

Úszódugattyús pneumatikus aktuátor Lineáris Változó Paraméterű szabályozása

Szabó Ádám* Bécsi Tamás**

*Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
(Tel: +36-1-382-9318, e-mail: szabo.adam@kjk.bme.hu)

**Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
(e-mail: becsi.tamas@kjk.bme.hu)

Kivonat: A cikkben egy úszódugattyús pneumatikus aktuátor modellezését és szabályozását mutatjuk be Lineáris Változó Paraméterű módszer alkalmazásával. Az aktuátor nemlineáris modelljéből kiindulva felírható egy 6 állapotot és 6 scheduling paramétert tartalmazó kvázi-Lineáris Változó Paraméterű modell, melyet mérnöki megfontolások alapján egyszerűsítettünk, hogy egy szabályozótervezésre hatékonyan felhasználható modellt kapjunk. Az így tervezett szabályozót szimulációs környezetben teszteltük, majd egy modell redukciós módszer használatával a megtervezett szabályozót tovább egyszerűsítettük, így alkalmassá téve azt beágyazott környezetben történő tesztelésre.

1. BEVEZETÉS

Pneumatikus aktuátorok szabályozására számos példát találhatunk a vonatkozó szakirodalomban, legyen szó akár lineáris, akár nemlineáris technikák alkalmazásáról. Ugyanakkor, az alkalmazott lineáris modellek legtöbb esetben a rendszer állapotaitól függenek, így Lineáris Paraméter Változó (LPV) módszerek alkalmazását is célszerű megfontolni.

LPV szabályozókat az utóbbi években egyre több területen alkalmaznak, például a járműiparban. (Gaspar, Szaszi, and Bokor 2004) egy aktív felfüggesztés modellezését és szabályozását mutatja be LPV módszer felhasználásával, míg (Poussot-Vassal et al. 2008) egy új szabályozási stratégiát ismertet fél-aktív felfüggesztések irányítására, ami az aktuátor limitációit a priori módon teljesíti. (Do, Sename, and Dugard 2010) a fél-aktív felfüggesztés modellezésére egy politóp LPV reprezentációt alkalmaz, melyet aztán egy H_∞ szabályozóval egészítenek ki, míg (Németh and Gáspár 2013) egy változtatható geometriájú felfüggesztés LPV szabályozását mutatja be.

LPV szabályozók szintén elterjedtek vezetéstámogató rendszerekben, például adaptív sebességszabályozó (ACC) (Németh et al. 2015), blokkolásgátló (ABS) kormányrendszerek (Németh 2019), valamint ezeknek az egységeknek az integrált szabályozása (Gáspár, Szabo, and Bokor 2011).

További alkalmazási példák tartalmaznak autópálya forgalmi modellezést (Luspay et al. 2011), szélturbina szabályozást (Inthamoussou et al. 2014), valamint belsőégésű motorok levegő-tüzelőanyag arányának szabályozása (Postma and Nagamune 2012).

Pneumatikus rendszerek LPV modellezéséről és szabályozásáról (Grof, Petres, and Gyevik 2009) és (Turcio, Yoneyama, and Moreira 2013) mutat példát. Előbbiben egy pneumatikus

pozicionáló rendszer politóp LPV modelljét írják fel, míg utóbbiban egy repülőgép pneumatikus alrendszerének kvázi-LPV (qLPV) szabályozását mutatja be.

A pneumatikus rendszerekre jellemző nemlinearitásokon (például sűrűdés, levegő összenyomhatósága) túl, a cikkben bemutatott munkahenger egy úszódugattyút tartalmaz, melynek mozgástartománya a henger egyik oldalára korlátozódik. Ez az úszódugattyú szélső helyzeténél található szomszédos, linearizált állapotter reprezentációk között egy egységugrás jellegű változást eredményez, melyet LPV reprezentáció felhasználásával szintén könnyedén kezelhető. A cikkben bemutatjuk egy úszódugattyús pneumatikus aktuátor qLPV modelljét, valamint annak pozíciószabályozását LPV- H_∞ módszer használatával.

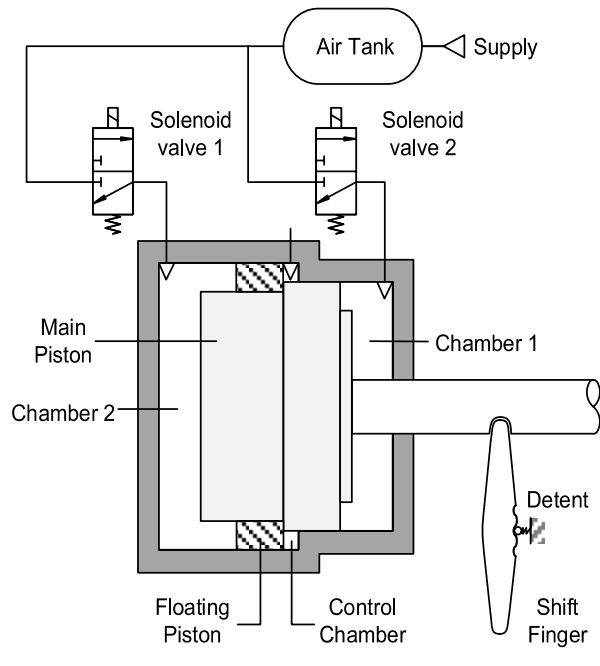
A cikk alapjául (Szabo, Bécsi, and Aradi 2020) szolgál, ugyanakkor annak eredményeit kibővítettük a valós rendszeren elvégzett mérésekkel, az ehhez szükséges szabályozó redukcióval, valamint az általánosított modellt és a szabályozási módszert módosítottuk.

A cikk felépítése a következő: a 2. fejezet bemutatja a vizsgált munkahengert, a 3. fejezetben az LPV szintézis kerül ismertetésre. A 4. a valós rendszeren elvégzett validációs tesztek eredményeit ismertetjük, míg az 5. fejezet a kutatás eredményeit foglalja össze.

2. AZ ÚSZÓDUGATTYÚS AKTUÁTOR BEMUTATÁSA

Az aktuátor egy automatizált, manuális sebességváltó működtetőegységének a része, azon belül is a H-séma szerinti váltó mozgás megvalósítása. Így három fix pozícióval rendelkezik, melyek a henger két végállása (a két fokozat), valamint egy köztes, a hengergeometria által kijelölt pozíció (üres állás), ami egybeesik az úszódugattyú mozgástartományának határával.

A munkahengert 3/2-es mágnesszelepekkel működtetjük, melyek a kamrákat aktív állapotban a tápnyomással, kikapcsolt állapotban pedig a környezettel kötik össze. Ennek megfelelően a kamrákat vagy tölteni, vagy üríteni tudjuk, konstans nyomás tartására a rendszer alkalmatlan. A hengeren belül három kamrát és két dugattyút különböztethetünk meg. A fődugattyút az 1. és 2. kamrák nyomásának változtatásával mozgatjuk a mágnesszelepeken keresztül. Az úszódugattyú feladata a felületarányok módosítása, ezáltal a fődugattyú pozíciószabályozásának a segítése. A kontroll kamra pneumatikus csillapításként működik a két dugattyú között. A fődugattyú végén található a kapcsolónyelv, mely a dugattyú



1. ábra Az elektro-pneumatikus aktuátor sematikus vázlatja

mozgásának hatására elfordul így mozgatva a váltórudazatot, azon keresztül pedig kapcsolva a kívánt fokozatot. A rendszer elvi felépítése az 1. ábrán látható.

3. LPV SZABÁLYOZÓ TERVEZÉS

A szabályozó feladata a kért fokozatváltás megvalósítása a fődugattyú pozíciójának szabályozásával. Ez összesen 4 különböző tesztet jelent, melyek az üres állás kapcsolása a két fokozatból (végállások), valamint az üres állás kapcsolása a fokozatokból. A munkahenger pozíciószabályozásán felül további minőségi kritériumoknak is meg kell felelni:

- Maximim 80ms fokozatkapcsolási idő
- Maximum 0.2m/s ütközési sebesség
- Maximum 1mm túlvés
- Maximum 6 szelepkapcsolás/fokozatkapcsolás
- Maximum 1kHz szabályozási és mérési frekvencia

3.1 LPV rendszerek bemutatása

LPV rendszerek alatt a nemlineáris rendszerek egy speciális csoportját értjük, melyeket olyan lineáris állapottér reprezentációk segítségével írhatunk le, melyek mátrixai időfüggő paramétereiktől függenek:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\rho(t)) & B(\rho(t)) \\ C(\rho(t)) & D(\rho(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Számos különböző módszer áll rendelkezésre az LPV rendszerek paraméterfüggésének leírására, melyek közül a grid pontokon alapuló felírást alkalmazzuk. Ezek előnye, hogy a rendszer paraméterfüggését implicit módon tartalmazzák, ezáltal bármilyen paraméter reprezentációt képesek kezelni. Ezáltal az úszódugattyú okozta diszkrét átmenet leírására is alkalmas. Ehhez Jacobi linearizálást alkalmazva a $\rho(t)$ paramétervektor által meghatározott rácsponatok mindegyikére meghatározunk egy lineáris időinvariáns állapottér modellt.

Az LPV rendszereket két csoportra oszthatjuk $\rho(t)$ elemei alapján. A vektor elemei lehetnek független paraméterek, ebben az esetben a rendszer viselkedése nem állandó, míg ha az állapotok függvénye, akkor a rendszer viselkedése nemlineáris. Utóbbiakat qLPV rendszereknek is nevezünk.

3.2 A munkahenger LPV modellje

Pneumatikus aktuátorok leírására az állapotvektor legtöbb esetben a kamranyomásokat, a dugattyú pozícióját és sebességét, esetleg gyorsulását tartalmazza. Ezek a modellek azonban nem veszik figyelembe a hőátvitel hatását. Annak érdekében, hogy a qLPV modell minnél pontosabban leírja a nemlineáris modellt, ki kell bővíteni az állapotvektort:

$$x = [p_{ch1} \ p_{ch2} \ m_{ch1} \ m_{ch2} \ v_{mp} \ x_{mp}]^T \quad (2)$$

ahol p a kamranyomást, m a kamrában lévő levegő tömegét, x a dugattyú pozíciót, v a dugattyú sebességét jelöli, míg $ch1$ és $ch2$ az 1. és 2. kamrára, mp a fődugattyúra utal.

A modellezés során meg kell találni az optimumot a modell pontossága, valamint számítási kapacitása között, emiatt mérnöki megfontolások mentén egyszerűsíteni kell a modellt. Az LPV modell ideális mágnesszelepeket feltételez, így $\rho(t)$ elemeinek a száma nagymértékben csökkenthető. A modell bemenetének a kamrák tömegáramait választjuk:

$$u = [\dot{m}_{ch1} \ \dot{m}_{ch2}]^T \quad (3)$$

A szabályozójel meghatározza a szükséges tömegáramot, majd azt egy kiegészítő logika diszkrétizálja és bináris szelepparancsokká alakítja.

A modell kimenetei:

$$y = x_{mp} \quad (4)$$

Mivel az aktuátor modell a bemenetre lineáris, az állapottér reprezentáció az alábbi módon írható fel:

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i \quad (5)$$

$$y = h(x) \quad (6)$$

Ahol f és h a rendszert leíró nemlineáris függvények, g_i az i . bemenetet figyelembe vevő lineáris függvény.

A rendszert leíró A és B mátrixokat a rendszer nemlineáris egyenleteiből (Szabo et al. 2018) vezetjük le Jacobi linearizálás segítségével, az alábbi egyszerűsítések figyelembevételével:

- Reteszelő szerkezet elhanyagolása
- Ütközések egyszerűsítése, a dugattyúk közötti kapcsolat leírása $\rho(t)$ segítségével
- Kontroll kamra elhanyagolása
- Coulomb súrlódás elhanyagolása

A rendszert leíró mátrixok az alábbi módon írhatók fel:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & a_{16} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & a_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$a_{11} = \frac{-\kappa_{air} A_{mp1} v_{mp}}{V_{ch1}(x)} \quad (8)$$

$$a_{15} = \frac{-\kappa_{air} A_{mp1}^2 v_{mp} p_{ch1} + k_{ht1} A_{ht1} A_{mp1} (T_{ch1} - T_{amb})}{V_{ch1}^2(x)} \quad (9)$$

$$a_{16} = \frac{-\kappa_{air} A_{mp1} p_{ch1}}{V_{ch1}(x)} \quad (10)$$

$$a_{22} = \frac{\kappa_{air} A_{mp2}(x) v_{mp}}{V_{ch2}(x)} \quad (11)$$

$$a_{25} = \frac{-\kappa_{air} A_{mp2}^2(x) v_{mp} p_{ch2} + k_{ht2} A_{ht2} A_{mp2}(x) (T_{ch2} - T_{amb})}{V_{ch2}^2(x)} \quad (12)$$

$$a_{26} = \frac{\kappa_{air} A_{mp1}(x) p_{ch2}}{V_{ch2}(x)} \quad (13)$$

$$a_{61} = \frac{A_{mp1}}{m_{mp}(x)} \quad (14)$$

$$a_{62} = \frac{-A_{mp2}(x)}{m_{mp}(x)} \quad (15)$$

$$a_{66} = \frac{-d_{mp}}{m_{mp}(x)} \quad (16)$$

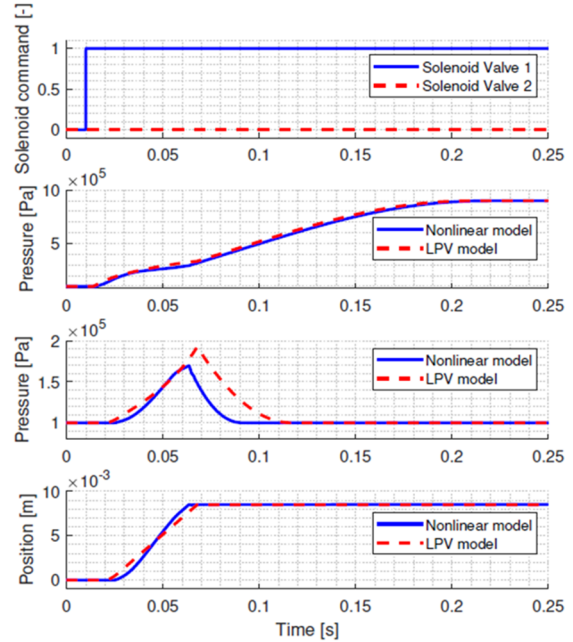
$$B = \begin{bmatrix} \frac{\kappa_{air} R_{air} T_{inw1}}{V_{ch1}(x)} & 0 \\ 0 & \frac{\kappa_{air} R_{air} T_{inw2}}{V_{ch2}(x)} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ahol κ_{air} az adiabatikus kitevő, k_{ht1} és A_{ht1} a hőátviteli kitevő és a hőátviteli felülete, R_{air} a gázspecifikus gázállandó, T_{inw} az áramló levegő hőmérséklete, V a kamra térfogata, d a viszkózus súrlódási tényező.

A rendszer viselkedését befolyásoló paraméterek A és B alapján az alábbiak:

$$\rho(t) = [p_{ch1} \ p_{ch2} \ A_{mp2} \ m_{mp} \ v_{mp} \ x_{mp} \ T_{inw1} \ T_{inw2}]^T \quad (18)$$

Az LPV modellt összehasonlítottuk a felírás alapjául szolgáló nemlineáris modellel. A felső végállás kapcsolását a 2. ábra szemlélteti. Az összehasonlítás alapján megállapítható, hogy a rendszer viselkedésének szimulációjára az LPV modell alkalmas, ugyanakkor a szabályozó tervezéséhez nem használható hatékonyan, ezért további egyszerűsítés szükséges.



2. ábra Az LPV modell validációja: üres állás – felső végállás

3.3 A egyszerűsített munkahenger qLPV modellje

Az egyszerűsítés célja, hogy a modell paraméterfüggését minimalizáljuk. Ennek leghatékonyabb módja a modell redukálása a mechanikai szakaszra. Ennek megfelelően az állapotter modell lényegesen egyszerűsödik:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-d_{mp}}{m_{mp}(x)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{A_{mp1}}{m_{mp}(x)} & \frac{-A_{mp2}(x)}{m_{mp}(x)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

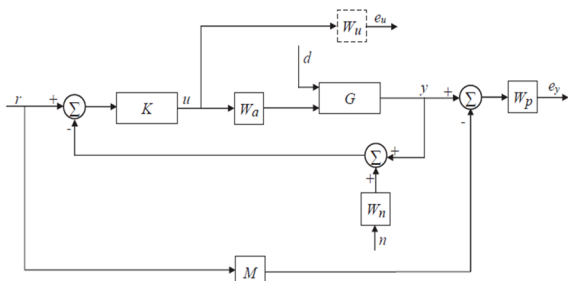
$$x = [v_{mp} \ x_{mp}]^T \quad (21)$$

$$u = [p_{ch1} \ p_{ch2}]^T \quad (22)$$

$$\rho(t) = [A_{mp2} \ m_{mp}]^T \quad (23)$$

Természetesen a termodinamikus szakasz a rendszer viselkedés és így a szabályozótervezés szempontjából sem elhanyagolható, ezért azt az általánosított modellben átviteli függvényekkel vesszük figyelembe. A zárt hurkú rendszer blokkdiagramját a 3. ábra tartalmazza.

A szabályozó (K) bemenete a referenciajel (r) és a rendszer kimenete (y) közötti különbség. A mérési zaj (n) és bemeneti zavarás (d) szintén része a rendszernek. A szabályozó feladata a két performancia kritériumot magába foglaló költség (W_p és W_u) minimalizálása. Az általánosított modell részei még az állapotter modell (G) és számos nemlinearitást, illetve modellezési bizonytalanságot leíró átviteli függvény.



3. ábra A zárt hurkú rendszer blokkdiagramja

A termodinamikai folyamatokat, valamint a szelepek dinamikáját W_a veszi figyelembe:

$$W_a(s) = \begin{bmatrix} p_{sup} & 0 \\ 0 & p_{sup} \end{bmatrix} \times \frac{1}{1.5e^{-4}s^2 + 3.84e^{-2}s + 1} \quad (24)$$

A szabályozójel súlyozására W_u általában egy felüláteresztő szűrő, ebben az esetben azonban nincs szükség frekvenciafüggő súlyozásra, így egységmátrixot alkalmazunk. A szenzorok jelentette bizonytalanságot W_n segítségével vehetjük figyelembe. A szenzorok általában pontosabbak alacsony frekvencián, ezért felüláteresztő szűrőket szokás használni:

$$W_n(s) = 1e^{-5} \times \frac{1e^{-1}s + 1}{1e^{-3}s + 1} \quad (25)$$

A performanciára vonatkozó követelményeket W_p tartalmazza. Rendszer jelkötésének kellően gyorsnak és pontosnak kell lennie, ugyanakkor a túllövést (és ütközési sebességet) is minimalizálni kell:

$$W_p(s) = 4e^3 \times \frac{0.4e^{-2}s + 1}{s + 1} \quad (26)$$

A referenciajel esetünkben egységugrás, ami folytonos jelkötésre nem alkalmas, ezért a performancia értékeléséhez célszerűbb egy ideális, elvárt viselkedéssel összehasonlítani a rendszer választát:

$$M(s) = \frac{1}{3.5e^{-5}s^2 + 1e^{-2}s + 1} \quad (27)$$

A termodinamikát figyelembe vevő tag pontatlanságait, például a pozíciótól való függését W_d segítségével írjuk le:

$$W_d(s) = \begin{bmatrix} 1e^4 & 0 \\ 0 & 1e^4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

A modell felírását követően következhet a szabályozó tervezés. Mivel a rendszer számos bizonytalan paramétert tartalmaz, a pozíciószabályozásra az LPV/ H_∞ szabályozót választottuk. A szabályozó megtervezéséhez Matlab Robust Control és LPVtools (Hjartarson, Seiler, and Packard 2015)

szoftvereket használunk. A szabályozótervezés lépései a következők:

1. $\rho(t)$ definiálása *pgrid* objektumként
2. A rendszert leíró mátrixok definiálása $\rho(t)$ segítségével
3. A grid alapú modell megalkotása a mátrixokból *ps* struktúrában
4. Az általánosított modell elkészítése a Robust Control toolbox *sysic* struktúráját használva
5. Szintézis az LPVtools *LPVsyn* függvényének segítségével

Az így megtervezett szabályozó szimulációs környezetben jó eredményeket adott, ugyanakkor mérete miatt meghaladta a rendelkezésre álló ECU kapacitását. A szabályozót, ami ebben az esetben önmagában is egy dinamikus rendszer, modell redukció segítségével tovább egyszerűsítettük.

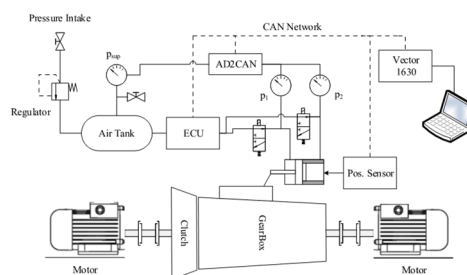
A szabályozótervezés utolsó lépése a folytonos jelek diszkrétizálása határérték segítségével.

4. A SZABÁLYOZÓ VALIDÁCIÓJA

4.1 A mérőrendszer bemutatása

A mérőrendszer sematikus vázlata a 4. ábrán látható. A rendszer központi eleme a sebességváltó, amelyet kardántengelyeken keresztül hajtanak a villanymotorok. A dugattyó pozícióját egy lézeres távolságmérő segítségével mérjük. Az aktuátor a sebességváltó tetején található az egységet vezérlő ECU-val együtt, mellyel CAN hálózaton keresztül kommunikálunk. A mérések elvégzéséhez Vector VN1630A mérőeszközt és CANape 14 szoftvert használunk.

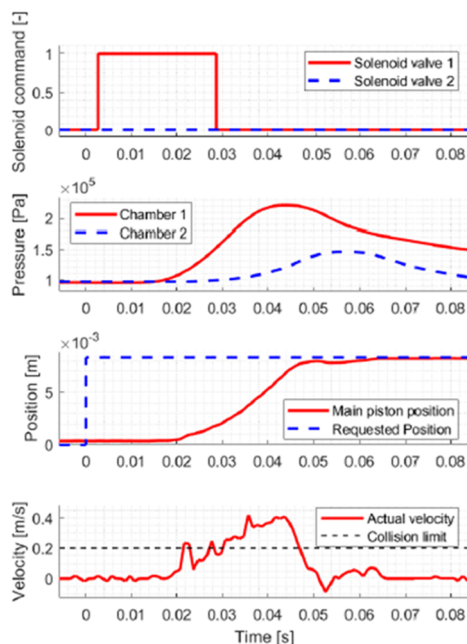
4.2 A mérési eredmények ismertetése



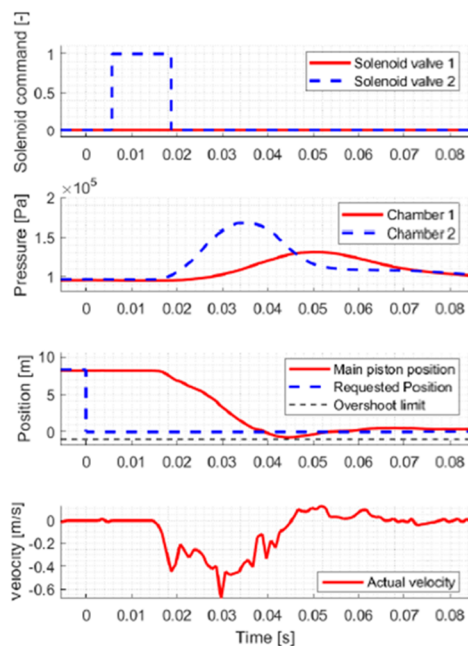
4. ábra A mérőrendszer bemutatása

A szabályozó első lépésben egy szimulációs környezetben lett tesztelve, valamint a kezdeti hangolások is itt történtek. A meghatározott paraméterekkel a valós rendszeren is sikeres volt a fokozatkapcsolás, ugyanakkor a minőségi követelmények teljesítésének érdekében a diszkrétizációs logikát finomhangolni kellett. A 4 tesztesetet az 5-8. ábrákon látható, valamint azokat az 1. táblázat foglalja össze. A teszteseteket $9bar$ tápnyomáson végeztük. Az ábrákon az 1. diagram a szelepparancsokat, a 2. diagram a kamranyomásokat, a 3. diagram a dugattyú pozícióját, a 4. diagram pedig annak sebességét ábrázolja.

Az 5. ábrán a felső végállás kapcsolása látható. A fokozatkapcsolás kb. 45ms alatt megtörténik, az ezt követő mozgás a rendszerben található mechanikai illesztések, bizonytalanságok hatása.



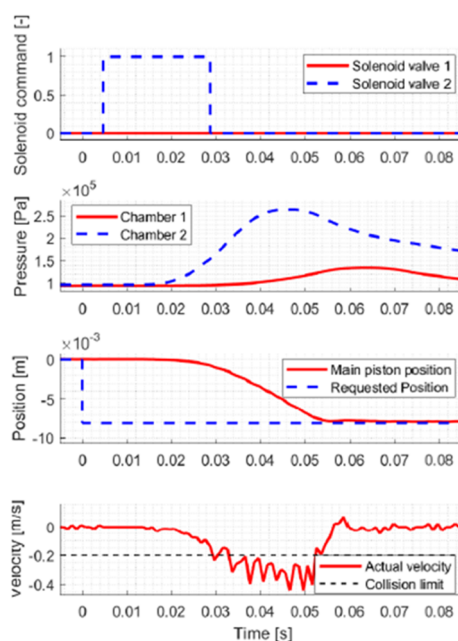
5. ábra Üres állás – felső végállás (N2H) kapcsolása



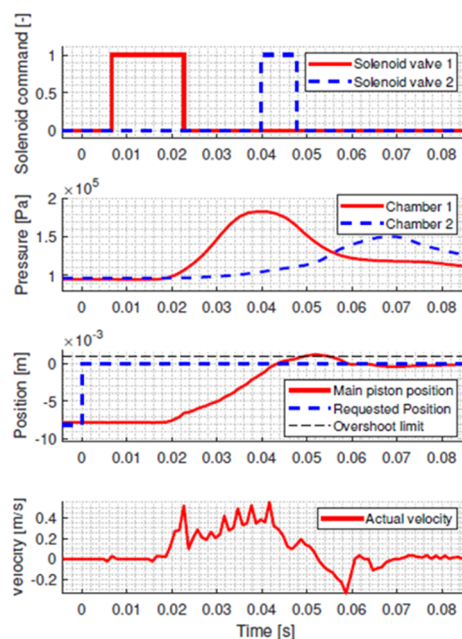
6. ábra Felső végállás – üres állás (H2N) kapcsolása

A 6. ábrán az a felső végállásból való kiváltás látható. Az LPV alapú szabályozó kis mértékben túllő ugyan, de a lassú sebesség miatt a reteszelő szerkezet képes még a megengedett túllövésen belül megállítani a mozgást.

A 7. ábrán az alsó végállás kapcsolása látható, ahol hasonlóan a felső végállás kapcsolásához. Az LPV szabályozó egy szelepkapcsolással, alacsony ütközési sebességgel kapcsolja a kívánt fokozatot.



7. ábra Üres állás – alsó végállás (N2L) kapcsolása



8. ábra Alsó végállás – üres állás (L2N) kapcsolása

A 8. ábrán az alsó végállásból üresbe kapcsolás látható. Az üres álláshoz közelítve a szabályozó a nagy sebesség miatt megpróbálja az ellenoldali szelep kapcsolásával megállítani a dugattyút, ugyanakkor a rendszerben lévő holtidő miatt kis mértékben megszegi a túllövésre meghatározott limitet.

1. táblázat A szabályozó performanciája

	N2H	H2N	N2L	L2N
Váltási idő [ms]	51	52	52	59
Túllövés [mm]	0.04	-	0.07	-
Ütközési sebesség [m/s]	-	0.7	-	1.15
Szelepkapcsolás [db]	1	1	1	2

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatunk egy elektro-pneumatikus munkahenger LPV modelljét. Ezt követően az abból levezetett, egyszerűsített qLPV modellt felhasználva megtervezünk egy LPV/H ∞ szabályozót, amit a valós rendszeren validáltunk.

A szabályozótervezés során az ECU jelentette korlátok miatt számos egyszerűsítést kellett alkalmazni, azonban egy kivétellel így is teljesíti a vele szemben támasztott minőségi követelményeket.

IRODALOM

- Do, Anh-Lam, Olivier Sename, and Luc Dugard. 2010. "An LPV Control Approach for Semi-Active Suspension Control with Actuator Constraints." In *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 4653–58. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531069>.
- Gáspár, Péter, Zoltan Szabo, and József Bokor. 2011. "LPV Design of Adaptive Integrated Control for Road Vehicles."
- Gaspar, Peter, Istvan Szaszi, and Jozsef Bokor. 2004. "Active Suspension Design Using LPV Control." *IFAC Proceedings Volumes* 37 (22): 565–70. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)30403-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)30403-2).
- Grof, Patricia, Zoltan Petres, and Janos Gyevik. 2009. "Polytopic Model Reconstruction of a Pneumatic Positioning System." In *2009 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, 61–66. <https://doi.org/10.1109/SACI.2009.5136213>.
- Hjartarson, Arnar, Peter Seiler, and Andrew Packard. 2015. "LPVTools: A Toolbox for Modeling, Analysis, and Synthesis of Parameter Varying Control Systems**This Work Was Supported by a NASA Small Business Innovation Research Contract from NASA Armstrong Flight Research Center, Contract #NNX12CA14C. Contract Monitor Is Dr. Martin J. Bren-Ner." *IFAC-PapersOnLine* 48 (26): 139–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.127>.
- Inthamoussou, Fernando A, Fernando D Bianchi, Hernán De Battista, and Ricardo J Mantz. 2014. "LPV Wind Turbine Control With Anti-Windup Features Covering the Complete Wind Speed Range." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 29 (1): 259–66. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2294212>.
- Luspay, Tamás, Balázs Kulcsár, Jan-Willem van Wingerden, Michel Verhaegen, and József Bokor. 2011. "Linear Parameter Varying Identification of Freeway Traffic Models." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19 (1): 31–45. <https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2063705>.
- Németh, Balázs. 2019. "Robust LPV Design with Neural Network for the Steering Control of Autonomous Vehicles." In *2019 18th European Control Conference (ECC)*, 4134–39. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795979>.
- Németh, Balázs, and Péter Gáspár. 2013. "Control Design of Variable-Geometry Suspension Considering the Construction System." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 62 (8): 4104–9. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2263156>.
- Németh, Balázs, Péter Gáspár, Rodolfo Orjuela, and Michel Basset. 2015. "LPV-Based Control Design of an Adaptive Cruise Control System for Road Vehicles." *IFAC-PapersOnLine* 48 (14): 62–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.434>.
- Postma, Marius, and Ryoza Nagamune. 2012. "Air-Fuel Ratio Control of Spark Ignition Engines Using a Switching LPV Controller." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20 (5): 1175–87. <https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2163937>.
- Poussot-Vassal, C, O Sename, L Dugard, P Gáspár, Z Szabó, and J Bokor. 2008. "A New Semi-Active Suspension Control Strategy through LPV Technique." *Control Engineering Practice* 16 (12): 1519–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.002>.
- Szabo, Adam, Tamas Becsi, and Szilard Aradi. 2020. "Linear Parameter-Varying Control of a Floating Piston Electro-Pneumatic Actuator." In *2020 IEEE 24th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 115–20. <https://doi.org/10.1109/INES49302.2020.9147127>.
- Szabo, Adam, Tamas Becsi, Peter Gaspar, and Szilard Aradi. 2018. "Control Oriented Modeling of an Electro-Pneumatic Gearbox Actuator." In *2018 European Control Conference, ECC 2018*. <https://doi.org/10.23919/ECC.2018.8550589>.
- Turcio, Wallace, Takashi Yoneyama, and Fernando Moreira. 2013. "Quasi-LPV Gain-Scheduling Control of a Nonlinear Aircraft Pneumatic System." In *21st Mediterranean Conference on Control and Automation*, 341–50. <https://doi.org/10.1109/MED.2013.6608744>.