



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2022**



Modell alapú hibadiagnosztika MIMO rendszerekben

Készítette: Valkó Judit

Témavezetők: Tarcsay Bálint Levente

Dr. Takács-Bárkányi Ágnes

Dr. Németh Sándor

Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézeti Tanszék

A pályamunka lezárásának dátuma: 2022. 11. 06.

Tartalomjegyzék

.....	1
ABSZTRAKT	1
RÖVIDÍTÉSEK	2
JELÖLÉSJEGYZÉK	3
1. FEJEZET - BEVEZETÉS.....	4
2. FEJEZET – IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	6
2.1. HIBÁK ÉS FAJTÁIK	6
2.2. HIBADIAGNOSZTIKA	7
2.3. KVANTITATÍV MODELL ALAPÚ DIAGNOSZTIKA	12
2.3.1. <i>Állapottér modell</i>	13
2.3.2. <i>Chow-Willsky módszer</i>	15
2.4. KORTÁRS HIBADETEKTÁLÁSI MÓDSZEREK	18
3. FEJEZET - MIMO MÉRŐRENDSZER BEMUTATÁSA.....	20
3.1. NÉGYTARTÁLYOS SZINTSZABÁLYZÓ RENDSZER	20
3.2. FEJEZET - ALKALMAZOTT MODELLEZÉSI MÓDSZER.....	22
4. FEJEZET – SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK.....	25
4.1. A FEHÉRDOBOZ MODELL ALAPÚ SZIMULÁTOR EREDMÉNYEI ÉS VALIDÁLÁSA	25
4.2. ÁLLAPOTTÉR MODELL IDENTIFIKÁLÁSA	28
4.3. REZIDUÁLIS GENERÁTOR	32
ÖSSZEFOGLALÁS.....	37
IRODALOMJEGYZÉK.....	38

Absztrakt

Az ipari technológia fejlődésével egyetemben növekvő igények egyre összetettebb rendszerek telepítését teszik szükségessé. Az összetettség következményeként azonban növekszik a rendszerek biztonságtechnikai kockázata és a hibák megjelenésének valószínűsége. A biztonságtechnika, mint fontos gazdasági szempont egyre nagyobb jelentőséget nyert az elmúlt évtizedeken belül. A megfelelő biztonságtechnikához elengedhetetlen az ipari rendszerek felülvizsgálatára alkalmas, adat vagy modell alapú információkat alkalmazó diagnosztikai eljárások fejlesztése.

Az egyes rendszereket jellemző modellek révén megbecsülhető a rendszer viselkedése rendeltetésszerű üzemeltetési körülmények között. A modell eredményeit a valós rendszer viselkedésével összehasonlítva megállapítható, hogy megfelelő-e a rendszer működése, az eredmények közti eltéréseket működési hiba, modell hiba vagy mérési zaj okozhatja. A különböző véletlenszerű zavaró jelenségek megfelelő szűrése után a modellben a hibaészlelés érzékeny eszközéhez juthatunk.

Munkám célja egy modell alapú diagnosztikai módszer tervezése és alkalmazása egy több bemenetű, több kimenetű négytartályos mérőrendszer felügyeletére. A fizikai rendszert fehér doboz modellel írtam le, mely alapján identifikáltam az objektum állapotter modelljét. A modell révén a tartályt jellemző lehetséges hibákra (szivattyú meghibásodás, dugulás, stb.) terveztem diagnosztikai sémákat.

Rövidítések

A dolgozatomban végig az alábbi általánosan alkalmazott rövidítéseket, jelöléseket használom:

AEM	Abnormal Event Management (Rendellenes eseménykezelési stratégia)
ARO	Adaptive Robust Observer (Adaptív robusztus megfigyelő)
ÁTM	Állapottér Modell
BKM	Bemenet-Kimenet Modell
EKF	Extended Kalman Filter (Kiterjesztett Kálmán-szűrő)
FD	Fault Detection (Hibakeresés)
FDD	Fault Detection and Diagnosis (Hibakeresés és -diagnosztika)
FDI	Fault Detection and Isolation (Hibakeresés és -elkülönítés)
FDIA	Fault Detection, Isolation and Analysis (Hibakeresés, -elkülönítés és hibaelemzés)
HMM	Hidden Markov Model (Rejtett Markov-modell)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Fűtés, szellőztetés és légkondicionálás)
MILP	Mixed-Integer Linear Programming (Vegyes egészértékű lineáris programozás)
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (Több bemenetű, több kimenetű rendszer)
NUIO	Nonlinear Unknown Input Observers (Nemlineáris ismeretlen bemeneti megfigyelő)
PCA	Principal Component Analysis (Főkomponens analízis)
RSS	Rudder Servo System (Kormánylapátos szervorendszer)
SVM	Support Vector Machine (Támogató vektorgép)

Jelölésjegyzék

A	tartály keresztmetszete [mm^2]
a	kifolyó nyílás keresztmetszete [mm^2]
A	állapot-átmeneti mátrix
B	állapot változás-bemenet kapcsolati mátrix
C	kimenet-állapot kapcsolati mátrix
D	kimenet-bemenet kapcsolati mátrix
E_f, F_f	additív folyamathibák paraméter mátrixai
e	hiba
f	térfogatáram [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]
g	nehézségi gyorsulás [m s^{-2}]
J, K, L	Toeplitz-mátrixok
L	logikai érték
m	tömeg [kg]
P	hibamátrix
q	tömegáram [kg h^{-1}]
r	reziduális jel
T	hőmérséklet [K]
t	idő [h]
U	bemenetmátrix
u	bemenetvektor
V	térfogat [m^3]
v	rendszer állapot megvalósításának száma
w	reziduális generátor
x	belső állapotvektor
Y	kimenetmátrix
y	kimenetvektor
z	magasság [mm]
κ	bemenetvektor mérete
μ	kimenetvektor mérete
ρ	hibavektor mérete
ρ	sűrűség [kg m^{-3}]
σ	mozgó időablak mérete

1. fejezet - Bevezetés

A hibadetektálás egy fontos feladat a mérnöki munkában. A hibafelismerés a Rendellenes Eseménykezelési Stratégia (AEM - Abnormal Event Management) központi eleme. Az AEM foglalkozik a rendellenes állapotok időben történő érzékelésével, azonosításával és javításával. Az eljárás magába foglalja a korai hibafelismerést, a hiba eredetének megállapítását és megteszi a megfelelő felügyeleti döntéseket és lépéseket, hogy visszaállítsa az eredeti normális és biztonságos üzemeltetési állapotot [1].

A megfelelő hibadiagnosztizáló rendszer megtervezése és a biztonságtechnika alkalmazásával elkerülhetők a súlyos ipari balesetek, melyek jelentős anyagi károkat és környezeti terhelést vonnak maguk után. A statisztikák azt mutatják, hogy az ipari balesetek 70%-át emberi hibák okozzák [1]. Megemlíthetjük például az 1984-es bhopáli mérgező gázszivárgást [2], az 1988-as Piper Alpha nyílt tengeri olajfűró felrobbanását [3], valamint a 2001-es toulouse-i AZF üzem katasztrófáját [4]. Mindhárom eset rávilágított arra, hogy az emberi gondatlanság okozta katasztrófák megelőzésében és minimalizálásában fontos szerepe van az óvintézkedések legmagasabb szintű betartásának.

Napjainkra jellemző, hogy az iparban éles verseny alakult ki, mely megköveteli a minél nagyobb pontosságot és megbízhatóságot. A technológia fejlődésével együtt alapvető igényként merül fel, hogy az alkalmazott rendszerek biztonságosan működjenek. A folyamatok során fellépő zavaró jelenségek gyors észlelése, megfelelő szűrése elengedhetetlen.

Az elmúlt három évtizedben hatalmas előrehaladás történt az összetett folyamatok automatizálásával, vagyis a számítógépes irányítással. Az alacsony szintű beavatkozásokat és műveleteket, amiket régebben emberek végeztek, manapság már számítógépek rutinszerűen végzik. Ennek ellenére, a rendellenes események ellenőrzése az üzemekben még mindig nagyrészt manuálisan történik. Azonban a rendellenes eseményekkel és vészhelyzetekkel foglalkozó emberi munkaerőre való támaszkodás több tényező miatt is egyre bonyolultabbá válik, ilyen tényező többek közt a modern feldolgozó üzemek mérete és összetettsége.

További nehézséget okoz, hogy a folyamatmérések lehetnek hiányosak, hibásak és akár megbízhatatlanok is. Az érzékelő eszközök mérési képességének torzulásai esetleges meghibásodások miatt történhetnek. A nehéz körülmények közt a pontatlan emberi döntések és közbeavatkozások gyakran még jobban súlyosbítják a helyzetet. A megbízható, robosztus és könnyen automatizálható hibadiagnosztikai módszerek fejlesztése még most is releváns probléma [1].

Számos kutatás foglalkozik hibadiagnosztikával és rendellenesség azonosítással. A kvalitatív, kvantitatív és adat alapú diagnosztikai módszerek közül én egy kvantitatív, vagyis mennyiségi modell alapú módszert alkalmazok egy valós rendszeren. Egy több bemenetű, több kimenetű (MIMO – Multiple-Input and Multiple-Output) négytartályos mérőrendszert építettem ki, majd megterveztem a vezérlési algoritmusát. Elkészítettem az objektum fehér doboz modelljét, majd annak segítségével állapotter modellet identifikáltam, mely egy kvantitatív hibadiagnosztikai módszer alapját biztosította. Ennek révén megterveztem egy reziduális generátort, mely azonosítja és elkülöníti a fellépő hibákat.

2. fejezet – Irodalmi áttekintés

A következő alfejezetekben bemutatom a hibák csoportosításának módjait, a diagnosztikai rendszerek általános felépítését és feladatait.

2.1. Hibák és fajtáik

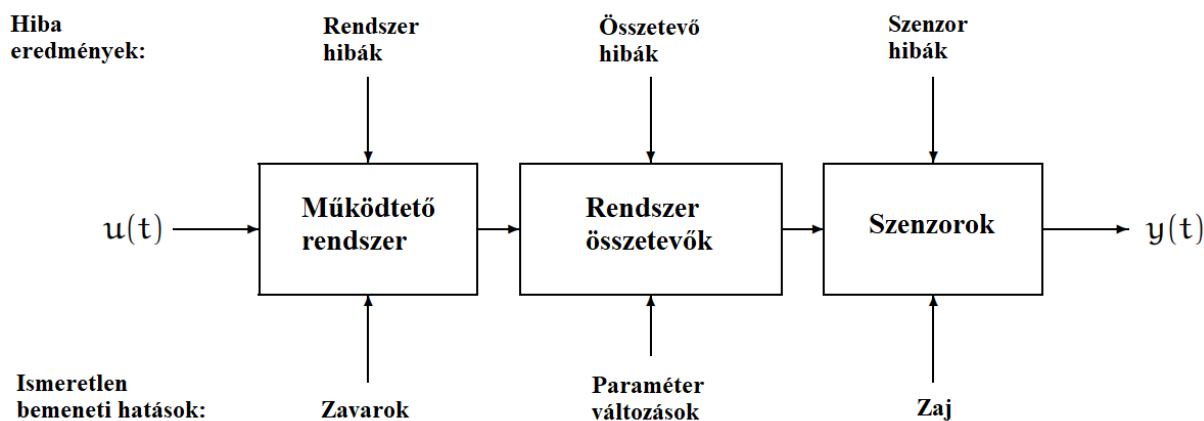
A hibát általánosságban úgy definiáljuk, mint egy időtől függő ismeretlen változó, vagy olyan zavaró bemenet, mely módosítja egy rendszer teljesítményét. Amennyiben a vizsgált rendszer valamely paramétere vagy jellemzője eltérést mutat az elvárt értéktől, akkor a rendszer hibát jelez [1]. Az eltérésnek káros hatása lehet a rendszerre, a környezetre vagy az emberekre. A hiba egy adott rendszer állapotának ideiglenes vagy végleges megváltozását is jelentheti.

A hibadetektálásban minden meghibásodási módhoz rendelhető egy úgynevezett gyökérok. Ezen gyökérok a rendszer nem megfelelő viselkedésének okozói, a hibák pedig tüneti jelenségek [1].

A hibák zöme adódhat a beavatkozók és az érzékelők téves jelzéséből is, hisz a berendezések folyamatos visszajelzéseket, illetve beavatkozást igényelnek. Ha a mérések vagy a beavatkozások tévesek, módosíthatják a rendszer működését, ezért a megfelelő üzemeltetés érdekében javítást igényelnek.

Az érzékelőkből és működtető szerkezetekből származó zajoknak is van jelentőségük. Adott esetben torzítják az érzékelést és a rendszerről gyűjtött adatokat, bár ideális esetben a nulla értékhez közelítenek.

Az 1. ábra a hibák lehetséges okait szemlélteti a bemeneti hatások és a hibaeredmények összefüggésében. Legyen egy rendszer, melynek bemeneti változóit jelöljük $u(t)$ -vel, kimeneti változóit $y(t)$ -vel [1].



1. ábra: A folyamat sematikus ábrája [5]

Rendellenességek adódhatnak a teljes rendszerben, a rendszer összetevőiben és a szenzorokban is. A rendszerekben bekövetkező meghibásodásokat általában a rendszer valamely paraméterének módosulásaként, vagy a be- és kimeneti adatokban változásként észlelhetjük. A változások két csoportba oszthatók: additív- és nem additív jellegű (parametrikus) hibákra [6]. Az additív hibák a gyakorlatban előforduló legfontosabb hibafajták leírására eredményesen használhatók. Az additív hibák általában a megfigyelt jelek mért értékeiben érzékelhető hirtelen változások, melyek a szenzorok hibáiból, illetve a rendszer összetevő elemeiben bekövetkezett pillanatszerű meghibásodásokból adódhatnak [5]. Az additív hibák megjelenhetnek plusz bemenet és/vagy kimenetként a rendszerben.

A parametrikus hibák a rendszer belső tulajdonságának változásaiból származnak [7]. Ezek nem hirtelen, külső behatás miatt kialakuló változások, hanem a rendszer természetes, lassú elhasználódásának következményei.

2.2. Hibadiagnosztika

A nagyobb katasztrófák és szerencsétlenségek, melyek emberéleteket követelnek, és hatalmas pénzügyi és környezeti károkat okoznak, szerencsére ritkák. A kisebb balesetek sokkal megszokottabbak, hiszen ezek napi gyakorisággal megesnek, munkahelyi sérüléseket, betegségeket és anyagi károkat okozva. A petrolkémiai ipar az Egyesült Királyságban egyedül megközelítőleg 20 milliárd dollárt veszít évente köszönhetően a kedvezőtlen AEM-nek [8].

A múltban bebizonyosodott, hogy a kötelező ellenőrzéseket matematikai modellek használatával lehet automatizálni, és ezáltal az emberi munkaerő dolgát megkönnyíteni. Ez nagy fejlődéshez vezetett az előállított termékek minőségét és állagát, emellett a folyamat biztonságát és hatékonyságát tekintve. A jelenlegi kihívás az, hogy egy intelligens és hatékony ellenőrzési rendszert használva automatizálni lehessen az AEM-et. Ezzel mentesíteni lehet a szabályzó rendszert az emberi hibáktól és nem mellékesen, a dolgozókat más területen lehet hasznosítani.

Az ipar 4.0 a legújabb forradalom a technológiák fejlődése szempontjából, melynek az ipari termelés átalakítása, fejlesztése és növelése a célja, ez az ipari folyamatok digitalizációjával történik meg. A felhasználásra álló adatok száma nagymértékben növekszik, így az újfajta technológiák és műveletek ellenőrzési körülményei leegyszerűsödnek, és könnyebben elemezhetővé válnak. A folyamatok optimalizálhatóbbak és fenntarthatóbbak, hatékonyságuk nő az ipar mindegyik területére érve [9], [10].

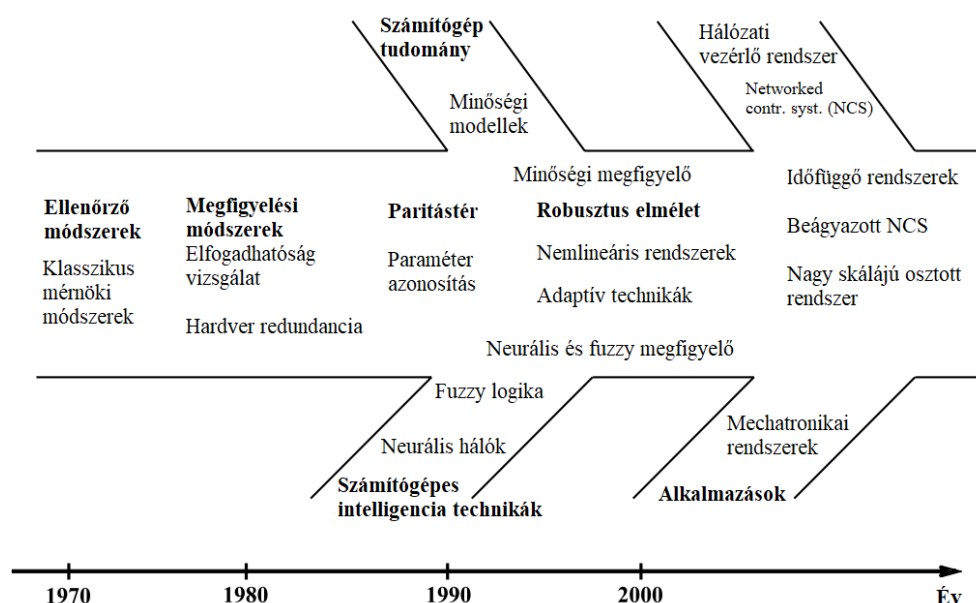
Az optimalizálás ellenére az üzemi folyamatok akármilyen korábban tárgyalt ok következtében hibásak lehetnek. A rendszerek rendellenességeit hibadiagnosztikai módszerek segítségével

tudjuk vizsgálni, melyek jelezhetik a hibák jelenlétét, illetve kimutathatják azok gyökérokait. A hibadiagnosztikai rendszernek három fő feladata van [6].

- Első helyen a hibafelismerés, hibadetektálás (FD - Fault Detection) áll, melynek során meghatározzuk az esetleges hiba jelenlétét a rendszerben.
- Második a hiba azonosítása és elemzése, melynek lényege a rendszerben a hiba gyökérokának felderítése és típusának meghatározása. Ez a két módszer együtt a hibakeresés és -elkülönítés (FDI - Fault Detection and Isolation).
- Harmadikként említhetjük a hibaterjedés útjának elemzését. Ha megváltozik egy érték, az más hibákat vonhat maga után és egyéb jellemzők sem fognak majd megfelelni emiatt. A három lépést együtt alkalmazó rendszer a hiba keresését, elkülönítését és elemzését is magába foglalja (FDIA - Fault Detection, Isolation and Analysis).

Végül egy rendellenes folyamat esetén a megfelelő időben meghozott helyes döntést, vagy beavatkozást végezzünk annak érdekében, hogy a rendszer visszakerüljön egy normális, biztonságos működési módba.

A 2. ábra segítségével a hibakeresési és -elkülönítési technikák (FDI) történelmi kialakulását követhetjük nyomon. Az ipari automatizálás és a számítógépek megjelenése nagyban hozzájárult a hibadetektálás fejlődéséhez az 1970-es években [11]. Az elmúlt évtizedben a számítógépes tudás és a tudományos közösségek által kifejlesztett számítógépes intelligencia technikáknak és alkalmazásoknak köszönhetően fejlődött tovább a hibadetektálás.



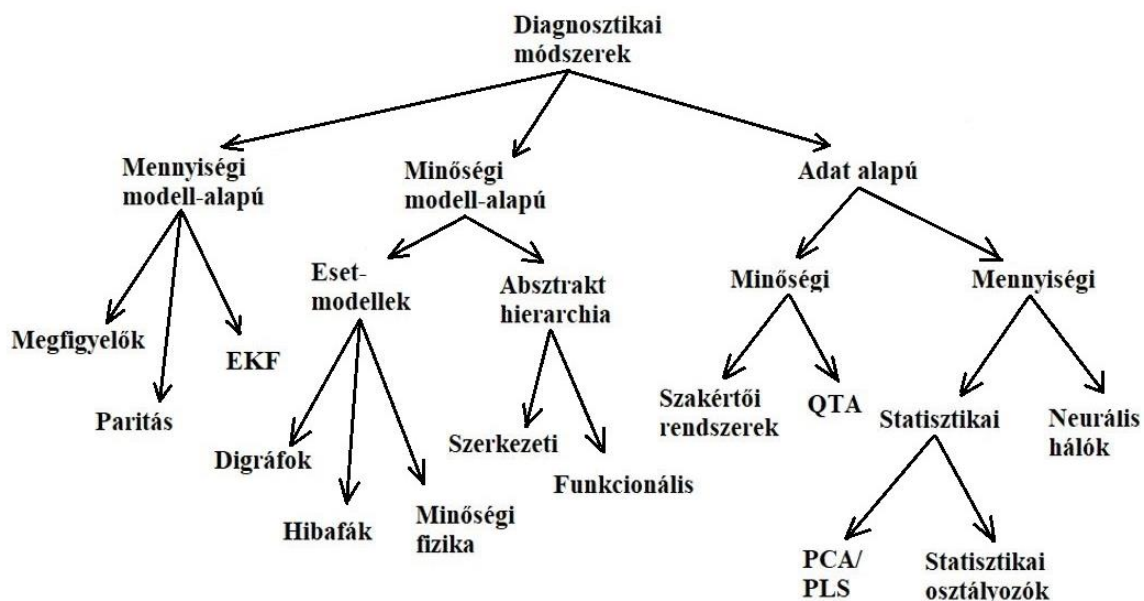
2. ábra: Az FDI történelmi fejlődése [11]

A hibadiagnosztizáló rendszer tervezése során különféle szempontokat kell figyelembe venni. Ezek közül emelném ki az alábbiakat a teljesség igénye nélkül [1].

- I. A korai hibafelismerés, a hibák beazonosítása még a kialakulásuk kezdeti fázisában, hogy elkerülhetők legyenek a súlyos következmények, módosíthatók legyenek a folyamatok.
- II. A hibadiagnosztizálás gyors, valós idejű megoldásokat, algoritmusokat igényel. Az elsietett hibaészlelés és meghatározás azonban téves riasztást eredményezhet a normál működés során, mely zavarokat okozhat a folyamatban.
- III. A különválasztás a diagnosztikus rendszer azon képessége, mellyel különbséget tud tenni különböző hibák között. Ez nagyban függ a folyamat jellemzőitől.
- IV. Elengedhetetlen elvárás a rendszerrel szemben az új hibák felismerése. Képesnek kell lennie különbséget tenni a normál és a rendellenes működés közt. Ez komoly kihívást jelent valamennyi alkalmazással szemben, nehogy félre értelmezzen egy folyamatot.
- V. Fontos elvárás az esetlegesen felmerülő hibák eredetének felismerése. A gépkezelő a diagnosztizálás során javaslatokat tehet saját tapasztalatai alapján a helyes működés érdekében.
- VI. Többszörös hibák azonosításának képessége elengedhetetlen, ámde bonyolult követelmény. A rendszer nem mindig képes a hibamintákat, modelleket egyidejűleg kombinálni, még akkor sem, ha külön-külön felismeri őket.

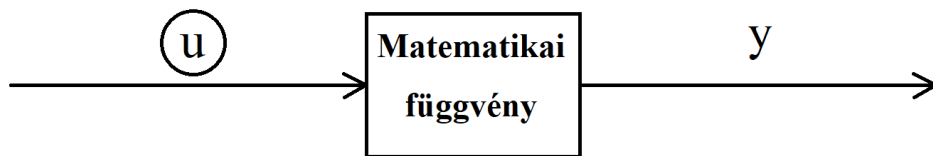
Az első lépése az AEM-nek a folyamathiba észlelésének és megállapításának automatizálása, de sok helyen még mindig operátorok foglalkoznak ezzel. Számos módszer használható fel hibadetektálásra, a kezdetben használt hibafáktól és diagramoktól, analitikus megközelítéseken át, a manapság használt tudásalapú rendszerekig és neurális hálózatokig [1].

A 3. ábra mutatja be a diagnosztikai módszerek három osztályát és azok alosztályait.



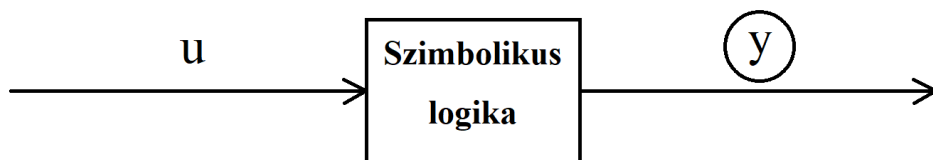
3. ábra: A diagnosztikai módszerek osztályozása [1]

Modellezés szempontjából a hibaérzékelés irodalmában önkényesen háromféle osztályba soroljuk a hibadiagnosztikai módszereket. Vannak mennyiségi, más szóval kvantitatív modell-alapú; minőségi, vagyis kvalitatív modell-alapú és üzemeltetési adatokat felhasználó, azaz adat-alapú eljárások.



4. ábra: Kvantitatív modellezés

A kvantitatív modellek általános elvét a 4. ábra szemlélteti. A bemenetek és a kimenetek közti kapcsolatot matematikai összefüggések segítségével írjuk le. A matematikai modellel tetszőleges bemenetekre meg tudjuk becsülni a kimenet jellegét, ha a rendszer megfelelően működik és ha a modell nem tér el az elvárttól. A modellel ellenőrizzük, hogy normális üzemállapotban adott bemeneti értékkel, milyen lenne a kimeneti érték. Ezt tekintjük referencia értéknek, ha ettől eltérő értéket kapunk, tudjuk, hogy a rendszerben hiba lépett fel.

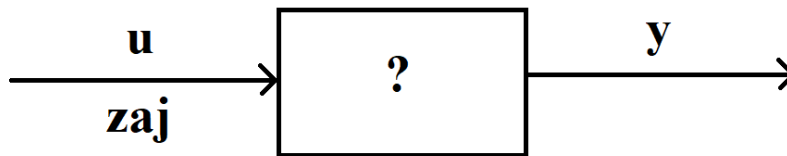


5. ábra: Kvalitatív modellezés

A 5. ábra segítségével szemléltetett kvalitatív modell hasonló elven működik, mint az előbb bemutatott mennyiségi modell, de vele ellentétben nem matematikai függvényt, hanem szimbolikus logikát használ. A modell a kimenetet, a rendszer válaszát figyeli. Azt vizsgálja, hogyan viselkedik a rendszer és keresi benne a tüneteket. Ha a várható kimenet helyett másfajta választ kapunk, vissza tud következtetni, hogy milyen hiba van jelen.

Mind a kvantitatív, mind a kvalitatív modellek összefüggéseket jelenítenek meg a rendszer bemeneti és kimeneti változói között. A különbség, hogy míg a kvantitatív modellek matematikai összefüggéseket, függvényeket használnak a kapcsolatok leírására, addig a kvalitatív modellek szimbolikus logikával írják le a kapcsolatokat (ha-és-vagy kapcsolatok) [12].

A 6. ábra a harmadik eljárást, az üzemeltetési adatokat felhasználó, vagyis adat alapú módszert mutatja be. Az adat alapú módszerek lényege, hogy nem igényelnek modell alapú információt és csak a már megtörtént esetekre és azok leírására támaszkodnak.



6. ábra: Adat alapú módszer

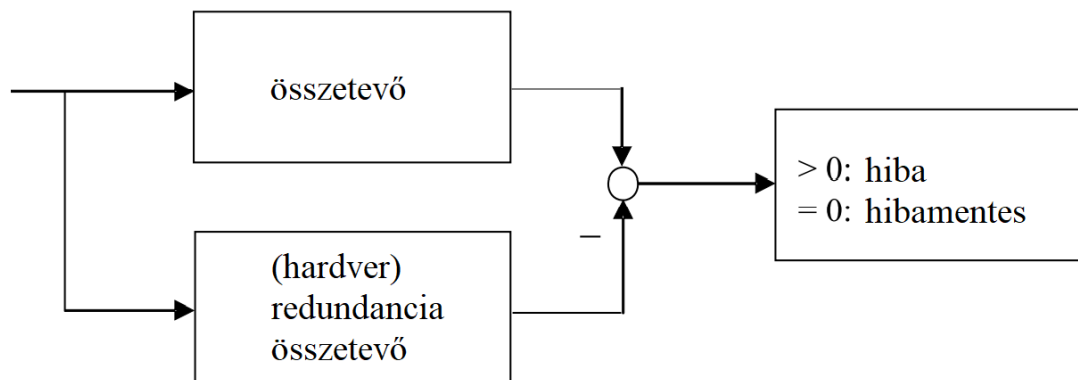
Ennél a módszernél nincsenek előzetes ismereteink a mért változók közötti kapcsolatról. Sem formális matematikai függvényekkel, sem szimbolikus logikával nem írjuk le a rendszer viselkedését, hanem sok éves üzemeltetési adatbázist használunk fel a rendszer viselkedésének jellemzésére [13]. Ha adott a bemenet, tapasztalatok alapján meg tudunk adni egy tartományt, intervallumot a kimeneti értékekre, mely a normális üzemállapotban elvárható a rendszertől. A zaj és zavarás mozgatja ezt a határt, amit jó becsléssel be lehet határolni, hogy hol kéne ideális esetben lennie.

2.3. Kvantitatív modell alapú diagnosztika

Ebben a részben a mennyiségi modell alapú hibadiagnosztika módszereit mutatom be, melyek az általános bemenet-kimenet, valamint az állapotter modellen alapulnak.

Az automatikus ellenőrzés, illetve hibadetektálás problémája modell alapú FDI-ként ismert. Ennek során az aktuális és a várható viselkedés összehasonlítása történik, mely így mesterséges jelként mutat rá a rendszer problémájára. Ezeket a jeleket nevezzük reziduálisoknak, melyek a rendszer lehetséges hibáit jelzik [1].

Egy rendszer megbízhatóságának javulása redundancia alkalmazásával érhető el. Ez megvalósítható kiegészítő hardver eszközök beépítésével (hardver redundancia), vagy további speciális programok használatával (analitikus/szoftver redundancia), esetleg a folyamat többszöri megismétlésével (idő redundancia).



7. ábra: A hardver redundancia vázlata [11]

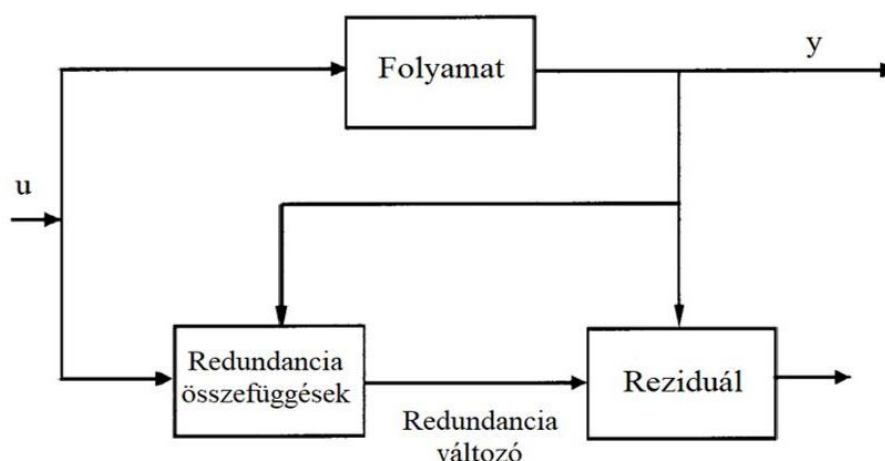
A 7. ábra szemlélteti, hogy a hardver redundancia esetén összevetjük az eredeti komponenst a redundancia összetevővel. Ha ezek eltérnek egymástól, akkor az hiba jelenlétére utal. Ha a folyamat redundáns eleme által becsült kimeneti értéke megegyezik az eredeti összetevő által becsült értékével, akkor nincs hiba a rendszer működésében.

A hardver redundancia esetén két, egymástól eltérő megoldás létezik: a hibatűrő és a nem hibatűrő tervezés [14]. Főként kritikus biztonsági rendszerek és nukleáris erőművek esetén ajánlott a hardver redundancia alkalmazása. Annak ellenére, hogy többlet kiadásokkal jár és helyet igényel, nagyban hozzájárul a biztonságos működéshez.

Az analitikus (szoftver) redundancia kiegészítő programok és rendszer ismeret alkalmazásából áll [14]. Ez esetben felállítjuk a rendszer referencia matematikai modelljét és ellenőrizzük, hogy miként kellene a rendszernek viselkedni adott bemenet hatására.

Az analitikus redundancia lényege a rendszer aktuális viselkedésének összehasonlítása a modell rendszer elvárható értékével. Ha ez az érték a nulla felé tart, akkor a hiba „jelentéktelen” nagyságú, ellenkező esetben a hiba jelentősnek tekinthető.

A 8. ábra bemutatja az analitikus redundancia működési elvének vázlatát.



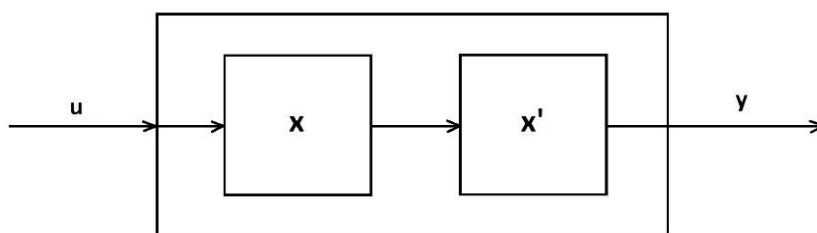
8. ábra: Az analitikus redundancia vázlata [1]

A kvantitatív modellt használó módszerek esetében két modell típus alkalmazása terjedt el a rendszer rendeltetészerű működésének jellemzésére, a bemenet-kimenet (BKM) és az állapottér modell (ÁTM).

2.3.1. Állapottér modell

Az ÁTM egy olyan lineáris modell, ami nem tükrözi a valós rendszer szerkezetét. Nem csupán a bemeneti és kimeneti változókat tartalmazza, hanem az állapotváltozókat is. A hiányzó információkat kísérleti mérésekkel pótoljuk és ezeket rendszerbe gyűjtve a későbbiek során is statisztikai adatként felhasználhatjuk.

A rendszer állapota adott bemenőjel ismeretében minden időpontban meghatározható, melyre a rendszer válaszul későbbi időpontra vonatkozó állapotokat és kimenő jeleket produkál. Ezt szemlélteti a 9. ábra.



9. ábra: Állapottér modell

Az állapottér modell egyenletrendszer segítségével adható meg az alábbi módon [15]:

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (2)$$

ahol $x(t_0) = x(0)$ kezdeti értékkel

$x(t)$ a belső állapotok vektora

$u(t)$ a bemenetek vektora

$y(t)$ a kimenetek vektora

A, B, C és D rendszermátrixok (A az állapot-átmeneti mátrix, B az állapot változás-bemenet kapcsolati mátrix, C a kimenet-állapot kapcsolati mátrix, D a kimenet-bemenet kapcsolati mátrix).

Az első összefüggést állapot egyenletnek, a másodikat pedig kimeneti egyenletnek nevezzük. Az állapot egyenletek megadják a bemeneti értékek és az állapotváltozók segítségével az állapotok időbeli változását, míg a kimeneti egyenletek matematikai összefüggést állítanak fel a kimeneti jelek, valamint a bemeneti értékek és az állapotváltozók közt [16].

A rendszermátrixokat állandó paramétereknek tekintjük, úgy vesszük, mintha nem változnának (például koszolódással stb.), ezért kell folyamatosan újra identifikálni őket az idő függvényében.

Megfigyelhető különbség, hogy míg a bemenet-kimenet modell nem függ az állapotváltozóktól, addig az állapottér modell tartalmazza azokat. A folyamat hibái általában változásokat idéznek elő az állapotváltozóban, illetve a folyamat paramétereiben.

A továbbiakban három módszert emelek ki a kvantitatív modell alapú hibadetektálás bemutatására, majd gyakorlati hasznukra adok példákat.

2.3.2. Chow-Willsky módszer

Szintén a kvantitatív modellek csoportjába tartozó hibadetektáló metódusok közé tartozik a Chow-Willsky módszer. A továbbiakban ezt a sémát fogom részletesebben bemutatni, és a MIMO mérőrendszeren rávilágítok gyakorlati alkalmazására is.

A Chow-Willsky módszer a rendszer állapotér modelljét paritás összefüggésekkel írja le, és így tervez egy reziduális generátor szerkezetet. A modell kiszámítja a linearizált változást az előző állapot (x), a bemeneti változók (u) és a hibák (e) figyelembe vételével.

$$x(t) = Ax(t-1) + Bu(t-1) + E_f e(t-1) \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_f e(t) \quad (4)$$

ahol E_f és F_f az additív folyamathibák paraméter mátrixait jelölik.

A folyamatot egy mozgó ablakon belül vizsgálva, a kimenet a hibás rendszerben a következő szerint számítható ki:

$$y(t-\sigma) = Cx(t-\sigma) + Du(t-\sigma) + F_f e(t-\sigma) \quad (5)$$

ahol $y(t-\sigma)$ az első kimenet és σ a mozgó időablak mérete.

A (5) egyenletet felhasználva előrejelzést lehet tenni a következő időlépésben lévő kimenetre:

$$y(t-\sigma+1) = Cx(t-\sigma+1) + Du(t-\sigma+1) + F_f e(t-\sigma+1) \quad (6)$$

A rendszer állapotát figyelembe véve és behelyettesítve (6) egyenletbe:

$$y(t-\sigma+1) = C(Ax(t-\sigma) + Bu(t-\sigma) + F_f e(t-\sigma)) + Du(t-\sigma+1) + F_f e(t-\sigma+1) \quad (7)$$

összefüggést kapjuk. Addig lehet ismételni ezt a behelyettesítést, míg elérjük az aktuális időlépést, amit $y(t)$ -képpen jelölünk. Az összes időlépésben lévő kimenetet (Y), bemenetet (U) és a hibaértéket (P) mátrixokba lehet foglalni, így megkaphatjuk a kimenet változását az időben.

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y(t-\sigma) \\ y(t-\sigma+1) \\ \dots \\ y(t) \end{bmatrix} \quad U(t) = \begin{bmatrix} u(t-\sigma) \\ u(t-\sigma+1) \\ \dots \\ u(t) \end{bmatrix} \quad P(t) = \begin{bmatrix} f(t-\sigma) \\ f(t-\sigma+1) \\ \dots \\ f(t) \end{bmatrix}$$

Felírhatjuk továbbá J , K és L Toeplitz-mátrixokat, amiket a (5), (6) és (7) egyenletek alapján kaphatunk meg.

$$J = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^\sigma \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} D & & & & \\ CB & D & & & \\ CAB & CB & D & & \\ \dots & & & & \\ CA^{\sigma-1}B & CA^{\sigma-2}B & \dots & CB & D \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} F & & & & \\ CE & F & & & \\ CAE & CE & F & & \\ \dots & & & & \\ CA^{\sigma-1}E & CA^{\sigma-2}E & \dots & CE & F \end{bmatrix}$$

Ezen mátrixok segítségével a következő képpen írhatjuk fel a kimenet változását az idő függvényében:

$$Y(t) = Jx(t - \sigma) + KU(t) + LP(t) \quad (8)$$

A vektorok mérete μ számú kimenetre, κ bemenetre és ρ hibára, ahol v a rendszer állapot megvalósításának száma:

1. táblázat: A vektorok mérete

Vektorok	Y	U	P
Sorok száma	$(\sigma + 1)\mu$	$(\sigma + 1)\kappa$	$(\sigma + 1)\rho$

Ugyanezen értékekre a mátrixok méretét a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: A Toeplitz-mátrixok mérete

Mátrixok	J	K	L
Sorok száma	$[(\sigma + 1)\mu]$	$[(\sigma + 1)\mu]$	$[(\sigma + 1)\mu]$
Oszlopok száma	v	$[(\sigma + 1)\kappa]$	$[(\sigma + 1)\rho]$

A (8) egyenletet átrendezve, az egyenlet bal oldalán megkapjuk a kimenetet és a megváltozott bemenetet, a jobb oldalon pedig a rendszer állapotát és a hibajeleket:

$$Y(t) - KU(t) = Jx(t - \sigma) + LP(t) \quad (9)$$

A reziduális generátor (w) meghatározható, ha a megfelelő hibákra az elvárt reziduális választ (r) kapjuk meg. A reziduális generátor az i -edik reziduális jelre (r_i) a következőképpen írható fel:

$$r_i = w_i(Y(t) - KU(t)) = w_i(Jx(t - \sigma) + LP(t)) \quad (10)$$

A w tervezési paramétert úgy kell kiválasztani, hogy az megfeleljen bizonyos feltételeknek. A (11) egyenlet leírja, hogy a reziduális elválasztja a rendszer hibajeleit az állapotváltozóktól. A

reziduális generátornak a rendszer állapotváltozóitól függetlenítenie kell a reziduális választ és módosítania kell a hibajeleket, hogy azok megfeleljenek az i -edik reziduális jelre felírt feltételeknek.

$$w = [0 \quad r_i][J \quad L]^{-1} \quad (11)$$

Látható, hogy a megoldás nem feltétlenül létezik, hiszen a J és L mátrixok méretei a kiválasztott időablaktól (σ) függnék.

A rendszer reziduális válaszai alapján különböző specifikációkból ki tudjuk választani a rendszer aktuális specifikációját teljes és majdnem teljes specifikációk esetén és így kaphatunk egy minimális komplexitású megoldást a problémánkra. Három fajta specifikációról beszélünk, homogén, majdnem homogén és nem homogén specifikációról. Ha a reziduális generátor nem reagál a hibajelekre, akkor homogén rendszerről van szó. Ha minden válasz nulla, kivéve egy, akkor majdnem homogén. Amikor pedig nem nulla választ kapunk, a nem homogén specifikáció esete áll fent. A teljes specifikáció arra az esetre vonatkozik, amikor a reziduálisban minden hibaválasz meg van határozva, a majdnem teljes specifikációk esetében egy kivétellel az összes válasz adott. A specifikáció kiválasztásához és a megoldás eléréséhez meg kell figyelni a reziduális mátrixokat.

2.4. Kortárs hibadetektálási módszerek

Az előző fejezetben megismerhettük a diagnosztikai módszerek típusait és alapjait, azonban számos fejlesztés történik ezek kapcsán és még mindig az akadémiai kutatás központjában áll ez a téma.

A fentiekben áttekintett kvantitatív modell alapú hibadetektálásnak mind elméleti, mind gyakorlati haszna jelentős, hisz sok múlik azon, hogy a rendszerben milyen gyorsan fedezzük fel a hibát, állítjuk fel a diagnózist, minimalizáljuk a hibák számát, a zaj nagyságát, a bizonytalanságokat, és tudjuk a számítógépes megoldásokat megvalósítani.

Az elmúlt két évtizedben több cikk jelent meg a kvantitatív modellek felhasználásával kapcsolatosan. A legtöbbjük a légi irányítással, mechanikai és elektromérnöki témákkal kapcsolatos. A vegyipari alkalmazásáról kevés szó esett, hisz a kémiai folyamatok általában nem lineárisak. Egyes szerzők a megoldás érdekében kétszintű stratégiát javasoltak. Az első szint a nem lineáris folyamatok állapot becslésére, a második szint pedig a hibaparaméter azonosítására szolgálnak. Ezt a technikát alkalmazták egy vegyi reaktor esetén, ahol hatékonyabb eredmény érték el, mint a Kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF - Extended Kalman Filter) módszer segítségével [1]. Kronológiai sorrendbe állítva ezeket a tanulmányokat, figyelemmel kísérhetjük a modell alapú hibadetektálás tendenciáit, fejlődését.

Bhagwat és társai a 2003-ban kiadott dolgozatukban egy modell alapú hibadetektálási sémát mutatnak be. Az általuk bemutatott séma magába foglalja a nemlineáris rendszerek több, lineáris modellezési rendszerbe történő lebontását. A Kálmán-szűrőket az állapotbecsléshez és a reziduális generáláshoz használják a kapott lineáris modellek alapján. A technikát tesztelték labor méretű nemlineáris pH semlegesítő reaktor működése során, ahol a program sikeresen észlelte a hibákat [17].

Isermann célja több-tüneti jelzőrendszer fejlesztése volt, ami különbséget tesz az elvárt és a hibás állapot között, sok esetben paraméter becslés és paritás összefüggés kombinációjával. A módszer leírására 2005-ben került sor [18].

Ugyanebben az évben Garimella és Yao tanulmánya egy nemlineáris modell alapú adaptív robusztus megfigyelő (ARO - Adaptive Robust Observer) alkalmazását mutatta be a hidraulikus rendszerekben előforduló gyakori hibák érzékelésére. A robusztus szűrőstruktúrákat úgy tervezték, hogy csökkentsék a modell bizonytalanságának mértékét és növeljék a rendszer érzékenységét. A szimulációs eredmények igazolták, hogy az algoritmus eredményes a rendszerekben előforduló hibák észlelésében a robusztusság elvesztése nélkül [19].

Liang és Du módszerüket 2007-ben mutatták be publikációjukban. Ők egy költséghatékony hibakeresési és -diagnosztikai (FDD - Fault Detection and Diagnosis) eljárást fejlesztettek ki a

modell alapú FDD és a szupport vektorgép (SVM - Support Vector Machine) módszer kombinálásával. Emellett kidolgoztak egy többretegű és nagy pontosságú SVM osztályozót is. Módszerük segít a fűtő, szellőztető és légkondicionáló (HVAC - Heating, Ventilation and Air Conditioning) rendszerek fenntartásában, az energiafogyasztás és a karbantartási költségek csökkentésében [20].

Szintén 2014-ben Xu és társai tanulmánya modell alapú FDI sémát kínál a hajónavigációt kezelő kormánylapátos szervorendszerhez (RSS - Rudder Servo System). Munkájukban bemutattak öt nemlineáris ismeretlen bemeneti megfigyelőt (NUIO - Nonlinear Unknown Input Observers), amelyek képesek kiküszöbölni az ismeretlen zavarokat a hibák észlelése és elkülönítése során. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a modell alapú rendszer hatékony és használható az online hibadetektáláshoz [21].

Poon és társai áramátalakítók kapcsolásához való FDI módszert terveztek, amihez egy modell alapú állapotbecslő megközelítést használtak. Módszerüket a 2016-os munkájukban foglalták össze. Ez az általános eljárás használható az érzékelők hibáinak észlelésére és felismerésére is. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a megközelítés megbízható és hatékony a kapcsoló áramátalakítók gyakori hibajelzésének kiszűrésében [22].

2018-ban Harirchi és Ozay cikkükben az áramátalakítók zajjal zavart bemenet-kimenet adatait hasonlítja össze az elképzelt modell viselkedésével vegyes egészskörű lineáris programozási (MILP – Mixed-Integer Linear Programming) problémává alakítva a detektálási feladatot. [23]. Cho és társai értekezésüket 2018-ban publikálták, melyben bemutatták az általuk tervezett Kálmán-szűrőt a turbinalapát dőlésszög-rendszer hibáinak érzékeléséhez. Az eszköz olyan következtetési módszereken alapuló algoritmussal rendelkezik, ami képes meghatározni a hiba típusát, helyét, nagyságát és idejét. A virtuális érzékelővel és leállítási móddal rendelkező vezérlő alkalmas a váratlan külső terhelések elkerülésére. A numerikus szimulációk igazolják, hogy az általuk tervezett hibadetektáló módszer hatékony a gyakorlatban is [24].

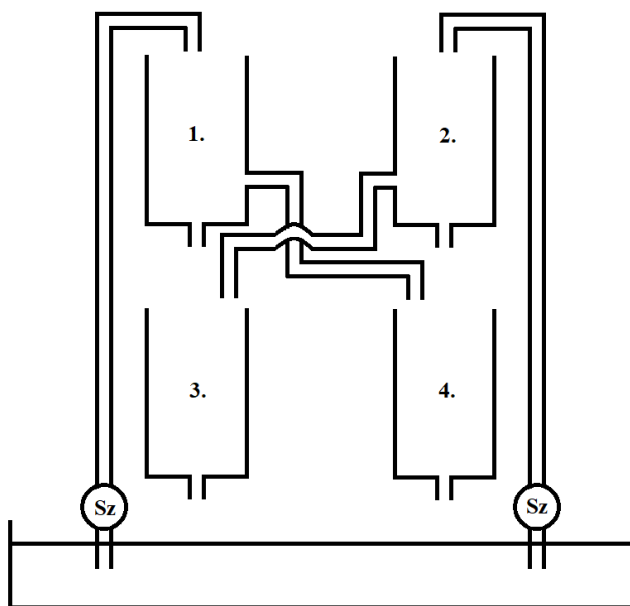
3. fejezet - MIMO mérőrendszer bemutatása

A következő fejezetben a kiépített mérőrendszer felépítését, elemeit és paramétereit mutatom be. A fizikai rendszer bemutatása és egyenletekkel való jellemzés után ismertetem az előző fejezetben leírtak alapján a rendszerre identifikált állapotter modellt. Azt követően a fentebb említett Chow-Willsky kvantitatív modell alapú hibadetektáló séma alkalmazásával elkülönítjük a kapott értékektől a generált hibákat.

További irodalmi munkák mutatják be a hasonló MIMO mérőrendszereken végzett hibadiagnosztikai metódusokat. Ezekben általában háromtartályos szintszabályzó rendszereken (Three-tank benchmark system) tesztelik a különböző detektáló sémákat, de további számú és változatos kapcsolású tartályokról olvashatunk bennük. Mind adat alapú, mind kvalitatív és kvantitatív módszerekkel vizsgálták ezek működését, ezek közül egy lehetőség az általam választott Chow-Willsky módszer.

3.1. Négytartályos szintszabályzó rendszer

Egy négy tartályból álló szintszabályzó rendszert vizsgálók. Két tartály a másik kettő fölött helyezkedik el úgy, hogy a felső tartályokból az alsóba jut a víz a tartály alján lévő szűk kifolyón keresztül. A felső tartályoknak (1,2) van további egy-egy oldalsó kifolyója, mellyel a keresztben lévő alsó tartályokba (3,4) folyik a víz, az alsó tartályoknak ezáltal pedig van egy másik befolyója is. Az összekapcsolt tartályok alatt egy vízzel teli edény van, az alsó tartályokból ide folyik a víz. A tartályok nyitottak, lehetőség van túlfolyásra. A 10. ábra szemlélteti a rendszer felépítésének vázlatát.



10. ábra: A szintszabályzó rendszer összeállításának szemléltetése

A vizet a készülékben két szivattyú (SZ) irányítja, melyek az alsó, vízzel teli edényből a két felső tartályba szállítják a vizet. Onnan a víz valamelyik lefolyón keresztül az egyik alsó tartályba kerül, majd visszajut a lenti edénybe. Ez a folyamat ismétlődik.

A mérés során Barwig márkájú, 04-es típusú kisfeszültségű bűvárszivattyúkat alkalmaztam. Ezek a szivattyúk 12 V feszültséggel működnek, de folyamatos üzemeltetéshez 6-9 V között is lehet használni őket.

A négy tartály oldalán azonos magasságban található egy-egy MPX2010DP típusú differenciál nyomásérzékelő készülék. Ezek a 10 V-tal működő szenzorok mérik a nyomáskülönbséget a szenzor két oldalán lévő forrás közt, vagyis a tartály belsejében lévő víz és a kinti levegő között. A segítségükkel meg tudjuk határozni a folyadékszintek magasságát az egyes oszlopokban.

A tartályok alján egyforma átmérőjű kifolyók vannak. A felső és keresztben lévő alsó tartályokat összekötő csöveken a szűkítő cserélhető.

A fent leírtak alapján a rendszer valós felépítését a 11. ábra mutatja be.



11. ábra: A mérőrendszer fizikai képe

A berendezés geometriai paramétereit a 3. táblázatban tüntetem fel. Számításaim során ezeket az értékeket használtam.

3. táblázat: Mérőrendszer paraméterei

	1. tartály	2. tartály	3. tartály	4. tartály
Tartály magassága [mm]	500	500	500	500
Oldalsó kifolyó magassága [mm]	40	40	-	-
Tartály átmérője [mm]	40	40	40	40
Alsó kifolyó átmérője [mm]	4	4	4	4
Oldalsó szűkítő átmérője [mm]	6	6	-	-
Kezdeti folyadékszint [mm]	0	0	0	0

3.2. fejezet - Alkalmazott modellezési módszer

Ebben a fejezetben röviden ismertetem az alkalmazott modellezési módszert és bemutatom a négytartályos rendszert leíró matematikai modell levezetését. Kutatásom során a vizsgált négytartályos rendszer előzetes, fehér doboz modelljét alkottam meg. Ez alapján terveztem meg az irányítási rendszert és ennek segítségével megismerjük az objektum működési elvét. További célja és haszna a modell felírásának, hogy a kapott és validált adatokat felhasználjuk az állapottér modell identifikálásához. Az így kapott értékek közül a Chow-Willsy séma alapján tervezett reziduális generátor felismeri a fellépő hibákat.

A mérőrendszerben, a tartályokban átfolyó vízre külön-külön felírható a víz tömegének változása az idő függvényében. Az első tartályra a tömegmérleget a (12) egyenlet mutatja be.

$$\frac{dm_1}{dt} = q_1 - q_{13} - q_{14} \quad (12)$$

Ahol m_i a víz tömege [kg], i a tartály sorszáma

t a vizsgálati idő [h]

q pedig a be- és kifolyó víz tömegáramai [kg h^{-1}]

A két felső tartálynak egy-egy forrása és két-két kimeneti árama van, ezáltal q_{13} az első tartályból kifolyó és harmadik tartályba befolyó tömegáramot jelöli. Ennek megfelelően a többi jelölés is hasonló metódus alapján értelmezhető. Így a négy tartályra felírva a tömegáramokat:

$$\text{1. tartály} \quad \frac{dm_1}{dt} = q_1 - q_{13} - q_{14} \quad (13)$$

$$\text{2. tartály} \quad \frac{dm_2}{dt} = q_2 - q_{24} - q_{23} \quad (14)$$

$$3. \text{ tartály} \quad \frac{dm_3}{dt} = q_{13} + q_{23} - q_3 \quad (15)$$

$$4. \text{ tartály} \quad \frac{dm_4}{dt} = q_{24} + q_{14} - q_4 \quad (16)$$

A $\rho = \frac{m}{V}$ egyenletet felhasználva a tömeg (m) helyére behelyettesíthetjük a sűrűség (ρ) és a térfogat (V) szorzatát.

$$\frac{d\rho V_1}{dt} = q_1 - q_{13} - q_{14} \quad (17)$$

Ahol a sűrűség mértékegysége [kg m^{-3}], a térfogaté [m^3].

Mivel a kísérlet alatt nincs hőmérsékletváltozás és légköri körülmények alatt dolgozok a rendszerrel, így a sűrűség konstans.

$$\rho \frac{dV_1}{dt} = q_1 - q_{13} - q_{14} \quad (18)$$

A tömegáramból megkapjuk a tartály térfogatmérlegét, ahol f a térfogatáramokat jelölik, mértékegységük [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$].

$$\frac{dV_1}{dt} = f_1 - f_{13} - f_{14} \quad (19)$$

A tartály térfogatát fel lehet írni a keresztmetszetének (A_1) és a magasságának (z_1) szorzataként is.

$$\frac{dA_1 z_1}{dt} = f_1 - f_{13} - f_{14} \quad (20)$$

A tartály keresztmetszete szintén időben állandó érték, így kiemelésével megkapjuk az első tartályban a keresett vízszintmagasság változását az idő függvényében.

$$\frac{dz_1}{dt} = \frac{1}{A_1} (f_1 - f_{13} - f_{14}) \quad (21)$$

Az első tartálynál az f_1 érték a szivattyúval bevezetett víz térfogatárama, f_{13} és f_{14} a tartály alján és oldalán lévő kifolyón keresztül távozó térfogatáram. Ez utóbbiakat a (22) összefüggéssel, a Torricelli-egyenlet behelyettesítésével lehet meghatározni.

$$f = a\sqrt{2\rho g z} \quad (22)$$

Ahol a a kifolyó nyílás keresztmetszete és ρ a víz sűrűsége, melynek értéke. Az így kapott relációt a (23) egyenlet írja le.

$$\frac{dz_1}{dt} = \frac{1}{A_1} \left(f_1 - a_1 \sqrt{2gz_1} - L a_{o1} \sqrt{2g(z_1 - z_{o1})} \right) \quad (23)$$

Felmerül az összefüggésben egy (L) logikai érték is, hiszen a tartály oldalsó kifolyója, melynek keresztmetszetének nagyságát a_{o1} jelöli, nem a tartály alján helyezkedik el, hanem felette, z_{o1}

magasságban. Emiatt ha a vízszint az oldalsó kifolyó alatt van, akkor nincs, ha eléri a magasságot, akkor van rajta kifolyó térfogatáram.

$$L = \begin{cases} 0 & z_1 < z_{o1} \\ 1 & z_1 \geq z_{o1} \end{cases} \quad (24)$$

Így a víz térfogatárama az oldalsó kifolyó elérése előtt és után a (25) egyenlettel definiálható.

$$f_1 = \begin{cases} 0 & z_1 < z_{o1} \\ a_{o1} \sqrt{2g(z_1 - z_{o1})} & z_1 \geq z_{o1} \end{cases} \quad (25)$$

Az első tartály példájára a (12)-(25) egyenletek alapján levezethető a tartályokban lévő vízszintek magasságának változásai.

A rendszert leíró differenciál egyenletrendszert a MATLAB programba beépített *n4sid* nevű numerikus módszer segítségével oldottam meg. Ez az időtartományban lévő MIMO rendszer állapotter modell identifikálásához használható. A szimulációs szoftverben kapott eredmények reprezentálják a rendszer működését. A kapott eredményekből identifikáltam a rendszer állapotter modelljét, melyet a következő alfejezetben mutatok be.

4. fejezet – Szimulációs eredmények

Ebben a fejezetben bemutatom a fehér doboz modell alapján a MATLAB és Simulink programok segítségével megoldott és ábrázolt szimulációs eredményeket.

4.1. A fehérdoboz modell alapú szimulátor eredményei és validálása

A mérések során a vízszintek magasságát vizsgáltam az egyes tartályokban.

Első esetben az figyeltem, hogyan reagálnak a különböző betáplált térfogatáramokra. Ekkor a szűkítők átmérőjét állandóra állítottam, 6 mm-re. A térfogatáramokat az első szivattyú esetén szinuszosan, a második esetén koszinuszosan változtattam 100 l h^{-1} körül, így kisebb ugrásokat okozva a bemenetekben.

A térfogatáramok változását a (26) és (27) egyenlet írja le.

$$f_1 = Be + szor \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \quad (26)$$

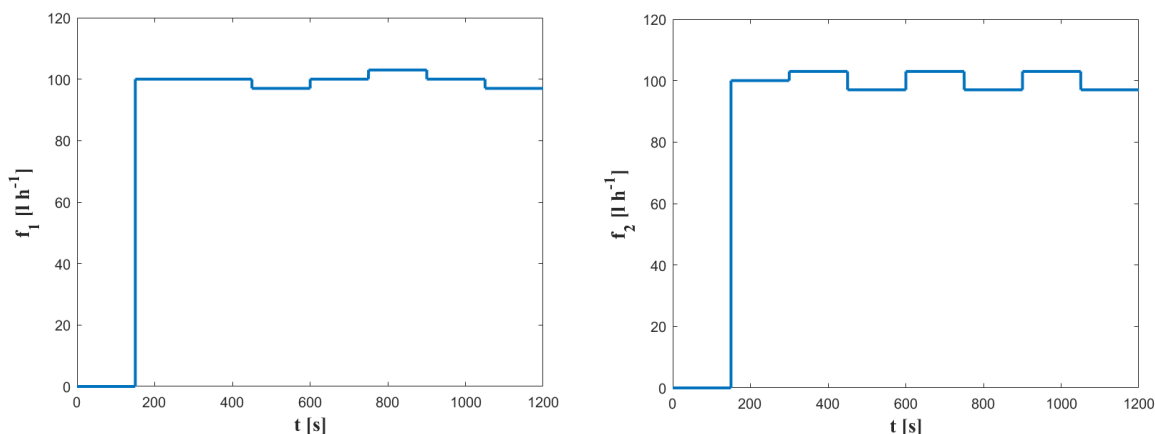
Ahol $Be = 100 \text{ l h}^{-1}$

$szor$ a szórás nagysága

n az ugrások száma

$$f_2 = Be + szor \cdot \cos(n\pi) \quad (27)$$

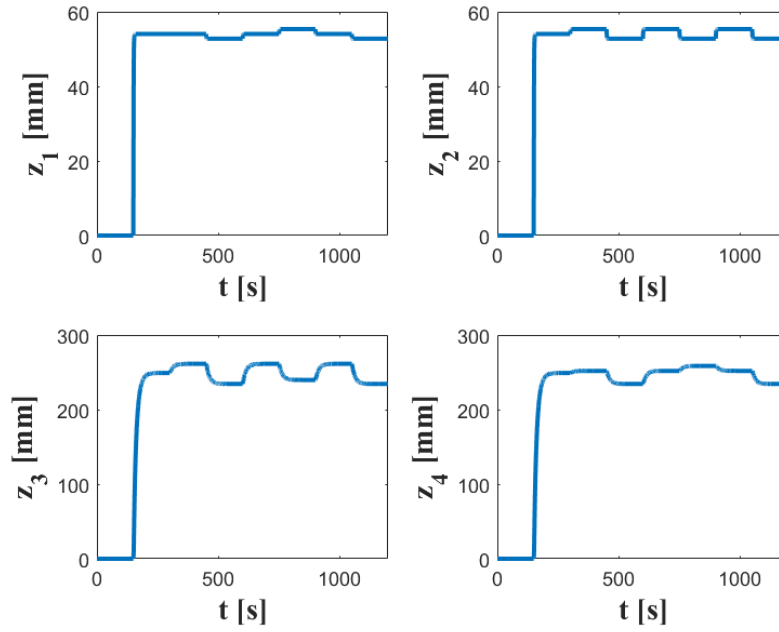
A 12. ábra mutatja a betáplált térfogatáramok alakulását az idő függvényében.



12. ábra: A térfogatáramok változása

A bal oldali ábra az első szivattyút, a jobb oldali a második szivattyú működését mutatja. Láthatjuk, hogy a betáplálás körülbelül 150 szekundumnál kezdődött meg. Ekkor az értéke felugrott 100 l h^{-1} -ra, majd utána a vizsgált időtartam végéig, 1200 s-ig szinuszosan és koszinuszosan változott a megadott érték körül.

Az erre válaszul kapott szintváltozásokat a 13. ábra mutatja.



13. ábra: A szintek változása változó térfogatáramnál

Várható módon mind a négy tartály esetén 150 s-nál kezdődik meg a szintemelkedés. A felső tartályoknál a szint hamarabb beáll alacsonyabb szintre, míg az alsóknál magasabb szintre telítődik. Ennek oka, hogy míg a felsőkbe egy, az alsó tartályokba két bemenet van a kimenetek száma pedig ellentétesen van. Az is látható, hogy a keresztben lévő tartályok nagyobb hatással vannak egymásra, hiszen az oldalsó kifolyóknak, a szűkítőknek nagyobb a keresztmetszetük, mint a tartály alján lévőknek.

Második esetben a szűkítők átmérőjének csökkenésének hatását néztem meg a folyadékszintek alakulására. A térfogatáramokat állandóra állítottam be, csak egy egység ugrást adtam mindegyik elejére, hogy fellépjenek 100 l h^{-1} -ra.

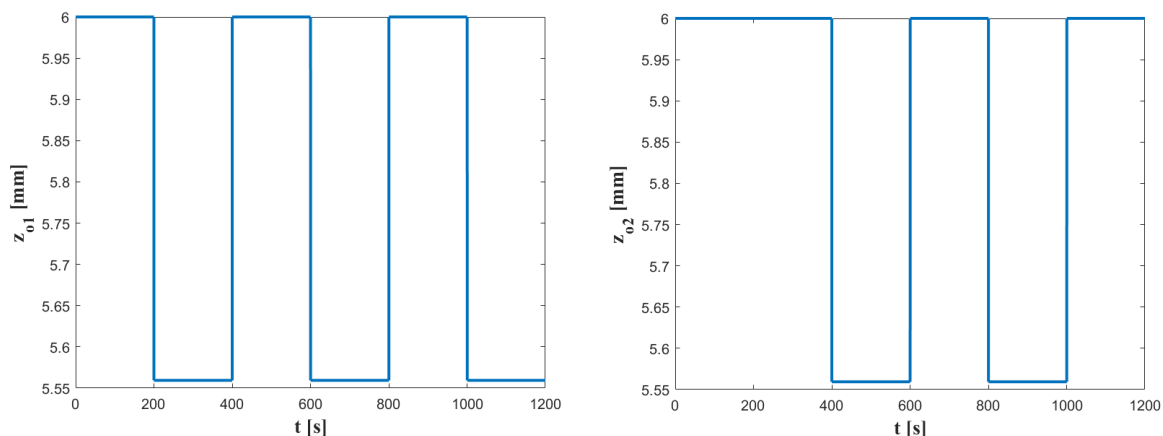
A szűkítők kezdeti értékét 6 mm-nek adtam meg, melyek aztán csökkentek az időben. Ez a lerakódások keletkezését reprezentálja, majd az értékük megnőtt, mintha a szennyeződés kimosódott volna. Ezek a változások ebben az esetben is, a térfogatáram változásához hasonlóan szinuszosak és koszinuszosak voltak, hogy hasonló tendenciát figyelhessünk meg.

A szűkítők változását a (28) és (29) egyenlet írja le, melyeknél $d_{1,2} = 6 \text{ mm}$.

$$a_{o1} = d_1 - \left| szor \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad (28)$$

$$a_{o2} = d_2 - \left| szor \cdot \cos\left(n \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad (29)$$

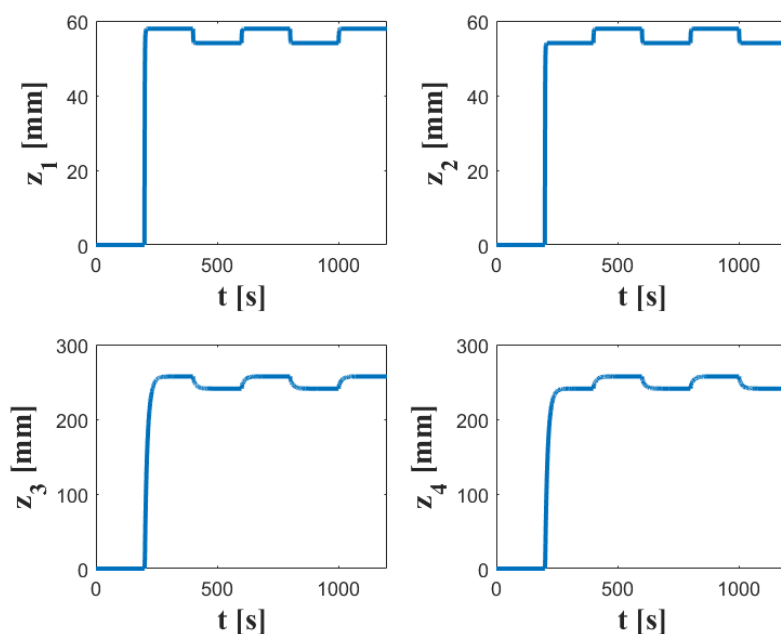
A 14. ábra a szűkítők átmérőjének alakulását mutatja az idő függvényében.



14. ábra: A szűkítők átmérőjének változása

A bal oldali ábra az első és a negyedik tartályt összekötő szűkítő átmérőjének időbeli változását, míg a jobb oldali a második és harmadik tartály közöttit mutatja. A méretben való csökkenések ellentétesen váltják egymást, így jól megfigyelhető lesz, hogy a melyik kifolyó lesz nagyobb hatással az alsó tartályokban lévő szintekre.

Az átmérők nagyjából fél millimétert szűkültek, ám a 15. ábra grafikonjain láthatjuk, hogy ez is nagy hatással volt a tendenciák alakulására.



15. ábra: A szintek változása változó szűkítő átmérőknél

Mindegyik tartály esetén 150 s-nál emelkedik meg a folyadékszint ugyanúgy, mint az előző esetben és hasonló értékekre is állnak be.

Viszont az előző eredményekkel ellentétben itt a felső tartályok kifolyói voltak nagyobb befolyással a szintmagasságra, vagyis az első tartály a harmadikra, a második pedig a

negyedike volt hatással. Ezt láthatjuk a hasonló szögfüggvényes eredményeiből. Ennek oka, hogy a szűkítők átmérője kisebb lett az alsó kifolyókénál.

4.2. Állapottér modell identifikálása

Az állapottér modell identifikálásához a bemeneti és kimeneti változók 2.3.1 meghatározása szükséges, mely alapján a modell meghatározza a rendszer állapotváltozóit az egyes időpillanatokban.

Ehhez a modellhez a bemeneteknek, vagyis a betáplált térfogatáramoknak és a szűkítők átmérőjének függvényes váltakozásához is véletlenszerű nagyságú szorzókat generáltam.

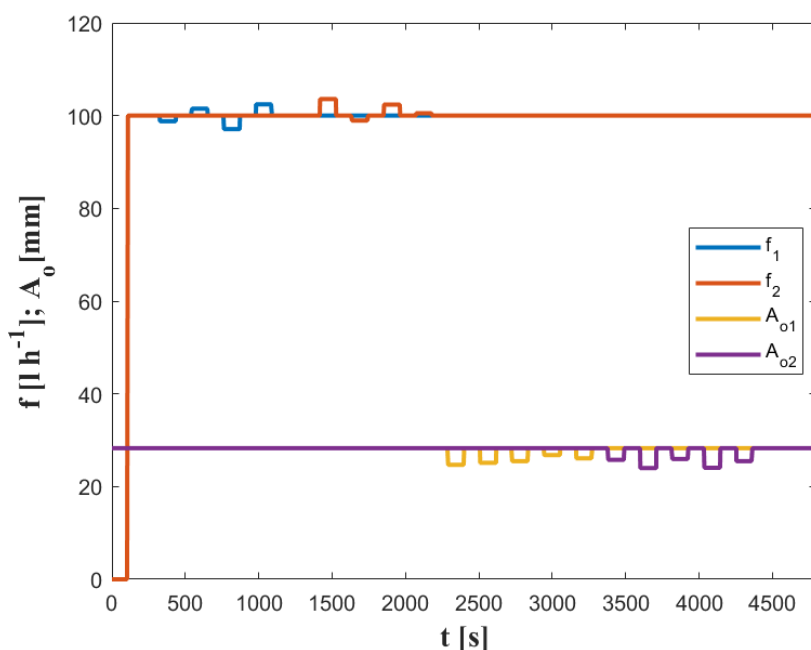
A szimulációs során továbbá egyszerre egy bemenetet változtattam, hogy ne keveredjenek össze a jelek. A térfogatáramok változását a (30) egyenlet, a szűkítők átmérőjének változását pedig a (31) összefüggés írja le.

$$f_{1,2} = Be + rand \cdot szor \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \quad (30)$$

Ahol $rand$ egy standard normális eloszlású véletlen szám.

$$a_{o1,2} = d - \left| rand \cdot szor \cdot \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \right| \quad (31)$$

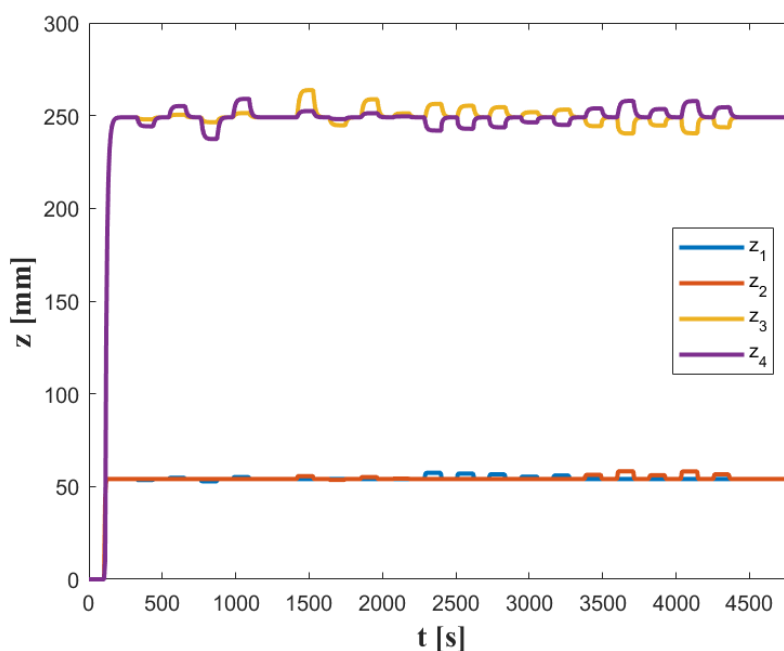
A szimuláció idejét itt 4800 s-nak adtam meg, hogy mindegyik változó hatásának vizsgálatára külön-külön legyen idő. A munkapontbeli térfogatáramokat 100 l h^{-1} -nak adtam meg, a szűkítők átmérőjének csökkenése 6 mm-ről kezdődik. A bemeneteket a 16. ábra szemlélteti.



16. ábra: Állapottér modell bemeneti változói

Láthatjuk, hogy a betáplált áramok körülbelül 100 s-nál indulnak meg és 100 l h^{-1} -ra állnak be. A szűkítők átmérője a mérés kezdetétől állandó, csak a generált ugrások törik meg az állandóságot. Először az első szivattyú által betáplált térfogatáram változik 300 s-nál, majd utána a második 1400 s-tól. Harmadikként 2300 s elteltével az első szűkítő átmérője csökken és végül a második 3300 s-kor, ezt követően mindegyik visszaáll az eredeti értékére.

A bemenetekre kapott válaszokat a 17. ábra mutatja.



17. ábra: Állapottér modell kimeneti változói

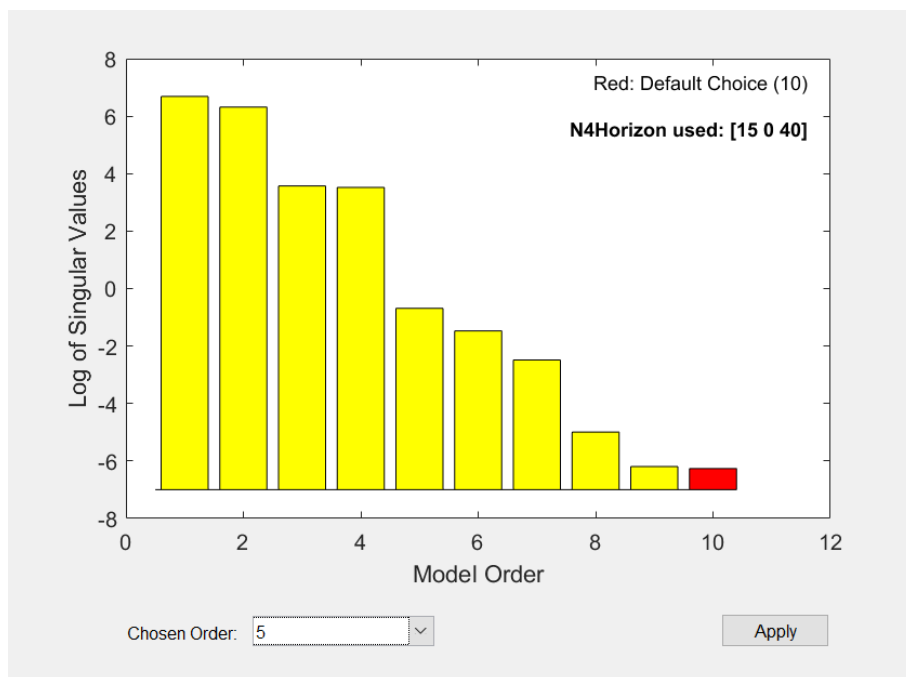
A szintekben történő első változás 100 s-nál esik meg, mikor elérik állandó értéküket. A felső tartályokban lévő szint alacsonyabb az alsó tartályokban lévénél, ennek oka itt is a folyadék betáplálás és kifolyás számában keresendő: az alsókból csak egy kifolyón folyik ki és két helyről folyik be a víz.

A négy szint mindegyikére hatnak a generált ugrások, kivételt képeznek a felső tartályok, melyeket nem érint a másik tartály szűkítőjének és térfogatáramának változásai. Például az első tartály szintje nem változik, mikor a második szűkítőben „lerakódások” keletkeznek vagy „visszaesik” a második szivattyú teljesítménye.

A véletlenszerű ugrások méretét tekintve kiderül, hogy a kisebb ugrások kisebb változásokat eredményeznek, mint a nagyobbak.

A bemeneti és kimeneti változók meghatározása után lehet identifikálni a rendszerre az állapottér modellt. A numerikus megoldás az *n4sid* algoritmussal történt. Ez az algoritmus a diszkrét állapottér modellek meghatározására használható, így megfelelő a MIMO mérőrendszer modelljének identifikálására.

A modell identifikálásához ki lehetett választani az állapotváltozók számát, melyekkel pontosítani lehet a modellt. Ennek a megválasztásnak a módját a 18. ábra mutatja. A megfelelő állapot kijelöléséhez meg kell figyelni a modell illesztése során kapott szinguláris értékek logaritmikus értékeket, melyek azt jelzik, hogy milyen illesztési hiba jellemzi adott állapotszám mellett a modellt.

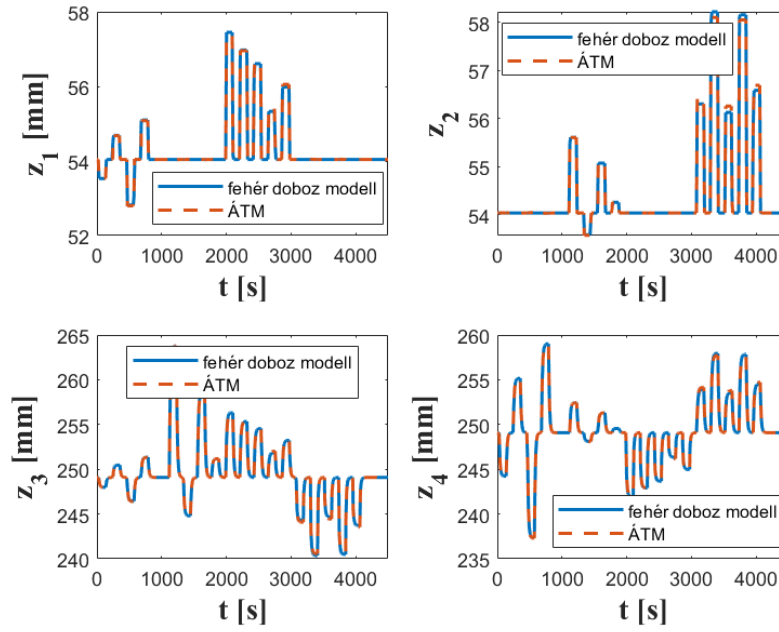


18. ábra: Az állapotváltozók számának kiválasztása

Ha kevesebb állapotot választunk, akkor az illeszkedés nem lesz pontos, nagyobb a hibalehetőség. Több változó figyelembe vételével megbízhatóbb modellt kapunk azonban egy ponton túl már nem növeli jelentősen az illeszkedést, csak bonyolítja a modellt.

Ezen tényezők figyelembe vételével a szinguláris értékek én az 5-öst vettem, mivel előtte meredeken csökkentek a szinguláris értékek, utána meg a változás nem volt jelentős. Vagyis az állapotok számának további növelése nem javítja nagymértékben a pontosságot, csak összetettebbé teszi a modellt.

A kapott állapotter modell által számított kimeneteket összevetettem az illesztéshez használt adatsorral. Az eredményeket a 19. ábra szemlélteti.



19. ábra: Az illesztett állapotter modell jóságának validálása

A fehér doboz és ÁTM által számított kimenetek átlagban 97,26 %-os egyezést mutat. A görbék fedik egymást, csak kisebb eltérések fedezhetők fel, ezek pár tized milliméter különbséget jelentenek.

Az illesztett állapotter modell általános alakját a (32) és (33) egyenlet szemlélteti. Az egyenletrendszerben a bemeneti változókat $u(t)$ jelöli, a kimeneti változókat $y(t)$.

$$x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (32)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (33)$$

A betáplált térfogatáramok és a hibajelek (e) alkotják a bemenetet a (34) egyenletben látható módon. A (35) egyenlet a kimeneti jeleket a szintmagasságok változását adja meg.

$$u(t) = [f_1 \quad f_2 \quad e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4] \quad (34)$$

$$y(t) = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad z_4] \quad (35)$$

A (32) és (33) egyenletekben az A , B , C és D paraméter mátrixok a következőeknek adódtak.

$$A = \begin{bmatrix} -0.8660 & -0.0466 & -0.0717 & -0.0025 & 0.0222 \\ -0.0220 & -0.7493 & -0.0181 & 0.0444 & 0.0078 \\ 0.1278 & -0.0778 & -0.4016 & -0.1199 & 0.1293 \\ -0.2928 & -0.0325 & -0.4238 & -0.2296 & 0.1652 \\ 0.2147 & -0.3742 & 0.7020 & 0.2903 & -0.3544 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 8.7762 \cdot 10^{-5} & -7.7946 \cdot 10^{-6} \\ -5.3290 \cdot 10^{-6} & -2.8316 \cdot 10^{-5} \\ 6.4728 \cdot 10^{-5} & -6.0904 \cdot 10^{-6} \\ 1.2403 \cdot 10^{-4} & -1.5687 \cdot 10^{-5} \\ -1.8654 \cdot 10^{-4} & 1.0274 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 21.4156 & -2.5458 & -1.4647 & -0.9873 & 0.7437 \\ -5.1614 & -43.6531 & -0.8968 & 4.3488 & 1.0702 \\ 87.1834 & 72.9902 & 129.5320 & -241.9125 & -77.1073 \\ 26.4495 & -155.7076 & 268.4630 & 176.9378 & 227.8879 \end{bmatrix}$$

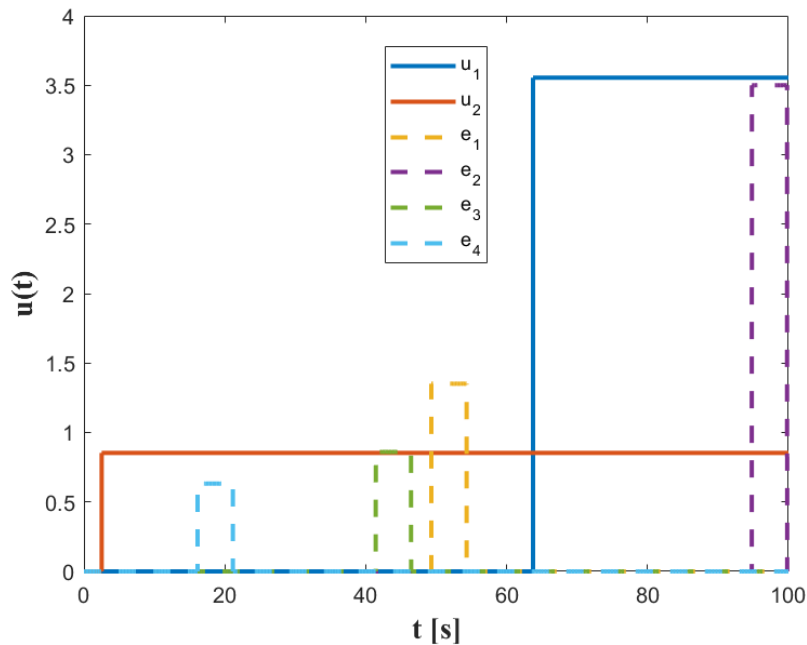
$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.3. Reziduális generátor

A hibák detektálására alkalmas reziduális generátort a Chow-Willsky módszer alapján terveztem meg. A fehér doboz modell felhasználásával adott bemenetekre és generált hibákra a program kiszámítja a rendszer választ normális és hibás üzemeltetési állapotban, ezek különbsége alapján pedig kiszűri a hibákat.

A tervezett generátorhoz az ideális specifikáció a majdnem homogén specifikáció, mivel így minden hibára csak egy reziduális választ kapok. Továbbá ez egy majdnem teljes specifikáció, melynél a megadott hibaválaszok száma kevesebb, mint a kimenetek száma. Ez megadja az ideális mozgó időablak méretét. Így tehát egy majdnem teljes és majdnem homogén specifikációt alkalmaztam.

Az így végzett szimulációknál véletlenszerű bemenetekkel és hibákkal teszteltem a reziduális generátor működését. Ennél a szimulációnál a bemeneti jelek nem elkülönítve lépnek fel, hanem akár egymást fedve is, hogy láthassuk, tud-e különbséget tenni köztük. A szimuláció idejét 100 s-nak adtam meg. A 20. ábra mutatja a bemeneti jelek idejét és nagyságát.

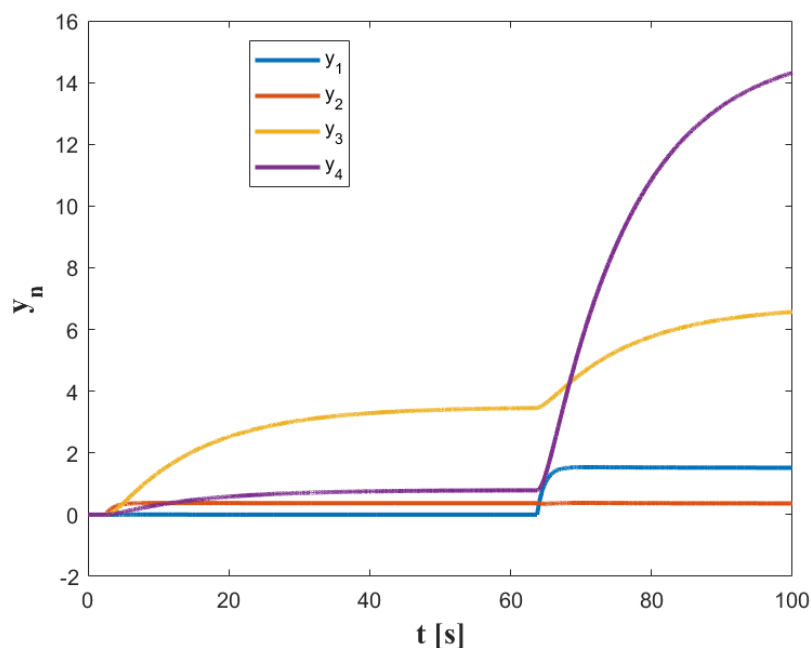


20. ábra: Reziduális generátor bemeneti jelei

A betáplált jelek és a hibák felvett értékeinek mérete a stacioner állapothoz való eltérést mutatják. Az u_1 és u_2 a betáplált térfogatáramokat jelölik, az e_1 és e_2 a térfogatáramokban bekövetkező hibákat, míg a e_3 és e_4 a szűkítők átmérőjében történt változásokat.

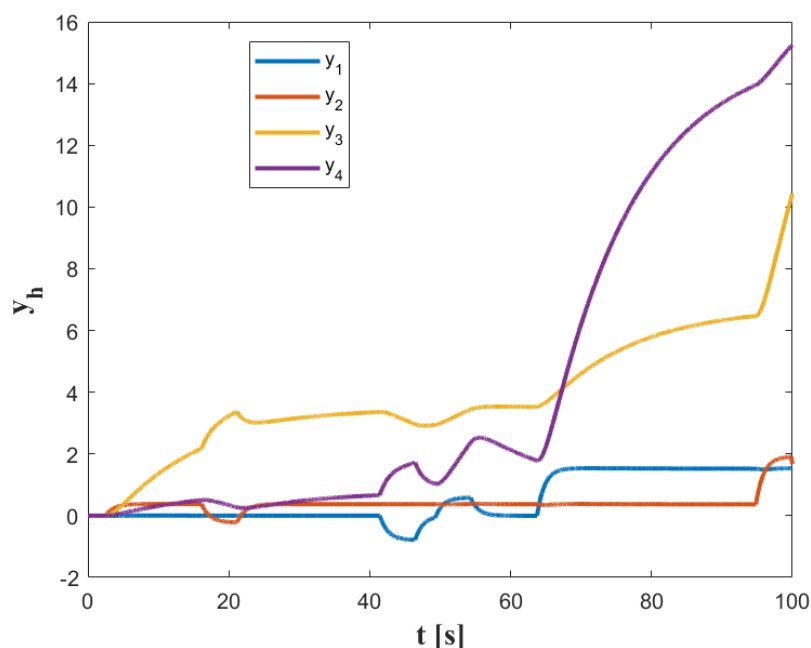
Az első betáplált térfogatáram nagyjából 5 s-nál indul meg, mely a második tartályt telíti, a második áram pedig 65 s-nál kezdődik és az első tartályt tölti. A térfogatáramok hibajelei 50 és 95 s-nál négyzetes vizsgálójel szerint ugrottak. A szűkítőkben történt változások 15 és 40 másodperc elteltével jelentkeztek.

A bemenetekre elvárt, hibamentes válaszokat, a tartályok szintmagasságának változását a 21. ábra szemlélteti.



21. ábra: Normális működés esetén a válaszok

Láthatjuk, hogy a második tartályt térfogatáramára reagálva 5 s-nál megindul a tartály feltöltődése, melyből tovább folyik a víz az alsó tartályokba, így azok kimenetei is megnőnek. Az első tartály telítődése 65 s-nál indul meg, mely tovább emeli a harmadik és negyedik tartály szintjeit. A betáplált áramok kicsik voltak, ezért a felső tartályok szintjei alacsonyan beálltak stacioner értékre, a víz egyből átfolyt az alsó tartályokba, ezért emelkednek magasabbra. A rendszer valódi válaszát a 22. ábra mutatja, melyen látszódnak a hibajelek hatásai a szintekre.



22. ábra: Hibás működés esetén a válaszok

A kapott értékek egyértelműen eltérnek a várt választól. Az 5. és 60. másodpercben megindulnak a térfogatáramok, ám ezeket megszakítják a szűkítők és áramok ugrásnyi ideig megjelenő hibajelei.

Az első ugrás a második szűkítő átmérőjének változása miatt történt, a második, harmadik és negyedik tartály szintjét is érintette. Láthatóan a harmadik tartályba több folyadék jutott abban az időben.

A következő hiba 40 s körül történt szintén szűkítővel. Hatására az első tartályból és így a harmadik és negyedik tartályból is kevesebb víz folyik ki.

A harmadik hibajel 50. s-nál volt, az első térfogatáramban történt növekedés megemelte az első, harmadik és negyedik tartály szintjeit, melyek utána a visszaállt folyamatos betáplálásra újra állandósultak, míg a második térfogatáram meg nem indult.

Az utolsó ugrás a második tartály térfogatáramát emelte meg, így az alatta lévő szintek is ugyanúgy megnöttek.

A normális és valós válaszokat összevetve a reziduális generátor meg tudja különböztetni a hibajeleket. A 23. ábra megmutatja, hogy milyen időpillanatokban voltak az ugrások, mennyi ideig és hogy melyik hiba okozta a nem kívánt változást.

A reziduális generátort (w) a (36) egyenlettel számítottam, melyben a hibákra az elvárt reziduális választ (r) kapjuk.

$$r_i = w_i(Y(t) - KU(t)) = w_i(Jx(t - \sigma) + LP(t)) \quad (36)$$

A reziduális generátor elválasztja az állapotváltozóktól a hibajeleket, majd módosítja azokat a (37) egyenlet alapján.

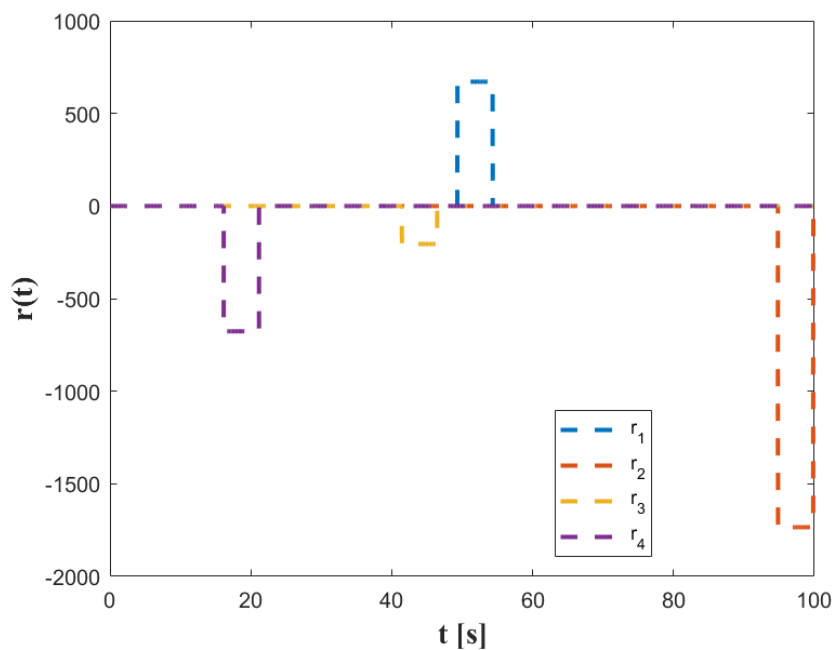
(37)

$$w = [0 \quad r][J \quad L]^{-1}$$

A számításokhoz szükség volt a mozgó időablak szélességére, melyet a majdnem teljes specifikációnál a kimenetek számából (v) és a megadott hibák számából (ρ) kapunk meg.

$$\sigma = v - \rho \quad (38)$$

A (38) egyenlet alapján az időablak mérete $\sigma = 2$ -nek adódott.



23. ábra: Reziduális válaszok

Várható módon az első kettő a szűkítőkben történt változásokat mutatja, ezek időben 15 és 40 s-nál voltak. Utána jön a két térfogatárambeli változás 50 és 95 s elteltével. A jelek 5 s-ig tartottak. Mivel a specifikációt majdnem homogénnek választottam, így minden reziduális csak egy hibára válaszol. Vagyis az egyes reziduális jeleket összehasonlítva a 20. ábra hibajeleivel láthatjuk, hogy megegyezik a helyzetük. A generátor felismerte az első hibát és az első reziduális jelnek tette, majd ugyanígy azonosította a többi rendellenességet is.

Összefoglalás

Munkám célja egy modell alapú diagnosztikai és rendellenesség azonosítási módszer tervezése és alkalmazása volt egy négytartályos MIMO mérőrendszer felügyeletére. Előzetes ismeretek gyűjtéséhez először elkészítettem a rendszer fehér doboz modelljét, mely matematikai egyenletekkel írja le az objektum működését. Segítségével megterveztem a rendszer irányítását és a modellel kapott adatokat felhasználtam az állapottér modell identifikálásához. A két modell 97,26 %-os egyezést mutatott. Vagyis a bemeneti és kimeneti adatokból az ÁTM-el meghatároztam a rendszer kimeneti és állapotváltozóit. A modellel utána a tartály lehetséges meghibásodásain teszteltem egy kvantitatív modell alapú hibadetektáló sémát, a Chow-Willsky módszert. A tervezett hibadetektálásra alkalmas reziduális generátor sikeresen felismerte és függetlenítette a fellépő hibákat az állapotváltozóktól.

A reziduális generátor szerkezet további felülvizsgálatot és pontosítást igényel, hogy más munkapontokban végezhető legyen vele számítás. Jövőbeli terveim közt szerepel egy modell alapú állapotbecslő megközelítés alkalmazása, mellyel további specifikációk adhatók meg. Ezek alapján a hibadiagnosztikai sémák működését valós fizikai rendszeren végzett mérésekkel tesztelném le.

Irodalomjegyzék

- [1] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., & Kavuri, S. N. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. *Computers & chemical engineering*, 27(3), 293-311.
- [2] Broughton, E. (2005). The Bhopal disaster and its aftermath: a review. *Environmental Health*, 4(1), 1-6.
- [3] Piper Alpha: The Disaster in Detail - Features - The Chemical Engineer (letöltés ideje: 2021. 01. 23.)
- [4] Taveau, J. (2010). Risk assessment and land-use planning regulations in France following the AZF disaster. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(6), 813-823.
- [5] Edelmayer, A. (2005). Fault detection in dynamic systems: from state estimation to direct input reconstruction methods (Doctoral dissertation, MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet).
- [6] Gertler, J. (1998). Fault detection and diagnosis in engineering systems. CRC press.
- [7] Horváth Zsolt (2019). Dízelmotor feltöltőrendszerének modellalapú robusztus hibadetektálása (Doktori értekezés, Infrastrukturális rendszerek modellezése és fejlesztése multidiszciplináris műszaki tudományi doktori iskola).
- [8] Bureau of Labor Statistics, 1998; McGraw-Hill Economics, 1985; National Safety Council, 1999
- [9] Bellini, P., Cenni, D., Mitolo, N., Nesi, P., Pantaleo, G., & Soderi, M. (2022). High level control of chemical plant by industry 4.0 solutions. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100276.
- [10] Kaczmarczyk, V., Zezulka, F., Beneš, T., Arm, J., Marcoň, P., Jirsa, J., & Venkrbec, L. (2022). Revisiting the Role of Manufacturing Execution Systems in Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 55(4), 151-157.
- [11] Ding, S. X. (2008). Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Springer Science & Business Media.
- [12] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., & Kavuri, S. N. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies. *Computers & chemical engineering*, 27(3), 313-326.
- [13] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N., & Yin, K. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods. *Computers & chemical engineering*, 27(3), 327-346.

- [14] TERTA, B. O. A hibatűrő rendszerek elvi kérdései VERESS TIBOR.
- [15] PPT - Kalman-féle rendszer definíció PowerPoint Presentation, free download - ID:5983656 (slideserve.com) (Letöltés ideje: 2021. 04. 25.)
- [16] Kar, M. I., & Iskola, I. T. D. Predikción alapuló diagnosztika mesterséges intelligencia módszerek felhasználásával. (letöltés ideje: 2021. 05. 09.)
- [17] Bhagwat, A., Srinivasan, R., & Krishnaswamy, P. R. (2003). Multi-linear model-based fault detection during process transitions. *Chemical engineering science*, 58(9), 1649-1670.
- [18] Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis–status and applications. *Annual Reviews in control*, 29(1), 71-85.
- [19] Garimella, P., & Yao, B. (2005, June). Model based fault detection of an electro-hydraulic cylinder. In *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.* (pp. 484-489). IEEE.
- [20] Liang, J., & Du, R. (2007). Model-based fault detection and diagnosis of HVAC systems using support vector machine method. *International Journal of refrigeration*, 30(6), 1104-1114.
- [21] Xu, Q. N., Lee, K. M., Zhou, H., & Yang, H. Y. (2014). Model-based fault detection and isolation scheme for a rudder servo system. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 62(4), 2384-2396.
- [22] Poon, J., Jain, P., Konstantakopoulos, I. C., Spanos, C., Panda, S. K., & Sanders, S. R. (2016). Model-based fault detection and identification for switching power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(2), 1419-1430.
- [23] Harirchi, F., & Ozay, N. (2018). Guaranteed model-based fault detection in cyber–physical systems: A model invalidation approach. *Automatica*, 93, 476-488.
- [24] Cho, S., Gao, Z., & Moan, T. (2018). Model-based fault detection, fault isolation and fault-tolerant control of a blade pitch system in floating wind turbines. *Renewable energy*, 120, 306-321.