

Elektro-pneumatikus váltóműködtető szabályozójának tervezése

Szabó Ádám*, Bécsi Tamás*,
Gáspár Péter,*Aradi Szilárd*

*Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
(e-mail: szabo.adam, becsi.tamas, gaspar.peter, aradi.szilard@mail.bme.hu)

Kivonat: A cikkben egy nehéz haszongépjármű elektro-pneumatikus sebességváltó működtetőjének modell alapú szabályozását mutatjuk be. Az elektro-pneumatikus rendszerek számos előnnyel rendelkeznek, ugyanakkor nemlineáris viselkedésük miatt nehezen szabályozhatók. Annak érdekében, hogy a nemlineáris rendszert hagyományos, lineáris módszerekkel szabályozhassuk, felírjuk a rendszer linearizált, többállapotú állapotter reprezentációját. Ezt követően az előzetes összehasonlítás alapján kiválasztott szabályozókat megtervezük, majd azokat Model-In-the-Loop környezetben teszteljük, és az eredményeket összehasonlítjuk.

1. BEVEZETÉS

A pneumatikus munkahengerek az összesűrített levegő energiáját használják fel lineáris mozgás előállítására, valamint erőátvitelre. A pneumatikus és elektro-pneumatikus aktuátorok által működtetett rendszereket széles körben használják az iparban, főként a robottechnika és automatizálás területén [1]. Ezek a rendszerek kevésbé hőmérsékletfüggők, mint az hidraulikus aktuátorok, ahol a munkaközegből kilépő folyadékok összegyűjtése további feladat. Továbbá a pneumatikus működtetésű rendszerek nagyobb fajlagos teljesítménysűrűséggel és fajlagosan kisebb tömeggel rendelkeznek, mint az egyenértékű mechanikus aktuátorok.

A modern, robottechnika-hoz kötődő kutatások jelentős része, többek közt [2], [3] és [4] a pneumatikus izmok modellezésével és irányításával foglalkozik, mivel azok ígéretesen felhasználhatók olyan alkalmazások során, ahol robotok és emberek közötti együttműködésre van szükség, míg a járműparhoz köthető kutatások az egyszeres és kettős működtetésű munkahengerekkel foglalkoznak. Ilyen rendszereket használnak kipufogógáz visszavezető rendszerekben, légfékekben [5], turbófeltöltőkben [6], valamint kuplung [7] és váltóműködtetőkben [8]. Számos előnyük ellenére azonban ezek az eszközök a nemlineáris tulajdonságaik miatt nehezen irányíthatók [9].

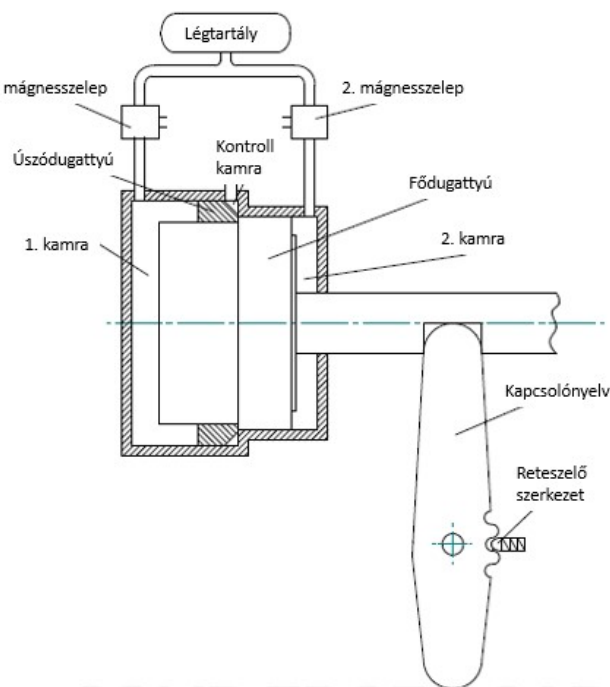
A szakirodalomban leggyakrabban javasolt irányítási módok közé tartozik a kaskád PID szabályozó [10], a lineáris kvadratikus szabályozó [8], a csúszómód szabályozás [11], valamint a H_∞ szabályozó [12]. Használhatók továbbá különböző fuzzy-logika alapú módszerek [13], adaptív szabályozók [14] és neurális hálón alapuló szabályozók is [15], [16] és [17].

A cikk célja, hogy bemutassa egy elektro-pneumatikus váltóműködtető rendszer pozíciószabályozásának tervezését és egy olyan szabályozási stratégia meghatározását, ami a

működtetőegységgel szemben megfogalmazott követelményrendszernek megfelel.

2. A PNEUMATIKUS VÁLTÓMŰKÖDTETŐ BEMUTATÁSA

A modellezett munkahenger (1. ábra) egy nehéz haszongépjármű automatizált mechanikus sebességváltójában található, ahol a H-séma szerinti „kapcsoló” mozgást végzi. A munkahengerek működtetése 3/2-es mágnesszelepek segítségével történik, melyek húzott állapotban a táplevegőt juttatják a kamrába, míg elengedett állapotban a kamrában lévő levegő a szelepeken keresztül a környezetbe távozik.



1. ábra A váltóműködtető egység sematikus vázlat

A fokozatok kapcsolása a fődugattyú mozgásával valósul meg, ennek megfelelően három kitüntetett pozícióval rendelkezik, melyek a két kapcsolható fokozat, tehát az alsó és felső végállás (L és H), valamint az üres állás (N). A fődugattyú elmozdulásakor elfordítja a hozzá csatlakozó kapcsolónyelvet, amely kétkarú emelőként működve a váltórudazaton keresztül elmozdítja a kapcsolóhüvelyt, ezáltal kapcsolva a kívánt fokozatot. Az úszódugattyú feladata a fődugattyú mozgásának segítése a felület ideiglenes megnövelésével.

A hengerben három különböző térrészt különböztetünk meg, ezek a fődugattyú két oldalán található kamrák (1. és 2. kamra), melyek mindegyikéhez egy mágnesszelep csatlakozik, valamint a két dugattyú között elhelyezkedő, kis térfogatú, úgynevezett kontrollkamra. A fokozatok kapcsolása az 1. és 2. kamra töltésével történik, az 1. kamrát töltve a felső végállás, a 2. kamrát töltve az alsó végállás valósítható meg, míg a váltó üres állása a két kamra egyidejű töltésével érhető el.

3. AZ ÁLLAPOTTÉR-REPREZENTÁCIÓ FELÍRÁSA

A nemlineáris rendszer lineáris szabályozási módszerekkel történő irányításához szükséges egy linearizált, többállapotú állapotter reprezentáció felírása. Mivel a rendszer a bemenő jelre lineáris a reprezentáció felírható az alábbi módon:

$$\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, \underline{d}, r) + \sum_{i=1}^m g_i(\underline{x}, \underline{d}, r) u_i \quad (1)$$

$$\underline{y} = h(\underline{x}, \underline{d}, \underline{u}, r) \quad (2)$$

Az állapotmátrixok linearizálás segítségével felírhatók:

$$A = \left. \frac{\delta f(\underline{x}, \underline{d}, r)}{\delta \underline{x}} \right|_{\substack{\underline{x}=\underline{x}_0 \\ \underline{u}=\underline{u}_0}}, \quad B = [g_1 \ g_2] \quad (3)$$

$$C = \left. \frac{\delta h(\underline{x}, \underline{d}, \underline{u}, r)}{\delta \underline{x}} \right|_{\substack{\underline{x}=\underline{x}_0 \\ \underline{u}=\underline{u}_0}}, \quad D = \left. \frac{\delta h(\underline{x}, \underline{d}, \underline{u}, r)}{\delta \underline{u}} \right|_{\underline{x}=\underline{x}_0} \quad (4)$$

A cikkben nem részletezett, tesztkörnyezetként szolgáló nemlineáris modell [18] a szabályozás során kezelhetetlen mennyiségű hibrid állapotot tartalmaz, így ezeknek lehetőség szerinti egyszerűsítése szükséges:

- A mágnesszelep modellek helyettesítése tömegáramokkal
- A reteszelő szerkezet elhanyagolása
- A kontakterők elhanyagolása
- A kontroll karma nyomásváltozásának figyelmen kívül hagyása
- A Coulomb-súrlódás elhanyagolása
- A hőcsere elhanyagolása

A fenti egyszerűsítések felhasználásával az állapotter reprezentáció hibrid állapotainak a számát sikerült nyolcra

redukálni, amelyek között a fődugattyú pozíció és a mágnesszelep parancsok alapján válthatunk.

Az így felírt állapotter reprezentáció állapotvektorai az alábbiak:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} p_{ch1} \\ p_{ch2} \\ x_{mp} \\ v_{mp} \end{bmatrix}, \underline{y} = \begin{bmatrix} p_{ch1} \\ p_{ch2} \\ x_{mp} \end{bmatrix}, \underline{u} = \begin{bmatrix} \tilde{m}_{ch1} \\ \tilde{m}_{ch2} \end{bmatrix}, \underline{d} = \begin{bmatrix} P_{amb} \\ T_{amb} \\ P_{sup} \\ T_{sup} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ahol p a nyomás, m a tömeget, T a hőmérsékletet, x a pozíciót jelöli, míg amb a környezeti, sup a táprendszer, $ch1$ az 1. karma, $ch2$ a 2. kamra és mp a fődugattyú paramétereire utal.

Az állapotter-reprezentáció pedig az alábbiak szerint írható fel, ahol f, g_1, g_2 és h vektorok $\underline{x}, \underline{d}$ és a hibrid állapot függvényei.

$$f = \begin{bmatrix} -\kappa_{air} p_{ch1} \dot{V}_{ch1} \\ V_{ch1} \\ -\kappa_{air} p_{ch2} \dot{V}_{ch2} \\ V_{ch2} \\ v_{mp} \\ \Sigma F_p - d_h v_{mp} \\ m_{mp} + m_{fp} \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} p_{ch1} \\ p_{ch2} \\ x_{mp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$g_1 = \begin{bmatrix} \kappa_{air} R_{air} T_{inw1} \\ V_{ch1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, g_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \kappa_{air} R_{air} T_{inw2} \\ V_{ch2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ahol κ az adiabatikus kitevőt, R a gázspecifikus gázállandót, F az erőt, d a viszkozus súrlódási együtthatót, v a sebességet jelöli, míg air a levegő, inw az áramló levegő, fp az úszódugattyú paramétereire utal.

4. SZABÁLYOZÓTERVEZÉS

4.1 Szabályozási célok

Az alkalmazható pozíciószabályozók meghatározásához először szükséges a szabályozási célok, a szabályozóval szembeni lehetséges követelmények meghatározása. A munkahenger feladata a 2. fejezetben ismertetettek szerint adott fokozat bekapcsolása, vagy a fokozatból való kiváltás megvalósítása. Ehhez több, egymásnak ellentmondó követelménynek kell megfelelni, melyek az alábbiak:

- A referencijel követése
- A kapcsolás megvalósítása legfeljebb 80ms alatt
- Fokozatkapcsoláskor az ütközés sebességének korlátozása (maximum 0,2m/s)
- Üres állás kapcsolásakor a túllendülés minimalizálása (maximum 1mm)
- A szelepkapcsolások számának minimalizálása (legfeljebb 6 darab)

A járműdinamika és menetkomfort szempontjából az az előnyös, ha a vonóerő-szakadás minél rövidebb ideig tart, vagyis a fokozatváltást gyorsan, minél rövidebb idő alatt tudjuk végrehajtani, mely viszonylag magas működtető erővel biztosítható. Ugyanakkor a túl nagy erővel történő felütközés csökkenti a szerkezet élettartamát, valamint ronthatja a menetkomfortot. A két követelmény közötti kompromisszum megvalósításának egy lehetséges módja a dugattyú mozgásának két szakaszra bontása. Az első szakaszban a dugattyú felgyorsítása a feladat, ezáltal minimalizálva a kapcsolási időt, míg a második szakaszban a dugattyú mozgását lassítva a felütközés sebessége csökkenthető.

A szelepkapcsolások számának minimalizálása a szabályozási feladatot jelentősen megnehezíti, mivel az alkalmazott 3/2-es mágnesszelepek nyomástartásra nem alkalmasak, így adott kamranyomás tartása csak bizonyos sávon belül, folyamatos mágnesszelep működtetéssel lehetséges. Ez viszont a szerkezet élettartamát rövidítené le jelentős mértékben. A tapasztalatok alapján valószínűsíthető, hogy a szelepkapcsolások számának alakulása nagyobb mértékben a mágnesszelep parancsok mintavételezési idejétől függ, az alkalmazott szabályozó paramétereinek a hatása ennél lényegesen kisebb.

4.1 Szabályozási módszerek kiválasztása

Szakirodalom alapján az alábbi módszerek lehetnek alkalmasak a rendszer pozíciószabályozására:

- Nyílt hurkú irányítás (OL)
- PID szabályozó (PID)
- Lineáris kvadratikus szabályozó (LQ)
- Csúszómód szabályozó (SMC)
- H-∞ szabályozó (Hinf)
- Modell prediktív szabályozó (MPC)

A rendszer tulajdonságainak ismeretében, valamint a szabályozási célokat felbontva a dugattyúpozíció mentén megállapítható, hogy az elkészített szabályozónak képesnek kell lennie a hibrid állapotok kezelésére. Ez megvalósítható egyrészt a komplex szabályozóalgoritmusok alkalmazásával, másrészt kevésbé összetett szabályozókból felépített többállapotú szabályozó, tehát „Switching Control” használatával.

1. táblázat Az alkalmazható szabályozók előzetes összehasonlítása

	PID	LQ	SM	MP	Hinf	OL
DoI	4	3	2	2	1	5
CC	4	3	2	3	1	5
GCL	4	3	1	1	1	5
S	2	3	5	3	5	1

P	2	4	5	4	5	1
Összesen	36	35	31	28	27	39

A felsorolt irányítási módszereket összehasonlítását az 1. táblázat tartalmazza, az implementálás nehézsége (DoI), számítási kapacitásigény (CC), generált kódhossz (GCL), stabilitás (S) és performancia (P) szempontjából. Az egyes szempontok szerint az osztályzatok 1-5 alakulnak, ahol 1 az adott szempont szerinti legrosszabb, míg 5 a legjobb értékelés. Ezt követően az egyes szempontokat súlyoztuk, hiszen a későbbiekben a fejlesztett szabályozóknak beágyazott környezetben is működniük kell majd, így az ezekhez kapcsolódó szempontok lettek figyelembevéve a legnagyobb súllyal, míg az implementálás nehézsége a legkisebbel.

Az 1. táblázat alapján az alábbi módszerek kerültek kiválasztásra:

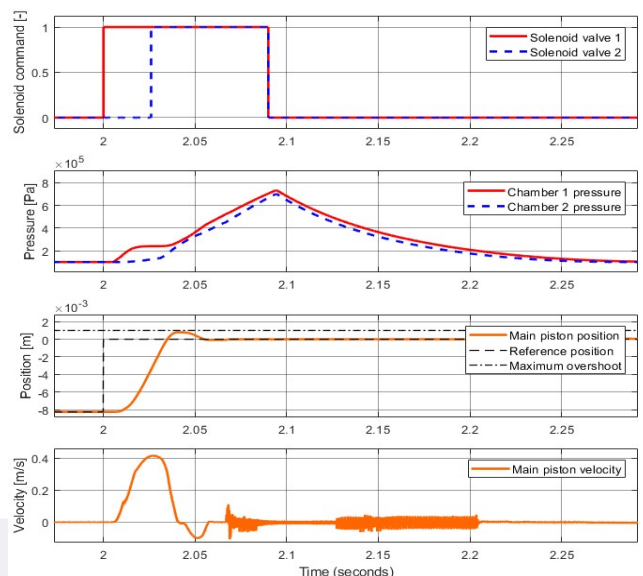
- Nyílt hurkú irányítás (OL)
- PID szabályozó (PID)
- Lineáris kvadratikus szabályozó (LQ)

Az implementált szabályozókat Model In the Loop környezetben teszteltük. A szabályozójelek a mágnesszelep parancsok, míg a mért jelek a fődugattyú pozíciója, sebessége és a kamranyomások. A szabályozó 1ms lépésközben, míg a modell 0,001ms lépésközben fut.

4.2 Nyílt hurkú irányítás

Nyílt hurkú irányítás esetén az irányítójel egy a referenciajel függvényében előre meghatározott mágnesszelep szekvencia. A mágnesszelep szekvenciákat előzetes tesztelés során határoztuk meg a következő elvek figyelembevételével:

- Fokozat kapcsolása esetén az ütközés sebességének csökkentése az ellenoldali kamra kismértékű feltöltésével
- Üres állás kapcsolása a két kamra egyidejű



2. ábra Nyílt-hurkú irányítás: Alsó végállás – Üres állás kapcsolása

töltésével

A négyből három fokozatkapcsolás megvalósítható a fenti megfontolások alkalmazásával, míg az Alsó végállás – Üres állás kapcsolása esetén a közel azonos dugattyúfelületek miatt célszerű a 2. kamra töltését kis mértékben csökkenteni, így a dugattyúfelületek arányaiból eredő lassulás kompenzálható. Ezt az esetet mutatja a 2. ábra.

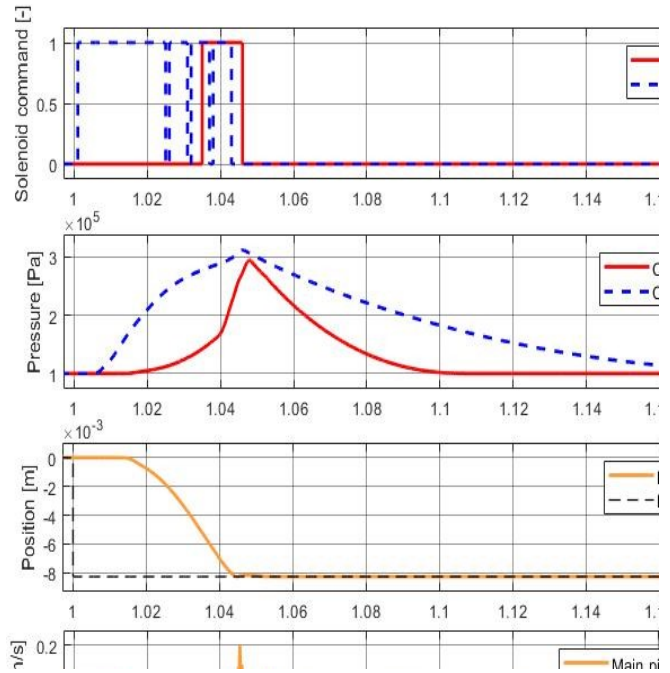
A szabályozók performanciáit bemutató ábrákon az 1. diagram a mágnesszelep parancsokat, a 2. diagram a kamranyomásokat, a 3. diagram a fődugattyú pozícióját, míg a 4. diagram a fődugattyú sebességét ábrázolja. A nyílt hurkú irányítással megvalósított működtetésű eredményeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat A nyílt-hurkú irányítás performanciái

Nyílt-hurkú irányítás	N2L	L2N	N2H	H2N
Szimulációs idő [s]	23,71			
Fokozatkapcsolási idő [ms]	63	58	70	63
Ütközési sebesség [m/s]	0,194	-	0,177	-
Túllövés [mm]	-	0,78	-	0
Szelepekt. száma [db]	2	2	2	2

4.3 PID szabályozó

A rendszer szabályozását először egy PID szabályozókból álló „Switching Control” alkalmazásával valósítottuk meg, ugyanakkor a rendszer tulajdonságait és a szabályozási célokat vizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy az integráló tag használata ebben az esetben nem célszerű. Az integráló tag feladata alapvetően az állandósult hiba megszüntetése és a felfutó szakasz gyorsítása, ezzel egyidejűleg azonban növeli a rendszer túllövését, valamint rontja annak stabilitását.



3. ábra PID szabályozó: Üres állás – Alsó végállás kapcsolása

Fokozat kapcsolása során az állandósult hiba megszüntetésére nincs szükség, hiszen a henger falán felütközve a reteszelő szerkezet rögzíti a dugattyút, így a jel állandósult hibája integráló tag nélkül is nulla. Üres állás esetén a túllövés növelése és a stabilitás csökkentése jelentősen megnöveli a fokozatkapcsolás idejét, miközben az állandósult hiba megszüntetésére a reteszelő szerkezet ebben az esetben is alkalmas. Mindemellett az integráló-tag által biztosított további dinamikára sincs szükség.

A PID szabályozó működésére (Üres állás – Alsó végállás kapcsolása) a 3. ábra mutat példát. Ameddig a pozíciójel hibája egy bizonyos érték alatt marad, addig a szabályozó nem avatkozik közbe, ebben az esetben a reteszelő szerkezet feladata megszüntetni a hibát. Négy P és D paraméter párt használunk a referencijel függvényében. A szabályozó algoritmus utolsó lépése a szabályozó kimenetének átkonvertálása mágnesszelep parancsokká. Alapvetően a szabályozójel előjelétől függően aktiváljuk az 1. vagy a 2. mágnesszelepet, ugyanakkor a 0 körüli kellően kis sávban egyik szelepet se aktiváljuk, ezáltal csökkenthető a szabályozó érzékenysége. Hogy megakadályozzuk a feleslegesen nagymennyiségű szelepektíválást, a legrövidebb kiadható mágnesszelepparancs hossza 5ms. A PID szabályozó performanciáját a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A PID szabályozó performanciái

PID szabályozó	N2L	L2N	N2H	H2N
Szimulációs idő [s]	25,33			
Fokozatkapcsolási idő [ms]	44	49	59	56
Ütközési sebesség [m/s]	0,179	-	0,162	-
Túllövés [mm]	-	0,36	-	0,99
Szelepekt. száma [db]	5	4	3	6

4.4 Lineáris kvadratikus szabályozó

A lineáris kvadratikus szabályozó esetén a cikkben bemutatott állapotér modell alapján meghatározhatók a szükséges állapotmátrixok, majd a súlymátrixok felírását követően számítható az erősítési mátrix. Az optimális erősítési mátrix felhasználásával meghatározható a mágnesszelepek szükséges tömegárama.

4. táblázat A lineáris kvadratikus szabályozó performanciái

LQ szabályozó	N2L	L2N	N2H	H2N
Szimulációs idő [s]	35,37			
Fokozatkapcsolási idő [ms]	54	300	57	200
Ütközési sebesség [m/s]	0,169	-	0,160	-
Túllövés [mm]	-	2,56	-	2,25
Szelepakt. száma [db]	1	1	1	1

Mivel a 3/2 mágnesszelepek pontos tömegáramérték tartását nem teszik lehetővé, ezért ha a szükséges tömegáram értéke meghalad egy előre meghatározott értéket, akkor kapcsoljuk a szelepeket. A PID szabályozó működésére (Üres állás – Felső végállás kapcsolása) a 4. ábra mutat példát.

A lineáris kvadratikus szabályozó performanciáját a 4. táblázat tartalmazza.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

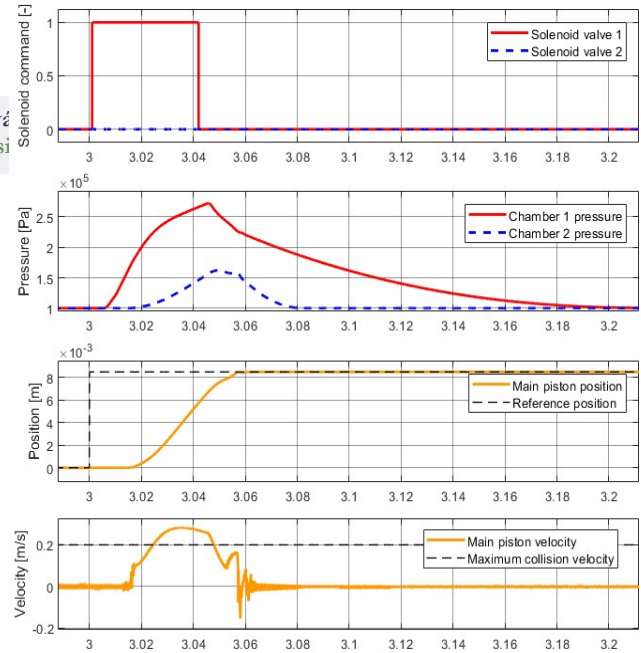
A cikkben bemutatunk három különböző pozíciószabályozót, valamint azok alkalmazását egy pneumatikus váltóműködtetőn. Az elkészített szabályozókat Model-In-the-Loop környezetben teszteltük, majd azok performanciáit összehasonlítottuk a megadott szabályozási célok alapján.

A nyílt-hurkú irányítás az összes esetben megfelelt a feltételeknek, ugyanakkor jelen helyzetben nem kellően robusztus, nem tud alkalmazkodni a környezeti és táprendszer paramétereinek változásához, valamint a várttól eltért működés (például valamilyen hiba miatti lassabb mozgás) esetén nem képes korrigálni.

A PD szabályozó szintén megfelelt az összes feltételnek, gyorsabb fokozatkapcsolást tesz lehetővé, mint a nyílt-hurkú szabályozó, ugyanakkor a szelepkapcsolások száma ennél a szabályozónál a legmagasabb, ami hátrányos a várható élettartam szempontjából.

A lineáris kvadratikus szabályozó rendelkezik a legnagyobb számításigénnyel, valamint nem képes teljesíteni a követelményeket üres állás kapcsolása esetén. Ennek oka kereshető egyrészt az állapotér reprezentáció egyszerűsítéseiben, másrészt abban, hogy az üres állás éppen két hibrid állapot határán fekszik.

Az eredmények alapján két javaslatot tehetünk a megfelelő szabályozóval kapcsolatban. Az első javaslat a nyílt-hurkú irányítás és a lineáris kvadratikus szabályozó kombinálása,



4. ábra Lineáris kvadratikus szabályozó: Üres állás – Felső végállás kapcsolása

egyesítve mindkét módszer előnyeit, a második pedig a lineáris kvadratikus szabályozó továbbfejlesztése, például a reteszelő mechanizmus figyelembevételével az állapotér reprezentációban.

A későbbi kutatások során megvizsgáljuk a szinkronizáló szerkezetek kapcsolhatósági tulajdonságait, valamint a szinkronizálás folyamatát, majd a nemlineáris modellt kiegészítjük egy szinkronizáló szerkezet modellel. Aminek célja egy olyan szinkronizálási stratégia kidolgozása, amivel a fokozatkapcsolás során a szinkronizáló szerkezet terhelése csökkenthető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetség gondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A cikk megírását a Magyar Autóműszaki Felsőoktatásért Alapítvány támogatta.

IRODALOM

- [1] D. Saravanakumar, B. Mohan és T. Muthuramalingam, „A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems,” *Precision Engineering*, %1. kötet49, %1. számSupplement C, pp. 481-492, 2017.
- [2] M. D. Doumit és S. Pardoel, „Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, %1. kötet91, %1. számSupplement C, pp. 93-110, 2017.
- [3] A. Hosovsky, J. Pitel, K. Zidek, M. Tothova, J. Sarosi és L. Cveticanin, „Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles,” *Mechanism and Machine Theory*, %1. kötet103, %1. számSupplement C, pp. 98-116, 2016.
- [4] M. Oliver-Salazar, D. Szwedowicz-Wasik, A. Blanco-Ortega, F. Aguilar-Acevedo és R. Ruiz-González,

- „Characterization of pneumatic muscles and their use for the position control of a mechatronic finger,” *Mechatronics*, %1. kötet42, %1. számSupplement C, pp. 25-40, 2017.
- [5] P. Karthikeyan, C. S. Chaitanya, J. N. Raju és S. C. Subramanian, „Modelling an electropneumatic brake system for commercial vehicles,” *IET Electrical Systems in Transportation*, %1. kötet1, %1. szám1, pp. 41- 48, 2011.
- [6] A. Mehmood, S. Laghrouche és E. M. Bagdouri, „Modeling identification and simulation of pneumatic actuator for vgt system,” *Sensors and Actuators A: Physical*, %1. kötet165, %1. szám2, pp. 367-378, 2011.
- [7] B. Szimandl és H. Németh, „Dynamic hybrid model of an electro-pneumatic clutch system,” *Mechatronics*, %1. kötet23, %1. szám1, pp. 21-36, 2013.
- [8] B. Szimandl és H. Németh, „Closed loop control of an electro-pneumatic gearbox actuator,” in *2009 European Control Conference*, Budapest, 2009.
- [9] E. Palomares, A. Nieto, A. Morales, J. Chicharro és P. Pintado, „Dynamic behaviour of pneumatic linear actuators,” *Mechatronics*, %1. kötet45, %1. számSupplement C, pp. 37-48, 2017.
- [10] A. Saleem, B. Taha, T. Tutunji és A. Al-Qaisia, „Identification and cascade control of servo-pneumatic system using particle swarm optimization,” *Simulation modelling Practice and Theory*, %1. kötet52, %1. számSupplement C, pp. 164-179, 2015.
- [11] B. Szimandl és H. Németh, „Sliding mode position control of an electro-pneumatic clutch system,” *IFAC Proceedings Volumes*, %1. kötet46, %1. szám2, pp. 707-712, 2013.
- [12] B. Szimandl és H. Németh, „Robust servo control design for an electro-pneumatic clutch system using the H_{∞} method,” in *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, Senigallia, 2014.
- [13] T. Nuchkrua és T. Leephakpreeda, „Fuzzy self-tuning pid control of hydrogen-driven pneumatic artificial muscle actuator,” *Journal of Bionic Engineering*, %1. kötet10, %1. szám3, pp. 329-340, 2013.
- [14] T. Y. Liu, T. T. Kung, M. K. Chang és Y. S. Chen, „Observer-based adaptive sliding mode control for pneumatic servo system,” *Precision Engineering*, %1. kötet37, %1. szám3, pp. 522-530, 2013.
- [15] C. J. Chiang és Y. C. Chen, „Neural network fuzzy sliding mode control of pneumatic muscle actuators,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, %1. kötet65, %1. számSupplement C, pp. 68-86, 2017.
- [16] N. N. Son, C. V. Kien és H. P. H. Anh, „A novel adaptive feed-feedforward-pid controller of a scara parallel robot using pneumatic artificial muscle actuator based on neural network and modified differential evolution algorithm,” *Robotics and Autonomous Systems*, %1. kötet96, %1. számSupplement C, pp. 65-80, 2017.
- [17] L. XiaoJun, Z. ChengRui, L. HongBin és W. XinLiang, „Electronic pneumatic clutch control of the heavy truck based on neural network pid,” in *2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2006.
- [18] Á. Szabó, T. Bécsi, P. Gáspár és S. Aradi, „Control oriented modeling of an electro-pneumatic gearbox actuator,” in *European Control Conference*, Submitted, 2017.