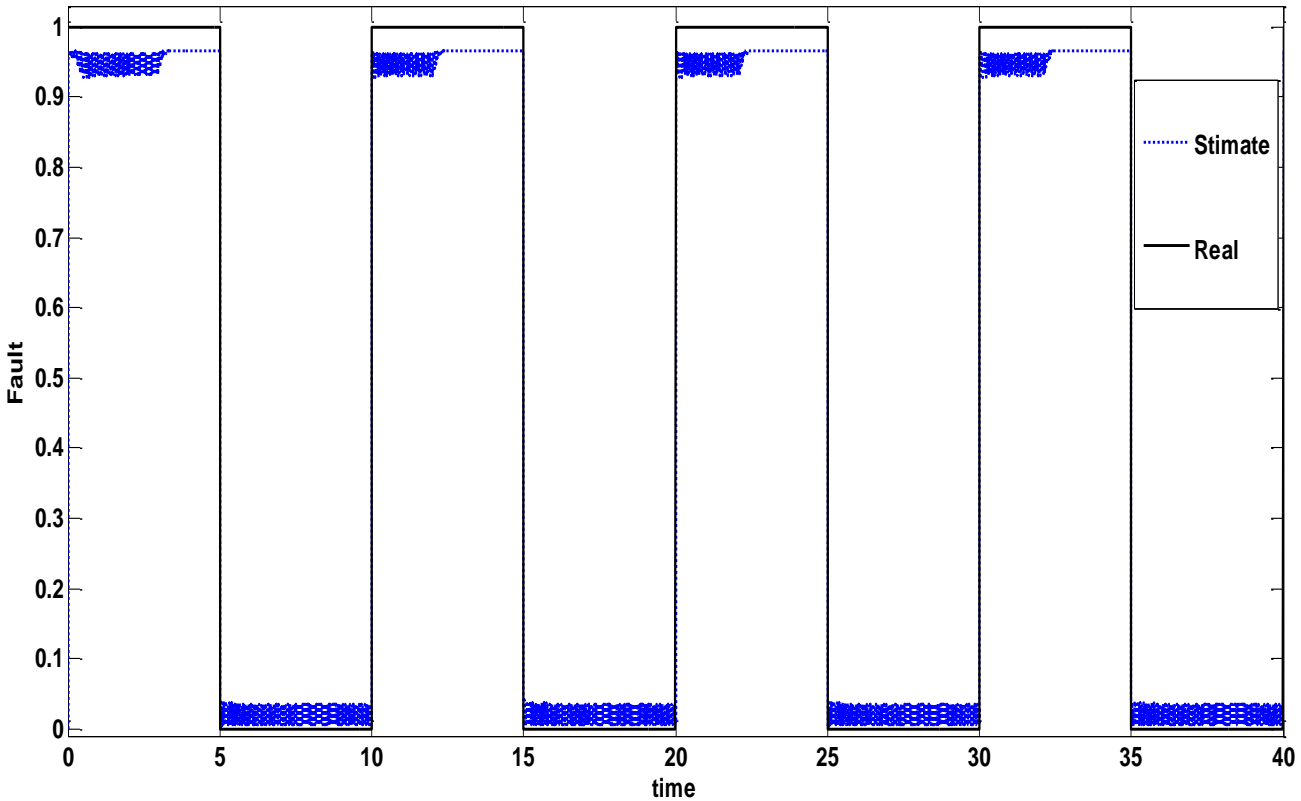
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

که $A_{11} = -10$ و پایدار، و نیز ماتریس $A_{22}^S = \text{diag}(-10, -11, -12)$ و ماتریس P_2 در معادله لیاپانوف $P_2 A_{22}^S + (A_{22}^S)^T P_2 = -I$ برآورده کننده شرایط پایداری است.

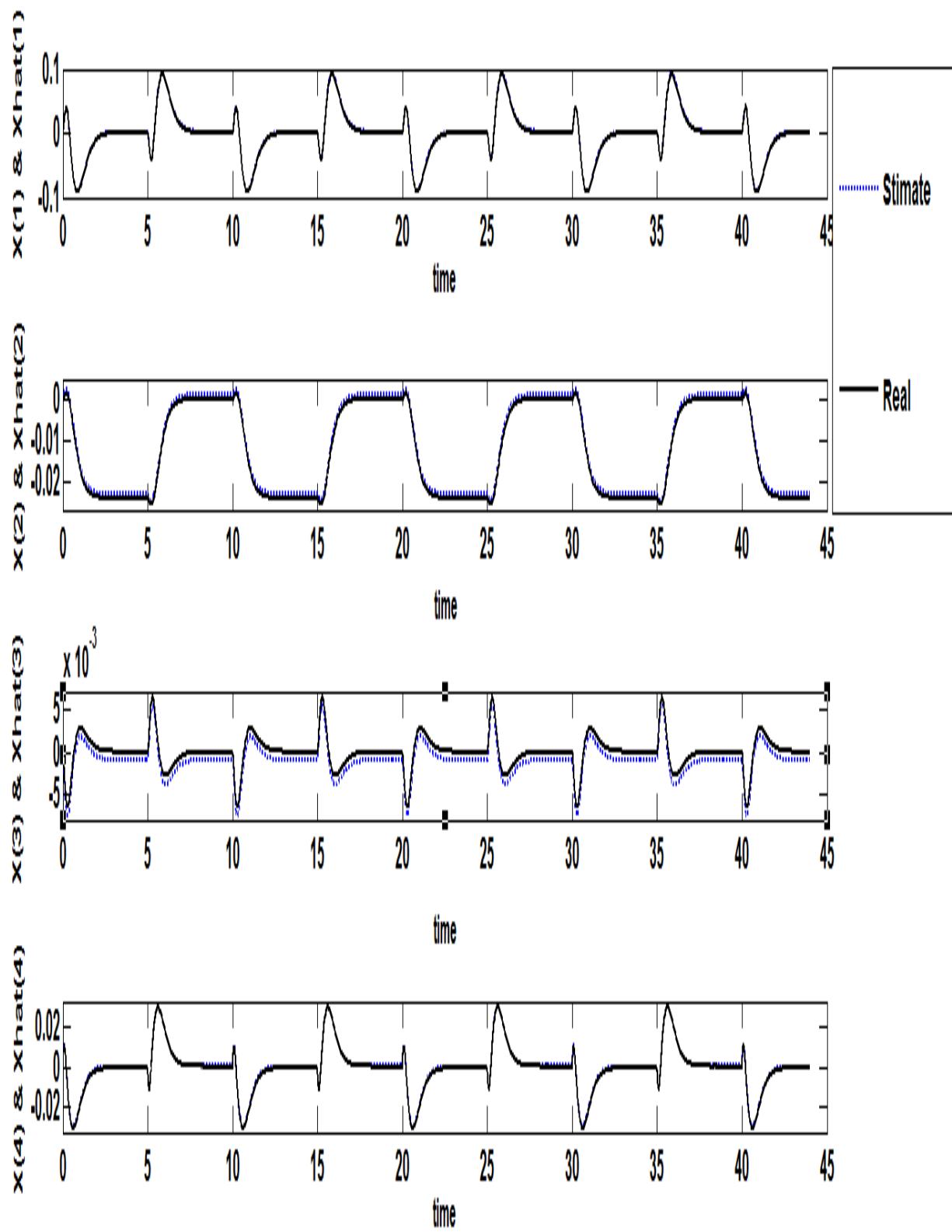
حال با محاسبه بهره‌های مشاهده‌گر G_I, G_n ، کار طراحی مشاهده‌گر مورد لغزشی کامل می‌شود.

$$G_I = \begin{bmatrix} 11 & 0 & 1 \\ 0 & 21.8549 & -3.1498 \\ 0 & -1.8436 & 10.9841 \\ 0 & 153.5226 & -34.1406 \end{bmatrix}, G_n = \begin{bmatrix} 0.3205 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3205 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3205 \\ 0 & 3.1585 & -1.0095 \end{bmatrix}$$

و در زیر نتایج شبیه سازی که شامل تخمین حالات و بازسازی خطای ورودی پالس بوده نمایش داده شده است، در سراسر پایان نامه زمان بر حسب ثانیه، خطوط سیاه پیوسته نمایانگر نمایش واقعی و خطوط آبی خط چین نمایانگر نمایش تخمین زده شده است.

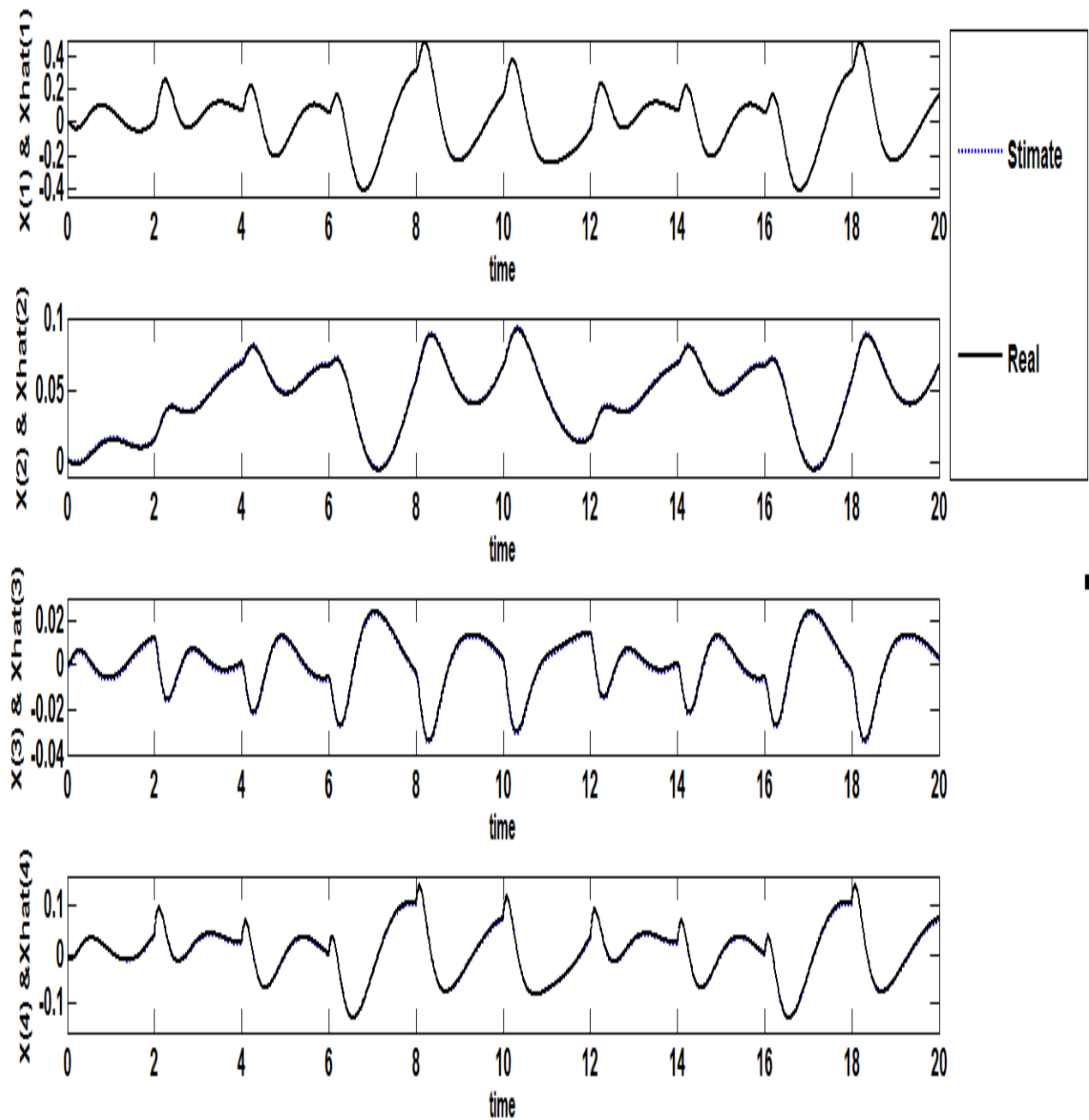


شکل (۲-۳) خطا محرک و خطای بازسازی شده آن

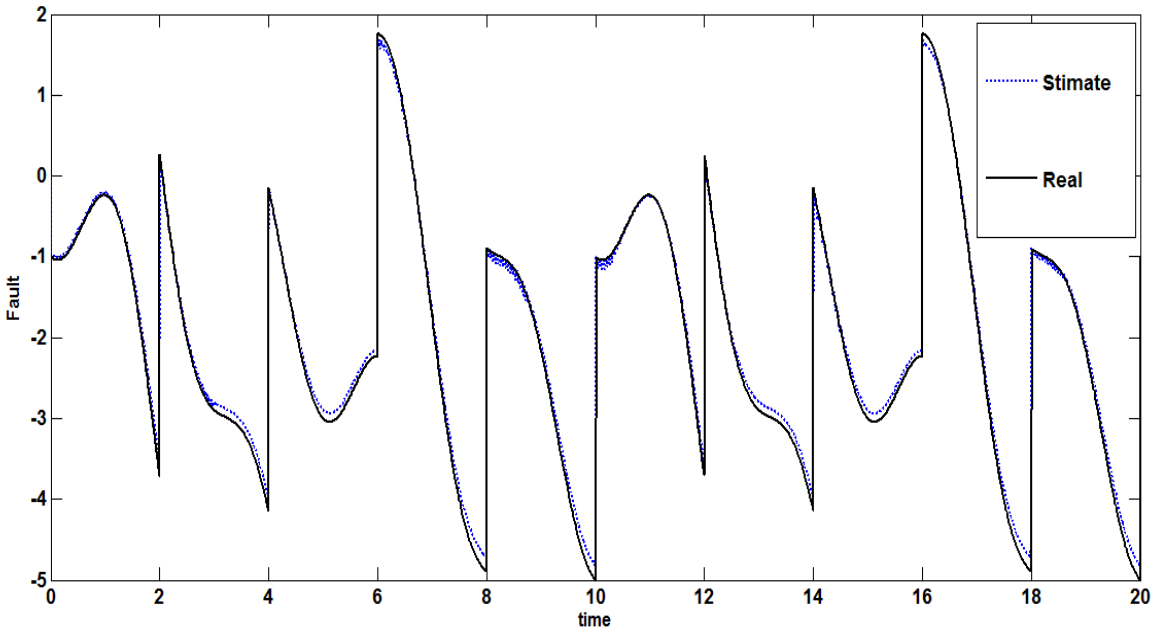


شکل (۳-۳) نمایش هم زمان حالات واقعی (X) و حالات تخمین زده شده (\hat{X})

و برای ورودی خطای محرک $f(t) = \sin(0.4\pi t) - \cos(0.8\pi t) - \text{triangular}(t)$ حالات تخمین زده شده و خطای بازسازی بصورت زیر است:

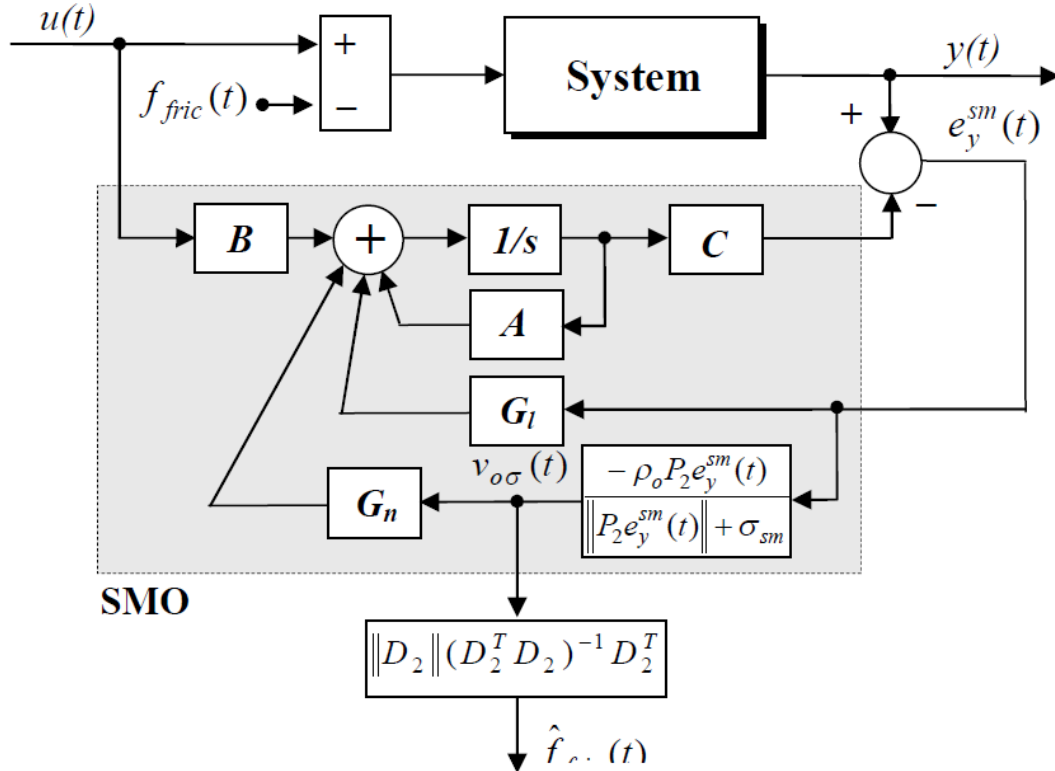


شکل (۳-۴) نمایش هم زمان حالات واقعی (X) و حالات تخمین زده شده (\hat{X})



شکل (۳-۵) خطای محرک و شکل بازسازی شده آن (نقطه چین)

که در شبیه سازی فوق برای بازسازی سیگنال خطا از بلوک دیاگرام شکل (۳-۶) استفاده شده است [۲۹].



شکل (۳-۶) بلوک دیاگرام بازسازی خطا با استفاده از مشاهده گر مود لغزشی

فصل چهارم:

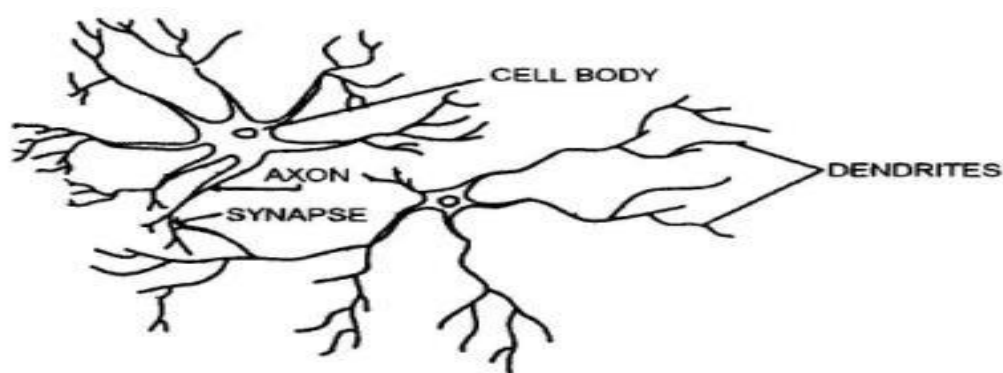
طراحی مشاهده‌گر مود لغزشی، مبتنی بر شبکه‌های عصبی تابع پایه

شعاعی برای تشخیص و جداسازی خطای محرک

۴-۱- مقدمه و معرفی شبکه های عصبی

یک شبکه عصبی مصنوعی^۱ ایده ای است برای پردازش اطلاعاتی که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات (پردازش موازی) می پردازد. عنصر اصلی این ایده، ساختار جدید سیستم پردازش اطلاعات است، که این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق العاده بهم پیوسته تشکیل شده نرون^۲ که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می کنند، تشکیل شده است [۳۰].

سیستم عصبی انسان از واحدهایی بنام سلول عصبی که همان نرون ها هستند تشکیل شده اند که دارای پیچیدگی های زیادی می باشد. یک نرون واقعی نیز در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) نمایش یک سلول عصبی واقعی

¹ Artificial Neural Network(ANN)

² Nerun

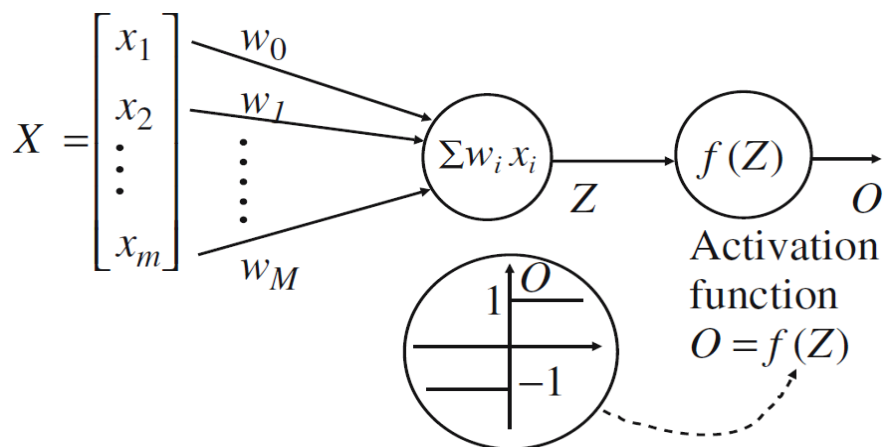
۲-۴- تاریخچه شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی در سال ۱۹۴۳ میلادی توسط مک کلاچ^۱ و پیتز^۲ معرفی شد [۳۰]. اولین شبکه عصبی که توسط آنها معرفی شد دارای چند نرون ساده بود و قدرت محاسباتی مناسبی نداشت. در سال ۱۹۴۹ میلادی هب^۳ [۳۱] اولین قانون آموزش شبکه‌های عصبی را پیشنهاد کرد.

دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی سالهای طلایی شبکه‌های عصبی است. در محدوده سالهای ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۲ روزن‌بلات^۴ گروه بزرگی از شبکه‌های عصبی به نام پرسپترون را معرفی نمود [۳۲]. قانون آموزش این شبکه‌ها یک روش تکراری اصلاح وزن بود که بسیار قوی‌تر از قانون هب عمل می‌کرد.

۳-۴- سلول عصبی مصنوعی

سلول عصبی مصنوعی تقلیدی از سلول عصبی بیولوژیکی است. شکل (۲-۴) مدل یک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۴) مدل یک شبکه عصبی مصنوعی

¹ Macculloch

² Pitis

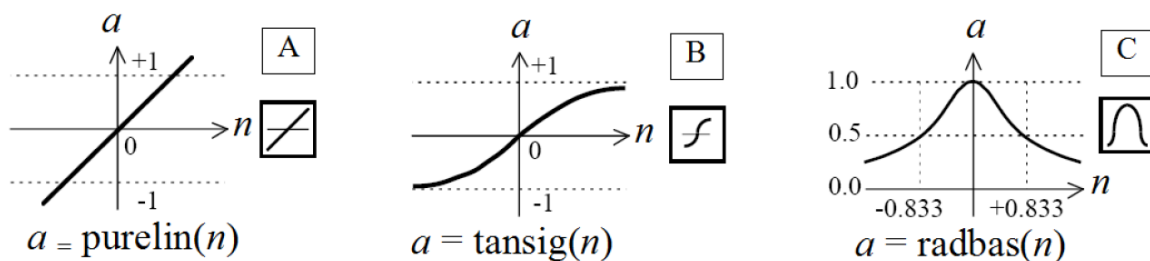
³ Hebb

⁴ Rosenblatt

که در آن $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{m-1} \ x_m]^T$ دسته‌ای از ورودیها بوده و به سلول عصبی اعمال می‌شود. این ورودیها که جمعا بعنوان یک بردار در نظر گرفته می‌شوند بردار ورودی نامیده می‌شوند. هر سیگنال قبل از اینکه به واحد جمع که با علامت \sum نشان داده شده اعمال شود، در وزن مربوط به خود ضرب می‌گردد. هر وزن مشابه با قدرت یک اتصال است. معمولاً مجموعه وزن‌های هر لایه با $W = [w_0 \ w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{M-1} \ w_M]^T$ نشان داده می‌شود. در آخر واحد جمع‌کننده، ورودیهای وزن‌دار را جمع کرده و خروجی را که با Out نشان داده می‌شود را تولید می‌کند.

۴-۳-۱- توابع تحریک

عملیات اصلی یک شبکه عصبی مشتمل بر جمع ورودی‌های وزن‌دار شده، و اعمال تابع تحریک به این مجموعه، برای تعیین خروجی شبکه است. برای نرون‌های ورودی، این تابع واحد بوده و خروجی نرون برابر با ورودی آن است. اگرچه انتخاب تابع تحریک یکسان برای تمام نرون‌های یک لایه الزامی نیست، ولی معمولاً تابع تحریک نرون‌های یک لایه یکسان انتخاب می‌شود و در اکثر موارد از تابع تحریک غیرخطی استفاده می‌شود [۳۲].؛ شکل (۴-۳)



شکل (۴-۳) توابع محرک (فعال‌ساز) شبکه‌های عصبی

۴-۴- شبکه های عصبی پایه شعاعی

در این نوع از شبکه های عصبی که شمای آن در شکل (۴-۴) داده شده است، در واقع به نوعی تابع تعلق و شعاع نفوذ وجود دارد که ورودی و وزنهای آن در این توابع ورود پیدا می کنند.

با توجه به شکل (۴-۴) توابع $\phi_i = f_d$ را تابع بنیادی شعاعی گوئیم اگر ۳ شرط زیر برقرار باشد:

الف) دارای ماکزیمم یکتا در مرکز باشد، یعنی $d = 0 \Leftrightarrow f(d) = 1$

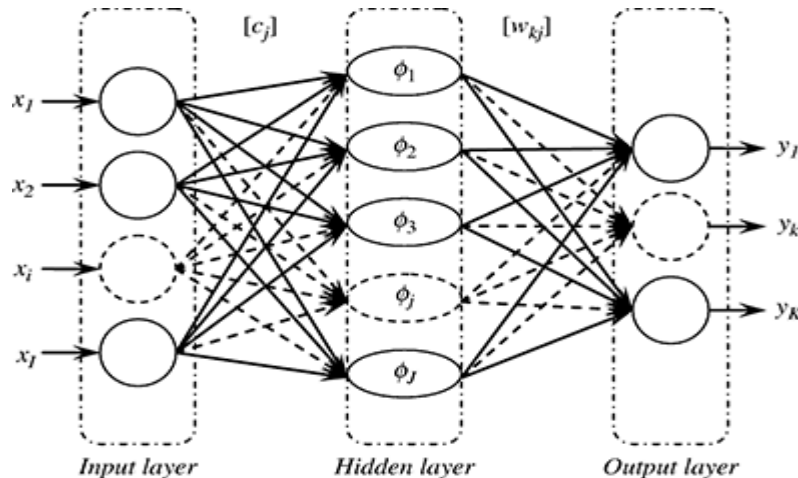
ب) نسبت به نزولی باشد، یعنی $\forall d_1, d_2 \Leftrightarrow f(d_1) \geq f(d_2)$

ج) توابع فعال ساز کراندار و محدود باشند یعنی $\lim_{d \rightarrow \infty} f(d) = 0$

که از جمله معروفترین توابع پایه شعاعی تابع گوسین $f_i(x) = e^{\frac{-1}{2} \frac{\|x - m_i\|^2}{\sigma_i^2}}$ است، که در آن m_i مرکز توابع، σ_i شعاع نفوذ نرون، i شماره نرون و $d_i = \|x - m_i\|$ فاصله ورودی از مرکز تابع است.

خروجی شبکه RBF که در این پایان نامه از آن استفاده شده است نیز به صورت

$$y_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} f_j(x) + w_0$$



شکل (۴-۴) ساختار شبکه RBF

کار بر روی شبکه‌های عصبی به منظور شناسایی خطا نیز در مقاله‌های [۳۳،۳۴] آورده شده است که بعدها در مقاله [۳۵] گونه آموزش مشاهده‌گر و نیز گونه تطبیق یافته مشاهده‌گر کار شده است. حال که با شبکه‌های عصبی و گونه پایه شعاعی آن آشنا شدیم، می‌توانیم به بیان مسئله تشخیص خطا و روند طراحی و پیاده سازی مشاهده‌گر بپردازیم. در ادامه به صورت گام به گام وارد عمل می‌شویم

۴-۵- بیان مسئله و مقدمات لازم

سیستم غیر خطی (۱-۴) را در نظر بگیرید [۳۶]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, u, t) + d(x, t) \quad \& \quad y(t) = Cx(t) \quad (1-4)$$

که در آن $A \in R^{n \times n}$, $C \in R^{p \times n}$ و $f(x, u, t)$ تحت عنوان اجزا شناخته شده سیستم، مثلا ترکیبی غیر خطی از $B \times u$ و $d(x, t)$ هم معرف خطا، اغتشاش، دینامیک مدل نشده و ... است. حال قبل از طراحی لازم است که شرایط زیر را در سیستم داشته باشیم:

الف) ماتریس بهره $K \in R^{n \times p}$ وجود داشته باشد، به طوری که طیف ماتریس $A_0 = A - KC$ مؤکدا دارای شرایط پایداری ماتریس هورویتز^۱ باشد.

ب) جز شناخته شده $f(x, u, t): R^n \times R^m \times R^+ \rightarrow R^n$ نیز برآورده کننده شرایط لیپ شیتز^۲ $\|f(x, u, t) - f(\hat{x}, u, t)\| \leq \gamma \|x - \hat{x}\|$ باشد، که در آن γ مقدار ثابت کوچکی است.

1

2

ج) ترم $d(x, t): R^n \times R^+ \rightarrow R^n$ برآورده کننده شرایط $d(x, t) = P^{-1}C^T \xi(y, t)$ باشد، که در آن $\xi(y, t): R^n \times R^+ \rightarrow R^n$ بوده و نیز $\|\xi(y, t)\| \leq \sum_{i=0}^N c_i \rho_i(t, y)$ به طوریکه $P = P^T$ و $\rho_i: R^n \times R^+ \rightarrow R^n$ و نیز داشته باشیم $PA_0 + A_0^T P = -Q$.

حال در هنگامی که خطایی در سیستم (۱-۴) رخ دهد، مدل توصیفی از سیستم به صورت (۲-۴) حاصل می شود

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x, u, t) + d(x, t) + E(x, t) \quad (۲-۴)$$

که در آن $E(x, t)$ معرف خطاست. حال $E(x, t)$ را توسط شبکه عصبی RBF (۳-۴) تعریف می کنیم

$$E(x, t) = W^* \phi(x, u) + \varepsilon \quad (۳-۴)$$

$$\phi(x, u) = \exp\left(-\sum_{j=1}^n \frac{(x_j - c_j)^2}{\sigma_j}\right) + \sum_{j=n+1}^{2n} \frac{(u_j - n - c_j)^2}{\sigma_j} \quad (۴-۴)$$

که در آن ε خطای تخمین بوده و بردار W^* کاهش دهنده خطای تخمین شبکه عصبی است.

۴-۶- طراحی مشاهده گر مود لغزشی

ساختار مشاهده گر مود لغزشی را به صورت معادله (۵-۴) تعریف می کنیم [۳۶]:

$$(۵-۴) \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + f(\hat{x}, u, t) + d(x, t) + K(y(t) - C\hat{x}(t)) + S(\hat{x}(t), y(t), \hat{E}(\hat{x}, t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

که در آن K باید به صورتی باشد که A_0 مؤکدا دارای پایداری ماتریس هورویتز باشد. حال با تعریف

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad \& \quad e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t) = Ce(t) \quad (۶-۴)$$

که در معادله $e_y(t)$ خطای تخمین خروجی بوده و معرف سیگنال مانده است. و بهره تطبیق غیرخطی

$$S(\hat{x}(t), y(t)) = \frac{P^{-1}C^T(y - C\hat{x}) \sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t, y)}{\|y - C\hat{x}\| - \dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t, y))}$$

برای ترم دینامیکی نامعین محاسبه می‌شود. حال اگر $\dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t, y))$ که کراندار فرض شده و نیز ترم $h_2 \equiv 0$ را قرار دهیم، می‌توان به فرم عمومی زیر رسید

$$S(\hat{x}(t), y(t)) = \frac{P^{-1}C^T(y - C\hat{x}) \sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t, y)}{\|y - C\hat{x}\|}$$

و تخمین $c_i(t)$ که با $\hat{c}_i(t)$ نمایش داده می‌شود نیز به صورت (۷-۴) محاسبه می‌شود

$$\dot{\hat{c}}_i(t) = q_i \|y - C\hat{x}\| \rho_i(t, y) \quad (7-4)$$

حال در هنگام بروز خطا، ترم $E(x, u)$ با استفاده از ساختار تطبیقی که دارد عمل تخمین خطا را انجام می‌دهد که خود این ترم $E(x, u)$ با استفاده از شبکه عصبی RBF به صورت $\hat{E}(\hat{x}, u) = W\phi(\hat{x}, u)$ تخمین زده می‌شود. در اینجا با تعریف خطای تخمین

$$\tilde{E} = E(x, u) - \hat{E}(\hat{x}, u) \quad (8-4)$$

حال با جایگذاری رابطه (۳-۴) در رابطه (۸-۴) داریم:

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= W^{*T} \phi(x, u) + \varepsilon - W^T \phi(\hat{x}, u) \\ &= W^{*T} \phi(x, u) - W^T \phi(\hat{x}, u) + W^* \phi(\hat{x}, u) - W^* \phi(\hat{x}, u) + \varepsilon \\ &= \tilde{W} \phi(x, u) + w(t) + \varepsilon \end{aligned}$$

که $w(t) = W^*(\phi(x, u) - \phi(\hat{x}, u))$ و $\tilde{W} = W^* - W$ و نیز فرض می‌کنیم که

$$\|w(t)\| \leq \beta$$

حال برای آنکه وزن‌های شبکه عصبی کراندار بوده و بتوانند مطلوبیات ما را در سیستم برآورده کنند، لازم است که یک محدوده مجاز و مناسب برای تغییرات آن طراحی کنیم، برای این کار تعریف می‌کنیم

$$\Omega = \{W | \text{Trace}(W^T W) \leq M\} \quad (9-4)$$

حال برای آنکه $W \in \Omega$ باید

$$\dot{W} = \begin{cases} e\phi^T(\hat{x}) & \text{if } \text{Tr}(W^T W) \leq M \\ \text{Pr}[e^T \phi^T(\hat{x})] & \text{if } \text{Tr}(W^T W) > M \end{cases} \quad (10-4)$$

$$\text{Pr}[\cdot] = -e\phi^T(\hat{x}) + \frac{e^T \phi^T(\hat{x})}{\text{Tr}(W^T W)} W \quad \text{که در آن}$$

۴-۶-۱- پایداری مشاهده‌گر

در این بخش؛ خاصیت پایداری مشاهده‌گر را مورد بررسی قرار می‌دهیم. از (۴-۱) و (۴-۵) داریم [۳۶]:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & A_0 e(t) + f(x, u, t) - f(\hat{x}, u, t) + d(x, t) - S(\hat{x}, y) + E(x, u) - \\ & \hat{E}(\hat{x}, u) \end{aligned} \quad (11-4)$$

حال با تعریف تابع لیاپانوف زیر:

$$V = e^T(t) P e(t) + \sum_{i=0}^N \frac{1}{q_i} \tilde{c}_i^2(t) + h_1(t) + \text{Tr}(\tilde{W} \tilde{W}^T)$$

که در معادله فوق $\tilde{c}_i(t) = \hat{c}_i(t) - c_i$ و نیز $V \geq 0$ ، حال با مشتق‌گیری از رابطه فوق داریم [۳۶]:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2e^T P [A_0 e(t) + f(x, u, t) - f(\hat{x}, u, t) + d(x, t) - S + E(x, u) - \\ & \hat{E}(\hat{x}, u)] + 2\text{Tr}(\dot{\tilde{W}} - \tilde{W}^T) + \dot{h}_1(t) + 2 \sum_{i=0}^N (\hat{c}_i(t) - c_i) \|y - C\hat{x}\| \rho_i(t, y) \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -e^T(t)Q(t) + 2\|e(t)\|^2\gamma\bar{\lambda}(P) + 2e^T(t)P \left(d(x,t) - S + E(x,u) - \right. \\
& \left. \hat{E}(\hat{x},u) \right) + 2Tr(\tilde{W}\tilde{W}^T) + 2\sum_{i=0}^N(\hat{c}_i(t) - c_i)\|y - C\hat{x}\|\rho_i(t,y) + \\
& 2\|ce(t)\|\sum_{i=0}^N(\hat{c}_i(t) - c_i)\rho_i(t,y) + 2e^T(t)P \left(P^{-1}C^T C\xi - \right. \\
& \left. \frac{P^{-1}C^T Ce(t)\sum_{i=0}^N(\hat{c}_i(t))\rho_i(t,y)}{c} \right) \leq -(\lambda_{min}(Q) - 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + \\
& 2Tr(\dot{\tilde{W}}\tilde{W}^T) + 2e^T P\tilde{W}\phi(x,u) + 2e^T v + \dot{h}_1(t) + \\
& \frac{1}{\|ce(t)\| - \dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y))} \left[2\|Ce(t)\|^2 \times \sum_{i=0}^N(\hat{c}_i(t) - c_i)\rho_i(t,y) - \right. \\
& 2\|ce(t)\|\sum_{i=0}^N(c_i)\rho_i(t,y) \times \dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y)) + \\
& 2\|ce(t)\|^2 \sum_{i=0}^N(\hat{c}_i(t) - c_i)\rho_i(t,y) - 2\|ce(t)\|\sum_{i=0}^N((\hat{c}_i(t) - \\
& c_i))\rho_i(t,y) \times \dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y)) \left. \right] \leq -(\lambda_{min}(Q) - \\
& 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + 2e^T P\tilde{W}\phi(x,u) + 2e^T v + \dot{h}_1(t) + 2Tr(\dot{\tilde{W}}\tilde{W}^T) - \\
& \frac{2\|ce(t)\|\sum_{i=0}^N((\hat{c}_i(t)))\rho_i(t,y)\dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y))}{\|ce(t)\| - \dot{h}_1(t)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y))} \leq -(\lambda_{min}(Q) - \\
& 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + 2e^T P\tilde{W}\phi(x,u) + 2e^T v + 2Tr(\dot{\tilde{W}}\tilde{W}^T) + \\
& \left(1 - 2\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y)h_2(\sum_{i=0}^N \hat{c}_i(t)\rho_i(t,y))\dot{h}_1(t) \right) \leq -(\lambda_{min}(Q) - \\
& 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + 2e^T P\tilde{W}\phi(x,u) + 2e^T v + 2Tr(\dot{\tilde{W}}\tilde{W}^T) = \\
& -(\lambda_{min}(Q) - 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + 2e^T v + Tr(e^T \phi^T(\hat{x},u) - \dot{W})\tilde{W}
\end{aligned} \tag{۱۲-۴}$$

حال از معادله (۱۰-۴) داریم پس $Tr[(e^T \phi^T(\hat{x},u) - \dot{W})\tilde{W}] \leq 0$

$$\dot{V} \leq -(\lambda_{min}(Q) - 2\lambda_{max}(P)\gamma)\|e(t)\|^2 + e^T v \tag{۱۳-۴}$$

با تعریف $(\lambda_{\min}(Q) - 2\lambda_{\max}(P)\gamma) = \alpha$ داریم

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\frac{\alpha}{2}\|e\|^2 - \frac{\alpha}{2}\left[\|e\|^2 - \frac{2}{\alpha}e^2v + \frac{1}{\alpha^2}\|v\|^2\right] + \frac{1}{2\alpha}\|v\|^2 \\ &\leq -\frac{\alpha}{2}\|e\|^2 + \frac{1}{2\alpha}\|v\|^2\end{aligned}$$

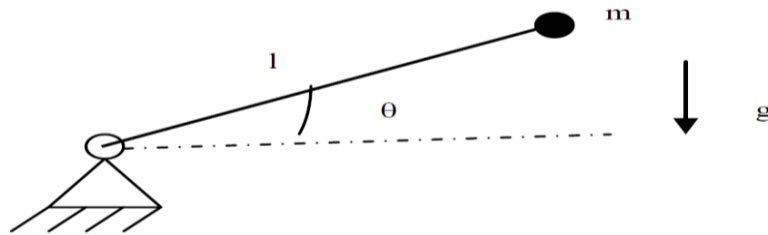
حال با انتگرال گیری از $t = 0$ تا $t = \infty$ از رابطه فوق داریم

$$\int_0^{\infty} \|e\|^2 dt \leq \frac{2}{\alpha}[V(0) - V(\infty)] + \frac{1}{\alpha^2} \int_0^{\infty} \|v\|^2 dt$$

و با استفاده از لم باربالات^۱ می توان بیان کرد که $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ و $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{W} = 0$ لذا پایداری مشاهده گر فوق اثبات شده و خطای تخمین هم همگرا به صفر شده است.

۷-۴- مثال ربات تک لینکی

برای نشان دادن صحت روش فوق، مشاهده گر مود لغزشی-عصبی را بر روی ربات تک لینکی^۲ که به عنوان یک سیستم پر کاربرد بوده و در شکل (۵-۴) نشان داده شده است، را پیاده سازی کرده ایم. معادلات حالت سیستم ربات تک لینکی به صورت (۴-۱۱) است.



شکل (۵-۴) شکل ربات تک لینکی

¹ Barballat lemma

² Robot single-link

$$M\ddot{\theta} + 0.5mgl\sin\theta = u \quad \& \quad y = \theta \quad (11-4)$$

که در آن θ موقعیت مفصل ربات، M ممان اینرسی، m, l به ترتیب معرف طول و جرم لینک‌های ربات و g معرف ثابت جاذبه زمین است که در جدول (۱-۴) مقادیر آن داده شده است.

جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای ربات تک لینکی

m	l	M	g
1	1	0.5	9.8

حال با فرض $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$ و $u = \sin 20t + \cos 20t$ ، $k = \begin{bmatrix} -3 \\ -2 \end{bmatrix}$ می‌توان معادله

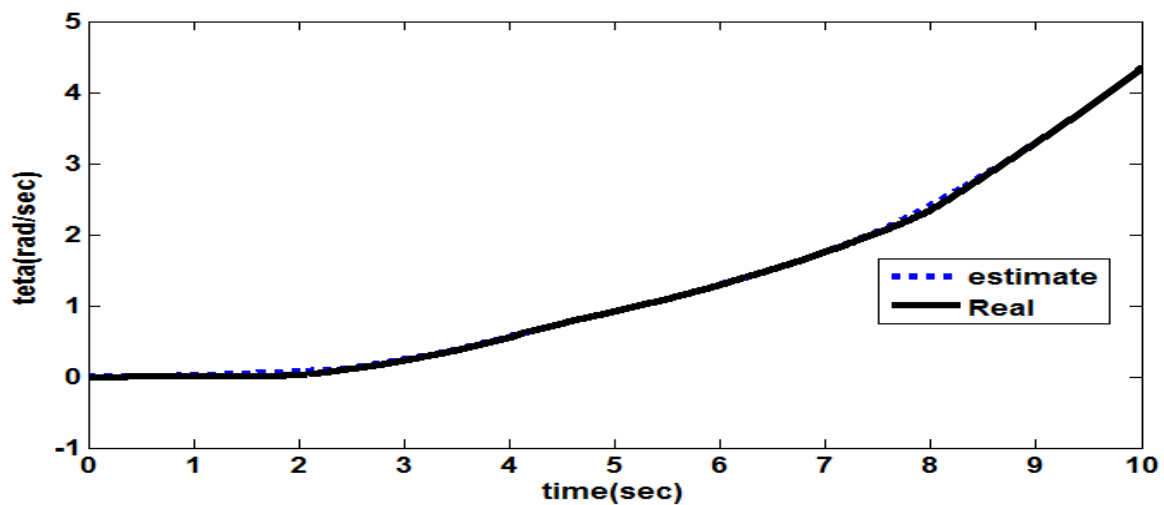
مشاهده‌گر را بر طبق معادله (۵-۴) نوشت که به صورت معادله (۱۲-۴) حاصل می‌شود

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\sin 20t + \cos 20t) + S(\hat{x}, y) \\ \hat{y} = \hat{x}_1 \end{cases} \quad (12-4)$$

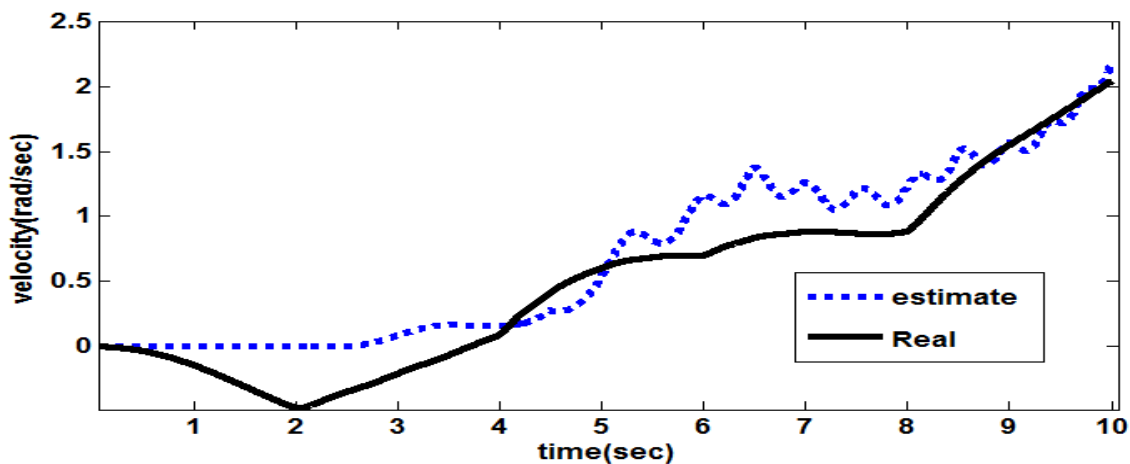
الف) با اعمال خطایی که حاصل جمع سینوسی و مثلثی است داریم:

در سراسر پایان نامه زمان بر حسب ثانیه، خطوط سیاه پیوسته نمایانگر نمایش واقعی و خطوط

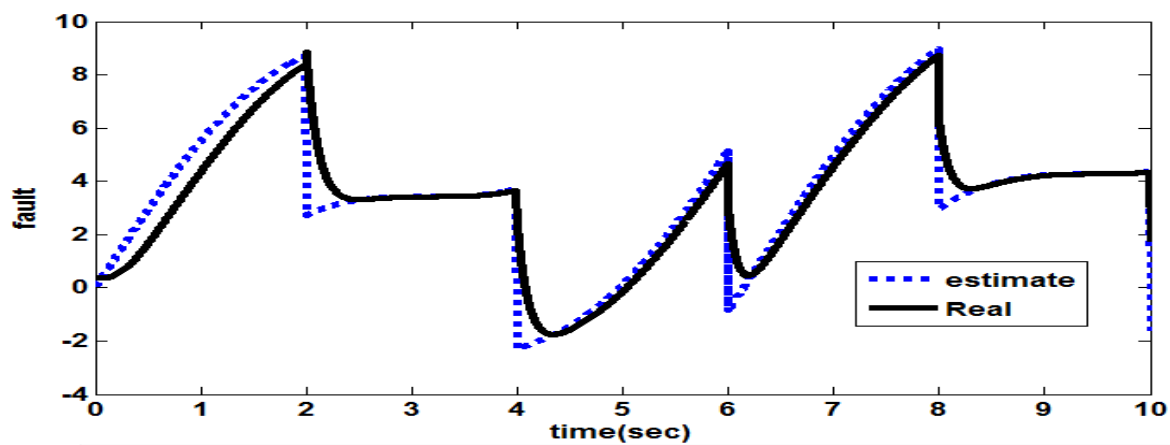
آبی خط چین نمایانگر نمایش تخمین زده شده است.



شکل (۴-۶) موقعیت روبات و تخمین آن



شکل (۴-۷) سرعت لینک روبات و تخمین آن



شکل (۴-۸) خطا و تخمین خطا (نقطه چین)

۴-۸-۱- ایده اصلی پایان نامه، پیاده‌سازی الگوریتم بهینه سازی PSO

روش الگوریتم بهینه سازی PSO که در واقع ایده اصلی پایان نامه بوده و جهت بهینه سازی مقادیری است که به شکل دستی یا روش سعی و خطا داده شده است وارد عمل می‌شود. مقادیری که به شکل دستی وارد شده اند، شامل: مراکز توابع فعال ساز، شعاع توابع گوسین، مقادیر اولیه انتگرال گیر، مقدار بهره مشاهده‌گر، مقادیر اولیه و نهایی آموزشی شبکه عصبی و گام آموزش است. که برای نشان دادن صحت و تاثیر عملکرد الگوریتم بهینه سازی PSO که ایده پایان نامه نیز می‌باشد، مقایسه ای بین خطای تخمین در خصوص شکل موج وضعیت لینک ربات، سرعت لینک ربات و خطای رخدادی در هر دو حالت عادی و بهینه سازی شده، انجام شده است.

۴-۸-۱- معرفی الگوریتم بهینه سازی PSO

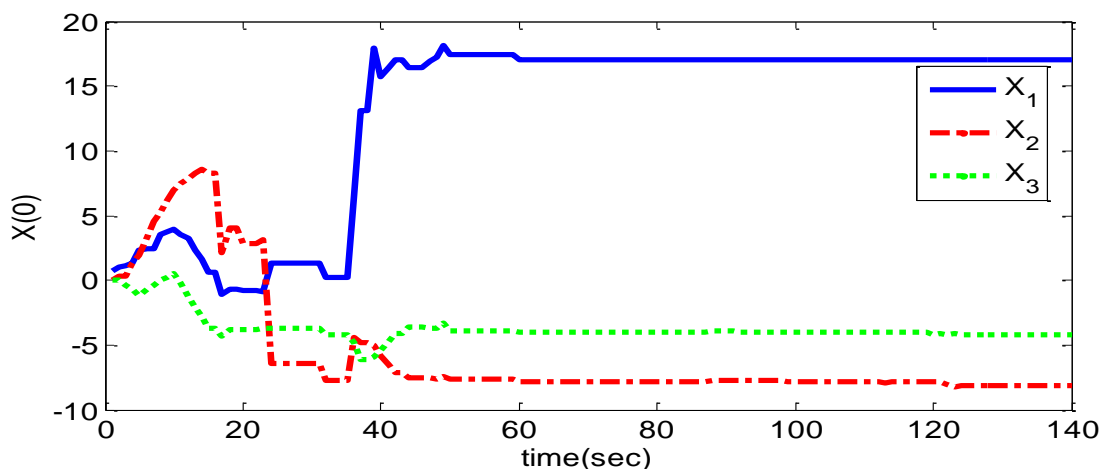
ایده الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات^۱، برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۵ مطرح شد [۳۷]، در حقیقت الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات، یک الگوریتم محاسبه ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و براساس تکرار می‌باشد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها بود. از این جهت که این الگوریتم با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه، شروع می‌شود.

حال در ادامه به پیاده‌سازی و نمایش مقادیر همگرا شده بهینه سازی می‌پردازیم. لازم به ذکر است که شکل موج های خروجی بعد از دوازده بار اجرا شدن مقادیر مطلوب را به ما داد.

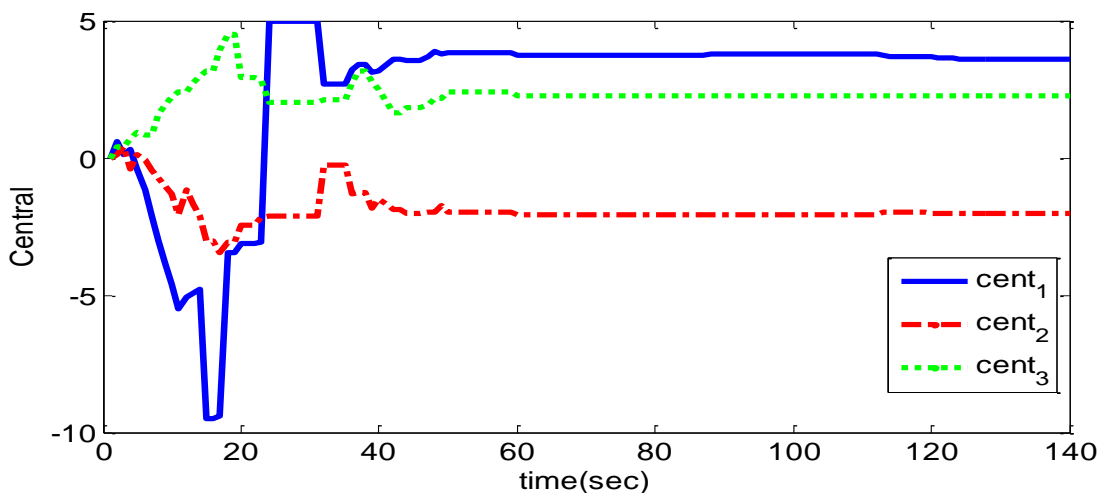
¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

۴-۸-۴- مقادیر همگرا شده بهینه سازی (در حالت خطای سینوسی-مثلی)

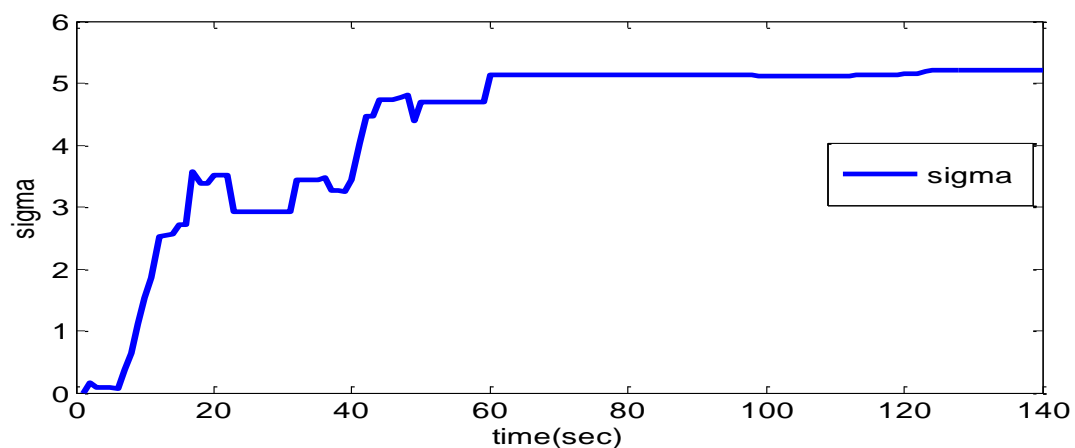
در این قسمت، با اعمال خطای محرک سینوسی - مثلی نیز قصد داریم تاثیر الگوریتم فوق را مشاهده کنیم. لازم به ذکر است که خطای دامنه و فرکانس هر دو موج سینوسی و مثلی برابر یک فرض شده است، در ادامه شکل موج‌های سیگنال‌های بهینه سازی شده، معرف عملکرد صحیح برنامه هستند.



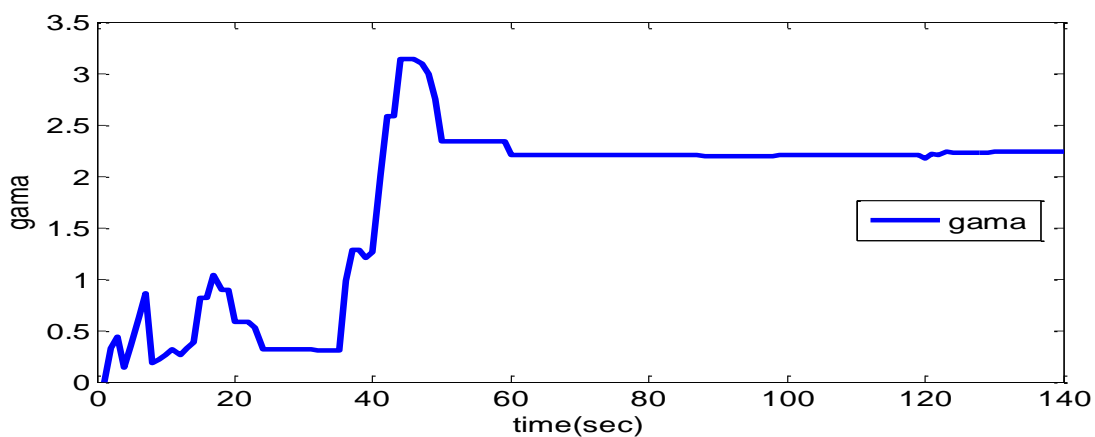
شکل(۴-۹) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر اولیه انتگرال گیرها



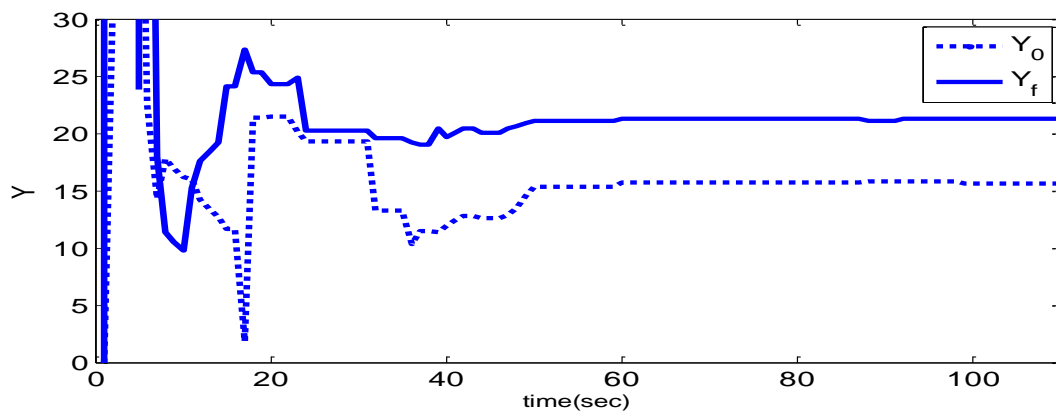
شکل(۴-۱۰) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر مراکز توابع تحریک شبکه عصبی



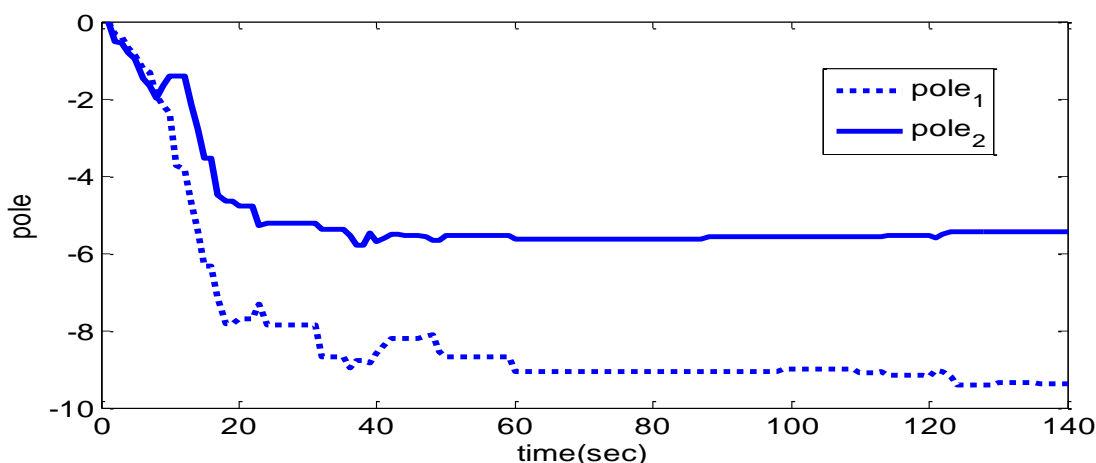
شکل (۴-۱۱) نمایش همگرا شده بهینه مقدار شعاع توابع تحریک شبکه عصبی



شکل (۴-۱۲) نمایش همگرا شده بهینه سازی شده گام آموزش شبکه عصبی



شکل (۴-۱۳) نمایش همگرا شده بهینه مقادیر اولیه و نهایی شبکه عصبی

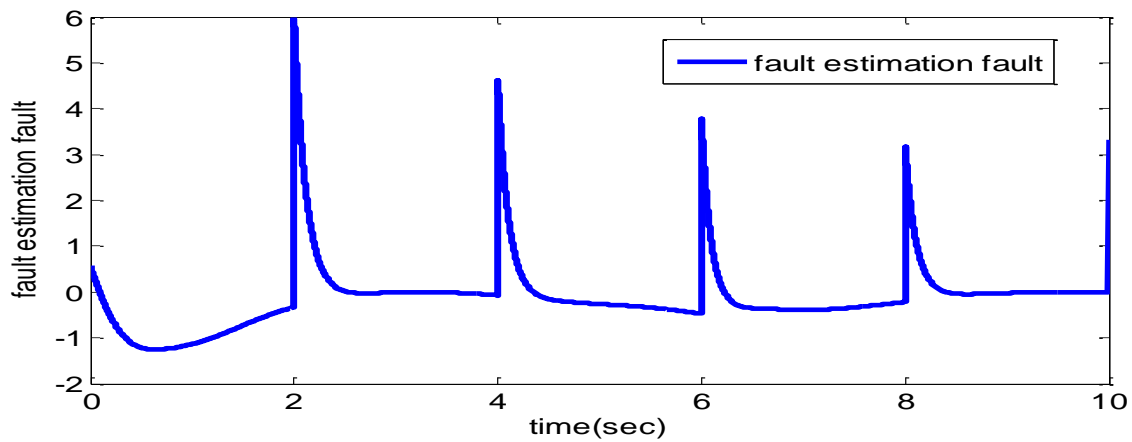


شکل(۴-۱۴) نمایش همگرا شده بهینه سازی شده بهره مشاهده گر جهت قطبها

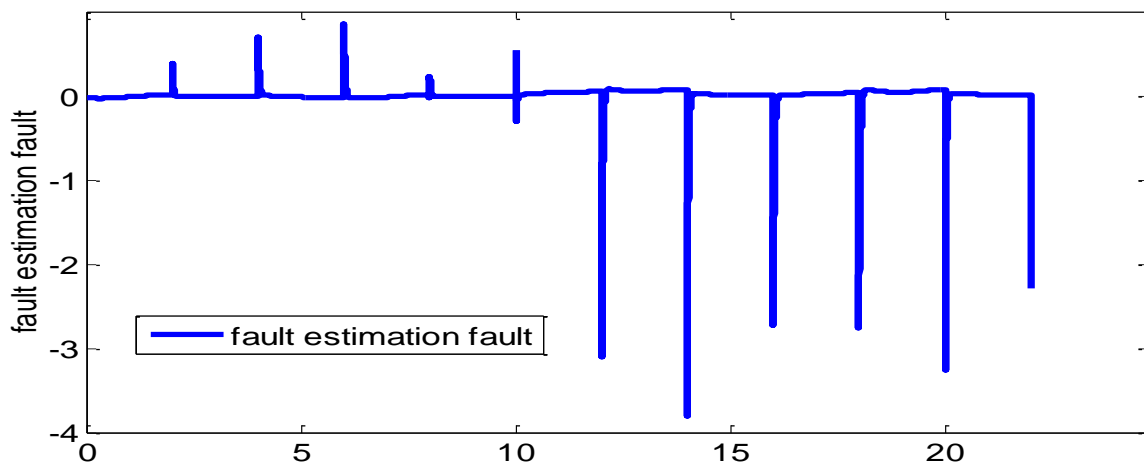
در شکل های بالا مقادیر همگرا شده بهینه سازی شده مقادیر اولیه انتگرال گیرها، مراکز توابع تحریک شبکه عصبی، گام آموزش، شعاع توابع گوسین و بهره مشاهده گر داده شده است، لذا اگر مقادیر پارامترهای مورد نیاز را از روی این مقادیر بهینه سازی شده قرار دهیم، در ادامه خواهیم دید که خطای تخمین و ردیابی به مراتب کمتر شده و به تقریب همرا به دقت بالایی میرسیم.

۴-۸-۵- نتایج حاصل از ایده اصلی پایان نامه، مقایسه خطای تخمین (در حالت خطای سینوسی-مثلی)

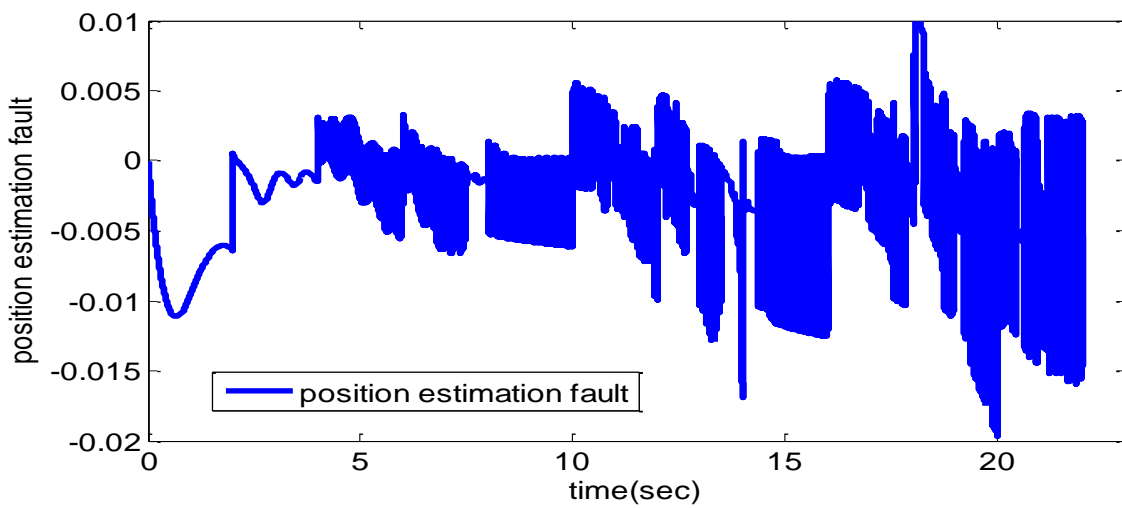
در این بخش، خطای تخمین خطای بازسازی شده در حالت خطای سینوسی-مثلی و نیز خطای تخمین موقعیت و سرعت لینک ربات نمایش داده شده است. برای توضیح هر چه بیشتر شکل های زیر، لازم است بیان شود که به جهت بررسی صحت و کارایی روش بهینه سازی، مقایسه ای بین خطای تخمین حالت، سرعت و خطا انجام شده است. در حالت های بهینه خطای تقریب به مراتب کمتر شده و این توجیه مناسبی برای کارایی و دقت روش بهینه سازی ارائه شده است.



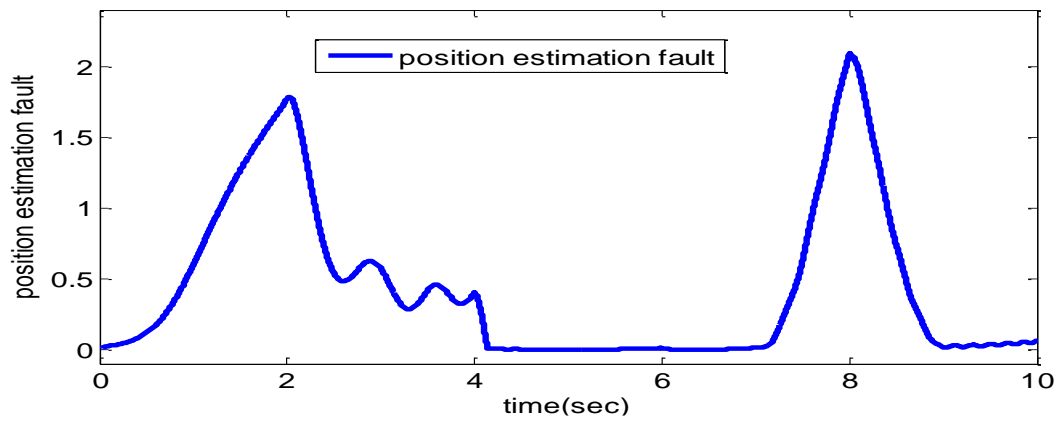
شکل (۴-۱۵) خطای تخمین بازسازی خطا در حالت خطای سینوسی- مثلثی و بدون عمل بهینه سازی



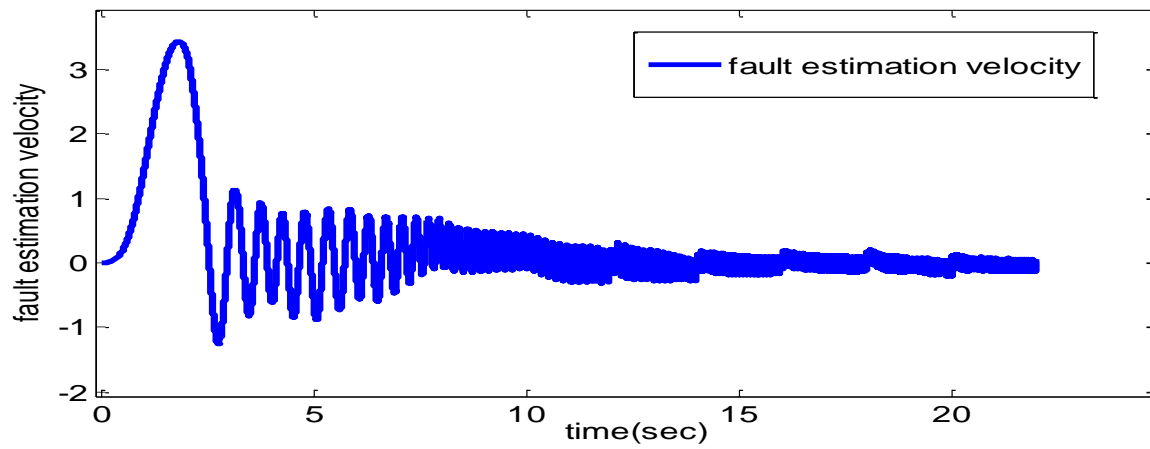
شکل (۴-۱۶) خطای تخمین بازسازی خطا در حالت خطای سینوسی- مثلثی و با عمل بهینه سازی



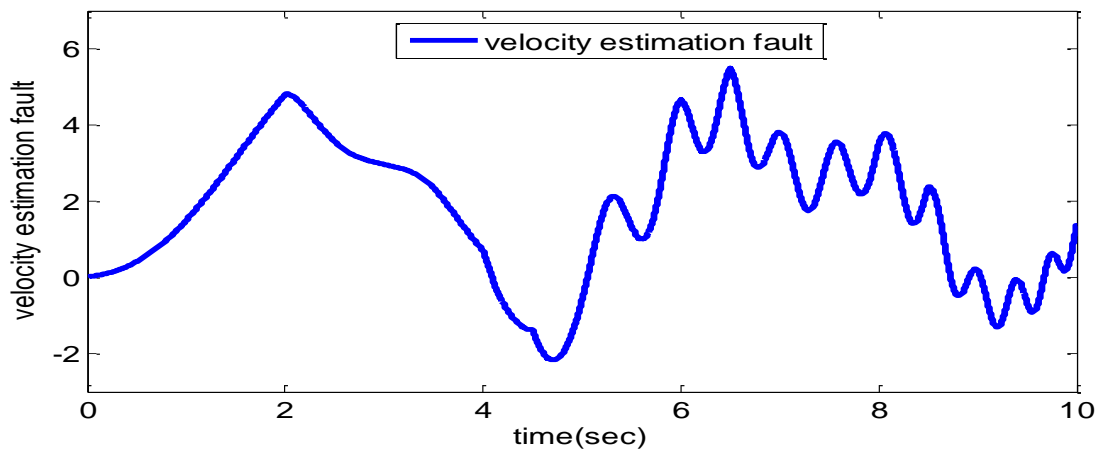
شکل (۴-۱۷) خطای تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی



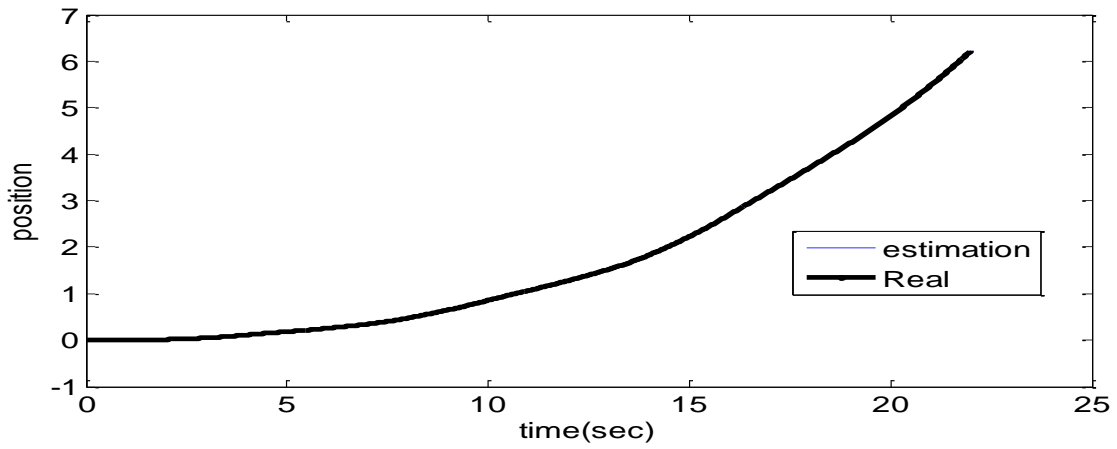
شکل (۴-۱۸) خطای تخمین موقعیت روبات بدون عمل بهینه سازی



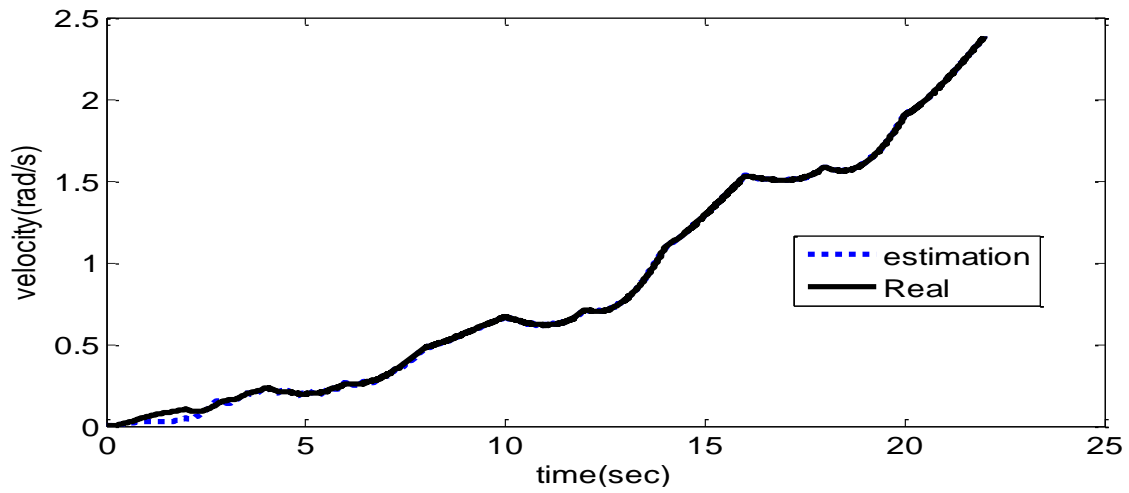
شکل (۴-۱۹) خطای تخمین سرعت روبات با عمل بهینه سازی



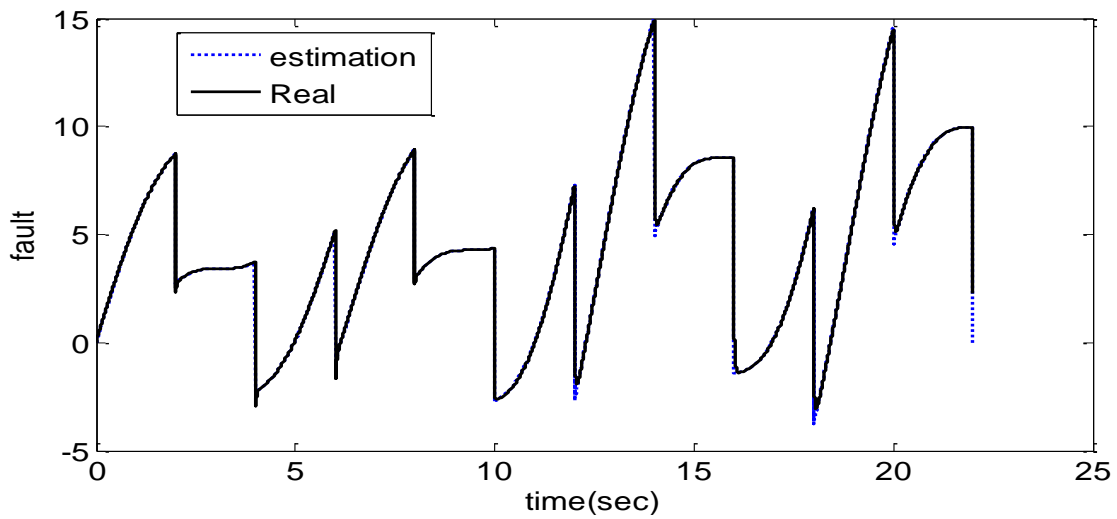
شکل (۴-۲۰) خطای تخمین سرعت روبات بدون عمل بهینه سازی



شکل (۲۱-۴) نمایش موقعیت روبات و تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی



شکل (۲۲-۴) نمایش سرعت روبات و تخمین موقعیت روبات با عمل بهینه سازی



شکل (۲۳-۴) نمایش خطای رخدادی و خطای بازسازی شده با عمل بهینه سازی

۴-۹- نتیجه گیری

در این پایان نامه سعی در بیان مؤلفه های خطا و ماهیت آن گردید تا بتوان با شناخت صحیح خطا و ماهیت آن، در مراحل بالاتر کنترل کننده مناسب برای آن طراحی و خطای رخدادی را برطرف کرد.

در فصل اول لازم بود تا مفاهیم و شناخت کلی از اصطلاحات رایج در خطا را شناخته و اشراف اجمالی نسبت به آن داشته باشیم. و سپس تاریخچه و دلیل پیدایش این حوزه از علم کنترل را بیشتر بشناسیم تا در مراحل و فصول بعدی بتوان از این اصطلاحات استفاده نموده و به کارهایی که در این زمینه انجام شده است را دانش یافت.

در فصل دوم به معرفی و نگاهی اجمالی به روش های تشخیص و شناسایی خطا پرداخته و کلیه روش های مرسوم و متداول در بحث خطا را بیان نموده و سپس به منابع و مراجع مناسب، از برای هر روش استناد شده است.

در فصل سوم که فصل مهمی از پایان نامه است ابتدا به ساکن به توضیح و معرفی مفهوم مود لغزشی پرداخته ایم و سپس روند طی شده در طراحی مشاهده گر مود لغزشی و اثبات پایداری آن و متعاقبا به معرفی مشاهده گرهای لوئن برگر، یوتکین و والکت و زاک پرداخته ایم و مقایسه ای بین آنها انجام داده ایم. سپس بعد از انجام مقایسه روش پیشنهادی مشاهده گر مود لغزشی والکت و زاک را تاکید نهادیم و روش اصلی پایان نامه را بر همین اصل بنا نهادیم. در ادامه فصل دوم به آوردن دو مثال، اولی پاندول معکوس؛ به این دلیل که سیستمی کاملا غیر خطی و ناپایدار است و به نوعی سیستم محک نامیده می شود. دومی سیستم چهار تانک است، و به این دلیل این سیستم را انتخاب نمودیم چرا که تاکنون در هیچ مقاله ای مشاهده گر مود لغزشی به منظور تشخیص خطا بر روی آن انجام نشده بود. و در آخر هم با شبیه سازی های انجام شده قدرت بالای روش استفاده شده را نشان داده ایم.

در فصل چهارم؛ کار را با معرفی شبکه عصبی، تاریخچه شبکه عصبی، و معرفی کارهای انجام شده بر روی آن شروع کردیم. سپس با معرفی توابع برانگیختگی و متعلقات یک شبکه عصبی سعی کردیم تا نگاهی اجمالی به شبکه عصبی داشته باشیم. در ادامه وارد فاز دوم شدیم و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی را به همراه شرایط این شبکه عصبی معرفی کرده و با تعریف معادلات حالت و معادلات مشاهده گر، نوع مشاهده گر مود لغزشی آن را طراحی و برای اثبات پایداری آن از قضیه پایداری لیپانوف استفاده کردیم.

ایده اصلی پایان نامه، پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی بر روی مود لغزشی، مبتنی بر شبکه های عصبی به منظور تشخیص و شناسایی خطا بود و با عنایت به شکل موج های بهینه سازی شده به قدرت و توانایی بالای بهینه سازی پی بردیم. از جمله مزایای پایان نامه نیز این است که در فصل چهارم، سیستم را در همان حالت غیرخطی، و بدون عملیات خطی پیاده سازی نموده ایم.

۴-۱۰- پیشنهادهایی برای آینده

به عنوان پیشنهادهایی برای کارهای آینده، به موارد زیر می توان تکیه داشت:

- ✓ استفاده از بانک مشاهده گرها به جای استفاده از یک مشاهده گر.
- ✓ استفاده از مشاهده گرهای تطبیق یافته جهت تطبیق داده بهره مشاهده گر.
- ✓ ترکیب منطق فازی و شبکه عصبی به منظور تشخیص هر چه بهتر خطا.
- ✓ انجام مقایسه ای بین فناوری تطبیقی و فناوری بهینه سازی و بررسی معایب و مزایای هر کدام.
- ✓ پیاده سازی بر روی سیستم های نوع ورودی غیر خطی^۱.

¹ Non Affain

- [١] Nicola Orani ,PHD Thesis (2010). “HIGHER-ORDER SLIDING MODE TECHNIQUES FOR FAULT DIAGNOSIS”. Dept. of Electrical and Electronic Engineering University of Cagliari.
- [٢] Bakiotis, C. Raymond, J, and Rault, A. (1979). “Parameter and discriminant analysis for jet engine mechanical state diagnosis”. In Proc. of The 1979 IEEE Conf. on Decision & Control, Fort Lauderdale, USA.-
- [٣] Himmelblau, D, (1978). “Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes”. Elsevier, New York.
- [٤] Luenberger, D. G, (1971), An introduction to observers, IEEE Trans. on Automatic control 16, 596–602..
- [٥] Patton, R,(1994).“Robust model-based fault diagnosis: the state of the art”. In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS), pages 1-24, Helsinki, Finland.
- [٦] Clark, R, (1990). “A simplified instrument detection scheme” IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems, 14(3):558-563.
- [٧] Frank, P. and Wunnenberg, J, (1987). “ Sensor fault detection via robust observers”. In Tzafestas, S, Singh, M., and Schmidt, G., editors, System fault diagnostics, reliability & related knowledge-based approaches, volume 1, pages 147-160. D. Reidel Press, Dordrecht.
- [٨] Filbert, D and Metzger, L.(1982). “Quality test of systems by parameter estimation”. In Proc. 9th IMEKO-Congress, Berlin, Germany.
- [٩] Filbert, D(1985). “Fault diagnosis in nonlinear electromechanical systems by continuous-time parameter estimation”. ISA Trans., 24(3):23-27.
- [١٠] Chen, J and Patton, R, (1999). “Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems”. Kluwer, Boston
- [١١] Frank, P, (1987). “Advanced fault detection and isolation schemes using nonlinear and robust observers”. In 10th IFAC Congress, volume 3, pages 63-68, Munchen, Germany.
- [١٢] Patton, R., Frank, P., and Clark, P., editors, (1989). “Fault diagnosis in dynamic systems,

theory and application”. Prentice Hall, London.

- [١٣] Gertler, J,(1998). “Fault detection and diagnosis in engineering systems”. Marcel Dekker, New York.
- [١٤] Mehdi Siah, PHD Thesis,(2009).” Fault Tolerant Control Systems, case study Unmanned Aircraft” Shahrood University of Technology, Faculty of Electrical and Robotic Engineering.
- [١٥] Rolf Isermann,(2006).” Fault-Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [١٦] E.S. Sogomonyan and M. Gossel(1996). “Concurrently self-testing embedded checkers for ultra-eliable fault-tolerant systems”. Proceedings of 14th VLSI Test Symposium, pages 138–144,1996.
- [١٧] J.J. Gertler(1988). “Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants”. IEEE Control Systems Magazine, 8(6):3–11, December.
- [١٨] S. K. Lee and P. R. White(1997). “Higher-order time-frequency analysis and its application to fault detection in rotating machinery”. Mechanical Systems and Signal Processing, 11(4):637–650.
- [١٩] X. Ding, L. Guo, and T. Jeinsch(1993). “A frequency domain approach to fault detection of uncertain dynamic systems”. Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control, 2:1722–1727, December.
- [٢٠] Ali Hashemi,Pierluigi Pisu, (2011). “Adaptive Threshold-Based Fault Detection and Isolation for Automotive Electrical Systems”. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Taipei, Taiwan
- [٢١] C. Edwards, S.K. Spurgeon, R.J. Patton,(2000). “Sliding mode observer for fault detection and isolation“. Automatica, 36:4, pp. 541-553.
- [٢٢] Mehra, R. and Peschon, J, (1971).“An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems”. Automatica, 7:637-640.
- [٢٣] P.S. Kim and E.H. Lee, (2005). “A new parity space approach to fault detection for general systems”. Proceedings of the 1st International Conference on High Performance Computing and Communications, 3726:535–540.
- [٢٤] Slotine,J.Hedrick,J.& Misawa, E. (1987). “On sliding observers for nonlinear systems”. Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 109,

245}252.

- [٣٥] ZAK, S. H., and WALCOTT, B. L, (1990), “State observation of nonlinear control systems via the method of Lyapunov”. *Deterministic Control of Uncertain Systems*, edited by A. S. I.
- [٣٦] A. N. Lakhal, A. S. Tlili, and N. Benhadj Braiek.(2010).” *Neural Network Observer for Nonlinear Systems Application to Induction Motors*”, *International Journal of Control and Automation* Vol. 3, No. 1.
- [٣٧] Z. Gao, X. Shi, and S.X. Ding, (2008) “Fuzzy State/Disturbance Observer Design for TS Fuzzy Systems With Application to Sensor Fault Estimation”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 38(3), pp. 875-880.
- [٣٨] P. Bergsten, R. Palm, and D. Driankov, *Observers for Takagi-Sugeno fuzzy systems*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 32(1), August 2002, pp. 114 121.
- [٣٩] SUPAT KLINKHIEO, PHD Thesis,(2009 *On-line Estimation Approaches to Fault Tolerant Control of Uncertain Systems* ,University of Hull, Faculty of control and electrical. [٣٠] Patton, R., Frank, P., and Clark, P., editors, (2000). “*Issues of fault diagnosis for dynamic systems*”. Springer, New York.
- [٣١] W.W. McCulloch and W. Pitts(1943), “*Logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity*”, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–133, 1943.
- [٣٢] Hebb, D.O. (1949). “*The Organization of Behavior*”. New York: Wiley & Sons.
- [٣٣] F. Rosenblatt,(1962) “*Principles of Neurodynamics*”, Science Editions, New York.
- [٣٤] T. Marcu and L. Mirea(1997) “*Robust detection and isolation of process faults using neural networks*”, *IEEE Contr. Syst.*, 17, pp. 72–79,
- [٣٥] A.B. Trunov and M.M. Polycarpou, (2000)“*Automated fault diagnosis in nonlinear multivariable systems using a learning methodology*”,*IEEE Trans. Neural Networks*, 11, pp. 91–101.
- [٣٦] W. Chen and M. Saif,(2006)“*An Iterative learning observer for fault detection and accommodation in nonlinear time-delay systems*”,*Int. J. Robust and Nonlinear Contr.*, 16, pp. 1–19.
- [٣٧] Liling Ma, Yinghua Yang, Fuli Wang, Ningyun Lu (2002). “*A Sliding Mode Observer Approach For Fault Detection And Diagnosis In Uncertain Nonlinear Systems*”. *Proceedings*

of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, china, pages: 2714 - 2717
vol.4

[37] Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995). "*Particle Swarm Optimization*", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948.

Abstract

With the daily increasing demand of industrial large and small customers for production the efficiency and quality product, the kind of supervision controller as fault detection and diagnosis is made. Advanced methods of fault detection are based on mathematical signal and process models, which is obtained by analytically theory and simulations that is done with expert people. In this thesis, we introduce the different fault, fault diagnosis methods and introduce and implementation the sliding mode observer for fault diagnosis respectively. The main idea is implementation the optimization algorithm on the sliding mode observer base on neural network in order to fault detection, without linearization. For examine the accuracy and efficiently idea, the comparison is done between the state estimation fault, fault estimation fault, states estimation and fault estimation.

Keyword: fault detection and diagnosis, sliding mode, observer and neural network



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

**Designing the sliding mode observer in order to fault detection and
isolation in nonlinear dynamical system**

Javad Azizabadi

Supervisor:

Dr Mohammad Ali Sadrnia

Date: 2014