

DINAMIKUS RENDSZEREK HIBÁINAK DETEKTÁLÁSA: ÁLLAPOTBECSLÉSTŐL A KÖZVETLEN INPUT REKONSTRUKCIÓS MÓDSZEREKIG

Dr. Edelmayer András
a műszaki tudomány kandidátusa
Ph.D.

FAULT DETECTION IN DYNAMIC SYSTEMS:
FROM STATE ESTIMATION TO DIRECT
INPUT RECONSTRUCTION METHODS

MTA
Doktori Értekezés Tézisei

Budapest
2005

Dr. András Edelmayer
Systems and Control Laboratory
Computer and Automation Research Institute
Hungarian Academy of Sciences
H-1111 Budapest, Kende u. 13-17.
Hungary

Original title in English:

*Fault Detection in Dynamic Systems:
From State Estimation to Direct Input Reconstruction Methods*

Typesetting in $\text{\LaTeX}2_{\epsilon}$: camera ready by the author

I. BEVEZETÉS

AZ OLVASÓ ÁLTAL KÉZBEN TARTOTT TÉZIS ÖSSZEFOGLALÓ összeállításával szerző célja az volt, hogy áttekintést adjon azokról az eredményekről, amelyek a műszaki tudomány kandidátusa cím, illetve a Ph.D. fokozat megszerzése (1994) óta eltelt évek során a dinamikus rendszerek hibadektálási módszereinek kutatása területén, szerzőnek tulajdonítható módon, az MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Irányítás-elméleti Kutató Laboratóriumában létrejöttek. Ennek során a bevezetőben először röviden meghatározzuk magát a kutatási területet, áttekintjük a vonatkozó tudományos előzményeket, ismertetjük a kutatási célkitűzéseket és azok módszereit, majd az új tudományos eredményeket külön fejezetben összefoglalva, megadjuk azokat a téziseket, amelyek szerző elmúlt kutatási időszakának a legfontosabb eredményei. Mindennek során különös figyelmet szentelünk a kapott eredmények nemzetközi vonatkozásainak. Az eredmények széleskörű nemzetközi elfogadottsága jellemzésére mellékeljük a szerző jelen tematikus összefoglalóban szereplő eredményeire vonatkozó publikációs listáját az SCI[©] irodalom hivatkozási rendszer normái szerint vett hivatkozási és impakt faktor adatok megadásával.

A KUTATÁSI TERÜLET MEGHATÁROZÁSA

A korszerű ipari technológiai folyamatok és rendszerek szerkezeti és működésbeli bonyolultságának növekedésével a modern technológia egyre növekvő számban hoz létre olyan, jellemzően nagy anyagi értéket képviselő dinamikus rendszereket, amelyekben a működés biztonsága és a rendszer funkcionalitásának tartós fenntartása (megbízhatóság) gyakran mindenek felett álló tervezési szempont. Érthető módon, a rendszerek által tartalmazott összetevő-elemek, szenzorok és beavatkozó szervek számának növekedésével, az elemek kölcsönhatásának mind bonyolultabbá válásával, egyre nagyobb figyelmet kell szentelni azok megbízható működésének. Különösen igaz ez az olyan, nagy működési kockázattal járó helyeken, mint a repülőgépek és űreszközök irányítása, a nukleáris és vegyipar veszélyes folyamatai vagy a jármű és autóipar, ahol adott esetben emberéletek, jelentős anyagi értékek, s nem utolsósorban a természeti környezet biztonsága forog kockán.

A modern társadalmakban biztonság és megbízhatóság (security and safety) elsőrendű prioritás fogalomná vált, amelynek számos szociális és gazdasági kihatása körvonalazható. Számos területen az ebbe a kategóriába tartozó rendszerek tervezésére, üzembeállítására és üzemeltetésére szigorú, nemzetközi egyezményekkel szabályozott biztonsági előírások vannak érvényben, ld. pl. a vasút és repülésbiztonságot befolyásoló rendszerek, vagy a nukleáris ipar minősített alkalmazásai. Érthető tehát az a nagy érdeklődés, ami az elmúlt tizenöt-húsz évben a nagy biztonsági igényű és nagy-megbízhatóságú rendszerek iránt az irányításelméleti kutatásokban világszerte megmutatkozott.

A mérnöki gyakorlatban nem ismeretes az abszolút biztonság és abszolút megbízhatóság fogalma. E rendszertulajdonságok mindig csak valamilyen valószínűségi értelemben jellemezhetők (a megbízhatóság pl. a funkcionalitás fenntartásának valószínűsége), amelyeknek mérnöki eszközökkel történő biztosítása pénzbe kerül. A technológiai fejlettség egy adott színvonalán a biztonsági mutatók egységnyi javítása csak a költségráfordítások nemlineáris növelése mellett valószínűsíthető meg: a biztonságnövelés hangsúlyozottan költségérzékeny gazdálkodási kategória.

Egy adott alkalmazásban a biztonsági követelmények túl alacsony, vagy ésszerűtlenül magas szinten történő specifikálása a termék versenyképességét veszélyezteti. A mérnöki tervezési gyakorlatban a biztonság tervezésének problémája ezért általában egy olyan kockázat minimalizálási problémaként merül fel, amelyben az adott alkalmazásra megkövetelt biztonsági mutató adott költségszinten való realizálhatóságának meghatározása a cél.

A BIZTONSÁGI KÖVETELMÉNYEK KIELÉGÍTÉSÉNEK MÓDSZEREI — A megkövetelt biztonsági és megbízhatósági mutatók kielégítésére kialakult módszereket az irodalom hagyományosan két fő csoportba ún. *aktív* és *passzív* módszerek közé sorolja. A rendszerek létrehozása során követett biztonsági szempontú tervezési és kivitelezési elvek, mint pl. amelyek a rendszer specifikációjából a részletes termék-funkció analízis segítségével lehetővé teszik minden olyan felesleges alkatelem eltávolítását, amelyek a meghibásodások lehetőségét potenciálisan magukban hordozzák, vagy a konstrukcióban felhasznált alkatrészekre felállított minőségbiztosítási követelményrendszer, passzív biztonságnövelő eljárások. A lehetséges veszélyforrások számának csökkentése, a meghibásodásokból és a hibák továbbterjedéséből származó biztonsági kockázatok minimalizálása, vagy a rendszer olyan implicit konfidencia mutatóinak, mint a rendszer megismerhetőségére és determinisztikus működésére vonatkozó feltételek tudatos kiépítése is mind-mind olyan passzív biztonságnövelő módszerek, amelyek a rendszer funkcionalitásába beépülve a termék teljes életciklusára kihatással befolyásolják annak megbízhatóságát és biztonsági mutatóit.

Ezzel szemben az aktív eljárások a rendszer üzeme során fellépő hibák felderítésére, megszüntetésére és eltávolítására (fault removal) adnak módszereket. Ezen eljárások közé tartoznak a hibatűrő architektúrák, a különféle on-line funkció és ön-teszt módszerek alkalmazása, a hibadetektálás és diagnosztika.

Szerző jelen tézisekben összefoglalt, alap kutatás jellegű tudományos tevékenysége a hibadetektálás és diagnosztika elméleti módszereivel kapcsolatban ad új eredményeket.

A korai hibafelismerő és műszaki diagnosztikai rendszerek alkalmazásának legfőbb célja, hogy a hibákat még kialakulásuk kezdeti fázisában azonosítani tudjuk: akkor, amikor a folyamatok leterhelésével, szabályozott leállításával vagy átkonfigurálásával, a végletes következményekkel járó hatások még jó valószínűséggel elkerülhetők. A hibatűrő irányítási rendszerek elmélete és mérnöki gyakorlata szorosan kapcsolódik ehhez a területhez. Nem kevésbé fontos a hibák korai detektálásra és lokalizálására alkalmas módszerek azon szerepe, amelyet a működésben megmutatkozó káros rendszer megváltozások időbeni kimutatásával, a megelőző intézkedések tervezhetővé tételével a tervszerű karbantartásban játszik. Az üzemeltetett rendszerek értékének növekedésével ez a fajta szerep a korszerű vállalat management egyre fontosabb elemévé válik.

A HIBADETEKTÁLÁS ÉS DIAGNOSZTIKA ELLENTMONDÁSOS HELYZETE — Mindazonáltal, a problématerület helyzete, különösen ha az elmúlt időszakban kidolgozott nagy-

számú elméleti módszer gyakorlati felhasználásának elterjedtségét a nagy nemzetközi kutatási erőfeszítések tükrében tekintjük, ennél sokkal ellentmondásosabb.

A hibadetektálási és diagnosztikai rendszerek kutatásának eredményei hagyományosan olyan módszerek és eljárások megalkotásában manifesztálódtak, amelyek a rendszerek egy különálló funkciójaként voltak realizálhatók. A klasszikus megközelítés szerint a detektálás és diagnosztika egy a termék életciklusa során bármikor pótlólag a rendszerbe integrálható ‘*add-on*’ funkció.

Ez a szemléletmód a korszerű termék-management ár/érték/funkció-orientált szemléletmódjával számos pontban kerül ellentmondásba. Míg a biztonsági, biztonságossági szempontok érvényesítésének, így a hibadetektálás és műszaki diagnosztika alkalmazásának *látható* költségei vannak, addíg az alkalmazásuktól remélhető gazdasági előnyök nem annyira nyilvánvalóak. Úgy mondhatjuk, hogy a hibadetektálás és diagnosztika nem tartozik a rendszer elsőrendű működési funkciói közé: – egy jól megtervezett berendezés nyilvánvalóan működőképes hibadetektálás és diagnosztika nélkül is. Egyrésről ezért a felhasználó nincs motiválva olyan funkciók létesítésében, amelyekből nem származik nyilvánvaló számszerűsíthető haszna, ám az számára egyértelműen költségtényezőként jelentkezik, másrésről a gyártó sem érdekelt olyan járulékos funkciók implementálásában, amely szükségszerűen a termék árának növekedéséhez vezet, de nem jár a vevő vásárlásra ösztönző funkcióbővítéssel. A biztonság ‘*add-on*’ funkcióként történő “eladása” nem könnyű feladat a profit maximalizálására törekvő gazdasági struktúrákban.

Ezen ellentmondásos helyzet megmagyarázására látszólag még az olyan statisztikai adatok is kíválóan alkalmasak, mint amelyek a veszélyes technológiák üzemeltetése során bekövetkezett balesetek okainak megoszlását szemléltetik. A Boeing repülőgépgyár által közölt adatok szerint pl. a repülőgép balesetek több mint 80%-át emberi mulasztás és nem műszaki hiba okozza. Hasonló adatok hozhatók fel a nukleáris iparban ismertté vált súlyos minősítésű balesetekkel kapcsolatban is. Erre való hivatkozással mind a gyártók, mind a felhasználók sokkal inkább érezték magukat motiválva az emberi tényező kezelésében, mintsem a megbízhatósági mutatók költséges, technológiai befektetések útján történő növelésében. Ez a trend az elmúlt időszakban a hibadetektálás és diagnosztika eredményeinek alkalmazása ellenében hatott és mind a gyártás mind az üzemeltetés oldalán megmutatkozott.

A rendszerek nagyobb működési megbízhatóságának követelményeit a gyártók a detektálás és diagnosztika aktív biztonságnövelő technológiájának alkalmazása helyett a már említett passzív biztonságnövelő intézkedésekkel próbálták kompenzálni. Ez az olyan jellegű befektetések, mint az ergonómiai tervezés, a biztonság-orientált üzemeltetési protokollok kidolgozása, vagy az oktató szimulátorok széleskörű alkalmazása, jelentős emelkedést hozta.

ÁTALAKULÓ TERMÉKFOGALOM — Napjainkban a termékfogalom jelentős mértékű átalakulását tapasztalhatjuk. Egészen új jelenséggé és a korábbiaknak némileg ellentmondva, kialakulni látszik egy olyan tendencia, amely a biztonsági és megbízhatósági funkciók termék funkcionalitásában történő megjelenítésének egészen új szempontjait vetíti előre. Számos, újonnan megjelenő termékcsoporthoz a követelmény-specifikációk teljesítése csak egyetlen módon: nagyteljesítményű adatfeldolgozó számítógépek alkalmazásának révén lesz megvalósítható: a termék funkcionalitása egyre növekvő mértékben az implementációba ágyazott (embedded) számítógépeken és az azokon futó programokon alapszik. Gyors ütemben alakul ki a számítógépi programok által működtetett rendszerek azon kategóriája (Software Enabled Control Systems), amelyben, míg egyfelől a

számítógépi platform a felhasználó számára egyre érdektelebbe válik, addig a szoftver funkcionalitás már nem csak egyszerű hozzáadott rendszer tulajdonság, hanem ahol – képletesen szólva – a szoftver (*firmware, middleware*), maga a rendszer. Az adatfeldolgozás metódusai, a szenzorok és aktuátorok elosztottsága és önálló intelligenciával történő felruházása, majd azok működési kölcsönhatásai, a komponensek közötti intenzív adatcsere és az extenzív kommunikációs infrastruktúra (Fly-by-Wire → X-by-Wire) jellemzik ezt a technológiát.

Ezek a rendszerek, a technológia sajátosságaiból következő módon, szükségszerűen és jelentős számban integrálnak – a hagyományos értelemben véve – rossz megbízhatóságú alkotóelemeket. Számítógépek és működtető programjaik teljes körű tesztelhetőségének problémája a nagy-megbízhatóságú rendszerekben történő felhasználásukat sok esetben teszi megkérdőjelezhetővé, ami különböző mérnöki fórumokon a mai napig heves szakmai viták tárgya. Úgy becsülhető, hogy a szoftver alapú rendszerek hibás működéshez vezető eseteinek 60-90 %-áért olyan szoftver jellegű "hibák" tehetők felelőssé, amik a rendszer működésében mindig is jelen voltak, de amik a normál üzemviszonyok között hibát nem okozva a gyártóművi funkciótesztek által nem voltak idejében felderíthetők. Az ilyen rendszerek biztonság kritikus helyeken való alkalmazása ezért általában csak szigorú szabályozások mellett és megszorításokkal engedélyeztethető.

Ilyen körülmények között a termékre előírt tartós megbízhatósági követelmények teljesítésének gyakran szinte egyetlen módja, az aktív biztonságnövelő módszerek rendszerbe integrálása, amelyek az esetlegesen megjelenő hibák eltávolítását megbízható módon, gyorsan és a működés teljesítménymutatóinak folyamatos fenntartása mellett képesek megoldani.

Ezek az újonnan felmerült szempontok megkövetelik, hogy irányítórendszert és irányított folyamatot szoros kölcsönhatásukban kezeljük, amelyet áthat a korszerű számítástudomány, a matematikai rendszerelmélet, hibadetektálás és diagnosztika, valamint a hibatűrő rendszerekre vonatkozó eredmények alkalmazásának szimbiózisa.

Az értekezés fő tartalmát a szerző által kidolgozott, és széleskörű nemzetközi elismertséget tükröző új hibadetektálási módszerek adják. Ezek a módszerek a klasszikusnak tekinthető állapotbecslési eljárásoktól a közvetlen hiba-rekonstrukciót lehetővé tevő rendszerinverziós módszerekig a hibadetektálás és hibajel becslés több új lehetőségét mutatták meg, amelyek mindegyike alkalmas arra, hogy a fent említett új problématerületeken alkalmazásra leljenek.

A PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA, CÉLKITŰZÉSEK

A változás és hibadetektálási probléma megfogalmazására és megoldására az irodalomban számos irányzatot találunk. A detektálási feladat megoldható a megfigyelt folyamat modelljének ismeretében, vagy anélkül. A modell alapú megközelítések – amelyek a kvalitatív vagy kvantitatív módszerek körébe tartozhatnak, – a '80-as évek elejétől egyre inkább a kutatások előterébe kerültek.

A hibadetektálás legkézenfekvőbb és a műszaki gyakorlat által legrégebben használt módja a hardver redundancia alkalmazása. Egy folyamatváltozó értékének legalább 3, fizikailag független méréssel történő reprezentálása, majd egy ezeken a jeleken működtetett 2/3 (kettő a háromból) szavazó algoritmus alkalmazása pl. a szenzorhibák kimutatásának triviális módja. Belátható, hogy a hardver redundancia, a vele együtt járó költség, bonyo-

lultság, térfogat és súlynövekedés miatt számos esetben nem kívánatos, vagy nem lehetséges. Máskor, mint pl. a beavatkozásszervek diagnosztizálása esetén leggyakrabban, közvetlen mérésekhez való hozzáférésre nincs lehetőség. Ilyen esetekben a komponensek hibastátuszának azonosítására a berendezés modelljének ismeretén alapuló indirekt, vagy analitikus mérések használhatók.

Az ún. analitikus redundancia elve azt mondja ki, hogy a rendszer modelljének és a rendszer (nem feltétlenül összetartozó) ki- bemeneti jelei mért értékének ismerete redundáns információkat hordoz a rendszer működéséről. Ez az analitikus ismerethalmaz lehetővé teszi olyan jelenségek és rendszertulajdonságok kalkulációját is, amelyek közvetlen mérések hiányában (vagy nem közvetlenül a jelenséghez tartozó mérések alapján) nem lennének felismerhetők. Egy általánosan használt és az analitikus redundancia elvére támaszkodó detektálási módszer szerint, pl. a folyamat kimeneti változóinak valóságos mért értékeit a folyamat modelljének ismeretében becsült elvárt jel-értékekkel hasonlítjuk össze. Ez a komparatív eljárás az ún. detektálási célú reziduál előállításának egyik legáltalánosabb módszere.

A hibadetektálás és diagnosztika elméletében és gyakorlatában a reziduál központi jelentőségű fogalom. A reziduál olyan komparatív analitikus mennyiség, amely a rendszer tényleges és a matematikai modellje által leírt, elvárt viselkedése közötti eltéréseket ábrázolja. Értéke a folyamatból szerzett mérési adatok alapján határozható meg, ami hibamentes esetben nulla és jellemzően nullától különböző bármely, az elvárt viselkedéshez képest megmutatkozó deviancia esetén. A detektálási problematika egyik legfontosabb kérdéskörét a gyakorlatban éppen ez adja. Nevezetesen, a rendszert érő különféle zavarok és egyéb parazita hatások következtében a reziduál értéke nullától akkor is különbözni fog, ha tényleges hiba nem lépett fel. A hibák robusztus (értsd: megfelelő érzékenységgű és hamis riasztásoktól mentes) detektálásának célja, hogy a hiba reziduáljelben történő megjelenését az egyéb zavarhatásoktól egyértelműen elkülönítsük és a nem összetartozó jelek és jelenségek hatását egymástól megkülönböztessük.

A dinamikus rendszerekben bekövetkező meghibásodásokat általában a rendszer valamely paraméterének megváltozásaként, vagy a ki- bemeneti jelekben bekövetkező változásokként modellezhetjük. A változások két fő kategóriába sorolhatók ún. additív és nem additív jellegű hibák. Az additív hibák általában a megfigyelt jelek mért értékei statisztikai átlagának megváltozásában érhetők tetten. Az ilyen jellegű változások megfelelhetnek a beavatkozásszervek és szenzorok hibáinak, és összefüggésbe hozhatók minden, nem rendszertulajdonság jellegű megváltozással, illetve a rendszer összetevő elemeiben bekövetkező hibával. A nem additív jellegű hibák (ilyenek lehetnek a rendszer szerkezetében bekövetkező struktúrális változások) csak a rendszer kimeneti jeleinek spektrál jellemzői megváltozásában fedezhetők fel. Megjegyezzük, hogy az additív hibamodellek a gyakorlatban előforduló legfontosabb hibafajták leírására eredményesen használhatók.

Szerző kutatási tematikája a modellek ismeretén (analitikus redundancián) és kvantitatív analitikus módszerek alkalmazásán alapuló robusztus reziduál előállítási módszerek kutatását tűzte ki célul annak feltételezésével, hogy a hibák additív módon modellezhetők.

Olyan szűrőtervezési eljárásokkal foglalkozunk, amelyek a műszaki gyakorlatban előforduló dinamikus rendszerekben bekövetkező nemkívánatos hibák és megváltozások minimális késedelemmel történő detektálását teszik lehetővé a mindenkor biztosítható legnagyobb érzékenységgel, olyan körülmények között, amikor a lineáris időinvariáns (*Linear Time Invariant* - LTI), lineáris időben változó dinamikájú (*Linear Time Varying* - LTV), vagy nemlineáris rendszer modellje csak bizonytalanul ismert és/vagy a folyamatot időben változó dinamikájú zavarok terhelik.

Azokban az esetekben, amikor a külső és belső rendszerzavarások és a modellezés bizonytalansága hatásukat tekintve összevethető magukkal a detektálni kívánt hibákkal, a probléma megoldását olyan robusztus szűrőtervezési módszerek alkalmazása adja, amelyek a szűrő kimenetén a zavarok és bizonytalanságok hatását, a hibák hatásától megfelelő érzékenységgel elkülöníteni képes. A dolgozatban közölt eredmények ezen probléma megoldására nyújtanak alternatív javaslatokat.

II. A KUTATÁS MÓDSZERTANA

A ROBUSZTUS DETEKTÁLÁS FENTEBB MEGFOGALMAZOTT követelményeit kielégíthetjük (i) a hibák és bizonytalanságok hatásának *teljes szétválasztásával* (exact decoupling), vagy ennek lehetősége hiányában, (ii) a bizonytalanságok hatásának a detektor reziduál jelére vett optimális *gyengítésével* (approximate decoupling).

Amíg a teljes szétcsatolásra képes detektor a hibák és egyéb, nemkívánatos parazita jelenségek hatásait egymástól elkülönítve jeleníti meg – így biztosítva a lehető legjobb érzékenységgel történő detektálást, – addig, optimális szűrés esetében, a detektálás érzékenysége csak a módszer zajelnyomási tulajdonságának rovására növelhető. Robusztusság és érzékenység, itt egymásnak ellentmondó tervezési elvek, amelyek számos, nehezen megoldható problémát vetnek fel és szűkítik az adott detektor által felismerhető hibák körét. Az így jellemzett robusztus detektálási probléma egy többváltozós optimalizálási problémára vezet, amely probléma megoldásának célja, hogy a hibadetektálás olyan egymással ellentétes tulajdonságait, mint a robusztusság és érzékenység, egy adott alkalmazáson belül, a legjobb performancia tulajdonságok biztosítása mellett, behangolhatóvá tegyük.

Dolgozatomban mind a teljes szétcsatolás mind az optimális szűrés problémájának megoldásával foglalkozom. Az előbbi megoldásához a dinamikus rendszerinverzió, az utóbbihoz az optimális H_∞ szűrés eredményeinek alkalmazásával teszek javaslatot. Megmutatom, hogy a két, meglehetősen különböző elv újszerű kombinációja, korábban nem megoldható feladatosztályok kezelését teszi lehetővé.

TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A hibadetektálás modell alapú megközelítései a '70-es évek végén vegyipari folyamatok irányítási problémáiban jelentek meg először, ahol a hagyományos anyag és energia egyensúlyi egyenletekre épülő rendszer kalkulációk természetes módon mutattak rá a mérési adatok analízisében rejlő sokoldalú lehetőségekre. Az a jelenség pl, hogy a meghibásodott, vagy rosszul kalibrált érzékelők által okozott adat inkonzisztenciák, vagy bármely, a mért fizikai jellemző statisztikai eloszlására nézve nem reprezentatív, véletlenszerű esemény mérési adatokban történő megjelenése jelentősen elronthatja az alkalmazott paraméterbecslési algoritmusok pontosságát, szükségszerűen vezetett a hibák kompenzálására alkalmas módszerek (data reconciliation, gross error detection) megjelenéséhez, ld. pl. (Himmelblau 1978, Romagnoli and Stephanopoulos 1981). Egy másik fontos alkalmazási terület, ahol a detektálás modell bázisú analitikus módszerei legkorábban alkalmazásra kerültek, a NASA által támogatott repüléstechnikai kutatások voltak (Willsky and Jones, 1976; Deckert *et. al.*, 1977).

Ezen korai eredmények vezettek a különféle paritás egyenlet módszerek megjelenéséhez (Chow and Willsky, 1984; Lou *et. al.*, 1986), amelyek azután J. Gertler munkáiban teljesedtek ki (Gertler, 1997;1998), megadva az analitikus redundancia elvére épülő hiba-detektálási módszerek máig egyik legfontosabb osztályát.

Annak általános felismerésével, hogy a modellek ismeretében elkerülhetetlenül jelenlévő bizonytalanság, a folyamatokat terhelő zajok és zavarok és az elhanyagolt nemlinearitások hatása az analitikus redundanciára épülő detektálási módszerek hatékonyságát jelentős mértékben leronthatja, ami a detektálást csak elfogadhatatlanul magas téves riasztási mérték mellett teszi lehetővé, egyre nagyobb figyelem fordult a detektálási folyamat robusztusságának biztosítására. A robusztus detektálási módszerek legfőbb tulajdonsága, hogy a hibák észlelését és azonosítását a rendszert ért zavaroktól és a modellezési bizonytalanság eredetű parazita jelenségek hatásától valamilyen módon függetlenné teszik. Ezen módszerekre nézve, a rendszer és irányításelmélet 80-as 90-es évek fordulóján megjelent, eredményei váltak irányadóvá, amelyek a robusztus modellezésre, a H_∞ módszereket alkalmazó szabályozó tervezésre és a geometriai rendszerelméletre vonatkoztak.

ÁLLAPOTBECSLÉSI MÓDSZEREK A ROBUSZTUS DETEKTÁLÁSBAN — Az R. V. Beard és H. L. Jones által a 70-es évek elején a geometriai rendszerelmélet eredményeire támaszkodva kidolgozott detektáló szűrő elmélet (Beard, 1971; Jones, 1973), amely – bár eredeti megfogalmazásában nem a robusztusságot, hanem a többszörös hibák egyidejű detektálhatóságának feltételeit fogalmazta meg, – olyan szűrő tervezésére ad módszereket, ami korlátozott számú hiba, zavarójel és a modellbizonytalanságok hatásának reziduáljelben történő, egymástól független megjelenítését teszi lehetővé. Ez a tulajdonság többszörös hibahatások szétválasztására és/vagy a szűrő robusztussági mutatóinak javítására használható, a teljes zavarészecsatolás elvének alkalmazásával. A geometriai detektáló szűrő robusztus a hibajelek modellezési bizonytalanságára, de a folyamat dinamikájának pontos ismeretét igényli. A geometriai rendszerelmélet eredményeire támaszkodó és alapvetően a klasszikus Luenberger-féle állapot megfigyelő geometriai szempontú újrafogalmazásával megvalósított detektáló szűrő a teljes szétcsatolás elvének legtisztább megjelenése.

Kálmán szűrő vagy egyéb statisztikai módszereken alapú reziduál előállító módszerek alkalmazhatók azokban az esetekben, amikor a rendszerből csak zajos mérési adatokhoz van hozzáférésünk (Basseville and Nikiforov, 1993; Mangoubi, 1998). Ilyenkor a zavarhatások statisztikai jellemzőit ismertnek kell feltételeznünk. A többszörös meghibásodások hatásának detektálására és identifikálására illesztett szűrők alkalmazásával élhetünk (többszörös modell módszer).

A reziduálok statisztikai jellemzőinek kiértékelésére az ún. általánosított valószínűségi hányados teszt módszer (*Generalized Likelihood Ratio Test* - GLRT) alkalmazható. A GLRT leggyakrabban a Kálmán szűrő alapú reziduál generátorokkal kombinálva használatos hibák robusztus detektálására (Willsky and Jones, 1976; Willsky, 1976). A módszer a rendszer dinamikájának ismeretén túl, a hibajel és a zavarok pontos ismeretét is feltételezi (Grenander, 1981).

Az ismeretlen bemeneti hatások (unknown input) becslésére épülő módszerek a zavarok reziduáljelben történő kimaszkolásával érik el a szűrő robusztusságát (Ribbens and Riggins, 1991; Chen and Patton, 1998).

Amikor a többszörös hibahatások és zavarok elkülönítése (szétcsatolása) geometriai módszerekkel, vagy illesztett szűrők alkalmazásával nem megoldható, vagy nehézségekbe ütközik, hagyományosan az optimális szűrés különféle módszereinek alkalmazása nyújthat használható alternatívát.

A robusztus H_∞ szabályozási feladat duális problémáját, a H_∞ értelemben optimális szűrési problémát, elemző korai cikkek már jelezték, hogy ez a szűrési technika alkalmas lehet olyan detektálási célú reziduálok előállítására, amelyekben a rendszerre ható zavarok és a rendszermodell eredetű bizonytalanságok hatása jelentősen csökkenthető (Ding and Frank; 1989; Mangoubi *et.al.*, 1993; Frank and Ding, 1994).

Ezen az úton elindulva szerző a 90-es évek elejétől foglalkozik az optimális szűrés detektálási célú alkalmazásának kutatásával. A probléma egy alap megközelítését szerző már kandidátusi értekezésében is tárgyalta (Edelmayer, 1994). A módszer robusztus detektáló szűrők tervezésében való alkalmazási lehetőségével kapcsolatban felvetett megközelítésmód jelentős érdeklődést váltott ki kutatói körökben, amit az eredményekre vonatkozó nagy számú hivatkozás is alátámaszt: a zavarok reziduáljelben történő H_∞ norma értelmében vett maszkolása, azaz a H_∞ szűrés technikájának hibák detektálására történő alkalmazása jelentős mértékben kötődik szerző és munkatársai nevéhez (Edelmayer *et.al.*, 1994;1996).

Amíg a H_∞ detektáló szűrők klasszikus elmélete a 90-es évek közepére jelentős mértékben letisztult, a detektálás érzékenységi mutatóinak javítása még számos kérdést hagyott megválaszolatlanul. Jelen kutatási tematika ehhez a problémakörhöz is ad hozzájárulást.

A KÖZVETLEN INPUT REKONSTRUKCIÓS MÓDSZER — Látni fogjuk, hogy a szétcsatolhatóság szempontjából problematikus esetek egy jelentős hányadában az optimális szűrők alkalmazása mellett a probléma megoldásának egy új, alternatív módszere, a dinamikus rendszerinverzió és az ún. közvetlen hibajel rekonstrukción alapuló eljárások alkalmazása lehet, amely szerző elmúlt öt évre visszamenő kutatási tevékenységének és tudományos hozzájárulásának jelen összefoglalóban is hangsúlyozott fontos részét képezi.

A *dinamikus rendszerinverzió* fogalmán az irodalom azokat a módszereket érti, amelyek a rendszer matematikai modellje inverzének és az inverz reprezentáción alapuló szűrőnek (szabályozónak) állapotvisszacsatoláson alapuló algoritmikus kiszámítását online, a folyamat irányításával egyidejűleg, valós időben végzik. A dinamikus inverz és a nemlineáris rendszerek feedback linearizációja között fennálló összefüggés R. W. Brockett munkái nyomán 1978-tól eredeztethető (Brockett, 1978; 1981).

A rendszer modelljének invertálásán alapuló különféle szabályozó tervezési eljárások az irányításelmélet klasszikus problémái közé tartoznak. Az egyik legkorábbi, lineáris dinamikus rendszerek inverzének kiszámítására és szabályozók szintézisére alkalmas algoritmus L. M. Silverman nevéhez kötődik (Silverman, 1969). Az elv detektáló szűrő célú megfeleltetésére azonban csak a legutóbbi időben hívtuk fel a figyelmet (Szigeti *et. al.*, 2001; 2002). Első ilyen tárgyú közleményünk elvéhez csatlakozva, több kutató is jelentetett meg publikációt a detektáló szűrő specifikus inverz kiszámíthatóságával kapcsolatban, ld. pl. (Varga, 2002).

A javaslatot alapvetően inspirálták és a számítási elv gyakorlati felhasználhatóságát nagymértékben támogatták azon legkorszerűbb, csak a legutóbbi időkben megjelent új mérés-technikai elvek, eszközök és módszerek, amelyek számbavétele és alkalmazása nélkül a módszer realizálása nem, vagy csak sokkal nehezebben lenne megoldható. Valószínűleg a műszaki technikai fejlődés eme összetevőjének tudható be az is, hogy a rendszer és irányításelméleti tudományokban a rendszerinverzió alapuló megoldások és módszerek, a nagy számú ilyen vonatkozású kutatási tematika és publikáció alapján ítélve, reneszánszukat élik. A dinamikus inverziót alkalmazó módszerek sikeres alkalmazásairól az utóbbi időben nagy számban jelentek meg közlemények, különösen az aeronautika terü-

letéről, ld. pl. (Krupadanam *et. al.*, 2002). Az aktuális helyzet egy áttekintését (Goodwin, 2002) adja.

A dinamikus rendszerekben bekövetkező hibák detektálásával, a többszörös hibahatások elkülönítésével és diagnosztikájával foglalkozó rendszerelméleti módszerek tárgya bizonyos értelemben mindig a rendszer bemeneti jeleinek (amelyek lehetnek irányítójelek, közvetlen mérések útján hozzá nem férhető ismeretlen eredetű külső zavarok, hiba eredetű és egyéb más, a rendszer bemeneti jeleként modellezhető parazita effektusok) *rekonstruálásának* (értsd: jel-érték visszaállításának) problémája.

Valójában a lineáris rendszerek input rekonstruálhatóságára vonatkozó, és már régebben megértett és feldolgozott elvek (60-as 70-es évek), az elmúlt időszakban létrejött detektálási módszerekben mindig is jelen voltak abban az értelemben, hogy a robusztus detektálás meghirdetett célja a hibajelek más, ismert és ismeretlen bemeneti jelek jelenlétében történő rekonstruálása volt. Ez az ún. indirekt megközelítés ritkán tűzte célul az input-ok teljes körű visszaállítását és becslését, mivel az esetek többségében alapvetően csak egy-egy megkülönböztetett bemeneti jel (a hiba) egy adott küszöbszinthez viszonyított, biztonságos észlelésére koncentrált, miközben a hibajel tényleges jellemzőivel kapcsolatban általában nem közvetített információt.

Ezzel szemben, azok a megközelítések, amelyeket jelen dolgozatban ténylegesen *input rekonstrukciós* módszerekként hivatkozunk, olyan szűrők (rekonstruktorok) tervezési kérdéseivel foglalkoznak, amelyek bármely (akár az összes) bemeneti jel egyidejű visszaállítására és becslésére alkalmasak. Az elv sok vonatkozásban mutat hasonlóságot a teljes szétcsatolást végrehajtó geometriai detektáló szűrők elvével, de azokat annyiban meghaladja, hogy a detektálhatóságra és a szétcsatolható jelek számára nézve nem tesz nehezen teljesíthető geometriai korlátozást. Korlátozás természetesen ebben a megközelítésben is van, ez esetben ez a stabil inverz létezésére és kiszámíthatóságára vonatkozik.

Ezek a szűrők olyan speciális dinamikus rendszerek, amelyek bemeneteire a szóban forgó megfigyelt rendszer mérések útján hozzáférhető jeleit vezetve, annak kimenete a rendszer eredeti bemeneti jeleit adja vissza. A problémát ezért hangsúlyosabb megkülönböztetésül *közvetlen input rekonstrukciós problémának* (*Direct Input Reconstruction – DIR*) nevezzük.

AZ ALKALMAZOTT TUDOMÁNYOS MÓDSZERTAN

ÁLLAPOTBECSLÉSTŐL A KÖZVETLEN HIBAJEL REKONSTRUKCIÓIG — A reziduálgenerálás centrális problémakörének történeti áttekintésben is jellemzett fejlődési vonulatában két jellemző és világosan kivehető tendencia körvonalazható. Az egyik a lineáris rendszerekre kifejlesztett módszerek egyfajta elvi konvergenciája, a másik a lineáris eredmények nemlineáris kiterjesztésére vonatkozó törekvés.

A detektálási módszerek fejlődési ívének a jelen dolgozatban kitűzött bemutatásával ("Állapotbecsléstől a közvetlen input rekonstrukciós módszerekig") szerző célja az volt, hogy a saját eredmények bemutatásán túl, a lineáris rendszerekre vonatkozó eredmények egymásra épülésére és számos, alapvetőnek tartott eredmény ismert, vagy kevésbé ismert kapcsolatára, sok esetben azonosságára rámutasson. Fontos megjegyezni, hogy a módszerek közötti elvi kapcsolat felismerése több ponton segítette a javasolt, rendszerinverz alapú reziduálgenerálási módszer szintetizálását.

Megközelítésünkben időtartományban értelmezett algebrai/geometriai módszereket alkalmaztunk az ún. szétszételhető és frekvenciatartománybeli H_∞ optimalizálási módszereket a nem szétszételhető detektálási problémák megoldásához.

A nemlineáris problémák megközelítésében a korábban általunk bevezetett dinamikus rendszer-inverzió alapuló módszerek szolgáltak kiindulásként, amelynek során számos, a lineáris rendszerek esetében már megértett és letisztázott matematikai rendszertulajdonság nemlineáris rendszerekben történő újraértelmezésére volt szükség. Az inverz rendszer tulajdonságai, az inverz előállításának módja és feltételei, valamint a bizonytalanságok nemlineáris esetekben való kezelésének elvei jórészt a lineáris rendszerekben megértett specifikumokon nyugszanak és részben még továbbra is fontos tisztázásra váró problémák.

Mivel a hibadetektálási problémákat alapvetően gyakorlati szempontok motiválják, kiemelt figyelmet fordítottunk a kidolgozott módszerek lehetséges alkalmazásaira, elsősorban a nagy-megbízhatóságú irányítási rendszerekben való felhasználásukra, különös tekintettel az ipar és technológia területén egyre inkább általánossá váló, beágyazott hibatűrő rendszerek követelményeire és a biztonsági automatika (security automation) rendszerekre, amelyek iránt mutatkozó kutatási érdeklődés az elmúlt években jelentősen megnövekedett. Ilyen követelmények az egyszerű megvalósíthatóság, kiszámíthatóság és számítástechnikai stabilitás és hatékonyság, valamint a műszaki tudomány és technológia által szolgáltatott legkorszerűbb irányítás- és mérés technikai elvek és eredmények körütekintő alkalmazása. Sok esetben maguk a megváltozott, vagy változófében lévő technikai lehetőségek voltak azok, amelyek új területekre bátorítottak, implikáltak és/vagy befolyásoltak elméleti eredményeket. Ennek egy jellemző példája a közvetlen derivált mérésekre lehetőséget adó intelligens szenzorok megjelenése, amelyek pl. az űreszközök és repülőgépek irányításában már évek óta alkalmazásban vannak, gyökeresen megváltoztatva a mérnöki tervezés módszertanának tradicionális szabályait. Ez tette lehetővé többek között azt, hogy a dinamikus inverzióra vonatkozó eredményeket a műszaki realitás talaján említhessük.

Laboratóriumunkban e téren folyó, alkalmazott kutatások kiváló kísérleti terepet biztosítottak az elméleti eredmények közvetlen gyakorlati átültetésére. A hibadetektálás analitikus módszereinek kutatásába világszerte befektetett erőfeszítés és annak nem jelentéktelen eredményei éppen az "embedded" hibatűrő rendszerekbe integrálva elégíthetik ki azokat a várakozásokat, amelyeket irántuk az elmúlt közel két évtizedben támasztottak.

A problémák elméleti megközelítésében alapvető fontosságú szerepet játszott a geometriai rendszerelmélet eredményeinek következetes alkalmazása (ld. Basile and Marro, 1969, 1991; Wonham, 1979).

Az általunk megfogalmazott, eredetileg nem-konvex kvadratikus optimalizálási probléma megoldásához a Lineáris Mátix Egyenlőtlenség és a robusztus irányításelmélet legkorszerűbb módszereit és eredményeit alkalmaztuk. Az eredmények helyességét számítógépes szimulációs kísérletek igazolták, a számításokat MATLAB és Simulink támogatással hajtottuk végre.

A KUTATÁS TÁMOGATOTTSÁGA

Tudományos tevékenységemet az MTA SZTAKI Rendszer és Irányításelméleti Kutató Laboratórium szervezetéhez kötődve, a Laboratórium egyik fő kutatási irányvonalához

kapcsolódva, alapvetően magyarországi kutatóhelyemen folytattam, amihez hatékony és inspiráló hozzájárulást adtak azon, viszonylag rövid, munkaperiódusok, amelyeket nemzetközi kapcsolataim révén az elmúlt időszak folyamán, meghívottként, külföldön tölthettem.

Munkámhoz két alkalommal, először 1996 és 1998¹, majd 2000 és 2002² között kaptam az Országos Tudományos Kutatási Alap-tól (OTKA) alapkutatási támogatást. A Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok (NKFP) által támogatott "Tudásintenzív információs technológia bonyolult ipari rendszerek biztonságos és optimális működtetéséhez" c. projekt (NKFP-2/016/2001) számos ponton biztosított kutatásaimhoz inspiráló háttérrel.

¹ OTKA projekt címe: *"Robusztus detektáló szűrők analízise és szintézise bizonytalan dinamikus rendszerekben"*, Grant No: T-019448.

² OTKA projekt címe: *"Hibadetektálás és diagnosztika nagy-megbízhatóságú dinamikus rendszerekben: robusztusság és érzékenység problémájának szintézise"*, Grant No: T-032408.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

AZ ELMÚLT 10 ÉVBEN FOLYTATOTT KUTATÓMUNKA SORÁN ELÉRT jelentős, új tudományos eredményeim a következők szerint foglalhatók össze.³

1. TÉZIS. (4. Fejezet – Propositions 4.1, 4.2, 4.3) — *Hibadetektáló szűrők érzékenységi mutatóinak javítása skálázott H_∞ -szűrés alkalmazásával* [11, 12, 16, 18, 19, 22].

A hibadetektáló szűrők detektálási érzékenység javításának tradicionális módja, hogy a szűrő zavarokra vett erősítését — (a zavaroknak a szűrő bemenetétől a reziduál kimenetig értelmezett zárthurkú átviteli függvényének H_∞ normáját), — a mindenkor legrosszabb (*worst-case*) zavarhatásokra való tekintettel minimalizáljuk. A probléma hagyományos megközelítésében egy lineáris-quadratikus optimalizálási feladatra vezet, amelyben a szűrő becslési hibájának a legrosszabb zavarhatások ellenében vett minimumát egy, a játékelméletről ismert *min-max* feladat megoldásával adjuk meg. Ez matematikailag a legrosszabb zavarhatásokkal felírható költségfüggvény

$$J(D, \kappa) \triangleq \sup_{\kappa \in \mathcal{L}_2} \frac{\|z - \hat{z}\|_2}{\|\kappa\|_2} = \|H_{\epsilon\kappa}(s)\|_\infty \quad (1)$$

minimalizálását jelenti, ahol D a detektáló szűrő zárthurkú erősítési mátrixa, $z(t) - \hat{z}(t)$ a szűrő becslési hibája, $\kappa(t)$ a legrosszabb zavarhatásokat leíró időfüggvény és

$$H_{\epsilon\kappa}(s) = C_z(sI - A + DC)^{-1}B_\kappa$$

ezen legrosszabb zavarhatásoknak a bemenettől a reziduál kimenetig értelmezett zárthurkú átviteli függvénye. Az irodalom ezt a módszert mint a klasszikus H_∞ detektáló szűrő probléma megoldását ismeri, amelynek kidolgozásához korábbi eredményeimmel jelentős mértékben járultam hozzá [1, 2, 3, 10, 16, 19].

A klasszikus eredményekkel kapcsolatban megmutattam, hogy bizonyos alkalmazásokban, az említett optimalizálási módszer a zavarok és hibahatások kedvezőtlen állapotbeli megjelenése esetén, gyakran nem teszi lehetővé a műszaki gyakorlatban használható megfelelő érzékenységu szűrő meghatározását, azaz ennek segítségével nem állapítható meg olyan detektálási küszöb, ami egy adott hiba megjelenését a zavarhatásoktól egyértelműen el tudná különíteni.

Kutatómunkánk során felfedeztük, hogy a H_∞ szűrő optimalizálási probléma bizonyos, szabad paramétereinek alkalmas megválasztásával a szűrő érzékenységi mutatója a megoldás célkitűzéseinek szempontjából kedvező irányban befolyásolható. Ezzel összefüggésben megmutattam, hogy ezen paraméterek az ismeretlen bemeneti zavarhatások kondicionálása révén vannak hatással az optimalizálás eredményére. Ennek értelmében a

³ Az eredmények könnyebb azonosíthatósága érdekében a téziseket a fejezetcím és a vonatkozó tézisállítások, dolgozatban szereplő hivatkozási számának megadásával, valamint a kapcsolódó publikációk hivatkozásával közlöm.

szűrőtervezési feladat átfogalmazását javasoltam (Proposition 4.1), amelyben az optimum problémát a szóban forgó $H_{\infty}(s)$ transzferfüggvény H_{∞} normájának *skálázásával* oldjuk meg. Ez a probléma, az ún. skálázott H_{∞} szűrési probléma fogalmának bevezetésével, (1)-gyel összevetve, az

$$\inf_{T>0} \|T(H_{\infty})T^{-1}\|_{\infty} \quad (2)$$

alakban leírható *min-max* feladat megoldását jelenti, ahol $T > 0$ invertálható, skalár skálázó mátrix. A (2) formában megfogalmazott feladat azonban egy nem konvex optimalizálási feladatot jelöl ki, amelynek megoldására nem állnak rendelkezésre matematikai eszközök. A probléma feloldására javasoltam a feladat *Lineáris Mátrix Egyenlőtlenség* (LMI) formájába történő átírását, amely megközelítésben a megoldást az ún. *Általánosított Sajátérték Probléma* (Generalized Eigenvalue Problem - GEVP) minimalizálásának megoldására visszavezetve, mindig zárt alakban kapjuk (Proposition 4.2).

A T skálázó mátrix megválasztására két alapvető módszert közöltem. Az egyik lehetőség szerint $T > 0$ diagonális, míg a másikon általános, invertálható teljes mátrix (ld. Proposition 4.3). Az így definiált input kondicionálási probléma, beépülve az optimalizálási feladat megoldásába, a hagyományos értelemben vett input skálázástól az általános koordináta transzformáció alkalmazásáig ad módszereket a detektáló szűrő érzékenységi mutatóinak optimális beállítására.

Ezzel egyidejűleg megmutattam, hogy a T skálázó mátrix és a skálázási módszer (diagonális skálázás vagy általános koordináta transzformáció) adott feladathoz legjobban illeszkedő alkalmas megválasztásával a skálázott H_{∞} szűrési feladat megoldása a hagyományos H_{∞} szűrési módszerek által szolgáltatott eredményhez képest érzékenyebb szűrő megtervezését teszi lehetővé.

2. TÉZIS. (2. Fejezet – Propositions 2.36, 2.37) — *Általánosított Luenberger-féle állapotmegfigyelő elveinek kidolgozása és alkalmazása időváltozós rendszerek hibáinak detektálására* [1, 6, 8, 13, 17].

Korábbi rendszerelméleti eredményeinkre támaszkodva (ld. a rendszer irányíthatóságára és megfigyelhetőségére vonatkozó általánosított Kálmán alterek koncepciója, (Szigeti, 1992; Szigeti *et.al.* 1995)) megmutattam, hogy a detektáló szűrő tervezésben kulcsfontosságú szerepet betöltő (C, A) -invariáns alterek lineáris időinvariáns (LTI) rendszerekben használatos elve hogyan terjeszthető ki az altér konstrukciós eljárás általánosításával lineáris időváltozós (LTV) rendszerekre.

Összehasonlítás végett emlékeztetünk arra, hogy LTI esetben a detektáló szűrő probléma megoldása a rendszer azon (rendszerint minimális) (C, A) -invariáns alterének tulajdonságai alapján adható meg, amely altér tartalmazza az L hibairányok képterét, azaz

$$\langle A + DC \mid \text{Im } L \rangle,$$

ahol $A + DC$ az állapotmegfigyelő zárthurkú erősítési mátrixa. Ezzel szemben az

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \left(A + \sum_{i=1}^m a_i(t) A_i \right) x(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^k L_i v_i(t), \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

alakban megadott $v_i(t)$ hibákkal terhelt LTV rendszer esetében, annak feltételezésével, hogy az állapotmegfigyelőt a rendszer ki- bemeneti jeleiből és a kimenetek legfeljebb k -ad rendű deriváltjaiból állítjuk elő, ez az altér konstrukció az $A_1, \dots, A_m$ mátrixok által

generált $\mathcal{L}$ Lie-algebra bázisán

$$\left\langle A + D \begin{bmatrix} C \\ CA_i \\ \vdots \\ CA_i^k \end{bmatrix} \mid \text{Im} L \right\rangle \quad (4)$$

alakban lesz minimális alakban megadható. Ezzel analóg módon, a tulajdonság közvetlen következményeképpen, megmutattam, hogy a detektáló szűrő erősítési mátrixa az $A_1 \dots A_m$ struktúra által generált Lie-algebra bázisán a $C, CA_i, \dots, CA_i^k$ alakú mátrix szorzatok, valamint a rendszer ki- bemeneti mérései és azok deriváltjai felhasználásával hogyan lesz megkapható.

Ez az eredmény nem annyira önmagában hanem, elsősorban jelen tézis szellemi kontextusában, az inverziós módszerekhez történő eljutásunk megértésében és azok elvének bevezetésében fontos. A koncepció hasonlósága és a (4) altér konstrukciója a következő tézispontokban ismertetett zéródinamika algoritmusok geometriai tulajdonságaival összevethető.

3. TÉZIS. (5. és 6. Fejezet – Propositions 5.6, 6.10) — *Dinamikus rendszerinverzió alapuló közvetlen input rekonstrukciós módszer alkalmazása a rendszer bemenetein ható ismeretlen (nem mérhető) zavarok és hibajelek detektálására és becslésére lineáris és nemlineáris rendszerekben* [20, 24].

Az irodalomban régóta ismert a rendszer input-rekonstruálhatóságának és inverz reprezentációjának szoros kapcsolata. Ezen tulajdonságra alapozva az 1. ábra sematikus ábrázolása szerint, javasoltam egy a rendszer bemenetén ható ismeretlen (közvetlenül nem mérhető) zavar és hibajelek detektálására és identifikálására alkalmas detektáló szűrő eljárás bevezetését.

A szűrő bemenetére a rendszer ki/bemeneti jeleit, illetve azok deriváltjait ($\vartheta_y(t), \vartheta_u(t)$) vezetve, a szűrő kimenetén a rendszer bemenetén ható eredeti hibajelek $v_1(t) \dots, v_k(t)$ egymástól és minden más input-tól elkülönítve (teljes szétcsatolás) jelennek meg. A módszer sarkalatos pontja a rendszermodell ún. baloldali inverzének megkonstruálása. Erre vonatkozó eredményeim lineáris és nemlineáris rendszerek esetén a következők szerint foglalhatók össze.

LINEÁRIS RENDSZEREK — Tekintsük a többváltozós lineáris rendszer egy minimális állapotter reprezentációját a következő alakban adottnak

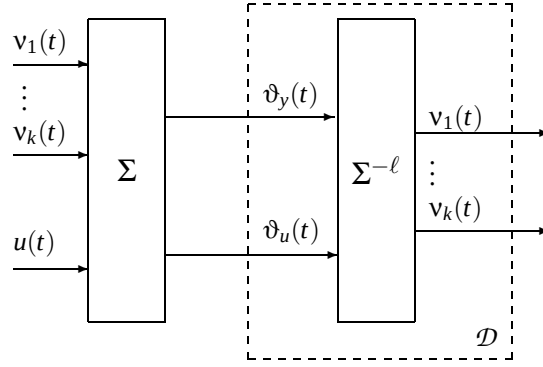
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \quad x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, \\ y &= Cx, \quad y \in \mathbb{R}^p. \end{aligned} \quad (5)$$

Jelölje $c_i, i = 1, \dots, p$ a C mátrix sorvektorait. Ha létezik a pozitív egész szám $r_i > 0$, úgy, hogy

$$c_i A^k B = 0, \quad \text{valamint} \quad c_i A^{r_i-1} B \neq 0, \quad \forall k < r_i - 1, \quad (6)$$

továbbá

$$\text{rank} \begin{bmatrix} c_1 A^{r_1-1} B \\ \vdots \\ c_p A^{r_p-1} B \end{bmatrix} = m, \quad (7)$$



1. ábra A dinamikus rendszer inverz reprezentációján alapuló detektálás sematikus elve. Σ az ismeretlen bemenetekkel és/vagy hibákkal terhelt dinamikus rendszer, $\mathcal{D}$ a detektor, amelyet praktikusán az eredeti rendszer $\Sigma^{-\ell}$ baloldali inverzével konstruálhatunk meg.

akkor az r_i számokat a rendszer relatív fokszámának, az $r = (r_1, \dots, r_p)$ alakban megadott mérőszámot pedig a rendszer vektor relatív fokának nevezzük. A rendszer relatív fokának ezen definíciójával írható, hogy

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_p^{(r_p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 A^{r_1} \\ \vdots \\ c_p A^{r_p} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} c_1 A^{r_1-1} B \\ \vdots \\ c_p A^{r_p-1} B \end{bmatrix} u, \quad (8)$$

amelyből a rendszer $u(t)$ input függvénye inverzió útján megkapható. Az inverz rendszer általános állapotter reprezentációját

$$\dot{\eta} = A_{inv} \eta + B_{inv} v_{inv} \quad (9)$$

$$u = C_{inv} \eta + D_{inv} v_{inv}, \quad (10)$$

alakban várjuk, amelyben Eq. (9) az inverz dinamikáját reprezentáló egyenlet és v_{inv} a rendszer kimeneti függvényének méréseit és azok deriváltjait a megfelelő fokszámokban tartalmazó vektor:

$$v_{inv} = \begin{bmatrix} y_1 & \dots & y_1^{(r_1)} & \dots & y_p & \dots & y_p^{(r_p)} \end{bmatrix}^T. \quad (11)$$

Megjegyezzük, hogy ha az inverz (9-10) alakban felírható reprezentációja minimális dimenziójú, akkor A_{inv} -et az inverz rendszer zéró dinamikájának nevezzük.

Annak feltételezésével, hogy ismerjük a lineáris rendszer (5) minimális állapotter reprezentációját, továbbá, hogy a rendszer a hibajelre nézve invertálható, egy olyan konstruktív algebrai eljárást adtam (ld. Proposition 5.6), amely alkalmas az inverz rekurzív előállítására. Bizonyítottam, hogy az eljárás által szolgáltatott inverz rendszer állapotter modellje minimális dimenziójú, ami azonban nem szükségszerűen stabil. Megmutattam, hogy azon esetekben, amikor az eljárás nem stabil inverzre vezet, új output függvények bevezetésével és azok alkalmas megválasztásával az eljárás második lépésében még stabil inverzhez juthatunk.

NEMLINEÁRIS RENDSZEREK — A közvetlen input rekonstrukcióra épülő detektálási módszerek egyik legfontosabb előnye, hogy a lineáris rendszerekre kapott eredmények viszonylag egyszerű eszközökkel terjeszthetők ki nemlineáris esetekre. Fontos megjegyezni,

hogy ez a tulajdonság a legtöbb lineáris rendszerre kidolgozott hibadetektálási módszerre nem érvényes.

A lineáris rendszerekre kapott eredmények kiterjesztésével megadtam egy, a nemlineáris rendszerek relatív fokkal rendelkező input affin osztályának invertálására vonatkozó inverziós algoritmust (Proposition 6.10). Hasonlóan a lineáris esethez, az algoritmus a rendszer relatív fokának algebrai reprezentációját használja az inverz előállításához.

Az eredmény értelmezéséhez tekintsük a többváltozós input affin nemlineáris rendszer állapotter reprezentációját

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i, \quad u \in \mathbb{R}^m, \quad y \in \mathbb{R}^p \\ y_j &= h_j(x), \quad j = 1, \dots, p.\end{aligned}\tag{12}$$

A nemlineáris rendszernek az x_o pontban létezik relatív foka (többváltozós rendszernek vektor relatív foka), amelyet r -el jelölünk, ha x_o környezetében minden x -re és minden $k < (r_j - 1)$ -re teljesül, hogy

$$L_{g_i} L_f^k h_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, m,$$

ahol L_f és L_g az $f(x)$ és $g(x)$ függvények deriváltjai, azt feltételezve, hogy a rendszer derivált mátrixa

$$A(x) \triangleq \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_p-1} h_p(x) \end{bmatrix}$$

$x = x_o$ -ban nonszinguláris (invertálható), azaz

$$\text{rank} A(x_o) = m.$$

A rendszer relatív fokának ismeretében (8) analógiájára írható

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_p^{(r_p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{bmatrix} + A(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix},\tag{13}$$

amely alapján az $u_1, \dots, u_m$ inputfüggvények az $A(x)$ mátrix invertálásával kiszámíthatók.

A nemlineáris input affin rendszerek fenti normál kanonikus alakban megadott reprezentációinak invertálására (Isidori, 1985) egy ún. 1-lépéses, a rendszer relatív fokának létezését feltételező invertálási módszert javasolt. Ez az inverzet egy lépésben megadó algoritmus, az $A(x)$ derivált mátrix invertálhatóságával szemben, nagyon szigorú követelményeket támaszt, hiszen sokszor, a gyakorlati felhasználás szempontjából fontos esetekben, az 1-lépéses algoritmussal az $A(x)$ mátrixot szingulárisnak kapjuk, ami – ilymódon – az inverz kiszámítását nem teszi lehetővé.

Az általam javasolt eljárás az Isidori algoritmus általánosításaként feloldja az 1-lépéses algoritmus által az $A(x)$ mátrix invertálhatóságával szemben támasztott követelményt és ezzel az eljárás gyakorlati felhasználhatóságát jelentősen kibővíti. Az eljárás elve az, hogy ha az első lépésben az $A(x)$ mátrix szingulárisnak adódna, új output függvények megkonstruálásával és azok deriváltjainak bevezetésével az inverzet véges k -lépéses rekurzióban állítjuk elő. A rekurzió lépéseit Proposition 6.10 foglalja össze.

4. TÉZIS. (7. Fejezet – Propositions 7.8, 7.9) — Az inverz rendszer geometriai tulajdonságaira épülő reziduál előállítási módszer detektáló szűrők tervezéséhez lineáris és nemlineáris rendszerekben [23, 25].

Míg az algebrai megközelítésben a rendszer relatív fok reprezentációjának volt kiemelkedő szerepe, addig a geometriai módszerek a rendszer zéró dinamikájának tulajdonságait használják ki.

LINEÁRIS RENDSZEREK — Tekintsük a $\Sigma : (A, B, C)$ bal-invertálható lineáris rendszert és jelölje $\mathcal{V}^*$ azt az extrémális (maximális) (A, B) -invariáns alteret, amelyet C nulltere ($\ker C$) foglal magába. A geometriai rendszerelmélet egy korábbi eredménye kimondja, hogy az inverz rendszer dinamikája az $(A + BF)$ leképezés $\mathcal{V}^*$ altérre vett megszorításaként adható meg, azaz a (9)-ben alkalmazott jelöléssel élve,

$$A_{inv} = (A + BF)|_{\mathcal{V}^*}, \quad (14)$$

ahol F egy (fiktív) visszacsatolás erősítési mátrixa úgy, hogy $(A + BF)\mathcal{V}^* \subseteq \mathcal{V}^*$. A $\mathcal{V}^*$ invariáns altér geometriai tulajdonságai alapján megmutattam, hogy a (14) megszorítás (azaz az inverz rendszer A_{inv} dinamikája) a rendszer ún. zéró dinamikájával ekvivalens (azzal a dinamikával, amely a rendszer kimenetén bármely időben nulla értékű jelet produkál).

Megjegyezzük, hogy az irodalomban több forrásból ismert maximális (A, B) -invariáns altér algoritmus segítségével $\mathcal{V}^*$ az F visszacsatolás tényleges ismerete hiányában is kiszámítható (ld. pl. Wonham, 1979; Basile and Marro, 1991).

Ezen tulajdonságok kihasználásával az inverz kiszámításának újszerű módját javasoltam, amely a következő módon foglalható össze. Különítsük el a rendszer zéró dinamikáját – az 1. ábra jelöléseit használva – az eredeti Σ rendszer Σ_1 és Σ_2 alrendszerre történő felbontásával, ahol Σ_2 fogja jelölni a zéró dinamikát. Ezt a felbontást egy T állapot transzformáció megkonstruálásával érhetjük el úgy, hogy

$$z = Tx = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}, \quad \xi \in \mathcal{V}^{*\perp}, \quad \eta \in \mathcal{V}^*,$$

ahol

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} B & \Lambda & V^* \end{bmatrix}, \quad \text{és} \quad \text{Im } \Lambda \subset \mathcal{V}^{*\perp}.$$

Ezt a transzformációt az eredeti rendszerre alkalmazva írhatjuk, hogy

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \bar{A}z + \bar{B}u \\ y &= \bar{C}z. \end{aligned} \quad (15)$$

Az új koordináta rendszerben értelmezett rendszer leíró mátrixokat a $p = \dim(\mathcal{V}^{*\perp})$ jelöléssel

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \underbrace{\bar{A}_{11}}_p & \underbrace{\bar{A}_{12}}_{n-p} \\ \underbrace{\bar{A}_{21}}_p & \underbrace{\bar{A}_{22}}_{n-p} \end{bmatrix} \begin{matrix} \} p \\ \} n-p \end{matrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \} p \\ \} n-p \end{matrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} \underbrace{\bar{C}_1}_p & \underbrace{0}_{n-p} \end{bmatrix},$$

alakban kapjuk, ahol $\bar{A}_{22}$ a rendszer elkülönített zéró dinamikája. Módszerünk során felteszük, hogy a $\bar{A}_{22}$ aszimptotikusan stabil (a rendszer nem-minimum fázisú). A (14) tulajdonság alapján vezessük be az $u = F\eta + v$ állapotvisszacsatolást és az

$$F = \begin{bmatrix} 0 & F_2 \end{bmatrix},$$

alakban adott visszacsatolási mátrixot majd az $u = F_2\eta + v$ visszacsatolást a (15) rendszerre alkalmazva állítsuk elő a

$$\begin{aligned}\dot{\xi} &= \bar{A}_{11}\xi + \bar{B}v \\ y &= \bar{C}\xi\end{aligned}\quad (16)$$

alakú dinamikus rendszert, majd az S állapottranszformáció alkalmazásával, (16) alapján, konstruáljuk meg a Σ_1 és Σ_2 alrendszerek $\bar{\Sigma}_1$ és $\bar{\Sigma}_2$ megfelelőit. Ennek megfelelően, az inverz rendszer dinamikáját az

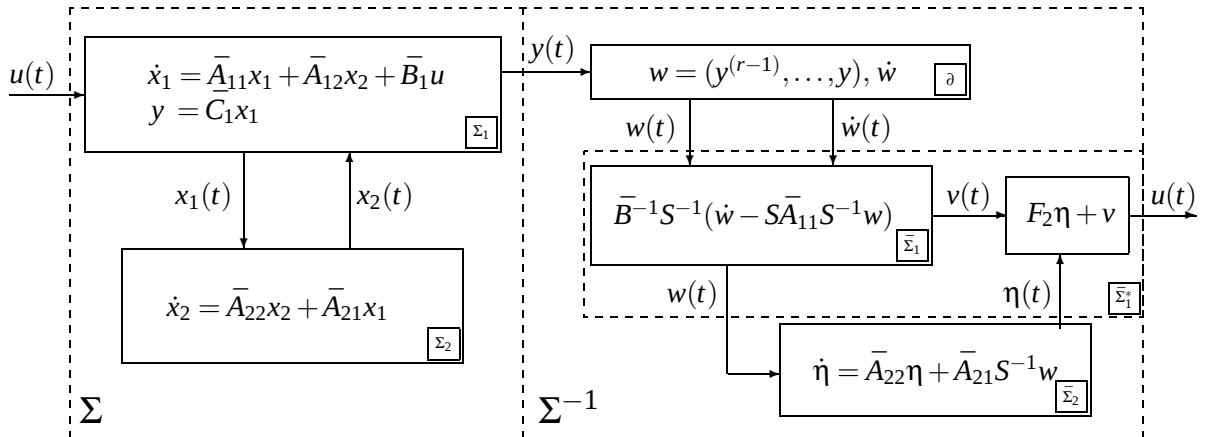
$$\begin{aligned}\dot{\eta} &= \bar{A}_{22}\eta + \bar{A}_{21}S^{-1}w \\ u &= F_2\eta + v,\end{aligned}\quad (17)$$

alakban kapjuk, ahol w a mérési adatok (output függvények) deriváltjait tartalmazó vektor és S egy, a dolgozatban megadott alakú állapot transzformációs mátrix.

Az említett felbontás lényege, hogy a $\bar{\Sigma}_1$ alrendszert olyan alakban hozzuk létre, amelynek állapotai és bemenetei az eredeti rendszer kimeneteivel és azok deriváltjaival előállíthatók. Látható pl, hogy (17)-ből a rendszer $u(t)$ bemeneti függvénye algebrai műveletekkel kiszámítható.

A Proposition 7.8 által összefoglalt eljárást tetszés szerinti bemeneti jelre (pl. hibajelekre) alkalmazva (azaz az inverziót a hibajelre elvégezve), a reziduálgenerálás olyan új módszerét kapjuk, amely a hibahatások teljes szétcsatolása mellett a hibajelek *becslésére* (azaz a hibajel valós paramétereinek meghatározására) is lehetőséget ad. A hibajel rekonstrukciós módszer számítási struktúráját lineáris rendszerekben a 2. ábra szemlélteti.

Az ábra szemléletesen mutatja, ahogyan a Σ rendszert alkalmas állapot transzformációs módszerekkel Σ_1 és Σ_2 alrendszerekre bontjuk, ahol Σ_2 a rendszer zéró dinamikája. A Σ_1 és Σ_2 alrendszereket az x_1, x_2 állapotváltozók csatolják össze. A felbontás ezen elemei a Σ^{-1} lineáris inverz struktúrában is megfeleltethetőek: a $\bar{\Sigma}_2$ alrendszer az inverz



2. ábra A rendszer dinamikus inverzióján alapuló input rekonstrukciós módszer struktúrája lineáris rendszerekben.

rendszer dinamikáját ábrázolja, míg $\bar{\Sigma}_1$ az állapotviszacsatolási blokkal az inverz rendszer ún. ‘read-out map’-je, amelynek kimenetéről (reziduál) az eredeti rendszer bemeneti függvényei “kiolvashatóak”.

A δ blokk az $y(t)$ mérési vektor deriváltjait (mint az inverz modell bemeneti függvényét), a meghatározott rendben állítja elő.

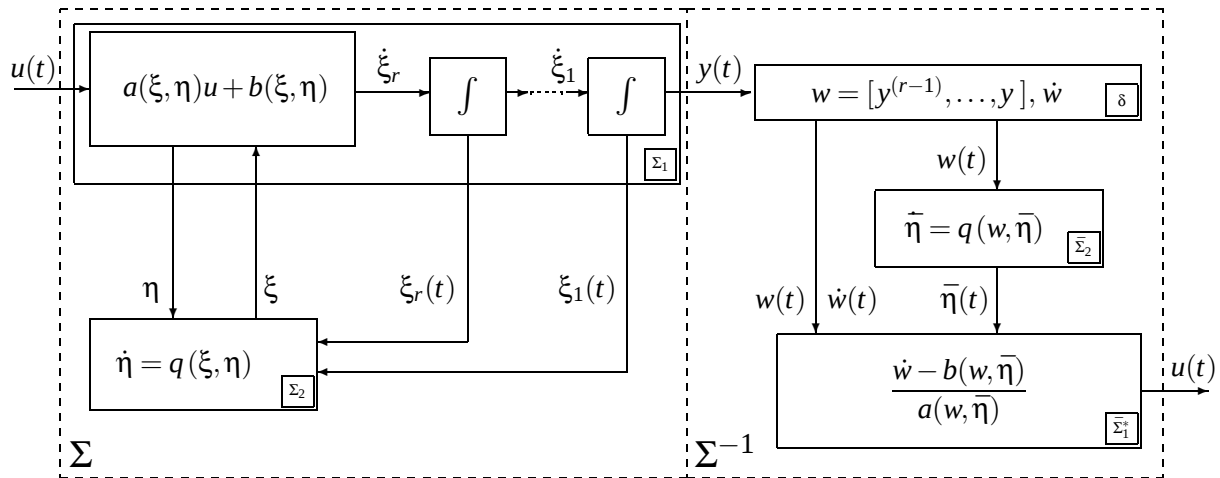
NEMLINEÁRIS RENDSZEREK — Tekintsük ismét a nemlineáris input affin rendszer (12) szerint megadott állapottér reprezentációját. Megmutattam, hogy az inverz rendszer dinamikájára vonatkozó geometriai altér reprezentáció lineáris rendszerekre érvényes (14) szerinti megfogalmazása viszonylag egyszerű eszközökkel kiterjeszthető nemlineáris rendszerekre is. A lineáris eredmények nemlineáris kiterjesztésének alapja az az irodalomból korábbról ismert eredmény, amely a lineáris rendszerek ker C -ben foglalt maximális (A, B) -invariáns alterének (azaz $\mathcal{V}^*$ -nak) fogalmát a

$$\ker(dh) = \bigcap_{j=1}^m \ker(dh_j) = (\text{span}\{dh_1, \dots, dh_m\})^\perp$$

által tartalmazott maximális irányított invariáns disztribúcióval (Δ^*) felelteti meg (Isidori, 1985; Nijmeijer and Van der Schaft, 1991). Ennek meghatározására fenti források a $\Delta^* = \Omega_*^\perp$ azonosság alapján az Ω_* kodisztribúció kiszámítására közölnek számítási módszereket (ld. *Controlled Invariant Codistribution Algorithm* - CICA).

Ezen eredmények ismeretében a lineáris rendszerekre kidolgozott módszer analógiájára eljárást adtam a (12) állapottér alakban megadott input affin nemlineáris rendszer inverzének kiszámítására (ld. Proposition 7.9).

A hibajel rekonstrukciós eljárás számítási struktúráját nemlineáris rendszerekben a 3. ábra szemlélteti. Az ábrán jól látható, ahogyan a Σ rendszert az alkalmas állapot transzformációs módszerekkel először Σ_1 és Σ_2 alrendszerekre bontjuk, ahol Σ_2 jelöli a rendszer zéró dinamikáját. A Σ_1 és Σ_2 alrendszereket az ξ, η állapotváltozók kapcsolják össze. A felbontás ezen elemei a Σ^{-1} nemlineáris inverz struktúrában is megfeleltethetőek: a $\bar{\Sigma}_2$ al-



3. ábra A rendszer dinamikus inverzióján alapuló input rekonstrukciós módszer számítási struktúrája nemlineáris rendszerekben.

rendszer az inverz rendszer dinamikáját ábrázolja, míg $\bar{\Sigma}_1^*$ most az állapotvisszacsatolást is tartalmazó ‘read-out’ blokk.

A δ -val jelölt funkcióblokk az $y(t)$ mérési vektor derivált függvényeit ($w, \dot{w}$) a lineáris esethez hasonlóan a megadott rendben állítja elő.

5. TÉZIS. (8. Fejezet – Propositions 8.1, 8.2, 8.7). — *Hibák robusztus detektálása és becslése a hibahatások közvetlen rekonstrukcióján alapuló teljes szétcsatolással és az inverz rendszer dinamikájának on-line becslésével* [26].

A dolgozat 8. fejezetében bemutatott esettanulmányra alapozva, a közvetlen input rekonstrukcióra épülő detektálási módszerek egészen új alkalmazási lehetőségét adtam.

Az esettanulmány egy, az irodalomból korábbról ismert valós repülőgép monitoring feladatot dolgoz fel, amely feladatnak legfontosabb jellemzője, hogy – a rendszermóddell állapotterének szerkezetéből adódóan, – a rendszerben fellépő hibahatások a rendszerre kívülről ható perzisztens zavarástól az irodalom által eddig közölt módszerek alkalmazásával nem voltak szétcsatolhatóak. Ennek következtében a robusztus detektálási problémára adott eddigi megoldások a zavarójel optimális szűrési eljárásokkal történő gyengítésére vonatkoztak (Douglas and Speyer, 1995; Chung and Speyer, 1998), amely megközelítésben a többszörös hibák egymástól való elkülönítése, ha csupán egyetlen szűrő alkalmazását feltételezzük, problematikus.

A dolgozat jelöléseivel egybevágyóan tekintsük a hibahatásokkal és külső zavarokkal terhelt lineáris dinamikus rendszer állapotter felírását a következő alakban

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_\omega \omega + B_\delta(\delta + v_\delta), \\ y &= Cx + E_{A_z} \mu_{A_z},\end{aligned}\tag{18}$$

ahol $\delta(t)$ jelölje most a rendszer irányítójelét, továbbá $v_\delta(t)$ és $\mu_{A_z}(t)$ jelölje a rendszer egyik beavatkozó szervét, illetve az egyik gyorsulás érzékelő mérését befolyásoló hibahatásokat és $\omega(t)$ legyen a rendszerre ható perzisztens külső zavarás. Feladatunk a hibák zavarhatásokra legkevésbé érzékeny (robosztus) detektálása, valamint az egyes hibahatások egymástól való elkülönítése. A feladat megoldását két, újszerű megközelítésben adtam meg.

1. Robosztus detektálás és hiba elkülönítés a hibák teljes szétcsatolásával és a zavarok H_∞ értelemben vett gyengítésével. – Megmutattam, hogy az ilyen jellegű feladatok egyetlen szűrővel előállított robusztus megoldása megkapható a hibák rendszerinverzió alapuló teljes szétcsatolásával és a zavarhatások H_∞ értelemben vett optimális gyengítésével. Ezen megoldásnak feltétele, hogy a rendszerből nagyobb számú mérés kell, hogy rendelkezésre álljon, mint a detektálandó hibák összes száma.

A megoldás Proposition 8.1 szerint javasolt lényege, hogy első lépésben a (18) rendszert az összes detektálandó és elkülönítendő hibajelre nézve invertáljuk előállítva az inverz rendszerre vonatkozó

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + B_\delta \xi_\delta + B_y \xi_y\tag{19}$$

$$f = \bar{C}\bar{x} + D_\delta \xi_\delta + D_y \xi_y,\tag{20}$$

általános állapotter reprezentációt, ahol

$$\xi_y = [y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(k-1)}]^T \quad \text{és} \quad \xi_\delta = [\delta, \dot{\delta}, \dots, \delta^{(k)}]^T$$

a rendszer méréseit és azok deriváltjait a megkövetelt rendben tartalmazó vektorok és

$$\begin{bmatrix} \mu_{A_z} \\ v_\delta \end{bmatrix} = \bar{C}\bar{x} + \bar{D}\bar{u}(y, \dot{y}, \delta) \quad (21)$$

a hibajeleket megadó output függvény (reziduál). Vegyük észre, hogy az ilyen feltételekkel megkapott (21) rendszer az egymástól teljesen szétcsatolt (exact decoupling), ám zavarokkal terhelt reziduál. Rámutattam, hogy a (19) reprezentáció ekvivalens az

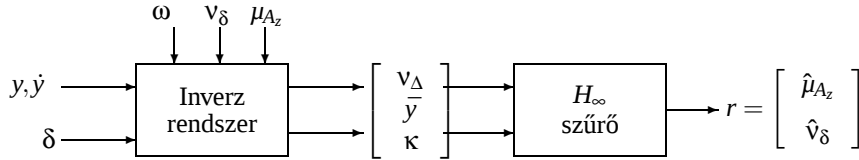
$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + B_\Delta v_\Delta + B_\kappa \kappa \quad (22)$$

alakban megadott állapottér felírással, amelyben $v_\Delta(t)$ úgy tekinthető, mint a rendszert érő hibák egyesített hatása, $\kappa(t)$ pedig a B_κ irányból érkező legrosszabb (worst-case) zavarhatás. A fentiek feltételezésével a (22-21) rendszert az

$$\bar{y} = C_1 \bar{x} \quad (23)$$

megfigyelésekkel kiegészítve – ahol C_1 az inverz előállításában nem szereplő mérési egyenleteket kiválasztó megfigyelési mátrix (azaz $\dim C_1 < \dim C$), – a (18-23) rendszer alapján a $\kappa(t)$ zavarok $v_\Delta(t)$ hibák ellenében vett elnyomása érdekében H_∞ szűrő tervezhető. Ennek feltételül azt szabjuk, hogy a $(C_1, \bar{A})$ pár megfigyelhető legyen.

A megoldás fontosságának és újszerűségének egyik legfontosabb eleme, hogy a fenti szempontok alapján megtervezett H_∞ szűrő, amellyel, hogy optimális zavarelnyomást biztosít, elvégzi az inverz reprezentáció on-line állapotbecslését is, szükségtelessé téve a rendszer zéró dinamikájának tényleges kiszámítását a szűrő tervezése során. A módszer alkalmazásának vázlatát a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra A rendszer inverziójával megoldott teljes hibaszétcsatolású detektálás és hiba elkülönítés elve amelyet a zavarhatások optimális elnyomásával kombinálunk. A H_∞ szűrő a zavargyengítés mellett az inverz dinamika becslését is adja.

2. Robusztus detektálás és hiba elkülönítés a hibák és zavarok teljes szétcsatolásával. – A fenti megoldásából kiindulva, azt továbbfejlesztve, kidolgoztam a (18) rendszerre megfogalmazott detektálási feladat teljes zavaraszétcsatolás elvére épülő robusztus megoldásának általános módszerét, amely az inverz dinamika on-line becslésére épül. E megoldásban, az előbbiekben ismertetett eljáráshoz hasonló módon, a tervezés első lépésében előállítjuk a rendszer inverz dinamikáját

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + B_\delta \xi_\delta + B_y \xi_y \quad (24)$$

alakban leíró állapot egyenleteket, de ez esetben már nem csak a hibajeleket, hanem a zavarok szerint is. Esetünkben ez azt jelenti, hogy az inverz kimeneti egyenletei (azaz a

szűrő reziduál kimenete) az

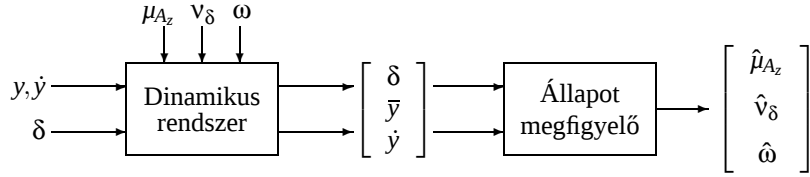
$$\begin{bmatrix} \mu_{A_z} \\ v_\delta \\ \omega \end{bmatrix} = \bar{C}\bar{x} + \bar{D}\bar{u}(y, \dot{y}, \delta) \quad (25)$$

alakban írható. Ha a (24-25) rendszer megoldható, akkor a reziduál a hibajelekre és zavarokra nézve egy teljesen szétcsatolt rendszert alkot, azaz a hibák detektálása és elkülönítése a zavarhatásoktól függetlenül megoldható. Az is nyilvánvaló, hogy a (25) reziduál az $\bar{x}(t)$ inverz állapot ismeretében kiszámítható.

A fentiek értelmében megmutattam, hogyan tervezhető a (24) inverz rendszerre az eredeti rendszer megfelelő szempontok szerint összeválogatott

$$\bar{y} = C_1 \bar{x} \quad (26)$$

mérései alapján $((C_1, \bar{A})$ pár megfigyelhető) olyan állapotmegfigyelő, amely a (24) inverzdinamika $\bar{x}(t)$ állapotainak $\hat{\bar{x}}(t)$ becslését megadva a (25) reziduál rendszer on-line kiszámíthatóságát lehetővé teszi.



5. ábra A hibák és zavarok teljes szétcsatolásának elvére épülő robusztus detektálás és hibajel becslés elvi sémája, amelyet az inverz dinamika on-line becslése egészít ki. Egy állapot megfigyelő, az eredeti rendszer ki/bemeneteinek és azok válogatott deriváltjainak mérései alapján az inverz dinamika on-line becslését adja.

A fenti megoldási módszer szerint előállított (21) és (25) alakú reziduálok nem csak a hibák detektálására és elkülönítésre alkalmas információt szolgáltatják, de – mivel közvetlen input rekonstrukciós eljárással állítottuk őket elő, – a hibajelek becslését is megadják, amely a hibák tényleges nagyságának megítélésében van segítségünkre.

A módszer alkalmazásával korábban nem megoldható új feladatosztályok megoldására nyílik lehetőség, új távlatokat nyitva és jelentősen leegyszerűsítve a közvetlen input rekonstrukciós elven működő szűrőtervezési eljárásokat és a módszer gyakorlati alkalmazását.

A módszer detektáló szűrők tervezésére való megfelelőségét több szempont szerint elvégzett és dokumentált szimulációs kísérletek igazolják, azok gyakorlatban történő alkalmazhatóságát a dolgozatban részletes, reprodukálható adatok támasztják alá.

IV. AZ EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE ÉS GYAKORLATI HASZNOSÍTÁSA

A jelen tézis összefoglalóban említett tudományos eredmények számos, az ipari automatizálás és műszaki informatika bevezetőben definiált területeihez illeszkedő kutatási eredmények, amelyeknek elméleti jellegű (alapkutatási) és a mérnöki alkalmazásokhoz kötődő (alkalmazott kutatási) vonatkozásai egyaránt említhetők.

A PROBLÉMAFELVETÉS GYAKORLATI SZEMPONTBÓL VETT AKTUALITÁSA — A fellelt problémák a tudományterület aktuális megoldandó problémái közül kerültek kiválasztásra, a megoldásra alkalmazott módszerek tudományos előzményekre épülő megközelítések eredményei. Szerző joggal gondolhatja ezért, hogy bármely a megfogalmazott problématerületre vonatkozóan elért új eredmény és annak közzététele a tudományos közösség érdeklődésére számot tarthat, hozzájárulva a tudományterület belső fejlődéséhez.

Szerző ebbéli meggyőződését támasztja alá az a nagyszámú érdemi hivatkozás, amely a szakterület vonatkozó irodalmában az említett eredményekre pozitívan utaló módon megjelent. A detektáló szűrők tervezési módszerei területén bevezetett új fogalmak, megközelítési módszerek és eljárások a tudományterület problémaszemléletéhez aktív hozzájárulást adtak. Ilyen eredményeknek tekinthetők a robusztus detektáló szűrők tervezésére javasolt közvetlen hibarekonstrukciós módszerek, ezek eszközei és technikája, és a skálázott H_∞ optimális szűrőtervezési megközelítés alkalmazása a detektálás robusztussági és érzékenységi mutatóinak beállítására.

Más szemszögből nézve, az értekezésben tárgyalt problémák felvetését és kidolgozását a mérnöki gyakorlat lehetőségei és módszerei nagymértékben inspirálták, – s egyben be is határolták. Egyetlen megoldási módszer sem született pusztán elméleti megfontolásokra alapozva: a mérnöki gyakorlat aktuális műszaki lehetőségei alapvető (gyakran restriktív) feltételként befolyásolták a kutatásban alkalmazott módszereinket, megközelítéseinket.

A bevezetőben említett módon jellemzett új termék kategóriák megjelenésével rohamos fejlődésnek indultak olyan új jellegű alkalmazási területek, amelyek a hibadetektálási eljárások általunk megfogalmazott módszereire fokozottan igényt tarthatnak. Amíg öt-tíz évvel ezelőtt a hibadetektálásról és műszaki diagnosztikáról érkező közlemények tipikus alkalmazási célterületként az olyan jellemzően nagyméretű rendszereket jelölték meg, mint pl. a repülőgépek, atomerőművek, vagy veszélyes vegyipari folyamatok irányítása, addig mára ez az alkalmazási terület jelentősen kibővülve, magában foglalja a fogyasztási javak egyre szélesedő körét. Ezek az alkalmazások érintik az autópálya szinte teljes termék spektrumát, az automatikus jármű helyzetérzékelő (GPS, AGPS) rendszerekkel, az intelligens szállító járművek és autópályák irányító rendszereit, a különféle hozzáférés vezérlő és engedélyező rendszereket (access control devices), az intelligens (smart) szenzorokat és szenzor hálózatokat, az ún. micro-elektro-mechanikus rendszereket (MEMS), a

városi tömegközlekedés és légiszállítás biztonsági, felügyeleti rendszereit, vagy a digitális képrögzítés technológiájának általánossá válásával, a digitális képfeldolgozó eszközök egyre növekvő választékát.

A MÓDSZEREK ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK FELTÉTELEI ÉS KORLÁTAI — A javasolt szűrőtervezési módszerek univerzálisak, egy adott alkalmazási területhez csak annyiban köthetők, amennyiben a módszer által igényelt rendszermodell (rendszerint annak egy determinisztikus állapottér reprezentációja), rendelkezésre állását feltételezzük. Ez a feltétel az alkalmazási feladatok jelentős hányadában nem jelent megszorítást; standard rendszer-identifikációs módszerek alkalmazásával a fizikai folyamat matematikai modellje előállítható.

További feltételként szabjuk a rendszer (illetve alkalmanként a rendszer zéró dinamikájának) stabilitását – azaz feltesszük, hogy a rendszer minimális fázisú. A rendszer-inverzió alapuló módszerek, dolgozatban közölt jelen formájukban, nem garantálják a stabil inverz előállítását még minimális fázisú rendszerek esetében sem. Ez olyan korlátozást jelent, amely a gyakorlatban előforduló feladatok egy részében nem teszi lehetővé a javasolt közvetlen input rekonstrukciós eljárások alkalmazását.

Megmutattam, hogy az ilyen, nem stabil inverzet produkáló esetek egy hányadában a probléma további megfontolások alkalmazásával kezelhetővé tehető. Ezzel kapcsolatban a dolgozatban használható módszereket hoztam.

Megjegyezzük, hogy a stabil inverz előállítása a matematikai rendszerelmélet fél évszázad óta egyik legfontosabb megoldandó problémája, ami még további kutatási erőfeszítéseket igényel. Ebből a szempontból különösen fontosak az inverz dinamikájának on-line becslésére alapozott módszereink, amelyek szükségtelemmé teszik a zéró dinamika tényleges kiszámítását, megtartva a módszer alkalmazásában a megközelítés összes előnyét.

További megemlíthető probléma a deriváltmérések alkalmazásának szükségessége, ami azonban, az említett instrumentális fejlődés tükrében, már egyre kevésbé technikai akadály, sokkal inkább a deriváltmérések által a problémába emelt (szimulációinkkal is demonstrált) inherens zajérzékenység. Ennek a problémának megoldása a közeljövő kiemelt fontosságú kutatási feladata (pl. optimális szűrés). A módszerek diszkretizálásával (alapvetően lineáris esetekben) a deriváltak alkalmazásának problémáját a reziduáljel késleltetett előállításával oldhatjuk fel.

Az inverz rendszer dinamikájának becslésére vonatkozó eredmények a detektálandó hibák számát meghaladó mérés rendelkezésre állását szabták feltételül. Ez a feltétel valójában csak a detektálósűrítő tervezési feladat egy hagyományos megközelítésében, (amikor egy korábban más célokra specifikált irányítórendszerben rendelkezésre álló mérésekhez igazodva kell a szűrőtervezési feladatot megoldani), jelenthet korlátozást. A hibatűrő irányítási rendszerek integrált tervezési elveinek alkalmazásával már a termék specifikációja során biztosíthatjuk, hogy folyamatmérések a legjobb detektálhatósági mutatókat biztosító módon, megfelelő számban és struktúrában rendelkezésre álljanak.

Összefoglalásul fontos megemlíteni, hogy a jellemzett nehézségek ellenére a közvetlen hibarekonstrukciós módszerek, a korábbi ismert eljárásokhoz képest, általában kevesebb megszorítást tartalmaznak, amely tulajdonság mibenlétéről a szóban forgó módszerek tárgyalásánál mindig szót ejtettünk. Ez tulajdonság az esettanulmányban bemutatott módon a problémák megközelítésében új perspektívákat nyitva, új megoldási módszerek kidolgozását teszi lehetővé.

IRODALOM

- Basile, G. and G. Marro: 1969, 'Controlled and conditioned invariants in linear systems theory'. *J. Optimiz. Theory and Appl.* **3(5)**, 305–315.
- Basile, G. and G. Marro: 1991, *Controlled and conditioned invariants in linear systems theory*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Basseville, M. and I. V. Nikiforov: 1993, *Detection of Abrupt Changes. Theory and Application*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Beard, R. V.: 1971, 'Failure accomodation in linear systems through self-reorganization'. Ph.D. thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, Cambridge, MA. Ph.D. Dissertation, MVT-71-1.
- Brockett, R. W.: 1978, 'Feedback invariants for nonlinear systems'. In: *Proc. Int. Congress of Mathematicians*. pp. 1357–1368. Helsinki.
- Brockett, R. W.: 1981, 'Nonlinear control theory and singular Riemannian geometry'. In: P. Hilton and G. Young (eds.): *New directions in applied mathematics*. pp. 11–27. Springer Verlag, New York.
- Chen, J. and R. J. Patton: 1998, *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic. Boston.
- Chow, E. Y. and A. S. Willsky: 1984, 'Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems'. *IEEE Trans. Aut. Cont.* **AC-29(7)**, 603–614.
- Chung, W. H. and J. L. Speyer: 1998, 'A Game Theoretic Fault Detection Filter'. *IEEE Trans. Aut. Cont.* **43(2)**, 143–161.
- Deckert, J. C., M. N. Desai, J. J. Deyst, and A. S. Willsky: 1977, 'F-8 DFBW sensor failure detection using analytical redundancy'. *IEEE Trans. Aut. Cont.* **AC-22**, 795–803.
- Ding, X. and P. M. Frank: 1989, 'Fault detection via optimally robust detection filters'. In: *Proc. of the 28th IEEE Conf. on Dec. Cont.* Tampa, FL.
- Douglas, R. K. and J. L. Speyer: 1995, 'An H-infinity Bounded Fault Detection Filter'. In: *Proc. Amer. Cont. Conf.* pp. 86–90. Seattle, WA.
- Edelmayer, A.: 1994, 'Robust Detection Filter Design in Uncertain Dynamical Systems'. Ph.D. thesis, Syst. and Control Lab., Computer and Automation Research Inst., Hungarian Academy of Sci., Budapest. p. 115.
- Edelmayer, A., J. Bokor, and L. Keviczky: 1994, 'An H_∞ Filtering Approach to Robust Detection of Failures in Dynamical Systems'. In: *Proc. 33rd IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 3037–3039. Orlando, FL.

- Edelmayer, A., J. Bokor, and L. Keviczky: 1996, 'H-infinity Detection Filter Design for Linear Systems: Comparison of Two Approaches'. In: *Proc. of the 13th IFAC World Congress*. pp. 37–42. San-Francisco, CA.
- Frank, P. M. and X. Ding: 1994, 'Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis'. *Automatica* **30**(5), 789–804.
- Gertler, J. J.: 1997, 'Fault detection and isolation using parity relations'. *Cont. Eng. Practice* **5**(5), 653–661.
- Gertler, J. J.: 1998, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel and Dekker. New York.
- Goodwin, G. C.: 2002, 'Inverse Problems with Constraints'. In: *CD-ROM Proc. 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.
- Himmelblau, D. M.: 1978, *Fault detection and diagnosis in Chemical and petrochemical processes*. Chemical Engineering Monograph **8**, Elsevier.
- Isidori, A.: 1985, *Nonlinear Control Systems*. Springer-Verlag, Berlin. (Third Edition 1995).
- Jones, H. L.: 1973, 'Failure Detection in Linear Systems'. Ph.D. thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, The Charles Stark Lab., Cambridge, MA. T-608.
- Krupadanam, A. S., A. M. Annaswamy, and R. S. Mangoubi: 2002, 'Multivariable Adaptive Control Design with Applications to Autonomous Helicopters'. *J. Guidance Cont. Dynamics* **25**(5), 843–851.
- Lou, X.-C., A. S. Willsky, and G. C. Verghese: 1986, 'Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems'. *Automatica* **22**(3), 333–344.
- Mangoubi, R. S.: 1998, *Robust Estimation and Failure Detection – A Concise Treatment*. Springer-Verlag, London.
- Mangoubi, R. S., B. D. Appleby, and J. Farrell: 1993, 'Robust Estimation in Failure Detection'. In: *Proc. 32nd IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 2317–2322. San Antonio, TX.
- Nijmeijer, H. and A. J. Van der Schaft: 1991, *Nonlinear Dynamical Control Systems*. Springer-Verlag, London.
- Romagnoli, J. A. and G. Stephanopoulos: 1981, 'Rectification of process measurement data in the presence of gross errors'. *Chem. Eng. Sci.* **36**, 1849–1863.
- Silverman, L. M.: 1969, 'Inversion of Multivariable Linear Systems'. *IEEE Trans. Aut. Cont.* **AC-14**(3), 270–276.
- Szigeti, F.: 1992, 'Kalman's Rank Conditions for Infinite Dimensional Time Dependent Linear Systems'. In: *Proc. Conf. EQUADIFF*. pp. 927–931. Barcelona, Spain.
- Szigeti, F., J. Bokor, and A. Edelmayer: 1995, 'On the Reachability Subspaces of Time Varying Linear Systems'. In: *Proc. 3rd Euro. Cont. Conf., ECC'95*. pp. 2980–2985. Roma, Italy.
- Szigeti, F., J. Bokor, and A. Edelmayer: 2002, 'Input reconstruction by means of system inversion: application to fault detection and isolation'. In: *CD-ROM Proc. 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.
- Szigeti, F., C. E. Vera, J. Bokor, and A. Edelmayer: 2001, 'Inversion based fault detection and isolation'. In: *Proc. 40th IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 1005–1010. Orlando, FL.

- Varga, A.: 2002, Computational Issues in Fault Detection Filter Design'. In: *Proc. 41st IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 4760–4765. Las Vegas, NV.
- Willsky, A. S.: 1976, 'A survey of design methods for failure detection in dynamic systems'. *Automatica* **12**, 601–611.
- Willsky, A. S. and H. Jones: 1976, 'A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems'. *IEEE Trans. Aut. Cont.* **21**, 108–112.
- Wonham, W. M.: 1979, *Linear Multivariable Control. A Geometric Approach*. Springer-Verlag, New York. First Edition.

PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

1992 –

SCI[©] impakt faktor
és irodalmi hivatkozási adatok megjelölésével⁴

- [1] Keviczky, L., J. Bokor, A. Edelmayer and F. Szigeti: 1992, Detection Filter Design in the Presence of Time Varying System Perturbations'. In: *Proc. of the 31st IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 3091–3093. Tucson, AZ., **Cit: 0(2)**.
- [2] Keviczky, L., J. Bokor, F. Szigeti and A. Edelmayer: 1993, 'Modeling Time Varying System Perturbations: Application to Robust Change Detection and Identification'. In: *Proc. 12th IFAC World Congress.* pp. 517–520. Sydney, Australia, **Cit: 1(2)**.
- [3] Edelmayer, A.: 1994, 'Robust Detection Filter Design in Uncertain Dynamical Systems'. Ph.D. Thesis, Systems and Control Lab., Comp. and Aut. Research Inst., Hungarian Academy of Sciences, Budapest, **Cit: 0(2)**.
- [4] Edelmayer, A., J. Bokor and L. Keviczky: 1994, 'An H_∞ Filtering Approach to Robust Detection of Failures in Dynamical Systems'. In: *Proc. 33rd IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 3037–3039. Orlando, Lake Buena Vista, FL, **Cit: 15(42)**.
- [5] Soumelidis, A., J. Bokor, L. Keviczky, A. Edelmayer, P. Gáspár, Z. Csáki and E. I. Varga: 1994, Toward and Intelligent Evolutionary Signal Processing Based Failure Monitoring and Diagnostic System for Complex Plants'. In: *Proc. IFAC/IMACS Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'94.* pp. 760–765. Helsinki, Finland, **(N/A)**.
- [6] Edelmayer, A., J. Bokor and L. Keviczky: 1995, 'Improving Robustness of On-Line Failure Detection and Isolation Methods'. In: *Proc. Conf. on Automation.* pp. 563–572. Budapest, Hungary, **(N/A)**.
- [7] Edelmayer, A., F. Szigeti and Z. Varga: 1995, 'Algebraic Computation of the Solution of First Order Linear Partial Differential Equations in Control with Examples'. In: *Proc. 3rd European Cont. Conf., ECC'95.* pp. 3443–3448. Roma, Italy, **(N/A)**.
- [8] Kiss, J., J. Bokor, A. Edelmayer and A. Soumelidis: 1995, 'An Open System Approach to Change Detection and Failure Monitoring of Complex Plants: The NPP Experience'. In:

⁴ **Nomenclature:** A publikációs jegyzékben **[IF: <impact>]** a közlemény impakt faktorát jelzi a legfrissebb nemzetközi SCI[©] 'Journal Citation Report' adatai alapján. Az adott cikkekre való hivatkozások számát a **Cit: <num1 (num2)>** formában adjuk meg, ahol num1 az SCI[©] 'Scientific Journal Citation Index' hivatkozási rendszer szerint vett hivatkozások számát, num2 pedig az összes hivatkozások számát ábrázolja, amely tartalmazza az SCI által nem minősített (alapvetően konferencia kiadványokban és disszertációkban fellelhető) hivatkozásokat is. (N/A) (non-applicable) megjelölés használatos ha megjelölhető adat nem áll rendelkezésre.

Proc. Symp. on Nuclear Reactor Surveillance and Diag., SMORN VII. p. 7.8. Avignon, France, (N/A).

- [9] Szigeti, F., J. Bokor and A. Edelmayer: 1995, 'On the Reachability Subspaces of Time Varying Linear Systems'. In: *Proc. 3rd Euro. Cont. Conf., ECC'95.* pp. 2980–2985. Roma, Italy, (N/A).
- [10] Soumelidis, A., J. Bokor, P. Gáspár and A. Edelmayer: 1995, 'A User-Friendly Environment for Designing Signal Processing-Based Failure Monitoring in Nuclear Power Plants'. In: *Proc. Conf. on Automation.* pp. 573–582. Budapest, Hungary, (N/A).
- [11] Edelmayer, A., J. Bokor and L. Keviczky: 1996, 'H-infinity Detection Filter Design for Linear Systems: Comparison of Two Approaches'. In: *Proc. of the 13th IFAC World Congress.* pp. 37–42. San-Francisco, CA, **Cit: 17(31)**.
- [12] Edelmayer, A., J. Bokor and L. Keviczky: 1997, 'Improving Sensitivity of H-infinity Detection Filters in Linear Systems'. In: *Proc. IFAC Symp. on Syst. Id., SYSID'97.* pp. 1195–1200. Kytakiushu, Japan, **Cit: 4(8)**.
- [13] Edelmayer, A., J. Bokor and L. Keviczky: 1997, 'A Scaled L_2 Optimization Approach For Improving Sensitivity of H_∞ Detection Filters For LTV Systems'. In: *Proc. 2nd IFAC Symp. on Robust Cont. Design, ROCOND'97.* pp. 543–548. Budapest, Hungary, **Cit: 1(5)**.
- [14] Edelmayer, A., J. Bokor and F. Szigeti: 1997, 'A Geometrical View Of Observer-Based Methods For Detection and Isolation of Faults in Time Varying and Bilinear Systems'. In: *Proc. 3rd IFAC Symp. Fault Det. Supervision and Safety for Techn. Sys., Safeprocess'97.* Vol. 1, pp. 140–146. Kingston Upon Hull, U.K., **Cit: 0(4)**.
- [15] Szigeti, F., J. Bokor, A. Edelmayer and R. Tarantino: 1997, 'Fault Detection Filter Design for LTV Systems: An Algebraic-Geometrical Approach'. In: *Proc. 4th Euro. Cont. Conf., ECC'97,* **Cit: 0(2)**.
- [16] Edelmayer, A., J. Bokor, F. Szigeti and L. Keviczky: 1997, 'Robust Detection Filter Design in the Presence of Time Varying System Perturbations'. *Automatica* 33(3), pp. 471–475, **[IF: 1.630] Cit: 13(41)**.
- [17] Edelmayer, A. and J. Bokor: 1998, 'Robust Fault Detection Filters for Linear Systems: Summary of Recent Results'. In: *Proc. Conf. on Industrial Diagnostics.* pp. 19–26. Jurata, Poland, (N/A).
- [18] Edelmayer, A., J. Bokor and F. Szigeti: 1999, Detection Filter Design in Uncertain Linear Systems: Application of the Generalized Observer Scheme'. In: *Proc. 14th IFAC World Congress.* pp. 121–126. Beijing, China, **Cit: 0(2)**.
- [19] Edelmayer, A. and J. Bokor: 2000, Scaled H_∞ Filtering for Sensitivity Optimization of Detection Filters'. In: A. Edelmayer (ed.): *Proc. 4th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'00.* pp. 324–330. Pergamon Press, London, **Cit: 6(9)**.
- [20] Mangoubi, R. S. and A. Edelmayer: 2000, 'Model Based Fault Detection: The Optimal Past, the Robust Present and a Few Thoughts on the Future'. In: A. Edelmayer (ed.): *Proc. 4th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Safeprocess'00.* pp. 65–76. Pergamon Press, London, **Cit: 3(6)**.

- [21] Szigeti, F., C. E. Vera, J. Bokor and A. Edelmayer: 2001, 'Inversion based fault detection and isolation'. In: *Proc. 40th IEEE Conf. Dec. Cont.* pp. 1005–1010. Orlando, FL, **Cit: 2(3)**.
- [22] Edelmayer, A.: 2002, 'Editorial notes to the special issue on fault detection and isolation'. *Int. J. Robust and Nonlin. Cont.* 12(8), 627–628. John Wiley, London, ISSN: pp. 1049-8923, **[IF: 1.021] (N/A)**.
- [23] Edelmayer, A. and J. Bokor: 2002, 'Optimal H_∞ Scaling for Sensitivity Optimization of Detection Filters'. *Int. J. Robust and Nonlin. Cont.* 12(8), 749–760. John Wiley, London, ISSN: pp. 1049-8923, **[IF: 1.021] Cit: 0(3)**.
- [24] Edelmayer, A., C. E. Vera and F. Szigeti: 2002, 'A Geometric View On Inversion Based FDI in Linear Systems'. In: *Proc. Mediterranean Conf. Cont. Aut.* Lisbon, Portugal, **Cit: 0(1)**.
- [25] Szigeti, F., J. Bokor and A. Edelmayer: 2002, 'Input reconstruction by means of system inversion: application to fault detection and isolation'. In: *CD-ROM Proc. 15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain, **(N/A)**.
- [26] Edelmayer, A., J. Bokor, Z. Szabó and F. Szigeti: 2004, 'Input reconstruction by means of system inversion: a geometric approach to fault detection and isolation in nonlinear systems'. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 14(2), pp. 101–111, **(N/A)**.
- [27] Edelmayer, A., J. Bokor and Z. Szabó: 2005, 'Robust Detection and Estimation of Faults with Exact Fault Decoupling and H_∞ Disturbance Attenuation in Linear Dynamical Systems'. Submitted to: *IEEE Amer. Cont. Conf., ACC'06*. To be held in Minneapolis, Minnesota, USA **(N/A)**.

A listában feltüntetett közlemények kumulatív impakt faktora: **[IF: 3.672]**

A cikkek SCI hivatkozásainak száma összesen: **62**

A cikkekre való hivatkozások összes száma: **163**