

# Nemlineáris folyamatrendszer diagnosztikája, analízise és irányítása szürke doboz módszerek segítségével

doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette: SZEDERKÉNYI GÁBOR

a Veszprémi Egyetem

Informatikai Tudományok Doktori Iskolája keretében

Iskolavezető: Dr. Friedler Ferenc

Témavezető: Dr. Hangos Katalin

Számítástudomány Alkalmazása Tanszék

Veszprémi Egyetem

Veszprém

2002

# 1. A kitűzött kutatási feladat összefoglalása

Korunk műszaki feladataiban egyre összetettebb rendszerek automatizálására van szükség. Dolgozatomban speciális dinamikus rendszerosztállyal, a termodinamika törvényei alapján működő folyamatrendszerek diagnosztikájával és irányításával foglalkozom. Bár a munka során használt eszközök és módszerek eléggé szerteágazóak, egy fontos közös célkitűzés mindvégig jelen van a dolgozatban: annak vizsgálata, hogy a folyamatrendszerek speciális struktúrális tulajdonságai hogyan használhatók fel a kitűzött diagnosztikai, modell-analízis és irányítási feladatok megoldására. Ezt a problémamegközelítési módszert szürke doboz megközelítésnek nevezzük.

A dolgozat első részének (2. fejezet) témája folyamatrendszerek modell alapú hibadiagnosztikája. Az iparban használt folyamatrendszerek a technológia fejlődésével egyre bonyolultabbá válnak, és ezzel egyidejűleg fokozott igény van a korszerű hibadetektáló és hibadiagnosztikai módszerek alkalmazására a folyamatos és biztonságos működés fenntartása érdekében [1]. A berendezések (ún. műveleti egységek) modellezése sokat kutatott terület, így a modell alapú hibadiagnosztikai eljárások folyamatrendszerekre általában hatékonyan alkalmazhatók. A kutatási cél esetemben annak vizsgálata volt, hogy a dinamikus folyamatmodell mellett rendelkezésre álló szürke doboz hibamodellek alkalmazása hogyan befolyásolja a hibadetektáló és hibadiagnosztikai algoritmusok tulajdonságait és teljesítményét.

A folyamatrendszerek tervezési célja általában energia és/vagy költségoptimális rendszerek létrehozása. Jól ismert tény, hogy a gyakorlatban használt folyamatrendszerek viselkedése gyakran erősen nemlineáris, ezért irányításuk a hagyományos (PID) alapú technikákkal, és sok esetben a modern irányításelmélet lokálisan linearizált modelleken alapuló módszereivel sem oldható meg kielégítő módon. A koncentrált paraméterű folyamatmodellek természetes alakja az ún. nemlineáris input-affin állapotter-modell [2]. Az utóbbi két évtizedben egyre több elméletileg jól megalapozott eredmény született a nemlineáris állapotter-modellekkal adott rendszerek analízisének és irányításának területén [3], [4]. Dolgozatom második fő részében (3., 4., 5. fejezet) tehát azt vizsgálom, hogy ezek az általános esetben igen számításigényes és gyakorlati problémákra nehezen használható módszerek hogyan alkalmazhatók nemlineáris folyamatrendszerek modell-

jei esetén. A kutatási célok közé tartozik annak vizsgálata, hogy a nemlineáris módszerek alkalmazásával kapott eredmények milyen fizikai, termodinamikai jelentéssel bírnak.

## 2. A felhasznált eszközök és módszerek

A hibadetektáló és hibadiagnosztikai módszerek három fő csoportba sorolhatók: a modell nélküli, modell alapú és tudás alapú módszerek közé [1]. A modell alapú módszerek lényege a jel- és folyamatanalízisen alapuló analitikus redundancia vizsgálata. A mérhető jelek analízisére leggyakrabban korrelációs függvényeket, frekvenciatartománybeli vagy statisztikai döntésméleti vizsgálati módszereket alkalmaznak. A folyamatok analíziséhez a modell alapú módszerek esetében a folyamatok és meghibásodások matematikai modelljeivel együtt többnyire paraméter- és állapotbecslőket és hibadetektáló szűrőket használnak. A folyamatrendszer állapot-termodelljei jól értelmezhető fizikai jelentéssel rendelkeznek, így hibadetektáláshoz érdemes a diagnosztikai információt hordozó paraméterek változását lineáris vagy nemlineáris módszerrel nyomonkövetni [5]. A hibadiagnosztika ezután a becsült paraméterértékeket és a hiba szürke doboz modelljét felhasználva elvégezhető [6].

A modell-analízis alapvető fontosságú lépés a folyamatrendszerhez történő szabályozótervezésben. A modell-analízis során kapott eredmények jelezhetik az irányítással kapcsolatos várható nehézségeket, és irányelveket nyújthatnak a szabályozótervezéshez [2].

A szabályozás szempontjából egyik legfontosabb tulajdonság az (állapot)irányíthatóság, amely számos korszerű szabályozási technika alkalmazhatóságának szükséges feltétele. Lineáris rendszereknél az irányíthatósági tulajdonságok a teljes állapotterben változatlanok, míg nemlineáris rendszereknél drasztikusan eltérőek lehetnek az állapotter különböző tartományai-ban. Lineáris rendszerek esetén az irányíthatóság ellenőrzése invariáns alterekeken alapuló jól ismert algoritmussal könnyen elvégezhető, az eredményül kapott Kalman-féle irányíthatósági mátrix oszlopai kifizítik az irányíthatósági alteret [7]. Az algoritmus nemlineáris input-affin rendszerekre való kiterjesztésével analitikusan megkonstruálható az ún. elérhetőségi disztribúció, amely a lokális irányíthatósági tulajdonságokat az állapotter minden egyes pontjának környezetében mutatja. Ha a rendszer az állapotter valamely részében nem elérhető (az elérhetőségi disztribúció rangja kisebb mint az állapotváltozók száma), akkor a lineáris esethez hasonlóan kiszámítható az a nemlineáris koordináta-transzformáció, amellyel felismerhetők az állapotváltozók bemenettől független nemlineáris kombinációi [3].

A visszacsatolatlan és visszacsatolt rendszerek stabilitásának vizsgálata lineáris esetben a rendszermátrix sajátértékeinek kiszámításával elvégezhető. A nemlineáris rendszerek stabilitásvizsgálatára és a stabilitási tartomány nagyságának becslésére mindmáig az egyik leghatékonyabb eljárás Ljapunov-függvények (tárolófüggvények, általánosított energiafüggvények) meghatározása [8]. Stabil folyamatrendszerekhez sok esetben meghatározható Ljapunov-függvény fizikai, termodinamikai megfontolások alapján [9]. Nemlineáris rendszerek input-output stabilitásvizsgálatára szolgálnak az utóbbi évtizedben egyre szélesebb körben ismertté vált passzivitás- és  $L_2$ -erősítés alapú technikák [10], [4]. A fizikai tárolófüggvény ismeretében könnyen meghatározhatók azon be- és kimenetek, amelyekre nézve a rendszer passzív [11].

Nemlineáris rendszereknél a zéró dinamika a lineáris rendszerek átviteli függvényeiben szereplő zérusokhoz hasonló szerepet játszik. A zéró dinamika azt mutatja, hogy a kiválasztott kimenet nulla (vagy konstans) értéke esetén a rendszer állapotváltozói hogyan (stabilan vagy instabilan) viselkednek. E tulajdonság vizsgálata tehát fontos segítséget nyújthat a szabályozott kimenetek megválasztásában, és a zárt rendszer stabilitási tartományának meghatározásában [3].

A mechanikából jól ismert hamiltoni rendszerleírás más rendszerosztályokra is kiterjeszhető. Ha a folyamatrendszereket a hamiltoni keretrendszerben ábrázoljuk, az adott folyamat fizikai és kémiai tulajdonságain alapuló tárolófüggvényt kapunk. Ezután speciális visszacsatolást alkalmazva a zárt rendszer általánosított energiafüggvényének és ezzel a rendszer dinamikus tulajdonságainak alakítására van lehetőségünk [4], [12].

### 3. Új tudományos eredmények

Az értekezésben bemutatott új tudományos eredményeket az alábbi tézisekben foglalom össze.

#### 1. Tézis *Nemlineáris folyamatrendszerek modell alapú hibadiagnosztikája* (2. fejezet)

([P1], [P5], [P6], [P7], [P11])

Módszert dolgoztam ki nemlineáris folyamatrendszerek modell alapú diagnosztikai eljárásainak vizsálatára. A folyamatdinamika leírására fizikai modellt, a meghibásodásokra szemi-empirikus modellt alkalmaztam.

1. Megmutattam, hogy a folyamatmodellek növekvő részletessége kedvezően befolyásolja a vizsgált hibadetektálási és hibaizolációs algoritmusok tulajdonságait. Módszert dolgoztam ki a hiba térbeli lokalizációjára a folyamatdinamikai modellnek a jelek térbeli elhelyezkedését is figyelembe vevő finomítása útján.
2. Megmutattam, hogy a folyamatmodell mellett rendelkezésre álló szürke vagy fehér doboz hibamodellek alkalmazásával az egy időben fellépő hibajelenségek is biztonságosan detektálhatók és elkülöníthetők.

Az eredményeket ellenáramú hőcserélők modell alapú hibadiagnosztikájának példáján illusztráltam. Az ismert folyamatdinamikát szűrőként használtam a mérési adatokból olyan jelek előállítására, amelyek karakterisztikus változásai csak a vizsgált hibajelenségekre jellemzők. A hibadiagnosztikához rekurzív paraméterbecslő és a becsült paraméter hibára jellemző változását detektáló algoritmusokat alkalmaztam.

#### 2. Tézis *Nemlineáris folyamatmodellek analízise* (3. fejezet)

([P2], [P8], [P9], [P12], P[13])

Nemlineáris input-affin állapotter modellel megadott folyamatmodellek analízisét végeztem el lineáris és nemlineáris módszerekkel, a kapott eredményeket összehasonlítottam.

1. Megmutattam, hogy a folyamatmodellek speciális strukturális tulajdonságait felhasználva az általános esetben nagy bonyolultságú nemlineáris elérhetőségi analízis analitikusan is kiszámítható problémává válik. Fermentációs folyamatok elérhetőségének példáján

mutattam be, hogy az elérhetőségi analízis során kiszámított szinguláris pontok mérnökileg jól értelmezhető fizikai jelentéssel bírnak.

2. Megmutattam, hogy izoterm félfolyamatos (fed-batch) üzemű fermentációs folyamatok széles osztálya nemlineáris értelemben nem irányítható a bemenő folyadékáram segítségével, mert az irányíthatósági disztribúció rangja az állapotter minden pontjában kisebb mint az állapotváltozók száma. Meghatároztam azt a globális koordináta-transzformációt, amelynek segítségével a félfolyamatos üzemű fermentációs folyamatok állapotter modellje irányíthatósági kanonikus alakra hozható. Megmutattam, hogy a kiszámított koordináta-transzformáció független a fermentációs modellben szereplő forrásfüggvénytől. A koordináta-transzformáció felhasználásával megadtam a félfolyamatos üzemű fermentációs folyamatok minimális állapotter realizációját. Meghatároztam egy dimenzionálisan homogén megmaradó mennyiséget, amely az állapotváltozók nemlineáris kombinációja. Az eredményeket hőmérsékletfüggő esetre is általánosítottam.
3. Megmutattam, hogy folyamatos üzemű izoterm fermentációs folyamatok zéró dinamikája a szubsztrátkoncentrációra nézve globálisan aszimptotikusan stabil a forrásfüggvénytől függetlenül (azaz a folyamatos üzemű fermentációs folyamatok a szubsztrátkoncentrációra nézve nemlineáris értelemben minimálfázisú rendszerek), míg a biomasszakoncentráció kimenetbe való bevonása a zéró dinamika (és így visszacsatolás esetén a zárt rendszer) stabilitási tartományát szűkíti.

### **3. Tézis** *Analízis alapú szabályozóstruktúra-választás* (4. fejezet)

([P3], [P9], [P14])

A nemlineáris analízis eredményeinek a szabályozó-struktúra tervezésében és kiválasztásában betöltött szerepét vizsgáltam. Lineáris és nemlineáris szabályozókat terveztem folyamatos üzemű fermentációs folyamatok stabilizáló szabályozására. A szabályozók működését összehasonlítottam.

1. Módszert dolgoztam ki arra, hogy a nemlineáris analízis során kapott előzetes információk (stabilitási tartomány, elérhetőségi disztribúció szinguláris pontjai, zéró dinamika) hogyan használ-

hatók fel folyamatrendszerek statikus nemlineáris szabályozóinak tervezésére.

2. Elméleti analízissel és szimulációs kísérletekkel megmutattam, hogy a modell analízis eredményeinek figyelembevételével tervezett nemlineáris statikus visszacsatolások tulajdonságai előnyösebbek a linearizált modell alapján tervezett lineáris szabályozókénál.
3. Módszert adtam folyamatos üzemű fermentációs folyamatokat globálisan stabilizáló nemlineáris statikus szabályozó tervezésére. A szabályozó tervezési paramétere a zárt rendszer kvadratikus Ljapunov-függvénye.
4. Általánosan alkalmazható módszert adtam nemlineáris, egy bemenetű, lokálisan irányítható input-affin alakú állapotter modellek lokális stabilizálására. A módszerrel a lineáris optimális szabályozás és a nemlineáris rendszerek közti kapcsolatot felhasználva olyan lineáris kimenet választható ki, amelyre nézve a rendszer legalább lokálisan minimálfázisú.

#### **4. Tézis** *Folyamatrendszerek hamiltoni leírása* (5. fejezet)

**([P4])**

A folyamatrendszerek széles osztályát leíró dinamikus modellek egyszerű hamiltoni alakra hozhatók. Az egyszerű hamiltoni leírás alapján a folyamatrendszerekhez stabilizáló és nemlineáris loop-shaping szabályozók tervezhetők.

1. Módszert dolgoztam ki a hamiltoni stabilizáló és nemlineáris loop-shaping szabályozók hangolásához, amely a visszacsatolt rendszer globális stabilitásvizsgálatán alapul.
2. Megadtam a folyamatrendszerek egyszerű hamiltoni leírásának a rendszer forrásfüggvényére vonatkozó feltételét. Ennek alapján megállapítottam, hogy a forrást nem tartalmazó, valamint a csak egy komponenst tartalmazó, forrással is rendelkező folyamatrendszerek mindig leírhatók egyszerű hamiltoni modellekkel.



## 4. Az értekezés témaköréből készült publikációk

### Referált folyóiratcikkek

- [P1] E. Weyer, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Grey box fault detection of heat exchangers. *Control Engineering Practice* 8:121–131, 2000. **(1. Tézis)**
- [P2] G. Szederkényi, M. Kovács, and K. M. Hangos. Reachability of nonlinear fed-batch fermentation processes. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, to appear, 2002. **(2. Tézis)**
- [P3] G. Szederkényi, N. R. Kristensen, K. M. Hangos and S. B. Jorgensen. Nonlinear analysis and control of a continuous bioreactor. *Computers & Chemical Engineering*, 26:659–670, 2002. **(3. Tézis)**
- [P4] K. M. Hangos, J. Bokor, and G. Szederkényi. Hamiltonian view on process systems. *AIChE Journal*, 47:1819-1831, 2001. **(4. Tézis)**

### Referált konferenciakiadványok

- [P5] G. Szederkényi, E. Weyer, and K. M. Hangos. Simultaneous fault detection of heat exchangers. In *Proc. of the IFAC Workshop on Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, P. S. Dhurjati, S. Cauvin (Eds.), (Lyon, France), pp. 1-6, June 1998. **(1. Tézis)**
- [P6] K. M. Hangos and G. Szederkényi. Grey box process modeling for fault detection and isolation. In *Proc. of the European Control Conference (ECC'99)*, (Karlsruhe, Germany), (on CD), Aug. 1999. **(1. Tézis)**
- [P7] L. Tesar, G. Dolanc, G. Szederkényi, J. Kadlec, D. Juricic, K. M. Hangos, and M. Kinnaert. A toolbox for model-based fault detection and isolation. In *Proc. of the European Control Conference (ECC'99)*, (Karlsruhe, Germany), (on CD), Aug. 1999. **(1. Tézis)**
- [P8] K. M. Hangos, J. Bokor and G. Szederkényi. Grey box characterization of nonlinear process systems. In *Proc. of the 9th Nordic Process Control Workshop*, (Copenhagen, Denmark), pp. 89-106, Jan. 2000. **(2. Tézis)**

- [P9] G. Szederkényi, N. R. Kristensen, K. M. Hangos, and S. B. Jorgensen. Nonlinear analysis and control of a continuous fermentation process. In *Proc. of the 11th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-11)*, R. Gani, S.B. Jorgensen (Eds.), (Kolding, Denmark), pp. 787-792, May 2001. **(2. és 3. Tézis)**
- [P10] G. Szederkényi, K. M. Hangos, J. Bokor, and T. Vámos. Linear output selection for feedback linearization. In *Proc. of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*, (Barcelona, Spain), accepted, July 2002. **(3. Tézis)**

### **Kutatási beszámolók és tanulmányok**

- [P11] G. Szederkényi. Simultaneous fault detection of heat exchangers. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-5-1998*. Budapest, MTA-SZTAKI, 1998. 39 p. **(1. Tézis)**
- [P12] K. M. Hangos, G. Szederkényi, and J. Bokor. Grey box characterization of nonlinear process systems. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-1-1999*. Budapest, MTA-SZTAKI, 1999. 17 p. **(2. Tézis)**
- [P13] K. M. Hangos, J. Bokor, and G. Szederkényi. Analysis and control of nonlinear process systems. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-3-2000*. Budapest, MTA-SZTAKI, 2000. 115 p. **(2. Tézis)**
- [P14] G. Szederkényi. Analysis and control of nonlinear fermentation processes. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-1-2001*. Budapest, MTA-SZTAKI, 2001. 53 p. **(3. Tézis)**

## **A dolgozat témaköréhez részben kapcsolódó publikációk**

- [P15] P. Ailer, I. Sánta, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Nonlinear model-building of a low power gas turbine. *Periodica Polytechnica*, in print, 2002.
- [P16] P. Ailer, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Parameter estimation and model validation of a low power gas turbine. In *Proc. of the IAS-TED International Conference on Modeling, Identification and Control (MIC'2002)*, (Innsbruck, Austria), accepted, Feb. 2002.
- [P17] P. Ailer, G. Szederkényi, and K. M. Hangos. Model-based nonlinear control of a low power gas turbine. In *Proc. of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*, (Barcelona, Spain), accepted, July 2002.
- [P18] T. Péni, G. Szederkényi, K. M. Hangos. Nonlinear dynamic output feedback control of bioreactors. *Research report of the Systems and Control Laboratory SCL-1-2002*. Budapest, MTA-SZTAKI, 2001. 15p.

## 5. Egyéb publikációk

- [E1] Hangos Katalin, Szederkényi Gábor. *Dinamikus rendszerek paramétereinek becslése*. (Tankönyv) Veszprém, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 1999. 99 p.
- [E2] Hangos Katalin, Bokor József, Szederkényi Gábor. *Computer Controlled Systems - 2nd edition with examples*. (Tankönyv) Veszprém, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2002. 135 p.
- [E3] J. Nacsa, G. L. Kovács, and G. Szederkényi. Intelligent alert state detection and switching order generation at the 400/120 kV substation of the Paks Nuclear Power Plant. In *Proc. of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS 2000)*, (Budapest, Hungary), pp. 1127-1132, 2000.
- [E4] K. Eged, Z. Kis, B. Kanyár, and G. Szederkényi. A critical review of experimental, field and modeling information on the transfer of radionuclides to fruits, description of RUVFRU model (I). *IAEA TECDOC*, 2000.
- [E5] K. Eged, Z. Kis, B. Kanyár, and G. Szederkényi. A critical review of experimental, field and modeling Information on the transfer of radionuclides to fruits, description of RUVFRU model (II). *IAEA TECDOC*, 2001.
- [E6] G. Szederkényi, K. Eged, and B. Kanyár. Nukleáris beavatkozások költség-optimalis tervezése Matlab-Simulink rendszerrel. In *Neumann János Kollokvium*, Veszprém, 1997.
- [E7] K. Eged, Z. Kis, G. Szederkényi, and B. Kanyár. Planning nuclear countermeasures in the way of optimization of cost. *23rd Workshop on Radiation Protection*, Balatonkenese, Hungary, 1998.
- [E8] B. Kanyár, K. Eged, Z. Kis, Á. Nényei, G. Szederkényi, and A. Sanchez. Radionuklidok transzportjának modellezése a talaj-növény rendszerek esetén, scenárió vizsgálatok. In *Új módszerek a mezőgazdaságban*, Szarvas, Hungary, 1999.

## 6. Az eredmények hasznosítása

A hőcserélők modell-alapú hibadiagnosztikájára kidolgozott módszerek (1. Tézis) különösebb nehézségek nélkül alkalmazhatók egyéb rendszerekre, amennyiben a hibamentes rendszer modellje mellett a hibajelenség szürke doboz modellje is adott.

A folyamatos üzemű fermentációs modelleknek a szubsztrátkoncentrációra mint kimenetre vonatkozó zéró dinamikájának globális stabilitása (2.3. tézispont) lehetővé teszi olyan stabilizáló nemlineáris dinamikus kimenet-visszacsatolás (állapotmegfigyelő-szabályozó struktúra) megtervezését, amelynél már nincs szükség a biomasszakoncentráció mérésére [P18]. Ez a megoldás megkönnyíti a gyakorlati alkalmazhatóságot, hiszen a biomasszakoncentráció folyamatos mérésére általában nincs lehetőség.

A félfolyamatos fermentációs folyamatok elérhetőségi analízise (2.2 tézispont) során kapott eredmények magyarázatot adnak a gyakorlatban is tapasztalt irányítási problémákra. Az értekezésben megadott minimális állapotter-modellre alkalmazhatók azok a modern lineáris vagy nemlineáris szabályozótervezési módszerek, melyeknél a kiszámíthatóság feltétele az együttes irányíthatóság és megfigyelhetőség.

A nemlineáris modell-analízis és szabályozóstruktúra-választás (2. és 3. Tézis) módszerei sikeresen alkalmazhatók egy kisteljesítményű gázturbina nemlineáris szabályozására [P15], [P16], [P17].

## Hivatkozások

- [1] Rolf Isermann. *Process fault diagnosis based on dynamic models and parameter estimation methods*. Prentice Hall, 1989.
- [2] K.M. Hangos and I.T. Cameron. *Process modelling and model analysis*. Academic Press, London, 2001.
- [3] Alberto Isidori. *Nonlinear control systems*. Springer, Berlin, 1995.
- [4] Arjan van der Schaft. *L2-gain and passivity techniques in nonlinear control*. Springer, Berlin, 2000.
- [5] L. Ljung. *System identification - theory for the user*. University of Linköping, Sweden, Linköping, 1984.
- [6] M. Basseville and I.V. Nikiforov. *Detection of abrupt changes. Theory and practice*. Prentice Hall, London, 1993.
- [7] T. Kailath. *Linear systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1980.
- [8] J. La Salle and S. Lefschetz. *Stability by Liapunov's direct method*. Academic Press, New York, London, 1961.
- [9] K. M. Hangos, A. A. Alonso, and J. Perkins. A thermodynamic approach to the structural stability of process plants. *AIChE Journal*, 45:802–816, 1999.
- [10] C. A. Desoer and M. Vidyasagar. *Feed-back systems: input-output properties*. Academic Press, New York, 1975.
- [11] C. I. Byrnes, A. Isidori, and J. C. Willems. Passivity, feedback equivalence and the global stabilization of minimum-phase nonlinear systems. *IEEE Trans. Aut. Contr.*, AC-36:1228–1240, 1991.
- [12] H. Nijmeijer A. J. Van der Schaft. *Nonlinear dynamical control systems*. Springer, New York, Berlin, 1990.

