

MECHATRONIKA- OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI
INFORMATIKA TANSZÉK

TDK dolgozat

Pneumatikus hajtású jármű szabályozása

Szerző:
BŐLE Pál
IV. évf. B.Sc. hallgató

Konzulens:
CZMERK András
tanársegéd

2011. november 10.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. A pneumatikáról általában	6
1.2. Pneumatikus munkahengerek	7
1.2.1. Egyszeres működésű munkahenger	7
1.2.2. Kétszeres működésű munkahenger	9
1.2.3. Egyéb eszközök	10
2. PNEUphoria	11
2.1. A váz tervezése	13
2.2. A motor konstrukciója	13
2.2.1. Hajtáslánc	17
2.3. A pneumatikus elemek kiválasztása	17
2.3.1. A munkahengerek kiválasztása	17
A hajtással szembeni követelmények	17
A súrlódás	19
Választott hengerek	19
Takarékos üzemeltetés	20
2.3.2. A pneumatikus kör tervezése	21
Meg nem valósult tervek	23
A szelepek kiválasztása	23
2.4. Szabályzórendszer tervezése	23
2.4.1. Megvalósítandó funkciók	24
2.4.2. Adatfeldolgozó és vezérlő egység	26
A PLC	26
Saját rendszer	27
2.4.3. Teljesítményelektronika	29
Mágnesszelep-meghajtó	29
Tápegység	32
2.4.4. Szenzorok	33
Szögadó	33
Lineáris útag	34
2.5. Numerikus szimuláció	40
2.5.1. Mechanikai modell	40
2.5.2. Hőtani folyamatok	41
Reduktor	41
Munkahenger	42

1. fejezet

Bevezetés

Gyermekkoromban sok időt töltöttem nagyapámnál. Akkoriban autószerelő volt és engem lenyűgözött, ahogyan dolgozott, ahogy egyszerű eszközökből saját gépeket állított össze. Épített egy kompresszort, pneumatikus autóemelőt, munkadarab-befogót. Azt mondta, készít nekem egy levegővel hajtott járgányt, amivel majd mehetek az utcában. Ez akkor nem készült el, most viszont – sok tervezés és munka után – beülhettem egy ilyenbe.

A Pneumobil verseny számomra hatalmas jelentőséggel bír. Soha nem vettem még részt ehhez fogható feladatban. Sosem voltam még egy ekkora terv részese, aktív tervezője és kivitelezője. Ezidáig sosem hittem, hogy egyetlen feladaton képes vagyok ennyit dolgozni. Egészen mostanáig nem volt részem olyan élményben, hogy egy (igen) hosszú éjszaka alatt írt program első feltöltés után működött.

A Pneumobil rengeteg mindent kért tőlünk és mi rengeteget kaptunk tőle. Hatalmas mennyiségű gyakorlati tapasztalattal gazdagodtunk. Megtapasztalhattuk, hogy nyomás alatt, stressz hatására milyen konfliktusok alakulhatnak ki barátok között is – és azt is, hogyan lehet ezt helyesen kezelni.

Fantasztikus volt először látni működni a motorunkat, hallgatni a szelepeket működés közben. Amikor – még köldökszinóron lógva – először ültünk bele és kattintottuk fel a főkapcsolót. Az első elfogyasztott palack az egyetem területén, az összes csapattag önfeledt mosolya...

Köszönöm.



1.1. ábra. A 2011-es Pneumobilunk

1.1. A pneumatikáról általában

A pneumatika azzal foglalkozik, hogy egy komprimált, gáznemű munkaközeg – általában levegő – potenciális energiáját alakítsa mozgássá. A pneumatika alapösszefüggése a

$$F = p \cdot A$$

egyenlet. Itt A a felület nagysága, amire ha p nyomás hat, a közeg F erőt fejt ki a teljes felületre.

A pneumatikus rendszer mindig tartalmaz egy forrást, ami a működéshez szükséges, magas nyomású gázt biztosítja. Ez telepített rendszereknél legtöbbször villamos motorral hajtott dugattyús kompresszor, mobil alkalmazásoknál pedig egy tartály. A munkaközeg majdnem mindig levegő, de speciális esetekben előfordulhat egyéb gáz munkaközeg; hordozható pneumatikus szerszámok szén-dioxiddal működnek, a Pneumobil versenyen pedig sűrített nitrogént használtak, mert az az iparban jól hozzáférhető. Az alkalmazott nyomás¹ általában 5 és 10 bar² között van.

A pneumatikus hajtás az iparban igen kedvelt és jelentősége egyre növekszik. Előnyös tulajdonságai

- megbízhatóság
 - Hosszú élettartam, alacsony karbantartási igény.
 - Ütésszerű hatásokat jól tolerálja: a gáz összenyomható, ráadásul jól csillapít is.
 - Kevesebb alkatrész egy DC-motoros mozgatóhoz képest, így kevesebb meghibásodási lehetőség.
- biztonság
 - A pneumatikus kör sérülése esetén az elszökő közeg nem szennyez és nem tűzveszélyes, szemben a hidraulikával.
 - Túlterhelésre érzéketlen.
- egyszerűség
 - A sűrített levegő könnyen tárolható, tisztán pneumatikus rendszer áramszünet esetén is üzemképes, amíg a tartály nyomása elegendő.
 - A szabványos elemek felhasználásával könnyen tervezhető összetett rendszer, a vezérlés egyszerű.
 - Az üzemeltetés könnyű, a karbantartás egyszerű.
 - A sűrített levegő könnyen, kis veszteséggel szállítható csővezetéseken.
- költséghatékonyság
- rugalmasság
 - A pneumatikus elemek többször felhasználhatóak, a rendszer átépítése egyszerű, így jól alkalmazható gyakran változó igények mellett is.

¹Itt, és a továbbiakban is, nyomás alatt a légkörihez képesti túlnyomást értem.

²1bar = 10⁵ Pa

- A nyomás- és mennyiség szabályzással tág határok között állíthatóak a működési paraméterek.

Említsünk meg néhány hátrányt is: főleg a kompresszor miatt, a rendszer egészét tekintve a hatások alacsony, az üzemeltetés drága. A közeg rugalmas összenyomhatósága miatt a pontos pozicionálás (szervopneumatika) nehéz feladat. A légtartályok energiasűrűsége alacsony.[1]

Pneumatikus elemekkel rengeteg vezérlési feladat is megoldható: kapható többek között pneumatikus ÉS és VAGY szelep, valamint logikai inverterként használható pneumatikusan vezérelt szelep, ezekkel együtt elméletileg bármilyen logikai függvény megvalósítható – akár pneumatikus számítógép is építhető. Ezt azonban csak érdekességgépp említem meg, ma már jóval olcsóbb, ha ezeket elektronikus úton oldjuk meg. Régebben telepített rendszerekben találkozhatunk ilyenekkel, valamint időreléekkel, programtárcsákkal és egyéb érdekességekkel is.

1.2. Pneumatikus munkahengerek

„A léghenger a hengercsőből áll, amelyet mindkét végén fedél zár le. Ebben a hengercsőben a dugattyú mozog. A dugattyúhoz dugattyúrúd csatlakozik, mely a mellő hengerfedélen keresztül jár ki a hengerből. A dugattyú előre-hátra történő mozgását sűrített levegő vezérli. Az erőátvitel dugattyúrúddal történik.”[2]

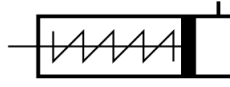
A legfontosabb pneumatikus-mechanikus erőátalakító eszközök tehát a lineáris munkahengerek. Ezek tehát egy hengercsőből állnak, amelyben a dugattyú a teret két félre (kamrára) osztja.

Normális használat során a munkahenger dugattyúrúdja a két véghelyzet valamelyikében helyezkedik el, amelyeket „+” (teljesen kint van a dugattyúrúd) és „-” (teljesen bent van a dugattyúrúd) állásnak neveznek. Ezeket a véghelyzeteket gyakran ellátják végálláskapcsolókkal, ami néha a dugattyúrúd mechanikus vagy egyéb³ érzékelése, kedveltebb azonban a munkahengerben a dugattyú helyzetének figyelése; a legtöbb munkahenger mágnesdugattyús, azaz a dugattyún egy mágneses elemet helyeznek el, ennek mezeje az alumínium hengertest külső felén is kitűnően érzékelhető reed-csővekkel vagy egyéb, a mágneses tér érzékelésére szolgáló eszközzel. Így a vezérlő egység visszajelzést kap, hogy a munkahenger tényleg elérte-e a kívánt pozíciót, vagy valami probléma történt.

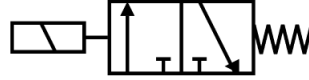
1.2.1. Egyszeres működésű munkahenger

Az egyszeres működésű munkahenger a legegyszerűbb kialakítású. Ennek egyik kamráját – célszerűen azt, amelyikben nincs dugattyúrúd – helyezhetjük nyomás alá, a másik kamra a külvilág felé részben nyitott, és a dugattyúrúdon egy rugó található. Ez a rugó gondoskodik arról, hogy nyomásmentes állapotban a dugattyú visszatérjen a „-” alaphelyzetbe. Így tehát ez a fajta henger egyszerűen az egyetlen aktív kamrájára kapcsolt nyomással működtethető. Gyártó sorokon általában befogóként, szorítóként alkalmazzák ezeket, a kifejtett erő egyszerűen beállítható és állandó. Az egyszeres működésű munkahenger jelölése az 1.2. ábrán látható.

³mágneses, induktív, optikai, kapacitív



1.2. ábra. Egyszeres működésű munkahenger



1.3. ábra. 3/2-es elektromechanikus szelep

A működtetése úgy történik tehát, hogy az aktív kamrát nyomás alá helyezzük, vagy a külvilággal kötjük össze, ekkor a bent lévő levegő távozik (lepufog) és a rugó visszatéríti a negatív véghelyzetbe a dugattyút. Ezt általában az 1.3. ábrán látható, úgynevezett 3/2-es útszeleppel valósítják meg. Az itt ábrázolt szelep elektromechanikus működtetésű, tehát a szeleptestet egy visszatérítő rugó ellenében egy szolenoid tekercset átjáró áram által létrehozott mágneses mező mozgatja. Léteznek mechanikusan – ütközőkkel, egykarú emelőkkel – vezérelt, valamint pneumatikusan működtetett szelepek is.

Elektromechanikus szelepknél fontos még beszélnünk az elővezérlésről. Általában nem tisztán elektromágneses működtetésű szelepeket alkalmaznak, hanem elektromágnesesen csak egy kisebb szelepet működtetnek, amely vezérlő levegőt kapcsol egy nagyobb, pneumatikusan működtetett szelepre. Ezeket egyetlen, közös szeleptestbe építve kapják az elővezérelt szelepet.

Megkülönböztetünk külső- és belső elővezérlést. Külső elővezérlésnél az elővezérlő szelep táplevegőjét kívülről, külön kell rákötnünk a szelepnél, míg belső elővezérléssel ellátott szelepek ezt a főszelep tápágáról oldják meg. Ennek akkor van jelentősége, ha a szeleppel kapcsolni kívánt levegő nyomása nem éri el a szelep ún. megszólalási nyomását – azaz azt az értéket, ami felett a szelep üzemképes. Külső elővezérlésű szelepnél ez nem probléma, mert az elővezérlő nyomás magasabb lehet.

Az egyszeres működésű munkahengerek hátránya, hogy a visszatérítő erő a rugótól függ, így erősen limitált, a visszatérítés sebessége pedig alacsonyabb. Akadályoztatás esetén, vagy ha a munkahenger kicsit megszorul, már nem tud visszatérni alaphelyzetbe és ez általában a gép leállítását jelenti, ami a termelésből való kiesés miatt kerülendő. Egyszerűségük miatt azonban kedvelt eszközök.

A munkahenger által kifejtett erő

$$F = p \cdot \frac{d^2 \pi}{4} - D \cdot x$$

ahol p a tápnyomás, d a dugattyúátmérő, D a visszatérítő rugó rugóállandója és x a dugattyúrúd 0 helyzettől mért pozíciója.

A munkahenger egyszeri működtetése során

$$q = l \cdot \frac{d^2 \pi}{4}$$

térfogatú, tápnyomású levegő fogy, ahol l a lökethossz. Ha térfogatáram-határolót alkalmazunk, a dugattyúsebesség legfeljebb

$$\dot{x}_{max} = \frac{4}{d^2 \pi} \cdot \dot{q}_{max}$$

lesz. Visszatérítés során további levegő nem fogy.

1.2.2. Kétszeres működésű munkahenger

A fent említett hátrányokat küszöböli ki az 1.5. ábrán látható kétszeres működésű munkahenger: itt mindkét kamra nyomásálló szigeteléssel van ellátva és egy-egy csatlakozóval rendelkezik. A működtetés úgy történik, hogy az egyik kamrára nyomást kapcsolunk, a másikat pedig összekötjük a külvilággal. Ha a kamrákat felcseréljük, a dugattyúrúd a másik végállásba mozog. Ehhez elegendő egyetlen, az 1.6. ábrán látható, 5/2-es szelepet használnunk.

A kétszeres (vagy kettős-) működésű munkahengerek tehát mindkét irányban képesek jelentős, bár nem egyenlő nagyságú erő kifejtésére. Visszatérítés során ugyanis a hatásos dugattyúfelületet csökkenti a dugattyúrúd keresztmetszetének átmérője. Emelett a negatív kamra is kisebb, hiszen a dugattyúrúd kamrán belüli része csökkenti annak maximális térfogatát. Emiatt visszatérés során kevesebb levegő fogy és a dugattyúsebesség azonos térfogatáram mellett magasabb.

Az 1.6. ábrán egy monostabil elektromechanikus szelep látható. Az 5/2-es szelepeknél gyakran alkalmaznak bistabil szelepeket is, itt két szolenoid tekercs található a szeleptesten. Az egyikre kapcsolt áram az egyik irányba állítja a szelepet, majd ezt a helyzetét áram nélkül is megtartja. A másik tekercsre kapcsolt áram állítja vissza a szelepet az eredeti állásába.

A munkahenger által kifejtett erő, ha a munkahenger pozitív állásba mozgató kamráját töltjük fel,

$$F_+ = p \cdot d_d^2 \frac{\pi}{4}$$

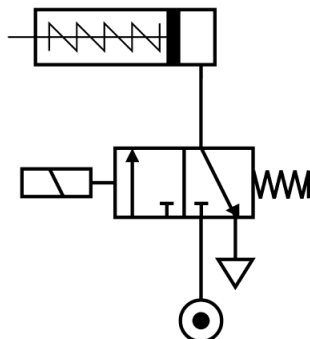
ahol p a tápnyomás, d_d a dugattyúátmérő. Visszatérítés folyamán a kifejtett maximális erő

$$F_- = p \cdot (d_d^2 - d_r^2) \frac{\pi}{4}$$

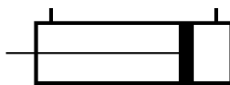
ahol d_r a dugattyúrúd átmérője.

A munkahenger egyszeri működtetése során itt is

$$q_+ = l \cdot d_d^2 \frac{\pi}{4}$$



1.4. ábra. Egyszeres működésű hengerrel felépített rendszer



1.5. ábra. Kétszeres működésű munkahenger



1.6. ábra. 5/2-es elektropneumatikus útszelep

térfogatú, p tápnyomású levegő fogy, ahol l a lökethossz, d_d a dugattyúátmérő. Visszatérítés során további

$$q_- = l \cdot (d_d^2 - d_r^2) \frac{\pi}{4}$$

levegő fogy.

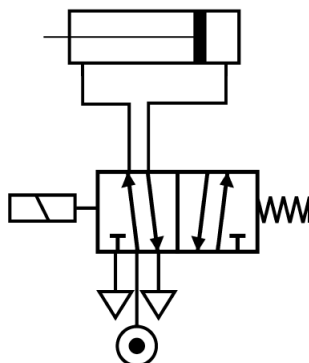
1.2.3. Egyéb eszközök

Habár a fent említett, kétfajta munkahenger a leggyakrabban alkalmazott, előfordulnak egyéb típusok is.

Léteznek forgó hengerek, amelyek két szöghelyzet között képesek elfordulni. Ezt pillangószelep forgatására, szerszámok, vagy a munkadarab forgatására használják.

Gyártanak dugattyúrúd nélküli munkahengereket is, előnyük a mindkét irányban egyforma erő kifejtés és azonos sebesség, valamint a kisebb beépítési méret.

Pneumatikus motorokkal is találkozhatunk, leggyakrabban légkulcsokban és egyéb pneumatikus szerszámgépekben. Ezekben nem a hagyományos értelemben vett munkahenger található, némelyikben lapátos légmotor, némelyikben inkább egy egyszeres működtetésű dugattyús henger, forgattyús mechanikával, amely a belsőégésű motorokéra hasonlít. A sűrített levegő energiáját forgó mozgás előállítására használják apró turbinákban is, mint amilyen a fogorvosi fúró is.



1.7. ábra. Kétszeres működésű munkahengerrel felépített rendszer

2. fejezet

PNEUphoria

A PNEUphoria a BME Gyártástudomány- és Technológia Tanszékének pneumobil csapata, melynek története már több évre nyúlik vissza. A régi csapatokból azonban nem sok maradt, tagjait a maiak már nem ismerik, s a néven kívül nem sokat hagytak ránk.

2010 szeptemberében keresett meg egy barátom, Gyöngy András, hogy érdekelne-e engem a pneumobil versenyen való részvétel. András már előző évben is csapattag volt és építettek egy kocsit, amivel végül ötödik helyet érték el a távolsági kategóriában. Rám főleg azért volt szüksége a csapatnak, hogy az előző évi, pusztán pneumatikusan vezérelt konstrukcióval szemben egy új, elektropneumatikus vezérlésű motort készíthessünk. Bár ez volt a fő feladatom, emellett a többi problémával is foglalkoztam és az építésben is részt vettem; a munka vége felé már én hegesztettem az alumínium vázat.

Végül a tervezetthez képest jóval kevesebb funkció készült el, az összeállított rendszer elektromos és szoftveres részével azonban nem volt probléma, megfelelően működött és ugyanez igaz a mechanikus részekre is. Az egész járművet nézve, összességében sikeres volt és jól szerepelt. Rengeteg fejlesztési lehetőség van még benne, a konstrukcióból többet is ki lehet még hozni, ezekre is ki fogok térni a későbbiekben.

A csapat¹ tagjai voltak ABC-rendben:

Acsády Tamás harmadéves gépészmérnök BSc hallgató, géptervező szakirány

Bőle Pál harmadéves mechatronikai mérnök BSc hallgató, mechatronikai berendezések tervezése szakirány

Gyöngy András végzős gépészmérnök BSc hallgató, géptervező szakirány

Nyitrai Attila harmadéves gépészmérnök BSc hallgató, géptervező szakirány

Pintér Gergely negyedéves gépészmérnök BSc hallgató, gépgyártás-technológia szakirány

A csapat tanára *Püspöki János* volt, a Gyártástudomány- és Technológia Tanszékről. Konzulensünk többek között *Sütő Zoltán* volt, az Automatizálási és Alkalmazott Informatika Tanszékről, valamint a MOGI Tanszékről *Bacsó István* segítségét is köszönöm. Ezúton is szeretnék mindenkinek köszönetet mondani a kapott támogatásért, ideértve szponzorainkat is.

¹Az egri versenyen Gergő sajnos nem tudott jelen lenni.



2.1. ábra. A csapat az egri versenyen

2.1. A váz tervezése

A váz tervezését András és Gergő végezték, jómagam nem sok részt vállaltam belőle, ezért csak röviden térnék ki rá.

A konstrukció során fontos szempontok voltak a kis tömeg és az alacsony súlypont. Az alacsony tömeg elérése érdekében önhordó alumínium csőváz szerkezetet használtunk, a legtöbb elem 20x20x2-es négyszög szelvény volt, az alváz főtartói nagyobb, 40x40x2-es anyagból készültek. A váz rajza a 2.2. ábrán látható.

A menettulajdonságok szempontjából kedvezően alacsonyra sikerült a súlypontot helyezni, a hasmagasság 7cm – ez az ülés alja és a talaj között mérhető – így a pilóta szinte a „földön ül”. A tengelytávot igyekeztünk a lehető legalacsonyabban tartani, végül 1554mm lett, ez kis fordulókört, jó kanyarodási képességeket tesz lehetővé.

A nyomtáv viszonylag nagy, 1252mm , ami az alacsony súlyponttal együtt a stabilitást növeli. A méretezésnél igyekeztünk a lehető legjobban kihasználni a verseny szervezői által megfogalmazott határértékeket. A kész jármű gépátvétkor természetesen megfelelt a műszaki követelményeknek.

A szerkezetet Autodesk Inventorral terveztük és végelelemes szimulációt is végeztünk a felülről becsült, hozzávetőleges terhelések figyelembevételével.

A tervezés során a gyárthatósági szempontokat nem vettük kellő mértékben figyelembe, erre azonban túl későn ébredtünk rá. A vázszerkezet nagy számú, különböző, rövid szelvényből állt össze, ráadásul térbeli² vágással kellett őket darabolni. Így a szelvények darabolása és előkészítése sok munkát vett igénybe és körülbelül két hónap alatt fejeződött be.

Az immáron méretre vágott szelvényeket AWT³-hegesztettük, kezdetben ezt *Mohos László* végezte a G épület hegesztőlaboratóriumában, majd néhány héttel később már részben én. Eleinte csak figyeltem, ahogy Laci bácsi dolgozik, majd hulladék alu-darabokon gyakorolni kezdtem. Mikor ez már tűrhetően ment, egyedül is dolgoztam a vázon.

A hegesztés során kb. $80-110\text{A}$ -es 60Hz -es váltakozó négyszögáramot használtunk és argon védőgázt. Több különböző hegesztőgéppel készült a váz, több részletben – legalább 60 munkaórát vett igénybe.

A kész váz végül a tervezetthez igen közel állt és szilárdságilag is megfelelőnek bizonyult. Üres tömegét nem mértük, de 20kg -nál könnyebbnek kell lennie.

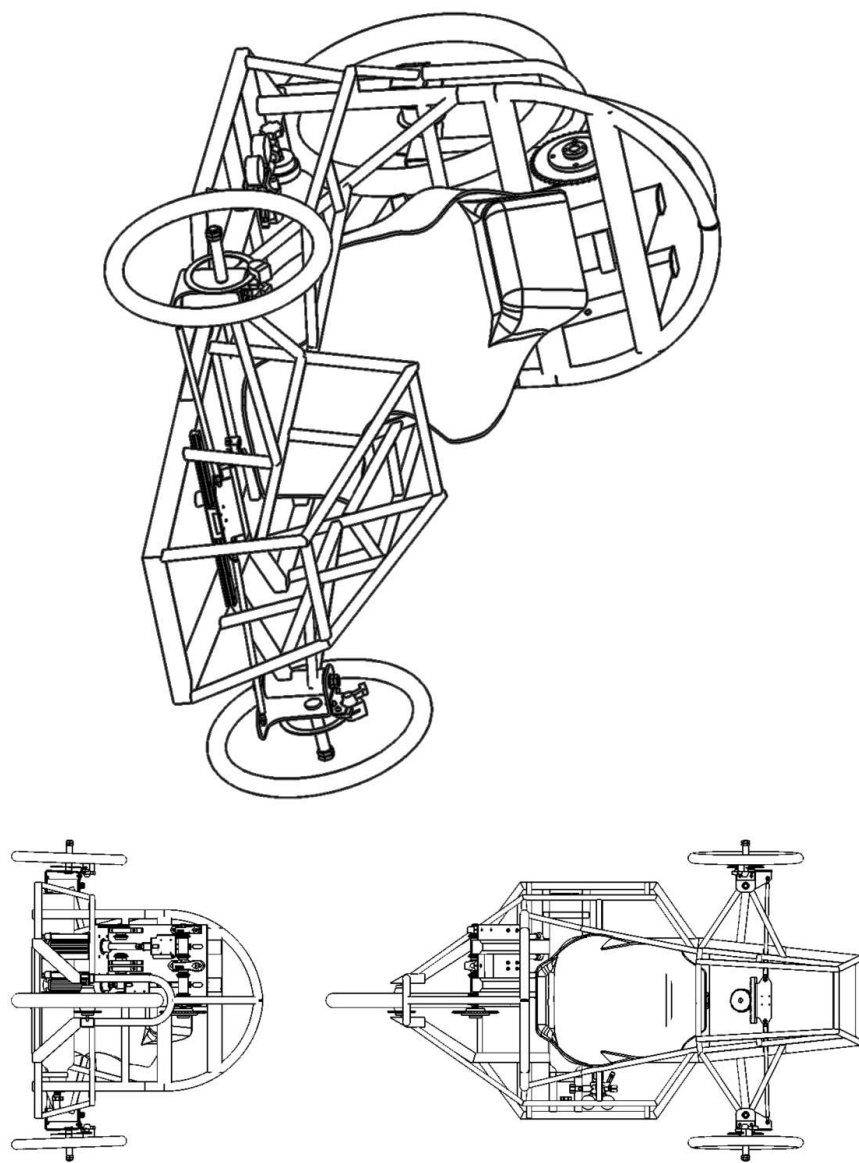
2.2. A motor konstrukciója

A pneumobil versenyen általában kétféle motorral lehet találkozni: vannak forgattyús rendszerek és forgattyú nélküli, lineáris megoldások. Az általunk használt az utóbbi családba tartozik, és elsődleges közvetítő elemként láncot használ az erőátvitelhez. Érdekessége, hogy a dugattyú munkát végez mindkét irányú mozgása során.

A pneumatikus motor a tavalyi autóban már bizonyított konstrukció továbbgondolása. A 2.4. ábrán „A”-val jelöltem a munkahengereket, amelyeknek dugattyúrúdja egy-egy golyós vezetéken gördülő kocsira szerelt, „B”-vel jelölt

²A cső tengelyére merőleges síkhoz képest térszöget zártak be a vágási síkok.

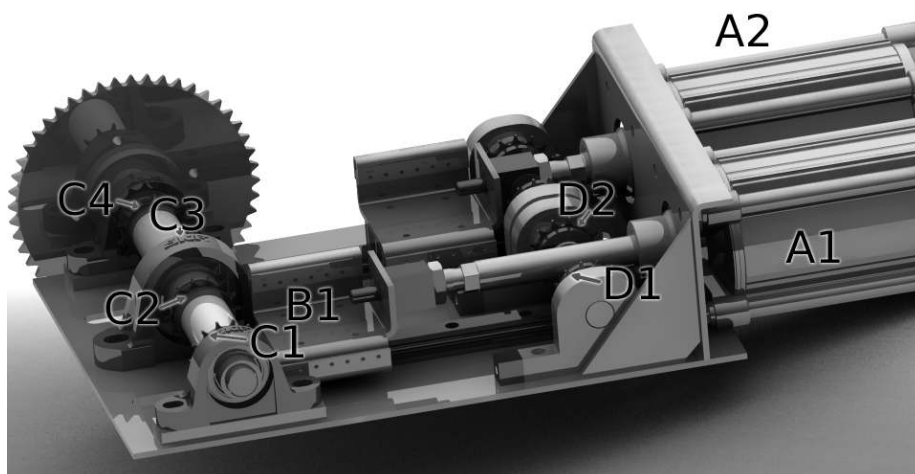
³Argon védőgáz, Wolfamelektrodás ívhegesztés, más néven MIG hegesztés.



2.2. ábra. A vázszerkezet terve



2.3. ábra. A váz összeállítása képekben

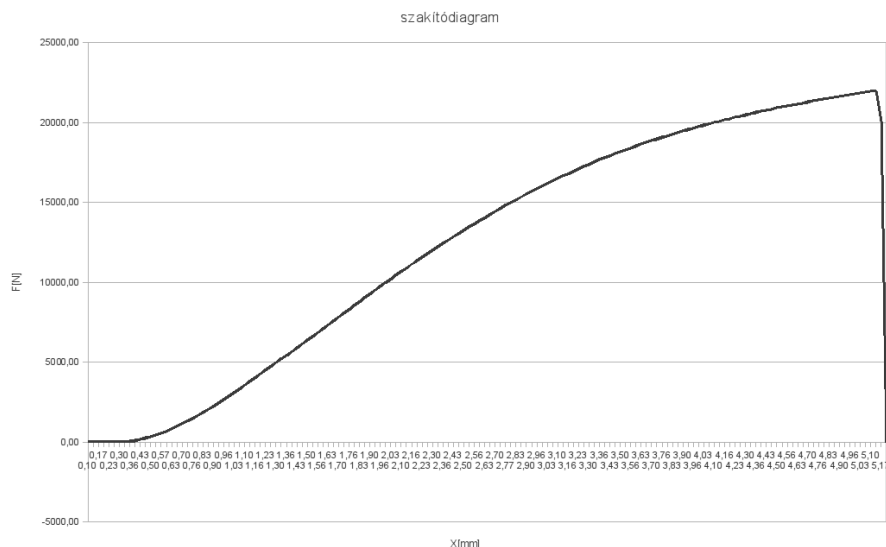


2.4. ábra. A 2011-es pneumobilunk motorja

elemmel adja át az erőt a láncokra⁴. Ez a „B” erőátviteli elem hajlított, S375 anyagú acéllemez.

Munkahengerenként két láncág a „D1” és „D2” jelű görgőkön keresztül fut a „C1” és „C2”-vel jelzett szabadonfutókra. A felhasznált szabadonfutó (racsni) közönséges biciklialkatrész, mégis, az általunk végzett roncsolásos vizsgálat során kiderült, hogy megfelelően erős. A „D” jelű 14 fogú láncgörgők átalakított szabadonfutók, amelyekben csak a csapágyrészt hagytuk meg.

A „B” kocsi tehát az egyik lánc alsó-, míg a másik lánc felső ágával áll kapcsolatban. Így a két lánc mindig ellentétes irányba fut – míg az egyik hajt, addig a másik racsnizik.



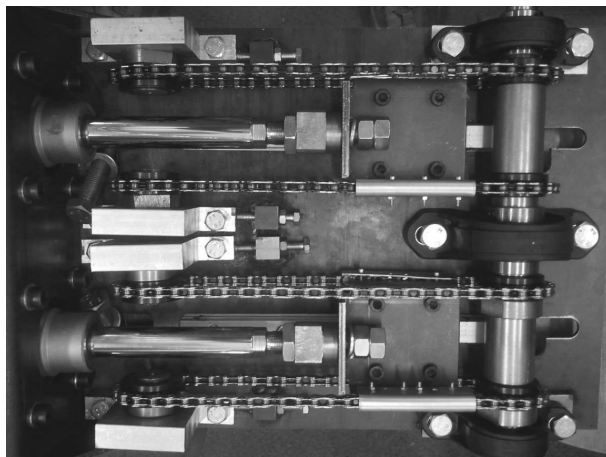
2.5. ábra. Két párhuzamosan befogott láncág szakítódíagramja

A lánc szintén biciklilánc, azok közül egy erősebb fajta, fixiken használják. A 2.5. diagramon látható, nem túl dinamikus szakítóvizsgálat során láncenként $11kN$ -os szakadási erőt mértünk, ami a $7kN$ -os maximális erőnél nem jelent túl nagy biztonsági tényezőt. Ennek ellenére a gyakorlat azt mutatta, hogy a lánc megfelelően erős – köszönhető ez valószínűleg annak is, hogy a szelepeken és a csöveken fellépő nyomásesést jelentősen alulbecsültük és a munkahenger messze nem kapott $10bar$ -os nyomást. Kis ciklusú kifáradás miatt a láncnak néhány ezer munkaütem után el kellett volna szakadnia.

A kocsi és a dugattyúrúd közötti távolság beállítható – ezzel elkerülve, hogy a kocsi beleütközzön a főtengelybe –, valamint a görgők távolságának állításával a láncfeszítés is megoldott. Az összeszerelt motor a 2.6. ábrán látható.

A motor különlegessége az is, hogy a két munkahenger szinte független egységet alkot – a mechanikus konstrukció lehetővé teszi akár azt is, hogy csak az egyik járjon. Ilyenkor a másik henger nem okoz veszteséget, gyakorlatilag ki van iktatva a hajtásláncból. Ezt a versenyszabályzat nem engedi, így ilyen üzemmódot nem használtunk, szoftveresen nem tettük lehetővé. Teszt során kipróbáltuk és természetesen működött.

⁴Az ábrán a láncok nincsenek feltüntetve.



2.6. ábra. Az összeszerelt, de még nem beépített motor fotója.

A független működés előnye az is, hogy az a motort redundánssá teszi; akár a fél motor meghibásodása esetén is üzemképes maradhat a másik fél. Erre sor is került a 2011 őszén rendezett, kecskeméti Pneumobil Gálafutamon⁵, ahol mindkét ág láncrögzítő lemeze szakadt el. Az autó – ha csökkentett teljesítménnyel is, de – fél munkahengerrel is üzemelt.

2.2.1. Hajtáslánc

A motor főtengelyén kúpos szorítókötéssel rögzített agyhoz van csavarozva a kihajtó nagy lánckerék, ami esetünkben 48 fogú. A lánc ugyanolyan, mint amit a motor belsejében is használunk. A hátsó lánckerék 18 fogú és egy nyolc sebességes Shimano agyváltón helyezkedik el, amelynek áttételi viszonya 0,517 és 1,615 között állítható. Az agyváltó belsejében egy szabadonfutó is található, valamint egy kontrafék is – ezt nem tudjuk használni, így felszereltünk egy V-féket.

Az agyváltó fokozatait egy vezérlő bowden segítségével lehet kapcsolni. Sajnos ez nem szekvenciális, hanem abszolút működésű: a bowdent egy rugó ellenében adott mértékig meghúzva a megfelelő fokozatba kapcsolható. Ezt egy szervomotorral próbáltunk automatizálni. A programot megírtam, a berendezést össze is állítottuk, azonban – mivel nem maradt idő a tesztelésre – a versenyen egy kézi kapcsolású, biciklis váltókart használtunk.

2.3. A pneumatikus elemek kiválasztása

2.3.1. A munkahengerek kiválasztása

A hajtással szembeni követelmények

Először vizsgáljuk meg a követelményeket. A versenyen három versenyszám van:

⁵A Gálafutam szabályzata nem tiltja a fent említett, félmotoros működtetést.

Távolsági futam – az egy palackkal megtehető távolság számít, 12km/h minimális átlagsebesség és 2km minimális megtett távolság szükséges a kvalifikációhoz.

Ügyességi futam – avagy gyorsasági verseny. Szlalom pályán mért köridő a rangsorolás alapja, több kört is lehet menni, a legjobb idő számít.

Gyorsulási futam – hosszú egyenes pályán, álló helyzetből történő gyorsulás, az elért időeredmény számít.

Ezek alapján két fő követelmény van: a hajtás

- legyen kis fogyasztású, takarékos és
- legyen nagy teljesítményű, erős.

Látszólag, hétköznapi tapasztalataink alapján ez a két követelmény egymásnak ellentmond. Szerencsére ez nem egészen így van.

Nézzük először a nagy teljesítmény feltételét. Ahogy azt már korábban írtam, a henger által kifejtett erő

$$F = p_t \cdot A$$

ahol p_t a rendszer légkörihez mért túlnyomása, versenykiírás szerint ez maximum 10bar , A pedig a dugattyúfelület, ami a munkahenger átmérőjétől függ: $A = d^2 \pi / 4$. Így a kifejtett erő akkor lesz a lehető legnagyobb, ha a lehető legnagyobb átmérőjű hengert választjuk.

A fenti úton számolt, a henger által kifejtett erőből közvetlenül azonban csak az indítási nyomaték függ. A teljesítményt a dugattyúsebesség és a kifejtett erő szorzataként kapjuk, a dugattyúsebesség pedig összefüggésben van a terheléssel és a légfogyasztással. Vizsgáljuk az utóbbit.

Mivel a versenyen használható, a szervezőktől kapott reduktor adatlapja szerint 10bar maximális néveleges nyomáson körülbelül 900Nl/perc áteresztőképességgel rendelkezik, ez lesz hát a szűk keresztmetszet, erre kell méretezni a rendszert. Ez átszámítva 15Nl/s , azaz 10bar nyomáson $1,5\text{l/s}$. A munkahenger által $\dot{x}$ dugattyúsebességgel fogyasztott levegő $\dot{q} = \dot{x} \cdot A$, tehát a $\dot{q}$ fogyasztáshoz társuló dugattyúsebesség

$$\dot{x} = \frac{\dot{q}}{A}$$

Innen az elérhető teljesítmény

$$P = F \cdot \dot{x} = p_t \cdot A \frac{\dot{q}}{A} = p_t \cdot \dot{q} = 1,5\text{kW}$$

Azt látjuk tehát, hogy az elméleti maximális teljesítmény független a dugattyúfelülettől. Ezek szerint tehát – elméletileg – nem számít, hogy mekkora hengert választunk? Térjünk vissza a kérdésre később.

Vizsgáljuk a kis fogyasztás feltételét: ehhez nem feltétlen kis méretű munkahengerre van szükség, hanem alacsony veszteségűre és takarékos működést megvalósító eszközökre. A veszteség több részből áll össze, ezek közül a legjobban észrevehető a súrlódás.

A súrlódás

A súrlódás komponensei a statikus súrlódás, a Coulomb súrlódás, a Striebeck súrlódás és a viszkózus súrlódás. Ezekről a katalógusok nem tesznek említést és értékük csak körülményes méréssel állapítható meg, ráadásul a súrlódási erők függenek a tömítéseket terhelő nyomásoktól⁶, a tömítések anyagától, azok kopásától, a hőmérséklettől, az érintkező felületek nagyságától, az aktuális dugattyúsebességtől és sok más tényezőtől is.[3]

A sok paramétert nem választhatjuk meg szabadon, de néhányat igen. A dugattyúsebesség csökkentésével – ha az még nem akadozva csúszik – egészen biztosan csökkenthető a súrlódás, ez ráadásul együtt jár a levegőfogyasztás csökkentésével, így a csőhálózaton és a szelepeken, mint pneumatikus ellenállásokon eső nyomás is csökken, ezek szintén a veszteség további csökkenéséhez vezetnek. Érdemes tehát a munkahengert takarékos módon kis sebességen, nagy terhelő erő mellett üzemeltetni.

Az is jól sejthető, hogy az érintkező felületek csökkentésével is a súrlódást csökkentjük. Az érintkező felületek nagysága a kerülettől függ, az pedig a dugattyú (és a dugattyúrúd) átmérőjével egyenesen arányos. Mivel azonban a kifejtett erő és a levegőfelhasználás is a dugattyúátmérő négyzetével arányos, a kisebb hengerek üzemeltetése arányaiban nagyobb veszteséggel jár.

Ha tehát azonos családú munkahengereket vizsgálunk, ahol a tömítések anyaga és a kialakítás alapvetően azonos, és az egyes típusok csupán furatukban és löketükben térnek el, a nagyobb furatú henger lesz jobb hatásfokú.

Választott hengerek

A munkahengerek kiválasztása a motor tervezésével párhuzamosan zajlott. Végül úgy találtuk, hogy tudunk elég erős szerkezetet építeni ahhoz, hogy az a legnagyobb furatú munkahengerrel is biztonsággal üzemeljen.

A tervezés során igyekeztünk a motor befoglaló méreteit minimalizálni, a kompakt kialakítás is fontos volt. Ezért nagy, $d = 100\text{mm}$ -es furatú, $l = 125\text{mm}$ -es rövid löketű hengereket építettünk be. Úgy gondoltuk, hogy a rövid löket nem sok hátrányt okoz majd, ebben azonban tévedtünk.

Egyrészt a munkahengerek holttere is veszteség, rövid lökethossz esetén pedig emiatt arányait tekintve többet pazarol a rövid löketű motor.

Kiválasztás során kicsit megfélekedtünk arról, hogy a munkahengerek vég helyzet-csillapítással készülnek, így a teljes lökethossz kihasználása esetén a végeken – még teljesen kitekert fojtószelepű csillapítás esetén is – további veszteségek lépnek fel. Szintén megfélekedtünk arról, hogy a racsnik holtjátéka is csökkenti a hasznos lökethosszt és rontja a hatásfokot. Emellett, a holtjáték miatt minden egyes irányváltás dinamikusan igénybe veszi a racsnikat és a láncot is, ami az élettartamot biztosan rövidíti.

Mindezek ellenére, vagy mindezek mellett; a koncepció működőképesnek bizonyult, a távolsági futamon is tudtunk felmutatni eredményt és a gyorsulásin sem szerepelt rosszul az autó.

⁶A tömítőfelületeket a nyomásból származó felületi erő szorítja össze.

Takarékos üzemeltetés

A nagyobb henger persze nagyobb fogyasztással jár. Több eszköz létezik arra, hogy csökkentjük a felhasznált levegő mennyiségét:

- fojtás beiktatása
- tápnyomás csökkentése
- részleges feltöltés

Fojtás Fojtás, vagy pneumatikus ellenállás beiktatása esetén a henger feltöltése lassabb lesz, így a dugattyúsebességet, ezáltal a felhasznált levegő mennyiségét csökkenthetjük. A fojtás lehet primer- vagy szekunder oldali aszerint, hogy a tápágba, vagy a leszellőző ágba kötjük be. Az iparban kedveltebb a szekunder oldali fojtás használata, mert egyenletesebb, simább működést eredményez. Fojtás alkalmazása esetén gondoskodni kell annak állíthatóságáról, hogy menet közben a pilóta az aktuális igényeknek megfelelően választhassa meg a dugattyúsebességet. Akár erre a célra gyártott lámpedált is lehet rendelni.

Azért nem célszerű mégsem fojtást alkalmazni, mert – hasonlóan az elektromos ellenálláshoz – mindenképpen elpazarolt teljesítményt jelent. A fojtás egy szándékosan létrehozott szűkület az áramlási keresztmetszetben, ami úgy van kiképezve, hogy turbulenssé tegye az áramlást. Ez a gáz kinetikus energiáját részben hőenergiává alakítja. A fojtáson fellépő nyomáscsökkenés Δp nemlineáris függvénye a $\dot{q}$ térfogatáramnak és a fojtás aktuálisan beállított nagyságának. A teljesítményvesztés $P_{loss} = \Delta p \cdot \dot{q}$.

Tápnymomás csökkentése A versenyen maximálisan $p_t = 10 \text{ bar}$ nyomást használhatunk a pneumatikus rendszerben, de a nyomásszabályzón ennél alacsonyabb nyomás is beállítható, az alkalmazható legkisebb nyomás kb. 3 bar . Egyszerű módszer, teszt közben érdemes is használni, hiszen a kötelezően felhasználandó elemek között szerepel egy nyomásszabályzó, nem elég a reduktor sajátját működtetni.

Rendelhető szervós nyomásszabályzó szelep, ezzel menet közben is könnyedén módosítható táplevegő nyomása. Ez egyébként azt a funkciót tölti be a pneumatikában, mint az elektronikában egy állítható lineáris feszültség szabályozó – és ugyanúgy van vesztesége is. Nem sokkal jutottunk tehát előrébb a fojtáshoz képest, azt leszámítva, hogy könnyebben szabályozható és állítható, de stabil tápünk van.

Részleges töltés Mi történik akkor, ha a munkahengert nem végállásig töltjük? Vegyünk egy kettős működésű munkahengert, és miközben az egyik kamráját folyamatosan leszellőztetjük, kezdjük el feltölteni a másik kamráját! A lökethossz bizonyos része – példának okáért 50%-a – után hagyjuk abba a levegő betáplálását, de ne szellőztessük le az épp töltött oldalt, zárjuk be a levegőt. A bent lévő, közel p_t tápnyomású levegő tovább fogja tolni a dugattyút, eközben pedig munkát végez.

Miközben a dugattyú halad a véghelyzet felé, a bezárt gáz nyomása csökken és az is előfordulhat, hogy – ha nagy a terhelés – meg is áll. Ez a jelenség a módszer alkalmazását megnehezíti, de mégis: miután a feltöltést abbahagytuk, újabb adag levegőt nem vettünk fel a rendszerből, s így alacsony terhelésen úgy oldható meg a teljesítményszabályozás, hogy az nem jár veszteséggel.

A pneumobil versenyen évek óta nyílt titok, hogy ez a megoldás.

2.3.2. A pneumatikus kör tervezése

A pneumatikus kör elemeinek kiválasztása során törekedni kell arra, hogy az áramló sűrített levegő a lehető legkisebb ellenállással haladhasson végig a rendszeren. A csatlakozások számát minimalizálni kell, kerülni kell a könyök-elemeket és a szűkítések. A lehető legnagyobb csőkeresztmetszetet érdemes használni, hiszen azonos térfogatáram mellett a nagyobb csőkeresztmetszet alacsonyabb áramlási sebességet jelent, ez pedig kisebb veszteséget okoz.

Érdemes használni a BOSCH-Rexroth weboldalán található kalkulátorokat[8] – itt adott térfogatáram mellett kiszámíthatjuk az adott átmérőjű csövön, adott térfogatáram mellett kialakuló nyomásesést, illetve a szelepekkel is elvégezhetjük ugyanezt. Méretezésnél nagy segítséget jelent.

Akár a korábban ismertetett módon, 5/2-es útszelepekkel is történhetne a munkahengerek táplálása, ezzel azonban csak a „hagyományos” működés valószínűsíthető meg. A már említett részleges feltöltéshez szükséges, hogy a táplevegő legalább egy 2/2-es szeleppel lezárható legyen. Mivel 2/2-es elektropneumatikus szelep nem volt a katalógusban, ledugózott 3/2-es szelepre lett volna szükség. Így már megoldható a részleges feltöltés és a kettős működés is.

A versenyszabályzat előírja, hogy a vezérlő jel megszűnése esetén a munkahengerek minden kamráját le kell szellőztetni. Tehát csak olyan vezérlés építhető meg, amely árammentes állapotban minden körülmények között nyomásmentesíti a hengereket. Ez a fentebb említett egy 5/2-es és egy 3/2-es szeleppel megvalósított kapcsolást kizárja, hiszen az 5/2-es szelep a henger egyik kamráját mindig nyomás alatt tartja. Így vagy még egy további 3/2-es szelepre lenne szükség, vagy egy 5/3-as szelepre, mindkét megoldás további szelepek beépítését teszi szükségessé.

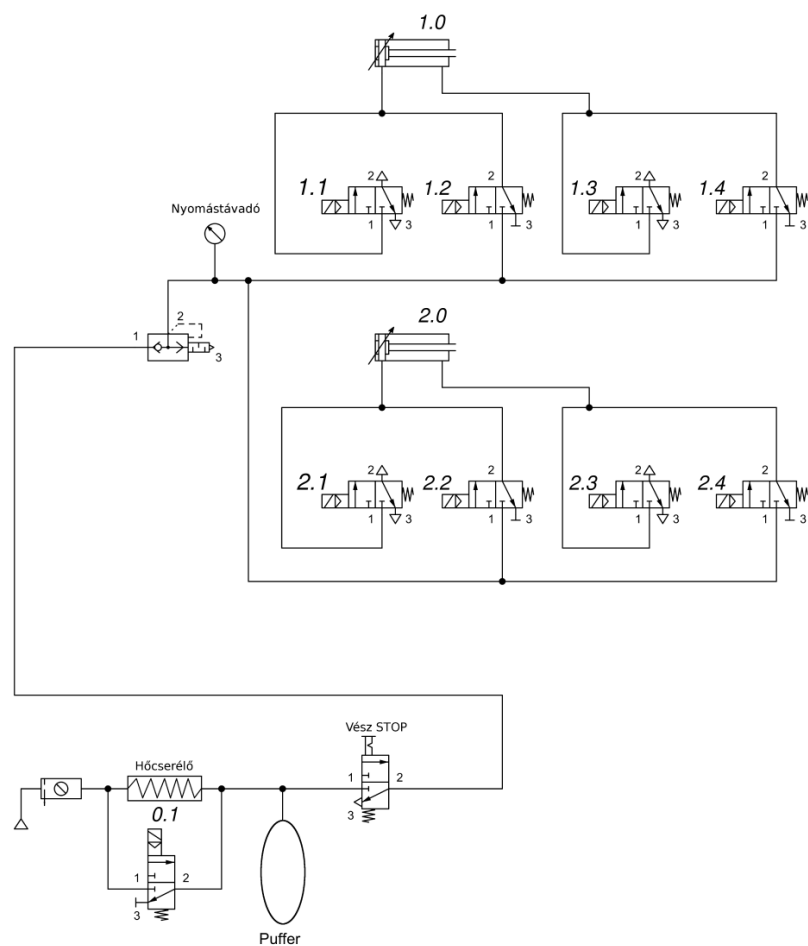
Azonban ha a rendszerhez úgylis további szelepeket kell hozzáadjunk, érdekesebb kicsit egyszerűsíteni a pneumatikus kört. Hagyjuk el az 5/2-es vagy 5/3-as szelepeket és építsünk be kamránként két 2/2-es szelepet. Egyikkel a feltöltést, másikkal a leürítést oldjuk meg. Mivel 2/2-es nem választható, ledugózott 3/2-es szelepekkel építettük meg a rendszert. Ezzel a kapcsolással nagy rugalmasságot értünk el, hiszen bármilyen üzemmódot megvalósíthatunk, amit kétállású szelepekkel meg lehet.

Ennek a több szelepes módszernek az is nagy előnye, hogy a levegő nem több szelepen áramlik keresztül, így nyomásesést mindig csupán egyetlen szelep⁷, a csőhálózat, valamint a csatlakozó- és elosztóelemek okoznak.

A leeresztőoldali 3/2-es szelepeknek külső elővezérlésűnek kell lenniük, hogy a szelepet működtető levegő a mindenkor táplevegő legyen – a leeresztendő nyomásról nem tudjuk biztosan, hogy a szelep minimális működési nyomása felett van.

A 3/2-es szelepek alaphelyzetét úgy választottuk meg, hogy a leeresztőoldaliak nyissanak, míg a tápoldaliak zárjanak. Így a mágnesszelep árammentes állapotában a táplálás megszűnik és a kamra leszellőzik.

⁷Az előzőleg említett megoldások során mindenképp több szelepet kellett volna egymás után kapcsolni.



2.7. ábra. Pneumatikus kapcsolási rajz

Meg nem valósult tervek

A 2.7. ábrán látható pneumatikus kapcsolási rajzon szerepel egy puffertartály és egy hőcserélő is. Ezek a járműbe végül beszerzési problémák és időhiány miatt nem kerültek beépítésre, pedig használatuk indokolt lenne.

A puffertartály egy pneumatikus kondenzátor, ami lehetővé teszi, hogy rövid időre a reduktor által szolgáltatottnál nagyobb térfogatáramot fogyasszanak a munkahengerek. Ez az extra teljesítmény fontos másodperceket is jelenthet kigyorsításkor, kanyar után. Ez veszélyes is azonban, mivel maximális, $p_t = 10\text{bar}$ nyomáson, a két nagy munkahenger így már adott esetben akkora terhelésnek teheti ki a láncot és a racsnikat, amit azok már nem képesek elviselni. Mindemellett a szelepek nagyobbra történő cseréjét is indokolja, lásd később.

A puffertartálynak azonban van hátránya is; hasonlóan elektronikus párjához, – a kondenzátorhoz – a tartály, mint kapacitás veszteséget okoz: a tartályba be- illetve onnan kiáramlás során a gáznak csőhálózaton, csatlakozókon kell keresztüláramolnia, ezek sajnos áramlási veszteséget jelentenek, ami nyomáscsökkenést okoz. Az így elvesztett energia jelentős lehet, mivel – főleg kiáramlásnál – igen nagy térfogatáramok lépnek fel. Tartály beépítésénél tehát erre fokozottan ügyelni kell.

A szelepek kiválasztása

A már ismertetett okok miatt tehát nagy furatú munkahengereket választottunk, amelyek rengeteg levegőt képesek elnyelni. Mivel az áramlási ellenállásra vonatkozó adatok hiányoznak a szelepek katalógusából, csak a névleges áteresztőképességből tudtunk kiindulni.

A BOSCH-Rexrothtól kapott katalógusból több különböző szelep közül is választhattunk. Az általunk végül kiválasztott, kisebb fajta CD4-es szelepek névleges áteresztőképessége 900Nl/perc^8 , ez pedig majdnem annyi, mint a reduktor maximális légszállítása – s mivel más levegőforrásunk, mint például puffertartály nincs – így a szelep elméletileg megfelel.

A fő ok, amiért nem választottunk nagyobb szelepeket, az volt, hogy bár a nagyobb szelepek villamos energiafogyasztása alacsonyabb⁹ lett volna, azok a kapcsolási ideje jelentősen nagyobb. A CD4 szelep 13ms alatt be és 27ms alatt kapcsol ki, CD7 esetén ezek az értékek 25ms és 45ms .^[6] Mivel több tervezett funkció – ezekről később ejtek majd szót – igényelte volna a rövid kapcsolási idejű szelepeket, így ezt nem tartottam jó megoldásnak.

Ezen kívül a választást az is megnehezítette, hogy a katalógus adatlapjáról hiányzott a kapcsolási karakterisztika is – azaz hogyan változik a pneumatikus ellenállás a kapcsolat során, mekkora a holtidő és mekkora az áteresztőképesség felfutásának meredeksége. Ezt kellően gyors nyomásmérő szenzor birtokában, méréssel meg lehet állapítani, erre azonban egyelőre nem került sor.

2.4. Szabályzórendszer tervezése

Ahogy az már kiderült, a rendszerben a sűrített levegő csak munkavégző feladatot lát el, a vezérlést pedig elektronikus úton oldjuk meg.

⁸ $p_t = 6\text{bar}$ nyomáson, $\Delta p = 1\text{bar}$ nyomáscsökkenés mellett – a CD7 szelepnél ez 1400Nl/perc

⁹A CD4 4,8W-ot fogyaszt, míg a CD7 2,1W-ot, 24V DC tekercessel.

2.4.1. Megvalósítandó funkciók

Alternáló működés Legfontosabb feladat, hogy a munkahengerek „normál”, alternáló működtetése biztonságosan megoldott legyen. Úgy kell kialakítani a szabályzórendszert, hogy részleges meghibásodás, szenzorhiba vagy előre nem tervezett üzemállapotok, programhiba esetén is, a rendszer gyengébb paraméterekkel, kevésbé kifinomultan, de üzemképes legyen. Ez az üzembiztonság nagyon fontos kritérium, hiszen adott esetben a csapat kiesése múlik rajta. Nem szabad, hogy egyetlen hibás programsor több ember fél éves munkáját tegye tönkre.

Résztöltés Szükséges továbbá, hogy a megépített rendszer alkalmas legyen a résztöltésre, ráadásul a résztöltés mértékét is állítani lehessen, a vezérlőrendszer pedig lehetőleg ügyeljen arra, hogy az aktuális terhelés mellett a résztöltés ne lehessen túl alacsony, így a henger ne álljon meg.

Mivel a motorunk lineáris működésű, nincs lendítőtömeg, ráadásul a főtenge ly szöghelyzet-érzékelésén alapuló résztöltés nem oldható meg, hiszen nincs forgattyús tengely és a lineáris motor főtenge ly a szabadonfutók miatt nem áll közvetlen kapcsolatban az aktuális lökettel.

Egyik legfontosabb feladatként, meg kell tehát oldani a dugattyú aktuális pozícióijainak érzékelését. Erre több próbálkozásunk is volt, amit később részletezek majd.

Simább irányváltás A munkahengerbe épített véghelyzet-csillapítás célja, hogy a nagyobb sebességű dugattyút még a hengerfedél felérése előtt lelassítsa, így az ne ütközzön bele abba. Ezt úgy oldják meg, hogy a dugattyú mindkét végén egy kisebb átmérőjű henger van, amelyek egy-egy, a fedélen kialakított fészekbe csúsznak bele, lecsökkentve ezzel az effektív dugattyúfelületet. Ráadásul az ebbe a kamrába beszoruló levegő egy állítható fojtáson keresztül áramolhat csak ki a henger csatlakozója felé, így ez jelentős csillapítást okoz. [2] A véghelyzet-csillapítás akkor is jelentős, ha a löketvégi fojtásokat a lehető legkisebbre állítjuk.

Ha pontosan és megbízhatóan működő pozícióérzékelőnk van, javíthatunk az irányváltás során fellépő veszteségeken. A véghelyzetek miatti csillapítás elkerülhető, ha – bár kellő tömeg van közvetlen kapcsolatban a dugattyúval¹⁰ – a véghelyzetet nem engedjük elérni.

Ha az éppen leszellőztetett kamrát már a végállás elérése előtt lezárjuk és idejekorán tápnyomásra töltjük, az aktív oldalt pedig leszellőztetjük, akkor nem csak, hogy a dugattyú nem ütközik fel, de – a lökethossz csekély rövidülése árán – dinamikusabb és kevesebb veszteséggel járó irányváltáshoz jutunk. Ha a mozgó rész tehetetlensége nagyon nagy, érdemes lehet a kamra feltöltése után azt lezárni, hogy a tehetetlen tömeg lendületéből adódóan az ott lévő gázt rugóként összenyomja.

A módszer kidolgozásához komoly elméleti háttérre van szükség, ismerni kell a pneumatikus munkahenger működését leíró differenciálegyenleteket, valamint meg kell határozni az abban szereplő paraméterek numerikus értékét. Pontosán ismerni kell a henger geometriáját – beleértve a véghelyzet-csillapítást is – és a mozgó rész tömegét, valamint az aktuális külső terhelés nagyságát is. További

¹⁰ Azaz esetünkben a racsnis rész előtt helyezkedik el, például a 2.4. ábrán „B”-vel jelölt kocsin.

fontos információ a szelepek kapcsolási karakterisztikája – ezt is méréssel kell megállapítani.

Az éppen fellépő külső terhelés valós időben jól megbecsülhető, ha az aktuális tápnyomás ismert és a dugattyúsebesség folyamatos, pontos mérésére lehetőség van.

Összességében tehát egy egyszerű elvről van szó, amelynek megvalósítása sok modellezést és valós idejű, pontos mérést igényel. Ez a funkció így nem készült el, de a megépített rendszer képes lenne ennek megvalósítására.

Gyors nyomatékszabályozás Az ügyességi futamon fontos lehet, hogy a motor nyomatéka finoman állítható legyen. Ehhez először is egy olyan gázpedálra van szükség, ami nem csak egy két állású kapcsoló. Mi ezt egy forgó potenciométerrel előállított analóg feszültségjellel oldottuk meg. Eleinte azt terveztük, hogy a gázpedál tengelyére két potenciométert szerelünk és így redundáns működést valósítunk meg, akár csak a személygépjárművekben. Erre végül nem került sor.

A gázpedál felbontása azonban nem minden; szükséges az is, hogy a gázreakció jó legyen. Az alapvetően lassú működés miatt nem elfogadható az, hogy az új gázállásnak csak a következő munkaütem során legyen hatása.

Ezekre a követelményekre megoldást jelentene a már említett, szervoműködtetésű nyomákszabályozó szelep. A feladat viszont kellően gyors szelepekkel enélkül is megoldható.

Elektronikából ismerős lehet a PWM¹¹ módszer. A motor vezérlése ilyenkor úgy történik, hogy a munkahenger kívánt irányának megfelelően, az egyik kamrát folyamatosan leszellőztetjük, míg a másik oldal feltöltő-szelepére kapcsolt vezérlő jel kitöltési tényezőjét a gázpedál állásának függvényében változtatjuk. Azaz például $T_c = 100ms$ -os ciklusidőt alkalmazva, ha az x gázállás 0 és 100 közötti értéket vehet fel, akkor a feltöltő szelepre $x ms$ ideig kapcsolunk vezérlő jelet, míg $100 - x ms$ ideig a szelep zárva van, levegő-utánpótlás nincs, a bezárt gáz munkát végez.

Ezzel a módszerrel az aktív kamra átlagos nyomását tudjuk szabadon állítani, bár ez a gázpedál helyzetétől nem lineárisan függ. Az éppen feltöltést végző szelep gyakran kapcsol, ez pedig rövidíti az élettartamát, mivel sokszor van tranziens állapotban, rajta a veszteség nagyobb lesz. A folyamatos kapcsolás miatt kattogó hangot ad, egyeseket ez varrógépre emlékeztetett.

A módszer nem tökéletes, gázelvételre nem reagál hirtelen. Úgy lehet ezen javítani, ha a folyamatos leszellőzést is lehetővé tesszük. Így a módosított kapcsolás úgy néz ki, hogy az új ciklusidő legyen $T_c = 100ms$, és ha a gázállás $x \geq 50$, akkor a feltöltő-szelep $2 \cdot x - 100 ms$ ideig legyen nyitva, a töltőoldali légtelenítő-szelep pedig végig zárva, míg ha a gázállás $x < 50$, akkor a feltöltő-szelep végig zárva van, a leszellőző-szelep pedig $2x ms$ -ig nyitva van.

Alternatíva lehet még a fékpedál állásának figyelése és a fékezés esetén történő leszellőztetés, ehhez csak egy további pedáljeladó vagy fékkapcsoló beépítése szükséges.

¹¹Pulse Width Modulation: Impulzusszélesség-moduláció.

2.4.2. Adatfeldolgozó és vezérlő egység

A PLC

A korábban említett feladatok megvalósítása célszerűen valamilyen számítógépes irányítási rendszerrel történhet. Ipari rendszerek gyakran alkalmaznak PLC¹²-ket. A PLC komolyabb feladatokra is alkalmas be- és kimenetekkel¹³ is rendelkezik, így egy PLC egységre közvetlenül ráköthetők a szenzorok és a szelepek.

A PLC-k lelke általában egy mikrokontroller, amely néhány tíz, esetleg száz MHz-es órajelen jár, és egy nem felejtő tárban – célszerűen flash memórián – tárolt programot hajt végre.

A PLC-k a kimenetek értékének tényleges módosítását nem valós időben végzik, hanem a programfutás úgynevezett SCAN ciklusokban történik. Egy ilyen SCAN ciklus típustól függő fix ideig fut, általában 50ms-ig. Ezalatt történik meg a bemenetek beolvasása, a programvégrehajtás, majd a kimenetek megváltoztatása. Léteznek gyorsszámláló egységek, amelyekkel ennél rövidebb impulzusokat is beolvashatunk.

Bár a versenyt szervező BOSCH-Rexroth a csapatok számára biztosít PLC-t, mi nem éltünk a lehetőséggel, inkább egy saját vezérlőt építettünk. A Rexroth PLC-ivel én még nem foglalkoztam közelebbről, így alábbi tapasztalataimat más gyártmányú készülékek használata során szereztem. Ezen okok miatt döntöttünk a saját rendszer mellett:

ár A PLC-k igen drága eszközök, s bár a BOSCH-Rexroth – hasonlóan a többi elemhez – a csapatok számára azt térítésmentesen biztosítja, beépítése nagy felelősséget jelent. Ha saját hibánkból tönkretesszük és a szervezők esetleg nem adnak egy másik eszközt, biztosan nem tudunk újat vásárolni.

szerelhetőség A PLC-k nem igazán szétszerelhetőek, illetve nem sok minden javítható van bennük. Ha a ki/bemenetek száma nem elegendő, újabb I/O modul csatlakoztatásával lehetséges a bővítés, saját eszközökkel nem.

rugalmasság A SCAN ciklus fix ideje, a csak külön modullal megoldható feladatok a felhasználást számunkra nehezíti, a próbálkozásokat, kísérletezéseket körülményessé teszi. A fent említett követelmények nem, vagy csak nagyon nehezen oldhatóak meg PLC-vel.

kényelem PLC-programozás során eddig nem sok jó tapasztalatot szereztem. A használható programnyelvek kényelmetlenek, egészen más féle gondolkodást követelnek meg. A fejlesztőkörnyezet körülményes és biztosan nem fut Linux alatt. Számomra ez fontos szempont.

kihívás A PLC-s megoldás egy biztosan járható út, de az eszköz megismerésén kívül sok feladatot nem rejt. Saját rendszer fejlesztése nehezebb, de több tapasztalattal kecsegtet.

Szeretném kiemelni, hogy a fentiekkel nem kívánom a Rexroth IndraControl L10 PLC-ket minősíteni, egyszerűen itt nem azokat az ipari vezérlési feladatokat kell megoldani, amihez a PLC-ket tervezték.

¹²Programmable Logic Controller, programozható logikai vezérlő.

¹³Akár közvetlenül a hálózati feszültség is kapcsolható némelyik típussal.

Saját rendszer

Ha nem használunk PLC-t, akkor az ott készen kapott illesztőáramköröket magunknak kell megvalósítani. A saját vezérlő központi eleme szintén egy mikrokontroller. A mikrokontroller egy olyan integrált áramkör, ahol egyetlen tokban található egy mikroszámítógép, valamint annak tápegysége, órajel-generátora, memóriái, perifériái.

Az Atmel ATmega családjában olcsó 8-bites RISC mikrokontrollereket találunk, 20MHz-es maximális órajellel. Típustól függően 512Byte – 8kByte RAM és 1kByte – 256kByte flash memóriával rendelkeznek. Ezek Harvard-architektúrájúak: az adat- és programmemória különálló egységet alkot és külön buszon helyezkedik el.

Ezek a mikrovezérlők tartalmaznak egy, vagy több számlálóáramkört, AD-konvertert¹⁴, kommunikációs perifériákat. A mikrokontrollerek rendelkeznek külső- és belső megszakítás-forrásokkal: valamilyen esemény hatására a processzor a programvégrehajtást felfüggeszti, és a megszakítás forrásától függő memóriacímen tárolt kódot hajtja végre. A megszakításkezelő rutin végrehajtása után visszatér oda, ahol előtte járt.

Az AVR családot több okból kedvelem: kedvező áron, könnyen beszerezhetőek, programletöltésük lényegében egy egyszerű SPI kommunikáció, az interneten rengeteg információ érhető el hozzájuk. A gyártó által kiadott dokumentáció jól érthető és részletes. Mindezek mellett, szabadon elérhető, nyílt forrású fejlesztőeszközök állnak rendelkezésre – számomra legfontosabb az AVR-libc, amivel a GCC nevű fordítóprogram alkalmassá tehető arra, hogy ATmega architektúrára fordítson C/C++ nyelven írt kódot.

Az Arduino projekt

„Az Arduino egy nyílt forrású elektronikai platform, amely rugalmas, könnyen használható hardveren és szoftveren alapszik. Művészeknek, grafikusoknak, hobbistáknak és mindenkinek, aki szeretne interaktív eszközöket vagy környezeteket létrehozni. (...)

A panelek kézzel összeépíthetők, vagy megvásárolhatók – a szoftver szabadon letölthető. A hardver tervdokumentációja (a CAD fájlok is) open-source licenc alatt elérhető, szabadon átalakíthatod azt igényeidnek megfelelően.”[4]

Az Arduino projekt Ivrea-ban, Olaszországban indult 2005-ben, hogy a hallgatók számára az akkoriban elérhető fejlesztőplatformoknál elérhetőbb alternatívát nyújtson. 2010 februárjáig több, mint 120 ezer darab Arduino panelt adtak el világszerte. A két alapító, Massimo Banzi és David Cuartielles a projektet Arduin of Ivrea után nevezték el, a város legjelentősebb történelmi alakja után. Az Arduino egy olasz férfinév, jelentése „erős barát”.

Az Arduino a nyílt forrású Wiring platformból jött létre. A Wiring-et egy kolumbiai művész és programozó hozta létre, egy diplomamunka keretein belül, az Interaction Design Institute Ivrea-nél. A Wiring a fejlesztőkörnyezetét a Processing-től vette át, amely Casey Reas és

¹⁴Analog-digitális átalakító, analog feszültségjelet képes diszkrét numerikus értéké alakítani.

Ben Fry keze munkáját dicséri. Ez egy java-ban írt, multiplatformos adat-vizualizációs szoftver.[5]

Az Arduino tehát egy open-source hardver- és szoftverplatform. A választás azért esett erre, mert egy arduino-kompatibilis panel olcsón beszerezhető az internetről, a platform jól dokumentált, könnyen használható. A panelon lévő mikrokontroller felprogramozásához semmilyen speciális hardverre nincs szükség – az az integrált USB-soros kapcsolaton keresztül megtörténik.

Az Arduino nem csak hardvert ad, hanem szoftvert is: kapunk egy integrált fejlesztőkörnyezetet – azaz IDE-t –, ami segít a fordítás és programletöltés automatizálásában. Az IDE Windows, Linux és OS X platformokra érhető el és az `arduino.cc` weboldaltól letölthető.

A programozás C++ nyelven történik, ráadásul az Arduino IDE-vel együtt a mikrovezérlő belső hardvereit kezelő, egyszerűen használható függvényeket is kapunk. Így például egy analóg érték beolvasásához elegendő meghívni az `analogRead(pin)` függvényt – ennek elég átadnunk azt, hogy melyik analóg lábat használja, s visszatérési értéke az olvasott érték lesz.

Összehasonlításképp, ha pusztán az AVR-libc-re – egyébként erre épülnek az Arduino egyszerűsített függvényei is – támaszkodhatunk, a fenti művelet leegyszerűsítve nagyjából így néz ki C nyelven:

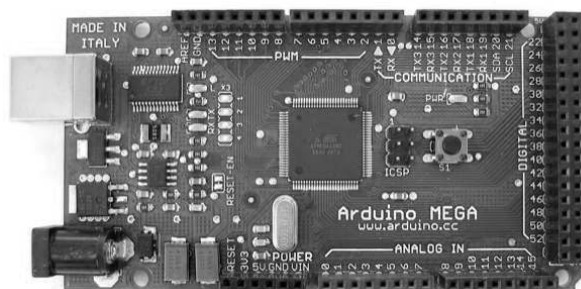
```
ADCSRA |= (1 << ADPS0); // Set ADC prescaler
ADMUX |= (1 << REFS0); // Set ADC reference to AVCC,
ADMUX |= (1 << ACME); // ADC0 as source selected
ADCSRA |= (1 << ADEN); // Enable ADC
ADCSRA |= (1 << ADSC); // Start A2D Conversion
```

Az Arduino nagyszerűségét nem csupán abban látom, hogy nem kell újból és újból feltalálni a kereket, és ezeket a függvényeket saját magunknak megírni. Ami nagyon tetszik, hogy egyszerűbben el lehet intézni a rutinfeladatokat és több idő marad a tényleges probléma megoldására. Enged elvonatkoztatni, az absztrakció szintjét megemeli – s ezzel együtt nem zár be egy lebutított parancsokból álló környezetbe; ugyanúgy hozzáferek a hardverhez közvetlenül. Így a fentebb leírt, hosszabb kód egy Arduino sketch-ben¹⁵ is tökéletesen használható. Így az Arduino rendszer a lehetőségeinket egy „mezítlábas” mikrokontrollerhez képest csupán bővíti, gyakorlatilag kompromisszumok nélkül.

Itt jegyezném meg, hogy véleményem szerint a hatékony fejlesztéshez tisztában kell lennünk a hardver elvi felépítésével, a működés módjával, az alacsony szintűvel is. Mindemellett nem szabad elveszni a részletekben – csak akkor kell az optimális megoldásra törekedni, ha az feltétlen szükséges. Ha egy megfelelő megoldás gyorsabban leprogramozható, mint a legjobb, akkor felesleges magunktól időt rabolni. Ha a feladat pedig megkívánja – számítási teljesítmény vagy memória hiány lép fel – nekiláthatunk az optimalizációnak.

A pneumobilunk központi logikai egységét tehát egy Atmel ATmega1280-as mikrokontroller biztosítja, ami egy, a 2.8. ábrán látható, Arduino Mega1280-as panelon foglal helyet. A mikrovezérlő 16MHz-es órajelen jár, 128kB programmemóriát tartalmaz, 8kB RAM-mal rendelkezik. Találunk még rajta több

¹⁵Az Arduino IDE sketch-nek (vázlatnak) nevezi a programokat.



2.8. ábra. Arduino Mega1280

USART-interfészt¹⁶, és több egyéb periféria mellett $4kB$ EEPROMot¹⁷.

Van tehát egy eszközünk, amivel – a feladathoz képest – kellően bonyolult programot tudunk gyorsan végrehajtani, azonban nincs még tápegységünk, valamint a ki- és bemeneteket is illeszteni kell...

2.4.3. Teljesítményelektronika

Az ATmega1280-as IC GPIO¹⁸ lábain kimeneti módban egyenként $20mA$ -t tud szolgáltatni vagy elnyelni, kimeneti feszültségszintjei pedig $0V$ és a tápfeszültség, ami esetünkben $5V$.

A lábakat bemenetként használva azokra legfeljebb a tápfeszültség kerülhet és nem kapcsolhatunk rájuk negatív feszültséget. A bemenetek Schmitt-triggeresek,¹⁹ ez a zavarvédelem szempontjából fontos. Emellett minden lábon találunk egy-egy szoftveresen kapcsolható, kb. $20k\Omega$ -s felhúzó-ellenállást, amellyel szükség esetén a tápvonalra köthetjük a lábat.

Mágnesszelep-meghajtó

Világosan látszik tehát, hogy a mágnesszelepek meghajtására a mikrovezérlő önmagában messze nem elég. A választott szelepek $24V$ DC tekercssel vannak ellátva, névleges teljesítményük $4,8W$. Innen egyszerűen kapjuk, hogy névleges áramuk $I = P/U = 0,2A = 200mA$. Figyelni kell azonban arra, hogy egy induktív fogyasztóról van szó, amely kikapcsoláskor veszélyes feszültségcsúcsot okozhat, ha nem kezeljük megfelelően.

A szelepek meghajtására tehát egy vezérelt kapcsolót kell alkalmazni. A kapcsoló működtető feszültsége legfeljebb $5V$ lehet, a működtetéséhez szükséges maximális áram pedig $20mA$. Ilyen paraméterű relét persze nem kapni, a relék inkább a szelepeinkkel tartoznak egy kategóriába. Ezért van szükség még egy, közbenső fokozatra, amelyet a mikrovezérlő képes működtetni, ő maga pedig képes a relé áramának kapcsolására. Ez a közbülső elem egy tranzisztoros

¹⁶Universal Synchronous Asynchronous Receiver / Transmitter – univerzális szinkron/aszinkron adóvevő, többek között a hagyományos, soros kommunikáció megvalósítására is alkalmas.

¹⁷Electrically Erasable Programmable Read-only Memory – elektronikusan törölhető, programozható csak olvasható memória: az adatok számára szolgál háttértárként.

¹⁸General Purpose Input/Output - általános felhasználású ki/bemenet

¹⁹A Schmitt-trigger egy hiszterézis megvalósító áramkör.

kapcsolófokozat.

Ha azonban szétnézzük a manapság kapható tranzisztorok között, azt találjuk, hogy szép számmal akadnak olyan FET-ek²⁰, amelyek nem csak a relé, de a szelepek meghajtására is bőven használhatók, s ráadásul az áruk is igen kedvező. Így tehát, nincs is szükségünk a relére, az egész kapcsolás kevesebb alkatrészből állhat, kevesebb a meghibásodás lehetősége.

A legegyszerűbb, „egy alkatrészes” megoldás egy n-csatornás MOSFET alkalmazása lenne, ez azonban több problémával járna. A MOSFET-ek érzékeny eszközök hírében állnak, s nem engedhetjük meg azt, hogy egy esetleges rövidzár, vagy átmeneti túlfeszültség a tranzisztor kimenetén tönkretegyje azt. Nem is a tranzisztor miatt, hiszen az különösebb gond nélkül cserélhető, hanem azért, mert egy meghibásodott FET zárlatba mehet át, s így – ha a 24V-os táp rossz helyre jut – a vele kapcsolatban álló mikrokontrollert is tönkretetheti, ezzel sok borús tekintetet okozva. („Füstbe ment terv.”)

Ezt a lehetőséget azért is szerettem volna minden kétséget kizárólag kiküszöbölni, mert egyszer már pórul jártam így: a „Magyarok a Marson” versenyre épített robotunk ért csúfos véget egy kissé zárlatos DC-motor miatt. Nem vállaltam tehát azt a felelősséget, hogy egy ilyen érzékeny alkatrészre bízam a csapatot.

Az n-MOSFET másik hátránya az, hogy ezt itt célszerűen csak úgy lehet bekötni, hogy a testet kapcsolja a szelepre; a szelep tekercsének egyik vége folyton a +24V-os tápon kell legyen, míg a másik kivezetést kötjük a FET (kapcsolható) drain kivezetésére. Ez azért probléma, mert – az autóiparban megszokott módon – a vázszerkezet testpotenciálón van. Kellemesebb tehát, ha a táp oldalt kapcsoljuk és nem a 0V-ot.

Az utóbbi probléma megoldásához vagy egy FET-meghajtót használunk, vagy n- helyett p-MOSFET-et. Ha p-csatornás FET-et használunk, arra kell ügyelnünk, hogy egy logikai inverterre is szükségünk lesz. A pMOS akkor nem vezet, ha a gate-je közel drain-potenciálón van, esetünkben ez $U_T = +24V$. Hogy nyisson²¹, a gate-jét alacsonyabb potenciálra kell kapcsolni, de az nem lehet kisebb $U_D - 20V$ -nál.²² Ismét úgy fest, a dolog mindenképp bonyolult lesz.

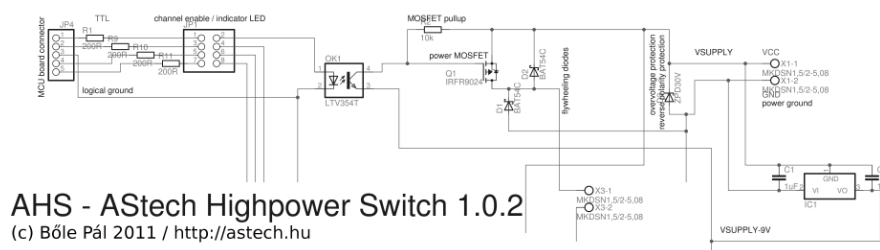
Szerencsére a két problémát egyetlen trükkel megoldhatjuk. Az úgynevezett optocsatolók olyan eszközök, melyek belseje egy LED-et és egy fototranzisztor rejt. Ez a két alkatrész egymástól galvanikusan el van szigetelve, de egyetlen tokba vannak beépítve, s így akár 3000V feszültségkülönbségnek is ellenáll. Ezt alkalmazva tehát akkor sem okozunk semmilyen problémát a mikrokontrollernek és így a rendszer egészének, ha valamilyen baleset okán az optocsatoló kimeneti tranzisztorja tönkremenne.

A 2.9. ábrán látható kimenő fokozat tehát a következő elemekből áll össze: a mikrokontroller felől jövő „logikai 1” jel (5V) az optocsatoló LED-jét működteti, s az vezetésbe viszi a vele egy tokban lévő tranzisztor. Ez a tranzisztor a kimeneti p-MOSFET gate-jét húzza $U_{G_{on}} = U_D - 9V$ -os feszültségre, amit egy 7909 típusú negatív feszültségstabilizátorral állítunk elő. Ekkor tehát a kimenetet $U_T = +24V$ tápra kapcsoljuk. Ha a mikrovezérlő alacsony feszültségű

²⁰Field Effect Transistor, térvezérelt tranzisztor. Három lába van, ezek rendre „source”, „drain”, és „gate”. Kis egyszerűsítéssel, a gate-re kapcsolt vezérlő feszültség hatására a source és drain közötti kapcsolóként viselkedik.

²¹Tranzisztoroknál a nyitáson vezetést értünk, azaz pont fordítva, mint kapcsolóknál.

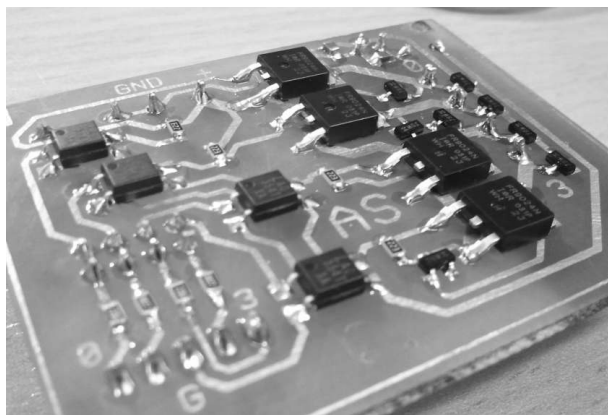
²²Nagyobb feszültségkülönbség hatására a gate pár száz nanométeres, vékony fém-oxid szigetelése átszakad, tönkretéve a tranzisztor.



2.9. ábra. A kapcsolóelektronika egyetlen csatornája

(0) jelet ad, a LED nem világít, a fototranzisztor nem vezet, s a gate kapacitás egy $R_{pullup} = 10k\Omega$ -os ellenálláson át $U_D = U_T$ feszültségre töltődik és a FET zár.

Ezekből a meghajtófokozatokból négyet terveztem egy panelra. Azért nem mindet egyre tettem, hogy egy esetleges meghibásodás esetén kisebb egységeket lehessen külön-külön cserélni. Azért nem tettem mindet külön-külön, mert jóval több helyre lett volna szükség hozzá és például 7909-es stabilizátorból így elég volt egyet használni panelenként. Hat ilyen panelt készítettem, a nyomtatott áramkört Eagle-ben²³ rajzoltam és otthon gyártottam le.



2.10. ábra. Optoleválasztott mágnesszelep-meghajtó

NYÁK-gyártás otthon Röviden szeretném ismertetni a nyomtatott áramkörti lapok háztáji előállításának egyik módját. A kapcsolási rajz alapján megterveztem a nyomtatott huzalozást. A rajzolat tükörképét lézernyomtatón, magas toner denzitással nyomtattam ki egy fényes felületű, úgynevezett műnyomó papírra – a festék legnagyobb része a papír felszínén található. A nyers nyáklemezről²⁴ egyre finomabb csiszolópapírral eltávolítottam a felületi oxidréteget, majd zsírtalanítottam. Az így előkészített lemezre tintával lefelé ráfektettem a kinyomtatott papírt, s egy közönséges vasalóval rávasaltam a lapot. A lézernyom-

²³<http://cadsoft.de>

²⁴Ez egy üvegszál-erősített, 1 – 2mm vastag műanyag lap, amelynek egyik, vagy mindkét oldalára gyárilag kb. 70µm sárgaréz-réteget gözőlnek fel.

tató tonerje egy termoplaszt polimer, így a vasaló hőjétől az újból megolvadt. Az olvadt toner a nyák felületéhez is hozzátapadt, de a papírt természetesen nem engedte el. Rövid hűtés után a nyákot vízbe dobva úgy fél óra alatt a papír annyira felázik, hogy kézzel könnyedén lehúzzható – a nyáklemezen most ott van a toner, ahol később a vezetópályákat szeretnénk kialakítani. A nem kívánt réz eltávolítása vas(III)-klorid oldatos maratással történt: a vas(III) atomok vas(II)-vé redukálódnak, miközben a réz oxidálódik réz(II)-vé és oldatba megy – a műanyag toner a folyamatban nem oxidálódik és így megvédi az alatta lévő rézfóliát. A nagyjából fél órás maratófürdő után a toner eltávolítása valamilyen szerves oldószerrel, célszerűen acetonnal történik, az utolsó lépés a szükséges furatok elkészítése.

Tápegység

Nem beszéltünk még arról, honnan kapjuk majd a vezérléshez szükséges villamos energiát.

Az akkumulátorok kérdése is nyitva áll. A tömeg minimalizálása miatt célszerű lenne a szükséges energiát valamilyen lítium-ion akkumulátorban tárolni, tekintettel azok igen jó energiasűrűségére. Van azonban két hátrányuk, ami miatt mégis zselés savas ólomakkumulátor mellett döntöttünk: a magas ár és az érzékenység.

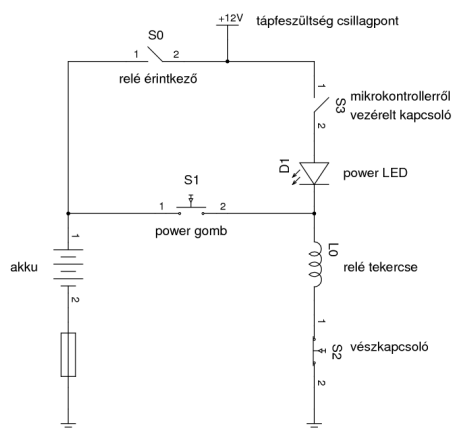
Korábban említettem, hogy a szelepek vezérlőfeszültsége 24V DC, az elektronikus rendszerek pedig 5V-ot igényelnek. Szerencsére az Arduino panelen találunk egy lineáris feszültségstabilizátort, ami a szükséges, stabil 5V-ot előállítja, így ezzel nem kell foglalkoznunk.

A 24V előállításának triviális módja az, a legtöbb csapatnál is látható megoldás, hogy két darab, 12V-os zselés akkumulátort sorosan kötnek be. Ezzel a megoldással az a baj, hogy a két akkumulátort együtt kell tölteni, és ha tartalékra is szükség van, akkor már négy akku kezeléséről kell gondoskodni. Ezen kívül megnövekedett tömeget jelent, a költségeket pedig növeli. Még egy probléma, hogy a sorba kapcsolt akkumulátorokat nem helyes a középen megcsapolni, 12V-os feszültség előállítására; ez eltérő kisülést jelent, ami az összkapacitást csökkenti.

A 24V kérdését mi egy kapcsolóüzemű DC/DC átalakítóval oldottuk meg. Ez az úgynevezett step-up vagy boost-konverter 10V – 14V között bármilyen feszültségből képes stabil 24V-ot előállítani, 3A terhelhetőség mellett, ami számunkra több, mint elég. Szerencsénkre találtunk egy autós laptop töltőt, ami a fent említett paramétereket nyújtotta, ára alacsonyabb volt, mint egy újabb akkué, tömege pedig kisebb.

Vészkapcsoló A versenyszabályzat előírja, hogy a járművet el kell látni egy vészkapcsolóval, amelyet működtetve az egész rendszer azonnal feszültségmentesíthető. Személy szerint nem tartom jó ötletnek, ha a rendszer „normál” főkapcsolóját használjuk vészkapcsolónak, hiszen akkor a vészmegállítót kell üzemszerűen kapcsolni. Ezek miatt a következő kapcsolást alakítottam ki:

Az akkumulátor negatív pólusa egy olvadóbiztosítékon keresztül a jármű vázával folyamatosan fémes kapcsolatban van. A pozitív pólus egy relé érintkezőjén keresztül a központi táp-csillagpontba fut. A relé tekercsével sorba kötöttem a vészgombot bontókapcsolóként, így az bármilyen körülmények között megszakítja a relé tápellátását, így a csillagpont feszültségmentes állapotba kerül. A



2.11. ábra. A villamos táplálás

relé tekercsét két dolog képes működtetni: egy, a központi csillagpontról táplált kapcsolótranszisztor, amelyet a processzor vezérel, valamint egy bekapcsoló nyomógomb, amely közvetlenül az akkumulátor pozitív sarkát kapcsolja a tekercsre – itt természetesen mindig a vészkapcsolóval sorba kapcsolt tekercset kell érteni.

Így tehát a műszerfalon elhelyezett „power” gombbal lehet a rendszert áram alá helyezni, amit nyomva kell tartani, amíg a mikrovezérlő nem kapcsolja be a kijelzőkkel együtt a tartótranszisztort. Kikapcsolást a menüből lehet kezdeményezni²⁵, ekkor a processzor az aktuális paramétereket a nem felejtő tárhoz menti, majd a tranzisztor kikapcsolásával kikapcsolja önmagát is. A rendszer előnye az is, hogy kikapcsolt állapotban egyáltalán nincs áramfelvétel, mégis lehetőség van a kikapcsolási öndiagnosztikára, késleltetett kikapcsolásra. Az ötletet a személygépkocsokban manapság használt motorvezérlő elektronikáktól kölcsönöztem.

2.4.4. Szenzorok

Szögadó

Korábban már részleteztem a megvalósítandó funkciókat, ott pedig említettem, hogy nagy szükség van a munkahengerek pozíciójának érzékelésére. A mi motor-kialakításunk mellett a főtengely helyzetének érzékelése nem járható út, más megoldást kell tehát találni. A 2.4. ábrán²⁶ megfigyelhetjük, hogy az ott „C”-vel jelölt görgő elfordulása arányos a dugattyúrúd elmozdulásával. Elegendő tehát, ha egy szögérzékelőt vagy elfordulás-érzékelőt teszünk a „C” jelű lánckerékre.

A motor fotóján (2.6. ábra) látszik, hogy igen kis hely áll rendelkezésre. Úgy tűnt, megtaláltuk a megoldást egy mágneses enkóder képében. Ilyen például a Melexis MLX90316-os típus, amely egyetlen tokban három analóg mágneses tér érzékelőt, AD-átalakítót és egy feldolgozóprocesszort is tartalmaz, így a kimenő

²⁵Egy egyszerű trükkkel a power gomb újbóli működtetésével is lehet kikapcsolást indítani, ezt azonban nem részletezem most.

²⁶Lásd: 15. oldal

jele már az aktuális szög lehet. A működéshez szükséges még egy ritkaföldfém mágnes elhelyezése a tengely középpontjában. Mikor már kezdtem azt hinni, hogy ilyen jól megoldottam a problémát, elkezdtek előjönni a gondok.

Az első gond az volt, hogy ezt az IC-t szinte sehol nem árulták. Egyetlen esélyként az USA-beli DigiKey-től rendeltem hat darabot, egy amerikai ismerősön keresztül, hogy az eladó horrorisztikus külföldi szállítási költségeit csökkent-sük. Néhány hét alatt meg is érkeztek a chipek, s ekkor döbbsenünk rá arra, hogy ezeket először fel kell programozni a gyár saját, speciális programozó-áramkörén keresztül. Kénytelenek voltunk más megoldás után nézni.

Nem is tudom, hogyhogy nem akadtam bele korábban, de nem csak a Melexis gyárt ilyen IC-eket, sőt; a Melexis épp pert veszített szabadalombitörítés miatt az Austriamicrosystems-szel szemben. Az Austriamicro mágneses szögadó IC-it jobban szemügyre véve csodálkoztam rá, hogy azok sok szempontból jobbak, gyárilag beléjük van égetve a program és ráadásul ingyenes termékmintát is lehet igényelni. Három nappal később a kezemből is tartottam az AS5040 típus néhány példányát.

Az AS5040 10 bites pontosságú, így a felbontás $360^\circ/2^{10} \approx 0,35^\circ$. Az IC rendelkezik digitális SPI kimenettel is, de használható inkrementális módban is. Itt két, fázisban 90° -kal eltolt négyszögimpulzus jelzi az elmozdulást, a fázissorrend pedig a forgásirányt.

A következő meglepetést a működéshez szükséges mágnes beszerzése okozta. A gyár által kiadott útmutató alapján tisztában voltunk a szükséges mágnes paramétereivel ($\varnothing 6 \times 2,5 \text{ mm}$, NdFeB N35H) és így mentünk a mágnesboltba. Később jöttünk csak rá, hogy a vásárolt mágnesek axiális irányban vannak felmágnesezve, míg a szenzorhoz radiálisan polarizált mágnes szükséges. Ezen kívül a tervezett felfogatás is jóval bonyolultabbnak tűnt most, hogy le kellett gyártani...

Lineáris útagó

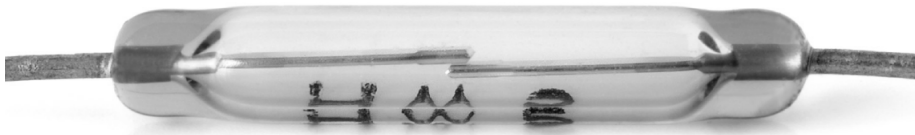
Jött tehát a B-terv: a munkahengereink mágnesdugattyúsak, talán ezt is tudjuk használni pozícióérzékelésre. A hengerek külső felületén az állandómágnes mezejét statikus úton érdemes érzékelni. Az egyik lehetőség erre egy Hall-elemes mágneses tér szenzor. Több típust is megvizsgáltunk, de nem sikerült megbízható üzemeltetést elérni. A 2.12. ábrán látható, Rexroth gyári végállásjeladók jól működnek, de ezekből csupán négy darabot rendeltünk. Utólag visszagondolva, jobb lett volna felhívni a verseny szervezőit és kérni még egy adag gyári szenzort. Mi a nehezebb utat választottuk...

A megoldást a reed-csőekben kerestük: ez egy, a 2.13. ábrán látható, hermetikusan zárt üvegcső, amelyben két lágvasas anyagból készült érintkező található, inert atmoszférában. A két érintkező alapállapotban egymástól néhány száz mikron távolságra helyezkedik el, de külső mágneses tér hatására az érintkezők zárnak. A külső mező megszűntével az érintkezők újra alapállapotba kerülnek és megszakítják az áramkört.

Ezekből a reed csővekből próbáltam építeni egy sűrű pozíció-jeladót, de nem volt egyszerű. Kísérletezésem során arra jöttem rá, hogy a reed cső tengelye és a munkahenger tengelye által bezárt szögtől erősen függ az, a lökethossz mentén mért távolság, ami alatt a reed csövet a belső mágnes kapcsolja. Ha tehát a 2.14. ábrán látható rajzon az α szöget növelem, az érzékeny szakasz rövidíthető – szélsőséges esetben, $\alpha = 90^\circ$ esetén a cső egyáltalán nem kapcsol. Az érzékeny

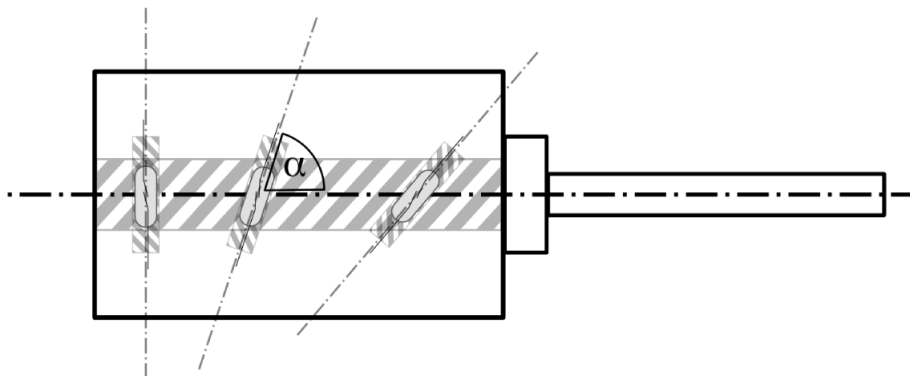


2.12. ábra. Rexroth végállásszenzor



2.13. ábra. Reed cső[7]

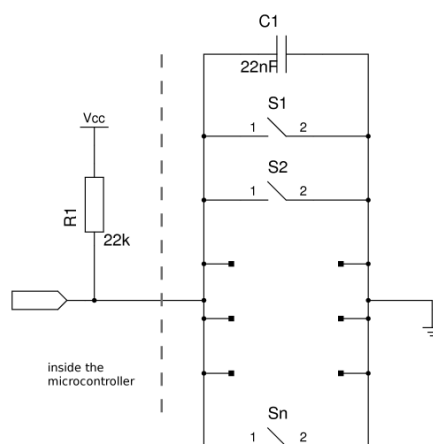
szakasz csökkentése számomra kívánatos, hiszen így adott lökethosszra több reed csövet tudok elhelyezni, ezáltal a pozíciójel felbontását növelni lehet.



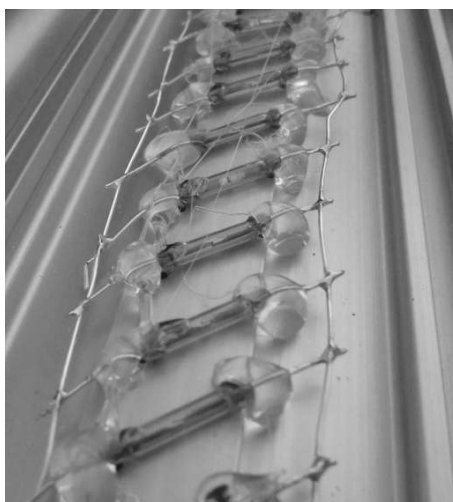
2.14. ábra. Reed csövek elhelyezése a munkahengeren

Először kimértem az érzékeny területet; egy reed kapcsolóval sorba kötöttem egy LEDet, egy ellenállást és egy elemet. Kézzel beállítottam középhelyzetbe a munkahenger dugattyúját, majd a reed csővel megkerestem a bekapcsolási pozíciót. Ezután kézzel, lassan addig mozgattam a reed csövet, amíg az nem bontott. A két pont közötti távolságot megmértem, a teljes lökethosszt elosztottam a kapott számmal, s úgy találtam, hogy 8 csövet tudok elhelyezni úgy, hogy azok ne nyissanak össze. A fent említett α szöveget állandó értéken tartva, mm pontossággal bejelöltem a csövek helyzetét a munkahengeren, majd melegragasztóval

rögzítettem azokat. A 2.15. ábrán láthatóan, az összes reed-csövet párhuzamosan kapcsoltam, az egyik oldalt földre kötöttem, míg a másik oldalt a mikrokontroller egyik olyan lábára, amely külső megszakítás-forrásként használható. A C1 kondenzátorra azért volt szükség, mert a reed-kapcsolók – lévén mechanikus kontaktusok – hajlamosak a pergésre: amikor a kapcsoló zár, az érintkezők először összeérnek, majd lepattannak egymásról, s az áramkör ismét megszakad. A kondenzátor mellett szoftveres pergésmentesítést²⁷ is alkalmaztam, önmagában egyik sem volt elég. Az összeállítás a 2.16. ábrán látható.



2.15. ábra. Reed csöves pozícióadó



2.16. ábra. Az első próbálkozás

A kapcsolási rajzon látható, $20k\Omega$ -s ellenállás a mikrokontroller belső felhúzó-

²⁷A szoftveres pergésmentesítést például úgy lehet megvalósítani, hogy megszakítás esetén megvizsgáljuk az előző megszakítás beérkezése óta eltelt időt. Ha ez egy beállított küszöbnél alacsonyabb, akkor a megszakítás-kezelő anélkül tér vissza, hogy bármi érdemlegeset is csinált volna.

ellenállása, így ezt nem kellett külön beépíteni. A megszakítás-forrást úgy állítottam be, hogy mind felfutó-, mind lefutó élre aktiválódjon. Megszakításakor egy bizonyos változó értékét növelem eggyel.

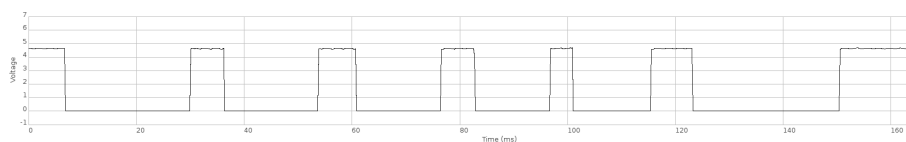
Amikor végül elkészültem az első munkahengerrel és kipróbáltam azt, csalódottan vettem észre, hogy az nem működik rendesen – csupán egyetlen kapcsolás történik a teljes lökethosszon, két szomszédos reed-kapcsoló közül az egyik mindig zárva van.



2.17. ábra. A működő példány

A melegragasztó szerencsére pár perc hajszárítóval történő melegítés után könnyen eltávolítható volt. Módosítottam a terven, a reed-csövek számát hatra csökkentettem, szigetelőszalagra ragasztottam fel őket úgy, hogy felragasztás előtt egyenként mértem mindegyiket, nehogy véletlenül ismét elkövessem az előző hibát. A félkész szenzor a 2.17. ábrán látható.

Ez a verzió már szépen működött, a fentebb már említett kondenzátor beépítése és a szoftveres pergésmentesítő beállítása után egy teljes lökethossz alatt megbízhatóan 12 impulzust számoltam. Ekkor próbaképp rákötöttem az A/D konverterre, azt szabadonfutó módba²⁸ kapcsoltam és a mért feszültségértékeket, valamint a pillanatnyi időt átküldtem a PC-re soros porton. A dugattyút egyenletes sebességgel mozgattam, majd a tárolt eredményeket grafikonon megjelenítettem. Így jutottam a 2.18. ábrán látható képhez.

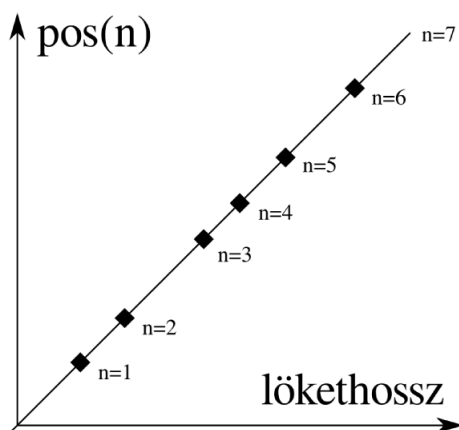


2.18. ábra. Reed-csöves pozíciószenzor mérése

²⁸ Analóg-digitális átalakítóknál szabadonfutó módról beszélünk, ha egy konverzió lezajlása után automatikusan, külön kérés nélkül indul a következő.

A képen is látszik, hogy a lökethossz mentén nem sikerült egyenletesen elosztani az érzékelőket. Ennek oka talán abban keresendő, hogy a reed-csövek túlzottan különböznek egymástól érzékenységben, illetve a hosszirányú tengelyük körüli elforgatásuk is befolyásolhatja az érzékeny szakasz hosszát. Akármennyire is igyekeztem tehát, nem sikerült pontos szenzort készíteni. Nézzük, mit lehet kezdeni azzal, amink van.

Ha egyenletes sebességgel tudjuk mozgatni a dugattyút, akkor az egyes impulzusok idejét hozzárendelhetjük az időhöz, vagyis pontosítani lehet a felosztást: például szekunder oldali fojtást, vagy jobb esetben térfogatáram-szabályzó szelepet alkalmazva a dugattyúsebesség állandó értéken tartható addig, amíg a kalibráció megtörténik. A kalibrált értékek normalizálás után a mikrovezérlő EEPROM-jába kerülnek tárolásra. Indítás után a mikrovezérlő betölti a memóriába a kalibrációs értékeket, s menet közben a pontosabb pozíció használható. A 2.19. ábrán egy szemléltető diagram látható.



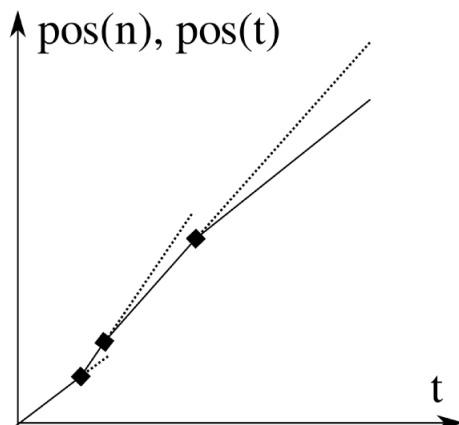
2.19. ábra. Reed-csöves jeladó impulzusai a lökethossz mentén

A következő feladat a dugattyúsebesség meghatározása: ez a korábban említett, magasabb szintű irányítási feladatokhoz szükséges. A probléma az, hogy csak diszkrét pozícióértékeink vannak és az idő is kvantált: a numerikus differenciálás pedig erős fenntartásokkal kezelendő. A másik érdekes kérdés az egyes pozíció-jelek közötti aktuális érték becslése: ehhez legegyszerűbben lineáris extrapolációt használhatunk.

Két mérési pont között az $pos(n)$ meredekséget (sebességet) tehát numerikusan a legegyszerűbben így kapjuk:

$$pos(n) = \frac{pos(n) - pos(n-1)}{t(n) - t(n-1)}$$

ahol $t(n)$ az n -edik pozíciójel beérkezéséhez tartozó idő, míg $pos(n)$ az n -edik pozíciójel a teljes lökethosszon mért tényleges helye. Az így kapott differenciányados természetesen nem lesz folytonos és programozáskor figyelni kell a változók helyes megválasztására. Mivel a lebegőpontos számokkal végzett műveletek igen lassúak, ahol lehet, érdemes fixpontos aritmetikát alkalmazni. A 2.20. ábrán szemléltető diagram látható – a lineáris extrapoláció által jósolt értékek pontozott vonallal vannak jelölve.



2.20. ábra. Lineáris pozíció-extrapoláció

Lineáris extrapolációval tehát bármikor megbecsülhetjük a dugattyú aktuális helyzetét, az $n+1$ -edik pozíciójel beérkezése előtt is. Az aktuális, becsült $pos_{ex}(t)$ pozícióhoz jutunk tehát az alábbi egyenlettel:

$$pos_{ex}(t) = pos(n) + pos'(n) \cdot (t - t(n))$$

Ennek alkalmazása során fontos figyelembe vennünk, hogy amennyiben a munkahenger valamilyen okból – például túl alacsony a tápnyomás a terheléshez képest – megáll, nem kapunk új impulzust, a becsült pozícióra alapuló vezérlés pedig egy idő után azt fogja hinni, hogy elértük a lökethossz végét, sőt; túl is haladtuk azt. Ezért mindenképp meg kell szabni, hogy a becsült érték csak bizonyos elévülési ideig használható.

Ha pontosabb eredményt szeretnénk elérni, érdemes lenne négyzetes extrapolációt alkalmazni. A pontosságon a mérési pontok számának emelésével is javíthatunk, de ezt az itt bemutatott reed-csővekkel nem igazán lehet megvalósítani.

Egyéb lehetőségek A pozíció-érzékelésnek több, egyéb módja is létezik. Ezeket röviden felsorolom:

Potenciométeres érzékelés A dugattyúrúddal párhuzamosan fel kell szerelni egy potenciométert (változtatható huzaellenállást) aminek csúszkája együtt mozog a dugattyúrúddal. Előnye, hogy a felbontás és a frissítési gyakoriság gyakorlatilag csak az A/D konverteren és a zajon múlik. Hátránya a mechanikai érzékenység és – ha jó minőségűt akarunk venni – magasabb ár.

Optikai impulzusszámlálás A dugattyúrúdra rögzíteni kell egy olyan fémlapot, vagy üveglapot, amelyen visszaverő-nem visszaverő illetve áteresztő-elnyelő, a mozgás irányára merőleges sávok vannak kiképezve. Ezt egy fotodiódával és egy fototranzisztorral, illetve a megfelelő optikával impulzusokká alakíthatjuk. Előnye, hogy a reed-csőves megoldáshoz képest jóval sűrűbb lehet a jel, illetve nagyon jó linearitást lehet elérni. Ugyanolyan helyigényes, mint a potenciométeres megoldás. Ide sorolnám azt a

felmerült ötletet is, hogy a kis, görgőként használt lánckerék fogait, mint transzmissziós optikai jeladót használjuk. Ezt azért vetettük el, mert a teljes lökethosszon is csak pár fognyi elfordulásunk van, így nagyon kevés impulzusunk lenne.

Optikai távolságmérés A motorunk konstrukciójában a dugattyúrúd végén található kocsira egy nagyobb függőleges felületet szerelve – mivel a szenzorok analóg kimenettel rendelkeznek, bár linearizálásra szükség van, viszonylag egyszerűen juthatunk a potenciométeres megoldásnál ismertetett eredményhez. Ilyen szenzor például a Sharp GP2D120XJ00F típus.

Ultrahangos távolságmérés A fent említett függőleges felületet érzékelhetjük egy ultrahangos távolságmérővel is. Ez futásidő-méréseken alapul; a kibocsátott impulzus visszaverődik a céltárgyról – a kibocsátás óta a visszaérkező jelig eltelt időből a hangsebesség ismeretében a távolság kiszámítható. Hátránya, hogy – a mérés jellegéből fakadóan – mindenképp időbeli késéssel kell számolni, valamint kevésbé pontos és megbízható, mint optikai párja. Az egyes mérések között pedig bizonyos ideig várni kell, hogy a szóródó ultrahang-jel lecsillapodjon.

DC-motoros sebességmérés Ismeretes, hogy az állandómágneses DC-motorok generátorként is használhatóak. A DC-motorokra jellemző, hogy az u_b belső, indukált feszültségük mind motoros, mind generátoros üzemben

$$u_b = k \cdot \phi \omega$$

ahol k az úgynevezett motorállandó, ϕ a gerjesztő fluxus, ω pedig a fordulatszám. Mivel a gerjesztés állandó, a motort generátorként üzemeltetve a kapcsai között a fordulatszámával arányos jelet mérhetünk – csupán azt kell megoldani, hogy a fent már említett lánckerékhez, vagy a lánchoz a motort megfelelően kössük.

A fordulatszám mérése azért is jó megoldás, mert annak numerikus integrálásával a pozíciót helyesen kapjuk. Az elérhető felbontást és mintavételi frekvenciát csak az A/D konverter határozza meg.

A fejlesztés lehetősége a 2012-es évre nyitva áll.

2.5. Numerikus szimuláció

Ejtsünk néhány szót a számításokról. A probléma igen komplex: egyszerre kell vizsgálni a mechanikai, áramlástan és hőtani egyenleteket. Bár a teljes rendszer modellezése feleslegesen sok munkát venne igénybe a rengeteg különböző paraméter kimérése miatt, egy általános modell (felszínes) vizsgálata célszerű, hiszen így jobban megértjük a rendszer működését.

2.5.1. Mechanikai modell

A pneumatikus munkahengerre felírhatjuk a mozgásegyenletet, Newton harmadik törvényét:

$$0 = m' \cdot \ddot{x} - P_a \cdot A_a + P_b \cdot A_b + F_r$$

ahol

- x a dugattyúrúd aktuális pozíciója,
- m' a munkahenger mozgó részének m_m tömegének, valamint a jármű teljes m_j tömegének motorra átszámított tehetetlensége,
- x a dugattyúrúd aktuális pozíciója,
- A_a a munkahenger pozitív kamrájához tartozó dugattyúfelület,
- P_a a pozitív kamrához tartozó, pillanatnyi nyomás, míg
- A_b a munkahenger negatív kamrájához tartozó, a dugattyúrúd felületével csökkentett dugattyúfelület,
- P_b a negatív kamrához tartozó, pillanatnyi nyomás, és
- F_r a pillanatnyi súrlódás, amely az $\dot{x}$ -nak (és a P_a , P_b nyomásnak, hőmérsékletnek) nemlineáris függvénye.

Amint az látható, a differenciálegyenlet nem állandó együtthatós és nemlineáris. Hogy ezzel a rendkívül bonyolult rendszerrel érdemben lehessen kezdeni bármit is, elhanyagolásokra van szükség. Kezdetben érdemes a súrlódást egy egyszerű viszkózus- és Coulomb-súrlódás összegeként kezelni. A kamrákban uralkodó nyomások kiszámításához áramlástani egyenletekre van szükség. A redukált tömeg kiszámításához írjuk fel a járműre vonatkozó mozgásegyenletet:

$$0 = \ddot{s} \cdot m_j - F_d - F_b + \frac{2M_w}{d_w}$$

itt m_j a jármű tömege, s a megtett út, F_d a légellenállás, első közelítésben $F_d = k_d \cdot \dot{s}^2$, itt k_d a légellenállásra vonatkozó konstans. F_b a csapágysúrlódás, ennek értékét először vegyük állandónak. M_w a motor által a hajtott kerékre kifejtett nyomaték, d_w a hajtott kerék átmérője.

A jármű tehetetlenségének a dugattyúra redukált m'_m értékét úgy kapjuk, hogy a teljes tömeget az eredő áttételi viszonyral osztjuk.

$$m'_m = \frac{m_m}{\sum_{j=0}^N i_j}$$

ahol i_j a hajtáslánc j -edik fokozatának áttétele.

2.5.2. Hőtani folyamatok

A munkavégző közeget érdemes ideális gázzal közelíteni, már így is épp elég bonyolult a rendszerünk.

Reduktor

Nézzük, mi történik a reduktoron, mint fojtószelepen: a tartályban kezdetben $p_1 = 200\text{bar} = 200 \cdot 10^5 \text{Pa}$ túlnyomás uralkodik, a gáz innen áramlik ki úgy, hogy végső nyomása $p_2 = 10\text{bar}$ lesz. A folyamat gyors, a környezeti hőbevitelt hanyagoljuk el. Ekkor igaz lesz az állapotváltozásra, hogy

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

az egyenlet T_2 -re rendezve, $T_1 = 300\text{K}$ kiindulási környezeti hőmérsékletet feltételezve

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Mivel nitrogén esetén a κ adiabatikus kitevő $\kappa = \frac{c_v}{c_p} 1,4$, behelyettesítve

$$T_2 = 300K \cdot \left(\frac{1 \cdot 10^6 Pa}{2 \cdot 10^7 Pa} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \approx 127K = -146^\circ C$$

A végbemenő tágulás tehát erősen lehűti a gázt, bár biztosan nem ilyen mértékben. Itt, az erősen idealizált esetben nem vettük figyelembe azt, hogy a szelep belsejében az áramlási veszteségek a gáz kinetikus energiájának csökkenését okozzák, így a nyomásesést nem pusztán maga a tágulás okozza, hanem a gáz, mint reális közeg belső súrlódásai.

Mindemellett, a hideg gáz jelentős hőt von el a környezetéből, ezt a versenyeken mindenki tapasztalhatta. Jelentős fogyasztás után jól láthatóan ráfagyott a levegő vízpárája a nyomáscsökkentőre és a palackra is. Nem csak a szelepen éppen átáramoltatott, hanem a palackban lévő gáz is tágul, így az is hűl. Az idő előrehaladtával tehát eleve egyre hidegebb nagynyomású gáz érkezik a reduktrorra.

Az így lehűlt gáz térfogatáramát megemelhetjük, ha sikerül a környezet hőjével azt felmelegíteni. Ehhez egy – célszerűen keresztáramú – hőcserélőre van szükség. Ha a hőcserélőn a maximális, $\dot{q}_1 = 15Nl/s = 1,5l_{10bar}/s$ térfogatáramot akarjuk $T_1 = 173K = -100^\circ C$ -ről $T_2 = 273K = 0^\circ C$ -ra melegíteni, az ehhez szükséges teljesítmény

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{q}_1 \varrho_1 \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

a T_1 hőmérsékleten a gáz ϱ_1 sűrűsége

$$\varrho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} \approx 20 \frac{kg}{m^3}$$

A c_v izochor fajhő első közelítésben kapható az $R_s = R/M$ specifikus gázál-landó és az f szabadságfok²⁹ ismeretében:

$$c_v = \frac{f}{2} \cdot R_s = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} = \frac{5}{2} \cdot 296,8 \frac{J}{kg \cdot K} \approx 742 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

Izobár fajhőre pedig igaz, hogy

$$c_p = c_v + R_s = R_s \left(1 + \frac{f}{2} \right) \approx 1038,8 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

A hőcserélő a környezetből tehát

$$P = 1,5 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cdot 20 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot 1039 \frac{J}{kg \cdot K} (273K - 173K) \approx 3kW$$

hőt kell felvegyen.

Munkahenger

A klasszikus működés során a munkahenger egy folyamatosan átáramoltatott, nyílt körfolyamat része, amelyben izobár állapotváltozás során végez munkát.

²⁹A nitrogén, mivel kétatomos gáz $f = 5$ szabadságfokkal rendelkezik.

Vizsgáljunk egy általános esetet: a munkahenger F erőt fejt ki l lökethossz mentén. A munka – definíció szerint

$$W = \int_0^l F \cdot ds = \int_0^l A \cdot p(s) ds$$

Amennyiben a izobár működésű a rendszer, $p(s)$ közelítőleg állandó. Más a helyzet azonban, ha a részleges feltöltést vizsgáljuk.

Résztöltés során az izobár munkavégzés közben megszüntetjük a gáz utánpótlását és expandálni hagyjuk. Mivel az expanzió gyors, a gáz pedig kis felületen érintkezik az – egyébként jó hővezető képességű – alumínium hengerfallal, az állapotváltozás gyakorlatilag adiabatikus.

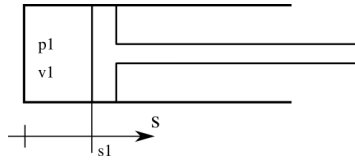
Adiabatikus állapotváltozásra igaz, hogy

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp + \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv = 0$$

itt c_p az izobár, c_v az izochor fajhő, T a gáz abszolút hőmérséklete, p a gáznyomás. [9]

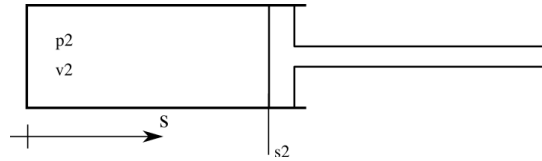
Innen levezethető, hogy adiabatikus állapotváltozásra

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\kappa$$



2.21. ábra. Az állapotváltozás idáig izobár

Először tehát a munkahengerben lévő gázt izobár munkavégzésre bírjuk. A 2.21. ábrán látható pontig, s_1 lökethosszig töltjük fel. Ekkor a bezárt gáz nyomása ideális esetben $p_1 = p_t$ tápnyomás, térfogata $v_1 = s_1 \cdot A$, ahol A a keresztmetszet felülete.



2.22. ábra. Az adiabatikus expanzió végállapota

A végállapot a 2.22. ábrán látható. Az előző egyenletet átrendezve

$$p(v) = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v}\right)^\kappa$$

innen és p -t $s = v/A$ függvényében kifejezve

$$p(s) = p_1 \cdot \left(\frac{s_1 A}{s \cdot A}\right)^\kappa = p_1 \left(\frac{s_1}{s}\right)^\kappa$$

A mechanikai munkát felírva

$$W_{exp} = A \cdot \int_{s_1}^l p_1 \left(\frac{s_1}{s} \right)^\kappa ds$$

Az integrálást elvégezve

$$W_{exp} = A \cdot \frac{1}{1-\kappa} \cdot p_1 \cdot s_1^\kappa \left[s^{1-\kappa} \right]_{s_1}^l + C = A \cdot \frac{1}{1-\kappa} p_1 \cdot s_1^\kappa \cdot (l^{1-\kappa} - s_1^{1-\kappa})$$

Nevezzük a résztöltés fokát $x = s_1/l$ -nek, résztöltés kezdeténél pedig közel a tápnyomás mérhető a kamrában, így $p_1 = p_t$. Ekkor a teljes lökethosszon végett munka

$$W(x) = W_p(x) + W_{exp}(x) = A \cdot s_1 \cdot p_t + A \cdot \frac{p_t \cdot (l^{1-\kappa} - s_1^{1-\kappa}) \cdot s_1^\kappa}{1-\kappa}$$

$$W(x) = A \cdot l \cdot x \cdot p_t + A \cdot p_t \cdot (l^{1-\kappa} - (l \cdot x)^{1-\kappa}) \cdot (l \cdot x)^\kappa \frac{1}{1-\kappa}$$

$$W(x) = A \cdot p_t \cdot l \cdot x \cdot \left(1 - x^{\kappa-1} \cdot \frac{1}{1-\kappa} \cdot (1 - x^{1-\kappa}) \right)$$

Esetünkben tehát $A = d^2\pi/4 \approx 7,85 \cdot 10^{-3} m^2$, $l = 0,100m$,³⁰ $p_t = 8bar = 8 \cdot 10^5 Pa$ ³¹. Behelyettesítve

$$W(x) \approx 7,85 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot 8 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0,1m \cdot \frac{x}{2} \cdot (7 - 5 \cdot x^{0,4}) = 314 \cdot x \cdot (7 - 5 \cdot \sqrt[5]{x^2}) [J]$$

Az eközben felhasznált levegő mennyisége x -szel arányos:

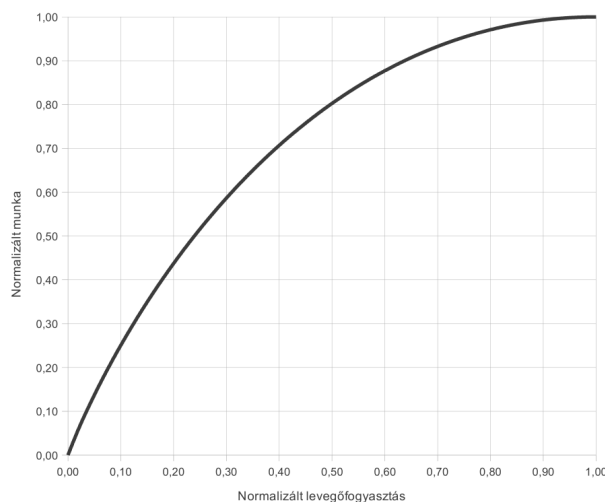
$$q(x) = l \cdot A \cdot x \approx 7,85 \cdot 10^{-4} \cdot x [m^3]$$

$q_n \sim x$ [1]	W [J]	W_n [1]	W_n/q_n
0,0	0	0,00	-
0,1	157	0,25	2,5
0,2	275	0,44	2,2
0,3	368	0,59	2,0
0,4	444	0,71	1,8
0,5	504	0,80	1,6
0,6	551	0,88	1,5
0,7	586	0,93	1,3
0,8	610	0,97	1,2
0,9	624	0,99	1,1
1,0	628	1,00	1,0

2.1. táblázat. Részleges feltöltés során végzett munka

³⁰A lökethossz valójában $l = 125mm$, de a véghelyzeti csillapítás miatt elhagytam $25mm$ -t.

³¹A reduktor tápnyomása maximálisan $10bar$, de $2bar$ nyomásesést feltételezek a szelepeken és a csőhálózaton.



2.23. ábra. Részöltés során végzett munka

A végzett munkát és a levegőfogyasztást a 2.1. táblázatban láthatjuk. Azt lehet észrevenni, hogy a részöltés fokának csökkentésével a fajlagos fogyasztás csökken. Ez azonban egy idealizált állapot, az itt látható W munka egy része például mindenképp a veszteségek fedezésére fordítódik. Nagyon alacsony részöltést azért sem lehet elérni, mert az alacsony végső kamranyomás mellett már csak akadozó csúszás jön létre.

Nem vizsgáltuk a részöltés során a dugattyúsebességet, a teljesítményt. Mivel azonban az izobár működtetéshez képest a kifejtett erő és így a dugattyúsebesség is kisebb, biztos, hogy kisebb lesz a munkahenger teljesítménye. Azonban a pneumobil versenyen – mivel a felvehető térfogatáram maximálva van – már egészen más a helyzet. Érdekes folyamatosan figyelni az aktuális légfogyasztást és amikor az kezdené megközelíteni a reduktor névleges térfogatáramát, kifizetődőbb a részöltést alkalmazni. Így megfelelően magas dugattyúsebesség mellett a teljesítmény tovább növelhető, ha több (N) hengert használunk: a hengerek közül egyszerre mindig csak egyet töltünk, a többi hagyjuk expandálni.

A fenti egyenletekkel csupán a felszínt érintettem, az itt ismertetett modell nagyon egyszerű, s még rendkívül sok mindent lehetne figyelembe venni. Az most is jól látszik, hogy a siker kulcsa egyrészt az elméleti háttér alapos megértése és ez alapján egy kedvező tulajdonságokkal bíró rendszer tervezése, másrészt pedig a kivitelezés, a megvalósítás minősége és a tesztelés.

Konklúzió

Dolgozatomban igyekeztem átfogó képet nyújtani a pneumatikus hajtás ilyen módon történő felhasználásáról, a felmerült problémákról és azok több lehetséges megoldásáról. Megfontolásaimat, tapasztalataimat igyekeztem számítással is alátámasztani.

Véleményem szerint a sűrített levegő járművek hajtására kevésbé hatékony eszköz, mint az elektromosság. Ettől függetlenül a pneumatika nagyon hasznos, érdekes és hasznos tudomány, megvan a maga helye az iparban, mérnökhallgatóként pedig a Pneumobil versenyben hatalmas kihívást és nagy lehetőséget látok. Nagyon tetszik, hogy a viszonylag laza műszaki feltételek nagy mozgásteret hagynak a csapatoknak, így az egyes konstrukciók között alapvető különbségek is vannak, s a csapatok a modelleket évről évre fejlesztik.

Bár a téma nagyon érdekes és szerteágazó, azt hiszem, már így is a maximális terjedelem határát súrolom. Remélem, sok hasznos információval szolgálhattam.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is, a csapat nevében szeretnék mindenkinek köszönetet mondani azért a rengeteg segítségért, ami nélkül nem juthattunk volna el a rajtvonalhoz. Bár az összes támogatónkat nem sorolhatom fel, szeretnék kiemelni néhányat közülük. Köszönjük

A Bosch Rexroth Pneumatika Kft.-nek a verseny szervezését és lebonyolítását, különösen Avar József megértését és kései elemigényeink megoldását, továbbá a rendelkezésünkre bocsátott pneumatikus elemeket,

A VARINEX Zrt.-nek az anyagi támogatást,

A BDI Hungary Kft.-nek a motorban használt SKF csapágyakat,

A Sapa Profiles Kft.-nek a váz alumínium alapanyagát,

A Zoltek Zrt.-nek a burkolatot alkotó szénszövetet,

Az EMG-Metall Kft.-nek a motorlemez anyagát, annak lézeres vágását és megmunkálását,

Az ÁRWILL Elektronik-nak a villamos rendszerünkhöz felajánlott alkatrészeket,

A Gyártástudomány és Technológia Tanszéknek a G épületi gépek használatának lehetőségét, valamint az ott dolgozók segítségét, különösen Jani bácsiét, valamint Dr. Mátyási Gyula, a GTT tanszékvezetőjének támogatását,

Az Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársainak, a hegesztési munkákat Mohos Lászlónak, Orbulov Imrének pedig a láncszakítást,

A Szervizcentrum Fehérvár Kft.-től kapott támogatást,

Dr. Sütő Zoltán a BME AAIT docensének, a villamos rendszer tervezése során nyújtott segítségét,

Farkas Zsolt a Műszakik Pneumobil csapat tanárának segítségét, valamint

családjainknak a rengeteg támogatást és megértést, végül pedig, de nem utolsó sorban, személyesen szeretnék köszönetet mondani

Oravecz Ágnesnek

Irodalomjegyzék

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics>
- [2] *Kjell Evensen, Jul Ruud*: A pneumatika alapjai. Budapest, 1994. Kiadja a Mecman Eger Kft.
- [3] *Pedro Luís Andrighetto, Antonio Carlos Valdiero, Leonardo Carlotto*: Study of the friction behavior in industrial pneumatic actuators. ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 2 - pp.369-376, http://www.abcm.org.br/symposiumseries/SSM_Vol2/Section_VI_Sensor_Actuators/SSM2_VI_01.pdf,
- [4] <http://arduino.cc>
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [6] BOSCH-Rexroth katalógus.
<http://www.boschrexroth.com/pneumatics--catalog/Vornavigation/VorNavi.cfm?PageID=g95890>
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Reed_switch_\(aka\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Reed_switch_(aka).jpg)
- [8] http://www.boschrexroth.com/computation/converter/flow_component_calculator.jsp
- [9] *dr. Harmatha András*: Termodinamika műszakiaknak. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982. ISBN 963 10 4467 X
- [10] http://de.wikipedia.org/wiki/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t

Bőle Pál, 2011.
<http://astech.hu>