

Pneumatikus jármű pneumatikus rendszerének modellezése

Szakács Tamás*

* Óbudai Egyetem - Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar – adjunktus
Hungary (e-mail: szakacs.tamas@bgk.uni-obuda.hu).

Absztrakt. A cikk az Óbudai Egyetemen dolgozó Powair pneumobil csapat által fejlesztett jármű pneumatikus rendszerének modelljét mutatja be.

A modell a tartályban tárolt gáz energiájától kiindulva a reduktor áramlási, termodinamikai és mechanikai működésén át, a rendszerben felhalmozódó gázmennyiség, a nyomások és veszteségek alakulását, a puffertartály hatását, a munkahengerben kialakuló gáz állapotokat írja le.

A fejlesztés célja a munkahengerben kialakuló erők, és mozgások leírása, a teljesítmény, és a fogyasztás optimalizálása céljából. További cél, hogy a modell segítségével vezérlési stratégiákat lehessen kifejleszteni, modellezni, különös tekintettel a jármű hatótavának maximalizálására.

1. BEVEZETÉS

A pneumatikus hajtású jármű vezérlésének optimalizálása a jármű pneumatikus rendszerének pontos leírását igényli. A járművet hajtó gáz állapotváltozásainak, és áramlásának leírása nem egyszerű feladat. A hőmérséklet, a nyomás, az áramlási sebesség időben és térben folyamatosan változik. A rendszeren belül tulajdonképpen csak a gázállandó konstans. Ami befolyik, az kifolyik, (idézzük a tömegmegmaradás hazai retro megfogalmazását), ezért a folyamatok leírásához az áramló gáz tömegáramát használom a rendszerben zajló részfolyamatok leírására. Első lépésként a gázpalackban tárolt nyomásalatti gáz leírását végzem. Adott térfogaton elhelyezkedő gáztömeg létrehoz egy nyomást. Ez a palack kezdőnyomása, ami a további elemek által elfogyasztott gázmennyiség (gáz-tömegátam) hatására folyamatosan csökken. Nem ilyen egyszerű a reduktor gázterében kialakuló nyomás leírása, mert ott kétirányú anyagcsere tapasztalható, Ennél még bonyolultabb a hengerben lezajló folyamatok leírása, mert ott nem csupán változó nyomású (és hőmérsékletű) folyamat zajlik, hanem a rendszer térfogata is változik.

A termodinamikai és áramlási rendszerek analitikus leírásában gyakran futunk bele abba a problémába, hogy a kiszámított eredmény a modell egyik paraméterét befolyásolja. Ilyen például a valós közegek veszteséges áramlása során fellépő nyomásesés, ami befolyásolja a közeg sűrűségét, ami pedig a nyomásesés egyik paramétere. Ilyen esetekben a rendszert leíró egyenletekben aritmetikai hurok alakul ki, ami a numerikus megoldási módszerben nehézséget okoz. Ilyen probléma leírása található a 2.6 fejezetben

A modell Matlab/Simulink® környezetben készült. Az alrendszerekben szereplő blokkok nevei a jobb érthetőség érdekében, többnyire a műveletek egyenletei, A szkópok nevei pedig az általuk ábrázolt fizikai mennyiségek, így az egyes funkciók könnyen megérthetőek, a modell könnyen áttekinthető, módosítható.

A modell egyes blokkjainak és jeleinek megnevezése angolul látható, egyrészt mivel a Pneumobil verseny nemzetközi, másrészt mivel cél, hogy a modell az idegennyelvű oktatásban is szerepet kaphasson, valamit, hogy nemzetközi publikációban is szerepelhessen.

A fizikai mennyiségek a gyakorlati életben megszokott mértékegységeket kaptak (liter, Celsius, bar...), melyek a modellen belül vannak SI mértékegységre konvertálva (m³, Kelvin, Pa). Az ilyen mértékegységváltó blokkok nevei is a funkciójukat tükrözik, mint ahogy az az 1. ábrán is látható (l2m³, C2K Pa2bar, vagyis liter köbméterre, Celsius Kelvinre, vagy fordított helyzetben Pascal bar-ra)

2. A MODELL LEÍRÁSA

Az alábbi pontokban bemutatom a modell egyes részeit, majd az utolsó alpontban a teljes modell felépítését. Az almodellek részben további almodellekből épülnek fel. A modellalkotás során szempont volt, hogy a modell könnyen kezelhető, és áttekinthető maradjon.

2.1 Sűrített nitrogénnel töltött palack modellje.

A levegőtartály egy állandó térfogatú termodinamikai rendszer.

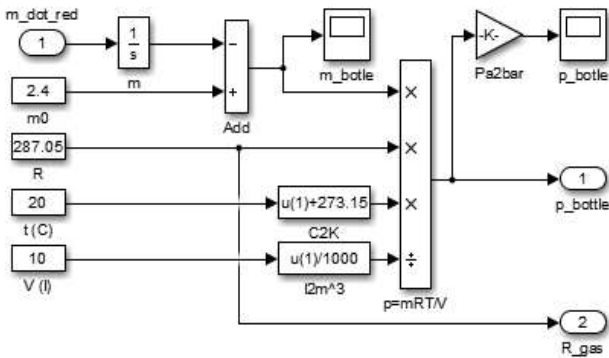
A rendszer működése: a feltöltött palackban m tömegű, R gázállandójú gáz található V térfogaton. A tartályban a gáz nyomása:

$$p = \frac{mRT}{V} \quad (1)$$

összefüggés szerint határozható meg. A palackban a gáz hőmérséklete állandónak tekinthető, megegyezik a környezeti hőmérséklettel. A gáz fogyását a reduktor almodellben meghatározott tömegáram jellemzi.

A palack almodell bemenete a palack tartalmának fogyása tömegáramban mérve. Kimenetei a palack pillanatnyi nyomása, és a gáz gázállandója.

Az 1. ábra a palack Matlab/Simulink modelljét mutatja.



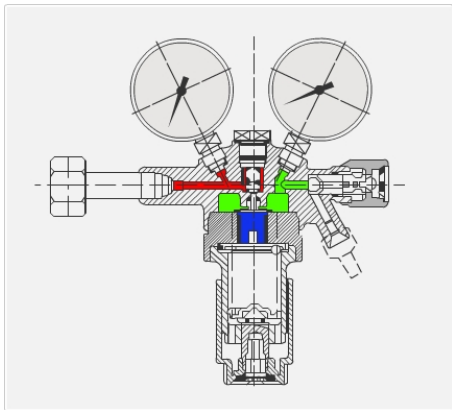
1. ábra A gázpalack modellje



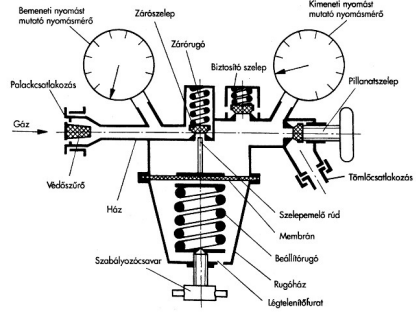
2. ábra A gázpalack maszkolt modellje

Ha az m_0 kezdeti tömeg 2,4 kg, $R=287,05$ kJ/kgK, $V= 10l$, $t=20^\circ\text{C}$, akkor az (1) összefüggés $p=202\text{bar}$ abszolút nyomást eredményez. Ez 201bar relatív nyomással egyenlő, ami jó közelítéssel egyezik a 10literes ipari nitrogénpalack nyomásával (200bar)

2.2 A reduktor modellje



3. ábra A reduktor keresztmetszeti ábrája [1]



4. ábra A reduktor részei [2]

Az ipari nitrogénpalack a jármű pneumatikus rendszeréhez egy reduktor segítségével illeszkedik.

A reduktormodell az alábbi feladatokat látja el:

- Meghatározza a gáz állapotához tartozó hangsebességet, és kiszámolja a MACH számot.
- A kiáramlás sebességét korlátozza a MACH értékre.
- Meghatározza a nyomáscsökkenés során kialakuló gázhőmérsékletet.
- Kiszámítja a nyomáscsökkentő szelep munkaterének gáznyomását.
- Modellezi a nyomáscsökkentő szelep átáramlási keresztmetszetének változását.
- Kiszámítja a nyomáscsökkentés során a gáz átáramlási sebességét, térfogat- és tömegáramát.

2.2.1. A gáz kiáramlási sebességének meghatározása:

A kiáramlási sebesség az alábbi képlettel számolható

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} RT_t \left[1 - \left(\frac{p_r}{p_t} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \left(\frac{m}{s} \right) \quad [3] \quad (2)$$

2.2.2. A hangsebesség meghatározása:

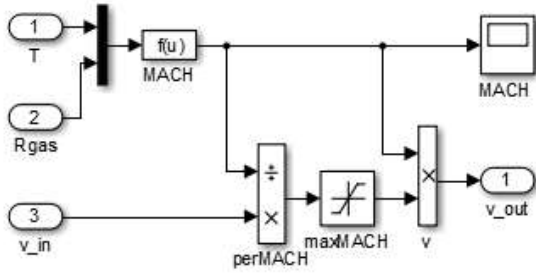
A fúvóka nélküli furatból kiáramló gáz sebessége nem haladhatja meg a hangsebességet. A hangsebesség meghatározása az adiabatikus kitevő κ , A gázállandó R, és a hőmérsékletből meghatározható

$$v_{\text{sound}} = \sqrt{\kappa RT} \quad (3)$$

A mach szám a kiáramlási sebesség és a hangsebesség hányadosa:

$$M = \frac{v}{v_{\text{sound}}} \quad (4)$$

A modell bemenetei: Gázhőmérséklet, gázállandó, és a Torrichelli képlettel meghatározott kiáramlási sebesség. Kimenete: A MACH számra korlátozott gázsebesség.



5. ábra A MACH szám meghatározása, és M-limier

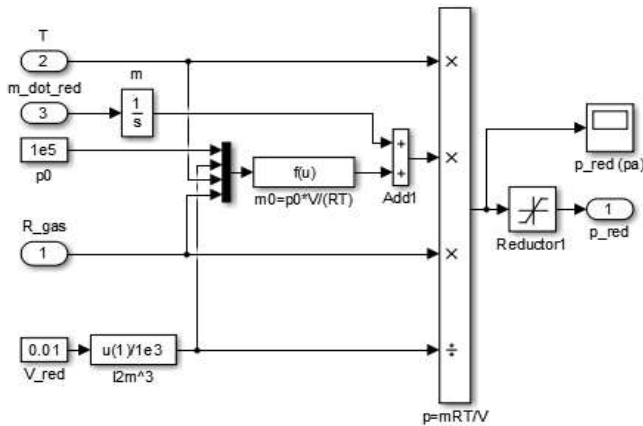
2.2.3. Reduktor munkaterében a gázyomás meghatározása:

A reduktor gázterében a kialakuló nyomás a gázpalackhoz hasonlóan történik. A termodinamikai rendszer egy állandó térfogatú, változó tömegű rendszer. Ez után a modell peremfeltételeit úgy állítom be, hogy a palackba 2,4kg gáz legyen a szimuláció futtatásának elején, ami 201bar relatív nyomásnak felel meg.

A palack töltése, és ürítése során, a 3. bemeneten érkező töltő/ürítő gáz tömegáramának integrálása után kapjuk meg a palackban lévő gáz tömegének változását, ami az (1) képlet szerint meghatározza a palack pillanatnyi nyomását.

További bemenetek: 1: gázállandó, 2: gázhőmérséklet.

A modell kimenete: A gázterben kialakult nyomás abszolút értéke.

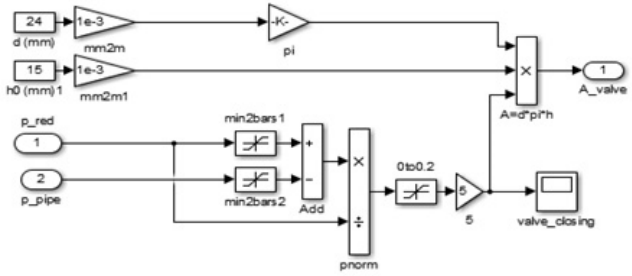


6. ábra A reduktor munkaterének modellje

2.2.4. Reduktorszelep modellje

A szelep a reduktortérben kialakult beállított nyomás elérése esetén a további beáramló gáz útját elzárja. Gázfogyasztás esetén a csökkenő nyomás miatt a szelep újra nyit, ami miatt újra áramlik gáz a palack irányából. A szelep nyitása-zárása a szelep átáramlási keresztmetszetének változásával valósul

meg.



7. ábra Szelepszárás és átáramlási keresztmetszet modellje

Az bemutatott almodelleken kívül a reduktor modellben a következő részek találhatók:

A reduktor nevű blokk a pillanatnyi tartálynyomást redukálja beállított értékre, jelen esetben 10 bar nyomásra.

A nyomáscsökkenés miatti gáz lehűlést politropikus expanzióval modellezve a következő képlet segítségével határozom meg:

A reduktor keresztmetszetén a nyomáskülönbség hatására átáramló közeg sebessége:

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

A képletben szereplő sűrűség:

$$\rho = \frac{\Delta p}{RT} \quad (6)$$

A térfogatáram:

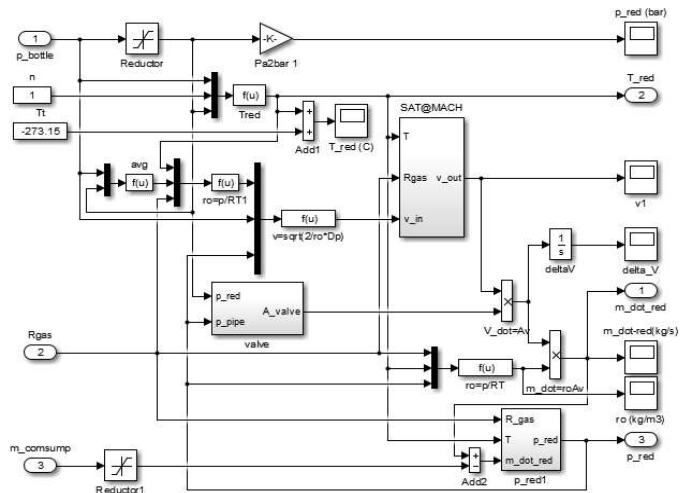
$$\dot{V} = Av \quad (7)$$

Ahol az A a reduktor átáramlási keresztmetszete.

A tömegáram:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (8)$$

ahol ρ a sűrűség



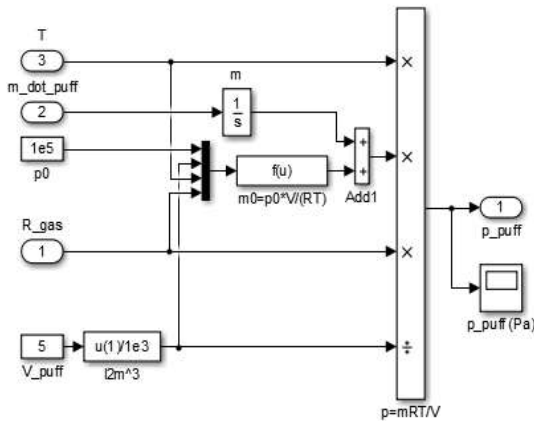
8. ábra A reduktor modellje



9. ábra A reduktor maszkolt modellje

2.3 A puffertartály modellje

A rendszer működése a következő:



10. ábra A puffertartály modellje

Az „üres” tartályban lévő kezdeti tömeg olyan nyomást hoz létre, ami megegyezik a környezeti nyomással. Ez az állapot tekinthető kezdeti állapotnak, mint amikor a tartály szelepe nyitva van, és a p_0 nyomása környezettel egyensúlyban áll. Ennek meghatározása a

$$m_0 = \frac{p_0 V}{RT} \text{ (kg)} \quad (9)$$

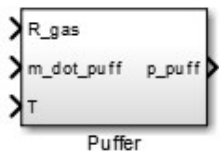
egyenlettel történik.

A puffertartályba áramló gáz tömegáramának integrálása révén a tartályban jelenlévő gáz tömegének változása határozható meg. A tömeg ismeretében a tartály nyomása az (1) egyenlettel meghatározható

A modell bemenetei: 1: gázállandó, 2 tömegáram, 3 hőmérséklet.

Változók: $p_0=10^5$ Pa

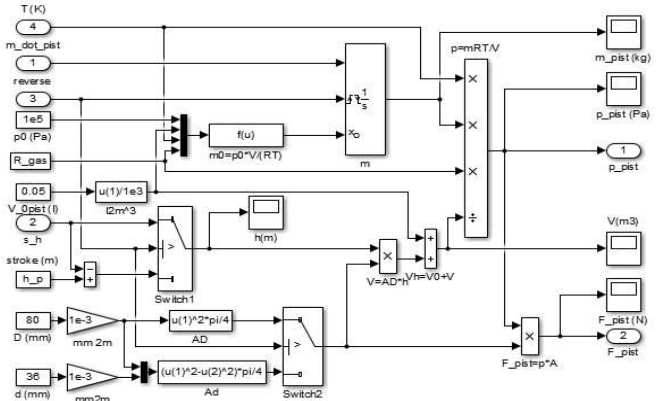
$V_{puff}= 51$



11. ábra A puffertartály maszkolt modellje

2.4 A munkahenger modellje

A munkahenger modellje a puffertartályéhoz hasonló. A fő különbség az, hogy a munkahenger egy változó térfogatú termodinamikai rendszer.

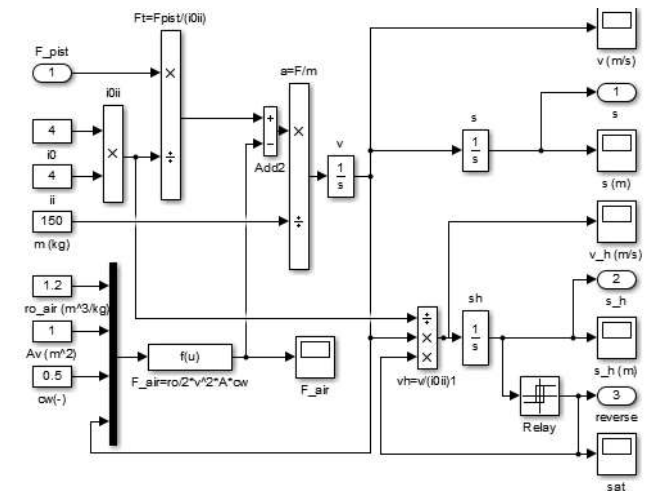


12. ábra A Munkahenger modellje

A munkahengerben lévő gáz kezdeti tömege a puffertartályban lévő kezdeti tömeghez hasonlóan számítható. A bemutatott munkahengermodell a löket végén a benne lévő tömeg kezdeti értékre újraállításával modellezi a hengertéri gáz kipufogását és az ellenkező oldali töltés kezdetét.

2.5 A járműtest modellje

A járműtest modell a jármű mozgását határozza meg a henger által kifejtett erők hatására. A járműtestben helyet kap az erőátviteli berendezések modellje is. Meghatározásra kerül a jármű gyorsulása, amit integrálva a haladási sebességet kapjuk meg, majd újabb integrálás után a megtett utat is.



13. ábra A járműtest modellje



14. ábra A járműtest modellje

Ezzel párhuzamosan határozza meg a modell a hajtó henger mozgását is. A henger végállásban megáll, ekkor a modell a pneumatikus hengermodell számára jelet ad, a henger mozgásának megfordítására

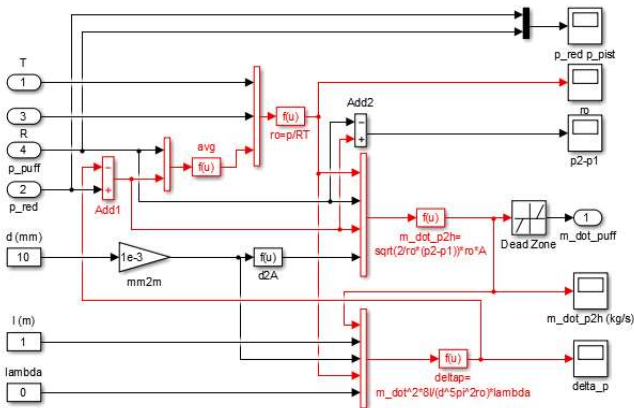
2.6 Csatlakozás

Csatlakozás, illetve vezetékmódel.

A vezetékmódel két különböző nyomású, vezetékekkel összekötött pont közötti légtömegáramot határoz meg. A kiszámított tömegáram az 1. pont felé fogyasztásként, a 2. pont felé szállításként jelentkezik.

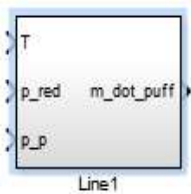
A tömegáram képlete:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_1)} \cdot \rho \cdot A \quad (10)$$



15. ábra Vezetékmódel, csatlakozás

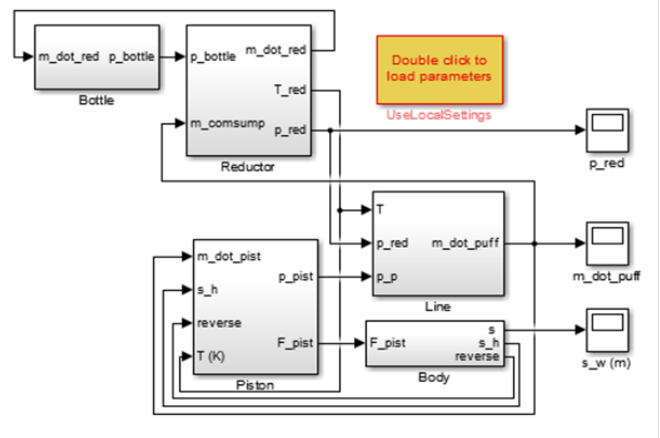
A 15. ábrán pirossal jelölt rész az áramlási veszteség meghatározásában használt egyenlet blokkmodell felírásában kialakuló algebrai hurkot mutatja, melyre a program hibaüzenettel reagál.



16. ábra A maszkolt vezetékmódel

2.7 A teljes modell

A teljes modell a Matlab/Simulink® modell felső rétege, tartalmazza az előbb részletesen leírt almodelleket, a legfontosabb paraméterek szköpjait, a modell paramétereinek betöltő funkcióját. A modell további elemekkel bővíthető, például puffertartály, vagy második munkahenger.

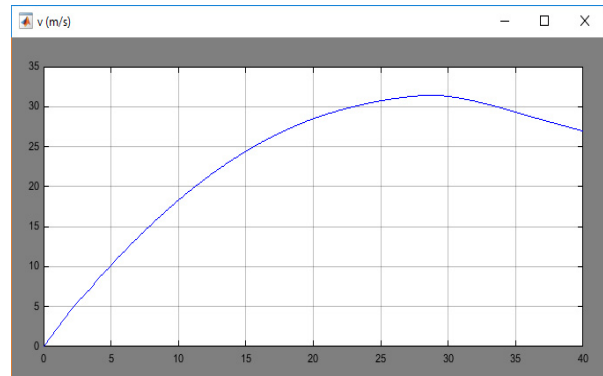


17. ábra A teljes modell

3. EREDMÉNYEK

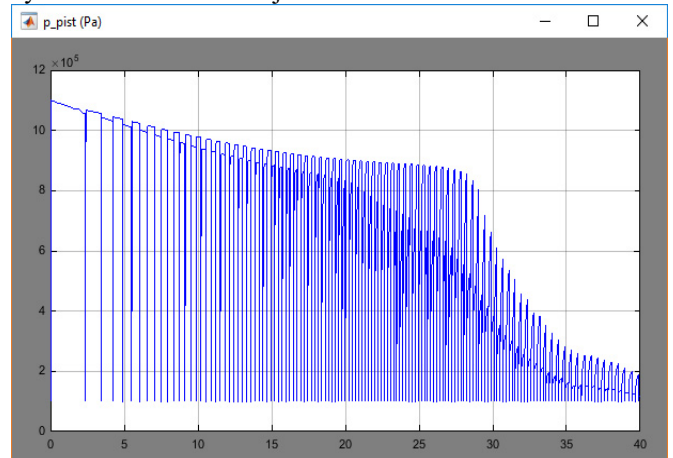
A modellfuttatás eredményeit egy rövid ideig tartó gyors szimulációval mutatom be, mely során a jármű egy fokozatban, teljes töltéssel a palack kiürüléséig halad.

A 18. ábra a jármű sebességét mutatja más mértékegységben. Látható, hogy a jármű a 30. másodpercig gyorsul, majd szabad kifutással lassul.



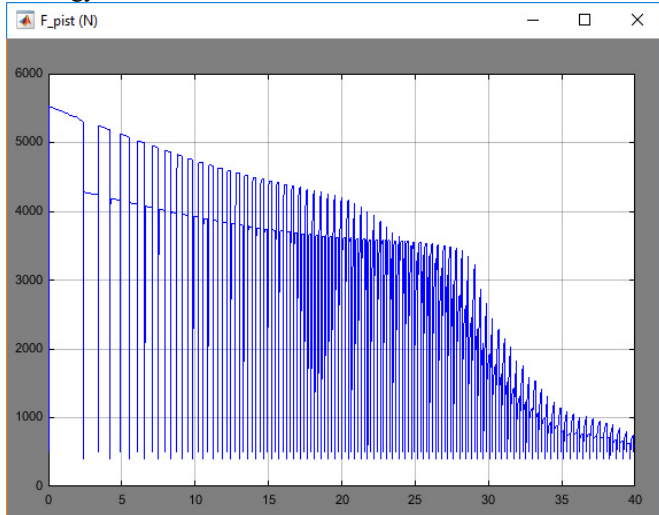
18. ábra: A jármű sebessége

A szimuláció során a pneumatikus munkahengerben lévő nyomás alakulását mutatja az alábbi ábra



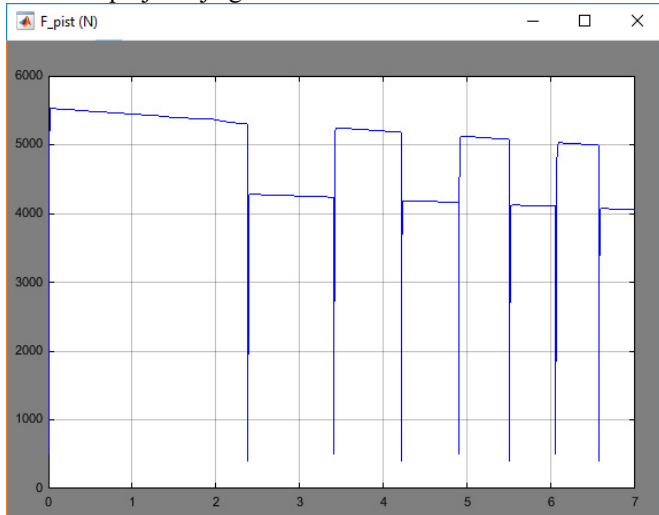
19. ábra A munkahenger nyomása a szimuláció során

A 20. ábrán a hengererőket figyelhetjük meg. Látható, hogy a kettőslöketű henger ki- és visszafelé mozgásakor az eltérő keresztmetszetek miatt más erő alakul ki. Azon az oldalon, ahol a dugattyúszár csökkenti a dugattyú keresztmetszetét, és a hengertérfogatot, ott kisebb dugattyúerő alakul ki, viszont a várttal ellentétben nem figyelhető meg gyorsabb dugattyúsebesség., amit a későbbiekben a 23. ábra is igazol. Érdekes megfigyelni, hogy a 25. másodperc körül a ki-, és a befelé mozgó löketek erőviszonyai megfordulnak, melynek okát egyelőre nem ismerem.



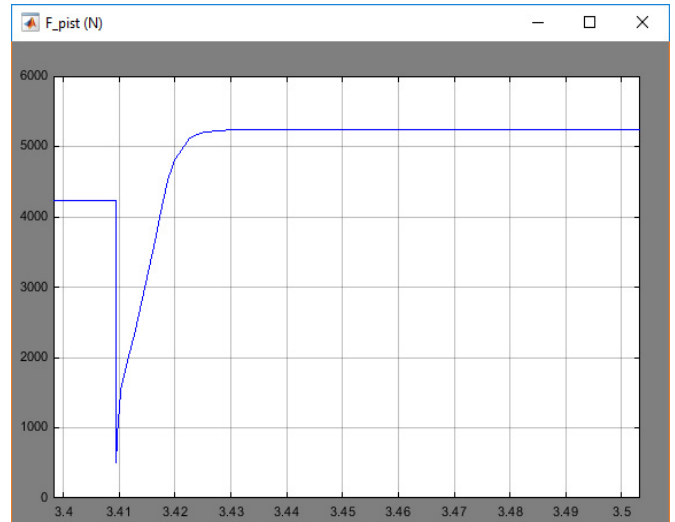
20. ábra A hengererő a teljes futam során

A 21. ábrán a hengererők alakulását a hengermozgás négy első löketpárja idejéig ábrázolom.



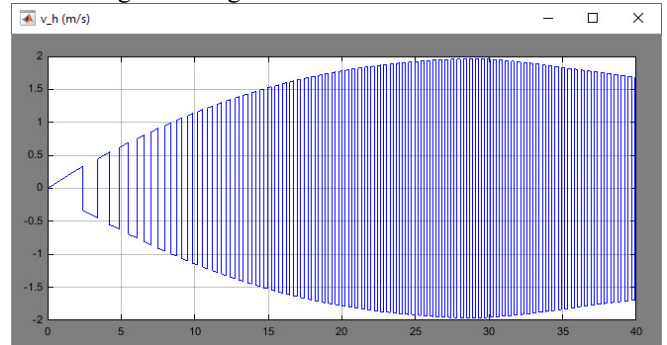
21. ábra A hengererő négy irányváltás alatt.

A 22. ábrán az első löket hengererejének felépülése látható.



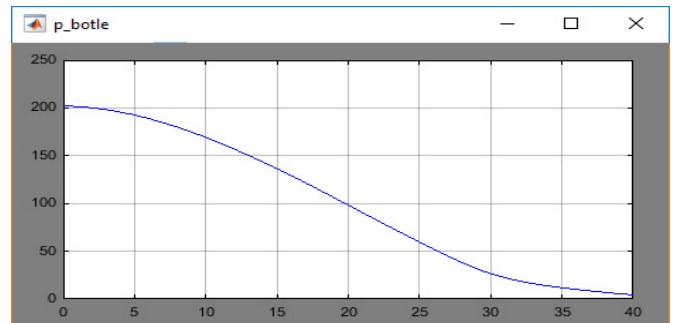
22. ábra A hengererő felépülése az első löketben

A dugattyú sebessége ábrán 23. ábra) látható, hogy a kettőslöketű henger ki- és befelé mozgása során nem alakul ki sebességkülönbség



23. ábra A dugattyú sebessége.

Végezetül az alábbi ábra a palacknyomás alakulását mutatja a szimuláció során.



24. ábra A palack nyomása a szimuláció során.

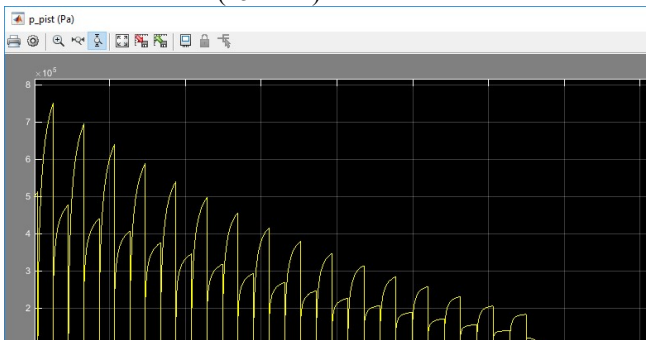
4. TOVÁBBFEJLESZTÉSI JAVASLATOK

A modell jelenleg egy egykamrás munkahengerrel rendelkezik. A henger irányváltása a henger végpozíciójában a henger mozgását számító integráló tag értékének a henger lökethosszal egyező érték esetén egy +1 -ből -1-re eső változó jel értékváltozására történik. Ez a jel egyrészt alaphelyzetbe állítja a munkahengerben lévő gáz tömegét, mintha a munkatérből a gáz a szabad térbe jutott volna, másrészt a

munkahenger további elmozdulását a végállásból visszafelé számoltatja.

Ez az egyszerűsített számítási módszer alkalmas arra, hogy a palackban lévő sűrített gázzal megtehető utat, a jármű maximális sebességét stb. meghatározhassuk a modellel, de nem alkalmas a kettőslökétű, kétkamrás munkahenger vezérlésének, kiexpandáltatási, és előtöltési stratégiáknak optimalizálására. Így a modell továbbfejlesztését úgy kell végezni, hogy a pneumatikus munkahenger valóban kétkamrás henger legyen, be kell vezetni útváltó szelepeket, és a pneumobilon található megoldáshoz hasonló út- és nyomásjeladó szenzorokat, és vezérlést kell a modellen is kialakítani. A vezérlés kialakítása lehet HIL rendszerű is.

A jármű mechanikus modellje jelenleg nem tartalmaz szabadonfutót, így amikor a hengererő megszűnik a munkahengert a jármű külsőleg mozgatja, a hengerben vákuumot hoz létre (25. ábra).



25. ábra Vákuum a munkahengerben

A pneumobilban viszont előírás szerint található szabadonfutó, így azt a modellbe is be kell építeni.

Megfontolandó a szabadonfutó kiiktatása abban az esetben, ha a pneumatikus meghajtású jármű nem pneumobil, mert akkor viszont a mechanikusan mozgatott henger kompresszorként működik, és regeneratív fékezési funkciót biztosít a járműnek.

Ezt követően a modell validálása is megtörténhet a pneumobilon végzett korábbi, és jövőbeli mérési adatok a modellel futtatott szimulációs eredmények összehasonlításával.

A járműmodell továbbfejlesztése során ki fog egészülni egy paraméterkezelő- és megjelenítő felhatalmított felülettel, ami lehetővé teszi majd, hogy a paraméterek programozási ismeretek nélkül is megjeleníthetők, illetve megváltoztathatók legyenek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_22_ipari_gazok/ch02s03.html
- [2] <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/gepszet/gepeszeti-szakismeretek-1/langhegesztes-alkalmazasa-anyagai-eszkozzei/langhegeszto-berendezesek-reszegysegei> Brown, F., M.G. Harris and A.N. Other (1994).
- [3] Kulmann László Áramlástechnika Typotex kiadó, 2012 ISBN 978-963-279-533-1