

## Elektro-pneumatikus munkahenger állapotbecslése

Szabó Ádám, Bécsi Tamás

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

Kivonat: A cikkben két állapotbecslő algoritmust, egy Kálmán szűrőt és egy kiterjesztett Kálmán-szűrőt ismertetünk, melyekkel egy pneumatikus munkahenger kamranyomásai meghatározhatók szenzorok alkalmazása nélkül. Az elkészített állapotbecslőket laboratóriumi mérések segítségével validáltuk, majd megmutattuk, hogy kellően nagy számítási kapacitás esetén mindkét algoritmus jól használható és hasonló pontossággal rendelkeznek. Ugyanakkor beágyazott rendszerekben, ahol a számítási kapacitás és a megvalósítható lépésköz korlátozott a Kálmán-szűrő nem minden esetben képes kezelni a rendszer nemlineáris viselkedését. A validációs eredmények alapján további javaslatokat tettünk, melyekkel a becslés pontossága tovább javítható.

### 1. BEVEZETÉS

Pneumatikus rendszereket számos ipari alkalmazásban megtalálunk, ahol erőátvitelre és pontos pozíció szabályozásra van szükség (Saravanakumar, et al., 2017). A járműiparhoz kötődő kutatások többnyire az egy- és kétoldali munkahengerekre fókuszálnak, melyek számos rendszerben használhatók, például légfék rendszerek (Karthikeyan, et al., 2011) és elektro-pneumatikus kuplung rendszerek (Szimandl & Németh, 2013) működtetésére, míg a legújabb, robotikához kötődő kutatások a pneumatikus mesterséges izmok modellezésével és irányításával foglalkoznak, például (Doumit & Pardoel, 2017), (Hošovský, et al., 2016) és (Oliver-Salazar, et al., 2017).

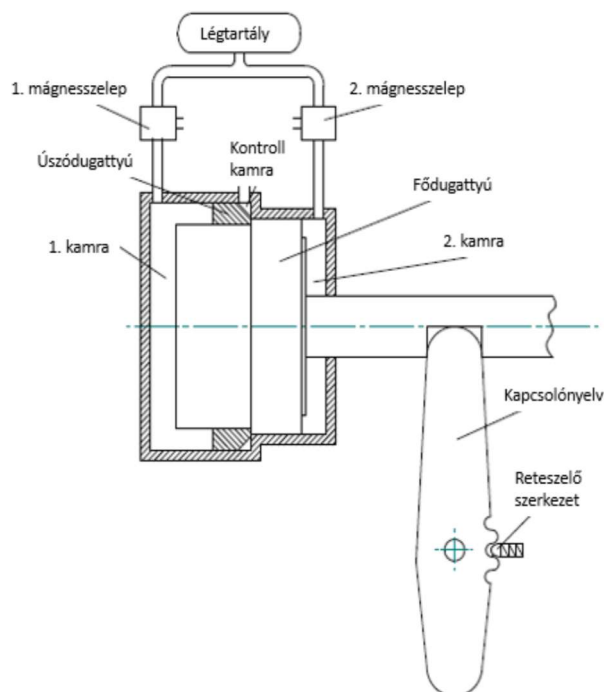
A pneumatikus rendszerek számos előnnyel rendelkeznek hidraulikus és elektro-mechanikus aktuátorokhoz képest, ugyanakkor nemlineáris tulajdonságuk miatt nehezen szabályozhatók. Pozíciószabályozás esetén a minél pontosabb jelkövetés biztosításához szükséges a kamranyomás ismerete, ugyanakkor a termékfejlesztési folyamat egyik fő szempontja a termék árának minimumon tartása, ezért szenzorok alkalmazása nem praktikus. A fenti szempontokat figyelembe véve logikus választás állapotbecslő alkalmazása, például (Gulati & Barth, 2005), (Ramezani & Baghestan, 2019) and (Turkseven & Ueda, 2017).

A kutatás célja, hogy bemutassa két nyomásbecslő tervezését, valamint azok validálását és összehasonlítását.

A cikk felépítése a következő: a 2. fejezet bemutatja a vizsgált rendszert, a 3. fejezet az állapotbecslők felépítését és a validáció eredményeit tartalmazza, a 4. fejezet összefoglalja a kutatás eredményeit.

### 2. A PNEUMATIKUS AKTUÁTOR BEMUTATÁSA

A vizsgált munkahenger egy nehéz haszongépjármű automatizált manuális, fokozatonként szinkronizált sebességváltójában található, feladata a H-séma szerinti kapcsoló mozgás megvalósítása. Ennek megfelelően három rögzített pozícióval rendelkezik. A henger két végállása felel



1. ábra Az elektro-pneumatikus aktuátor sematikus vázlata

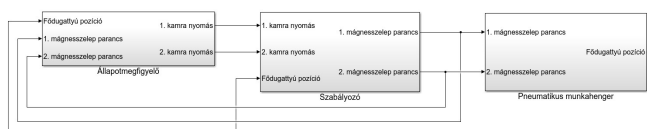
meg a két fokozatnak, illetve a henger közepén található az üres állásnak megfelelő pozíció.

A hengert két 3/2-es mágnesszeleppel működtetjük, melyek a kamrákat aktív állapotban a tápnyomással, eleresztett állapotban pedig a környezettel kötik össze. A hengeren belül három kamrát és két dugattyút különböztethetünk meg. A mágnesszelepek az 1. és 2. kamrához csatlakoznak, a fődugattyú mozgását ennek a két kamrának a töltésével és ürítésével lehet mozgatni a hengeren belül. Az úszódugattyú feladata a felületarányok módosítása, ezáltal a fődugattyú pozíciószabályozásának segítése, míg a kontroll kamra egy pneumatikus csillapításként működik a két dugattyú között. A fődugattyú végén található a kapcsolónyelv, mely a dugattyú lineáris mozgásának hatására elfordul ezáltal mozgatva a váltórudazatot, bekapcsolva a kívánt fokozatot. A rendszer elvi felépítése az 1. ábrán látható.

A rendszernek szintén a része egy pozíciószenzor, mely a fődugattyú tengelyének az elmozdulását méri, valamint a validációs mérések során az 1. és 2. kamrát is nyomásszenzorokkal láttuk el.

### 3. ÁLLAPOTMEGFIGYELŐ TERVEZÉS

A rendszer pontos szabályozásához a kamranyomásokra a pozíciószabályozáshoz szükség van, valamint szinkronizálás során a működtetőerő ismerete szintén szükséges, mely a kamranyomásokból számítható, Mivel a rendszer árának minimalizálása miatt szenzorok alkalmazása nem jöhet szóba, így állapotmegfigyelők alkalmazásával kell meghatározni azokat. A megfigyelővel kiegészített szabályozási kör felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra A szabályozási kör felépítése

Ebben a cikkben a megtervezett állapotmegfigyelőket mutatjuk be, míg a teljes szabályozási kör elkészítése egy jövőbeni kutatás témája. A megtervezett állapotbecslőkkel szembeni követelmény, hogy a becslés hibájának négyzetes középértéke (RMS) 5% alatt maradjon

Először egy Kálmán-szűrőt terveztünk, ami a rendszernek egy lineáris állapotter reprezentációján alapul, majd egy kiterjesztett Kálmán-szűrőt is felépítettünk, amihez egy korábbi kutatás (Szabó, et al., 2018) során felírt nemlineáris egyenleteket vettük alapul. A kovariancia mátrixokat a nemlineáris egyenleteket tartalmazó modell pontossága, valamint a szenzorok pontosságát alapul véve írtuk fel.

#### 3.1 A mérés bemutatása

A méréshez használt aktuátort 9,5bar tápnyomáshoz csatlakoztattuk és közvetlen mágnesszelep parancsokkal működtettük. A mérés során az alábbi jeleket rögzítettük:

- Tápnyomás
- 1. mágnesszelep parancs
- 2. mágnesszelep parancs
- 1. kamra nyomás
- 2. kamra nyomás
- Fődugattyú pozíció

A nyomásokat 2ms lépésközzel, míg a mágnesszelep parancsokat és a pozíciót 5ms lépésközzel rögzítettük. A különböző lépésközök alkalmazására a CAN csatorna kapacitása miatt volt szükség.

A mérések során négy tesztet vizsgáltunk a munkahenger valós üzemiállapotainak megfelelően, melyek a következők: Üres állás – Felső végállás, Felső végállás – Üres állás, Üres állás – Alsó végállás, Alsó végállás – Üres állás. A cikk további részében az utóbbi két tesztet eredményeiket mutatjuk be részletesen.

#### 3.2 Kálmán-szűrő

A Kálmán-szűrő (KF) algoritmust két lépésre bonthatjuk: első lépésben elvégzi a jelenlegi állapotváltozók becslését, majd második lépésben súlyozza a becslést a jelenlegi időlépésre vonatkozó mérési adatokkal.

A Kálmán-szűrő által használt állapotter reprezentáció vektorai az alábbiak:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} p_{ch1} \\ p_{ch2} \\ m_{ch1} \\ m_{ch2} \\ x_{mp} \\ v_{mp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{y} = [x_{mp}] \quad (2)$$

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{ch1} \\ \dot{m}_{ch2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ahol  $p$  a nyomás,  $m$  a tömeget,  $x$  a pozíciót,  $v$  a sebességet,  $\dot{m}$  a tömegáramot jelöli, míg  $ch1$  az 1. kamra,  $ch2$  a 2. kamra és  $mp$  a fődugattyú paramétereire utal.

A rendszer állapotmátrixai nem függetlenek a rendszer állapotaitól és a bemenetektől, a fődugattyú pozíciója és a tömegáramok alapján 8 különböző kombináció lehetséges. A mátrixok egy lehetséges felírása:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & a_{16} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & a_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\underline{\underline{B}} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\underline{\underline{C}} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (6)$$

$$\underline{\underline{D}} = [0 \ 0] \quad (7)$$

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

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

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

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

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

$$a_{26} = \frac{-\kappa_{air} A_{mp2} p_{ch2}}{V_{ch2}} \quad (13)$$

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

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

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

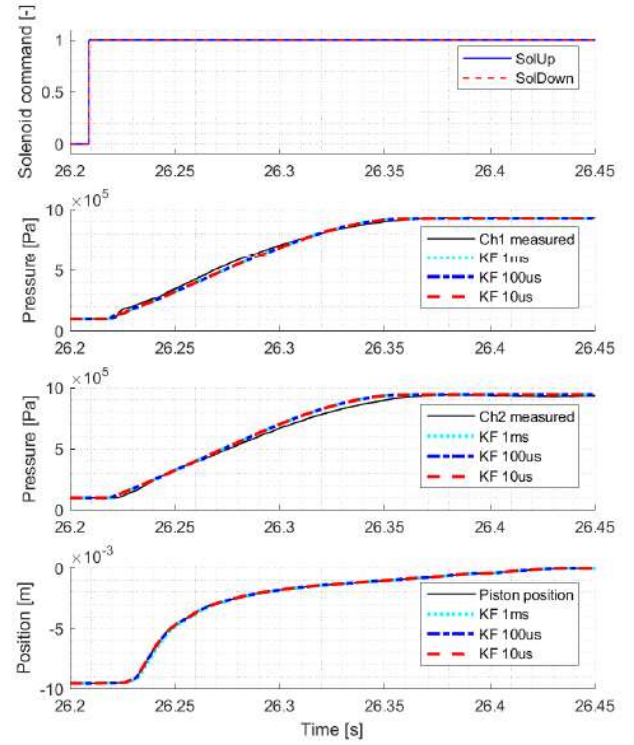
$$b_{11} = \frac{\kappa_{air} R_{air} T_{sup}}{V_{ch1}} \quad (17)$$

$$b_{22} = \frac{\kappa_{air} R_{air} T_{sup}}{V_{ch1}} \quad (18)$$

ahol  $\kappa_{air}$  az adiabatikus kitevőt,  $A$  a felületet,  $V$  a térfogatot,  $T$  a hőmérsékletet,  $d_f$  a viszkózus sűrűdési együtthatót jelöli. míg  $ht$  a hőcserére utal.

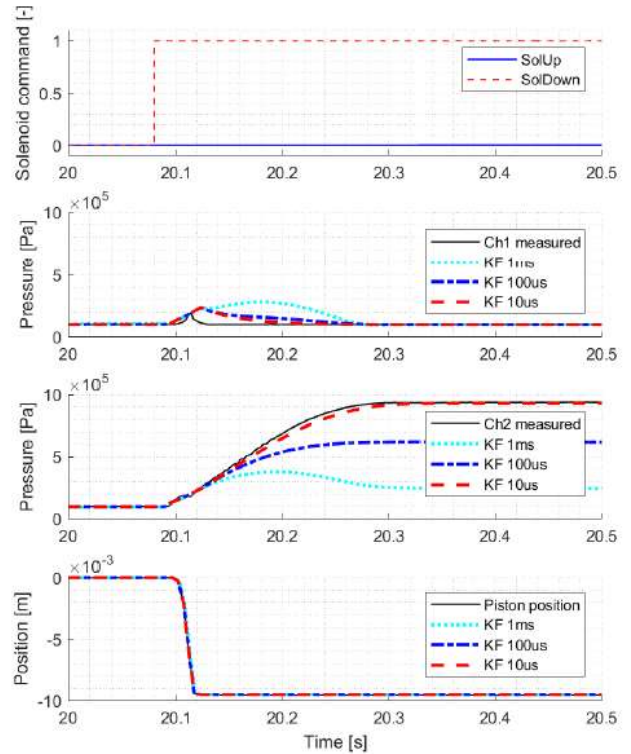
A 3. ábrán az Alsó végállás – Üres állás kapcsolás validációja látható. A validációt bemutató ábrákat az alábbiak szerint kell értelmezni: az 1. diagram a mágnesszelep parancsokat, a 2. diagram az 1. kamra nyomását, a 3. diagram a 2. kamra nyomását, a 4. diagram pedig a fő dugattyú pozícióját ábrázolja. Az egyes jelölések magyarázata a következő: az első diagramon SolUp és SolDown az 1. és 2. mágnesszelep parancsokat jelölik, a második, harmadik és negyedik diagramon pedig az adott mennyiség mért értéke, valamint az 1ms, 0.1ms és 0.01ms mintavételi idővel becsült értéke látható.

A felírt állapotér reprezentáció a rendszer viselkedését folytonos időben írja le, ezért első lépésként diszkrétizálni kellett. Először 0.01ms lépésközt használtunk, hogy megvizsgáljuk az állapotbecslő viselkedését, majd a lépésközt egészen 1ms-ig növeltük, ami egy jellemző lépésköz beágyazott környezetben. Mivel a mérés és a becslés által használt lépésköz nem egyezik, a mért jelet interpolálni kellett.



3. ábra Kálmán-szűrő: Alsó végállás – Üres állás kapcsolása

A 3. ábrán láthatjuk, hogy a Kálmán-szűrő pontossága szinte független az alkalmazott lépésköztől és nagy pontossággal képes megbecsülni a kamranyomásokat.

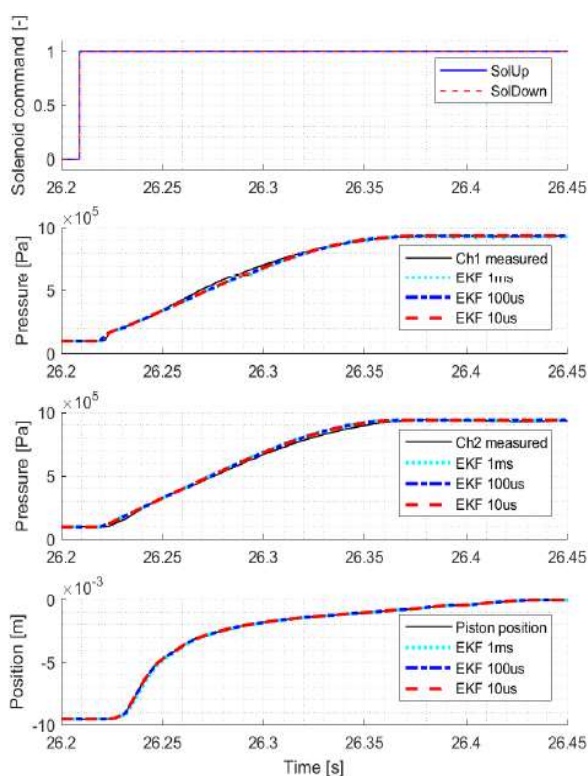


4. ábra Kálmán szűrő: Üres állás – Alsó végállás kapcsolása

A 4. ábrán az Üres állás – Alsó végállás kapcsolás validációja látható. A 2. diagram alapján megállapítható, hogy a sebességet és azon keresztül a térfogatváltozást a munkát az energiaegyenletben túlbecsüljük, hiszen ebben az esetben a nyomásnövekedést az 1. kamrában csak a lecsökkenő térfogat okozza. Továbbá a becsléshez használt modell a kontakterőket nem tartalmazza, így a becsült sebesség a megállás pillanatát követően még nem nulla, ezért a térfogatváltozás által előidézett nyomásnövekedés időben tovább tart. A 3. diagram alapján láthatjuk, hogy a sebességbecslés hibája ellenére 0.01ms lépésköz esetén a becsülő elfogadható eredményt ad, ugyanakkor ahogy elkezdjük növelni a lépésközt a becslés hibája is nagymértékben megnövekszik. A 4. diagramon a pozícióbecslés ettől függetlenül pontos, hiszen a mérés súlya az átlagolás során lényegesen magasabb, mint a becslésé.

### 3.3 Kiterjesztett Kálmán-szűrő

A kiterjesztett Kálmán-szűrő felépítését tekintve megegyezik a hagyományos Kálmán-szűrővel, tehát itt is található egy becslési és egy korrekciós fázis. A különbség, hogy az EKF nemlineáris egyenleteket használ a becslési fázisban, így esetünkben jobb eredményeket várhatunk tőle. Az Alsó végállás – Üres állás kapcsolás az 5. ábrán látható. A becsülő ebben az esetben jól működik és a vártak megfelelően pontosabb becslést szolgáltat, mint a hagyományos Kálmán-szűrő.

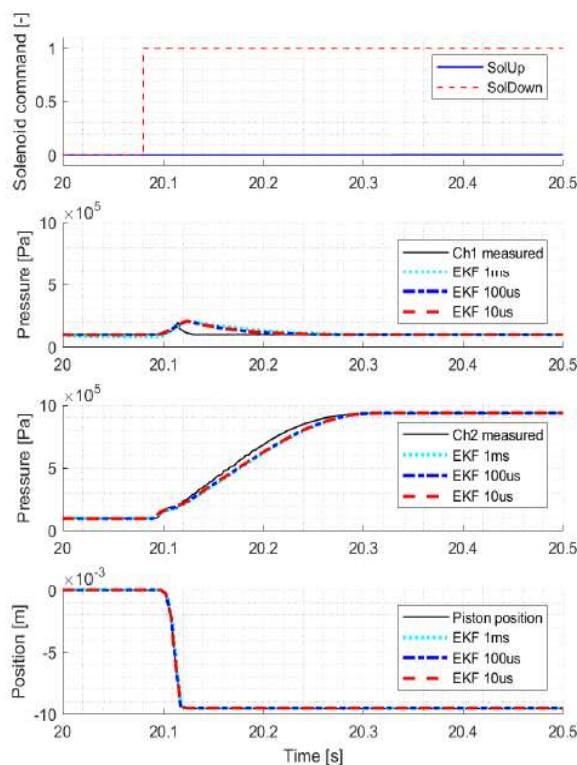


5. ábra Kiterjesztett Kálmán-szűrő: Alsó végállás – Üres állás kapcsolása

Az Üres állás – Alsó végállás kapcsolása a 6. ábrán látható. A 2. diagram alapján a sebességet már nem, vagy csak kis

mértékben becsüljük túl, viszont a kontrakterők elhagyása miatt (a pozíciót egyszerűen szaturáljuk a végállás elérésekor) az 1. kamrában a valóságnál hosszabb ideig figyelhető meg nyomásnövekedés.

Elmondható, hogy a kiterjesztett Kálmán-szűrő mindkét esetben képes elfogadható pontossággal becsülni a rendszer viselkedését 1ms mintavételi idő esetén is.



6. ábra Kiterjesztett Kálmán-szűrő: Üres állás – Alsó végállás kapcsolása

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Pontosabb összehasonlítás végett megvizsgáltuk az állapotbecslők relatív hibáját minden időlépésben, melyekből egy példát a 7. ábrán láthatunk, ami a 2. kamra nyomásbecslésének hibáját ábrázolja Alsó végállás – Üres állás kapcsolás (L – N) esetén. A hibák négyzetes középértékét az 1. táblázat tartalmazza

Az 1ms lépésközű becslés hibája mindkét algoritmus esetén lényegesen rosszabb.

Ugyanezek a következtetések vonhatók le az 1. táblázat alapján kiegészítve a megállapítással, hogy ebben az esetben mindkét állapotbecslő pontossága eléri a kívánt szintet függetlenül a lépésköztől. Érdekes továbbá, hogy a kiterjesztett Kálmán-szűrő által becsült nyomás hibája lényegesen zajosabb, mint a többi becslésé. Ez valamilyen numerikus problémára utalhat.

1. táblázat A nyomásbecslés hibáinak RMS értéke

		EKF		KF	
		L - N	N - L	L - N	N - L
p_ch1	0.01ms	1.52	3.95	2.09	4.57
	0.1ms	1.49	3.88	2.06	5.50
	1ms	1.62	4.53	1.77	12.15
p_ch2	0.01ms	1.62	4.18	2.87	3.21
	0.1ms	1.76	4.17	2.91	25.25
	1ms	2.39	4.49	3.28	53.57

A 7. ábra alapján láthatjuk, hogy Kálmán-szűrő esetén a különbség a 0.1ms és 0.01ms mintavételi idejű becslések között elhanyagolható, míg kiterjesztett Kálmán-szűrő esetén a 0.01ms lépésközű becslés pontosabb eredményt ad, ahogy a kamranyomás közelíti a tápnyomáshoz.

Az Üres állás – Alsó végállás kapcsolás (N - L) esetén a Kálmán-szűrő már csak 0.01ms lépésköz esetén képes teljesíteni a követelményeket, míg a kiterjesztett Kálmán-szűrő hibája lépésköztől függetlenül az elvárt értéken belül maradt.

Az eredmények alapján levonható következtetéseket három fő pontban foglalhatjuk össze:

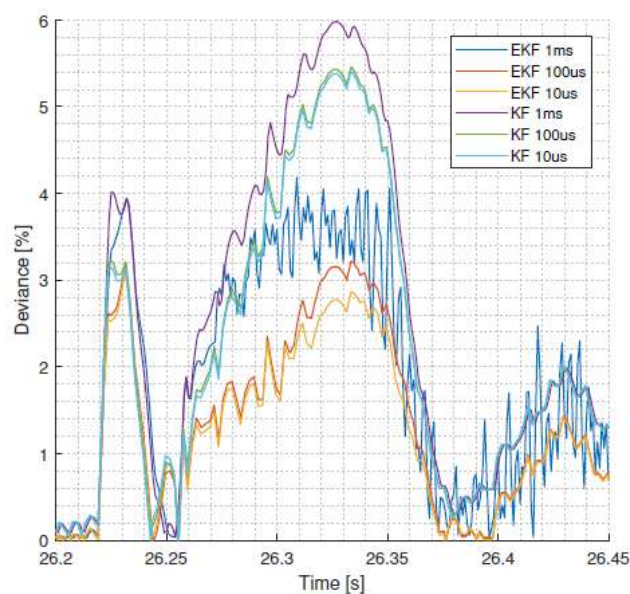
- A lépésköz növelésével a becslés hibája növekszik
- L - N kapcsolás esetén mindkét becselő pontosabb eredményt ad
- A kiterjesztett Kálmán-szűrő alkalmazása pontosabb becslést eredményez

Az eredmények alapján megállapítható, hogy szimulációs célokra, ahol a számítási kapacitásigény másodlagos mindkét algoritmus alkalmazható, viszont nagyobb pontossága miatt a kiterjesztett Kálmán-szűrő javasolt. Beágyazott rendszerekben, ahol a számítási kapacitás jelentősen korlátozott csak a kiterjesztett Kálmán-szűrő használható, mivel az 1ms lépésköz esetén is képes volt kellően pontos eredményeket adni.

A fejlesztett algoritmusokat a későbbiekben szükséges a beágyazott rendszerekre optimalizálni, de megállapítható, hogy azonos lépésköz esetén a két algoritmus közötti számítási kapacitásigény minimális.

Az állapotbecslő pontossága tovább növelhető a sebességbecslés finomításával. A dugattyú pozíciójelének deriválásával durva közelítést kaptunk annak sebességére, viszont nem szabad elfelejteni, hogy ez a sebességjel zajjal terhelt és az 5ms felbontás miatt csak felületes összehasonlításra használható, viszont a cikkben levont következtetéseket alátámasztására alkalmasnak bizonyult.

A sebességbecslés pontosságát a felütközés figyelembevételével javíthatjuk, ennek egy lehetséges módja dugattyú és a ház közötti kontakt csillapított, nagy merevségű rugóként történő modellezése, ezzel azonban újabb hibrid állapotokat viszünk a rendszerbe. Egy másik lehetséges megoldás a pozíciójel visszacsatolása a sebességbecslésbe, amennyiben a dugattyú eléri a szélsőhelyzetet, a becsült sebesség nullázható. Ebben az esetben a feladat a reset logika megfelelő meghatározása.



7. ábra A 2. kamranyomás becslésének hibája Alsó végállás – Üres állás kapcsolás esetén

A továbbiakban a kiterjesztett Kálmán-szűrőt szeretnénk a valós, beágyazott rendszeren is implementálni, majd azt különböző szabályozók részeként felhasználni.

A lineáris szabályozókon túl jelenleg megerősítéses tanuláson alapuló szabályozó implementálása is folyamatban van, ahol a neurális hálót különböző bemenetein a mért pozíció túl biztosan szükség lesz legalább a kamranyomásokra, vagy a sebességre, esetleg egyéb jelekre, melyek az állapotbecslő jeleiből könnyen meghatározhatók.

Példaként megemlíthető a kamrákban lévő levegő hőmérsékletre, ami az ideális gáz állapotegyenletéből az állapotbecslő adatai alapján meghatározható.

A szinkronizálás során a munkahenger szabályozásához szintén szükséges a már említett működtetőerő, hiszen túl kis erő esetén a szinkronizálás lényegesen lassabb, legrosszabb esetben meghiúsulhat a fokozatkapcsolás, míg túl nagy működtetőerő csökkenti a szerkezet élettartamát, valamint a megnövekedett zaj és túl nagy sebességkülönbség mellett bekapcsolt fokozat miatt a menetkomforta is negatív hatása lehet.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás 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.

## HIVATKOZÁSOK

- Doumit, M. D. & Pardoel, S., 2017. Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91. kötet, pp. 93-110.
- Gulati, N. & Barth, E. J., 2005. Non-linear pressure observer design for pneumatic actuators. In: *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Monterey, CA, USA: IEEE, pp. 783-788.
- Hošovský, A. és mtsai., 2016. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles. *Mechanism and Machine Theory*, 103. kötet, pp. 98-116.
- Karthikeyan, P., Chaitanya, C. S., Raju, N. J. & Subramanian, S. C., 2011. Modelling an electropneumatic brake system for commercial vehicles. *IET Electrical Systems in Transportation*, 1(1), pp. 41-48.
- Oliver-Salazar, M. A. és mtsai., 2017. Characterization of pneumatic muscles and their use for the position control of a mechatronic finger. *Mechatronics*, 42. kötet, pp. 25-40.
- Ramezani, S. & Baghestan, K., 2019. Observer-based nonlinear precise control of pneumatic servo systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), pp. 165-176.
- Saravanakumar, D., Mohan, B. & Muthuramalingam, T., 2017. A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precision Engineering*, 49. kötet, pp. 481-492.
- Szabó, Á., Bécsi, T., Gáspár, P. & Aradi, S., 2018. Control oriented modeling of an electro-pneumatic gearbox actuator. In: *2018 European Control Conference (ECC)*. Limassol, Cyprus : IEEE, pp. 2623-2628.
- Szimandl, B. & Németh, H., 2013. Dynamic hybrid model of an electro-pneumatic clutch system. *Mechatronics*, 23(1), pp. 21-36.
- Turkseven, M. & Ueda, J., 2017. An Asymptotically Stable Pressure Observer Based on Load and Displacement Sensing for Pneumatic Actuators With Long Transmission Lines. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2), pp. 681-692.