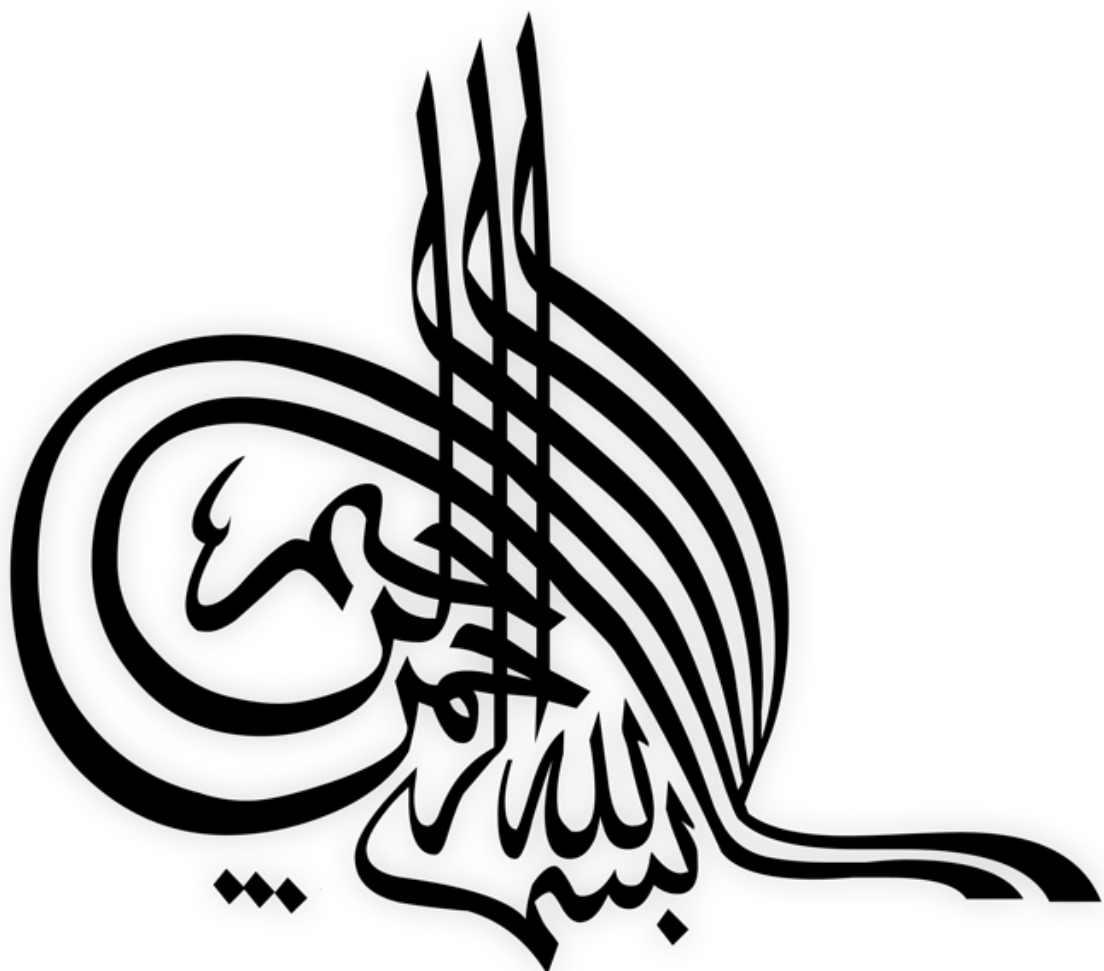






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

تشخیص خطای حسگر سیستم راکتور دسته‌ای پلیمرشده به روش مقاوم H_∞ بهینه

دانشجو: علی روحانی بسطامی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی صدرنیا

استاد مشاور:

دکتر علی کرمی ملائی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار: شهریور ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۱۹۹ / آ.ت.ب
تاریخ: ۹۳/۰۶/۲۶
ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای:
علی روحانی بسطامی رشته: برق گرایش: کنترل
تحت عنوان: تشخیص خطای سیستم راکتور دسته ای پلیمر شده به روش مقاوم H_{∞} بهینه
که در تاریخ ۹۳/۰۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (یا درجه: ~~خوب~~) امتیاز: ۱۷/۴۲۵ (☒) دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	اعضاء
۱- استاد راهنما	محمدعلی محمدزاده	استادیار	
۲- استاد مشاور	علی کریمی عالی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	حسین قنبرآبادی	استادیار	
۴- استاد منتحن	ایمان حسینی	استادیار	
۵- استاد منتحن	عزیزاللهی	استادیار	

رئیس دانشکده:

تقدیم به:

روح پاک پرّم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

و به مام، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و به سرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگی و امید بودم.

سپاس از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر صدیقا که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد صبور، جناب آقای دکتر کریمی، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر الهی و جناب آقای دکتر مرموزی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم، باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب، **علی روحانی بسطامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تشخیص خطای حسگر سیستم راکتور دسته‌ای پلیمرشده به روش مقاوم** H_{∞} **بهینه 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

در این پایان نامه یک راه حل بهینه H_-/H_∞ برای مساله تشخیص خطا در سیستم های غیرخطی نامتغیر با زمان ارایه شده است. در ابتدا مفاهیم اولیه خطا و انواع خطا تعریف می گردد و سپس یک شاخص عملکرد براساس روش H_-/H_∞ به صورت فرموله شده برای کم کردن اثر اغتشاش و افزایش اثر خطا در سیگنال باقیمانده ارایه می شود. سپس یک فیلتر بهینه برای حل مساله خطا از روش H_-/H_∞ با حل مساله LMI بهینه شده برای سیستم تانک راکتور CSTR طراحی می گردد. سپس نتایج شبیه سازی با روش های دیگر مبتنی بر رویتگر از قبیل رویتگرهای لیونبرگر، H_2 ، H_∞ و H_2/H_∞ مقایسه می شود.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا، H_∞ ، H_2/H_∞ ، H_-/H_∞ ، تشخیص خطای سنسور، تشخیص خطای مقاوم، راکتور CSTR.

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه.....	۱
فصل دوم خطا و تشخیص خطا.....	۹
۱-۲ مقدمه.....	۱۱
۲-۲ تعاریف.....	۱۱
۳-۲ انواع خطا.....	۱۲
۱-۳-۲ خطای سنسور.....	۱۲
۲-۳-۲ خطای محرک.....	۱۳
۳-۳-۲ خطای اجزا.....	۱۳
۴-۳-۲ دسته بندی خطا براساس مشخصه زمانی.....	۱۳
۵-۳-۲ دسته بندی خطا براساس نحوه مدل کردن.....	۱۴
۴-۲ تشخیص خطا.....	۱۵
۱-۴-۲ تشخیص خطا بر مبنای افزونگی سخت افزاری.....	۱۵
۲-۴-۲ تشخیص خطا بر مبنای افزونگی تحلیلی.....	۱۶
۳-۴-۲ روش های بدون مدل.....	۱۶
۴-۴-۲ روش های مبتنی بر مدل.....	۱۷
۵-۴-۲ مساله مقاوم بودن در تشخیص خطای مبتنی بر مدل.....	۲۰
فصل سوم ساختار رویتگرهای تشخیص خطا.....	۲۱
۱-۳ مقدمه.....	۲۳
۲-۳ رویتگر لیونبرگر.....	۲۳
۳-۳ رویتگر اغتشاش.....	۲۴
۴-۳ رویتگر ورودی نامعلوم.....	۲۶
۵-۳ طراحی رویتگر به روش H_2	۲۹

۳-۶ طراحی رویتنگر به روش H_{∞}	۳۱
۳-۷ طراحی رویتنگر به روش H_2/H_{∞}	۳۲
۳-۸ طراحی رویتنگر به روش H_{∞}/H_{∞}	۳۶
فصل چهارم طراحی رویتنگر H_{∞}/H_{∞}	۳۷
۴-۱ مقدمه	۳۹
۴-۲ تعاریف اولیه	۳۹
۴-۲-۱ ماتریس انتقال	۴۰
۴-۲-۲ نرمها	۴۰
۴-۲-۳ معادله ریکاتی	۴۰
۴-۲-۴ فاکتور اول چپ	۴۰
۴-۳ فرموله کردن مساله	۴۱
۴-۴ اثبات ریاضی	۴۵
۴-۵ راه حل LMI برای حل مساله تشخیص خطا	۴۹
فصل پنجم تعریف سیستم	۵۵
۵-۱ مقدمه	۵۷
۵-۲ مفاهیم واکنش‌های شیمیایی	۵۸
۵-۲-۱ سینتیک واکنش	۵۸
۵-۲-۲ ترمودینامیک واکنش	۵۹
۵-۲-۳ اثر کاتالیزورها و بازدارنده‌ها بر واکنش	۶۰
۵-۲-۴ انواع واکنش‌ها	۶۱
۵-۳ انواع راکتورهای شیمیایی	۶۱
۵-۳-۱ انواع راکتور از نظر فازهای درگیر در واکنش	۶۲
۵-۳-۲ راکتور بسته و نیمه بسته	۶۲
۵-۳-۳ راکتورهای پیوسته	۶۳

۴-۳-۵ راکتورهای ثابت‌بستر و سیال‌بستر	۶۶
۴-۵ مفاهیم بنیادی راکتورها	۶۶
۴-۵-۱ زمان اقامت، زمان نیمه عمر و زمان پایان واکنش	۶۷
۴-۵-۲ انتقال حرارت در راکتور	۶۹
۴-۵-۳ میکسینگ و انتقال جرم در راکتور	۶۹
۴-۴-۵ معادله راکتور	۷۰
فصل ششم شبیه‌سازی	۷۳
۶-۱ مقدمه	۷۵
۶-۲ طراحی رویگرهای تشخیص خطا	۷۵
۶-۲-۱ رویگر لیونبرگر	۷۵
۶-۲-۲ رویگر H_2	۷۸
۶-۲-۳ رویگر H_{∞}	۸۱
۶-۲-۴ رویگر H_2/H_{∞}	۸۵
۶-۲-۵ رویگر H_-/H_{∞}	۸۸
۶-۳ ارزیابی مقاوم بودن فیلتر تشخیص خطا H_-/H_{∞} برای سیستم خطی شده	۹۱
۶-۴ تشخیص خطا برای سیستم غیرخطی به روش H_-/H_{∞}	۹۲
۶-۵ ارزیابی مقاوم بودن فیلتر تشخیص خطا H_-/H_{∞} برای سیستم غیرخطی	۹۳
فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۹۵
۷-۱ نتیجه‌گیری	۹۷
۷-۲ پیشنهادات	۹۷
منابع	۹۹

فهرست شکل‌ها

۱۲	شکل (۱-۲) تجزیه حلقه باز اجزای سیستم و محلهای احتمالی وقوع خطا در آنها [۱۱]
۱۵	شکل (۳-۲) مدل‌های خطا [۲۷]
۱۹	شکل (۴-۲) روی‌نگر تشخیص خطا [۲۷]
۲۰	شکل (۵-۲) تولید باقیمانده براساس معادلات برابری [۲۷]
۲۹	شکل (۱-۳) فلوجارت روی‌نگر ورودی نامعلوم [۵۴]
۳۳	شکل (۲-۳) فیلتر تشخیص خطا [۵۷]
۴۲	شکل (۱-۴) بلوک دیاگرام سیستم تشخیص خطا.
۷۱	شکل (۱-۵) طرحی از راکتور CSTR [۲۸].
۷۶	شکل (۱-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر لیونبرگر در حالت اول .
۷۶	شکل (۲-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر لیونبرگر در حالت دوم .
۷۶	شکل (۳-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر لیونبرگر در حالت سوم.
۷۷	شکل (۴-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر لیونبرگر در حالت چهارم.
۷۷	شکل (۵-۶) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۷۸	شکل (۶-۶) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۷۹	شکل (۷-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_2 در حالت اول.
۷۹	شکل (۸-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_2 در حالت دوم.
۷۹	شکل (۹-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_2 در حالت سوم.
۸۰	شکل (۱۰-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_2 در حالت چهارم.
۸۰	شکل (۱۱-۶) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۸۱	شکل (۱۲-۶) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۸۲	شکل (۱۳-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_∞ در حالت اول.
۸۲	شکل (۱۴-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_∞ در حالت دوم.
۸۳	شکل (۱۵-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_∞ در حالت سوم.
۸۳	شکل (۱۶-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_∞ در حالت چهارم.
۸۴	شکل (۱۷-۶) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۸۴	شکل (۱۸-۶) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۸۵	شکل (۱۹-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط روی‌نگر H_2/H_∞ در حالت اول .

۸۵	شکل (۶-۲۰) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_2/H_{∞} در حالت دوم.
۸۶	شکل (۶-۲۱) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_2/H_{∞} در حالت سوم.
۸۶	شکل (۶-۲۲) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_2/H_{∞} در حالت چهارم.
۸۷	شکل (۶-۲۳) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۸۷	شکل (۶-۲۴) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۸۸	شکل (۶-۲۵) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت اول .
۸۸	شکل (۶-۲۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت دوم.
۸۹	شکل (۶-۲۷) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت سوم.
۸۹	شکل (۶-۲۸) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت چهارم.
۹۰	شکل (۶-۲۹) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۹۰	شکل (۶-۳۰) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۹۱	شکل (۶-۳۱) باقیمانده در حضور تغییرات پارامتری .
۹۲	شکل (۶-۳۲) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.
۹۲	شکل (۶-۳۳) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.
۹۳	شکل (۶-۳۴) باقیمانده در حضور تغییرات پارامتری.

علائم و اختصارات

C_A	غلظت ماده A در راکتور ، $mol.m^{-3}$
C_B	غلظت ماده B در راکتور ، $mol.m^{-3}$
C_C	غلظت ماده C در راکتور ، $mol.m^{-3}$
C_{AF}	تغذیه غلظت ماده A در راکتور ، $mol.m^{-3}$
K_1	نرخ غلظت مرتبه اول
K_2, K_3	نرخ غلظت مرتبه دوم

N_{BF}	نرخ تغذیه مولار ماده B ، $mol.s^{-1}$
F	نرخ تغذیه حجمی، $m^3.s^{-1}$
V	حجم راکتور، m^3
Da_1	k_1V/F
Da_2	k_2VC_{AF}/F
Da_3	k_3VC_{AF}/F
x_1	C_A/C_{AF}
x_2	C_B/C_{AF}
x_3	C_C/C_{AF}

فصل اول

مقدمه

رشد روزافزون سیستم‌های اتوماتیک و کاربرد آن‌ها در سیستم‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر، و به تبع آن افزایش تقاضا برای ایمنی سیستم‌ها منجر به گرایش بیشتر به سمت و سوی تکنیک‌های تشخیص خطا در سیستم‌های دینامیکی شده است [۱].

عدم تشخیص به‌موقع خطا منجر به صدمه دیدن و از بین رفتن بخش قابل توجهی از امکانات و اطلاعات و در برخی از موارد نیروی انسانی خواهد شد. برای مثال:

۱. 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 شد [۲].

۲. صنایع نفت آمریکا سالانه در حدود بیست میلیارد دلار به‌علت عدم تشخیص به‌موقع خطا ضرر کرده‌اند.

۳. در صنایع پلیمر به‌خاطر بروز خطا، سالانه خسارتی در حد بیست میلیارد دلار متحمل می‌شدند [۳].

به‌علت خسارت‌های وارده از بروز خطا، صنایع علاقه‌مند شدند دنبال روشی برای کم کردن وقوع خطا باشند. جلوگیری از وقوع خطا در سیستم‌های کنترلی امری غیر ممکن است اما اگر به‌توان خطا را به‌موقع تشخیص داد و دینامیک آن‌را شناسایی کرد می‌توان با اعمال قانون کنترلی مناسب میزان خسارت را تا حد قابل قبولی کاهش داد.

به سیستم‌های که دارای چنین توانایی باشند، اصطلاحاً سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا^۱ می‌گویند، در این سیستم‌ها در صورت وقوع خطا، مقداری افت عملکرد نیز قابل قبول می‌باشد [۲، ۴].

برای طراحی سیستم‌های کنترلی تحمل‌پذیر خطا دو رویکرد اصلی وجود دارد: رویکرد فعال^۲ و رویکرد غیرفعال^۳. سیستم‌های غیرفعال کنترل تحمل‌پذیر خطا، از یک روش ثابت برای اصلاح کردن همه

^۱ Fault tolerant control system (FTCS)

^۲ Active approach

^۳ Passive approach

خطاها و اشتباهات استفاده می‌کنند. اما از آنجاییکه در یک سیستم ممکن است انواع خطاها وجود داشته باشد برای همین طراحی سیستم کنترلی تحمل‌پذیر خطا کاری سخت و در بعضی از موارد غیر ممکن است.

در سیستم کنترلی تحمل‌پذیر خطا با رویکرد فعال، اندازه‌گیری‌های مختلف متناظر با خطاهای مختلف در نظر گرفته می‌شود و در نهایت بهترین تصمیم برای برخورد با خطا اتخاذ می‌گردد. در این روش نیازمند عیب‌یابی سریع و عکس‌العمل مناسب بعد از رخ دادن خطاست. عیب‌یابی خطا^۴ و فرآیند تصمیم‌گیری به عنوان تشخیص خطا تعریف می‌شوند که در مباحث بعدی پیرامون آن بحث خواهد شد.

برای تشخیص خطا دو رویکرد اصلی وجود دارد: تشخیص خطا مبتنی بر مدل^۵ و تشخیص خطا بدون مدل^۶ دسته بندی می‌شوند [۶].

روش‌های بدون مدل نیازی به مدل دینامیکی سیستم برای تشخیص خطا ندارند [۷]. این روش‌ها برای وضعیتی که به دست آوردن مدل سیستم مشکل است و یا دارای پیچیدگی‌های محاسباتی است مناسب می‌باشد. در این روش از الگوریتم‌های هوشمند فازی و عصبی استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این روش می‌توان به حجم بالای اندازه‌گیری‌های سیستمی اشاره کرد.

روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل تحلیلی یکی از مهمترین روش‌ها در حوزه تشخیص خطا است [۸]. روش‌های بر پایه مدل سیستم به‌طور کلی سریع‌تر و دقیق‌تر از رویکرد بدون مدل است. این روش‌ها از ایده تولید سیگنال باقیمانده استفاده می‌کنند که از عدم تطابق بین رفتار تخمین زده شده

^۴Fault diagnosis

^۵Model based

^۶Model free

و سیستم واقعی حاصل می‌شود [۱۱]. روش‌های گوناگونی برای تولید سیگنال باقیمانده وجود دارد که می‌توان به روش‌های مبتنی بر رویتگر^۷، معادلات برابری^۸ و تخمین پارامتر^۹ اشاره کرد [۶، ۱۰].

اولین اقدامات در زمینه تشخیص خطا به اوایل دهه هفتاد برمی‌گردد [۲۰]. در سال ۱۹۷۱ برید^{۱۰} و در سال ۱۹۷۳ جونز^{۱۱} فیلتر تشخیص نارسایی^{۱۲} را برای سیستم‌های خطی ارائه دادند [۲۱]. اولین کتاب با موضوع روش‌های تعیین و تشخیص خطا در سال ۱۹۷۸ توسط هیمبلو^{۱۳} منتشر شد، در همین سال تشخیص نارسایی سنسور مبتنی بر روش افزونگی تحلیلی توسط کلارک^{۱۴} ارائه شد [۲۲].

هومان^{۱۵} در سال ۱۹۷۷ برای اولین بار روش تخمین پارامتر را ارائه داد و پس از آن در سال ۱۹۸۴ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه تشخیص خطای فرآیند، برپایه مدل سازی، تخمین حالت و پارامتر توسط ایزرمن^{۱۶} منتشر گردید [۲۳].

روش‌های معادلات همسانی توسط چو^{۱۷} و ویلسکای^{۱۸} در سال ۱۹۸۴ ارائه گردید و سپس توسط گرتلر^{۱۹} در سال ۱۹۹۱ و پتن^{۲۰} و چن^{۲۱} در سال ۱۹۹۴ گسترش داده شد [۲۴، ۲۵].

در [۱۲] از شبکه عصبی پیش‌خور برای تشخیص خطا در سیستم‌های شیمیایی استفاده شده است. با استفاده از خاصیت تقریب زندگی شبکه‌های پایه شعاعی خطای سنسور را تشخیص می‌دهد. یکی از معایب شبکه عصبی پیچیده بودن و وابستگی تقریب به مقادیر اولیه است.

⁷Observer based approach

⁸Parity equation approach

⁹Parameter estimation approach

¹⁰Bread

¹¹jones

¹²Failure detection filter

¹³Himmelblau

¹⁴Clarck

¹⁵Hohmann

¹⁶Isermann

¹⁷Chow

¹⁸Willsky

¹⁹Gertler

²⁰Patton

²¹Chen

در [۱۳] روش تطبیقی برای معادلات همسانی پیشنهاد شده است. برای تشخیص سریع خطا از معادلات برابری پیوسته در زمان استفاده شده است. اما باید در نظر گرفت در روش تطبیقی باید خطا مقداری ثابت باشد یا تغییرات بسیار کندی داشته باشد.

در [۱۴] از روش فیلتر تشخیص خطای مقاوم در سیستم‌های غیرخطی که دارای تاخیر زمانی، با ورودی نامشخص استفاده شده است. فیلتر تشخیص خطا از روش H_∞ بهینه استفاده شده است.

در [۱۵] روشی را برای تشخیص و جداسازی خطای سنسور در سیستم‌های چند متغیره ارائه داده است. یک روش بهینه، با استفاده از معادلات فضای حالت از سیگنال باقیمانده ابتدایی یک سیگنال باقیمانده گسترده ساخته که به وسیله آن می‌توان خطا را تشخیص داده و جداسازی انجام شود. سطح آستانه را برای تشخیص خطا از روش فازی تطبیقی به دست آورده است. نتایج این مقاله از دقت بسیار بالایی برخوردار است، اما پیاده‌سازی عملی آن به علت استفاده از تخمین‌گرهای زیاد و محاسبات ریاضی پیچیده بسیار هزینه‌بر و کند است.

در [۱۶] معادلات همسانی را از روش فازی به دست آورده است. در این روش ابتدا سیستم غیرخطی با روش فازی تاگاکای سوگنو تخمین زده می‌شود. بعد با مدل خطی شده سیستم مقایسه می‌شود، سپس معادلات همسانی به وسیله فازی تاگاکای سوگنو به دست می‌آید.

در [۱۷] هدف تهیه کردن معادلات همسانی غیرخطی از طریق شناسایی برای تشخیص خطا است. مزیت این روش عدم نیاز به شناخت کامل از سیستم است، ولی مشکل این روش زمانی است که خطا جهش ناگهانی داشته باشد که نمی‌تواند دامنه خطا را به خوبی نشان دهد.

در [۱۸] از روش فازی-عصبی برای تشخیص خطای سیستم تانک راکتور استفاده شده است.

در [۱۹] با استفاده از روش مقاوم غیرفعال خطا را تشخیص داده است. معادلات برابری در این مقاله از روش فازی به دست آمده است.

استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند نیز به‌طور وسیعی در زمینه‌ی تشخیص خطا گسترش یافته است. از جمله در [۲۶-۲۷] کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان^{۲۲} در تشخیص خطا به‌کار گرفته شده است.

یکی از روش‌هایی که به‌طور گسترده برای تولید باقیمانده استفاده می‌شود، روش‌های افزونگی تحلیلی مبتنی بر رویتگر است، که در فرآیندهای عملی با موفقیت به کار برده شده‌اند [۵].

روش پیشنهادی استفاده از رویتگر است. در روش مبتنی بر رویتگر از یک مدل نامی خطی، بدون وجود خطا استفاده می‌گردد و خروجی آن با سیستم واقعی مقایسه می‌شود. در صورتی که از خطای مدل-سازی و اغتشاش صرف‌نظر شود، خروجی مدل نامی با خروجی سیستم واقعی تا زمانی که خطایی در سیستم رخ ندهد برابر است. اما در عمل از خطای مدل سازی و اغتشاش نمی‌توان صرف‌نظر کرد، بنابراین باید دنبال روشی بود که به‌توان سیگنال باقیمانده فقط به خطا حساس باشد. برای حساس کردن سیگنال باقیمانده به خطا، با استفاده از روش‌های مقاوم می‌توان اثر اغتشاش و حالت‌های سیستم را در خروجی به حداقل رساند و اثر خطا را افزایش داد، با کم کردن اثر حالت‌های سیستم در خروجی، در واقع خطای مدل سازی حداقل می‌شود. به‌علت اینکه اغتشاشات شناخته شده و ناشناخته در سیستم‌های عملی وجود دارند، زمانی یک سیستم تشخیص خطا، مقاوم و قابل اطمینان است که در روند طراحی اثرات این پارامترها در نظر گرفته‌شود. بنابراین روش H_-/H_∞ برای پیدا کردن این ماتریس پیشنهاد داده شده‌است.

برای حل مساله تشخیص خطا از ترکیب نرم‌های مختلف از قبیل H_2/H_∞ و H_∞/H_∞ استفاده شده- است، در این مقاله از روش H_-/H_∞ برای تشخیص خطا در سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان در حضور اغتشاش استفاده شده‌است. سپس با استفاده از مدل فضای حالت و با حل نامعادلات خطی ماتریسی یک روش مناسب برای تشخیص خطا که حساسیت سیگنال باقیمانده به اغتشاش را به حداقل و حساسیت سیگنال باقیمانده به خطا را به حداکثر برساند ارائه گردیده‌است. فیلتر H_-/H_∞

²²Particle swarm optimization (PSO)

حساسیت سیگنال باقیمانده به خطا را افزایش می‌دهد و حساسیت سیگنال باقیمانده را به اغتشاش و عدم قطعیت‌های سیستم مقاوم می‌کند. با استفاده از تحقق فضای حالت فیلتر بهینه در یک رویکرد حالت به‌وسیله حل نامعادلات خطی ماتریس^{۲۳} این فیلتر طراحی می‌شود [۳۷].

روش پیشنهادی بر روی یک سیستم غیرخطی درجه سه، یک ورودی-خروجی راکتور دسته‌ای پلیمرشده که معادلات آن از [۲۸-۱۲] به‌دست آمده‌است مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل دوم تعاریف مقدماتی خطا، انواع آن و سیستم‌های تشخیص خطا شرح داده می‌شود. سپس به بیان اهمیت تولید سیگنال باقیمانده و نقش آن در امر تشخیص خطا و اهمیت مقاوم بودن این سیگنال در برابر اغتشاشات پرداخته می‌شود.

در فصل سوم ساختار رویکردهای لیونبرگر، اغتشاش، ورودی نامعلوم، H_2 ، H_∞ و H_-/H_∞ بررسی می‌شود.

در فصل چهارم به بیان دقیق راه حل پیشنهادی برای حل مساله تشخیص خطا پرداخته می‌شود و اثبات‌های لازم در این زمینه ارائه می‌گردد.

در فصل پنجم مفاهیم اساسی و تعاریف اولیه راکتورهای شیمیایی معرفی می‌گردد، سپس انواع راکتورها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه معادلات فضای حالت سیستم راکتور CSTR محاسبه می‌گردد.

در فصل ششم شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سیستم راکتور CSTR با روش‌های مختلف ارائه می‌گردد.

در فصل هفتم به بیان نتایج و ارائه پیشنهادات پرداخته می‌شود.

²³Linear Matrix Inequalities

فصل دوم

خطا و تشخیص خطا

۲-۱ مقدمه

وابستگی شدید جوامع امروزی به سیستم‌های صنعتی، متخصصین را بر آن داشته است که به دنبال روش‌هایی باشند که احتمال وقوع خطا را در این سیستم‌ها کاهش دهند. اما از آنجاییکه احتمال وقوع خطا همیشه وجود دارد، بنابراین باید به دنبال روش‌هایی بود که به توان در صورت وقوع خطا، آن را تشخیص داد و به موقع اثر مخرب خطا را بررسی کرد.

تشخیص به موقع خطا برای بهبود اطمینان، امنیت و کارایی بسیاری از فرآیندهای صنعتی و فنی مثل هواپیما، اتومبیل، فرآیندهای شیمیایی و فرآیندهای قدرت حائز اهمیت می‌باشد [۱۰].

اگر در این سیستم‌ها خطا به موقع تشخیص داده نشود ممکن است خسارت‌های سنگین اقتصادی و انسانی به بار بیاورد.

در ابتدا بهتر است برخی از اصطلاحات اساسی و تعاریف مهم مثل خطا، انواع خطا و سیستم تشخیص خطا را تعریف کرد.

۲-۲ تعاریف

۱- خطا^{۲۴}: یک انحراف غیرمجاز که حداقل یکی از ویژگی‌های مشخصه سیستم از شرایط قابل قبول یا استاندارد می‌باشد [۱۰].

۲- شکست^{۲۵}: یک وقفه‌ی موقت در توانایی یک سیستم برای اجرای یک عمل مورد نیاز تحت شرایط عملکردی ویژه می‌باشد.

۳- بدعمل کردن^{۲۶}: یک بی‌نظمی متناوب در برآورده کردن عملکرد مطلوب سیستم می‌باشد.

۴- اغتشاش^{۲۷}: یک ورودی ناشناخته و کنترل نشده است که به سیستم وارد می‌شود.

²⁴Fault

²⁵Failure

²⁶Malfunction

²⁷Disturbance

۵- باقیمانده^{۲۸}: یک شاخص خطا، مبتنی بر انحراف بین اندازه‌گیری‌ها و محاسبات مبتنی بر روی معادلات مدل می‌باشد [۳۰].

۶- تشخیص خطا^{۲۹}: تشخیص وقوع خطا [۷].

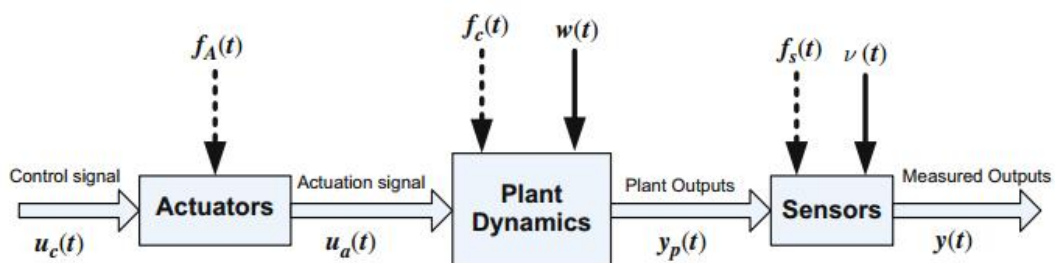
۷- جداسازی خطا^{۳۰}: در صورت وقوع خطا، مکان خطا مشخص می‌شود.

۸- شناسایی خطا^{۳۱}: اندازه و رفتار متغیر با زمان خطا مشخص می‌شود.

یک سیستم FDI متشکل از زیر سیستم‌های تشخیص و جداسازی و شناسایی خطا تشکیل می‌شود.

۲-۳ انواع خطا

خطا را می‌توان به چندین روش مختلف دسته‌بندی کرد. حالت اول براساس محل وقوع خطا به سه دسته خطای سنسور، محرک و اجزا دسته‌بندی می‌گردد [۱۱]. به‌طور شماتیک این نوع خطا در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) تجزیه حلقه باز اجزای سیستم و محل‌های احتمالی وقوع خطا در آن‌ها [۱۱].

۲-۳-۱ خطای سنسور

این نوع خطا باعث می‌شود اطلاعات نادرستی از سیستم به محیط بیرون منتقل شود، و می‌تواند موجب ناپایداری سیستم گردد. بنابراین تشخیص این نوع خطا بسیار مهم است. بایاس، تنزل عملکرد و ... نمونه‌های از خطای سنسور می‌باشند.

²⁸Residual

²⁹Fault Detection

³⁰Fault Isolation

³¹Fault Identification

۲-۳-۲ خطای محرک

در بسیاری از سیستم‌های الکتروشمیایی و الکترومکانیکی، سیگنال‌های کنترل به‌طور مستقیم به سیستم قابل اعمال نیستند. محرک‌هایی مورد نیاز است که سیگنال‌های کنترل را به سیگنال‌های تحریک مناسب مثل گشتاورها و نیروها برای راه‌اندازی سیستم تبدیل کنند. پیامد خطای محرک از مصرف انرژی بالاتر تا از دست دادن کنترل و ناپایداری سیستم می‌باشد.

خطای محرک معمولاً به نوع محرک بستگی دارد، مثل اشباع شدگی، نشتی، خاموشی و

۲-۳-۳ خطای اجزا

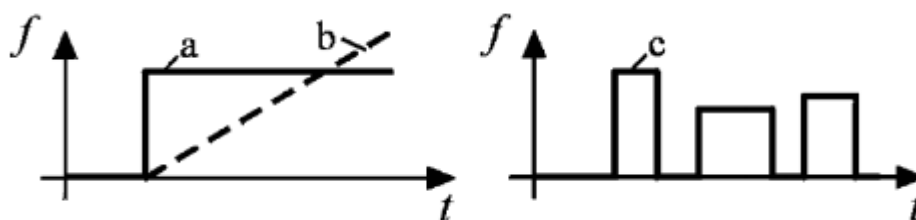
خطاهایی که در اجزای سیستم رخ می‌دهند و نتوان آن‌ها را در گروه خطای سنسور و خطای محرک جای داد در این گروه قرار می‌گیرند. در حقیقت این نوع خطا موجب بی‌اعتبار شدن معادلات نامی می‌شوند. ارائه مدل ریاضی این نوع خطا بسیار مشکل می‌باشد.

این نوع خطا معمولاً به صورت یک تغییر در معادلات حالت سیستم که می‌تواند یک تغییر پارامتری یا یک تغییر ساختاری باشد، قابل ارائه است.

علت ایجاد این خطا فرسودگی، پارگی، کهنگی اجزا و ... است. نشتی در تانک‌های پلیمر و شکستگی در جعبه‌دنده نمونه‌هایی از خطای اجزا هستند.

۲-۳-۴ دسته بندی خطا براساس مشخصه زمانی

حالت دوم دسته بندی خطا براساس مشخصه زمانی آن‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۱۰]. به-طور شماتیک این نوع خطا در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) وابستگی زمانی خطاها (a) ناگهانی (b) افزایشنده (c) تناوبی [۱۰].

۱. خطای ناگهانی^{۳۲} (پله‌ای): این نوع خطاها بر اثر وقوع نقص فنی و خرابی تجهیزات به وقوع می‌پیوندند و اثرات مخربی دارند اما به راحتی تشخیص داده می‌شوند. شکستن جعبه‌دنده و یا از کار افتادن بال هواپیما نمونه‌هایی از این نوع خطا می‌باشند.
۲. خطای نرم^{۳۳} (شیب): خطای نرم به خطایی گفته می‌شود که در طول زمان، به کندی و به علت کهنه و فرسوده شدن اجزای سیستم رخ می‌دهد. به علت تغییرات رفتاری آهسته تشخیص آن‌ها مشکل است.
۳. خطای تناوبی^{۳۴}: این خطاها در فاصله‌های زمانی مشخص در سیستم اثر می‌گذارند. مانند حباب‌های هوا در لوله‌های گاز.
۴. خطای موقتی: این نوع خطا به‌طور موقت در سیستم ظاهر می‌شوند و پس از مدتی رفع می‌شوند.

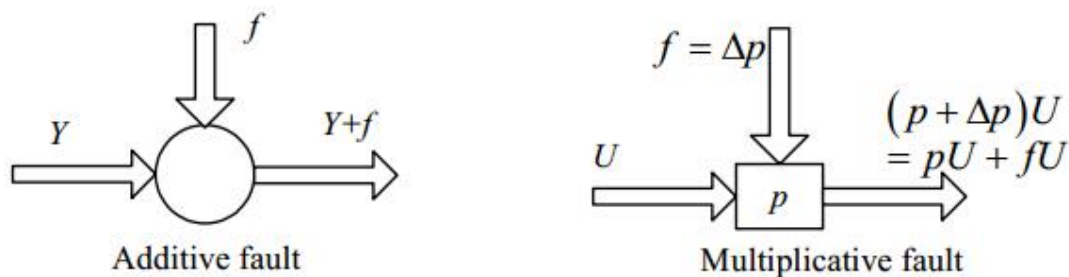
۵-۳-۲ دسته بندی خطا براساس نحوه مدل کردن

حالت سوم دسته‌بندی براساس نحوه مدل کردن آن‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند [۱۰]. به‌طور شماتیک این نوع خطا در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

³²Abrupt Faults

³³Inception Faults

³⁴Intermittent Faults



شکل (۳-۲) مدل‌های خطا [۲۷].

۱. خطای جمع‌شونده^{۳۵}: این خطاها به صورت جمع‌شونده در ورودی یا خروجی سیستم ظاهر می‌شوند. مثل آفست سنسورها.

۲. خطای ضرب‌شونده^{۳۶}: این خطاها سبب ایجاد تغییر در پارامترهای سیستم می‌شوند و به صورت ضرب‌شونده پدید می‌آیند.

۴-۲ تشخیص خطا

اعتماد به اپراتورهای انسانی در مدیریت رویدادهای غیر طبیعی امکان‌پذیر نمی‌باشد. عدم تشخیص به موقع خطا به ایجاد مشکلات اقتصادی و انسانی منتهی می‌شود.

هدف از به کارگیری روش‌های تشخیص خطا، بهبود عملکرد و بالابردن قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد.

۲-۴-۱ تشخیص خطا بر مبنای افزونگی سخت افزاری^{۳۷}

این روش از روش‌های قدیمی تشخیص خطا است. مبنای این روش مقایسه و بررسی سیگنال‌های تولیدشده توسط سخت افزارهای مختلف که عموماً چندین سنسور می‌باشد است. به عنوان مثال سه سنسور یک سیگنال را اندازه‌گیری می‌کنند، اگر یکی از این سه سنسور با سنسور دیگر تفاوت داشته باشد نشان‌دهنده وجود خطا است.

³⁵Additive faults

³⁶Multiplicative Faults

³⁷Hardware redundancy

از مزایای این روش اطمینان افزونگی کاملاً مرتبط با کیفیت سخت‌افزار (سنسور یا محرک) بوده و به آنالیزهای سنگین ریاضی نیازی ندارد. اما ایراد اصلی این روش هزینه بالا و فضای زیادی که برای نصب نیاز دارد است.

این روش تشخیص خطا، در سیستم‌هایی که به امنیت بالا نیاز دارد مثل سیستم حمل و نقل هوایی و نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده می‌شوند.

۲-۴-۲ تشخیص خطا بر مبنای افزونگی تحلیلی^{۳۸}

از اوایل ۱۹۷۰ به دلیل هزینه‌های زیاد و محدودیت‌های افزونگی سخت‌افزاری که از نظر وزن و مکان به سیستم تحمیل می‌کرد روش‌های جدیدتری در حوزه تشخیص خطا ارائه شد.

مبنای این روش بررسی رفتار حقیقی سیستم در مقابل مدل ریاضی برای تشخیص تناقض می‌باشد. هرگونه خطایی در سیستم به‌عنوان باقیمانده بیان می‌شود. اگر باقیمانده برابر صفر باشد یعنی خطایی رخ نداده است و اگر مخالف صفر باشد نشان دهنده وقوع خطا است.

مزیت این روش نسبت به روش افزونگی سخت‌افزاری این است که به فضا و هزینه کمتری نیاز دارد. اما دارای قابلیت اطمینان کمتری نسبت به روش افزونگی سخت‌افزاری است.

۲-۴-۳ روش‌های بدون مدل

در این روش برای تشخیص خطا از مدل ریاضی استفاده نمی‌شود. در این روش با به‌کارگیری اطلاعات موجود در یک پایگاه داده خطا را تشخیص می‌دهند. مشکل اصلی این روش، نیاز آن به داده‌های غنی از سیستم تحت نظارت می‌باشد، ولی برای سیستم‌هایی که دارای مدل ریاضی پیچیده هستند و یا اینکه به‌دست آوردن مدل ریاضی آن بسیار مشکل است، از این روش استفاده می‌شود.

³⁸Analytical redundancy

روش مبتنی بر آنالیز سیگنال و بررسی حد در این دسته قرار می‌گیرند.

۱. روش مبتنی بر آنالیز سیگنال: در این روش یک یا چند سیگنال قابل اندازه‌گیری از سیستم با استفاده از روش‌های مختلفی مانند تحلیل طیف فرکانسی، تحلیل دامنه و تحلیل روند تغییرات سیگنال و... مورد تحلیل قرار گرفته و هرگونه تغییر غیرمجاز در خصوصیات سیگنال، نشان‌دهنده وقوع خطا در سیستم است [۳۱].

۲. روش بررسی حد: در این روش، مقدار متغیرهای سیستم که با اندازه‌گیری به‌دست آمده است با حدود تعیین شده، توسط یک کامپیوتر مقایسه می‌شوند. تجاوز از آستانه نشان‌دهنده وقوع خطا است.

روش بررسی حد ساده‌ترین روش تشخیص خطا است و به راحتی قابل اجرا می‌باشد. ولی این روش زمانی قابل اجرا است که خطا از حدود تعیین شده بسیار بزرگ‌تر باشد که در این صورت امکان ایجاد خسارت در سیستم وجود دارد و حتی امکان دارد بسیاری از خطاها تشخیص داده نشوند و در بعضی از موارد ممکن است که اغتشاش به‌عنوان خطا در نظر گرفته شود. همچنین این روش برای سیستم‌هایی که دارای رفتار متغیر هستند مناسب نمی‌باشد [۳۲].

۲-۴-۴ روش‌های مبتنی بر مدل

اکثر روش‌های تشخیص خطا براساس روش‌های مبتنی بر مدل هستند. در این روش از یک مدل نامی برای توصیف سیستم استفاده می‌شود، رفتار مدل نامی با سیستم واقعی مقایسه می‌شود، سپس با تحلیل این مقایسه خطا تشخیص داده می‌شود [۳۲].

برای تشخیص خطا از این روش باید دو مرحله زیر را طی کرد.

۱. مرحله اول، تولید باقیمانده^{۳۹}: هدف این مرحله تولید سیگنال باقیمانده است. این سیگنال تفاوت میان متغیرهای اندازه‌گیری شده از سیستم با تخمین‌های محاسبه شده است. در حالت ایده‌آل تا زمانی که خطایی رخ ندهد مقدار سیگنال باقیمانده صفر یا نزدیک صفر خواهد بود، ولی اگر مقدار سیگنال باقیمانده صفر نباشد به معنای رخ دادن خطا است. تولید باقیمانده مهمترین بخش فرآیند تشخیص خطا می‌باشد. زیرا که اگر این سیگنال درست تولید نشود خطا به‌درستی تشخیص داده نمی‌شود.

۲. مرحله دوم، ارزیابی باقیمانده^{۴۰}: بعد از تولید سیگنال باقیمانده این سیگنال باید مورد ارزیابی و تحلیل قرار بگیرد، که بوسیله این ارزیابی باید تشخیص داده شود که اختلاف بین سیستم نامی و سیستم واقعی به‌علت وجود خطا بوده است یا به‌علت عوامل دیگر بوده است.

روش‌های رایج تولید باقیمانده به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند.

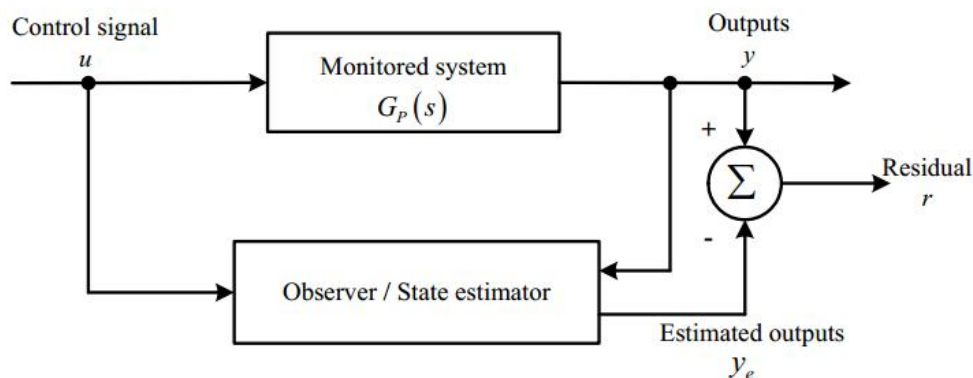
۱. روش مبتنی بر رویتگر: اگر یک سیستم رویت‌پذیر باشد، رویتگرها برای تخمین حالت‌های سیستم با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری می‌توانند استفاده شوند. رویتگرهای تشخیص خطا از خطای بین خروجی اندازه‌گیری شده و خروجی تخمین‌زده شده به‌عنوان باقیمانده استفاده می‌کنند. طرح کلی این روش در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. در این شکل $\hat{y}$ به‌عنوان خروجی تخمین زده شده و y به‌عنوان خروجی واقعی سیستم در نظر گرفته می‌شود که باقیمانده از رابطه ۲-۱ حاصل می‌شود.

$$r = \hat{y} - y \quad (1-2)$$

رویتگرها به مدل دقیق سیستم نیاز دارند و به این علت که این مدل در دسترس نیست طراحی مقاوم برای رویتگرهای تشخیص خطا مهم است [۲۷].

³⁹Residual generation

⁴⁰Residual evaluation



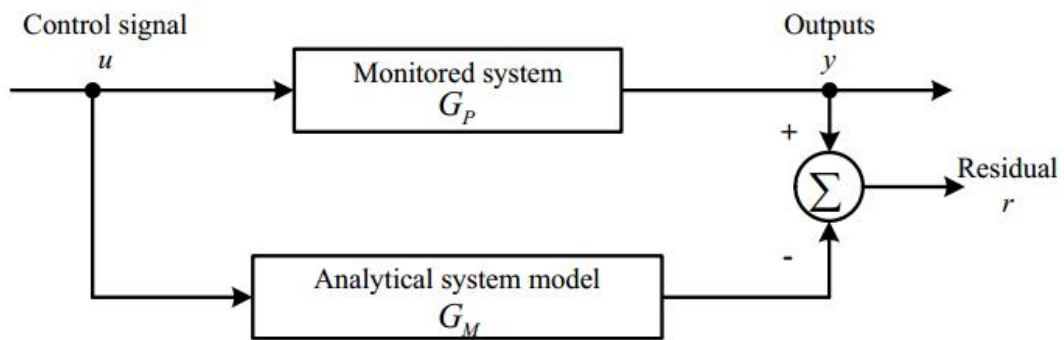
شکل (۴-۲) روینگر تشخیص خطا [۲۷].

۲. روش معادلات برابری: روش معادلات برابری یک روش ساده و مستقیم برای تولید سیگنال باقیمانده است [۱۰]. اگر $G(s)$ سیستم واقعی باشد و $\hat{G}(s)$ تخمینی از سیستم واقعی باشد، باقیمانده براساس معادلات برابری از رابطه ۲-۲ به دست می آید. در این رابطه u ورودی کنترل سیگنال است.

$$r = (\hat{G}(s) - G(s))u \quad (۲-۲)$$

در شکل (۵-۲) نحوه عملکرد این روش نشان داده شده است. با وجود این که روش مبتنی بر معادلات برابری از لحاظ محاسباتی ساده ترین روش است اما به دلیل این که برای استفاده از این روش پارامترهای مدل، شناخته شده و ثابت فرض می شوند، پس به علت عدم قطعیت های سیستم در معرض عدم صحت مدل هستند. برای غلبه بر این مشکل باید از معادلات برابری مقاوم استفاده کرد. روش معادلات برابری برای تشخیص و جداسازی خطاهای جمع شونده مناسب است [۱۰].

روش معادلات برابری برای تشخیص خطای سنسور مناسب است. زیرا هر سیگنال باقیمانده فقط توسط یک خروجی تحت تاثیر قرار می گیرد.



شکل (۵-۲) تولید باقیمانده براساس معادلات برابری [۲۷].

۳. روش تخمین پارامتر: این روش برای سیستم‌هایی که پارامترهای آن دقیقاً مشخص نیستند به کار می‌رود. این روش برای تشخیص خطاهای ضرب‌شونده بسیار مناسب است [۱۰]. اساس این روش بر مبنای انحراف مقادیر پارامترها از مقادیر نامی آن‌ها است. سیگنال باقیمانده از تفاضل مقدار پارامتر در مدل اصلی با مقدار پارامتر تخمین زده‌شده، براساس مقادیر ورودی-خروجی به دست می‌آید.

۵-۴-۲ مساله مقاوم بودن در تشخیص خطای مبتنی بر مدل

در روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل، داشتن یک مدل از سیستم لازم و ضروری است. ولی به دست آوردن یک مدل دقیق از سیستم کاری مشکل است. حتی اگر مدل دقیق از یک سیستم داشته باشیم، برخی از پارامترها به طور تقریبی در دسترس هستند. از طرفی سیستم‌های واقعی همواره در معرض ورودی‌های ناخواسته به نام اغتشاشات هستند. در نتیجه حتی اگر خطا هم در سیستم وجود نداشته باشد باقیمانده مخالف صفر است و ممکن است برخی از سیگنال‌هایی که ناشی از خطا نیستند را به عنوان خطا تشخیص دهیم. بنابراین در طراحی باید همیشه به دنبال روشی بود که سیگنال باقیمانده فقط به سیگنال خطا حساس باشد و هیچ حساسیتی نسبت به سیگنال‌های دیگر نداشته باشد.

فصل سوم

ساختار رویته‌های تشخیص خطا

۳-۱ مقدمه

روش‌های مبتنی بر رویتگر به صورت بسیار گسترده‌ای برای تولید باقیمانده مورد توجه قرار می‌گیرد. از آنجاییکه رویتگرهای حالت از یک خطای خروجی بین خروجی یک سیستم اندازه‌گیری شده و خروجی یک مدل قابل نامی استفاده می‌کنند، گزینه مناسبی برای تولید باقیمانده می‌باشند.

ایراد اصلی روش‌های مبتنی بر رویتگر، وابستگی آن‌ها به مدل دقیق سیستم می‌باشد [۵].

در ادامه ساختار رویتگرهای لیونبرگر^{۴۱}، رویتگر اغتشاش^{۴۲} و رویتگر ورودی نامعلوم^{۴۳} مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲ رویتگر لیونبرگر

یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان را به صورت زیر در نظر بگیرید.

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

به طوریکه $x \in \mathcal{R}^n$ و $u \in \mathcal{R}^{n_u}$ و $y \in \mathcal{R}^{n_y}$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی و خروجی سیستم می‌باشند. A ، B و C ماتریس‌های مدل فضای حالت سیستم هستند، فرض می‌شود که سیستم رویت‌پذیر باشد [۳۷].

با معلوم بودن ساختار و پارامترهای مدل سیستم، از یک رویتگر حالت برای بازسازی متغیرهای حالت غیرقابل اندازه‌گیری مبتنی بر ورودی و خروجی‌های اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - c\hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (۳-۲)$$

⁴¹Lunberger Observer

⁴²Disturbance Observer

⁴³Unknown Input Observer

که $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ بردار تخمین زده شده‌ی حالت و $L \in \mathcal{R}^{n \times n_y}$ بهره رویتگر است. با تعریف خطای تخمین به صورت $e = x - \hat{x}$ ، معادله دینامیکی خطا به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (3-3)$$

برای اینکه خطای تخمین به صفر میل کند، باید مقدار L را طوری انتخاب کرد که تمامی مقادیر ویژه ماتریس $A - LC$ سمت چپ محور موهومی قرار بگیرد [۳۷].

۳-۳ رویتگر اغتشاش

ابتدا یک سیستم را با اغتشاش ثابت در نظر بگیرید.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d d \\ \dot{d} = 0 \\ y = cx \end{cases} \quad (4-3)$$

سیستم فوق را می‌توان به فرم ماتریسی زیر بیان کرد

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ d \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5-3)$$

فرض کنید

$$z = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix}, \quad A_D = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_D = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_D = [C \quad 0] \quad (6-3)$$

با جایگذاری (۶-۳) در (۵-۳) داریم

$$\begin{cases} \dot{z} = A_D z + B_D u \\ y = C_D z \end{cases} \quad (7-3)$$

یک رویتگر مرتبه کامل به صورت زیر قابل ساخت است.

$$\dot{\hat{z}} = (A_D - L_D C_D) \hat{z} + L_D y + B_D u \quad (۸-۳)$$

که L_D بهره رویتگر می باشد. با طراحی مناسب بهره L_D ، (۸-۳) قادر خواهد بود حالت x و اغتشاش d از سیستم اصلی در رابطه (۴-۳) را تخمین بزند.

حال فرض کنید که اغتشاش به صورت $\dot{d} = M$ که در آن M متناسب با بعد دینامیک های اغتشاش است توصیف می گردد.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d d \\ \dot{d} = Md \\ y = cx \end{cases} \quad (۹-۳)$$

به طور مشابه حالت قبل داریم:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (۱۰-۳)$$

فرض کنید

$$z = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix}, A_{DM} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & M \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_D = [C \quad 0] \quad (۱۱-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۱۰-۳) در رابطه (۱۱-۳) داریم

$$\begin{cases} \dot{z} = A_{DM} z + B_D u \\ y = C_D z \end{cases} \quad (۱۲-۳)$$

یک رویتگر مرتبه کامل به صورت زیر قابل ساخت است.

$$\dot{\hat{z}} = (A_{DM} - L_{DM} C_D) \hat{z} + L_{DM} y + B_D u \quad (۱۳-۳)$$

که L_{DM} بهره رویتگر می‌باشد. با طراحی مناسب بهره L_{DM} ، (۳-۱۳) قادر خواهد بود حالت x و اغتشاش d از سیستم اصلی در (۳-۹) را تخمین بزند. [۳۴].

۳-۴ رویتگر ورودی نامعلوم

رویتگر ورودی نامعلوم یا هر روش تولید باقیمانده مبتنی بر جداسازی اغتشاش مستلزم این است که ماتریس توزیع ورودی نامعلوم شناخته شده باشد، نیازی نیست که ورودی نامعلوم واقعی شناخته شده باشد [۲۰].

برای طراحی یک سیستم خطی نامتغیر با زمان با یک عامل اغتشاش نامعلوم به فرم زیر در نظر می‌گیریم

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) \\ y = Cx \end{cases} \quad (۳-۱۴)$$

به‌طوری‌که $x(t) \in \mathcal{R}^n$ ، $u(t) \in \mathcal{R}^{n_u}$ ، $y(t) \in \mathcal{R}^{n_y}$ و $d(t) \in \mathcal{R}^{n_d}$ به ترتیب بردارهای، حالت، ورودی معلوم، خروجی و تابع اسکالر نامعلوم است که اغتشاش را معرفی می‌کند. ماتریس‌های A ، B ، C و B_d ماتریس‌هایی معلوم با ابعاد مناسب هستند. رویتگر ورودی نامعلوم مرتبه‌ی کامل به فرم زیر بیان می‌گردد

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + TB_u(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (۳-۱۵)$$

به‌طوری‌که $z(t) \in \mathcal{R}^n$ حالت رویتگر ورودی نامعلوم، $\hat{x}(t)$ بردار تخمین زده شده‌ی حالت $x(t)$ است، باید H ، T ، K و F طوری طراحی شوند که اثر اغتشاش را از خطای تخمین حالت که به صورت $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ تعریف می‌شود جدا گردد.

اگر رویتگر ورودی نامعلوم (۱۵-۳) به سیستم (۱۴-۳) اعمال شود، خطای تخمین حالت توسط معادلات زیر توصیف می‌شود

$$e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t) = x(t) - z(t) - Hy(t) = x(t) - z(t) - HCx(t) = (I - HC)x(t) - z(t) \quad (۱۶-۳)$$

و

$$\dot{e}_x(t) = [A - HC - K_1C]e_x + [F - (A - HCA - K_1C)]z(t) + [K_2 - (A - HCA - K_1C)H]y(t) + [T - (I - HC)]Bu(t) + (HC - I)B_d d(t) \quad (۱۷-۳)$$

به‌طوریکه

$$K = K_1 + K_2 \quad (۱۸-۳)$$

تعریف (۱-۳): یک رویتگر به‌عنوان یک رویتگر ورودی نامعلوم برای سیستم توصیف شده با روابط (۳-۳) (۱۴) تعریف می‌شود اگر بردار خطای تخمین حالت آن، صرف‌نظر از حضور عامل نامعلوم در سیستم، به‌صورت مجانبی به صفر نزدیک شود.

برای برآورده شدن شرایط موجود در تعریف باید روابط زیر برقرار باشند

$$(HC - I)E = 0 \quad (۱۹-۳)$$

$$T = I - HC \quad (۲۰-۳)$$

$$F = A - HCA - K_1C \quad (۲۱-۳)$$

$$K_2 = FH \quad (۲۲-۳)$$

سپس خطای تخمین حالت به فرم زیر خواهد بود

$$e_x(t+1) = Fe_x(t) \quad (23-3)$$

از رابطه (۲۳-۳) نتیجه می‌شود که اگر همه مقادیر ویژه F پایدار باشند، $e_x(t)$ به‌طور مجانبی به صفر میل می‌کند، یعنی $\hat{x} \rightarrow x$ میل می‌کند. پس می‌توان نتیجه گرفت که طبق تعریف (۱-۳) معادلات ارائه شده توسط رابطه (۱۵-۳)، معادلات یک رویتگر ورودی نامعلوم برای سیستم (۱۴-۳) خواهد بود [۲۰].

قضیه (۱-۳): شرایط لازم و کافی برای وجود یک رویتگر ورودی نامعلوم (۱۵-۳) برای سیستم تعریف شده در معادله (۱۴-۴) عبارت است از [۵۴]:

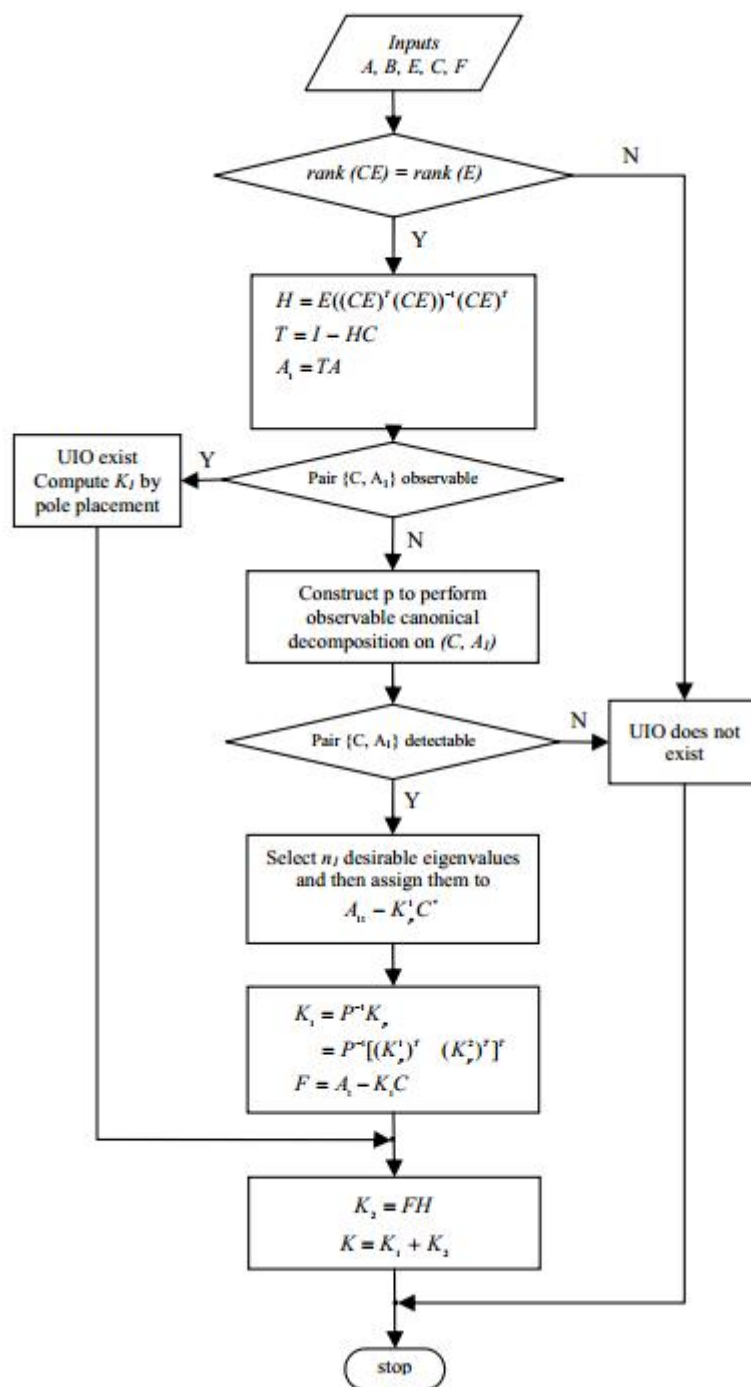
$$rank(CE) = rank(E) \quad ۱.$$

$$زوج (A_1, C) \text{ قابلیت آشکارپذیری داشته باشد به طوریکه:} \quad ۲.$$

$$A_1 = A - E[(CE)^T CE]^{-1} (CE)^T CA \quad (24-3)$$

طبق این فرضیات اگر زوج (A_1, C) رویت‌پذیر باشد، به منظور پایداری ماتریس $F = A_1 - K_1 C$ روش‌های کنترل کلاسیک قابل استفاده هستند.

در شکل (۱-۳) فلوچارت طراحی رویتگر ورودی نامعلوم نشان داده شده است.



شکل (۳-۱) فلوچارت رویتگر ورودی نامعلوم [۵۴].

۳-۵ طراحی رویتگر به روش H_2

سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) + B_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_d d(t) + D_f f(t) \end{cases} \quad (۳-۲۵)$$

با توجه به رابطه (۳-۲۵) سیگنال باقیمانده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱].

$$r(s) = \hat{N}_d(s)d(s) + \hat{N}_f(s)f(s) \quad (۳-۲۶)$$

$$\hat{N}_d(s) = C(sI - A + LC)^{-1}(B_d - LD_d) + D_d \quad (۳-۲۷)$$

$$\hat{N}_f(s) = C(sI - A + LC)^{-1}(B_f - LD_f) + D_f \quad (۳-۲۸)$$

باتوجه به روابط (۳-۲۶) تا (۳-۲۸) باید L طوری طراحی گردد که $\hat{N}_d(s)$ تا حد امکان کوچک باشد، یعنی [۱]:

$$\min_L \|C(sI - A + LC)^{-1}(B_d - LD_d)\|_2 \quad (۳-۲۹)$$

برای یک سیستم پیوسته زمانی نرم H_2 وجود دارد که سیستم اکیدا سره باشد [۱].

قضیه (۳-۲): برای سیستم $C(sI - A + LC)^{-1}(B_d - LD_d)$ فرض کنید [۱]:

۱. زوج (A, C) رویت‌پذیر باشد.

۲. D_d دارای مرتبه کامل سطری باشد با این شرط که $D_d D_d^T = 1$ باشد.

۳. مرتبه ماتریس $\begin{bmatrix} A - j\omega I & B_d \\ C & D_d \end{bmatrix}$ به‌ازای $\omega \in [0, \infty)$ کامل باشد.

آن‌گاه مقدار مینیمم برای

$$\min_L \|C(sI - A + LC)^{-1}(B_d - LD_d)\|_2 = \left(\text{trace}(CXC^T) \right)^{1/2} \quad (۳-۳۰)$$

از رابطه (۳-۳۰) مقدار L مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد

$$L = XC^T + B_d D_d^T \quad (۳-۳۱)$$

مقدار $X \geq 0$ از حل معادله ریکاتی زیر به‌دست می‌آید.

$$(A - B_d D_d^T C)X + X(A - B_d D_d^T C)^T - X C^T C X + B_d B_d^T - B_d D_d^T D_d B_d^T = 0 \quad (32-3)$$

اثبات روابط (31-3) و (32-3) در [55] آمده است.

۳-۶ طراحی رویتگر به روش H_∞

در ابتدا یک سری تعاریف اولیه مورد نیاز برای طراحی بیان می گردد.

قضیه (3-3): فرض کنید $H \in \text{dom}(\text{Ric})$ و $X \in \text{Ric}(H)$ آن گاه [۱]:

۱- X متقارن حقیقی است.

۲- X در معادله ریکاتی زیر صدق می کند

$$A^T X + X A + X R X + Q = 0 \quad (33-3)$$

۳- $A + R X$ پایدار است.

اثبات قضیه (3-3) در [29, 56] ارائه گردیده است.

قضیه (4-3) فرض کنید که H هیچ مقدار ویژه ای روی محور موهومی نداشته باشد و R نیمه معین مثبت یا نیمه معین منفی باشد، آن گاه $H \in \text{dom}(\text{Ric})$ است اگر و تنها اگر (A, R) پایدارپذیر باشد [۱].

اثبات قضیه (4-3) در [29, 56] ارائه گردیده است.

با توجه به قضیه (2-3) می توان نتیجه گرفت که $\gamma > 0$ وجود دارد که [۱]:

$$\|C(sI - A + LC)^{-1}(B_d - LD_d) + D_d\|_\infty < \gamma \quad (34-3)$$

به ازای

$$L = -(XC^T + B_d D_d^T)R^{-1} \quad (35-3)$$

$$R = \gamma^2 I - D_d^T D_d \quad (36-3)$$

که در آن $X \geq 0$ پاسخ معادله ریکاتی زیر است [۱].

$$(A - B_d D_d^T R^{-1} C)X + X(A - B_d D_d^T R^{-1} C)^T - X C^T R^{-1} C X + B_d (1 - D_d^T R^{-1} D_d) B_d^T = 0 \quad (37-3)$$

۷-۳ طراحی رویتگر به روش H_2/H_∞

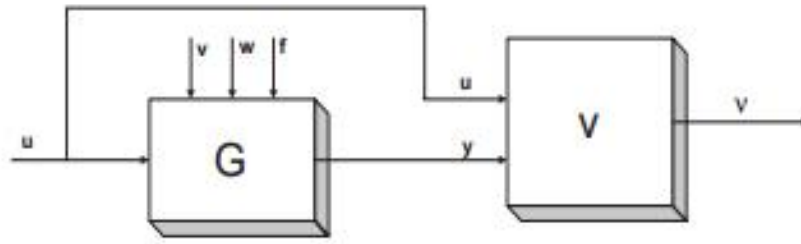
این روش به تضعیف اثر اغتشاش و توزیع می‌پردازد و همانند روش‌های H_2 و H_∞ تاثیری بر سیگنال خطا ندارد.

سیستم خطی متغییر با زمان زیر را در نظر بگیرید.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) + B_w w(t) + B_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_d d(t) + D_w w(t) + D_f f(t) \end{cases} \quad (38-3)$$

در اینجا، $x \in R^n$ حالت است، $u \in R^{n_u}$ و $y \in R^{n_y}$ ورودی‌ها و خروجی‌های شناخته شده‌اند؛ ورودی ناشناس $w \in R^{n_l}$ زمانی که ورودی نامعلوم $d \in R^{n_d}$ به صورت پیش فرض دارای طیف محدود است، سفید (معلوم) در نظر گرفته می‌شود. ورودی ناشناس $f \in R^q$ خطایی ممکن است. با میل کردن f به سمت صفر، سیستم (۳۸-۳) رفتار عادی (بدون خطای) سیستم را بیان می‌کند [۵۷]. همه ماتریس‌های ضرایب در معادله (۹-۴) و (۱۰-۴) ثابت و مشخص فرض شده‌اند.

در شکل (۲-۳) فیلتر تشخیص خطا نمایش داده شده است.



شکل (۳-۲) فیلتر تشخیص خطا [۵۷].

همانطور که در شکل نشان داده شده است، هدف از تولید سیگنال باقیمانده V است. با توجه به شکل خواهیم داشت

$$v = V \begin{pmatrix} u \\ y \end{pmatrix} \quad (۳-۳۹)$$

با پارامتری کردن V به عنوان یک فیلتر از نوع n ام کالمن-لوونبرگر، خواهیم داشت:

$$V: \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - Du(t) - C\hat{x}(t)) \\ v(t) = -C\hat{x}(t) + y(t) - Du(t) \end{cases} \quad (۳-۴۰)$$

از آنجاییکه، برای ساختن فیلتر V در (۳-۴۰)، تنها به محاسبه بهره K نیاز داریم. با استفاده از (۳-۳۸) و (۳-۴۰)، خواهیم داشت:

$$T: \begin{cases} \dot{e} = \Lambda e(t) + B_d d(t) + B_w w(t) + B_f f(t) \\ v = C e(t) + D_w w(t) + D f(t) \end{cases} \quad (۳-۴۱)$$

که در آن $e = x - \hat{x}$ و $\Lambda = A - KC$ ، $B_d = B_d$ ، $B_w = B_w - KD_3$ و $B_f = B_f - KD_f$ است.

توجه داشته باشید که باقی مانده V کاملاً مستقل از ورودی u است. به علاوه پایداری داخلی V نیازمند این است که K به مجموعه $\Omega = \{K: \Lambda \text{ is Hurwitz}\}$ تعلق داشته باشد. اگر جفت (A, C) ، Ω تهی نیست. با استفاده از رابطه (۳-۴۱) سیگنال باقیمانده به شکل زیر تعریف می شود.

$$v = \bar{v} + v_0 \quad (۳-۴۲)$$

که در رابطه (۳-۴۲)

$$\bar{v} = T_1 e_0 + T_2 d + T_3 w + T_4 f \quad (۳-۴۳)$$

$$\begin{aligned}
T_1 &:= (\Lambda, I_n, C, 0) \\
T_2 &:= (\Lambda, \beta_2, C, 0) \\
T_3 &:= (\Lambda, \beta_3, C, 0) \\
T_4 &:= (\Lambda, \beta_4, C, D_f)
\end{aligned} \tag{۴۴-۳}$$

نکته حائز اهمیت دیگر این است که v_0 در رابطه (۴۲-۳) مستقل از بهره K است و تنها به w علاوه بر این، ایجاب اینکه $K \in \Omega$ باشد نیز نشان می‌دهد که $T_1 \cdots T_2 \in \mathcal{RH}_\infty$ است. همانگونه که قبلاً نیز ذکر گردید، باقیمانده v برای تشخیص خطاست. بنابراین می‌شود گفت که v به ورودی‌های نامشخص و شرایط اولیه حساس نیست. واضح است که تاثیر شرایط اولیه غیر صفر به سمت صفر می‌روند. زمانی که T_1 اکیداسره بوده و متعلق به فضای $\mathcal{RH}_\infty$ است. بنابراین فقط باید ماتریس‌های d و w را به v تقلیل دهیم. این مساله بهینه سازی زیر را پدید می‌آورد. زمانی که خطایی وجود نداشته باشد، بهره K از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\min_{K \in \Omega} \sup_{\tilde{w} \in \omega} \|T_2 d + T_3 w\| \rho^2 \tag{۴۵-۳}$$

که در آن $\tilde{w} = (d^T w^T)^T$ و $\omega \subseteq \bar{\rho} \times \bar{S}$.

لم زیر نشان می‌دهد زمانی که v و w هر دو به سیستم اعمال شوند و مستقل از هم هستند، بدترین حالت زمانی رخ می‌دهد که $\|T_2 d + T_3 w\|$ مخلوطی از نرم‌های H_2 و H_∞ می‌باشد.

با استفاده از این لم، به راحتی می‌توان دید که اگر ما از d صرف نظر کنیم، مساله بهینه سازی (۳-۳) (۴۳) به مساله فیلتر H_2 کاهش می‌یابد. به طور مشابه، اگر با صرف نظر از w ، مساله به طراحی فیلتر H_∞ خلاصه می‌شود. با استفاده از لم (۳-۱) زیر می‌توان فیلتر H_2/H_∞ را طراحی کرد.

لم ۳-۱: فرض کنید $\tilde{w} \in \bar{\rho} \times \bar{S}$ و d و w مستقل اند، $K \in \Omega$ بنابراین:

$$\sup_{\tilde{w} \in \omega} \|T_2 d + T_3 w\| \rho^2 = \|T_2\|_\infty^2 + \|T_3\|_3^2 \tag{۴۶-۳}$$

با استفاده از این لم ، به راحتی میتوان دید که اگر ما از d صرف نظر کنیم ، مساله بهینه سازی (۳-۳) (۴۵) به مساله طراحی فیلتر H_2 تقلیل خواهد یافت. به طور مشابه ، اگر از ω صرف نظر کنیم ، مساله به طراحی فیلتر H_∞ تقلیل می یابد. با کمک از لم (۳-۱) و رابطه (۳-۴۵) مسایه ترکیبی H_2/H_∞ به فرم زیر بیان می شود.

$$\min_{K \in \Omega} \{ \|T_3\|_2^2 : \|T_2\|_\infty < \gamma \} \quad (۳-۴۷)$$

که در آن $\gamma > 0$ داده شده است.

با داشتن رابطه های (۳-۴۶) و (۳-۴۷) با استفاده از روابط [۵۷] می توان نشان داد که با حل LMI های زیر می توان مقدار K را طراحی کرد.

$$\begin{pmatrix} z & (B_3 - KD_3)^T Q \\ Q(B_3 - KD_3) & Q \end{pmatrix} \geq 0$$

$$\begin{pmatrix} (A - KC)^T Q + Q(A - KC) & QB_2 & C^T \\ B_2^T Q & -\gamma^2 I & 0 \\ C & 0 & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (۳-۴۸)$$

$$Z = Z^T \geq 0, \quad Q = Q^T > 0.$$

توجه داشته باشید که ماتریس های از نظر Z, Q, K غیر خطی اند. با در نظر گرفتن $K = Q^{-1}U$ و با محاسبات جبری ماتریسی به معادلات LMI زیر به دست می آید.

$$\begin{pmatrix} z & B_3^T Q - D_3^T U^T \\ Q(B_3 - UD_3) & Q \end{pmatrix} \geq 0$$

$$\begin{pmatrix} A^T Q + QA - C^T U^T - UC & QB_2 & C^T \\ B_2^T Q & -\gamma^2 I & 0 \\ C & 0 & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (۳-۴۹)$$

$$Z = Z^T \geq 0, \quad Q = Q^T > 0.$$

الگوریتم طراحی فیلتر H_2/H_∞ به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

مرحله ۱: به γ مقدار اولیه بزرگتر از صفر داده شود.

مرحله ۲: از نتایج استاندارد در نظریه فیلترینگ H_∞ برای تشخیص اینکه آیا K ای وجود دارد که $\|T_2\|_\infty < \gamma$ اگر این قید امکان پذیر نباشد، γ را تا حدی که مساله بهینه سازی H_∞ امکان پذیر باشد، در غیراین صورت ادامه می دهیم.

مرحله ۳: حل معادلات LMI را در مساله (۳-۴۹) برای بدست آوردن U, Q و محاسبه بهره K با استفاده از رابطه $K = Q^{-1}U$ و تولید سیگنال باقیمانده v از رابطه (۳-۴۱).

۳-۸ طراحی رویتگر به روش H_-/H_∞

روش های ارائه شده در بخش های (۳-۵)، (۳-۶) و (۳-۷) به تضعیف اثر اغتشاش روی سیگنال باقیمانده می پرداختند. در این بخش روشی معرفی خواهد شد که به طور همزمان اثر اغتشاش روی باقیمانده را کاهش و اثر خطا روی باقیمانده را افزایش دهد. برای تحقق این امر اثر خطا بر روی باقیمانده به وسیله H_- ماکزیمم و اثر اغتشاش بر روی باقیمانده به وسیله H_∞ مینیمم می گردد [۱].

در فصل بعدی به طور کامل در مورد این روش طراحی بحث خواهد شد و اثبات های لازم ارایه می گردد.

فصل چہارم

طراحی رویتگر H_-/H_∞

۴-۱ مقدمه

در این فصل یک راه حل بهینه H_-/H_∞ برای مساله تشخیص خطا در سیستم‌های خطی غیر متغیر با زمان ارائه شده است. در ابتدا مفاهیم اولیه لازم برای طراحی H_-/H_∞ تعریف می‌گردد و سپس یک شاخص عملکرد براساس روش H_-/H_∞ به صورت فرموله شده برای کم کردن اثر اغتشاش و افزایش اثر خطا در سیگنال باقیمانده ارائه می‌شود. سپس یک فیلتر بهینه برای حل مساله خطا از روش H_-/H_∞ با حل مساله LMI بهینه شده طراحی می‌گردد.

۴-۲ تعاریف اولیه

ابعاد ماتریس‌های حقیقی (مختلط) با نماد $R^{n \times m} (C^{n \times m})$ نشان داده می‌شود. برای $A \in C^{n \times m}$ نماد A^T و A' به ترتیب نمادهای ترانپوز و ترانپوز مزدوج مختلط است. برای $A = A' \in C^{n \times n}$ و $A \geq 0$ اشاره به این دارد که A نیمه مثبت معین است. $A = A' \in C^{n \times n}$ نماد $\bar{\lambda}(A)$ بزرگ‌ترین و $\underline{\lambda}(A)$ کوچک‌ترین مقدار ویژه است. $A \in C^{n \times n}$ بزرگ‌ترین و $\underline{\sigma}(A)$ کوچک‌ترین مقدار تکین است. ماتریس واحد $n \times n$ با I_n و ماتریس تهی $n \times m$ با $0_{n \times m}$ نمایش داده می‌شود.

$R(s)^{m \times p}$ نشان دهنده مجموعه‌ای از همه ماتریس‌های تابع حقیقی گویا $m \times p$ از s است. $\mathcal{L}_\infty^{m \times p}$ اشاره به فضای تابع ماتریسی $m \times p$ با ورودی محدود بر روی محور موهومی گسترده شده jR_e دارد. زیر فضای $\mathcal{H}_\infty^{m \times p} \subset \mathcal{L}_\infty^{m \times p}$ نشان دهنده ماتریس تابع تحلیلی در ناحیه بسته نیمه راست از صفحه مختلط است. پیشوند R نشان دهنده یک تابع حقیقی گویا است، بنابراین $\mathcal{RH}_\infty^{m \times p}$ نشان دهنده مجموعه‌ای از همه $m \times p$ ماتریس تابع حقیقی گویا پایدار از s است.

برای $G(s) \in \mathcal{RH}_\infty^{m \times p}$ ، تعریف می‌شود $\tilde{G}(s) = G(-s)^T$ که ترانپوز مزدوج مختلط پارامیتر $G(s)$ از $G(s)$ است. یک ماتریس مربعی تابع $G(s) \in \mathcal{RH}_\infty^{m \times p}$ داخلی نامیده می‌شود اگر $\tilde{G}(s)G(s) = I_m$ باشد.

۴-۲-۱ ماتریس انتقال

اگر تحقق فضای حالت تابع تبدیل $G(s)$ به فرم زیر بیان گردد

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

به طوریکه $G(s) = D + C(SI - A)^{-1}B$ آن گاه اگر D مخالف صفر باشد برای معکوس آن داریم

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} A - BD^{-1}C & -BD^{-1} \\ D^{-1}C & D^{-1} \end{bmatrix} \quad (۲-۴)$$

۴-۲-۲ نرم ها

برای $G \in \mathcal{RH}_\infty$ نرم بی نهایت به فرم زیر تعریف می گردد:

و همچنین H_- نیز برای برای G در همه فرکانس ها به فرم زیر تعریف می گردد

$$\|G\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathcal{R}} \overline{\sigma}(G(j\omega)) \quad (۳-۴)$$

$$\|G\|_- = \sup_{\omega \in \mathcal{R}} \underline{\sigma}(G(j\omega)) \quad (۴-۴)$$

۴-۲-۳ معادله ریکاتی

فرض کنید Q ، A و R ماتریس های حقیقی با ابعاد $n \times n$ به طوری که Q و R ماتریس های متقارن می باشند آن گاه معادله جبری ریکاتی در حالت پیوسته به فرم زیر خواهد بود

$$A^T X + XA + XRX + Q = 0 \quad (۵-۴)$$

ماتریس متقارن X جواب این معادله خواهد بود به شرطی که یک جواب پایدار برای $A+RX$ باشد.

۴-۲-۴ فاکتور اول چپ

فرض کنید $P(s)$ تحقق ماتریس انتقال سری یک فضای حالت باشد آنگاه فاکتور اول چپ، این گونه تعریف می گردد

$$P = M^{-1}N \quad (۶-۴)$$

که $M, N \in \mathcal{RH}_\infty$ هستند و فاکتور اول چپ می‌باشند آن‌گاه داریم

$$P = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (۷-۴)$$

که تحقق رویت‌پذیر P است و L نیز یک ماتریس با ابعاد مناسب است به‌طوری‌که $A+LC$ پایدار باشد
آن‌گاه فاکتور اول چپ آن از رابطه زیر بدست می‌آید

$$[M \quad N] = \left[\begin{array}{c|c} A+LC & B+LD \\ \hline C & D \end{array} \right] \quad (۸-۴)$$

۳-۴ فرموله کردن مساله

معادله حالت مربوط به سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان در حالت پیوسته، با در نظر گرفتن اغتشاش و خطا به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود [۵۸].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) + B_f f(t) \quad (۹-۴)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_d d(t) + D_f f(t) \quad (۱۰-۴)$$

به‌طوری‌که $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $y(t) \in R^n$ خروجی قابل اندازه‌گیری، $d(t) \in R^{n_d}$ نشان‌دهنده بردار اغتشاش و $f(t) \in R^{n_f}$ نشان‌دهنده بردار خطا می‌باشد. $B_f \in R^{n \times n_f}$ و $D_f \in R^{n_y \times n_f}$ از اجزا و ساختار توزیع ماتریس خطا هستند. در حالی که $B_d \in R^{n \times n_d}$ و $D_d \in R^{n_y \times n_d}$ مربوط به ماتریس‌های توزیع اغتشاش می‌باشند [۲۹]. همه ماتریس‌های ضرایب در معادله (۹-۴) و (۱۰-۴) ثابت و مشخص فرض شده‌اند. با گرفتن تبدیل لاپلاس از روابط (۹-۴) و (۱۰-۴) رفتار ورودی خروجی سیستم به‌صورت زیر توصیف می‌شود.

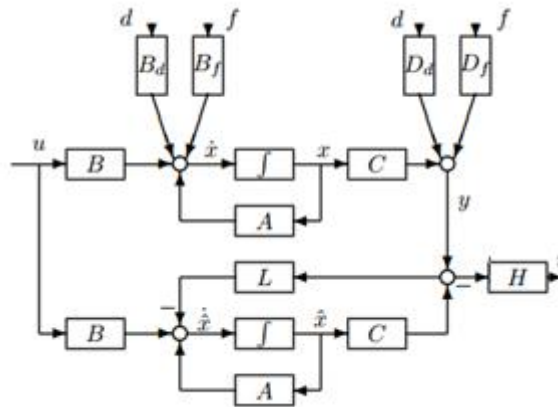
$$y(s) = G(s)u(s) + G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s) \quad (۱۱-۴)$$

$$n_y \begin{bmatrix} n_u & n_d & n_f \\ G(s) & G_d(s) & G_f(s) \end{bmatrix} s \begin{bmatrix} A & B & B_d & B_f \\ C & 0 & D_d & D_f \end{bmatrix} \quad (۱۲-۴)$$

که ماتریس‌های انتقال فرآیند، اغتشاش و خطا هستند.

هدف از ایجاد سیگنال باقیمانده در یک سیستم تشخیص خطا نشان دادن عدم تطابق بین سیستم و مدل ریاضی و پاسخ به خطا و اغتشاش می‌باشد.

یک رویکرد مبتنی بر مشاهده گر استاندارد، برای تولید باقیمانده، استفاده از سیستم جداسازی دینامیک‌های سیگنال می‌باشد [۳۳، ۲۹]. بلوک دیاگرام یک سیستم تشخیص خطا مبتنی بر مشاهده گر در شکل (۱-۴) نشان داده شده است. اینجا $\hat{x}$ حالت تخمین زده شده است. مشاهده گر و بهره باقیمانده $L \in R^{n \times n_y}$ و $H \in R^{n_f \times n_y}$ که برای رسیدن به تشخیص خطا باید تنظیم شوند.



شکل (۱-۴) بلوک دیاگرام سیستم تشخیص خطا [۵۸].

که سیستم فوق طرح یک فیلتر است که با معادلات زیر نمایش داده می‌شود.

$$r(s) = F(s)[G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s)] \quad (۱۳-۴)$$

$$F(s) \triangleq \begin{bmatrix} A + LC & L \\ HC & H \end{bmatrix} \quad (۱۴-۴)$$

از دو پارامتر L و H برای ایجاد پایداری در سیگنال باقیمانده و بهبود عملکرد فیلتر استفاده می‌گردد. فرم حلقه بسته دینامیک باقیمانده به شکل زیر می‌باشد.

$$r(s) = T_{rf}(s)f(s) + T_{rd}(s)d(s) \quad (۱۵-۴)$$

$$n_f \begin{bmatrix} n_d & n_f \\ T_{rd}(s) & T_{rf}(s) \end{bmatrix} = F(s)[G_d(s) \quad G_f(s)] \triangleq \begin{bmatrix} A + LC & B_d + LD_d & B_f + LD_f \\ HC & HD_d & HD_f \end{bmatrix} \quad (۱۶-۴)$$

که به ترتیب، ماتریس انتقال خطا به باقیمانده و اغتشاش به باقیمانده می‌باشند.

با این مقدمات مساله موردنظر را می‌توان به شرح زیر فرمول‌بندی کرد.

مساله ۴-۱: $G(s) \in \mathcal{RH}_\infty^{n_y \times n_u}$, $G_d(s) \in \mathcal{RH}_\infty^{n_y \times n_d}$, $G_f(s) \in \mathcal{RH}_\infty^{n_y \times n_f}$ تحقق فضای حالت

داده شده در (۴-۹) و (۴-۱۰) می باشند. فرض کنید که:

فرض (۴-۱): جفت (A, C) رویت پذیر باشد. (تبصره (۴-۲))

فرض (۴-۲): $G_f(s)$ صفری روی محور موهومی نداشته باشد. (تبصره (۴-۳))

فرض (۴-۳): $rank(c) = n_y$ باشد. (تبصره (۴-۴))

فرض (۴-۴): $n_y < n_d$ باشد. (تبصره (۴-۵))

فرض (۴-۵): $n_y \geq n_f$ باشد. (تبصره (۴-۶))

و یافتن

$$\gamma_o = \min_{\|FG_f\|_{-1} \geq 1} \|FG_d\|_\infty \quad (۴-۱۷)$$

$$F(s) \triangleq \begin{bmatrix} A + LC & L \\ HC & H \end{bmatrix} \in \mathcal{RH}_\infty^{n_f \times n_y} \quad (۴-۱۸)$$

که $F(s) \triangleq (A + LC, L, HC, H) \in \mathcal{RH}_\infty^{n_f \times n_y}$ یک فیلتر بهینه است.

تبصره (۴-۱): مساله ۴-۱ می خواهد نشان دهد که باید $\bar{\sigma}(T_{rd}(j\omega))$ کوچک تر یا مساوی

$\gamma_o \underline{\sigma}(T_{rf}(j\omega))$ به ازای تمام مقادیر $\omega \in \mathcal{R}$ باشد. این فرض نیاز است تا ما از عدم حساسیت به

اغتشاش و حساس بودن به خطا اطمینان حاصل کنیم [۳۷]. زیرا

$$\|T_{rf}^{-1}T_{rd}\|_\infty \leq \|T_{rf}^{-1}\|_\infty \|T_{rd}\|_\infty = \|T_{rd}\|_\infty / \|T_{rf}\|_- \quad (۴-۱۹)$$

سپس

$$\gamma_o \geq \min \left\{ \|T_{rf}^{-1}T_{rd}\|_\infty : A + LC \text{ is stable} \right\} =: \gamma_1 \quad (۴-۲۰)$$

رابطه فوق این مطلب را می رساند که γ_1 حد پایین γ_o است، که موجب طرح مساله زیر می شود:

مساله (۴-۲) تمام متغیرها و پیش فرض های مساله ۴-۱ برای یک $\gamma > 0$ اگر یک L و H وجود

داشته باشد به طوری که $A+LC$ پایدار باشد و

$$\|T_{rf}^{-1}T_{rd}\|_\infty < \gamma \quad (۴-۲۱)$$

تبصره (۲-۴): فرض (۱-۴) لازم است تا تضمین داشته باشیم حداقل یک L وجود دارد به طوری که $A+LC$ پایدار باشد.

تبصره (۳-۴): فرض اینکه صفرهای $G_f(s)$ روی محور موهومی نباشد به این علت ضروری است که $0 < \|FG_f\|_-$ و $F(s)$ پایدار باشد. توجه داشته باشید فرض برای دلالت دارد $D_f = G_f(\infty)$ ، که دارای رتبه کامل ستونی باشد.

تبصره (۴-۴): اگر $rank(C) < n_y$ با توجه به رابطه (۱۶-۴) می توان C و H را به صورت $C = [C_1^T \ 0]^T$ و $H = [H_1 \ 0]$ نشان داد. تجزیه H ناشی از تجزیه C است. این مساله بیان می کند که کلیت فرض $rank(c) = n_y$ برقرار است.

تبصره (۵-۴): $n_y < n_d$ به این معنی است که همه سیگنال های قابل اندازه گیری در خروجی، ممکن است توسط همه یا بعضی از سیگنال های اغتشاش و نویز تحت تاثیر قرار گیرند، زیرا که در سیستم های عملی اندازه گیری بی عیب و نقص غیرممکن است و از طرفی دیگر فرض استقلال نویزهای قابل اندازه گیری نیز امری معقول است.

تبصره (۶-۴): در این مورد که $n_y \geq n_f$ ، سپس با در نظر گرفتن فرض های (۱-۴) و (۲-۴) با تئوری ۳۲-۱۳ در [۳۵] حاکی از این است که $G_f(s) = \hat{G}_f(s)G_i(s)$ به طوری که $\hat{G}_f(s) \in \mathcal{RL}_{\infty}^{n_y \times n_y}$ و $G_i(s) \in \mathcal{RL}_{\infty}^{n_y \times n_f}$ به طوری که $G_i(s)G_i^{\sim}(s) = I_{n_y}$ به علاوه $\hat{G}_f(s)$ می تواند شبیه ماتریس های A و C به عنوان $G_f(s)$ انتخاب شود. بنابراین می توان $G_f(s)$ به جای $\hat{G}_f(s)$ قرار دهیم زیرا $\|FG_f\|_- = \|F\hat{G}_f\|_-$ و $\|F\hat{G}_fG_i\|_- = \|F\hat{G}_f\|_-$ بنابراین می توان $n_f = n_y$ قرار داد.

نمونه های مختلف مساله ۱-۴ در [۳۶] اشاره شده است (نرم H_{∞} جای H_{∞} استفاده می شود.) و [۳۸] از H_2 استفاده کرده است. مساله ۱-۴ در [۳۹] که در آن ترکیب خطی / درجه دوم ماتریس نابرابری مبتنی بر راه حل بهینه در نظر گرفته شده است و در [۱۴] که با استفاده از حل نامعادلات ماتریس خطی و یک ماتریس معین لیاپانوف P یک فرمول $\|FG_f\|_- > \beta$ و برای $\|FG_d\|_{\infty} > \gamma$ به دست

آمده است. همچنین این استدلال در [۳۹-۴۱] با استفاده از نرم H_- در تابع هزینه، ممکن است در یک فیلتر FDI که در برابر عدم قطعیت فرآیند، قوی تر شود. با این حال، این راه حل بهینه تر از روش-های معمول در روش های طراحی LMI بر اساس چند هدف است، همان ماتریس لیاپانوف P برای هر دو LMI استفاده می شود. در این مقاله یک راه حل کامل بهینه برای این مشکل در نظر گرفته شده است.

۴-۴ اثبات ریاضی

در این بخش به دنبال فرمولی هستیم که محدودیت ها را با موفقیت حذف کند. که این مهم به کمک روش LMI حاصل می شود.

بعد از ارائه تعریف های لازم در بخش های قبل فرمولی برای حذف محدودیت های پایداری $F(s)$ ارائه می گردد. اگر $\mathcal{RL}_{\infty}^{n_f \times n_y} F(s)$ مینیمم شود، همیشه می توان یک فاکتور اول سمت چپ $F(s) = M^{-1}(s)\tilde{F}(s)$ به طوری که $M(s) \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ ، $\tilde{F}(s) \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ تعریف کرد. مشکل اصلی اثبات در این مورد این است که تحقق $F(s)$ رویت پذیر نیست.

لم ۴-۱) همه متغیرهای تعریف شده در مساله ۴-۱ را داریم

$$\gamma_0 := \min_{\|\tilde{F}G_d\|_{\infty} \geq 1} \|\tilde{F}G_d\|_{\infty} = \min_{\|FG_d\|_{\infty} \geq 1} \|FG_d\|_{\infty} =: \gamma \quad (5-22)$$

که در آن $\tilde{F}(s) \in \left[\frac{A+\tilde{L}C}{\tilde{H}C} \left| \frac{\tilde{L}}{\tilde{H}} \right| \right] \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ و $F(s) \in \left[\frac{A+LC}{HC} \left| \frac{L}{H} \right| \right] \in \mathcal{RL}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ است.

اثبات: توجه داشته باشید که $\gamma_0 \geq \gamma$ است. تا زمانی که $\mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y} \subset \mathcal{RL}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ باید $F(s) \in (A +$

$LC, L, HC, H) \in \mathcal{RL}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ سمت راست معادله (۵-۲۲) مینیمم باشد.

برای اثبات $\gamma_0 = \gamma$ ساختار $\tilde{F}(s) \in (A + \tilde{L}C, \tilde{L}, \tilde{H}C, \tilde{H}) \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ به طوری که $\|\tilde{F}G_d\|_{\infty} \geq$

1 و $\|\tilde{F}G_d\|_{\infty} = \gamma$ را در نظر می گیریم.

(۱) فرض کنید که زوج $(A+LC, HC)$ رویت پذیر باشد پس از قضیه ۱۳،۱۴ در [۴۲] پیروی می-

کند. که بیان می کند یک فاکتور اول سمت چپ وجود دارد که $F(s) = M^{-1}(s)\tilde{F}(s)$ به طوری که

$M(s) \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ داخلی است و $\tilde{F}(s) \in \mathcal{RH}_{\infty}^{n_f \times n_y}$ به طوری که:

$$[M(s) \quad \tilde{F}(s)]_s^{\infty} = \left[\frac{A + LC + L_0 HC}{HC} \left| \frac{L_0}{I_{inf}} \frac{L + L_0 H}{H} \right| \right] = \left[\frac{A + \tilde{L}C}{HC} \left| \frac{L_0}{I_{nf}} \frac{\tilde{L}}{H} \right| \right]$$

به طوری که $\tilde{L} = L + L_0 H$ و $L_0 = -XC^T H^T$ که $X = X^T \in \mathcal{R}^{n \times n}$ یک جواب پایدار برای حل

معادله ریکاتی زیر است.

$$(A + LC)X + X(A + LC)^T - XC^T H^T H C X = 0 \quad (۲۳-۴)$$

سپس $\|\tilde{F}G_d\|_{\infty} = \|MFG_d\|_{\infty} = \gamma$ و $\|\tilde{F}G_f\|_{-} = \|MFG_f\|_{-} \geq 1$ زیرا که $M(s)$ داخلی است.

بنابراین $\gamma_0 = \gamma$ است.

(۲) فرض کنید که زوج $(A+LC, HC)$ رویت پذیر نباشد. لازم است که یک شبه ماتریس انتقال بر

روی داده ها تعریف کرد.

$$F(s)_s^{\infty} = \left[\frac{A+LC}{HC} \left| \frac{L}{H} \right| \right]_s^{\infty} = \left[\frac{A_{11}+L_1C_1}{HC_1} \frac{A_{12}+L_1C_2}{HC_2} \left| \frac{L_1}{L_2} \frac{L}{H} \right| \right] \quad (۲۴-۴)$$

که $A_{11} + L_1 C_1$ ناپایدار است (تمامی قطب های آن در نیمه سمت راست صفحه قرار دارند). زوج

$(A_{22} + L_2 C_2, HC_2)$ رویت پذیرند. $HC_1 = 0$ و $A_{21} + L_2 C_1 = 0$ هستند. تجزیه A و C مربوط به

تحقق $F(s)$ است. باید ثابت شود که زوج (A_{11}, C_1) رویت پذیر هستند زیرا که فرض شده است که زوج

(A, C) رویت پذیر هستند. در زیر

$$\begin{bmatrix} A_{11} - sI & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} - sI \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix}$$

به ازای همه s ها به طوری که $s + \bar{s} > 0$ دارای رتبه کامل ستونی باشد. با استفاده از این واقعیت که

$A_{21} = -L_2 C_1$ ، در زیر آمده است

$$\begin{bmatrix} A_{11} - sI & A_{12} \\ 0 & A_{22} + L_2 C_2 - sI \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & L_2 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} - sI & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} - sI \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad (۲۴-۴)$$

به‌ازای همه s ها به‌طوری‌که $s + \bar{s} > 0$ دارای رتبه کامل ستونی است. بنابراین زوج (A_{11}, C_1)

رویت‌پذیر است. که $\tilde{L}_1$ وجود دارد به‌طوری‌که $A_{11} + \tilde{L}_1 C_1$ پایدار باشد. با تعریف $\tilde{F}(s) \triangleq (A +$

$$\tilde{L} = [\tilde{L}_1^T \quad L_2^T]^T \text{ که به‌طوری‌که } \tilde{L}C, \tilde{L}, HC, H)$$

پس $\tilde{F}(s) \triangleq \begin{bmatrix} A_{11} + \tilde{L}_1 C_1 & A_{12} + \tilde{L}_1 C_2 \\ 0 & A_{22} + L_2 C_2 \\ 0 & HC_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{L}_1 \\ L_2 \\ H \end{bmatrix}$ رویت‌پذیر است. هرچند با حذف بخش نامینیمال از تحقق

$F(s)$ و $\tilde{F}(s)$ به‌دست می‌آید $\tilde{F}(s) = F(s)$ پس $\|\tilde{F}G_d\|_\infty = \gamma$ و $\|\tilde{F}G_f\|_- \geq 1$. بنابراین از بخش

(۱) $\gamma_0 = \gamma$ حاصل می‌شود.

نتیجه بعدی نشان می‌دهد که می‌توان تمام $F(s)$ (نه الزاما پایدار) را به معکوس چپ $G_f(s)$ محدود کرد.

لم (۲-۴): با توجه به متغیرهای مساله (۱-۴)

$$\gamma_0 := \min_{\|\tilde{F}G_f\|_- \geq 1} \|\tilde{F}G_d\|_\infty = \min_{F(s)G_f(s)=I_{n_f}} \|FG_d\|_\infty =: \gamma \quad (۲۵-۴)$$

که در آن $\tilde{F}(s) \triangleq \begin{bmatrix} A + \tilde{L}C \\ \tilde{H}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{L} \\ \tilde{H} \end{bmatrix} \in \mathcal{RL}_\infty^{n_f \times n_y}$ و $F(s) \triangleq \begin{bmatrix} A + LC \\ HC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ H \end{bmatrix} \in \mathcal{RL}_\infty^{n_f \times n_y}$ است.

اثبات: توجه داشته‌باشید که $\gamma_0 \leq \gamma$ زیرا $\|I_{n_f}\|_- \geq 1$ است. باید سمت چپ معادله (۲۵-۴)

$\|Q\|_- \geq 1$ بنابراین $Q(s) = \tilde{F}(s)G_f(s)$ مینیمم باشد و تعریف می‌کنیم $\tilde{F}(s) \triangleq (A + \tilde{L}C, \tilde{L}, \tilde{H}C, \tilde{H})$

و 1 و $\|\tilde{F}G_d\|_\infty = \gamma_0$ سپس $Q^{-1}(s) = \mathcal{RL}_\infty^{n_f \times n_f}$ و $\|Q^{-1}\|_\infty \leq 1$. در نتیجه $F(s) =$
 $Q^{-1}\tilde{F}(s) \in \mathcal{RL}_\infty^{n_f \times n_f}$ می‌شود.

با به‌کارگیری فضای حالت $F(s) \triangleq (A + LC, LC, HC, H)$ به‌طوری‌که $L = \tilde{L} -$

$$H = (\tilde{H}D_f)^{-1}\tilde{H} \text{ و } (B_f + \tilde{L}D_f)(\tilde{H}D_f)^{-1}\tilde{H}$$

حالا داریم $\|FG_d\|_\infty = \|Q^{-1}\tilde{F}G_d\|_\infty \leq \|\tilde{F}G_d\|_\infty = \gamma_0$ زیرا $\|Q^{-1}\|_\infty \leq 1$. این اثبات نشان می‌-

دهد که همزمان $\gamma_0 \leq \gamma$ و $\gamma_0 \geq \gamma$ است یعنی $\gamma_0 = \gamma$ می‌باشد.

با استفاده از عبارات $F(s)G_d(s)$ و $F(s)G_f(s)$ در (۷) با اندکی تغییر در نمادها به طور واضح وابستگی بین L و H نمایان می شود. لم (۴-۲) ادعا می کند که

$$\gamma_0 = \min_{L \in \mathcal{R}^{n \times n_y}, H \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y}} \left\| \left[\frac{A+LC}{HC} \middle| \frac{B_d+LD_d}{HD_d} \right] \right\|_{\infty} \quad (26-4)$$

$$\left[\frac{A+LC}{HC} \middle| \frac{B_f+LD_f}{HD_f} \right] \equiv I_{n_f}$$

با اعمال محدودیت ها به دست می آید

$$F(s)G_f(s) \stackrel{s}{=} \left[\frac{A+LC}{HC} \middle| \frac{B_f+LD_f}{HD_f} \right] \equiv I_{n_f} \quad (27-4)$$

تمام مجموعه های L و H به هم ربط داده شده اند به طوری که $F(s)G_f(s) \equiv I_{n_f}$. به طور واضح نشان داده شد که نیاز است $HD_f = I_{n_f}$ باشد. در ادامه نشان داده خواهد شد که بدون از دست دادن کلیت، ممکن است L محدود شود به طوری که $B_f + LD_f = 0$ باشد.

لم (۴-۳) با توجه به متغیرهای مساله ۴-۱:

$$\gamma_0 = \min_{\tilde{L} \in \mathcal{R}^{n \times n_y}, \tilde{H} \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y}} \left\| \left[\frac{A+\tilde{L}C}{\tilde{H}C} \middle| \frac{B_d+\tilde{L}D_d}{\tilde{H}D_d} \right] \right\|_{\infty} =$$

$$\left[\frac{A+\tilde{L}C}{\tilde{H}C} \middle| \frac{B_f+\tilde{L}D_f}{\tilde{H}D_f} \right] \equiv I_{n_f}$$

$$\min_{\substack{L \in \mathcal{R}^{n \times n_y}, H \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y} \\ B_f+LD_f=0, HD_f=I_{n_f}}} \left\| \left[\frac{A+LC}{HC} \middle| \frac{B_d+LD_d}{HD_d} \right] \right\|_{\infty} =: \gamma \quad (28-4)$$

اثبات: توجه داشته باشید که استدلال اول درست قبل از لم نشان می دهد که $\gamma_0 \leq \gamma$ است. با جایگذاری $\tilde{L} \in \mathcal{R}^{n \times n_y}$ و $\tilde{H} \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y}$ رابطه (۴-۲۸) بهینه خواهد بود. آنگاه $\tilde{H}D_f = I_{n_f}$ است. فرض کنید زوج $(A + \tilde{L}C, \tilde{H}C)$ رویت پذیر است. محدودیت در (۴-۲۸) اشاره به $B_f + \tilde{L}D_f = 0$ دارد. پس فرض کنید که زوج $(A + \tilde{L}C, \tilde{H}C)$ رویت پذیر نیستند. سپس یک شبه ماتریس انتقال معرفی می شود.

$$\left[\frac{A + \tilde{L}C}{\tilde{H}C} \middle| \frac{B_f + \tilde{L}D_f}{\tilde{H}D_f} \right] = \left[\begin{array}{cc|c} A_{11} + \tilde{L}_1 C_1 & A_{12} + \tilde{L}_1 C_2 & B_{f1} + \tilde{L}_1 D_f \\ 0 & A_{22} + \tilde{L}_2 C_2 & B_{f2} + \tilde{L}_2 D_f \\ 0 & \tilde{H}C_2 & I_{n_f} \end{array} \right]$$

زوج $(A_{22} + \tilde{L}_2 C_2, HC_2)$ رویت‌پذیرند که ناشی از تجزیه $A, \tilde{L}, C$ و B_f است. بنابراین $B_{f1} + L_1 D_f = 0$ است. به علاوه

$$\gamma_0 = \left\| \left[\frac{A + \tilde{L}C}{\tilde{H}C} \middle| \frac{B_d + \tilde{L}D_d}{\tilde{H}D_d} \right] \right\|_\infty = \left\| \left[\begin{array}{c|c} \frac{A_{11} + \tilde{L}_1 C_1}{0} & \frac{A_{12} + \tilde{L}_1 C_2}{\tilde{H}C_2} \\ \hline \frac{B_{d1} + \tilde{L}_1 D_d}{0} & \frac{B_{d2} + \tilde{L}_2 D_d}{\tilde{H}D_d} \end{array} \right] \right\|_\infty =$$

$$\left\| \left[\frac{A_{22} + \tilde{L}_2 C_2}{\tilde{H}C_2} \middle| \frac{B_{d2} + \tilde{L}_2 D_d}{\tilde{H}D_d} \right] \right\|_\infty \quad (۲۹-۴)$$

با حذف بخش رویت‌ناپذیر $L_2 = \tilde{L}_2$ و انتخاب L_1 به طوری که $B_{f1} + L_1 D_f = 0$ باشد. این زمانی ممکن است که D_f طبق فرض دارای رتبه کامل ستونی باشد. حال تعریف می‌شود $H = \tilde{H}$ و $L =$

$$[L_1^T \quad L_2^T]^T. \text{ سپس } HD_f = I_{nf} \text{ و } B_f + LD_f = 0 \text{ به علاوه}$$

$$\gamma_0 = \left\| \left[\frac{A + LC}{HC} \middle| \frac{B_d + LD_d}{HD_d} \right] \right\|_\infty = \left\| \left[\begin{array}{c|c} \frac{A_{11} + L_1 C_1}{0} & \frac{A_{12} + L_1 C_2}{\tilde{H}C_2} \\ \hline \frac{B_{d1} + L_1 D_d}{0} & \frac{B_{d2} + L_2 D_d}{HD_d} \end{array} \right] \right\|_\infty =$$

$$\left\| \left[\frac{A_{22} + \tilde{L}_2 C_2}{\tilde{H}C_2} \middle| \frac{B_{d2} + \tilde{L}_2 D_d}{\tilde{H}D_d} \right] \right\|_\infty \quad (۳۰-۴)$$

به کمک حذف بخش رویت‌ناپذیر و قراردادن $L_2 = \tilde{L}_2$ و $L_1 = \gamma$ است.

۴-۵ راه حل LMI برای حل مساله تشخیص خطا

لم (۳-۴) مساله تشخیص خطا را به حل بهینه مساله (۲۸-۴) کاهش می‌دهد. در این بخش ما مستقیماً از همه پارامترهای L و H استفاده می‌کنیم به طوری که $B_f + LD_f = 0$ و $HD_f = 0$ یک مدل از لم‌های حقیقی محدود تولید می‌شود (به طوری که محدودیت پایداری را تحمل نکنیم [۹]).

برای حل مساله ۴-۱

به این دلیل که $D_f \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y}$ دارای رتبه کامل ستونی است، پس $D_f^\dagger \in \mathcal{R}^{n_f \times n_y}$ و $D_f^\perp \in \mathcal{R}^{(n_y - n_f) \times n_y}$ (که می‌توان از روی تجزیه مقادیر تکین به دست آورد). به طوری که

$$\begin{bmatrix} D_f^\dagger \\ D_f^\perp \end{bmatrix} D_f = \begin{bmatrix} I_{n_f} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{rank} \left(\begin{bmatrix} D_f^\dagger \\ D_f^\perp \end{bmatrix} \right) = n_y \quad (۳۱-۴)$$

نشان داده می شود که همه L و H های که تمام محدودیت های رابطه (۲۸-۴) را برآورده می کنند از رابطه زیر بدست می آید.

$$L = -B_f D_f^\dagger + R D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}}, \quad H = D_f^\dagger + S D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} \quad (۳۲-۴)$$

که $R \in \mathcal{R}^{n \times (n_y - n_f)}$ و $S \in \mathcal{R}^{n_f \times (n_y - n_f)}$ که پارامترهای آزاد هستند.

حل یک ماتریس غیرخطی برای بهینه کردن مساله (۲۸-۴)، با استفاده از مکمل برشی^{۴۴} ساده برای تولید لم محدود حقیقی [۹] و پارامتری کردن L و H در رابطه (۳۲-۴) نتیجه ای است که حاصل می شود.

تئوری (۱-۴) با توجه به متغیرهای لم (۳-۴):

سپس

$$\gamma_0 = \min \left\{ \gamma : R \in \mathcal{R}^{n \times (n_y - n_f)}, S \in \mathcal{R}^{n_f \times (n_y - n_f)}, P = P^T \in \mathcal{R}^{n \times n}, \begin{bmatrix} P(A - B_f D_f^\dagger C + R D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} C) + \star & \star & \star \\ \left(B_d - B_f D_f^\dagger D_d + R D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} D_d \right)^T P & -\gamma^2 I & \star \\ D_f^\dagger C + S D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} C & D_f^\dagger D_d + S D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} D_d & -I \end{bmatrix} \leq 0 \right\} \quad (۳۳-۴)$$

نماد $\star$ به آسانی از تقارن به دست می آید. تنها عبارت غیرخطی در رابطه (۳۳-۴) عبارت PR است. با

اعمال تغییر متغیر $Z = PR$ نامعادله ماتریسی خطی می شود. قسمت دشوار اثبات نشان دادن این است

که R همیشه از Z بدست می آید حتی اگر P تکین شود.

تئوری (۲-۴) با توجه به متغیرهای تئوری (۱-۴):

⁴⁴Schur complement

$$\gamma_0 = \min \left\{ \gamma : Z \in \mathcal{R}^{n \times (n_y - n_f)}, S \in \mathcal{R}^{n_f \times (n_y - n_f)}, P = P^T \in \mathcal{R}^{n \times n}, \begin{bmatrix} P(A - B_f D_f^\dagger C) + Z D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} C + \star & \star & \star \\ (B_d - B_f D_f^\dagger D_d)^T P + (D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} D_d)^T Z^T & -\gamma^2 I & \star \\ D_f^\dagger C + S D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} C & D_f^\dagger D_d + S D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} D_d & -I \end{bmatrix} \leq 0 \right\} \quad (34-4)$$

به علاوه برای هر $\gamma_0 \leq \gamma$ یک P, Z و S وجود دارد که نامعادله رابطه (34-4) را ارضا کند به طوری که

معادله $Z=PR$ یک حل برای محاسبه R می باشد.

اثبات: می توان رابطه (33-4) به صورت زیر نوشت

$$\gamma_0 = \min \left\{ \gamma : R \in \mathcal{R}^{n \times (n_y - n_f)}, S \in \mathcal{R}^{n_f \times (n_y - n_f)}, P = P^T \in \mathcal{R}^{n \times n}, Z = PR, \begin{bmatrix} A_1^T P + P A_1^T + Z C_2 + C_2^T Z^T & \star & \star \\ B_1^T P + D_2^T Z^T & -\gamma^2 I & \star \\ C_1 + S C_2 & D_1 + S D_2 & -I \end{bmatrix} \leq 0 \right\} \quad (35-4)$$

که:

$$\begin{bmatrix} \frac{A_1}{C_1} \mid \frac{B_1}{D_1} \\ C_2 \mid D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A - B_f D_f^\dagger C}{D_f^\dagger C} \mid \frac{B_d - B_f D_f^\dagger D_d}{D_f^\dagger D_d} \\ \frac{1}{D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} C} \mid \frac{1}{D_{\bar{f}}^{\frac{1}{2}} D_d} \end{bmatrix} \quad (36-4)$$

این نشان می دهد $\gamma_0 \geq \gamma$ از حل LMI رابطه (34-4) P, Z و S به دست می آیند. اگر P غیر تکین

باشد، $R = P^{-1}Z$ به دست می آید و اگر P تکین باشد پس با یک تغییر مناسب P قطری می شود. اگر

به توان اثبات کرد که $P=0$ است بر $\tilde{Z} = 0$ دلالت دارد، LMI حل شده است. با قرار دادن $P=0$ در

LMI (17) بدست می آید

$$\begin{bmatrix} Z C_2 + C_2^T Z^T & \star & \star \\ D_2^T Z^T & -\gamma^2 I & \star \\ C_1 + S C_2 & D_1 + S D_2 & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (37-4)$$

توجه داشته باشید که ماتریس C دارای رتبه کامل سطری است (فرض (۳-۴) مساله (۴-۱)). این امر دلالت می‌کند که C_2 هم، دارای رتبه کامل سطری می‌باشد. با تجزیه بخش مقدار تکین به دست می‌آید. فرض کنید که

$$C_2 = [0 \quad C_{22}]$$

حال که C_2 غیر تکین شد عبارات زیر به دست می‌آید

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \quad C_1 = [C_{11} \quad C_{12}].$$

LMI رابطه (۳۷-۴) تبدیل می‌شود به

$$\begin{bmatrix} 0 & * & * & * \\ C_{22}Z_1^T & Z_2C_{22} + C_{22}^TZ_2^T & * & * \\ D_2^TZ_1^T & D_2^TZ_2^T & -\gamma^2I & * \\ C_{11} & C_{12} + SC_{22} & D_1 + SD_2 & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (38-4)$$

برای $Z_1 = 0$ و $C_{11} = 0$ سطر و ستون اول رابطه (۳۸-۴) حذف می‌گردد و LMI به فرم زیر به دست می‌آید

$$\begin{bmatrix} Z_2C_{22} + C_{22}^TZ_2^T & * & * \\ D_2^TZ_2^T & -\gamma^2I & * \\ C_{12} + SC_{22} & D_1 + SD_2 & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (38-4)$$

با ضرب $Y^T = [-D_2^TC_{22}^T \quad I \quad (D_1 + \tilde{S}D_2)^T]$ از سمت چپ و با ضرب Y از سمت راست به طوری که $\tilde{S} = -C_{12}C_{22}^{-1}$ با کمی تغییر حاصل می‌شود

$$(D_1 + \tilde{S}D_2)^T(D_1 + \tilde{S}D_2) - \gamma^2I \leq 0$$

یا با استفاده از مکمل برشی

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2I & * \\ D_1 + \tilde{S}D_2 & -I \end{bmatrix} \leq 0$$

توجه داشته باشید که $C_{12} + \tilde{S}C_{22} = 0$ در LMI رابطه (۳۸-۴) به وسیله $Z_2 = 0$ و $S = \tilde{S}$ صدق

می‌کند. بنابراین در LMI رابطه (۳۴-۴) $P=0$ حاصل می‌گردد.

خلاصه نتایج به دست آمده از مساله ۴-۱ الگوریتم زیر است:

الگوریتم (۱-۴): اگر $G_d(s) \in \mathcal{RL}_\infty^{n_y \times n_d}$ و $G_f(s) \in \mathcal{RL}_\infty^{n_y \times n_f}$ که در رابطه (۴-۱۲) داده شده است.

فرض کنید $n_y \geq n_f$ و زوج (A, C) رویت پذیر و $G_f(s)$ صفری روی محور موهومی نداشته باشد.

- D_f^+ و $D_f^{\frac{1}{f}}$ را طوری تعریف کنید که در رابطه (۴-۳۱) صدق کند.

- A_1, B_1, C_1, D_1 و D_2 را طبق رابطه (۴-۳۶) تعریف کنید.

- پیدا کردن γ_0, P, Z و S با حل LMI بهینه شده رابطه (۴-۳۴).

- پیدا کردن مقدار R با حل معادله $Z=PR$.

- مقدار $\gamma_0 = \frac{\|T_{rd}\|_\infty}{\|T_{rf}\|_-}$ را محاسبه کنید [۳۷].

- H و L را مطابق رابطه (۴-۳۲) تعریف کنید.

۱. اگر $A+LC$ پایدار باشد، جواب حاصل شده است.

۲. در غیر این صورت، اگر زوج $(A+LC, HC)$ رویت پذیر باشند $X = X^T \in \mathcal{R}^{n \times n}$ قرار داده می -

شود که پاسخ پایدار معادله ریکاتی رابطه (۴-۲۳) است. و L جدید را مطابق زیر تعریف می گردد

$$L := L - XC^T H^T H.$$

۳. در غیر این صورت، L جدید را به روش قسمت (۲) از اثبات لم (۴-۱) تعریف می شود. پس

زوج $(A+LC, HC)$ رویت پذیر است و مطابق مرحله دوم عمل می گردد.

فصل پنجم

تعریف سیستم

۵-۱ مقدمه

اغلب فرآیندهای تولید مواد و محصولات شیمیایی توام با تغییر ماهیت شیمیایی مواد اولیه و تبدیل آنها به مواد دیگر می باشد. این تغییر ماهیت، ناشی از واکنش مواد اولیه است. انجام این تغییرات و واکنش‌ها در تجهیزاتی به نام راکتور شیمیایی^{۴۵} صورت می‌گیرد.

در یک واحد صنایع شیمیایی مواد خام ابتدا از یک رشته فرآیندهای تغییر فیزیکی اولیه از قبیل جداسازی، مخلوط کردن و ... عبور می‌کنند تا آماده ورود به مرحله بعدی یعنی تغییرات شیمیایی شوند. در این مرحله به کمک راکتور یا راکتورهای مناسب واکنش‌های شیمیایی^{۴۶} مورد نظر انجام و محصول تهیه می‌شود.

واکنش بین مواد شیمیایی می‌تواند در فازهای مختلف صورت پذیرد. به‌عنوان مثال یکی از مواد واکنش‌گر می‌تواند مایع و دیگری به شکل گاز یا جامد باشد. اگر واکنش‌گرها هم‌فاز باشند واکنش را همگن و اگر واکنش‌گرها غیر هم‌فاز باشند واکنش را ناهمگن می‌گویند. در یک واکنش شیمیایی، به‌طور هم‌زمان هم‌ماده مورد نظر تشکیل می‌شود و هم ممکن است مواد ناخواسته دیگری به‌عنوان محصولات نامطلوب واکنش تشکیل گردد. در یک فعالیت اقتصادی، هدف حداکثر کردن تولید محصول مطلوب می‌باشد. این امر در صنعت شیمیایی می‌تواند از طریق دو راهکار زیر محقق گردد.

الف) انتخاب نوع مناسب راکتور و تعیین شرایط مطلوب عملیاتی نظیر دما و فشار.

ب) استفاده از کاتالیزور: کاتالیزورها موادی هستند که سرعت واکنش را اغلب افزایش داده و گاهی نیز در صورت نیاز و بسته به نوع واکنش سبب کاهش سرعت واکنش می‌گردند. هم‌چنین کاتالیزورها باعث می‌شوند واکنش در دماها و فشارهای پایین‌تر انجام شود. کاتالیزور در تحولات شیمیایی بدون تغییر باقیمانده و ماهیت شیمیایی و فیزیکی خود را حفظ می‌نماید.

⁴⁵chemical reactor

⁴⁶chemical reactions

اگر در یک راکتور چند واکنش به‌طور هم‌زمان صورت پذیرد یک کاتالیزور مناسب می‌تواند سرعت تشکیل و تولید محصول مطلوب را افزایش داده و یا کاهش سرعت واکنش‌های نامطلوب از تولید مواد ناخواسته و نامطلوب کاهش دهد.

۵-۲ مفاهیم واکنش‌های شیمیایی

واکنش شیمیایی فرآیندی است که طی آن یک یا چند ماده به مواد دیگر تبدیل می‌شوند. مواد اولیه موادی با ارزش اقتصادی کمتر می‌باشند ولی محصولات موادی با ارزش بالاتری هستند. درک سینتیک و ساز و کار واکنش یکی از نکات مهم در طراحی راکتورهای صنعتی است. معادله سرعت، تعادلی بودن یا نبودن، فازمواد درگیر در واکنش (جامد، مایع، گاز)، گرماگیر یا گرماده بودن و همچنین اثر کاتالیزور بر واکنش، از جمله مهم‌ترین نکاتی است که در طراحی راکتور حائز اهمیت است [۴۳].

۵-۲-۱ سینتیک واکنش

سینتیک واکنش شیمیایی عبارت است از بررسی ساز و کار انجام یک واکنش شیمیایی. علم سینتیک شیمیایی به‌طور کامل به نحوه انجام واکنش، واکنش‌های جانبی، مواد واسطه تولیدی و بسیاری از جزئیات یک واکنش می‌پردازد. سرعت واکنش و بستگی آن به غلظت گونه‌های درگیر در واکنش با استفاده از رابطه‌ای به نام معادله سرعت بیان می‌شود. به‌طور کلی تغییر غلظت گونه‌ای موجود در واکنش در واحد زمان را سرعت واکنش نسبت به آن ماده تعریف می‌کنند، مثلاً برای واکنش ساده $A \rightarrow B$ معادله سرعت به‌صورت زیر است [۴۳].

$$r_A = \frac{d[A]}{dt} \quad (۵-۱)$$

معادله سرعت واکنش را می‌توان به شکل زیر هم بازنویسی کرد. باید توجه داشت که در معادله زیر علامت منفی به‌طور قراردادی نشان‌دهنده مصرف گونه A است. به همین ترتیب برای تولید گونه B از علامت مثبت استفاده می‌شود.

$$-r_A = k[A]^n \quad (2-5)$$

در این معادله k عددی ثابت است که به «ثابت سرعت واکنش» معروف است و عدد k بزرگ‌تر نشان‌دهنده واکنش سریع‌تر است. همچنین n میزان بستگی سرعت واکنش به غلظت A را نشان می‌دهد که به درجه واکنش نسبت به گونه A معروف است. این پارامتر معمولاً عددی بین صفر تا ۳ است. همچنین اگر گونه‌های واکنش‌دهنده بیش از یکی باشد، از جمع توان‌های واکنش‌دهنده‌ها، درجه کلی واکنش حاصل می‌شود.

۲-۲-۵ ترمودینامیک واکنش

بررسی واکنش‌ها از نظر انرژی، در حوزه مباحث ترمودینامیک شیمیایی است. گرماگیر و یا گرماده بودن واکنش و میزان انرژی تبادل شده در واکنش از نکات مهم در این علم است. اهمیت این مسئله از آن جهت است که برای راکتورها می‌بایست سیستم‌های گرمایش و یا سرمایش طراحی شود تا تبادل انرژی به خوبی انجام شود. وجود هر نوع اشکال و یا محاسبات نادرست در سیستم تبادل انرژی موجب اخلاف در انجام واکنش، کیفیت محصول، مقدار محصول و حتی خطر جانی و مالی می‌شود. به-عنوان نمونه در واکنش‌های گرماده شدید، در صورتی که گرمای تولید شده در واکنش به خوبی تبادل نشود، افزایش بی‌رویه دما داخل راکتور می‌تواند منجر به افزایش حجم و بالا رفتن فشار شود، همچنین در واکنش‌هایی که با تولید گاز شدید انجام می‌شوند، ممکن است موجب انفجار شود [۴۴].

۵-۲-۳ اثر کاتالیزورها و بازدارنده‌ها بر واکنش

کاتالیزوره‌های همتا هستند که با دخالت در واکنش و تغییر مسیر واکنش، سرعت واکنش را بالا می‌برند. از کاتالیزورها در واکنش‌هایی که در شرایط معمول با سرعت پایین انجام می‌شوند استفاده می‌شود. در نقطه مقابل مواد دیگری به نام بازدارنده‌ها وجود دارند که مانند کاتالیست هستند با این تفاوت که افزودن آن به واکنش موجب کندی و حتی توقف واکنش می‌شود. بازدارنده‌ها به طور ویژه در صنایع پلیمر و برای کنترل فرآیندهای پلیمراسیون در راکتور شیمیایی کاربرد دارند. کاتالیزورها و بازدارنده‌ها می‌توانند به صورت همگن با فاز مواد درگیر در واکنش مصرف شوند که به واکنش‌های کاتالیستی همگن^{۴۷} معروف هستند. واکنش‌هایی که کاتالیست و مواد درگیر در واکنش در یک فاز قرار ندارند به واکنش‌های کاتالیستی ناهمگن^{۴۸} معروف هستند [۴۴].

این مواد معمولاً با درصد بسیار پایین و به اشکال مختلف در فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. ممکن است کاتالیزور یا بازدارنده به صورت ثابت در راکتور شیمیایی قرار داشته باشد و مواد واکنش‌دهنده پس از تماس با آن خارج شوند. در نقطه مقابل ممکن است این مواد به صورت پودر یا اشکال دیگر به داخل راکتور تزریق و سپس از آن خارج شوند. به عنوان نمونه در فرآیند کراکینگ کاتالیزوری سیال بستر، کاتالیست زئولیت به صورت پودر به داخل راکتور تزریق می‌شود. پس از اشیاع شدن کاتالیزور، همراه با فرآورده‌ها از فرآیند خارج و پس از جداسازی و بازیابی مجدداً به داخل راکتور تزریق می‌شود. به این ترتیب این چرخه دائماً ادامه پیدا می‌کند و کاتالیزور در فرآیند مرتباً در گردش است [۴۵].

⁴⁷Homogeneous Catalysis

⁴⁸Heterogeneous Catalysis

۵-۲-۴ انواع واکنش‌ها

توجه به ماهیت و نوع واکنش نیز در طراحی راکتور از اهمیت بالایی برخوردار است. مثلاً در واکنش‌های یک‌طرفه تقریباً تمام مواد واکنش‌دهنده با نسبت‌های استوکیومتری مشخص مصرف می‌شوند. اما در واکنش‌های تعادلی در یک سیستم بسته، در دما و فشار مشخص، مواد اولیه و مواد تولیدی پس از مدتی با یکدیگر به تعادل می‌رسند، یعنی با گذشت زمان، غلظت مواد دچار تغییر نشده و مقداری از مواد اولیه به صورت واکنش نداده در سیستم باقی می‌ماند. رفتار واکنش‌های تعادلی با اصلی به نام اصل لوشاتلیه بررسی می‌شود [۴۴].

$$A \rightleftharpoons B \quad (۳-۵)$$

در واکنش‌های رقابتی یک یا چند واکنش جانبی، که منجر به تولید مواد بلااستفاده می‌شود، در کنار واکنش اصلی رخ می‌دهد. در این نوع واکنش‌ها باید پارامترهای فرآیند طوری طراحی شود که بیشترین مقدار ممکن از ماده مطلوب تولید شود [۴۶].

$$\begin{cases} A \rightarrow B \\ A \rightarrow C \end{cases} \quad (۴-۵)$$

همچنین در واکنش‌های سری چند واکنش پشت سرهم انجام می‌شود تا محصول نهایی تولید شود. به عبارتی واکنش کلی از ترکیب چند واکنش به وجود می‌آید. در این نوع واکنش‌ها، سرعت کلی واکنش به سرعت کندترین واکنش بستگی دارد [۴۶].

$$\begin{cases} A \rightarrow B \\ B \rightarrow C \end{cases} \quad (۵-۵)$$

۵-۳ انواع راکتورهای شیمیایی

راکتورهای شیمیایی طراحی‌های پیچیده‌ای دارند که گاه طی سالیان متمادی برای یک فرآیند خاص به تکامل رسیده است. پارامترهای بسیار بر طراحی و شکل راکتور موثر هستند که موجب تنوع انواع راکتورها می‌شوند. اما می‌توان بر اساس برخی پارامترهای اساسی، راکتورها را به دسته‌های عمده تقسیم کرد که در زیر به آن می‌پردازیم [۴۴].

۵-۳-۱ انواع راکتور از نظر فازهای درگیر در واکنش

واکنش‌ها در راکتور ممکن است به صورت همگن (تمامی مواد در یک فاز هستند) و یا ناهمگن (مواد درگیر در واکنش در فازهای مختلف قرار دارند) انجام شود. این امر موجب می‌شود تا در طراحی راکتور محدودیت‌هایی ایجاد شود. واکنش‌های گازی نمونه‌ای از واکنش‌های همگن هستند که معمولاً در راکتورهای لوله‌ای انجام می‌شوند. راکتورهای ناهمگن بر اساس فازهای درگیر در واکنش شکل‌های مختلفی دارند اما نکته مهم در این راکتورها ایجاد انتقال جرم و تماس مناسب بین فازها برای انجام واکنش است.

۵-۳-۲ راکتور بسته و نیمه بسته

راکتورهای بسته^۱ گونه ساده‌ای از راکتورهای شیمیایی هستند که به صورت مخزنی همراه با همزن و سیستم تبادل حرارت است. در این راکتورها مواد اولیه داخل راکتور پر می‌شود و سپس واکنش انجام می‌گیرد. پس از تکمیل واکنش و تولید محصول، درب راکتور باز شده و محصولات تخلیه می‌شوند. این فرآیند بارها و بارها قابل تکرار است. راکتورهای نیمه بسته^۲ نیز به همین صورت است با این تفاوت تفاوت که در این نوع از راکتورها، مواد اولیه به آرامی به مخزن افزوده می‌شود اما خروجی از راکتور وجود ندارد [۵۰]. از راکتورهای بسته عمدتاً در تولید محصول در ابعاد کم و محصولاتی که متقاضی

^۱batch reactor

^۲semi-batch reactor

مقطعی و یا فصلی دارند استفاده می‌شود. موادی مانند مواد دارویی از جمله موادی هستند که در سیستم‌های بسته تولید می‌شود. تغییر در شکل فرآیند با استفاده از راکتورهای بسته به مراتب آسان‌تر و به صرفه‌تر از فرآیندهای پیوسته است. دانستن سینتیک و سازوکار فرآیند در راکتورهای بسته کم اهمیت‌تر است به همین سبب است که سینتیک عمده فرآیندهای داروسازی ناشناخته است [۵۱].

معادله عمومی راکتورهای بسته به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۶-۴۷].

$$-r_A = \frac{-d[A]}{dt} \rightarrow dt = \frac{d[A]}{-r_A} \quad (۶-۵)$$

با انتگرال‌گیری از معادله دیفرانسیل رابطه (۵-۱۰) در شرایط مرزی زیر به معادله عمومی راکتور بسته بر حسب غلظت خواهیم رسید.

- غلظت گونه A از $[A]_0$ تا $[A]_f$ که غلظت پایانی است، تغییر می‌کند.
- زمان از لحظه صفر تا زمان کامل شدن واکنش (t) در تغییر است.

$$dt = \frac{d[A]}{-r_A} \rightarrow t = - \int_{[A]_0}^{[A]_f} \frac{d[A]}{-r_A} \quad (۷-۵)$$

۳-۳-۵ راکتورهای پیوسته

راکتورهای پیوسته گونه‌ای متداول از راکتورها هستند که در آن‌ها یک یا چند جریان ورودی به سیستم، مواد واکنش‌دهنده را به داخل راکتور می‌آورد و پس از واکنش، از خروجی یا خروجی‌های راکتور محصولات خارج می‌شوند. به‌طور معمول دبی ورودی و خروجی از این راکتورها ثابت است. در غیر این‌صورت امکان سرریز و یا تخلیه سریع مخزن راکتور وجود دارد. در زیر معادله کلی موازنه راکتور پیوسته نوشته شده است [۴۶-۵۰].

¹continuous reactor

$$\left\{ \begin{matrix} \text{دبی} \\ \text{جرمی} \\ \text{ورودی} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \text{دبی} \\ \text{جرمی} \\ \text{خروجی} \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \text{دبی} \\ \text{جرمی} \\ \text{تولیدی} \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \text{دبی} \\ \text{جرمی} \\ \text{مصرفی} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} \text{دبی} \\ \text{جرمی} \\ \text{انباشته} \end{matrix} \right\} \quad (۸-۵)$$

این نوع راکتورها عمدتاً برای تولید محصولات با حجم بالا و محصولاتی که میزان تقاضای آن‌ها به صورت ثابت در بازار وجود دارد استفاده می‌شود. مواد سوختی، محصولات پتروشیمی و مواد شوینده و بهداشتی از جمله این مواد هستند. ایجاد تغییرات در راکتورهای پیوسته به دلیل این‌که در فرآیندهای پیوسته باید همه فرآیندها با یکدیگر هماهنگ کار کنند به مراتب سخت‌تر از راکتورهای بسته است. به همین دلیل از این نوع راکتورها در تولید یک محصول یا محصولاتی که تولید آن شباهت زیادی به هم دارند استفاده می‌شود [۵۱]. دو نوع متداول از راکتورهای پیوسته، راکتورهای مخزنی با همزن و راکتورهای پلاگ (یا لوله‌ای) هستند:

- راکتور پلاگ

راکتورهای پلاگ گونه‌ای از راکتورهای پیوسته هستند که در آن‌ها به جای یک مخزن یا تانک، از یک لوله برای انجام واکنش استفاده می‌شود. این نوع راکتورها نسبت به شکل مخزنی آن، فضای کم‌تری اشغال می‌کنند. در عین حال به دلیل ساختار لوله‌ای، سطح تماس بیشتری با محیط اطراف داشته و تبادل گرما راحت‌تر انجام می‌شود [۵۰]. جریان پلاگ گونه‌ای از جریان سیال در داخل لوله است که در آن سرعت حرکت سیال در نزدیکی دیواره لوله و در مرکز لوله یکنواخت است. این امر موجب می‌شود مواد واکنش‌دهنده به‌طور یکنواخت با یکدیگر تماس یافته و واکنش انجام شود. این نوع از جریان با لوله‌های بلند و باریک ایجاد می‌شود. همچنین مارپیچ کردن لوله نیز می‌تواند به این امر کمک کند. معادله عمومی راکتورهای پلاگ به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۶-۴۷].

$$\frac{V_p}{q} = - \int_{[A]_0}^{[A]_f} \frac{d[A]}{-r_A} \quad (۹-۵)$$

در معادله (۹-۵)، q نشان‌دهنده دبی حجمی و V_p نشان‌دهنده حجم راکتور پلاگ است. همچنین رابطه زمان اقامت در این نوع راکتور پیوسته به صورت زیر است

$$\tau_p = C_{A_0} \frac{V_p}{F_{A_0}} = \frac{V_p}{q} \quad (۱۰-۵)$$

در این رابطه C_{A_0} نشان‌دهنده غلظت اولیه خوراک ورودی به راکتور و F_{A_0} نشان‌دهنده دبی جرمی خوراک ورودی است.

• راکتورهای مخزنی با همزن

راکتورهای مخزنی با همزن^۱ که به اختصار راکتورهای CSTR نیز شناخته می‌شوند. این راکتورها به صورت مخازنی همراه با ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند که عمل اختلاط و همزدن مواد توسط شفت و پروانه صورت می‌گیرد. این نوع راکتورهای پیوسته در مقایسه با راکتورهای پلاگ حجم بیشتری نیاز دارند اما حجم تولید در آن‌ها بالاتر است. معادله عمومی راکتور برای این نوع از راکتور بر حسب غلظت به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۶].

$$\frac{V_m}{q} = \frac{C_{A_0}}{-r_A(C_{A_f})} \quad (۱۱-۵)$$

در معادله (۱۱-۵)، V_m نشان‌دهنده حجم راکتور CSTR است. باید توجه داشت که در این رابطه، سرعت معادله در نقطه پایانی واکنش (C_{A_f}) محاسبه می‌شود.

زمان اقامت در این نوع راکتور نیز مشابه راکتور پلاگ به صورت زیر قابل تعریف است

$$\tau_m = C_{A_0} \frac{V_{mp}}{F_{A_0}} = \frac{V_m}{q} \quad (۱۲-۵)$$

^۱continuous-stirred tank reactor(CSTR)

۵-۳-۴ راکتورهای ثابت‌بستر و سیال‌بستر

گونه دیگری از راکتورها، راکتورهای ثابت‌بستر^۲ و سیال‌بستر^۳ هستند. در راکتورهای ثابت‌بستر ماده جامد که معمولاً کاتالیست می‌باشد، به‌طور ثابت داخل راکتور قرار دارد و مواد واکنش‌دهنده پس از عبور از روی این مواد، واکنش داده و از راکتور خارج می‌شوند. راکتورهای آکنده نمونه‌ای از این نوع راکتورها هستند. نمونه‌ای از کاربرد این نوع راکتورها برای تصفیه گازهای خروجی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی است. در این نوع نیروگاه‌ها، پس از فرآیند احتراق، گازهای حاوی ترکیبات مضر نیتروژن از داخل راکتور حاوی کاتالیست عبور می‌کند تا ترکیبات مضر آن به مواد کم‌خطرتر تبدیل شوند [۵۲]. در راکتورهای سیال‌بستر مواد جامد با جریانی از سیال در داخل راکتور به‌صورت معلق در می‌آیند. این مواد جامد می‌توانند واکنش‌دهنده‌ها، کاتالیست‌ها و یا بازدارنده‌ها باشند. این فرآیند موجب افزایش انتقال جرم و حرارت در راکتور و اختلاط کامل‌تر اجزا می‌شود. از دیگر مزایای این نوع راکتور امکان خارج کردن جامد از راکتور به‌صورت پیوسته و انتقال به واحد دیگر است. به‌عنوان نمونه هنگامی که احیا دوباره بازدارنده‌ها و کاتالیست‌ها نیاز باشد، می‌توان آن‌ها را به این ترتیب از راکتور خارج و به واحد بازیابی منتقل کرد [۵۳].

۵-۴ مفاهیم بنیادی راکتورها

راکتورهای شیمیایی، محلی برای انجام یک واکنش شیمیایی هستند. راکتورها می‌توانند جهت تولید انبوه مواد شیمیایی، دارویی، مواد پتروشیمی و در واحدهای صنعتی بزرگ به‌کار گرفته شوند و یا جهت انجام مطالعات و تحقیقات و در ابعاد کوچک به‌کار بروند.

^۲fix bed reactor

^۳fluidized bed reactor

طراحی راکتورها با توجه به مکانیسم واکنش و همچنین نوع واکنش و فازمواد درگیر در واکنش متفاوت است. در طراحی راکتورهای شیمیایی برخی از پارامترها مانند دما، فشار و دبی مواد ورودی و خروجی، توسط طراح قابل تغییر است. اما برخی پارامترها مانند ماهیت واکنش، گرماگیر یا گرماده بودن، ایجاد گاز و یا تغییر در حجم مواد، از جمله مواردی است که به طبیعت واکنش مربوط بوده و در اختیار طراح قرار ندارد. از مجموع این موارد می‌توان نتیجه گرفت که راکتورها در اشکال پیوسته و یا بسته، بستر ثابت و یا بستر متلاطم، تحت فشار یا در فشار اتمسفری و یا با اثر کاتالیست و یا بدون اثر کاتالیست طراحی می‌شوند [۴۴]. برخی از پارامترهایی که تقریباً در تمام راکتورها مطرح بوده و حائز اهمیت به جهت شناخت راکتور و عملکرد آن است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

۵-۴-۱ زمان اقامت، زمان نیمه عمر و زمان پایان واکنش

در راکتورهای پیوسته که به‌طور مداوم مواد خام وارد و محصولات خارج می‌شوند، نمی‌توان زمان مشخصی برای انجام واکنش و تبدیل مواد اولیه به محصول بیان کرد. در نتیجه از کمیتی به‌نام زمان اقامت^۴ استفاده می‌شود. زمان اقامت متوسط، زمانی است که یک ذره وارد راکتور شده و تا زمان خروج در آنجا در حال واکنش است. این کمیت به‌صورت زیر نشان داده می‌شود

$$\tau = \frac{v}{q} \quad (۵-۱۳)$$

در این معادله، v نشان‌دهنده حجم راکتور، q دبی حجمی ورودی و خروجی از راکتور و τ زمان اقامت است. زمان اقامت یکی از پارامترهای مورد استفاده در معادله راکتور است [۴۶].

^۴residence time

زمان نیمه عمر^۵ مدت زمانی است که نیمی از غلظت ماده اولیه تزریق شده در راکتور، به محصولات تبدیل می‌شوند. به عنوان مثال در واکنش ساده $A \rightarrow B$ نیمه عمر واکنش به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۶].

$$-r_A = k[A]^n \rightarrow \frac{-d[A]}{dt} = k[A]^n \rightarrow \frac{-d[A]}{[A]^n} = kdt \quad (۱۴-۵)$$

از این رابطه با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر انتگرال می‌گیریم:

- غلظت گونه A از $[A]_0$ تا $[A]_{\frac{1}{2}}$ که نصف غلظت اولیه است، تغییر می‌کند.

- زمان از لحظه صفر تا زمان نیمه عمر $(t_{\frac{1}{2}})$ در تغییر است.

$$\int_{[A]_0}^{[A]_{\frac{1}{2}}} \frac{-d[A]}{[A]^n} = \int_0^{t_{\frac{1}{2}}} kdt \rightarrow \frac{\left(\frac{-[A]_0}{2}\right)^{1-n}}{1-n} + \frac{[A]_0^{1-n}}{1-n} = kt_{\frac{1}{2}} \rightarrow t_{\frac{1}{2}} = \frac{(2^{n-1}-1)[A]_0^{1-n}}{k(n-1)} \quad (۱۵-۵)$$

همچنین زمان پایان واکنش به شیوه مشابه به صورت زیر به دست می‌آید. باید توجه داشت که تنها واکنش‌هایی پایان پذیر هستند که در آن‌ها $n < 1$ باشد، در غیر این صورت همواره مقداری از مواد اولیه در راکتور به صورت واکنش نداده باقی می‌ماند [۴۶].

از رابطه (۱۴-۵) با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر انتگرال می‌گیریم:

- غلظت گونه A از $[A]_0$ تا $[A] = 0$ که به معنی صفر شدن غلظت مواد اولیه است، تغییر می‌کند.

- زمان از لحظه صفر تا زمان پایان واکنش (t_{end}) در تغییر است.

$$\int_{[A]_0}^0 \frac{-d[A]}{[A]^n} = \int_0^{t_{end}} kdt \rightarrow \frac{(-0)^{1-n}}{1-n} + \frac{[A]_0^{1-n}}{1-n} = kt_{end} \rightarrow t_{end} = \frac{[A]_0^{1-n}}{k(n-1)} \quad (۱۶-۵)$$

⁵half life

۵-۴-۲ انتقال حرارت در راکتور

انتقال حرارت فرآیند چه از نظر عملیاتی و چه از نظر ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. عمده واکنش‌های شیمیایی یا گرماده هستند و یا گرماگیر، در نتیجه در حین انجام واکنش ممکن است محتویات درون راکتور گرم شده و یا سرد شوند. بالا رفتن بیش از حد دما در راکتور می‌تواند موجب اختلال در عملکرد راکتور و تجهیزات کنترلی آن شود و از همه مهم‌تر، ریسک خطر انفجار و نشت مواد را بالا می‌برد. همچنین در صورتی که واکنش گرماگیر باشد، با پیشرفت واکنش محتویات راکتور سردتر می‌شود و ممکن است موجب کندی سرعت واکنش و یا انجماد در راکتور و تجهیزات آن شود. در نتیجه می‌بایست در راکتورها، همواره دما را در حد مناسب و ایمن نگه‌داشت. برای این منظور از مبدل‌ها و تجهیزات انتقال حرارت استفاده می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کنترل دمای راکتورها استفاده از جاکت^۶ و یا کوئل‌های^۷ تبادل حرارت است. در جاکت‌ها، یک لایه از سیال با دمای بالاتر و یا پایین‌تر برای تنظیم دما، در اطراف راکتور و بدون تماس جرمی با محتویات راکتور، مرتباً در چرخش است. در روش کوئل نیز لوله‌هایی که حاوی سیال سردتر و یا گرم‌تر است به‌صورت مارپیچ یا اشکال دیگر در اطراف راکتور قرار داده می‌شود تا تبادل حرارت با راکتور انجام شود [۴۷].

۵-۴-۳ میکسینگ و انتقال جرم در راکتور

فرآیند همزدن و انتقال جرم در راکتورها از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا در صورتی که محتویات داخل راکتور به خوبی ترکیب نشوند، امکان واکنش ندادن بخشی از مواد و در نتیجه پایین آمدن کیفیت محصول می‌شود. عمل همزدن در راکتورهای مخزنی شکل، با استفاده از همزن‌های دوار که به شفت و الکتروموتور متصل است انجام می‌شود. در راکتورهای لوله‌ای^۸ نیز به دلیل شکل راکتور، عمل اختلاط در طول لوله با حرکت سیال اتفاق می‌افتد. شکل، نحوه قرار گیری و سرعت چرخش همزن

^۶jacket

^۷coil

^۸Plug reactors

بستگی به عواملی چون، حجم مخزن، شکل مخزن، ویسکوزیته سیال و ... دارد. همچنین انتخاب جنس همزن و بدنه راکتور به مواد داخل راکتور بستگی دارد. مثلاً اگر مواد داخل راکتور خورنده باشند، استفاده از فولادو موادی که امکان خورده شدن در آن وجود دارد، غیرمنطقی است [۴۸]. در این گونه موارد انتخاب مواد جایگزین و یا پوشش‌دهی تجهیزات با لعاهای سرامیکی و یا پوشش‌های پلیمری روش مناسبی در جلوگیری از خوردگی و واکنش‌های ناخواسته است [۴۹].

۴-۴-۵ معادله راکتور

معادله راکتور رابطه ریاضیاتی است که پارامترهای مربوط به راکتور مانند زمان اقامت و حجم راکتور را به سرعت واکنش، نشان می‌دهند. این معادلات می‌توانند به صورت عمومی برای دسته‌ای خاصی راکتورها مطرح شوند و یا به صورت تجربی برای گونه خاصی از راکتور به دست بیایند.

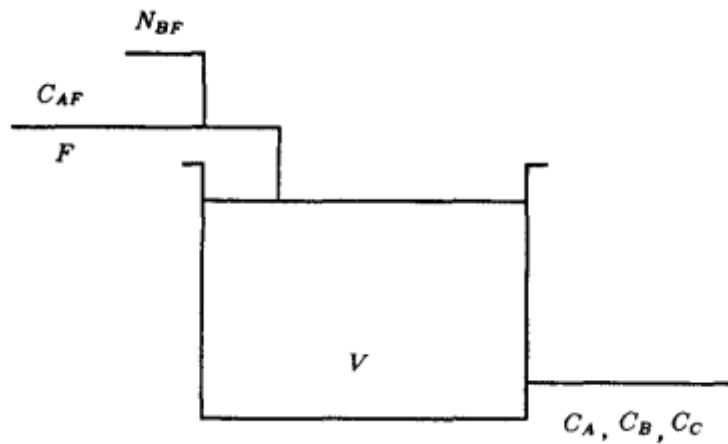
سیستم مورد بررسی در این پایان‌نامه مخزن یک راکتور CSTR که در شرایط هم‌دما و در فاز مایع می‌تواند چندین واکنش شیمیایی را انجام دهد. معادلات شیمیایی سیستم در رابطه (۵-۱۷) آمده است [۲۸].



سرعت انجام واکنش از رابطه (۵-۱۸) به دست می‌آید [۲۸]

$$\begin{cases} r_1 = k_1 C_A - k_2 C_B^2 \\ r_2 = k_3 C_B^2 \end{cases} \quad (۵-۱۸)$$

در شکل (۵-۱) طرحی از این نوع راکتور مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۵) طرحی از راکتور CSTR [۲۸].

معادلات دینامیکی این راکتور بعد از بدون واحد کردن آن‌ها در رابطه (۱۹-۵) آمده است [۲۸].

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= 1 - x_1 - Da_1 x_1 + Da_2 x_2^2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= Da_1 x_1 - x_2 - Da_2 x_2^2 - Da_3 x_2^2 + u \\ \frac{dx_3}{dt} &= Da_3 x_2^2 - x_3 \\ y &= x_3\end{aligned}\quad (۱۹-۵)$$

که در اینجا $u = N_{BF}/FC_{AF}$ است.

اگر مقادیر نهایی x_1 ، x_2 و x_3 را به ترتیب x_{1D} ، x_{2D} و x_{3D} بنامیم خواهیم داشت [۲۸]

$$\begin{aligned}0 &= 1 - x_1 - Da_1 x_1 + Da_2 x_2^2 \\ 0 &= Da_1 x_1 - x_2 - Da_2 x_2^2 - Da_3 x_2^2 + u \\ 0 &= Da_3 x_2^2 - x_3\end{aligned}\quad (۲۰-۵)$$

با تعریف متغیرهای جدید $\bar{x}_1 = x_1 - x_{1D}$ ، $\bar{x}_2 = x_2 - x_{2D}$ ، $\bar{x}_3 = x_3 - x_{3D}$ و $\bar{u} = u - u_D$

ترکیب معادلات (۱۹-۵) و (۲۰-۵)، معادله نهایی به فرم زیر خواهد بود [۲۸].

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{x}_1}{dt} &= -(1 + Da_1)\bar{x}_1 + (2Da_2 x_{2D})\bar{x}_2 + (Da_2)\bar{x}_2^2 \\ \frac{d\bar{x}_2}{dt} &= Da_1 \bar{x}_1 - (1 + 2Da_2 x_{2D} + 2Da_3 x_{2D})\bar{x}_2 - (Da_2 + Da_3)\bar{x}_2^2 + \bar{u} \\ \frac{d\bar{x}_3}{dt} &= Da_3 \bar{x}_2^2 + (2Da_3 x_{2D})\bar{x}_2 - \bar{x}_3 \\ \bar{y} &= \bar{x}_3\end{aligned}\quad (۲۰-۵)$$

مقادیر ثابت‌ها برابر است با $Da_3 = 1$ و $Da_2 = 0.5$, $Da_1 = 3$, $u_D = 1$ و $x_{3D} =$ مقادیر نهایی برابر با

$$x_{2D} = 0.8796 \text{ و } x_{1D} = 0.3467 \text{ است [۲۸].}$$

برای تشخیص خطا به روش H_-/H_∞ به مدل خطی سیستم نیاز است. برای رسیدن به این منظور

ابتدا نقطه تعادل محاسبه می‌شود و سپس از روش ژاکوبین مدل خطی سیستم محاسبه می‌گردد.

یکی از نقاط تعادل سیستم نقطه $(0,0,0)$ می‌باشد. پس ماتریس‌های A , B , C و D سیستم برابر

خواهند شد با

$$A = \begin{bmatrix} -4 & 0.8796 & 0 \\ 3 & -3.6388 & 0 \\ 0 & 1.7592 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 1], D = 0 \quad (۲۱-۵)$$

فصل ششم

شبه‌سازی

۶-۱ مقدمه

در این بخش چهار رویترگر لیونبرگر، H_2 ، H_∞ و رویترگر H_-/H_∞ برای سیستم راکتور CSTR طراحی می‌گردد و آنگاه عملکردشان در امر تولید باقیمانده در حضور خطا و اغتشاش بررسی می‌گردد. سپس مساله تشخیص خطا برای سیستم غیرخطی هم بررسی می‌گردد. تمامی شبیه سازی‌ها در محیط سیمولینک انجام شده‌است.

۶-۲ طراحی رویترگرهای تشخیص خطا

همان‌طور که در فصل پنجم توضیح داده شده برای سیستم تانک راکتور CSTR داریم

$$A = \begin{bmatrix} -4 & 0.8796 & 0 \\ 3 & -3.6388 & 0 \\ 0 & 1.7592 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad 0 \quad 1], D = 0, B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_f = 0, D_d = [-0.8565 \quad 0.5548 \quad 0.4826], D_f = [0.1 \quad 0.35 \quad 0.3]$$

که مرتبه اغتشاش $n_d = 1$ و مرتبه خطا $n_f = 1$ است.

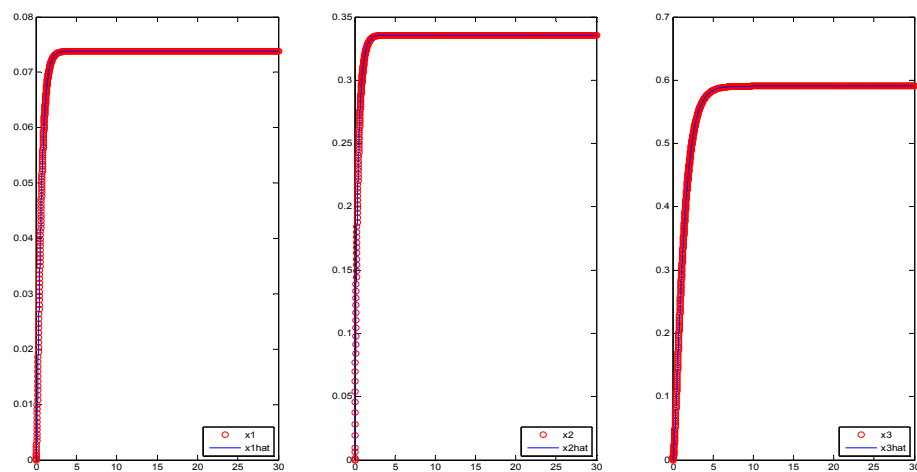
فرض کنید که خطای اول بین ثانیه‌های ۵ تا ۱۰ به صورت $\sin(t)$ رخ می‌دهد و خطای دوم بین ثانیه‌های ۱۱ تا ۱۵ به صورت عدد ثابت یک و خطای سوم بین ثانیه‌های ۱۷ تا ۲۳ به صورت عدد ثابت یک رخ می‌دهد.

تمامی اغتشاش‌ها به صورت نویز سفید با میانگین صفر و انحراف از معیار یک و دامنه ۰/۱ می‌باشد.

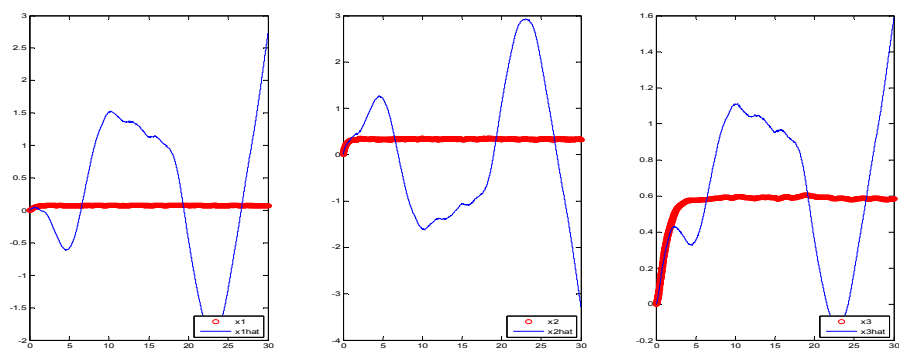
۶-۲-۱ رویترگر لیونبرگر

با استفاده از جایابی قطب بهره رویترگر به دست می‌آید. شبیه‌سازی را در چهار حالت: ۱. عدم وجود خطا و اغتشاش ۲. عدم وجود خطا و وجود اغتشاش ۳. وجود خطا و عدم وجود اغتشاش ۴. وجود خطا و اغتشاش انجام می‌شود.

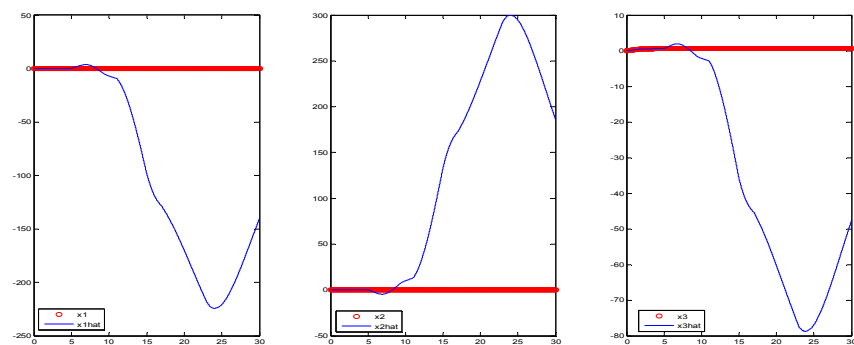
$$L = \begin{bmatrix} -14.6437 \\ 22.2295 \\ -7.6388 \end{bmatrix}$$



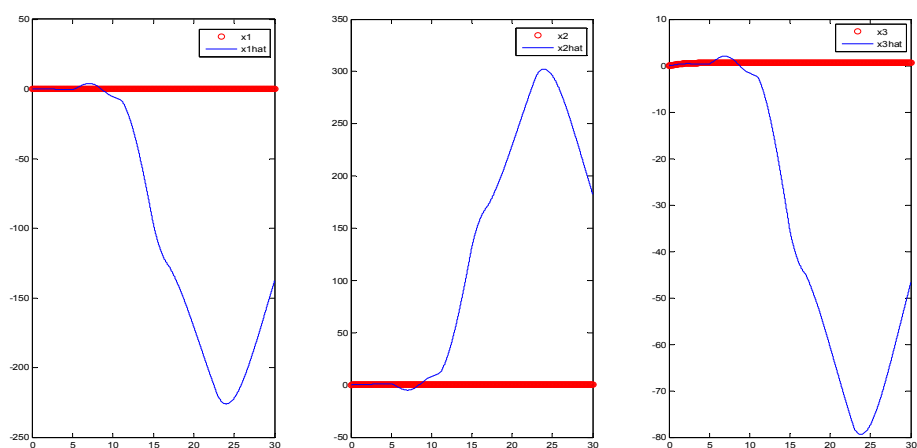
شکل (۶-۱) تخمین حالت‌های سیستم توسط ریتگر لیونبرگر در حالت اول.



شکل (۶-۲) تخمین حالت‌های سیستم توسط ریتگر لیونبرگر در حالت دوم.

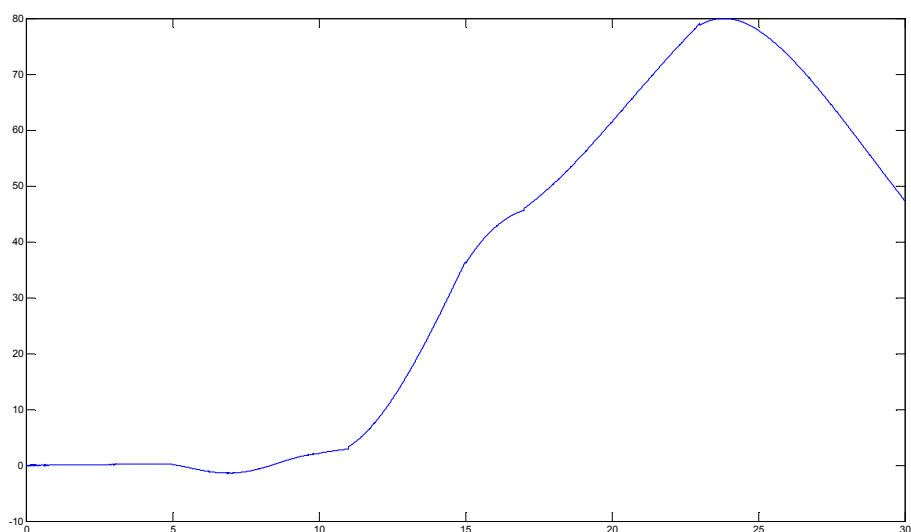


شکل (۶-۳) تخمین حالت‌های سیستم توسط ریتگر لیونبرگر در حالت سوم.

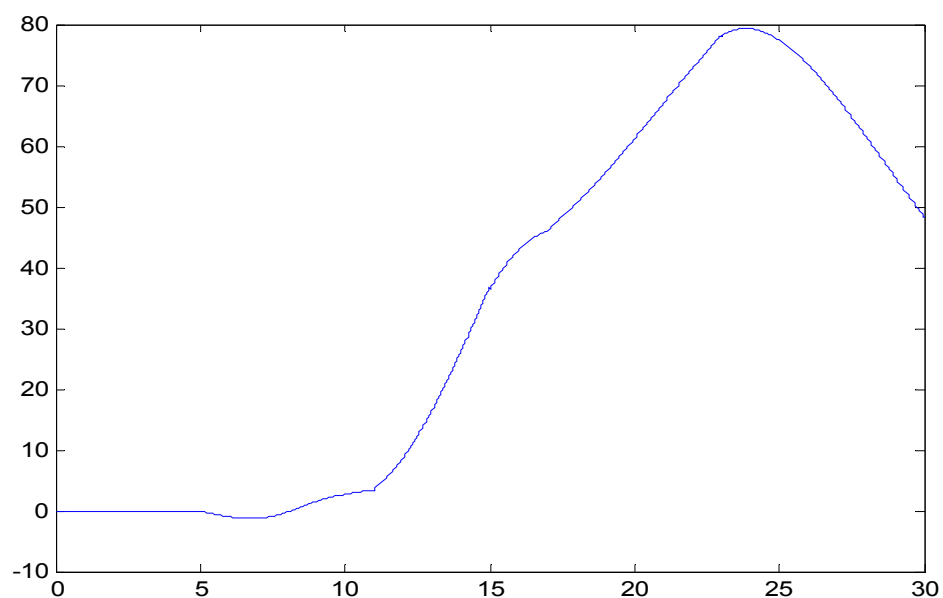


شکل (۴-۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویترگر لیونبرگر در حالت چهارم. همان‌طور که مشاهده شد این رویترگر زمانی که هیچ‌گونه خطا و اغتشاشی وجود نداشته باشد به خوبی توانایی تقریب حالت‌های سیستم را دارد، اما به محض اعمال اغتشاش و یا خطا به سیستم دیگر قادر به تقریب زدن سیستم نخواهد بود.

در ادامه توانایی این رویترگر در زمینه تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می‌گردد.



شکل (۵-۶) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



شکل (۶-۶) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

همان‌طور که در شکل‌های (۶-۵) و (۶-۶) مشاهده می‌شود، این رویتگر توانایی تشخیص خطا را ندارد.

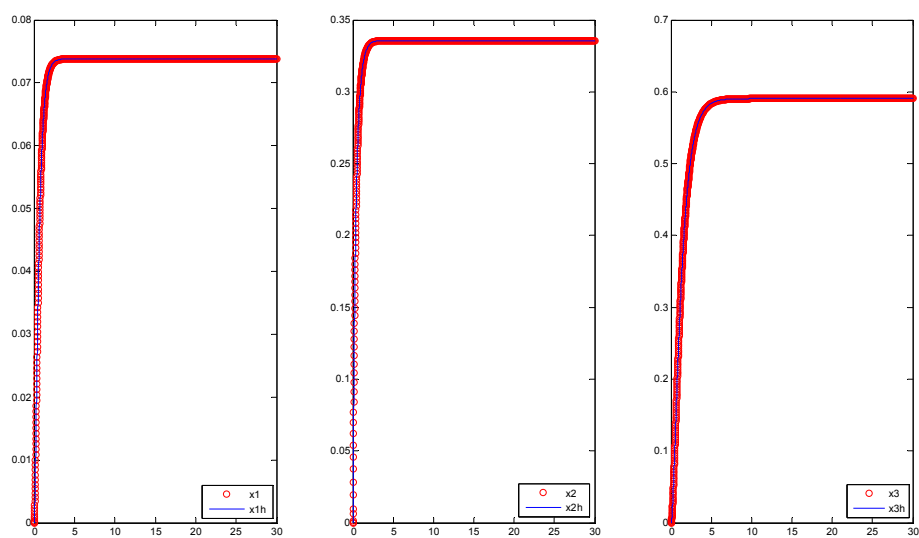
۶-۲-۲ رویتگر H_2

با استفاده از روابط بخش (۳-۵) ماتریس‌های طراحی به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند. شبیه‌سازی را در

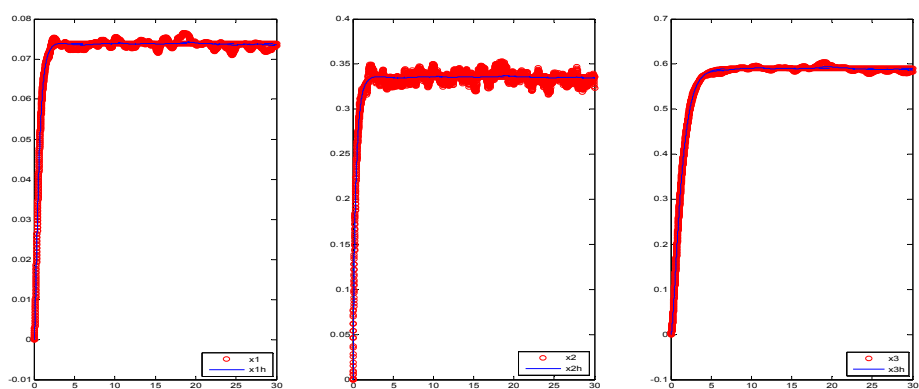
چهار حالت: ۱. عدم وجود خطا و اغتشاش ۲. عدم وجود خطا و وجود اغتشاش ۳. وجود خطا و عدم

وجود اغتشاش ۴. وجود خطا و اغتشاش انجام داده می‌شود.

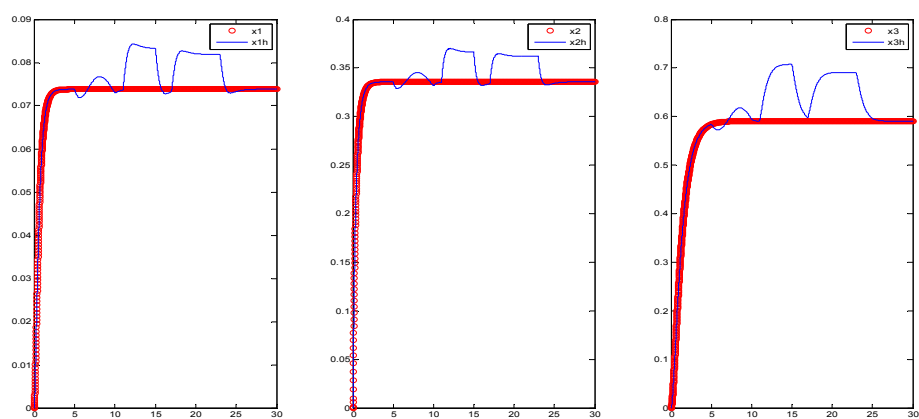
$$L = \begin{bmatrix} 0.0469 \\ 0.3565 \\ 0.2720 \end{bmatrix}$$



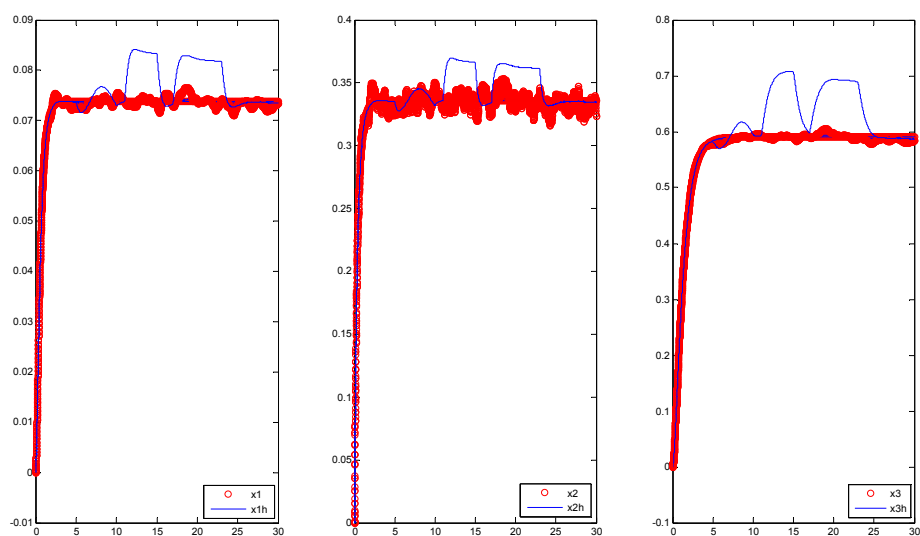
شکل (۶-۷) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_2 در حالت اول.



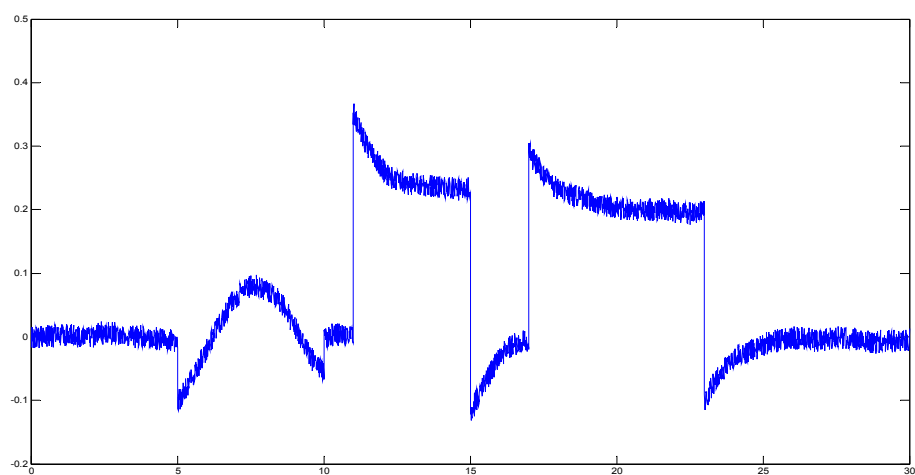
شکل (۶-۸) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_2 در حالت دوم.



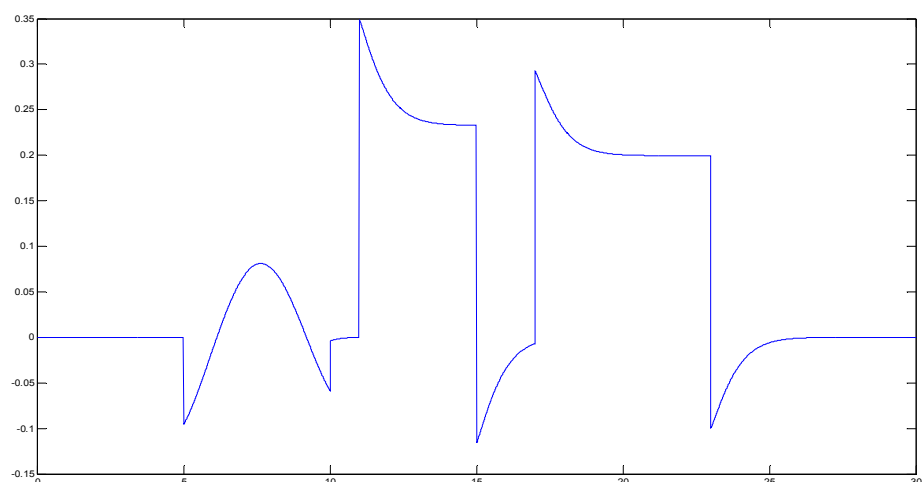
شکل (۶-۹) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_2 در حالت سوم.



شکل (۶-۱۰) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویترگر H_2 در حالت چهارم. همان‌طور که مشاهده شد این رویترگر زمانی که هیچ‌گونه خطایی وجود نداشته باشد به خوبی توانایی تقریب حالت‌های سیستم را دارد و اثر اغتشاش را تضعیف می‌کند. اما در زمان‌هایی که خطا به سیستم اعمال می‌گردد، نمی‌تواند حالت‌های سیستم را به خوبی تخمین بزند. در ادامه توانایی این رویترگر در زمینه تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می‌گردد.



شکل (۶-۱۱) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



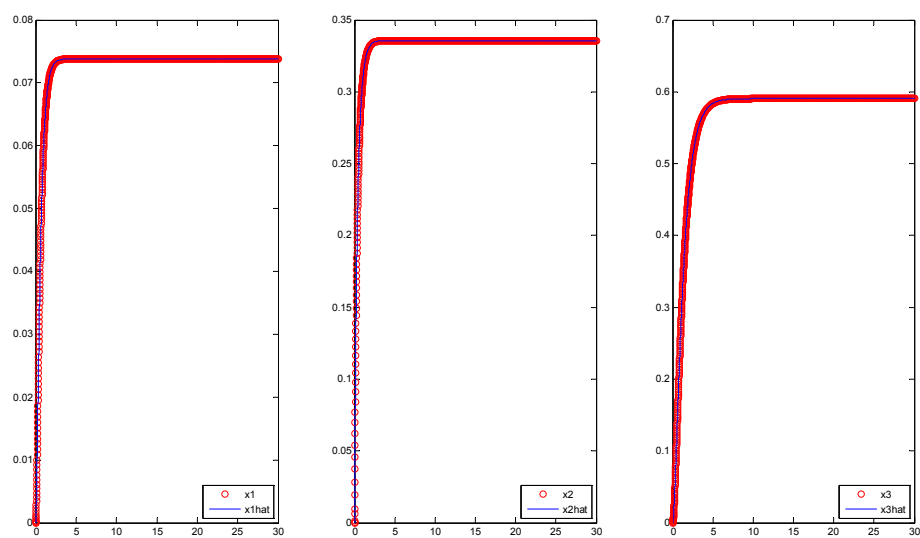
شکل (۶-۱۲) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

همان‌طور که در شکل‌های (۶-۱۷) و (۶-۱۸) می‌شود این فیلتر خطا را بی‌خوبی تشخیص نمی‌دهد. بین ثانیه‌های ۱۵ تا ۱۷ و ثانیه‌های ۲۳ تا ۲۵ خطای رخ نداده ولی اعلام می‌کند که خطا داده است.

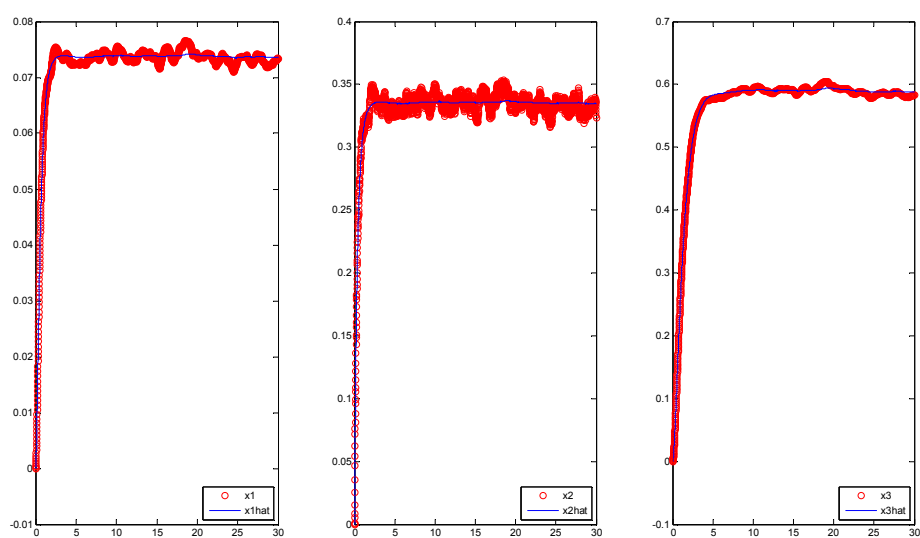
۶-۲-۳ روی‌تگر H_{∞}

با استفاده از روابط بخش (۳-۶) ماتریس‌های طراحی به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند. شبیه‌سازی را در چهار حالت: ۱. عدم وجود خطا و اغتشاش ۲. عدم وجود خطا و وجود اغتشاش ۳. وجود خطا و عدم وجود اغتشاش ۴. وجود خطا و اغتشاش انجام داده می‌شود.

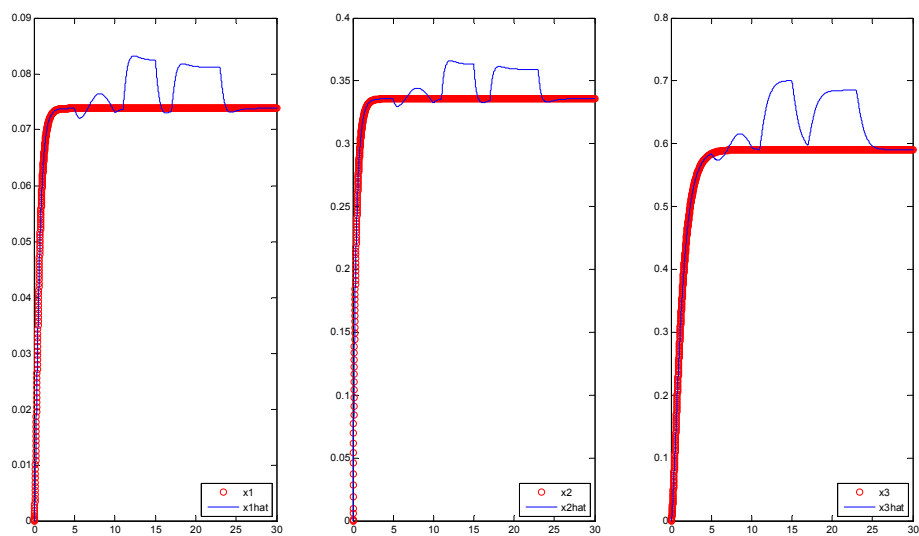
$$\gamma = 0.018, L = \begin{bmatrix} 0.0431 \\ 0.30777 \\ 0.2582 \end{bmatrix}$$



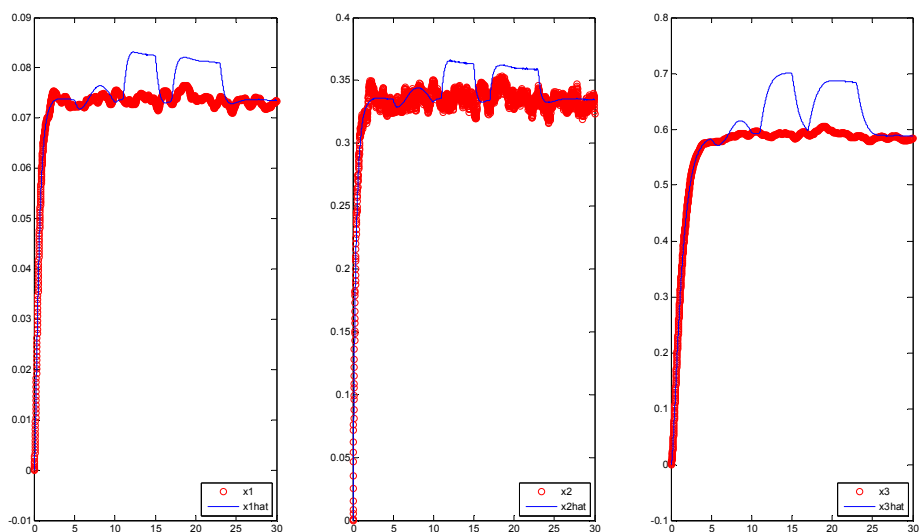
شکل (۶-۱۳) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_∞ در حالت اول.



شکل (۶-۱۴) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_∞ در حالت دوم.



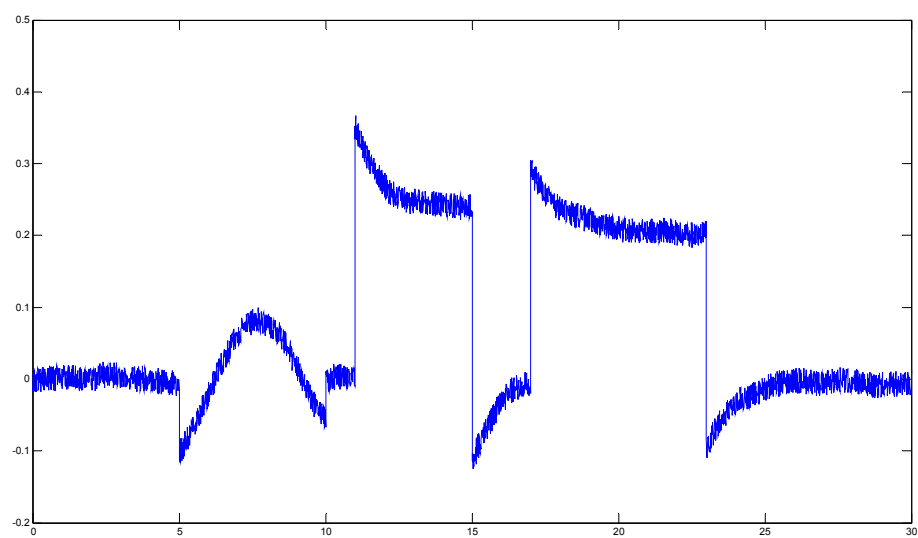
شکل (۶-۱۵) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_∞ در حالت سوم.



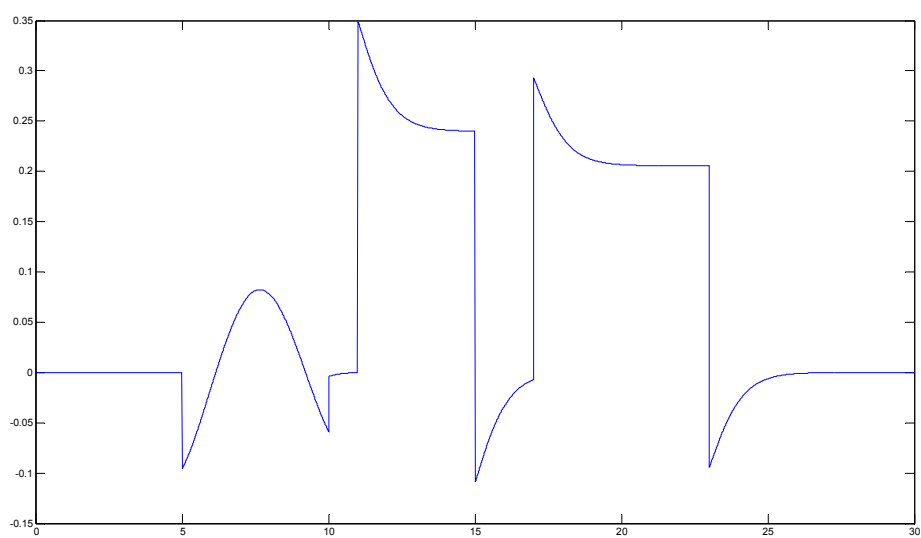
شکل (۶-۱۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_∞ در حالت چهارم.

همان‌طور که مشاهده شد این رویکرد زمانی که هیچ‌گونه خطایی وجود نداشته باشد به‌خوبی توانایی تقریب حالت‌های سیستم را دارد و اثر اغتشاش را تضعیف می‌کند. اما در زمان‌هایی که خطا به سیستم اعمال می‌گردد، نمی‌تواند حالت‌های سیستم را به‌خوبی تخمین بزند.

در ادامه توانایی این رویکرد در زمینه تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می‌گردد.



شکل (۶-۱۷) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



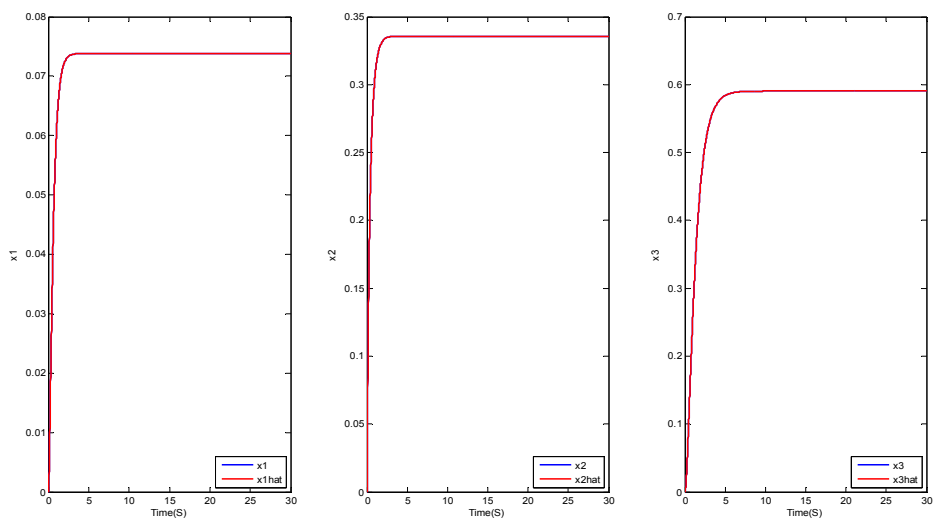
شکل (۶-۱۸) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

همان‌طور که در شکل‌های (۶-۱۷) و (۶-۱۸) می‌شود این فیلتر خطا را بی خوبی تشخیص نمی‌دهد. بین ثانیه‌های ۱۵ تا ۱۷ و ثانیه‌های ۲۳ تا ۲۵ خطای رخ نداده ولی اعلام می‌کند که خطا رخ داده است.

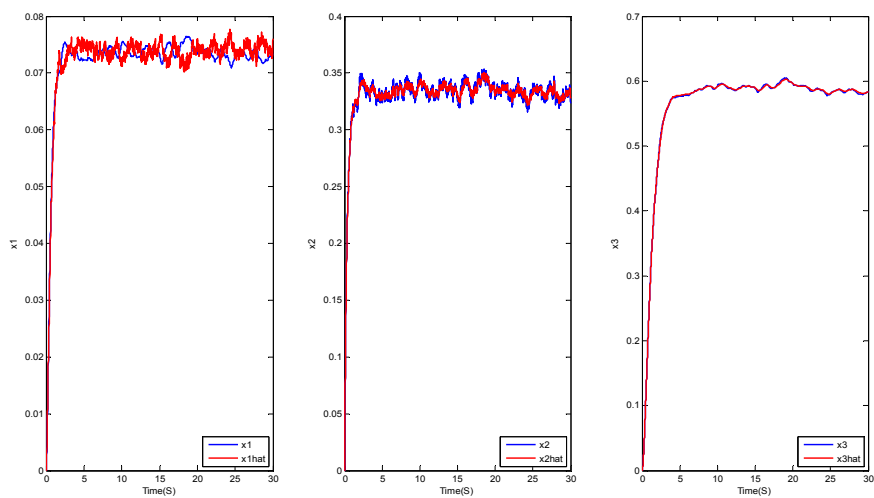
۴-۲-۶ رویتگر H_2/H_∞

با استفاده از روابط فصل چهارم ماتریس‌های طراحی به صورت زیر محاسبه می‌شوند. شبیه‌سازی را در چهار حالت: ۱. عدم وجود خطا و اغتشاش ۲. عدم وجود خطا و وجود اغتشاش ۳. وجود خطا و عدم وجود اغتشاش ۴. وجود خطا و اغتشاش انجام داده می‌شود.

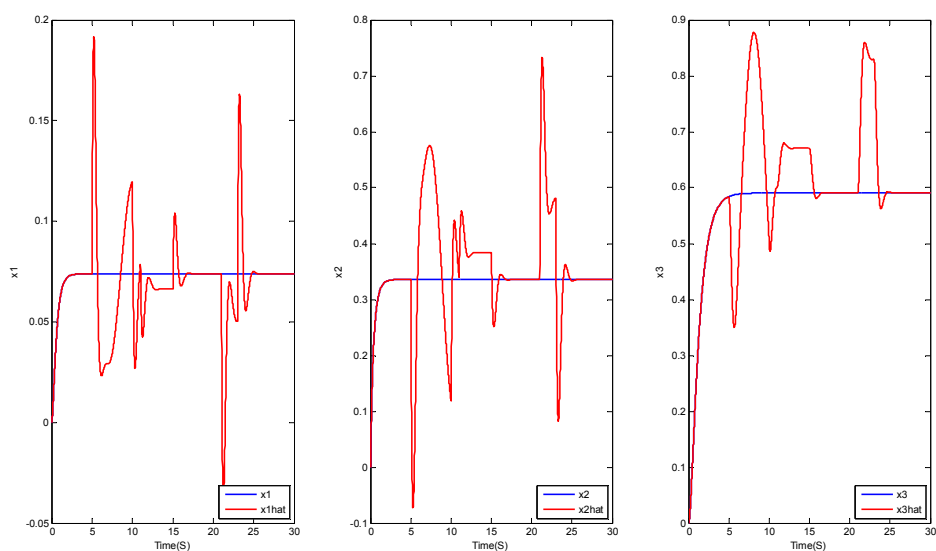
$$K = \begin{bmatrix} -3.67 & 7 & 1 \\ 1 & 00 & 34 \\ -0.1 & 8 & 66 \end{bmatrix}$$



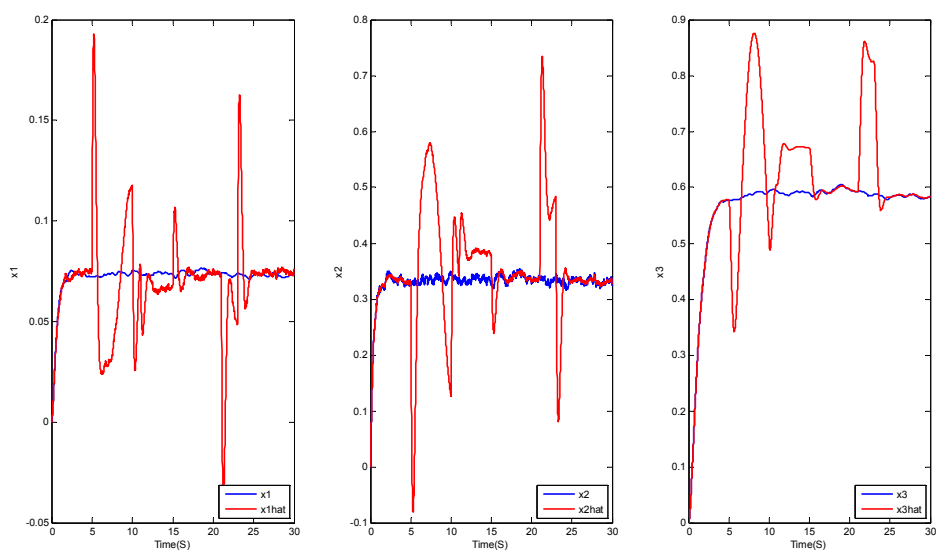
شکل (۶-۱۹) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_2/H_∞ در حالت اول.



شکل (۶-۲۰) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_2/H_∞ در حالت دوم.



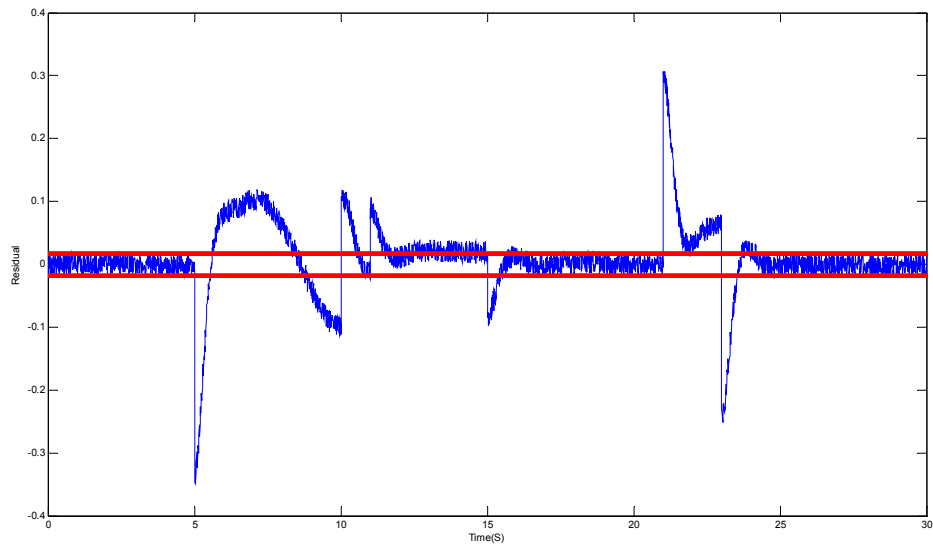
شکل (۶-۲۱) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_2/H_∞ در حالت سوم.



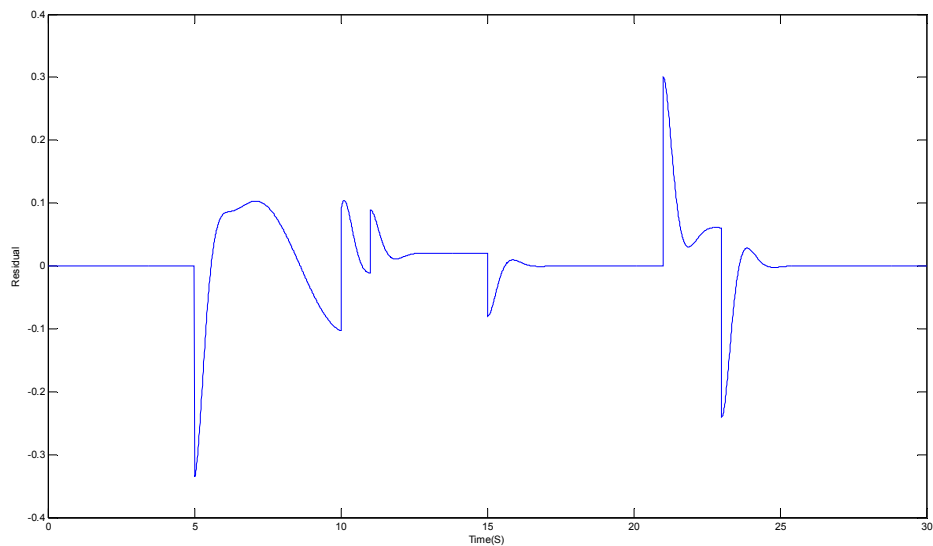
شکل (۶-۲۲) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_2/H_∞ در حالت چهارم.

همان‌طور که در شکل‌های (۶-۱۹) و (۶-۲۰) مشاهده می‌گردد این روش به‌خوبی تمامی حالت‌های سیستم را تخمین می‌زند و اغتشاش هیچ‌خللی در کار تخمین حالت‌های سیستم ایجاد نمی‌کند. اما در شکل‌های (۶-۲۱) و (۶-۲۲) مشاهده می‌شود در حضور خطا حالات سیستم را به‌خوبی تخمین نمی‌زند.

در ادامه توانایی این رویتر در زمینه تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می گردد.



شکل (۶-۲۳) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



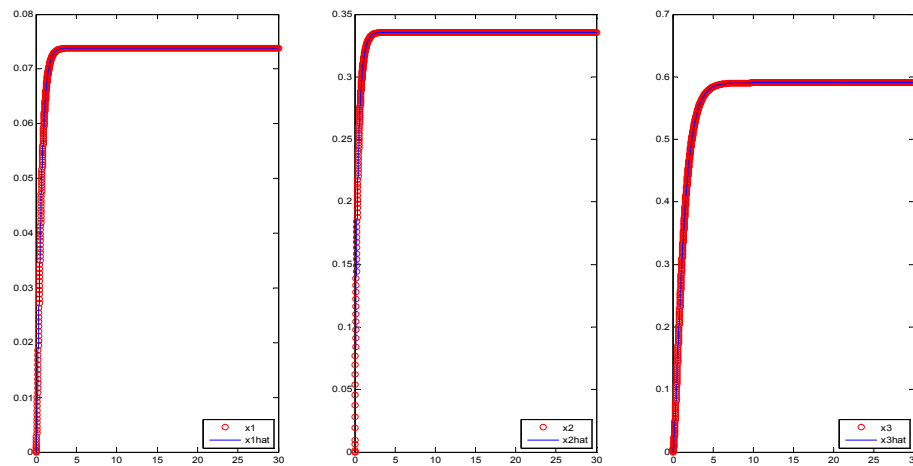
شکل (۶-۲۴) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

همان طور که در شکل های (۶-۲۳) و (۶-۲۴) می شود این فیلتر خطا را بی خوبی تشخیص نمی دهد. بین ثانیه های ۱۰ تا ۱۱ خطای رخ نداده ولی اعلام می کند که خطا رخ داده است.

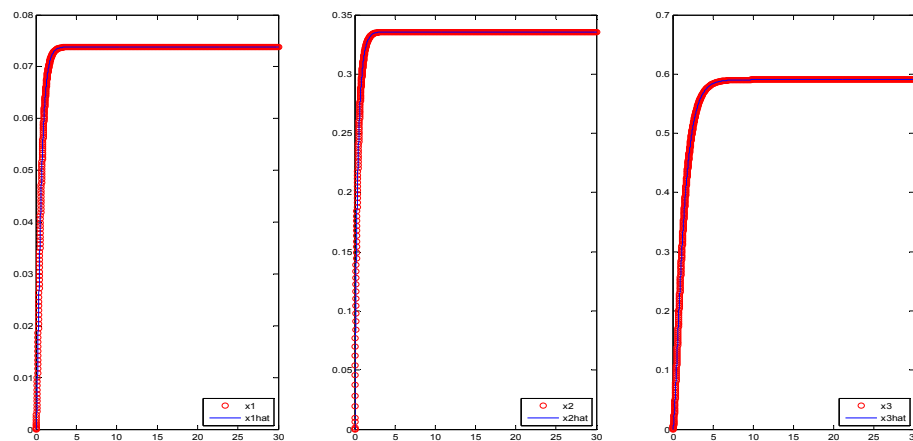
۵-۲-۶ رویتگر H_{∞}/H_-

با استفاده از روابط فصل چهارم ماتریس‌های طراحی به صورت زیر محاسبه می‌شوند. شبیه‌سازی را در چهار حالت: ۱. عدم وجود خطا و اغتشاش ۲. عدم وجود خطا و وجود اغتشاش ۳. وجود خطا و عدم وجود اغتشاش ۴. وجود خطا و اغتشاش انجام داده می‌شود.

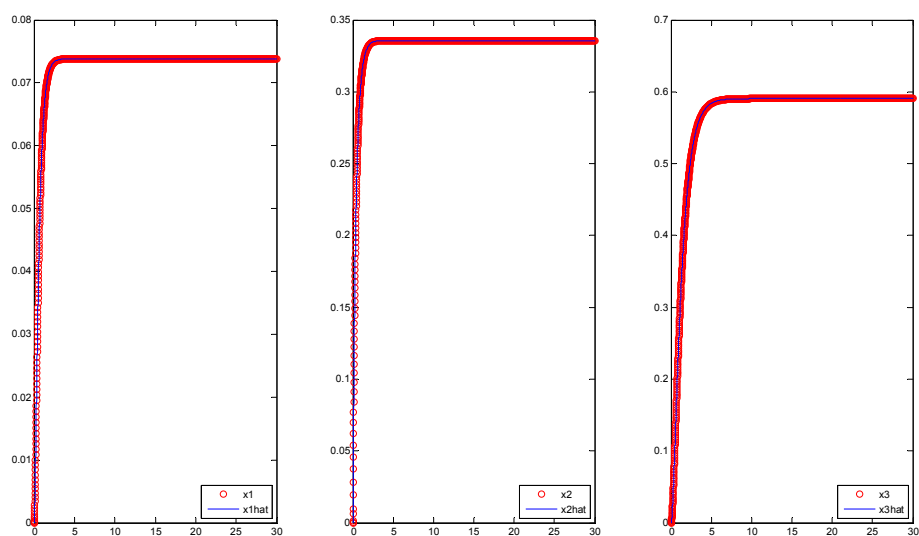
$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0.4496 \\ 1.573 \\ 1.3483 \end{bmatrix}, \quad \gamma_0 = 0.018$$



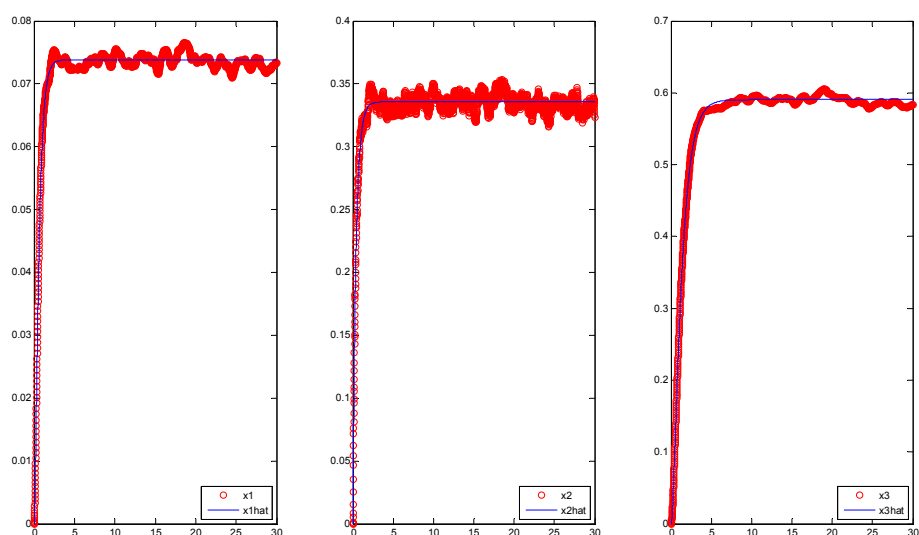
شکل (۶-۲۵) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت اول.



شکل (۶-۲۶) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویتگر H_-/H_{∞} در حالت دوم.



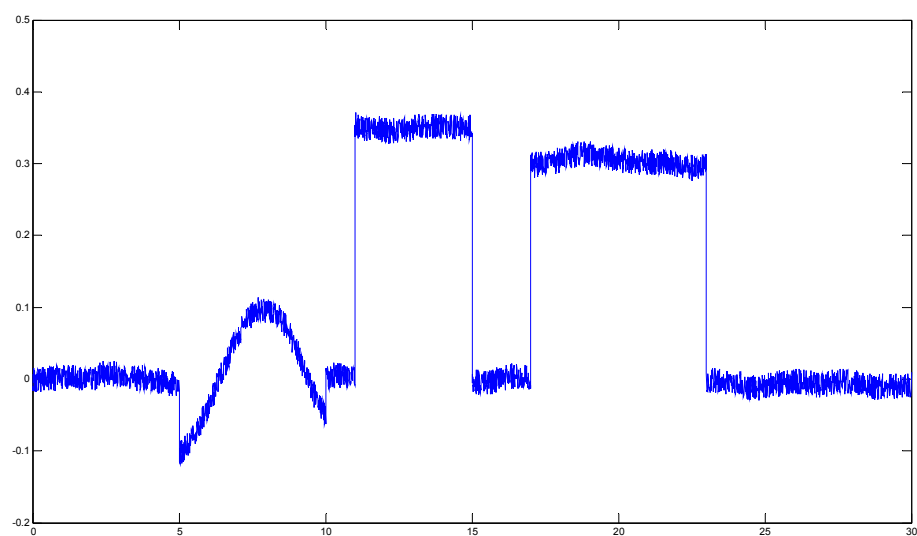
شکل (۶-۲۷) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_-/H_∞ در حالت سوم.



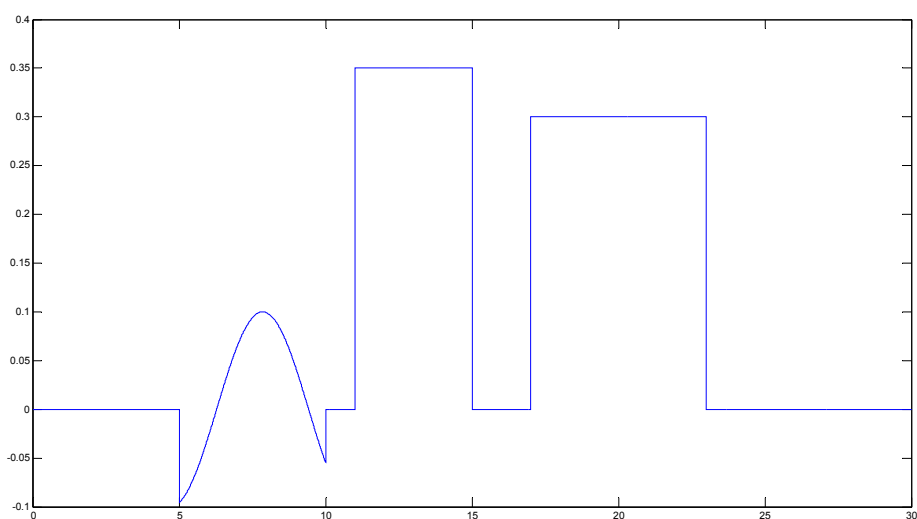
شکل (۶-۲۸) تخمین حالت‌های سیستم توسط رویکرد H_-/H_∞ در حالت چهارم.

همان‌طور که در شکل‌های (۶-۲۵) تا (۶-۲۸) مشاهده می‌گردد این روش به‌خوبی تمامی حالت‌های سیستم را تخمین می‌زند و اغتشاش و خطا هیچ خللی در کار تخمین حالت‌های سیستم ایجاد نمی‌کند.

در ادامه توانایی این رویکرد در زمینه تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می‌گردد.



شکل (۶-۲۹) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



شکل (۶-۳۰) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

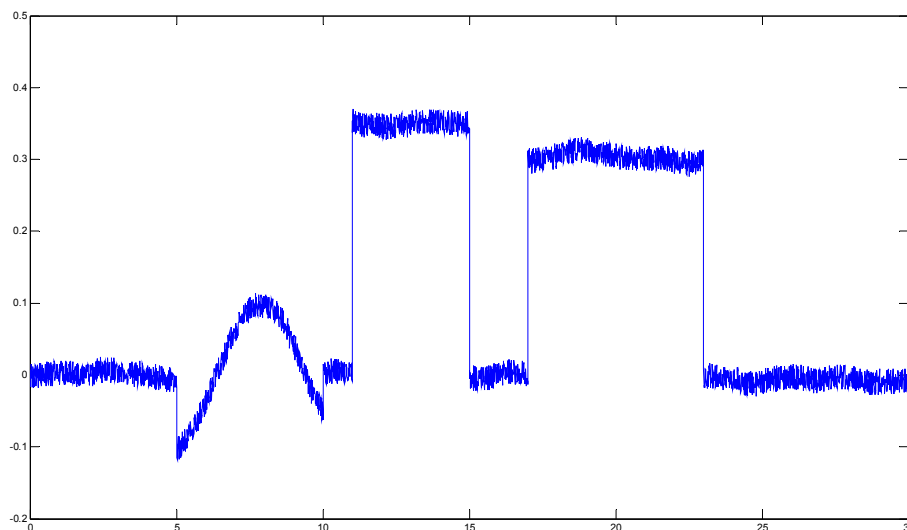
همان‌طور که در شکل (۶-۳۰) مشاهده می‌شود این فیلتر تشخیص خطا در صورتی که اغتشاش وجود نداشته‌باشد خطا و دینامیک خطا را به‌خوبی تشخیص می‌دهد و در حضور اغتشاش همان‌طور که در شکل (۶-۲۹) مشاهده می‌گردد اغتشاش را تضعیف کرده و خطا و دینامیک خطا را به‌خوبی تشخیص می‌دهد.

۳-۶ ارزیابی مقاوم بودن فیلتر تشخیص خطا H_-/H_∞ برای سیستم خطی

شده

همان‌طور که مشاهده شد فیلتر تشخیص خطای طراحی شده در حضور اغتشاش به‌خوبی سیگنال باقیمانده را تشکیل داده و اثر اغتشاش را تقریباً صفر کرده و خطا را به‌خوبی تشخیص داده‌است. در این بخش مقاوم بودن این فیلتر نسبت به تغییرات مدل بررسی می‌گردد. برای بررسی مقاوم بودن ماتریس A سیستم به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$A + \Delta A = \begin{bmatrix} -4 & 0.8796 & 0 \\ 3 & -3.6388 & 0 \\ 0 & 1.7592 & -1 \end{bmatrix}, \quad \Delta A = 0.1A$$

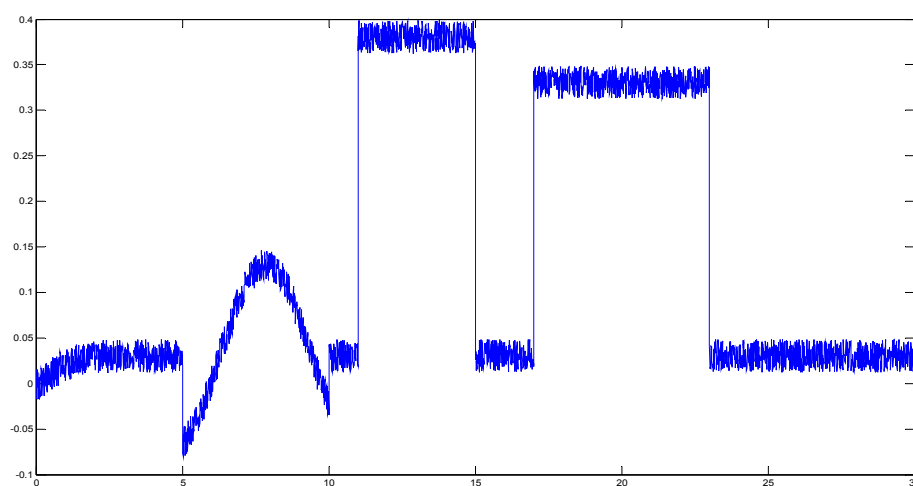


شکل (۳۱-۶) باقیمانده در حضور تغییرات پارامتری.

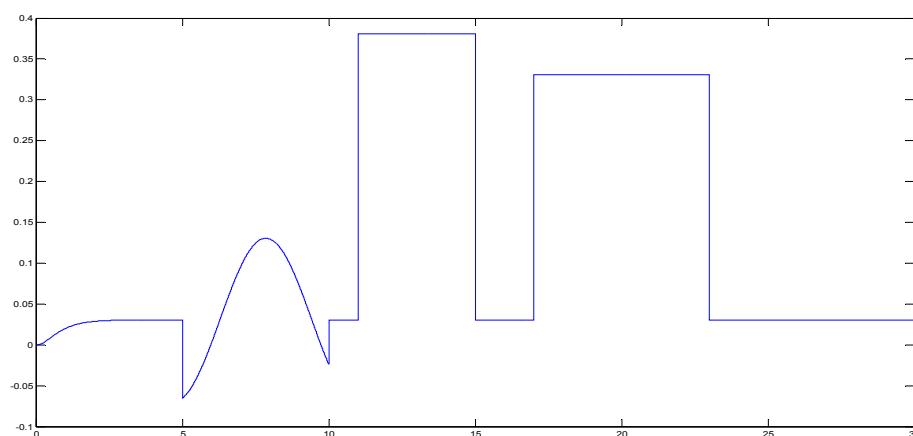
همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر تشخیص خطا به‌خوبی توانست اثر تغییرات پارامتری را حذف کند و خطا را به‌درستی تشخیص دهد.

۴-۶ تشخیص خطا برای سیستم غیرخطی به روش H_-/H_∞

همان‌طور که در بخش قبل دیده شد، مساله تشخیص خطا برای سیستم خطی شده راکتور CSTR به خوبی انجام شد. حال سیستم غیرخطی را جایگزین سیستم خطی کرده و مساله تشخیص خطا در دو حالت وجود اغتشاش و عدم وجود اغتشاش بررسی می‌شود.



شکل (۳۲-۶) سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.



شکل (۳۳-۶) سیگنال باقیمانده بدون اغتشاش.

همان‌طور که در شکل (۳۳-۶) مشاهده می‌شود این فیلتر تشخیص خطا در صورتی که اغتشاش وجود نداشته باشد خطا و دینامیک خطا را به خوبی تشخیص می‌دهد و در حضور اغتشاش همان‌طور که در

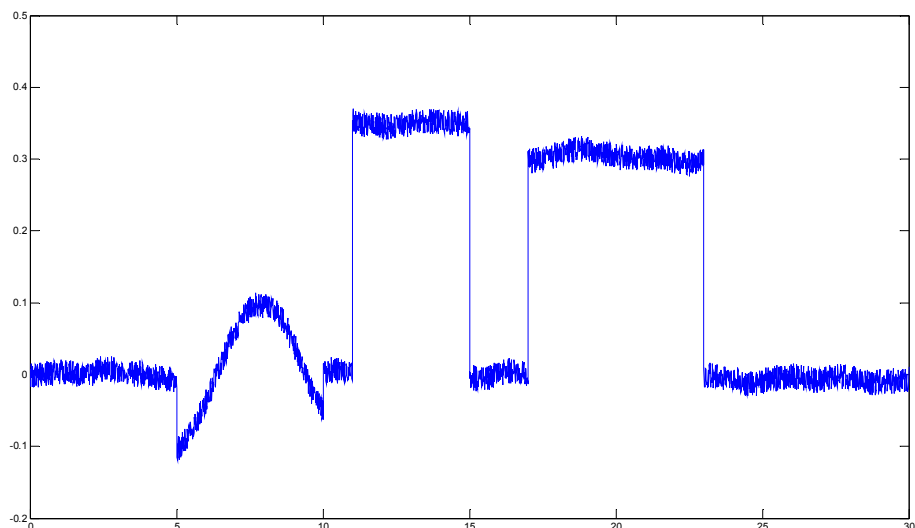
شکل (۳۲-۶) مشاهده می‌گردد اغتشاش را تضعیف کرده و خطا و دینامیک خطا را به‌خوبی تشخیص می‌دهد.

۵-۶ ارزیابی مقاوم بودن فیلتر تشخیص خطا H_-/H_∞ برای سیستم غیرخطی

همان‌طور که مشاهده شد فیلتر تشخیص خطای طراحی شده در حضور اغتشاش به‌خوبی سیگنال باقیمانده را تشکیل داده و اثر اغتشاش را تقریباً صفر کرده و خطا را به‌خوبی تشخیص داده‌است. در این بخش مقاوم بودن این فیلتر نسبت به تغییرات مدل بررسی می‌گردد. برای بررسی مقاوم بودن ماتریس سیستم به‌صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$F(x) + \Delta F(x) = \begin{bmatrix} -(1 + Da_1)\bar{x}_1 + (2Da_2x_{2D})\bar{x}_2 + (Da_2)\bar{x}_2^2 \\ Da_1\bar{x}_1 - (1 + 2Da_2x_{2D} + 2Da_3x_{2D})\bar{x}_2 - (Da_2 + Da_3)\bar{x}_2^2 \\ Da_3\bar{x}_2^2 + (2Da_3x_{2D})\bar{x}_2 - \bar{x}_3 \end{bmatrix} + \Delta F(x) ,$$

$$\Delta F(x) = 0.1F(x)$$



شکل (۳۴-۶) باقیمانده در حضور تغییرات پارامتری.

همان‌طور که مشاهده می‌شود فیلتر تشخیص خطا به‌خوبی توانست اثر تغییرات مدل را حذف کند و خطا را به‌درستی تشخیص دهد.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱ نتیجه گیری

هدف این پایان نامه طراحی رویتر H_-/H_∞ و استفاده از آن در تشخیص و جداسازی خطای مقاوم سنسور در سیستم تانک راکتور CSTR است. بعد معرفی مختصری از مفاهیم و روش های تشخیص خطا، روش های تولید باقیمانده توضیح داده شد، سپس به معرفی ساختار شش رویتر تشخیص خطا با تاکید بر تشخیص خطای مقاوم پرداخته شده است. موثر بودن تشخیص خطای مقاوم مبتنی بر رویتر در تصاویر شبیه سازی شده نشان داده شده است. همانطور که در شبیه سازی ها مشاهده شد رویترهای H_2 و H_∞ و H_2/H_∞ به خوبی قادر به تشخیص خطا نیستند.

در این تحقیق مشاهده شد که طراحی رویتر H_-/H_∞ پیچیده تر است اما در مقابل اغتشاش مقاوم تر است و خطا را به خوبی تشخیص می دهد. رویتر H_-/H_∞ در برابر عدم قطعیت مدل مقاوم است.

طراحی رویتر H_-/H_∞ که برای سیستم خطی شده انجام شده بود، بر روی سیستم غیرخطی پیاده سازی شد. همان طور که در شبیه سازی ها نشان داده شده است، این رویتر توانست به خوبی خطای اعمالی به سیستم غیرخطی را هم تشخیص دهد و اثر اغتشاشات را تضعیف کند. مقاوم بودن این رویتر در برابر تغییرات مدل بررسی شد، همان طور که در شبیه سازی ها نشان داده شده است در این رویتر در برابر تغییرات مدل مقاوم است.

۷-۲ پیشنهادات

مساله ی تشخیص خطای مقاوم یکی از موضوعات بسیار مهم دنیای صنعتی امروز می باشد که همچنان جای تحقیقات بسیار گسترده ای دارد و اقدامات بسیار زیاد دیگری در این زمینه می توان انجام داد. در ادامه چند پیشنهاد برای بهبود کار ارائه می گردد.

۱. بررسی و مقایسه معیارهای دیگر از قبیل H_2/H_∞ ، H_2/H_2 و H_∞/H_∞ .

۲. استفاده از الگوریتم های هوشمند و ترکیب آن با روش H_-/H_∞ .

۳. طراحی یک رویتگر غیرخطی برای تشخیص خطای سیستم‌های غیرخطی.

منابع

- [۱]. شبیرطیسی (۱۳۹۲) "تشخیص خطای مقاوم سنسور مبتنی بر مشاهده‌گر روی مدل توربین گازی" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [2] M. Siah, (2009) PhD. thesis'' Fault Tolerant Control Systems, case study Unmanned Aircraft'' Faculty of Electrical and Robotic Engineering.
- [3] V.Venkatasubramanian, R.Rengaswamy,K.Yin,S.N.Kavuri (2003) "Areview of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods" Computers and Chemical Engineering 27 (2003) 293/311
- [4]I.Hwang, S.Kim, Y.Kim, C.E.Seah(2010) " A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods" IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 18, NO. 3, MAY 2010
- [5] C.Ye D.Zhang, P.P.Lin (2009) " Fault Diagnosis by an Observer-Based Fuzzy Decision" International conference on Inteligent Human-machine Systems and Cybernetics.
- [6] I .Samy, I .Postlethwaite, and Gu D.(2011) " Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes" Control Engineering Practice 19 (2011) 658–674.
- [7] J.Ma, J.Jiang (2011) " Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: A review "Progress in Nuclear Energy 53 (2011) 255e266.
- [8] M.Fang,Y.Tian, L.Gao (2007)" Fault diagnosis of nonlinear system based on generalized observer "Applied Mathematics and Computation 185 (2007) 1131–1137
- [9] A. Laszlo (2003) "A generalization of the bounded real lemma "Linear Algebra and its Applications 372 (2003) 79–103.
- [10] R.isermann (2005) " Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications "Annual Reviews in Control 29 (2005) 71–85
- [11] E.sobhani-Tehrani, K.Khorasani,(2009) " Fault Diagnosis of Nonlinear Systems Using a Hybrid Approach "Springer Scince+Business Media LLC.

- [12] Y. Zhou, J.Hahn, M. Sam Mannan "Fault detection and classification in chemical processes based on neural networks with feature extraction" ISA Transactions 42 ~2003! 651–664
- [13] T.Hofling , R.Isermann (1996) "fault Detection Based on Adaptive Parity Equations And Singele-Parametr Tracking" control Eng.Practice,Vol.4 , No 10,pp.1361-1369,1996
- [14] Z.Gao, B.Jiang (2008)" Delay-dependent Robust Fault Detection for a Class of Nonlinear Time-delay Systems" College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R. China
- [15] W.Li, S.Sha(2002) " Structured residual vector-based approach to sensor fault detection and isolation" Journal of Process Control 12 (2002) 429–443
- [16] S.Hua,C.W.Chan,Z.H.Yue (2006) " Fuzzy Parity for fault detection and Identification of nonlinear systems" IFAC Fault Detection,supervision and safety of Technical Processes,Bejiang 2006
- [17] A. Zakharov, V.M.Tikkala, S.L.Jamsa-Jounela (2013) "Fault detection and diagnosis approach based on nonlinear parity equations and its application to leakages and blockages in the drying section of a board machine"Journal of Process Control 23 (2013) 1380– 1393
- [18] U. Sabura Banua, G. Umab (2011) "ANFIS based sensor fault detection for continuous stirred tank reactor" Applied Soft Computing 11 (2011) 2618–2624
- [19] V.Puig, J.Quevedo (2002)" Passive robust fault detection using fuzzy parity equations" Mathematics and Computers in Simulation 60 (2002) 193–207
- [20] S.Simani, C.Fantuzi, J.Patton (2002)."Model-based Fault Diagnosis in Dynamic System Using Identification Techniques" Springer-Verlag Berlin
- [21] Z.Gao, B.Jiang (2008)" Delay-dependent Robust Fault Detection for a Class of Nonlinear Time-delay Systems"College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P.R.China
- [22] E.G.Collins, T.song (1999) "Multiplier-Based, Robust H_{∞} Estimation with Application to Robust Fault Detection"Proceedings of the American Control Conference San Diego, California June 1999
- [23] M.L.Visinsky (1991) M.S Thesis "Fault Detection and Fault Tolerance Methods for

Robotics"Rice University

[24] R.Patton, S.Kengeth (1988) " Robust Fault Diagnosis using Model-Based Approach" Condition Monitoring and Failure Diagnosis IEE colloq pp2/1213.

[25] T.Dalton, R.Patton, J.Chen (1996), " An Application of Eigenstructure Assignment to Robust Residual Design for FDI" UKACC 1,pp78-83.

[26] I.Fliss, M.Tagina (2010) "MULTIPLE FAULTS FUZZY DETECTION APPROACH IMPROVED BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION"8th International Conference of Modeling and Simulation - MOSIM'10 - May 10-12, 2010 - Hammamet – Tunisia "Evaluation and optimization of innovative production systems of goods and services"

[27] L.Liu (2006) PhD.Thesis, "Robust Fault Detection and Diagnosis for Permanent Magnet Synchronous Motors"Florida State University

[28]C.Kravaris, S.Palanki (1988) " Robust Nonlinear State Feedback Under Structured Uncertainty" AICbE Journal Vol. 34, No. 7

[29]P.M. Frank and X. Ding. " Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems "J. Proc. Cont., 7(6):403–424, 1997.

[30] R.Iserman, (2006) "Fault Diagnosis System, An Introduction From Fault Detection to Fault Tolerance", Springer-Verlag Berlin Hiedelberg

[۳۱] امیرآبادی، خ.زارعی، م.ع.صنیدزاده (۱۳۸۹) "تشخیص و شناسایی خطا در سیستم سوزن با روشا لگوریتم فازی" مجله مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره اول.

[32] M.Abid (2010) PhD. Thesis " Fault detection in nonlinear systems: An observer-based approach"Universit`at Duisburg-Essen

[33] R.V. Beard. "Failure accommodation in linear systems through self-reorganization" . PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1971.

[34] J.Zhang M.S Thesis (2009) "evaluation of observer structure with application tp fault detection "Northeastern University

[35] K. Zhou and J. Chen."Performance bounds for coprime factor controller reductions."Systems & Control Letts. , 26(2):119–127, 1995.

[36] P.M. Frank and X. Ding."Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis". Automatica, 30(5):789–804, 1994.

- [37] Z.hang, I.M.Jaimoukha (2011) "An optimal solution to an H_2/H_∞ fault detection problem" 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, December 12-15, 2011
- [38] R.J. Patton, P.M. Frank, and R.N. Clark (eds). "Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems". Springer, 2000.
- [39] M. Hou and R.J. Patton."An LMI approach H_2/H_∞ fault detection observers". In UKACC International Conference on Control. '96, pages 305–310, England, 1996.
- [40] F. Rambeaux, F. Hamelin, D. Sauter. "Optimal thresholding for robust fault detection of uncertain systems". Int. J. Robust & Nonlinear Control, 10:1155–1173, 2000.
- [41] R.J. Patton and M. Hou."On sensitivity of robust fault detection observers". In Proceedings of the 14th IFAC world congress, pages 67–72, Beijing, China, 1999.
- [42] K. Zhou, J.C. Doyle, and K. Glover."Robust and Optimal Control".Prentice-Hall Inc., NJ, 1996.
- [۴۳] چ.مورتیمر، ترجمه ع.یاوری (۱۳۸۳) "شیمی عمومی ج. دوم" نشر علوم دانشگاهی.
- [44] J.Faulk " Concise Encyclopedia of Chemistry"New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-143953-6.
- [۴۵] م.جعفری نصر، ا.اقبال حامد (۱۳۸۹) "مدل سازی واکنش شکست کاتالیزی سیال بستر و بررسی پارامترهای فرایندی در تولید بنزین" مجله مهندسی شیمی ایران.
- [۴۶] ا.لونسپیل ترجمه م.سهرابی (۱۳۸۴) " طراحی راکتورهای شیمیایی " جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [47] R.H.Perry, D.W.Green (1984) " InPerry's Chemical Engineers' Handbook"vol. 2 And vol.1 .McGraw-Hill.
- [48] E.Ludwi (1984) "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants"vol. 2. Gulf Professional Publishing.
- [49] M.G.Fontana (1986) " Corrosion Engineering" New York: McGraw-Hill.
- [50]M.K.Stenstrom,D.Rosso (2003) "Fundamentals of Chemical Reactor Theory" University Of California Los Angeles.

[۵۱] و.هویل، ترجمه م.محسن نیا(۱۳۸۳) "واحدهای نیمه صنعتی و بزرگسازى فرآیندهای شیمیایی" انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[52] F.Ullmann (2011) "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry" vol.B4, John & Sons.

[53] C.J.Metcalf, J.F.Richardson (1994) "In Coulson & Richardsons Chemical Engineering" vol.3. Chemical and Biochemical Reactors & Process Control. Elsevier.

[54] J.zarei, J.Poshtani (2011) " SENSOR FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS OF A PROCESS USING UNKNOWN INPUT OBSERVER"Mathematical and Computational Applications, Vol. 16, No. 1, pp. 31-42, 2011.

[55] S.Ding (2008) " model based fault diagnosis techniques design schemes algorithms and tools"Springer-Verlag Berlin.

[56] K.zhou (1999) "Essential Of Robust Control" Prentice Hall.

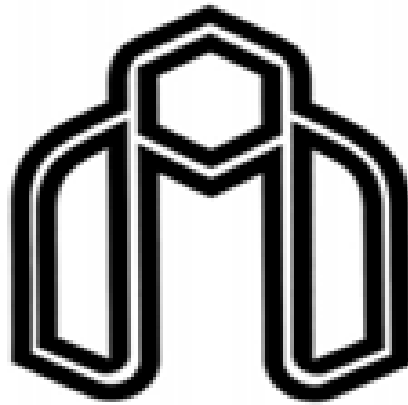
[57] M.J.Khosrowjerdi, R.Nikoukhah, N.safari-shad (2003) "Fault Detection in a Mixed H_2/H_∞ Setting" Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and control Maui,Hawaii USA,December 2003.

[58] Z.Li, E.Mazars, I.Jaimoukha " State Space Solution to the H_-/H_∞ Fault Detection Problem" This work has been partially supported by the Ministry of Defence through the Data & Information Fusion Defence Technology Centre.

Abstract

In this thesis, an optimal solution H_-/H_∞ to the problem of fault detection in non-linear time invariant systems is presented. First, the basic concepts of fault and fault types are defined. Then a formulated performance index based on H_-/H_∞ is presented to minimize the effects of disturbance, and maximize the fault impact on the residual fault signal. Then an optimal filter to solve the fault problem by H_-/H_∞ method, via optimized LMI problem solving method is designed for tank reactor systems CSTR. Afterwards the simulation results are compared with other methods based on the observer such as Lunberger observers, H_2 , H_∞ and H_2/H_∞ .

Key words: Fault Detection, H_2 , H_∞ , H_2/H_∞ , H_-/H_∞ , sensor Fault Detection, CSTR Reactor, Robust Fault Detection



Shahrood University of Technology
Faculty of electrical and robotic engineering

Robust H_{∞} Optimization Fault Detection Of Batch Polymerization Reactor

Ali Rohani Bastami

Supervisor:

Mohammad Ali Sadrniya

Advisor:

Ali Karami Molaei

Date: September 2014