

Mechatronikus Védőszelep Nemlineáris Vizsgálata és Irányítása

Tézisek

NÉMETH HUBA

Témavezető: Palkovics László

Konzulens: Hangos Katalin

Járművek és Mobil Gépek Tudomány szak

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki Kar

Gépjárművek Tanszék

Budapest

2004

1. A kitűzött kutatási feladat összefoglalása

Napjainkban a haszonjármű fékrendszerek területén egyre fokozódik az igény az alkalmazott rendszerek integrációs szintjének és költségének csökkentésére. Ez a trend nagyban befolyásolta az elektronikus levegőelőkészítő rendszerek felépítését és működését.

Az elektronikus levegőelőkészítő rendszerek fő feladatai a sűrített levegő nyomásának- és minőségének szabályozása (nedvességi- és szennyezettségi szintjének csökkentése), valamint a levegő független fékkörökbe történő elosztása. E három funkciót egy rendszerben valósítják meg a költségek csökkentése és az integrációs szint növelése érdekében, ellentétben a hagyományos mechanikus rendszerekkel, ahol mindegyikük egy-egy külön szelepegységet alkot. Az új integrált rendszerekben a felsorolt funkciók szabályozását egy elektronikus vezérlőegység látja el.

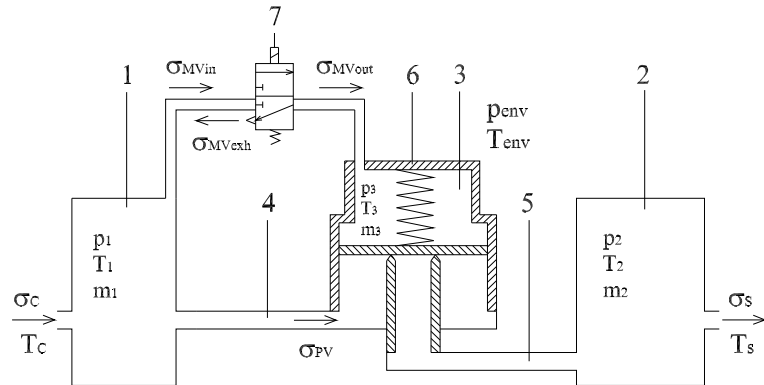
Az elektronikus levegőelőkészítő rendszerek levegőelosztó részének további feladata, hogy a független fékkörök számára különböző nyomásszintet állítson elő. Ezt a követelményt általában további nyomáscsökkentő szelepek beépítésével valósítják meg, noha e rendszerek más kiegészítő szabályozási funkciók érdekében, rendelkeznek bizonyos fékkörökben elektronikus beavatkozószerrel. Ilyen kiegészítő funkciók például a független körök feltöltési sorrendjének befolyásolása, vagy bizonyos speciális körvédelmi módszerek. A rendszer mágnesszeleppel kiegészített levegőelosztást megvalósító részét mechatronikus védőszelepnek hívjuk.

A fentiekből kézenfekvően adódik a fékkörök nyomáskorlátozó funkciójának a mechatronikus védőszelep segítségével történő megvalósítása. Ennek eredményeként a mechanikus nyomáskorlátozó szelep elhagyható, ami jelentős költségmegtakarítással jár. A nyomáskorlátozás megvalósítása azonban igényli a modern irányításelméleti módszerek alkalmazását.

Ezzel egyidőben jelentős változás figyelhető meg a szabályozástechnikai módszerek fejlődésében, ahol a hagyományos lineáris módszerek mellett a nemlineáris technikák is egyre inkább teret nyernek. E fejlődés különleges jelentőséggel bír a hibrid dinamikus rendszerek esetén [7].

A felsorolt okok alapján a disszertációban leírt kutatómunka fő célja egy nemlineáris nyomáskorlátozó szabályozó alkalmazási lehetőségének megvizsgálása és ezek alapján egy lehetséges nemlineáris szabályozó megtervezése és megfelelő hangolása.

E célok elérése érdekében szükséges a vizsgált mechatronikus védőszelep szabályozás-tervezés céljára alkalmas dinamikus modelljének felállítása. Ez a disszertáció első részének tárgya. A dinamikus modell az 1. ábrán jelölt mérlegelési térfogatokra felírt termodinamikai-, mechanikai- és elektro-mágneses dinamikus megmaradási egyenletekből áll, amelyek további algebrai egyenletekkel egészülnek ki (2. fejezet).



1. ábra. A mechatronikus védőszelep felépítése

A megmaradási- és kiegészítő egyenletekből felépített dinamikus mérnöki modellek gyakran túl részletesek és bonyolultak szabályozástervezési célokra, így ilyen esetekben a modellépítést követő modellegyszerűsítésre is szükség van. A mechatronikus védőszelephez kifejlesztett dinamikus modell bonyolult alakja és magas rendje miatt szükség volt modellegyszerűsítésre, annak érdekében, hogy a szabályozás megtervezéséhez egy alacsony rendű modell álljon rendelkezésre. Ehhez egy modellegyszerűsítési módszert dolgoztam ki, amely koncentrált paraméterű dinamikus modellekre alkalmazható (3. fejezet).

Ezek után megbecsültem az egyszerűsített modell ismeretlen paramétereit. Majd az ily módon identifikált modellt validáltam független mérések segítségével. (4. fejezet).

Az értekezés második fő része a mechatronikus védőszelep modelljének dinamikus vizsgálatával és a nyomáskorlátozó szabályozó tervezésével foglalkozik.

A szabályozás tervezésének első lépése a modell alapvető dinamikus tulajdonságainak vizsgálata (5. fejezet). A szabályozás-tervezési feladat eredeti célkitűzésének vizsgálatával megállapítottam, hogy az általános

nyomáskorlátozási szabályozási feladat nem kauzális. Ezért további kiegészítő feltételezések segítségével alakítottam kauzálissá a feladatot.

A modell dinamikus vizsgálatának eredményei, a szabályozási célok és a beavatkozó jelre vonatkozó korlátozás figyelembevételével egy bang–bang típusú szabályozó struktúrát terveztem, amelyet optimalizáció segítségével hangoltam. A szabályozó minőségi és mennyiségi tulajdonságait számítógépes szimulációk segítségével értékeltem (6. fejezet).

2. A felhasznált eszközök és módszerek

A mechatronikus védőszelep *modelljének felállítása* egy irodalomból ismert, 7 lépésből álló szisztematikus modellezési módszer felhasználásával történt [4]. Ehhez a modellezés célját kell pontosan meghatározni, amely jelentősen befolyásolja a modell végleges alakját, felépítését. Koncentrált paraméterű dinamikus modellek felépítéséhez megmaradási elvekből származó differenciál egyenletekre van szükség, amelyek algebrai egyenletekkel kiegészítve különböző eljárásokkal megoldhatók. A modellezés kezdetén már bizonyos egyszerűsítő feltételezésekkel élhetünk, amelyek segítségével a modellezés célja szempontjából nem lényeges modell elemek elhagyhatók.

A szabályozástervezés céljára készített modellnek a valós rendszer minden jelentős dinamikai tulajdonságával rendelkeznie kell (ilyenek például a stabilitási tulajdonságok, vagy a rendszer fő időállandói), azonban ne tartalmazzon olyan viselkedést, amely az állapotváltozóknak elhanyagolható hatású, vagy nem kapcsolódik a szabályozási célokhoz.

Mivel a modellezés tárgya önmagában is *hibrid viselkedést mutat*, a kifejlesztett modell is hasonló tulajdonságokkal bír. A modell egyenletek felírását egy dedikált hibrid módban végeztem, a modellben található hibrid viselkedésű elemeket pedig külön tárgyaltam [1, 12].

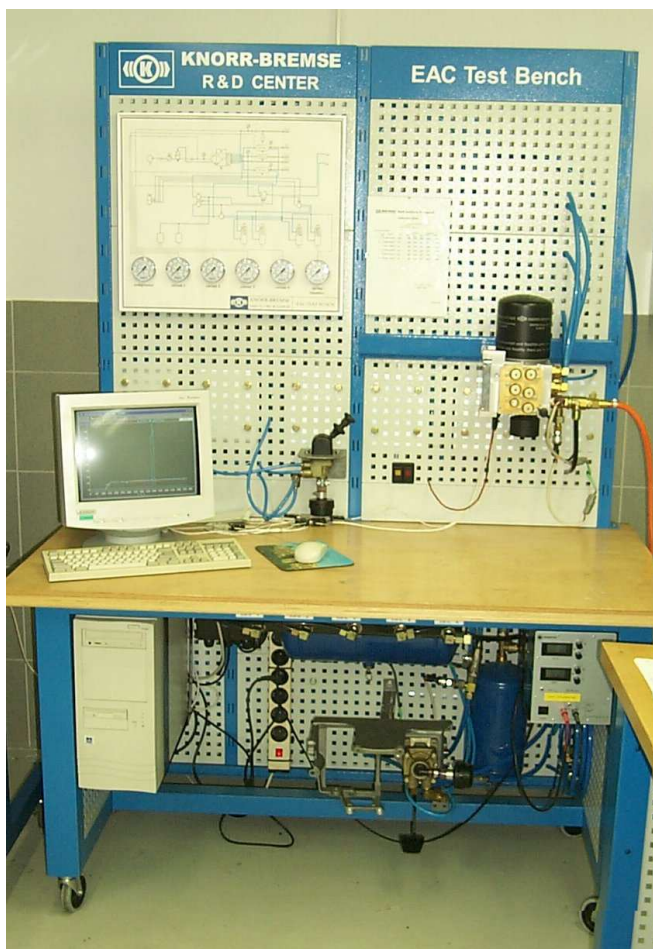
A modell szabványos állapotter alakban való felírásához az algebrai egyenletek differenciálegyenletekbe való behelyettesíthetőségét kell megvizsgálni. Ha azok mindegyike behelyettesíthető, akkor a modellezés végeredménye közönséges differenciálegyenletek formájában kapható meg, amelyek *nemlineáris input affin állapotter modellé* alakíthatók.

Az irodalomban többféle módszer található *dinamikus modellek egyszerűsítése* céljára, amelyek segítségével megfelelő méretű és komplexitású modell levezethető. E módszerek alapvetően az egyszerűsítés során alkalmazott mérnöki ismeretek alapján csoportosíthatók.

Az úgy nevezett *modellegyszerűsítés* a rendszer üzemeltetése során szerzett, fizikai jelentéssel bíró változóinak ismeretére, változási sebességére vonatkozó tapasztalataira alapozva egyszerűsíti, vagy elhagyja az állapotváltozók dinamikáját [4, 9]. Egy ilyen módszer került felhasználásra a mechatronikus védőszelep modelljének egyszerűsítésére.

Az egyszerűsített modell a modellépítés e fázisában még tartalmaz olyan paramétereket, amelyek értéke nem pontosan ismert. Ezek laboratóriumi

mérések felhasználásával megkaphatók [2, 10]. Erre a célra egy Knorr–Bremse elektronikus levegőelőkészítő rendszer került felszerelésre, amelyet a Knorr–Bremse budapesti kutatási–fejlesztési központjának laboratóriumi tesztpadján vizsgáltam (2. ábra).



2. ábra. A vizsgáló pad

A rendszer dinamikus vezérlését és az eredmények rögzítését mérőszámítógép segítségével végeztem. Az identifikáció során a rögzített jeleket a három kamra nyomása (bemeneti-, kimeneti- és vezérlő kamra), a mágnesszelep tekercsén folyó elektromos áram és a beavatkozó jelet képviselő kapcsolófeszültség alkotta. A vizsgált rendszer 23-as jelölésű fékkörében levő mechatronikus védőszelep volt az értekezésben tárgyalt modellezés és szabályozás-tervezés tárgya.

Mivel a mechatronikus védőszelep modellje az ismeretlen értékű paraméterekben nemlineáris, ezért e paraméterek az általános paraméter-

becslési feladat megoldásával kaphatók meg. Ez numerikus optimalizációs problémaként fogalmazható meg, amelyet a Nelder-Mead simplex keresési algoritmussal oldottam meg [11].

Végül a modell validálását végeztem el, amelyben az identifikált modell független mérésekhez viszonyított kimenetét értékeltem.

A modell *dinamikus tulajdonságai vizsgálatának* a szabályozás tervezése során nagy jelentősége van. A dinamikus analízis során vizsgált tulajdonságok a következők voltak: állapot irányíthatóság, állapot- és zavarás megfigyelhetőség, a bemenetek kimenetekhez viszonyított relatív foka, valamint a nyílt hurkú modell stabilitása. A fentiekén túl, mivel hibrid modellről van szó, a hibrid módok elérhetőségének vizsgálatára is szükség volt. Nemlineáris modellek esetén a dinamikus tulajdonságok jelentős eltérést mutathatnak az állapottér különböző tartományaiban [6].

A mechatronikus védőszelep modelljének bonyolult nemlineáris alakja miatt a megfigyelhetőségi és irányíthatósági tulajdonságokat *strukturális értelemben* vizsgáltam, azaz az adott tulajdonság bizonyos null méretű halmazok kivételével mindenhol érvényes. A *hibrid módok elérhetősége* és a bemeneti–kimeneti *relatív fok* gráfelméleti módszerek felhasználásával került kiértékelésre [4].

A nyitott rendszer *BIBO értelemben vett stabilitását* a kimenetek fizikai korlátainak értékelése, a *lokális lineáris aszimptotikus értelemben vett stabilitását* pedig a nyomáskorlátozó szabályozó jellemző munkapontjaiban kapott lineáris rendszer sajátértékeinek vizsgálata adta [3].

A szabályozási célok, a beavatkozó jelre vonatkozó korlátozások és a külső fogyasztásra vonatkozó feltételezések figyelembevételével egy *nemlineáris bang–bang szabályozó* került felhasználásra és hangolásra.

A szabályozó három fő részt tartalmaz: egy zavarás megfigyelőt (mivel a fő zavaró jel nem mérhető), egy fix programú zavarás előrecsatoló modult és egy modell prediktív visszacsatolást [5, 8].

A teljes modellezési folyamat és a szabályozó tervezése *MATLAB/Simulink környezetben* készült [13].

3. Új tudományos eredmények

Az értekezésben bemutatott új tudományos eredményeket az alábbi tézisek foglalják össze.

1. Tézis *Elkészítettem a mechatronikus védőszelep nemlineáris dinamikus modelljét* (2. fejezet) ([P1], [P2])

Megmutattam, hogy a mechatronikus védőszelep dinamikus matematikai modellje vegyes termodinamikai, mechanikai és elektro-mágneses rendszerként írható fel, valamint, hogy a modell a következő speciális tulajdonságokkal rendelkezik:

1. A mechatronikus védőszelep modellje nemlineáris differenciál-algebrai egyenletekkel adott. *A differenciál egyenleteket a gáz tömeg- és energia mérlegei, a mozgó alkatrészek impulzus mérlegei és a mágneses körre felírt tekeresfluxus megmaradási egyenletei alkotják.*
2. Megmutattam, hogy a 11 állapotváltozóval rendelkező *nemlineáris dinamikus modell felírható szabványos input affin alakban.*

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}).$$

3. A nemlineáris modell koordináta függvényei a következő tulajdonságúak:
 - (a) *Az $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ koordináta függvény függ a \mathbf{d} zavarás vektortól, valamint hibrid viselkedésű: $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r)$, ahol $r: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{N}$ egy tartományonként konstans kapcsoló függvény, amely az állapotot a következő véges egész halmazra képezi $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, 960\}$, \mathbf{x} pedig az állapot vektort jelöli.*
 - (b) *A $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ koordináta függvény affin kombinációja az állapotvektornak, azaz $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{b}$, ahol \mathbf{B} egy konstans mátrix és \mathbf{b} egy konstans vektor.*
 - (c) *A kimeneti egyenlet koordináta függvénye az alábbi alakú: $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{e}(\mathbf{d})$, ahol \mathbf{C} egy konstans mátrix és \mathbf{e} egy nemlineáris függvénye a \mathbf{d} zavarás vektornak.*

2. Tézis *Eljárást mutattam be a mechatronikus védőszelep modelljének egyszerűsítésére (3. fejezet) ([P3], [P4])*

Megállapítottam, hogy az általam javasolt szisztematikus modellegy-szerűsítési eljárás segítségével a mechatronikus védőszelep modellje szabályozás–tervezés céljára alacsonyabb rendűvé alakítható, s az így kapott modell az alábbiakkal jellemezhető:

1. *A modell megtartja input affin struktúráját az egyszerűsítés so-rán. Az állapotvektor dimenziója 11-ről 7-re csökken, a zavarás vektor dimenziója pedig 5-ről 3-ra.*
2. *Az egyenletek algebrai alakja jelentősen egyszerűsödik. Az \mathbf{f} ko-ordináta függvény hibrid módjait megadó $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, 960\}$ egész halmaz mérete jelentősen csökken: $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, 54\}$.*
3. *A bemeneti- és kimeneti vektorok nem változnak az egyszerűsítés során.*
4. *A modell minden visszamaradt változója (állapot-, bemeneti-, ki-meneti- és zavarás változó) megtartja fizikai jelentését, néhány modell paraméter azonban elveszti fizikai jelentését az egyszerű-sítés során.*

3. Tézis *Identifikáció segítségével meghatároztam a mechatronikus védő-szelep modelljének ismeretlen paramétereit (4. fejezet) ([P5], [P6])*

Az egyszerűsített modell ismeretlen paramétereinek becslése és a mo-dell validációja laboratóriumi mérések segítségével történt. Az iden-tifikációt az alábbi nem szokásos lépésekben végeztem:

1. *A modell paramétereinek érzékenységi vizsgálata révén kiválasz-tottam a dinamikus mérések segítségével becslendő paramétere-ket. A paraméter vektor így a következő öt tagból áll:*

$$\theta = [\alpha_{MV_{in}} \quad \alpha_{MV_{exh}} \quad \alpha_{PV} \quad R_{ML} \quad R_{MV}]^T.$$

Az utolsó tag (R_{MV}) ugyan független statikus mérésekkel is meg-határozható lenne, de jelentős időfüggő viselkedése miatt került be a becslendő paraméterek közé.

2. *Az öt paraméter egyike (R_{ML}) függvényében a modell nemlineáris, míg a többi függvényében lineáris. A paramétereket az általános paraméterbecslési feladat megoldásával, az L_2 norma és a simplex direkt kereséses optimalizációs módszer, valamint a folytonos idejű modell és a diszkrét idejű mérési adatok segítségével becsültem meg.*
3. *Az identifikált modellt független mérések segítségével validáltam. Ilymódon megmutattam, hogy a modell a szabályozás-tervezés céljára képes leírni a valós rendszer dinamikus viselkedését az előre definiált 10%-os hibahatáron belül.*
4. **Tézis** *Meghatároztam a nyomáskorlátozási szabályozási feladatot, valamint terveztem egy nemlineáris nyomáskorlátozó szabályozót a mechatronikus védőszelephez (6. fejezet) ([P7], [P8], [P9], [P10])*
 1. *A szabályozási feladat analízisével megállapítottam, hogy a mechatronikus védőszeleppel történő nyomáskorlátozási feladat nem kauzális tetszőleges külső légfogyasztásra, mint zavarásra nézve.*
 2. *Megmutattam, hogy a következő két, a légfogyasztásra vonatkozó feltételezéssel a feladat kauzálissá tehető:*
 - (a) *A külső légfogyasztás időben konstans értékű.*
 - (b) *A légyfogyasztás időtartama állandó.*
 3. *A fenti feltételezések, valamint a beavatkozó jelre vonatkozó korlátozások alapján egy nemlineáris bang–bang szabályozó struktúrát terveztem, amely egy zavarás megfigyelőt, egy fix programú zavarás előreccatoló modult és egy modell prediktív visszacsatolást tartalmaz. A zárt kör számítógépes szimulációi alapján bizonyítottam, hogy a szabályozás a következő tulajdonságokkal rendelkezik:*
 - (a) *A szabályozó teljesíti az előírt nyomástúllendülési és nyomáscsökkenési követelményeket.*
 - (b) *A szabályozott kimenet maradó hibája és a külső fogyasztás hatására létrejövő nyomáscsökkenés a fix programok intervallumának sűrítésével csökkenthető.*
 - (c) *A szabályozó teljesíti a mágnesszelep beavatkozásainak számára vonatkozó felső korlátozási követelményt.*

4. Az értekezés témakörében készült publikációk

Az értekezés témájában a következő konferencia- és folyóiratcikkek, illetve kutatási jelentések készültek (zárójelben a publikációhoz kapcsolódó **Tézis** szerepel):

- [P1] H. Németh, P. Ailer, and K. M. Hangos. Nonlinear hybrid model of a single protection valve for pneumatic brake systems. Technical Report SCL-002/2002, Computer and Automation Research Institute, Budapest, Hungary, 2002. <http://daedalus.scl.sztaki.hu>. (**1. Tézis**)
- [P2] H. Németh, P. Ailer, and K. M. Hangos. Nonlinear modelling and model verification of a single protection valve. *Periodica Polytechnica, Ser. Transportation Eng.*, 30(1–2):69–92, 2002. (**1. Tézis**)
- [P3] H. Németh, L. Palkovics, and K. M. Hangos. Model simplification of a single protection valve; a systematic approach. Technical Report SCL-004/2002, Computer and Automation Research Institute, Budapest, Hungary, 2002. <http://daedalus.scl.sztaki.hu>. (**2. Tézis**)
- [P4] H. Németh, L. Palkovics, and K. M. Hangos. Unified model simplification procedure applied to a single protection valve. *Control Engineering Practice*, 2004, Exeter, Devon, UK. Nyomdában. (**2. Tézis**)
- [P5] H. Németh, L. Palkovics, and K. M. Hangos. System identification of an electro-pneumatic protection valve. Technical Report SCL-001/2003, Computer and Automation Research Institute, Budapest, Hungary, 2003. <http://daedalus.scl.sztaki.hu>. (**3. Tézis**)
- [P6] H. Németh and K. M. Hangos. Elektro-pneumatikus védőszelep rendszeridentifikációja. *Gép*, 56(3–4):33–42, 2003. (**3. Tézis**)
- [P7] H. Németh, L. Palkovics, and J. Bokor. Electro-pneumatic protection valve with robust control for commercial vehicle air supply systems. In I. Kageyama, T. Fujioka, and T. Takahashi, editors, *6th International Symposium on Advanced Vehicle Control '02*, volume 1, pages 757–762, Hiroshima, Japan, Sept. 2002. Society of Automotive Engineers of Japan. (**4. Tézis**)

- [P8] H. Németh and K. M. Hangos. Nonlinear control of an electro-pneumatic protection valve for circuit pressure limiting. Technical Report SCL-005/2003, Computer and Automation Research Institute, Budapest, Hungary, 2003. <http://daedalus.scl.sztaki.hu>. (4. Tézis)
- [P9] H. Németh, L. Palkovics, and K. M. Hangos. Feedforward bang-bang control design for electro-pneumatic protection valves. *Periodica Polytechnica, Ser. Transportation Eng.*, 32(1–2):1–18, 2004. (4. Tézis)
- [P10] H. Németh, L. Palkovics, and K. M. Hangos. Feedforward Pressure Limiter Control for Mechatronic Air Management Systems. *7th International Symposium on Advanced Vehicle Control '04*, Arnhem, The Netherlands, Elfogadva. (4. Tézis)

5. Az értekezés témaköréhez részben kapcsolódó publikációk

- [O1] F. Varga, I. Wahl, and H. Németh. Definite project plan of electro-pneumatic braking, hardware-in-the-loop simulation model. Technical report, Department of Automobiles, Technical University of Budapest, 1997.
- [O2] F. Varga, L. Kádár, I. Wahl, and H. Németh. Kísérő Gépjármű Kifejlesztése. Technical report, Department of Automobiles, Technical University of Budapest, 1997.
- [O3] H. Németh. Hygrometric measurement and error estimation for electronic air treatment systems of commercial vehicles. *Járművek*, 11–12:315–318, 2001.
- [O4] B. Istók, J. Vad, Zs. Szabó, T. Gáspár, H. Németh, and G. Lóránt. On the resonance effects of pneumatic unloader valves. In *3rd International Fluid Power Conference*, volume 2, pages 581–592, Aachen, Germany, 2002.

6. Az eredmények hasznosítása

A mechatronikus védőszelep modellezésénél és paraméter becslésénél alkalmazott módszerek más, a haszonjárművek fékrendszereiben alkalmazott eltérő típusú és konstrukciójú elektro–pneumatikus szelepek esetén csekély módosítással alkalmazhatók. Azonban más konstrukciójú szelepek esetén megváltozhatnak a modellegyenletek, és azok száma is eltérő lehet.

Mindezekon túl a bemutatott módszerek lehetőséget adnak már meglévő elektro–pneumatikus szelepek szabályozási tulajdonságai javítási lehetőségeinek vizsgálatára. A mechatronikus védőszelep dinamikus modellje hatékony eszközt nyújt a szelep mechanikai kialakításának javításához is, amellyel a szabályozás dinamikus viselkedése tovább optimalizálható.

A kifejlesztett modellegyszerűsítési eljárás más koncentrált paraméterű modellek esetében is felhasználható. Ehhez el kell készíteni (i) az aktuális modell hierarchia diagramját, el kell végezni (ii) a modell paramétereinek érzékenységi vizsgálatát, amely rávilágít az egyszerűsíthető összetevőkre, valamint definiálni kell (iii) egy teljesítmény kritériumot, amelyet az adott modellezési cél határoz meg.

Hivatkozások

- [1] Krister Edström and Jan-Erik Strömberg. Modelling and simulation of hybrid systems. In *Preprints, Reglermöte*, pages 185–190. Reglermöte, Jun 1996.
- [2] R. Haber and L. Keviczky. *Nonlinear system identification–input-output modeling approach*, volume 1–2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
- [3] K. M. Hangos, J. Bokor, and G. Szederkényi. *Analysis and control of nonlinear process systems*. Springer-Verlag, 2003.
- [4] K.M. Hangos and I.T. Cameron. *Process Modelling and Model Analysis*. Academic Press, London, 2001.
- [5] S. Huang, K. K. Tan, and T. Heng. *Applied predictive control*. Springer Verlag, 2001.
- [6] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems*. Springer, Berlin, 1995.
- [7] R. Johansson and A. Rantzer. *Nonlinear and Hybrid Systems in Automotive Control*. Springer, London, 2003.
- [8] B. Lantos. *Irányítási Rendszerek Elmélete és Tervezése II., Korszerű szabályzási rendszerek*. Akadémiai Kiadó, 2003.
- [9] A. Leitold, K. M. Hangos, and Zs. Tuza. Structure simplification of dynamic process models. *Journal of Process Control*, 12/1:69–83, 2000.
- [10] L. Ljung. *System Identification – Theory for the User*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2nd edition, 1999.
- [11] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7(3):308–313, 1965.
- [12] Jan-Erik Strömberg, Ulf Söderman, and Jan Top. Conceptual modeling of hybrid systems. In *Proc. European Simulation Multiconference (ESM '94)*, pages 1095–1099, Barcelona, Jun 1994.
- [13] The MathWorks Inc., Natick, MA, USA. *Using MATLAB (v6.5)*, 2002.