



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2011**



Pneumatikus csillagmotor tervezése és gyártása

Készítette: Fébert Gábor, 4. évfolyam

Szak: Gépészmérnöki alapszak

Témavezető: Dr. Tímár Imre, egyetemi tanár

Mérnöki Kar, Gépészmérnöki Intézet

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	5
2.	Irodalmi áttekintés.....	5
2.1.	A motorizáció kialakulása.....	5
2.2.	A pneumatika és alkalmazása	6
2.3.	A csillagmotor.....	8
2.4.	Autodesk Inventor.....	9
2.5.	Működési elv.....	10
3.	A tervezés menete	11
4.	Az elkészítés	18
4.1.	Az alapanyagok kiválasztása.....	18
4.2.	Az alkalmazott eszközök.....	18
4.3.	Gyártás	19
4.4.	Összeszerelés	26
5.	Működési vizsgálat.....	30
6.	Összefoglalás	36
7.	Felhasznált irodalom:	37
	Függelék	38

Jelölésjegyzék

Jel	Magyarázat	Mértékegység
a	függőleges irányú fogásmélység	mm
b	lendítőkerék könnyítésének szélessége	mm
A_s	forgácskeresztmetszet	mm^2
c	vízszintes irányú fogásmélység	mm
d	hengerfurat átmérő	mm
d_{sz}	szerszám átmérő	mm
f_z	fogankénti előtolás	$\frac{\text{mm}}{\text{fordulat}}$
F_v	teljes forgácsoló erő	N
F_{vz}	egy élre jutó forgácsoló erő	N
h_x	közepes forgácsvastagság	mm
i	hengerek száma	-
i_f	forgácsolási ív hossza	mm
k_s	fajlagos forgácsolási ellenállás	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
$m_{tömör}$	a tömör lendítőkerék tömege	kg
$m_{üres}$	a lendítőkeréken található könnyítés tömege	kg
n	fordulatszám	$\frac{\text{fordulat}}{\text{perc}}$
$n_{átl}$	átlagos fordulatszám	$\frac{\text{fordulat}}{\text{perc}}$
n_{konst}	konstans fordulatszám	$\frac{\text{fordulat}}{\text{perc}}$
p	nyomás	bar
P_v	forgácsoláshoz szükséges teljesítmény	W
r_1	lendítőkerék belső sugara	mm
r_2	lendítőkerék külső sugara	mm
r_b	lendítőkerék könnyítésének belső sugara	mm

r_k	lendítőkerék könnyítésének külső sugara	mm
r_{sz}	szerszámsugár	mm
s	lökethossz	mm
t_f	tengely forgásának ideje	s
t_{gy}	tengely szöggyorsulásának ideje	s
t_l	tengely szögsebesség csökkenésének ideje	s
t_m	mérés időtartama	s
v	forgácsoló sebesség	$\frac{m}{perc}$
V	lökettérfogat	cm^3
$x\%$	százalékos hiba	-
α	tengely szöggyorsulása	$\frac{1}{s^2}$
α_f	átfogási szög	°
β	tengely szögsebességének csökkenése	$\frac{1}{s^2}$
$\Theta_{tömör}$	tömör lendítőkerék tehetetlenségi nyomatéka	$kg \cdot m^2$
$\Theta_{üres}$	lendkerék könnyítésének tehetetlenségi nyomatéka	$kg \cdot m^2$
Φ	forgácsolási átfogási szög	°
Ψ	kapcsolási szám	-

1. Bevezetés

A dolgozat egy pneumatikus működtetésű csillag elrendezésű motor modell tervezési és gyártási folyamatát mutatja be. A kitűzött cél egy viszonylag egyszerű felépítésű, könnyen legyártható és összeszerelhető motor létrehozása volt, amely segítségével jól szemléltethető és könnyen megérthető ennek a motorelrendezésnek a működése. Azért esett a választás a pneumatikus megvalósításra, mert ez a típusú energia könnyen előállítható szinte bárhol, ahol akár egy kisebb méretű kompresszor illetve villamos hálózat található, valamint palackokban szállítható is. Ennek eredményeképpen a motor működése bárhol, bárki számára könnyedén demonstrálható. A motor tervezésén és gyártásán kívül az összeszerelést, a beüzemelést és a mérést is magam végeztem, melyek tapasztalatait és eredményeit a dolgozat megfelelő fejezetében ismertetem.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A motorizáció kialakulása

Az emberiség létezése óta mindig is igény volt a motorizációra, amely azonban csak az utóbbi kb. 200-300 évben vált lehetővé. A kezdetekben kizárólag emberi izomerőt használtak minden nemű munka elvégzésére, az emberi izomzat viszont a legrosszabb „munkagép”, ha a kitartását tekintjük. Habár viszonylag nagy erő kifejtésére képes, mégis hamar elfárad, bizonyos időközönként pihentetni kell. Ez nagy hátránya a ma használatos gépekkel, célgépekkel szemben. Hamar elterjedtek azonban a haszonállatok, amelyekre a munka legnagyobb és legmegterhelőbb részét át lehetett ruházni, gondoljunk itt például a lovas kocsikra. Az emberiség fejlődésével párhuzamosan fejlődött az általa készíthető eszközök technikai szintje, így idővel már munkavégzésre alkalmas gépeket is képes volt építeni. Fontos mérföldkőnek számít a víz munkába állítása különböző lapátkerekes megoldásokkal, jó példák erre a vízimalmok. Az idő haladásával tudományok alakultak ki, amelyek eredményeit sikerrel tudták alkalmazni az egyes technikai megoldások készítésénél. Kialakult pl. a fizika, amelynek jeles képviselői elméleti úton is levezették az addig csak tapasztalatok által megismert jelenségeket.

Motorizáción általában a belsőégésű motorok kialakulását és fejlődését szoktuk érteni, azonban minden olyan technikai megoldás, amely munkavégzésre alkalmas gépet hozott létre, hozzájárult a motorizáció mai szintjének eléréséhez. Ennek megfelelően a gőzgépek megjelenését tekinthetjük a motorizáció első lépcsőfokának. Ebben az időben ismerték fel a nyomás munkavégző képességét, amelyet képesek voltak hasznos munkává alakítani és az ipar, illetve a közlekedés különböző területein felhasználni.

A gőzgép volt az első olyan hőerőgép, amely a gőz energiáját képes volt hasznosítani. Az első valódi gőzgép (1769) feltalálójaként James Wattot tartjuk számon, azonban a kifejlesztéséhez sokan hozzájárultak. Működési elve szinte teljesen megegyezik a ma használatban lévő belsőégésű motorokéval, mely szerint egy dugattyút tartalmazó hengerbe nyomással rendelkező (vagy nyomást létrehozó) közeget juttatunk, amely a nyomással és a dugattyú átmérőjével arányos erőt fejt ki a dugattyú felületére. Ezen erő hatására a dugattyú elmozdul, amellyel gyakorlatilag megtörténik a munkavégzés. Ezt az egyenes vonalú mozgást az esetek döntő többségében forgattyús mechanizmussal alakítják könnyebben hasznosítható forgó mozgássá. Az azóta eltelt 200 évben a használatban lévő motorok alapelve csak kis mértékben változott, inkább kifinomultabbakká és letisztultabbakká váltak.

2.2. A pneumatika és alkalmazása

Pneumatika szó alatt a sűrített levegő munkavégzésre történő felhasználását értjük. Ennek a munkának a felhasználása rengeteg féleképpen történhet, ugyanis ma már egy egész iparág foglalkozik ezzel a területtel. A legjelentősebb felhasználása ennek az energiának az ipari automatizálás, ugyanis itt van a legnagyobb szükség viszonylag gyorsan előállítható illetve könnyen szállítható segédenergiára. Mára rendkívül fejlett és sokoldalú eszközök kaphatók a kereskedelmi forgalomban, amelyek közül a felhasználó választhat, kezdve a különböző nagy teljesítményű kompresszoroktól az egyszerű szelepeken és levegő előkészítő egységeken át egészen a löketvég-csillapítással és érzékelők elhelyezésére alkalmas hornyokkal ellátott munkahengerekig.

A sűrített levegő előállítása kompresszorokkal történik, amelyek működési elvüket tekintve sokfélék lehetnek, azonban általánosan elterjedt az egyszerű dugattyús kompresszor, egyszerű felépítésének és viszonylag alacsony karbantartás igénye miatt (1. ábra). Ezeket szinte kizárólag légtartállyal együtt hozzák forgalomba, amikor is maga a levegősűrítő hozzá van rögzítve a tartályhoz. A levegősűrítő egység lehet egy vagy több hengeres, amelyet széles határok közt változó teljesítményű háromfázisú aszinkron motorral szokás meghajtani szíj, vagy egyéb hajtáson keresztül. Villamos teljesítményük a néhány kW-tól több tíz kW-ig terjed, levegőszállításuk pár száz l/perc-től egészen több tízezer l/perc-et is elérheti. Az egyes hengerekbe szelepek vezérlik a levegő be és kijutását. A beáramló levegőt a környezetből szívja be a kompresszor, majd sűrítés után továbbítja a légtartályba, amelyben, széles tartományban változhat a nyomás értéke, 1-2 bar-tól több tíz bar-os értéket is felvehet.



1. ábra

Dugattyús kompresszor [1]

Az így előállított sűrített levegőt el kell juttatni a felhasználási helyekre, amely csöveken keresztül történik. Nagyon sokféle átmérőjű és falvastagságú létezik belőlük, amely méretek szabványosak, így a különböző gyártók termékei csereszabatosak egymással. Anyaguk általában poliamid, poliuretán vagy egyéb műanyag, az iparban acél. A felhasználó az alkalmazott levegőnyomásnak megfelelően választhat közöttük.

A kompresszor által előállított sűrített levegőt nem lehet közvetlenül felhasználni, mivel különböző szennyeződések találhatók benne, illetve a környezeti levegő páratartalmától is meg kell tisztítani. Mindezek káros hatással vannak az alkalmazott pneumatikus elemekre.

A fent leírtak kiküszöbölésére alkalmaznak levegő előkészítő egységeket, amelyek a szűrésen és tisztításon kívül még kenési és nyomásszabályozási funkciókat is ellátnak. Kenésre a mozgó alkatrészek védelme miatt van szükség, nélküle nagyobb kopás lenne. A csöveken szállított levegő útját és nyomását valamilyen módon vezérelni kell, erre szolgálnak a különböző szelepek. A levegő nyomását fojtószelepekkel szokás a feladathoz kívánt mértékűre lecsökkenteni, amelyek fokozatmentes állítási lehetőséget biztosítanak, de általában a levegő előkészítő egységen is van erre lehetőség.

Az egyes útszelepekkel megoldható, hogy a levegő több útvonal közül a kívánt helyre áramoljon. Ezeknek a szelepeknek a felépítése a választható útvonalak és állások számának növekedésével bonyolultabbá válik. Jellemzésükre egy számpárt alkalmaznak, amelyet /-jellel választanak el egymástól. Az első szám megadja a választható utak számát, a második az állások számát jelenti. Például egy 3/2-es számpárt olvasva arra következtethetünk, hogy az adott szelepnek 3 választható útja van, tehát 3 irányban áramoltatható benne a levegő, illetve 2 stabil vagy éppen instabil állása van. Stabilitást és instabilitást tekintve akkor számít stabilnak a szelep adott állása, ha átváltást követően az adott állásban is marad a szelep. Ha viszont egyszeri, például gombnyomásra átbillen a másik állapotba, de a gombnyomást megszüntetve visszaáll az eredetibe, akkor a gombnyomásra bekövetkező állapot instabil. Ennek megfelelően megkülönböztetünk bistabil és monostabil szelepeket. A bistabil szelepnek (3/2-esről lévén szó) mindkét állapota stabil, tehát működtetéskor a másik állapotba történő billenés után az adott állapotban is marad, nem tér vissza az eredetibe, ezért egy másik oldali működtetéssel kell visszaállítani az eredeti állásába. Monostabil szelep esetén ennek a fordítottja igaz, csak az egyik állapota stabil, működtetés esetén átbillen, majd annak megszűnésekor visszaáll az eredeti állapotába.

Ha eljutott a levegő a kívánt helyre, akkor azt ténylegesen elmozdulássá, munkává kell alakítani. Erre a célra szolgálnak a különböző kialakításban és méretben kapható munkahengerek. Jellemzőjük a dugattyúátmérő és a lökethossz. A munkahengerek gyártótól függően rendkívül különbözőek lehetnek, de alapelvük azonos. Egy zárt, kör keresztmetszetű térben egy dugattyú mozog, amely egy rúdon keresztül van kivezetve a hengerből. A munkahengereket alapvetően két csoportra oszthatjuk, egy-, illetve kettős működtetésűekre (2. ábra). Az egyes működtetésű munkahengerek tulajdonsága, hogy csak egy levegő csatlakozóval rendelkeznek, így csak a dugattyú egyik oldalára lehet nyomást adni, ellenkező irányban egy nyomórugó téríti vissza a dugattyút akkor, ha nincs már rajta levegőnyomás. Ezáltal a henger csak az egyik irányban tud munkát végezni. A kettős működtetésű hengerek két levegő csatlakozóval rendelkeznek, amelyeknek köszönhetően a dugattyú mindkét oldalára lehet nyomást adni, így a dugattyú a löket mindkét irányában képes munkavégzésre. A két típus közti választást az elvégzendő feladat szabja meg. Ha olyan alkalmazásról van szó, ahol nem szükséges mindkét irányban nagy erőt kifejteni, akkor megfelelő lehet a célra egy egyszeres működtetésű munkahenger is, amellyel a felhasználó költséghatékonyabban tudja megoldani a feladatot, hiszen így kevesebb csővezetékre van szükség, illetve elegendő egy 2/2-es útszelep is a működtetéséhez.

Az egyes gyártók különböző típusú, dugattyú átmérőjű és lökethosszú hengereket forgalmaznak, az egészen kis mérettől és egyszerű felépítéstől, rendkívül nagy méretekig és bonyolult felépítésig. Választható opcióként általában felajánlanak löketvég csillapítást, amely lelassítja a dugattyút a löket vége előtt 1-2 mm-rel, így

például ha a henger által mozgatott alkatrészt nem terhelhetik lökészerű igénybevételek, akkor ez a megoldás ideális lehet. Továbbá gyakori még, különösen ipari automatizálással foglalkozó cégek körében, hogy olyan hengereket rendelnek és építenek a gépeikbe, amelyeken könnyen elhelyezhetők különböző véghelyzet érzékelők. Mindezt olyan hengerekkel lehet megoldani, amelyek kompakt kivitelűek, és minden oldalukon az érzékelő számára megfelelően kialakított horony található. Ezekbe a hornyokba a különböző szenzorok becsúszthatók és egy kisméretű csavarral rögzíthetők a kívánt pozícióban. Ez olyan esetekben lehet kiemelt jelentőségű, amikor a berendezést például PLC-vel vezérlik, és a véghelyzet elérésekor egy másik hengert kell működésbe hozni, ekkor az érzékelők által kiadott jel jól feldolgozható PLC-vel és a többi henger működtetése elektropneumatikus szelepek segítségével könnyedén megoldható.



2. ábra

Kettős működtetésű pneumatikus munkahenger [2]

2.3. A csillagmotor

A csillagmotor egy különleges típusa a belső égésű motoroknak, amelyet először a 2. világháborúban, vadászpilóták gépeiben alkalmaztak. Főleg a különböző hűtési problémák kiküszöbölésére fejlesztették ki ezt a fajta elrendezést, amellyel sikeresen meg is oldották azokat. A hengerek körben helyezkednek el a főtengely körül, a kiálló hengerek csillagra emlékeztető alakzata miatt kapta ezt a nevet. Minden esetben páratlan hengerszámmal készülnek, azért, hogy ne legyenek egymással szemben, egy vonalba eső hengerek, amelyek pontosan egymás ellen dolgoznának. Természetesen lehetséges a páros hengerszám is, azonban ehhez több hengersort kell azonos főtengelyre, de egymás mögé elhelyezve felépíteni. További érdekesség a hajtókarok összekapcsolódása, amely úgy történik, hogy csak az egyik dugattyú hajtókarja van a főtengelyre rögzítve, az összes többi ehhez a bizonyos hajtókarhoz van csapágyazva. Létezik belőle egy korai változat is, amelynél a főtengely volt rögzített pozícióban, és körülötte forogtak a hengerek, és a hozzájuk rögzített légcsavar. Azért választották először ezt a fajta megoldást, mert jobb hűtési tulajdonságokat reméltek tőle, amely be is igazolódott, viszont teljesítmény szempontjából messze elmaradtak az elvárttól. Jelentős előnye, hogy egyenletesebb nyomatékleadásra képes, mint más hengerelrendezésű motorok. A légcsavart a legtöbb esetben egy lassító áttételű fogaskerék hajtóművön (reduktor) keresztül hajtják meg. Erre azért van szükség, mert a légcsavaros repülőgépeknél fontos előírás, hogy a lapátok kerületi sebessége - amely a nagy átmérőből és fordulatszámból adódóan szintén nagy értékkel bír - semmiképp sem

lépheti át a hangsebességet, mivel ilyenkor áramlástechnikai rendellenességek léphetnek fel a légsavar lapátjain, amely a repülőgép biztonságos üzemelése szempontjából katasztrofális következményekkel járhat. Jelentős hátránya viszont más elrendezésekkel szemben hogy hosszabb állás után a forgattyús házban lévő kenőolaj belefolyik az alsó hengerekbe, eltömítve ezzel a gyújtószikra hézagokat, így a henger nem képes begyűjteni a benzin-levegő keveréket. Ha viszont próbálják beindítani, a felső hengerek működőképesek maradnak, így munkára bírják az alsó hengereket is, ahol viszont útban van a felgyülemlett olaj. A folyadékok összenyomhatatlansága miatt az alsó dugattyú nekiütközik az olajnak, amely ennek következtében súlyosan károsodhat, legrosszabb esetben el is törhetnek a hajtókar, illetve a forgattyús ház is károsodhat. Mindezek elkerülése végett szokták indítás előtt a motort a légsavarnál fogva átforgatni, illetve a felesleges olajt az alsó hengerekből leengedni. További hátránya még, hogy két egymás mögé helyezett henger-koszorú esetén már jelentkeznek az amúgy kiküszöbölt hűtési problémák, amikor is a hátsó hengerek nehezebben hűthetők, ezért külön hűtést kell alkalmazni. Ebben az esetben viszont a teljesítmény javára ugyan, de elvesz az egyik előnye ennek az elrendezési módnak. [3]

Csillagmotorok a mai napig megbízhatóan üzemelnek különböző idősebb repülőgép (pl. Antonov An-2) és helikopter (Kamov Ka-26) típusokban, amelyeket legtöbbször légi szállításra illetve mezőgazdasági munkákra használnak. További jelentős felhasználási területe még a távirányítású repülő modellezés, amelyre példa az alábbi ábrán látható (3. ábra).



3. ábra

Csillagmotor [4]

2.4. Autodesk Inventor

A motor tervezése az Autodesk cég Inventor 2010 nevű parametrikus tervező szoftverével történt. Magát a programot elterjedten alkalmazzák olyan tervezési feladatok megoldására, amelyeknél fontos a háromdimenziós megjelenítés lehetősége, illetve gazdaságosság szempontjából nem jöhet szóba más megoldás. Ez és az ilyen jellegű szoftverek ugyanis nagyságrendekkel meggyorsítják, illetve megkönnyítik a tervezés és dokumentálás teljes folyamatát, amely nem elhanyagolható szempont a mai kiélezett piaci helyzetben.

A parametrikus tervező szoftverek közös jellemzője, egyrészt hogy az egyes méreteket számszerűsítve kell megadni, illetve azok valamilyen függvény szerint hivatkozhatnak is egymásra, másrészt pedig hogy képesek a háromdimenziós képmegjelenítésre. Ezt azt

jelenti, hogy a megadott paraméterekkel meghatározott alakzat, a majdani alkatrész azonnal térben látható és körbeforgatható, ezáltal segítve a tervező munkáját.

2.5. Működési elv

A motor működési elvének alapötlete egy internetes honlapról [5] származik, amely a következőképpen írható le. Maga a motor a kétütemű belsőégésű motorokhoz hasonlóan részvezérlésűnek tekinthető, amelyeknél az egyes rések (jelen esetben furatok) fedésbe hozásával, illetve takarásával történik a motor vezérlése. A honlap készítője angolul Oscillating Steam Engine-nek nevezi, amely magyarul Oszcilláló Gőzgépet jelent. Ebből következik, hogy ezt a fajta működési elvet eredetileg gőzgépekben alkalmazták, viszont sűrített levegővel is ugyanúgy működtethető, mint gőzzel. Ez az eset azonban gazdaságossági kérdéseket vet fel, hiszen a motor működéséhez sűrített levegőt kell előállítani, amelyhez kompresszort kell alkalmazni, az pedig villamos teljesítményt vesz fel.

Az oszcilláló elnevezés a forgattyús mechanizmus szerkezeti megvalósítására utal, ugyanis ennél a típusnál a dugattyú és a hajtókar nem két különálló alkatrész, hanem egyetlen darabból készült. Ilyenkor azonban felmerül a kérdés, hogy ha a dugattyú és a hajtókar egyetlen merev egységet képez, akkor hogyan lehet működőképes egy forgattyús mechanizmus, amelyben két csukló is található. Erre a kérdésre az a válasz, hogy az egyik csukló a megszokott helyen található (a forgattyús tengely és a hajtókar találkozási pontja), a másik viszont magán a hengeren. Ez pedig úgy valósítható meg, ha a hengert egy csuklópont körül elforgatjuk. Innen származik az oszcilláló kifejezés, mivel ilyenkor a henger két adott véghelyzet között és egy forgástengely körül ide-oda oszcillál.

A honlapon található animáció az enyémtől eltérő megoldást szemléltet, mivel ott a dugattyú mindkét oldalán található térrészt felhasználják munkavégzésre, ezért ott két irányból kap gőzt (vagy sűrített levegőt). Ennek a megoldásnak az előnye, hogy egy hengerrel helyettesíteni lehet két hengert, azonban a dugattyúrúd felőli oldalon csak kisebb erőt képes kifejteni, mivel a hasznos dugattyúfelület a rúd átmérőjével csökken.

3. A tervezés menete

Mivel a tervezés során a legfőbb szempont az egyszerűség és könnyű legyárthatóság volt, ezért igyekeztem a lehető legegyszerűbb alkatrészekből felépíteni a motort. Ezek jellemzően hasáb jellegű alakzatok, amelyeket síkfelületek határolnak, így egyetemes marógépen rendkívül egyszerűen előállíthatók.

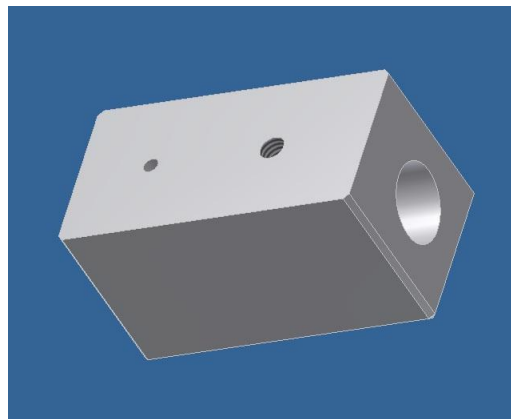
A legelső lépés a hengerek számának meghatározása volt, ugyanis leginkább ez a jellemző határozta meg a projekt nyersanyag igényét. Törekedtem a lehető legkisebb hengerszáma, azonban az egyhengeres motor nem csillagmotor, a kéthengeres hasonló elrendezésűt V-motornak nevezik, így a 3 hengerre esett a választás.

A következő lépés a lökettérfogat meghatározása volt. Ebben az esetben a motor lökettérfogata nem olyan jelentős paraméter, mint egy belsőégésű motor esetében, hiszen itt az alkalmazott közeg nyomása és nem a mennyisége a lényeges. A hengerek furatát 15 mm átmérőjűre választottam, míg a lökethossz a konkrét tervezés során 26 mm-re adódott. Ezen paraméterek, illetve a hengerek számának ismeretében az alábbi összefüggés segítségével meghatározható a motor lökettérfogata

$$V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot s \cdot i = \frac{(15 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 26 \text{ mm} \cdot 3 = 13783 \text{ mm}^3 = 13,78 \text{ cm}^3,$$

ahol V – a motor lökettérfogata [cm^3], d – a henger furat átmérője [mm], s – a motor lökethossza [mm], i – a hengerek száma.

Folytatásként az Inventorban elkezdtem az alapvető alkatrészek megalkotását. Elsőként a hengereket készítettem el a fentebb említettek figyelembevételével (4. ábra). Ennek megfelelően hasáb jellegű alkatrésznek rajzoltam a hengereket, amelyekben 15 mm átmérőjű furatot helyeztem el. A hengerek magassága nem egyezik meg, ahogy az őket tartó alkatrészeké sem, ugyanis a dugattyúrudakat közös csapra kellett rögzíteni, ezért a legegyszerűbb megoldás a hengerek magasságának változtatása volt. Így a rudakat sikerült egymáson elhelyeznem.



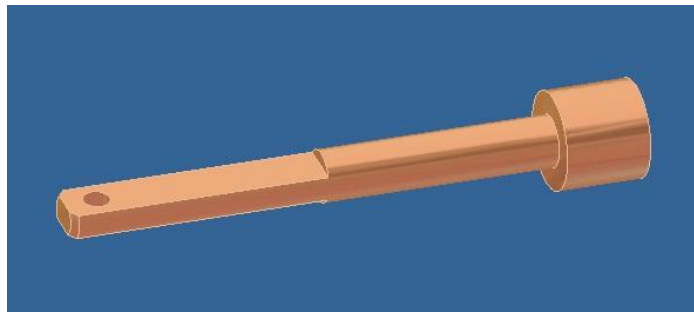
4. ábra

Henger

A hengerek alsó síkján látható két furat. A kisebbik a levegő bejutását illetve kijutását biztosítja a hengerekbe, átmérője 3 mm. A másik furat menetes és a henger elfordulását biztosítja.

A hengerbe annak furatával azonos átmérőjű dugattyút készítettem, amely érdekessége a korábban említettek miatt, hogy maga a dugattyú és a hajtókar egy azon alkatrész (5. *ábra*). Ennek oka a motor működési elve (Oscillating Engine). A hajtókart kisebb átmérőjűre készítettem, mivel lehetett volna ugyan azonos átmérőjű is a dugattyúval, azonban ezt semmi nem indokolta, hiszen számottevő terhelést nem kell elviselnie, illetve ez által némi súlycsökkenést is el lehetett érni. Ennek megfelelően a 15 mm dugattyúátmérő mellé 8 mm átmérőjűnek választottam a hajtókart, amelynek a végét le is kellett lapolni annak érdekében, hogy azok összeszereléskor biztosan és pontosan feküdjenek fel egymáson. Lapolás nélkül csak egy-egy ponton érintkeztek volna a hengerpalástok, ami nem megengedhető. A lapolás síkjára átmenő furatot készítettem, amelyen keresztül rögzíthetők a dugattyúk.

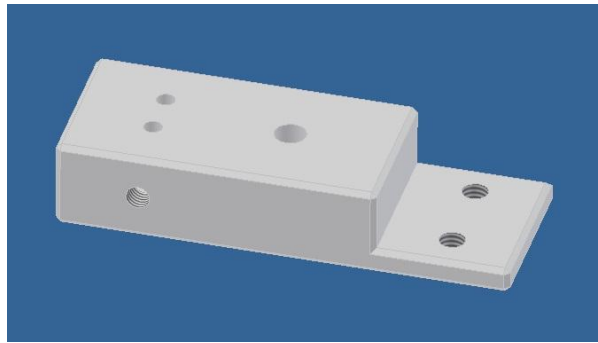
A dugattyúfejnek az átmérőhöz képest hosszúnak kellett lennie, hiszen a hagyományos működési elvhez képest - ahol a dugattyúra csak tengelyirányú erők hatnak így nem jelentős a befeszülés kockázata - itt a dugattyúra a merev hajtókaron keresztül radiális irányú erők is hatnak. Ezek a hengereket forgatják a tengelyük körül, ebből adódóan a dugattyúfej és a hengerfurat közti játékkal arányos mértékű, a henger forgástengelye körüli elfordulást okoznak. Ha ez a játék egy bizonyos értéket túllép, akkor a dugattyú előbb utóbb képes lesz olyan mértékben elfordulni a hengerben, hogy az befeszül. Mindez a dugattyúfej viszonylag hosszúra történő tervezésével - amely jobb megvezetést biztosít - illetve kenőanyagok alkalmazásával jelentősen késleltethető.



5. *ábra*

Dugattyú

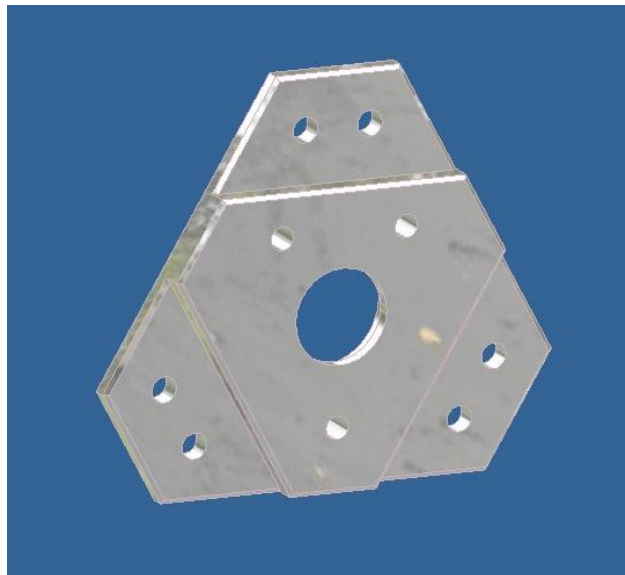
A hengerek felfogató lapja következett (6. *ábra*), amely szintén hasáb alakú alkatrész. A magasabb részen található furatok funkciói a következők. A bal szélső két furat a vezérlést végzi, mégpedig úgy, hogy az alsó furat az oldalsó menetes furaton keresztül kapja a levegőt, amelyen keresztül az a hengerbe áramlik, majd a henger elfordulása után a fenti furaton keresztül a levegő az előre felé mozgó dugattyú hatására távozik a hengerből. A középső furat a henger felfogatására szolgál, ugyanis egy menetes szár van rajta keresztülvezetve, amelynek egyik vége a henger menetes furatába van rögzítve, a másik végén pedig egy nyomórugó helyezkedik el. A rugó egyik vége a tartó lapon fekszik fel, a másik egy, a száron lévő anyacsavar homloklapján. Ennek köszönhetően az anyacsavarral előfeszített rugó eltávolítani igyekszik a szárt a tartólaptól, ezáltal a túloldalon nekifeszíti a hengert a menetes száron keresztül a tartólapnak. Az alacsonyabb részen található furatok a felfogatást szolgálják.



6. ábra

Hengertartó talp

Ezután az eddig elkészült két alkatrész összeszerelését biztosító elem megalkotása következett, amely az egész motor legbonyolultabb alkatrészének tekinthető, mind a tervezés, mind a gyártás szempontjából. A három darab hengerre való tekintettel ezt egy háromszög alakú alkatrésznek képzeltem el (7. ábra), természetesen némi változtatásokkal. Az alkatrész közepén helyeztem el a forgattyús tengely furatát, amelyben egy egysoros mélyhornyú golyóscsapágy is helyet kapott. A háromszög csúcsait el kellett távolítani, mivel az ott található anyag felesleges volt a motor összeszerelése és működése szempontjából. Az alkatrész hátoldalára szintén készítettem lemunkálásokat, mivel nélkülük nem fértek volna be a hengertartók a főtartó oszlop és a háromszög-alkatrész közé. Mindegyik csúcsot egyszerű, átmenő furatokkal láttam el, majd a hengertartók végeire készítettem menetes furatokat, így elég csak csavarokat alkalmazni a szereléshez, csavaranyák nem szükségesek. Végül három rögzítő furatot helyeztem el az alkatrészen, a forgattyús tengely körül.



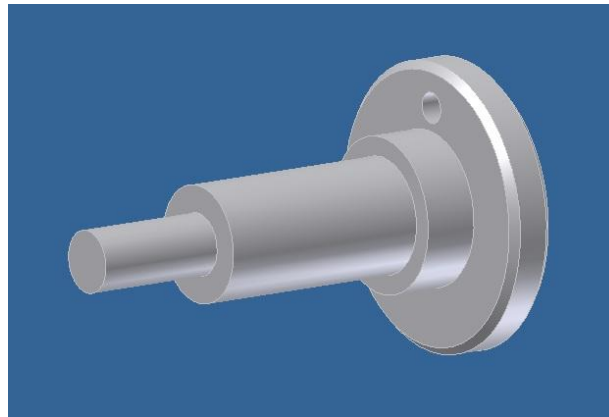
7. ábra

Háromszög-alkatrész

Ezt követően a forgattyús tengelyt készítettem el (8. ábra), szintén az egyszerűség jegyében, pusztán annak legfőbb funkciójára koncentrálnak, amely az egyenes vonalú mozgás forgó mozgássá alakítása. Lépcsős kivitelűre készítettem, ami azt jelenti, hogy a hossza mentén az átmérője ugrásszerűen változik. A lépcsősséget általában a terhelés

függvényében számítják ki és határozzák meg, ez esetben viszont a sűrített levegő nyomásából adódó erők rendkívül kis terheléseknek teszik ki nem csak a tengelyt, de a többi alkatrészt is, így az egyes lépcsőket konkrétan csupán a szerkezeti kialakítás határozta meg.

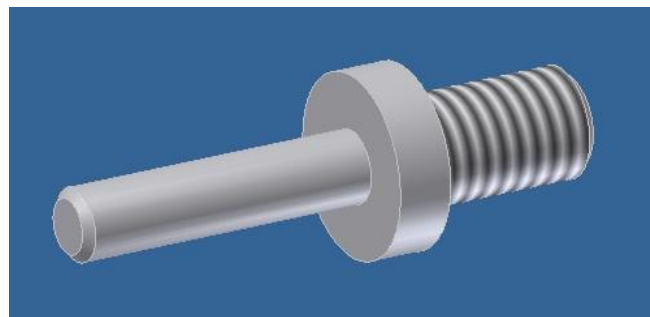
A tengelyre három lépcsőt készítettem, amelyek átmérői a hengerek felől haladva rendre csökkennek. Egy negyedik lépcsőnek tekinthető a tengely azon része, amelyen az excentrikusan elhelyezett csap található. Ezt leszámítva az első váll szerepe a tengely felütköztetése a golyóscsapágyon, ezáltal axiálisan rögzítve magát a tengelyt. A következő szakasz a már meglévő csapágyak belső átmérőjéhez lett igazítva, azaz szerepe a tengely megvezetése. Az utolsó váll a lendítőkerék felütköztetése céljából készült, tehát kizárólag a szerkezeti kialakítás szempontjai alapján.



8. ábra

Forgattyús tengely

A tengely elkészültét követően szükségessé vált a dugattyúvégeket közös tengelyre helyező csap elkészítése (9. ábra). Ez szintén viszonylag egyszerű alkatrész, azonban ezen is helyet kapott egy váll. Ennek oka, hogy mivel a tengelyhez legközelebb eső dugattyú rúdja és maga a tengely közvetlen kapcsolatban áll, így jelentős kopásnak lenne kitéve mindkét alkatrész. Ennek kiküszöbölésére került közénk egy kopásállóbb anyagból készült alkatrész, amely egyben közös tengelyként is szolgál a hajtókarok számára. A nagyobbik átmérőjű, menetes rész excentrikusan csatlakozik a forgattyús tengelybe, a kisebb átmérőjű részhez a hajtókarok kapcsolódnak.

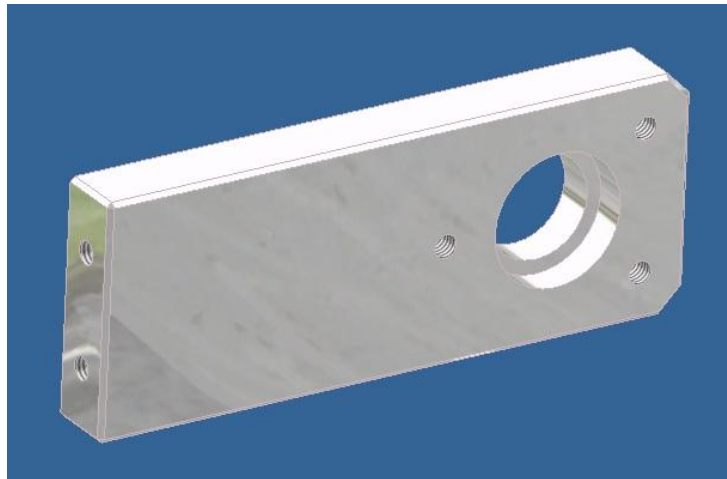


9. ábra

Csap

Következő lépésként a motor fő tartóelemét készítettem el, a hátlapot (10. ábra). Ebben az alkatrészben foglal helyet a másik golyóscsapágy is, amely a forgattyús tengely

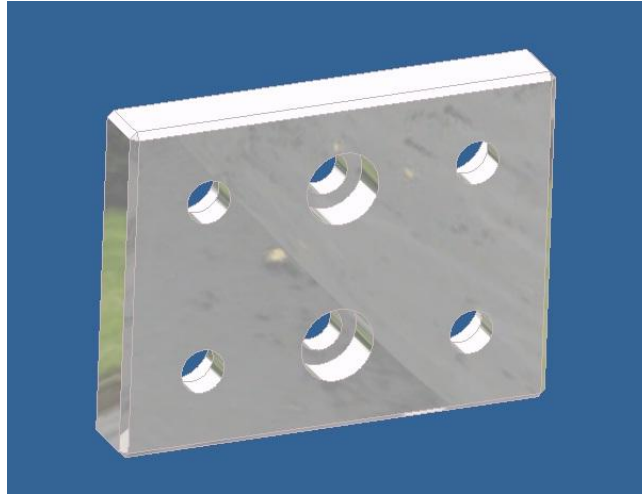
megvezetését végzi. A többi alkatrészhez hasonlóan ez is egy tömb, amely megfelelő távolságban tartja a motor mozgó alkatrészeit a talajtól, ennek megfelelően állítva kell beépíteni a motorba. Mivel a rövidebbik élére állítva nem lenne stabil a szerkezet, ezért még egy hasábot el kell helyezni a hátlapra merőlegesen. Ennek rögzítésére a hasáb alsó oldalába két menetes furatot, valamint a csapágy furat köré a háromszög-alkatrész rögzítésére szolgáló három menetes furatot készítettem. A csapágy beépítését megkönnyítendő, lépcsős furatot készítettem a hátlapba, hasonló megfontolásból, mint a tengely esetében. A kisebbik átmérőjű lépcső által létrehozott váll a csapágy felütköztetésére szolgál, ezáltal biztosítva axiálisan az egyik irányban a csapágyat. A másik irányú biztosítást szereléskor alakítottam ki, mégpedig utólagos képlékeny alakítással. Ez annyit jelent, hogy a behelyezést követően a furat szélét három helyen pontozóval beütöttem, így apró kitüremkedéseket létrehozva a furat homlokfelületén, amelyek alakkal záró módon rögzítették a csapágyat a furatban. Ennek a módszernek az előnye az egyszerűség, hiszen nincs hozzá szükség speciális szerszámra, illetve szinte bármilyen felületen létrehozható. Hátránya viszont, hogy általa csak oldhatatlan kötés hozható létre, tehát a csapágyat később nem lehet eltávolítani. Ebben az esetben azonban nincs is szükség a csapágy eltávolítására, mivel a rendkívül ritka és rövid üzemelésből adódóan a csapágy elhasználódása elhanyagolható, így valószínűleg karbantartásra illetve cserére sem lesz szükség.



10. ábra

Hátlap

A motor már majdnem elkészült, viszont még nem lehetett stabilan felállítani. Ennek kiküszöbölésére készítettem még egy egyszerű alkatrészt, amelyet talpnak neveztem el. A talp (11. ábra) a többi alkatrészhez hasonlóan hasáb jellegű és a hátlappal azonos vastagságú. Középen két süllyesztett furatot készítettem belső kulcsnyílású csavarok számára. Az alkatrész négy sarkán szintén furatokat helyeztem el, mivel a későbbiekben a motor egy fa alaplappra lesz rögzítve, amelyen a motor sokkal esztétikusabban fog mutatni.



11. ábra

Talp

Végül utolsó alkatrészként egy lendítőkereket (12. ábra) készítettem a motor forgattyús tengelyének tengelycsonkjára. A lendítőkerék feladata a motor átsegítése a holtpontokon történő túllendülésekkor a benne tárolt mozgási energia által, illetve a motor járásának egyenletessé tétele. Az ideális lendítőkerék nagy tömegű és nagy átmérőjű, ebből adódóan nagy a tehetetlenségi nyomatéka. A forgó mozgásnál használt tehetetlenségi nyomaték azonos jellegű mennyiség a haladó mozgásnál értelmezett tömeggel. Értéke megadja, hogy egy forgó rendszernek mennyire „nehéz” megváltoztatni a szögsebességét. Egy körpályán mozgó anyagi pont tehetetlenségi nyomatékát meghatározhatjuk a $\Theta = m \cdot r^2$ összefüggéssel, amelyben m az anyagi pont tömege, r pedig az anyagi pont forgástengelytől mért távolsága, azaz a körpálya sugara. A fenti összefüggésből látható, hogy a tehetetlenségi nyomaték a tömeggel egyenes arányosságban, a sugárral négyzetes arányosságban áll. Ez azt jelenti, hogy egy test tehetetlenségi nyomatékát úgy növelhetjük hatékonyan (ha ez szükséges), ha minél nagyobb tömeget helyezünk el rajta, minél nagyobb sugáron.

Az általam készített lendítőkerék nem lehetett tetszőlegesen választott átmérőjű, mivel a hengereket tartó kiálló menetes szárok korlátot szabtak ennek. Mindezek figyelembevételével az alábbi számításokban alkalmazott jelölések a lenti ábra méretei alapján:

a lendkerék belső sugara $r_1 = 4$ mm, a lendkerék külső sugara $r_2 = 35$ mm, a könnyítés belső sugara $r_b = 10$ mm, a könnyítés külső sugara $r_k = 30$ mm, a könnyítés nélküli lendkerék tömege $m_{\text{tömör}} = 0,196$ kg, a könnyítés tömege $m_{\text{könnyítés}} = 0,034$ kg, a lendkerék szélessége b .

A lendkerék tehetetlenségi nyomatékának számításához szükséges elemi tömeg

$$dm = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot dr \cdot b \cdot \rho,$$

a tehetetlenségi nyomaték

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{tömör}} &= \int_V r^2 dm = \int_{r_1}^{r_2} r^2 \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \cdot dr = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \int_{r_1}^{r_2} r^3 \cdot dr = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \left[\frac{r^4}{4} \right]_{r_1}^{r_2} = \end{aligned}$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \left[\frac{r_2^4}{4} - \frac{r_1^4}{4} \right] = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \cdot (r_2^4 - r_1^4) =$$

$$\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot b \cdot \rho \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot (r_2^2 + r_1^2) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 + r_1^2).$$

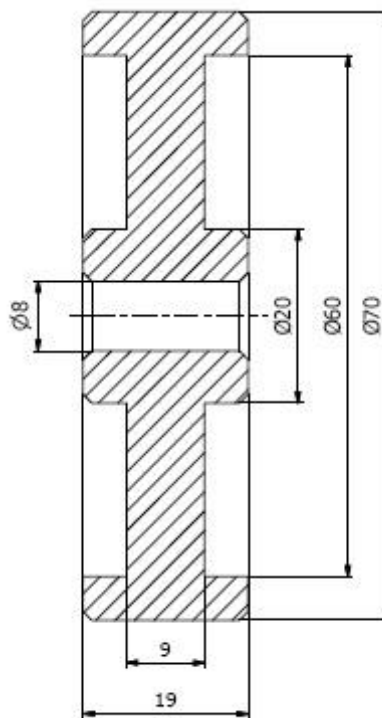
$$\Theta_{\text{tömör}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 + r_1^2) = \frac{1}{2} \cdot 0,196 \text{ kg} \cdot [(0,035 \text{ m})^2 + (0,004 \text{ m})^2] = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Az így kapott érték a tömör, könnyítések nélküli tárcsa tehetetlenségi nyomatékát adja meg. A pontos érték meghatározásához szükség van az üres körgyűrűk okozta tehetetlenségi nyomaték csökkenés kiszámítására. A fenti összefüggéshez hasonlóan a két körgyűrű okozta tehetetlenségi nyomaték csökkenés:

$$\Theta_{\text{üres}} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_k^2 + r_b^2) = 0,034 \text{ kg} \cdot [(0,03 \text{ m})^2 + (0,01 \text{ m})^2] = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

Az ábrán látható lendítőkerék tehetetlenségi nyomatékát a két érték különbsége adja:

$$\Theta_{\text{kerék}} = \Theta_{\text{tömör}} - \Theta_{\text{üres}} = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 - 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$



12. ábra

Lendítőkerék metszetben

A motor háromdimenziós tervezési szakasza ezen alkatrész elkészültével befejeződött. A következő feladat a gyártáshoz szükséges összeállítási- és alkatrészrajzok elkészítése volt, amelyhez szintén az Autodesk Inventor programot használtam, mellyel a modellekből közvetlenül és gyorsan lehet a műhelyrajzokat előállítani.

4. Az elkészítés

4.1. Az alapanyagok kiválasztása

A motor alkatrészeinek elkészítéséhez olyan alapanyagra volt szükség, amely elsősorban kis sűrűségű, hiszen egy kézbe vehető modellhez képest viszonylag nagy térfogatú alkatrészek készülnek belőle. Továbbá kereskedelmi forgalomban kapható legyen, lehetőleg olcsón. A szilárdsági tulajdonságok ebben az esetben nem mérvadóak, hiszen a néhány bar nyomású sűrített levegőből adódó erők nem teszik ki nagy terheléseknek az alkatrészeket. A fentiek figyelembevételével az alumíniumra esett a választás. A dugattyúk anyagául azonban sárgarezet választottam, mivel jobb kopási tulajdonságokat reméltem tőle, mintha a henger és a dugattyú is alumíniumból készült volna. Ennek teljesülését a tesztelési fázisban ellenőriztem.

Mivel a motor összes alkatrésze – a kötőcsavarokat és a csapágycsapatokat leszámítva – mind egyedi, forgácsolt gépelem, ezért az alapanyagok megvásárlása előtt minden alkatrész esetén meg kellett határozni a megmunkálási ráhagyásokat. Ezen értékeket átlagosan 5 mm-re választottam, hiszen ennél nagyobb ráhagyás esetén túl nagy anyag felesleg keletkezne, ami gazdaságtalanná tenné az alkatrészek gyártását. Miután minden alkatrészt meghatároztam a ráhagyásokat, a kapott értékeket felfelé – 5-re vagy 0-ra – kerekítve meg lehetett rendelni az alapanyagok darabolását. Az egyes alkatrészek olyan felületeire, amelyek nem érintkeznek más alkatrészekkel, illetve méretpontosságuk nem létfontosságú a motor üzemelése szempontjából, azokra nem számítottam ráhagyást, helyette meghagytam a szabványos méretét. Ilyen például a Talp 10 mm-es magassági méretének pontossága, amely elhanyagolható, ugyanis teljesen lényegtelen, hogy a motor milyen magasan helyezkedik el a talajtól. Szélességi mérete azonban lényeges, hiszen nem esztétikus, ha a talp szélessége eltér a hátlap szélességétől.

4.2. Az alkalmazott eszközök

A motor alkatrészeinek legyártásához szükséges eszközöket, berendezéseket és szakmai támogatást a Pannon Egyetem Alkalmazott Gépészet Intézeti Tanszéke bocsátotta rendelkezésemre.

A hengeres alkatrészeket (a forgattyús tengelyt és a lendítőkereket) egyetemes csúcsesztergán készítettem, a hasáb jellegűeket egyetemes marógépen, ujjmaró szerszámokkal. Az alkotóelemek túlnyomó többsége tömb alkatrész, így a legtöbbet a marógépet kellett használni a gyártás során.

Alapvetően egyszerű műveletekből épül fel a marás technológiája, ha csak egyetemes marógép áll rendelkezésre, hiszen ez magában foglalja a kézi szánmozgatást, amelynek következtében egyszerre csak egy tengely mozgatása lehetséges. Az egyszerűsége egyben a hátránya is a CNC technikával szemben, ahol a számítógép által vezérelt szerszámgép képes akár mindhárom tengelyének egyidejű, összehangolt mozgatására is. Kézi vezérlés esetén azonban egy befogásban csak két, egymásra merőleges irányban lehet megmunkálást végezni, így például egy merőlegetől eltérő szögben nem lehetséges a szerszám adott pályán történő mozgatása. Ennek eredményeképp előre meg kellett tervezni minden egyes alkatrész esetén az anyagleválasztás sorrendjét, azaz az egymást követő lépéseket illetve azt, hogy ezeket a lépéseket milyen befogásban lehet elvégezni.

Az alkatrészek nagy részének megmunkálásakor egy 12 mm átmérőjű, három élű ujjmaró szerszámot használtam. Ahol ennél nagyobb anyagleválasztást kellett elérni egy befogásban, ott egy egyélű körkést alkalmaztam, amely egy rendkívül egyszerű szerszám. Egy hengeres befogó részből egy egyélű esztergakés áll ki, de meredeken

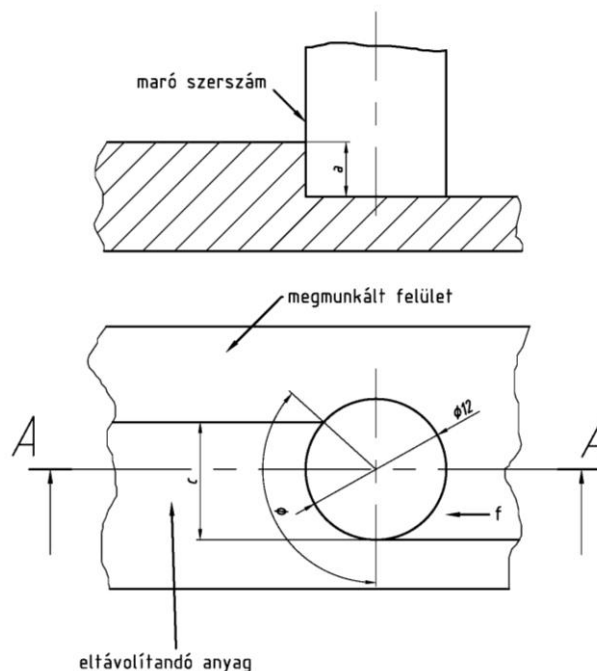
lefelé mutató irányban. Ezzel a megoldással az esztergakésből marószerszámot lehet készíteni. Előnye az egyszerűség, hátránya azonban, hogy az egy dolgozó él és annak excentricitása miatt más szerszámokhoz képest csak kisebb fordulatszámmal, illetve ebből adódóan kisebb előtolási sebességgel használható. A csökkentett előtolásra azért van szükség, mert az egy élből adódóan a szerszám két forgácsleválasztás között nagyobb utat tenne meg megmunkálás nélkül, mint ha egy normál szerszámnál alkalmazott előtolási sebességet választottunk volna. Ebben az esetben a megmunkált alkatrész felületi minősége jelentősen csökkenne az üresjáratban megtett távolságok, ebből adódóan a megmunkálatlan felületi részek miatt. Így azonban több „ideje” marad a szerszámnak a forgácsolásra.

A megmunkálási lépések a hengerek és a hozzájuk hasonló alkatrészek esetén nagyon hasonlóak voltak, hiszen csak néhány mm-nyi anyagfelesleget kellett eltávolítani. Ezt oldalanként külön-külön befogással lehetett megvalósítani, két-három fogásban. A fogásmélység értékének általában 2 mm-t választottam, amely még nem jelentett nagy terhelést a szerszámnak, így egy oldalt 2-3 fogásban lehetett készre munkálni. Ezek a fogások az utolsót leszámítva nagyoló megmunkálások, amelyek jellemzője a nagy anyagleválasztási teljesítmény. Ezt viszonylag nagy fogásmélységgel és nagy előtolási sebességgel lehet elérni. Az utolsó fogás minden esetben egy simító fogás volt, amelyre jellemző a kis anyagleválasztási sebesség, a rendkívül kis fogásmélység és az alacsony előtolási sebesség.

4.3. Gyártás

Az alábbiakban látható a marás technológiai paramétereinek számítása. Mivel az összes munkadarab összes felületének megmunkálási paramétereinek ismertetése rendkívül hosszadalmas lenne, ezért egy kiválasztott alkatrész, az egyik henger talpfelülete megmunkálásának számítását mutatom be. [6]

A megmunkálás során nem alkalmaztam „telibe” marási módszert (13. ábra), ami azt jelenti, hogy nem a teljes szerszámtér dolgozik a megmunkálás során, hanem annak csak egy bizonyos hányada.



13. ábra

Henger marása

Adatok:

Fogankénti előtolás: $f_z = 0,1 \frac{\text{mm}}{\text{ford.}}$

Forgácsoló sebesség: $v = 25 \frac{\text{m}}{\text{min}}$

Függőleges irányú fogásmélység: $a = 2 \text{ mm.}$

Vízszintes irányú fogásmélység: $c = 8 \text{ mm.}$

A szerszám átmérője: $d = 12 \text{ mm.}$

Fajlagos forgácsolási ellenállás: $k_s = 750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Megoldás:

A forgácsolási ív hossza

$$i_f = \frac{d_{sz} \cdot \pi \cdot \phi}{180^\circ}$$

A forgácsolási átfogási szög

$$\Phi = 90^\circ + \alpha_f = 90^\circ + \arcsin \frac{c - r_{sz}}{r_{sz}} = 90^\circ + \arcsin \frac{8 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 109,47^\circ$$

A közepes forgácsvastagság

$$h_x = f_z \cdot \frac{c}{i_f} = f_z \cdot c \cdot \frac{180^\circ}{d_{sz} \cdot \pi \cdot \Phi} = 0,1 \text{ mm} \cdot 8 \text{ mm} \cdot \frac{180^\circ}{12 \text{ mm} \cdot 109,47^\circ} = 0,1096 \text{ mm} = 0,11 \text{ mm.}$$

Az egy élre jutó forgácsoló erő

$$F_{vz} = k_s \cdot A_z = k_s \cdot h_x \cdot a = 750 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,11 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} = 165 \text{ N.}$$

A kapcsolási szám

$$\psi = \frac{i}{t} = \frac{\frac{d_{sz} \cdot \pi \cdot \phi}{180}}{\frac{d_{sz} \cdot \pi}{z}} = \frac{z \cdot \phi}{180^\circ} = \frac{3 \cdot 109,47^\circ}{180^\circ} = 1,8245.$$

A teljes forgácsoló erő

$$F_v = \psi \cdot F_{vz} = \frac{\phi \cdot z}{180} \cdot F_{vz} = \frac{k_s \cdot a \cdot f_z \cdot c \cdot z}{d \cdot \pi} = 1,8245 \cdot 165 \text{ N} = 301,04 \text{ N} = 301 \text{ N.}$$

A szükséges teljesítmény

$$P_v = F_v \cdot v = 301 \text{ N} \cdot 0,4166 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 125,41 \text{ W} = 125 \text{ W.}$$

A kapott számok kis értékeknek számítanak, ami az alacsony előtolási sebesség, a forgácsolási sebesség és a fogásmélység értékeiből adódik. Ennél gazdaságosabban akkor lehetett volna gyártani az alkatrészeket, ha ezen értékeket nagyobbak választom, így jobban ki lehetett volna használni a szerszámgép teljesítményét. Ezen értékeket mindössze elővigyázatosságból választottam ennyire kicsinek.

Az összes alkatrész marási folyamata hasonlóképpen nézett ki. A marógépen lévő satuban távtartó hasábokon rögzítettem a nyersanyagot, amire azért volt szükség, mert a satu pofái sokkal magasabbak voltak, mint a megmunkálendő darabok. A hasábok nélkül nem lehetett volna minőségi megmunkálást végezni, hiszen a szerszámmal be kellett volna nyúlni a satupofák közé. Ez egyrészt nem is biztos, hogy megoldható lett volna a szerszám hossza miatt, másrészt veszélyes is mind a szerszámra, mind a pofákra nézve. Ha ugyanis a munkadarab a pofák felső síkja alatt helyezkedik el, akkor a megfogás miatt nem lehet annak felső síkját teljes egészében megmunkálni a szerszám és a satu ütközése nélkül. Mindezek kiküszöbölése érdekében kellett a hasábokat alkalmazni.

A hasábok a satu pofái közé kerültek, annak szánjára, majd a nyersanyagot a hasábra helyezve, enyhe megszorítás után gumikalapáccsal le kellett ütögetni, hogy a munkadarab biztosan teljes egészében felfeküdjön a távtartó hasábokon. Elhelyezkedési és egyéb hibák nem megengedettek.

Befogás és a gép beindítása után a munkadarabot a szerszám alá mozgattam a kézi tekerők segítségével, úgy, hogy a szerszám legalsó pontja éppen hogy megérintette a nyersanyag felső síkját, majd lenulláztam a kézi tekerő osztását. Ezen folyamatot érintő fogásnak nevezik és az a célja, hogy egy bázisfelületet jelöljön ki a munkadarabon, amelyhez képes viszonyítani lehet a megmunkálás további mozgásait. Ezt követően vízszintes irányban a nyersanyagot a szerszám elé helyeztem, rá merőleges irányban pedig szintén érintő fogást vettem. Itt azonban már nem a szerszám homloklapjával érintettem az anyagot, hanem a palásfelületével. Erre azért volt szükség, hogy $0,6 \dots 0,7 d_{sz}$ -nek megfelelő átfedést tudjak kialakítani a szerszám és a munkadarab között. Ez utóbbi a vízszintes irányú fogásmélység (c), amely értékek táblázatban olvasható, javasolt viszonyszámok. Általános esetben a munkadarabon nem csak egy bázisfelület szokás kijelölni, hanem egy referencia pontot, amely három bázisfelület (sík) metszéspontjaként adódik. Erre akkor van szükség, ha a szerszám mindhárom irányú mozgását számszerűen követni kell. Ebben az esetben azonban csak a függőleges irányú távolság mérésére volt szükség, hiszen a munkadarab teljes síkjában el kellett távolítani a ráhagyást, így lényegtelen volt, hogy vízszintes irányban mekkora távolságokat tesz meg a szerszám.

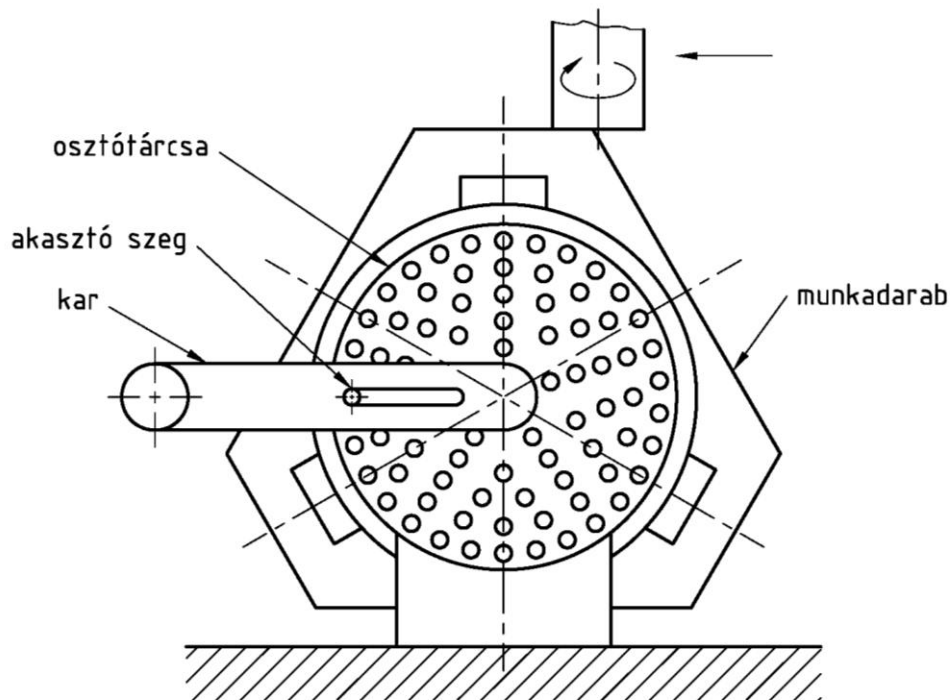
Az érintő fogásokat követően függőleges irányban is fogást vettem, az asztallal együtt mozgó munkadarabbal. Ezt az értéket viszont már mértem a gép kézi szánjának osztását figyelve és a korábbi számításoknak megfelelően 2 mm-re állítottam be, majd elkezdtem az érdemi forgácsolást a gépi előtolás bekapcsolásával. Ezt egy karral lehetett megtenni, amely közvetlen kapcsolatot létesít a gép főorsója és az asztal mozgatóorsója között. Ennek köszönhetően nem kellett folyamatosan a gép mellett állni és kézzel mozgatni az asztalt, hanem ezt a gép elvégezte helyettem, ráadásul a gépi előtolás teljesen folytonos mozgást biztosít, amelyet kézzel nem biztos, hogy meg lehet valósítani. A mozgás folytonossága azért lényeges, mert a mart felületen megmunkálási nyomok láthatóak, amelyek a szerszám forgó mozgásából adódóan körívek. Ezek egymástól mért távolsága az előtolási sebességgel arányos. Ha az előtolás nem folytonos, akkor a nyomok sem egyenlő távolságokban helyezkednek el egymástól, amely valamelyest levon a munkadarab esztétikai értékéből.

Mivel a marógép főorsója felülről nézve az óramutató járásával megegyező irányban forog, a munkadarab szintén felülről nézve balról érkezik, a fogás pedig lefelé halad (a fenti ábrának megfelelően), ezért a megmunkálás ilyen fajta elrendezése a palástmarásnál is értelmezett ellenirányú marás esete. Ez azt jelenti, hogy ha a szerszámot tekintjük mozdulatlanak, akkor annak kerületi sebesség vektora és a munkadarab sebességvektora egymással szembe mutatnak. Ha a főorsó az ellenkező irányban forogna, akkor egyenirányú marás valósulna meg. A két fajta megmunkálási mód között az a különbség, hogy míg ellenirányú marás esetén a szerszám éle alulról folytonosan hatol bele az anyagba, így jelentős csúszás, ezzel együtt melegedés is fellép. Egyenirányú marás esetén a szerszám felülről hatol az anyagba, ott viszont nincs folytonos átmenet a teljes forgácsvastagság eléréséig, hanem hirtelen ütésszerű terhelést kap a szerszám.

Miután a megmunkálás befejeződött a munkadarab teljes hosszán, ellenirányú módon, újabb vízszintes irányú fogásvétel után a szerszámmal újabb megmunkálást indítottam visszafelé szintén gépi előtolással. Mivel a szerszám forgásiránya nem változott, csak a megmunkálás iránya, így az egyenirányú módban folytatódott a korábbival ellentétesen. Ezek a műveletek addig követték egymást, amíg a teljes felület megmunkálása véget nem ért. Ezután újabb függőleges irányú fogásvétel következett és a fent leírt folyamat ismétlődött.

A teljes művelet a hengerek esetén azonos, mindhárom a 12 mm átmérőjű három élű ujjmaróval készült, ahol nagyobb mennyiségű anyagot kellett leválasztani – például a hátlap hosszabbik oldalával párhuzamosan – ott a körkést használtam.

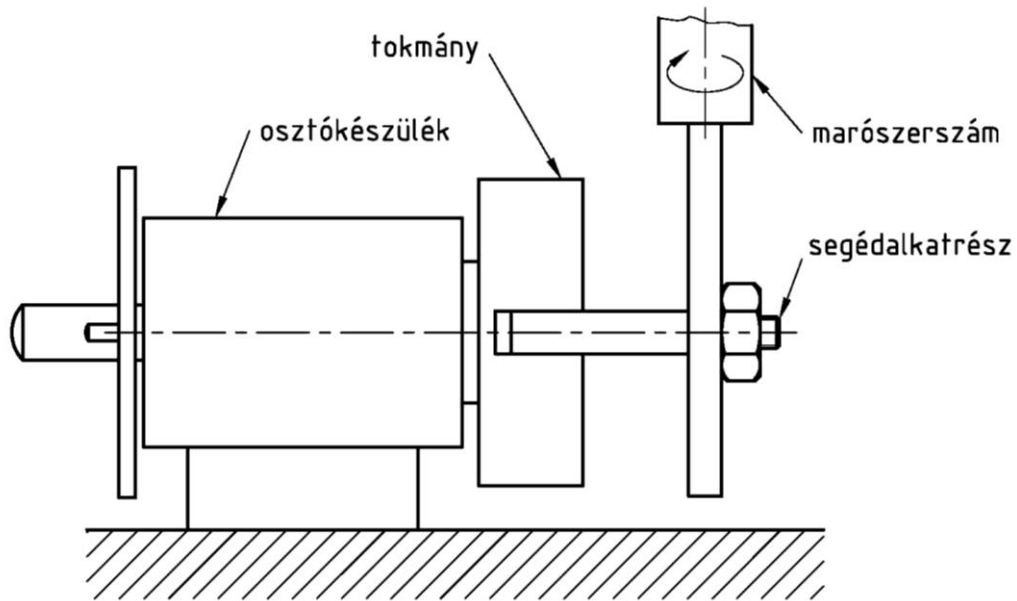
A legtöbb alkatrészt ezzel a műveletssorral le lehetett gyártani, azonban a háromszög alakú alkatrésznél nem lehetett alkalmazni. Ott ugyanis a nyersanyag négyzet alakú volt, amelyből ki kellett alakítani a lehetőleg alak- és méretpontos háromszöget. Az alkatrész oldalai egymással 120° -ot zárnak be, azaz a munkadarabot a megmunkálás egyes szakaszai között forgatni kell, ezt marógépen a legegyszerűbben osztókészülékkel lehet megvalósítani (14. ábra). Az osztókészülék gyakorlatilag egy olyan tokmány, amelyet adott áttételen keresztül egy karral lehet elforgatni a tengelye körül. Annak érdekében, hogy biztosítani lehessen a kívánt szöggel történő elforgatást, egy osztótárcsa helyezkedik el a kar mögött, vele azonos tengelyen. A tárcsa homlokfelületén körben furatok találhatók, több gyűrűben, adott osztással. Ezen furatokba egy, a karon lévő csap illeszkedik, amely megakadályozza, hogy a megmunkálás során a munkadarab elforduljon a kívánt pozícióból. Mivel a furatok osztása adott, ennek és az osztókészülék áttételének ismeretében kiszámítható, hogy hány teljes körülfordulással illetve furatosztással kell a kart elforgatni, hogy a munkadarab a kívánt szögértékkel forduljon el. Azonban a megfogásra alkalmazott tokmány miatt a készülékben elsősorban csak átmérős, azaz hengeres alkatrészek marhatók adott szögben.



14. ábra

Osztókészülék alkalmazása

Bizonyos megoldásokkal természetesen be lehet fogni egyéb alakú nyersanyagot is. Egy példa az ilyen megoldásokra, ha a munkadarabot átfúrják egy olyan helyen, ahol az nem okoz problémát funkciójának ellátásában – még jobb eset ha eredetileg is található az előgyártmányon ilyen furat. Ezen a furaton átvezetnek egy hengeres segéd alkatrészt, amit pedig befognak az osztókészülék tokmányába (15. ábra). Ez esetben már csak a munkadarab segéd alkatrészt történő biztonságos rögzítését kell megoldani és itt jelentkezik a módszer hátránya. Ez a hátrány pedig az, hogy esetenként egyáltalán nem vagy nem teljesen biztosítható az alkatrész rögzítése a segédalkatrészen, akár a munkadarab szilárdsági jellemzői, akár annak felületi sérülékenysége miatt. Ennek következtében én sem tudtam ezt a módszert alkalmazni, hanem más lehetőséget kellett keresni, holott ez lett volna a legprecízebb megoldás, amelyet én magam is el tudok készíteni (különböző cégekkel történő legyártatást leszámítva, pl. vízsugaras vágással).



15. ábra

Segédalkatrész alkalmazása

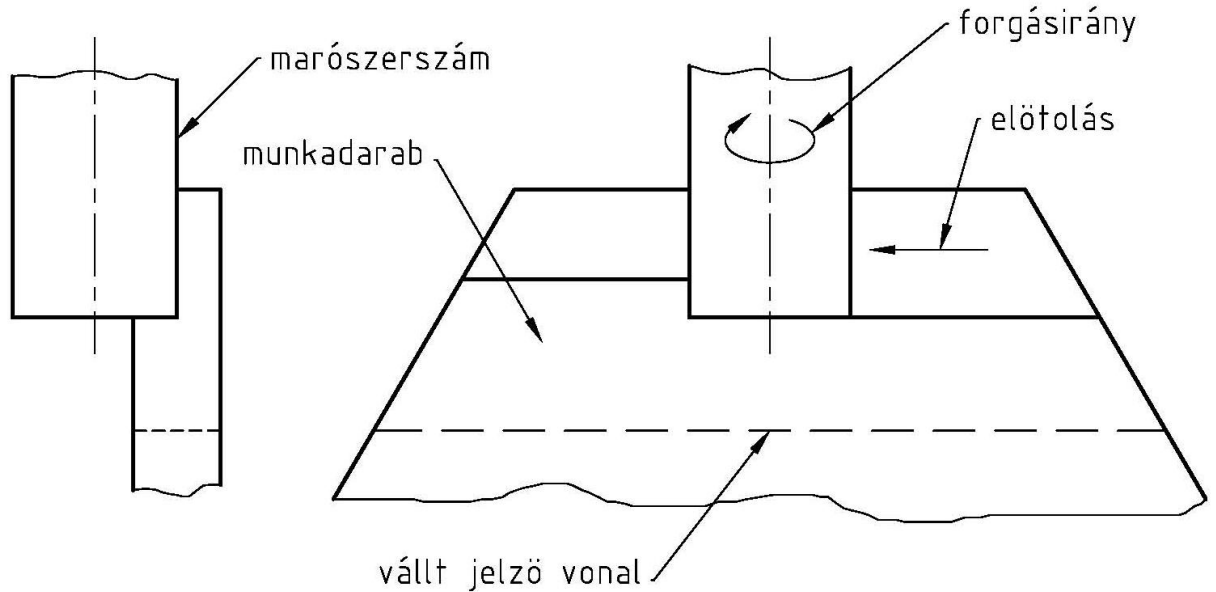
Ehelyett egy olyan módszert sikerült találni, amely ugyan nem adott lehetőséget olyan alak- és méretpontosság elérésére, mint az osztókészülék, viszont annak alkalmazása nélkül legyártható volt az alkatrész. Ez a módszer pedig úgy nézett ki, hogy vonalzóval és egy karctűvel megszerkesztettem a munkadarab – nagyjából pontos – mását a nyersanyag felületére, amely már egy támpontot adott a megmunkálás során. Még a háromszög oldalainak megmunkálása előtt elkészítettük a golyóscsapágy furatát egytetemes csúcsesztergán furatkést alkalmazva, ugyanis nem állt rendelkezésre olyan fűrészszerszám, amellyel a csapágy rendkívül kis tűrésű furatát meg lehetett volna munkálni. Ilyen műveletet azelőtt még nem végeztem esztergán, ezért a feladat elvégzéséhez szakmai segítséget kértem. A nyersanyag fűrészelt oldalfelülete azonban nem volt elegendő minőségű az eszterga tokmányába történő befogáshoz, ezért annak mind a négy oldalát egy-egy nagyoló fogással síkra martam. Ezt követően már be lehetett fogni az eszterga tokmányba a munkadarabot viszonylag központosan, amelyet egy 10 mm átmérőjű kétélű csigafúróval történő telibe fúrás követett. Miután már volt egy furat a nyersanyag közepén, furatkéssel meg lehetett növelni azt a kívánt mértékben és mélységben. A furat mélysége lényeges volt, ugyanis axiális rögzítés szempontjából – és az alkatrészrajz szerint is - egy vállat kellett hagyni a csapágy mögött, amelyen fel tudott ütközni. A furat átmérőjének pontos beállítása rendkívül hosszadalmas folyamat volt, mivel magát a csapágyat kellett minden fogás után belepróbálni. Miután a csapágyfuratot sikerült készre esztergálni, a nyersanyagot befogtam a marógép satujába majd az egyik felkarcolt élt kiválasztva végigmartam annak mentén a darabot. Mivel ebben a befogásban ennek a munkadarabnak volt a legkisebb a szélessége a többi alkatrészhez képest, ezért csak egyszer kellett fogást venni vízszintes irányban, hiszen a szerszám átmérője nagyobb, mint az anyag szélessége. Ennek megfelelően csak egyszer kellett vízszintesen pozicionálni a munkadarabot, majd az egyes löketek végén függőleges irányban kellett fogást venni. Az első hosszú oldal elkészülését követően már volt az alkatrészen egy olyan bázisfelület, amelyhez viszonyítva egy szögmérővel már be lehetett állítani a munkadarabot úgy, hogy a satu szánjával 60° -os szöget zárjon be. A szögbe állítás és a satu megszorítása után meg lehetett munkálni a háromszög

következő oldalát, az elsőhöz hasonlóan függőleges irányú fogásvételekkel. A harmadik oldal is hasonlóképpen készült.

Ezt követően a háromszög csúcsait kellett lemunkálni, itt viszont már nem kellett a munkadarabot szögmérővel beállítani, hiszen a hosszú és rövid oldalak páronként párhuzamosak egymással. Ebből adódóan elegendő volt egy hosszabb oldalon felfektetni azt a satu szánjára és megszorítani. A két oldal távolságát a műhelyrajzon beméreteztem, így ennek ismeretében - a pontos megmunkálás érdekében – oda, ahová a rövid oldal került, egy előzetes bázisfelületet kellett kialakítani. Erre azért volt szükség, mert a hosszú oldalak elkészítése után a rövid oldalak helyén szabálytalan alakú, sorjás felület alakult ki, amelynek rendkívül nehéz lett volna tolómérővel pontosan megmérni a hosszú oldaltól mért távolságát. Miután egy tetszőleges méretű darabot – de még a felkarcolt vonalat el nem érve – leforgácsoltam a munkadarabról, azt a satuból kivéve már pontosan meg lehetett mérni az említett távolságot. Ennek ismeretében, a darabot a satuba visszاسzorítva és érintő fogás vétele után, a két oldal távolságának és a konkrét méret ismeretében egy egyszerű kivonással meg lehetett határozni azt a távolságot, amely a végső méret kialakításához szükséges. Ezt a fogásmélységgel elosztva megkaptam a fogásszámot, amely megadta, hogy hány fogásból lehet elérni a kívánt méretet.

Ezzel a művelettel maga a háromszög alakzat elkészült, azonban további megmunkálásokra volt szükség. Az alkatrésze három lapolást is terveztem közvetlenül a rövidebbik oldalak mellé, így ezeket, illetve a rögzítő furatokat is el kellett készíteni. A lapolások mélysége az anyagvastagság felét teszi ki, azaz 5 mm-t, amelyet két fő elrendezési mód szerint lehet eltávolítani. Az első variáció szerint a munkadarabot a satuba vízszintes helyzetben befogva el lehetne végezni a megmunkálást, azonban ezt nem lehetett megoldani. Ennek oka a munkadarab elhelyezése. Az egyik lehetőség, ha a munkadarab nem teljesen a satupofák között, hanem azok közül kilógva helyezkedik el. Így a lapolás vállrésze párhuzamosan helyezkedett volna el a szerszámgép egyik tengelyével, azonban maga a munkadarab élek mentén feküdt volna fel a pofákra. Ez a végtermék épségének szempontjából nem megengedhető, hiszen a satu szorítása eldeformálta volna a felfekvő éleket. A másik lehetőség szerint a munkadarab egy hosszú és egy rövid él mentén ér a satupofákhoz. Ez a befogás a munkadarab szempontjából sokkal előnyösebb lenne az előzőnél, viszont ilyen pozícióban a forgácsolandó területet határoló felület egybeesett volna a satupofa síkjával, ami a szerszám és a satu ütközését okozta volna. Ez elkerülhetetlen lett volna, ha a készre munkálás a cél. Mindezt azonban ki lehetne küszöbölni, ha sikerül a munkadarabot különböző távtartó hasábok segítségével olyan magasra kiemelni a satuból, hogy annak legfelső síkja és a lapolás síkja már éppen nem esik egybe, viszont a munkadarab még elég mélyen foglal helyet a pofák között a biztonságos megfogáshoz. Ehhez a megoldáshoz azonban nem állt rendelkezésre különböző magasságú távtartók olyan kombinációja, amellyel a fent leírt szintre tudtam volna emelni a nyersanyagot.

A végül alkalmazott elrendezés szerint a munkadarabot nem vízszintes, hanem függőleges pozícióban fogtam be, a nagyobb síkfelületét a pofák felé fordítva (16. ábra). Így biztosítottam a megfelelően nagy felfekvő felületeket, illetve a megmunkálás iránya is párhuzamos volt a szerszámgép egyik tengelyével. Ez utóbbinak köszönhetően a gépi előtolást is lehetett alkalmazni.



16. ábra

Lapolás marása

A munkadarab legyártásának utolsó művelete a rögzítő furatok elkészítése. Ehhez először fel kellett jelölni az alkatrész homlokfelületére a furatok pozícióit, amelyet egy tolómérővel végeztem. Az alkatrészrajzon feltüntettem a furatok oldalaktól mért távolságait is, így ezeket a távolságokat a tolómérőn beállítva fel lehetett karcolni a tolómérő hegyével a munkadarab felületére. Az egyes távolságok metszéspontjai adták meg a furatok pozícióit, amelyeket pontozóval is meg kellett ütni annak érdekében, hogy fúraskor a szerszám ne vándoroljon el a kívánt helyzetből. Miután az összes furat pozícióját felrajzoltam és bepontoztam a munkadarabon, egy oszlopos fűrőgép és annak tokmányába befogott kétélű csigafűrő segítségével elkészítettem az egyes furatokat.

A többi mart alkatrész ehhez hasonlóan készült, azonos műveletekkel és forgácsolási paraméterekkel. Néhány alkatrésznél előfordult azonban, hogy egy befogással több irányban is lehetett megmunkálást végezni, azaz nem kellett a következő megmunkálási lépés elvégzéséhez másik befogást alkalmazni. Mivel a szerszámgépen csak egy irányban lehetett gépi előtolást használni, így a rá merőleges irányban kézi előtolással kellett a forgácsolást elvégezni.

4.4. Összeszerelés

A motor összeszerelése az alkatrészek elkészülésének sorrendjében történt. A gyártás során az első alkatrészek a talp és a hátlap voltak, majd őket követte a háromszög alkatrész, a főtengely, illetve a lendítőkerék. Ezen alkotó elemek összeszerelt állapotát mutatja az alábbi fotó (17. ábra).



17. ábra

A motor félkész állapotban

Az összekötő csavarok általánosan M6 méretű metrikus menetű csavarok, fej kialakításuk azonban helyenként eltérő. A háromszög alkatrészt a hátlaphoz erősítő csavarok a főtengely közelsége miatt hat lap fejűek, mivel ezen csavarok fejmagassága viszonylag kicsi. A talpat és a hátlapot összekötő csavarok sülyesztett fejű csavarok, amelyeket egy egyszerű művelettel, a munkadarab felületével azonos síkba lehet hozni. Erre azért volt szükség, mert ha a csavarok fejei nem lennének besülyesztve, akkor az egész motor gyakorlatilag a csavarfejekre feküdne fel és instabilan állna, ami viszont nem megengedhető egy rezgő rendszer esetén. A lendítő kerék felszerelése szintén M6 méretű, menetes tengelyvéggel történt, amelyet egy vállnak nekiszorítva valósítottam meg. Elfordulás elleni védelem nem szükséges, mivel egyrészt a tengelyirányú rögzítés akkora súrlódó erőt biztosított a váll homlokfelületén, amely az üzem közbeni elfordulást megakadályozza, másrészt a motor egyelőre nem hajt meg semmilyen munkagépet, így a lendítőkerék elfordulása esetén sem okozna fennakadást a motor működésében.

Miután a többi alkatrész is elkészült, azaz a hengerek, a hengertartók, a dugattyúk és a csap, ezeket is felszereltem a félkész motorra. Kisebb probléma adódott a hengertartók felhelyezésénél, ugyanis azok lapolt felületének vastagsága túl nagy maradt, így nem fértek be a háromszög alkatrész és a hátlap közé. Először reszelővel próbáltam eltávolítani némi anyagfelesleget, ám ez kevésnek bizonyult, így a marógépbe egyesével ismét befogtam az alkatrészeket. Érintő fogás vétele után függőleges irányban 0,2 mm-es fogást vettem, és mivel a darabokat a gépi előtolás irányára merőlegesen tudtam csak befogni, így a kézi tekerő forgatásával adtam előtolást a gépnek. Miután mindhárom alkatrész teljes felületét lemunkáltam, már könnyen be tudtam szerelni őket a kívánt helyre.

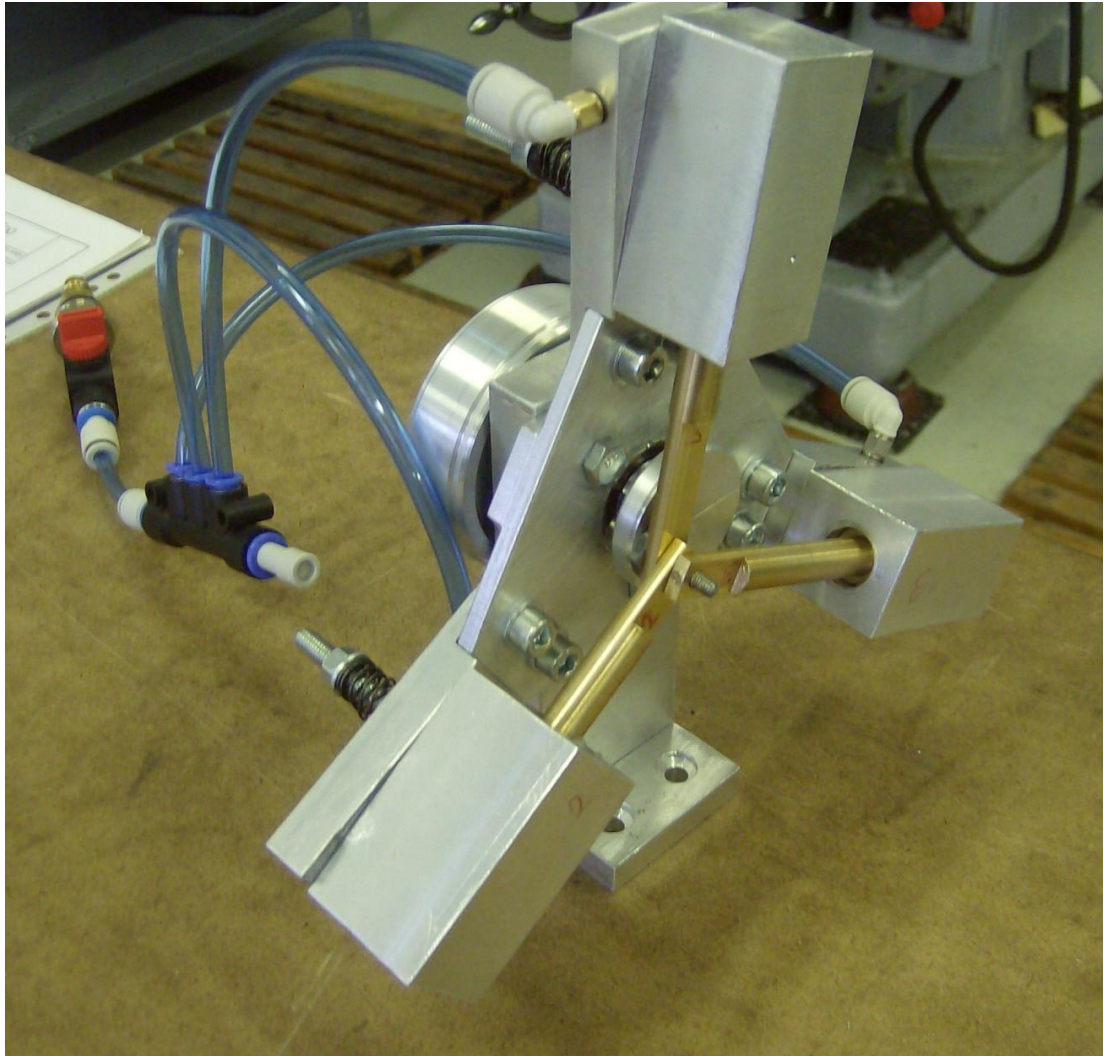
Ezt követően a hengereket szereltem a helyükre, amelyhez el kellett készítenem azokat a menetes szárazakat, amelyek a hengereket adott pozícióban tartják, illetve biztosítják nekik a forgástengelyt. Ehhez, mivel nekem nem sikerült M6 méretű menetes szárat beszerezni, a gépműhely raktárából bocsátottak rendelkezésemre egy 1 m hosszú

szálat. Hengerenként 70 mm hosszú darabokra volt szükségem, összesen 3 darabra, így egy sarokköszörűvel ledaraboltam a kívánt – nem egészen pontos – hosszúságú szárazakat. A levágott szárazak végei sorjásak voltak, így nem lehetett biztonságosan tovább dolgozni velük, ezért egy köszörűgépen mindegyik darab végeire kb. $1 \times 45^\circ$ -os letörést készítettem. Az élek letörése után a szárazakat bekentem Loctite márkájú csavarrögzítővel, és betekertem őket a hengerekbe. Azért használtam ragasztót, hogy a motor üzemelése közben fellépő nagy frekvenciájú rezgések miatt a szár ne tudjon kicsavarodni a helyéről. Szétszerelésre ritkán kerül sor, így nem gond, ha azok nem távolíthatók el a hengerekből. Végso felhelyezés előtt megkentem mindhárom henger alsó felületét, valamint a hengertartók felső felületét, azaz azokat a helyeket, ahol a dugattyúk után a legnagyobb súrlódás ébred.

A dugattyúk beszerelése előtt bekentem őket és a hengerek furatait is szilikon zsírral, ezzel biztosítva a szükséges kenést, hiszen itt a legnagyobb súrlódás a motoron belül. Mindhárom hengernek adott a helyzete a motoron, tehát egyiket sem lehetett felcserélni, de az eltérő magasságuk miatt másképp nem is lehetett volna felszerelni őket. Az összeszerelt hengereket a helyükre illesztettem, majd a menetes szárazak hengertartókon túlnyúló részére nyomórugókat húztam. Ezek a rugók szorítják a hengereket a hengertartókhoz. Magasságuk 50 mm, külső átmérőjük 12 mm, huzalátmérőjük 0,8 mm. Előfeszítésükről két csavaranya felhelyezésével gondoskodtam, amelyek alá egy alátétet is tettem. A két anya tekerésével lehet a rugók előfeszítését beállítani vagy megszüntetni, illetve egymásnak szorításukkal rögzíteni őket (kontra anya). A rugót olyan mértékben nyomtam össze a csavaranyákkal, hogy a henger még könnyen el tud fordulni a tengelye körül.

A motorhoz be kellett szerezni különböző pneumatikus alkatrészeket, amelyek a táplevegőtől a motor felé haladva a következők. Az első egy átalakító, amelynek egyik vége a szabványos levegő gyorscsatlakozóhoz köthető, a másik vége pedig belül menetes. A menet a következő elemhez, az elzáró szelephez történő csatlakoztatás miatt fontos. Ennek feladata, hogy, a táplevegő csatlakoztatása után lehetőséget biztosítson mennyiségének szabályozására, illetve ugyanezzel el is lehet zárni a levegő útját, melynek hatására a motor megáll. A szelepet egy háromfelé ágazó elosztó követte, ezeket 6 mm átmérőjű pneumatika csővel kötöttem össze. Az elosztó három kimenetére a három hengert kötöttem, viszont ehhez szükség volt egy csatlakozóra, ami L alakú menetes végű volt. A menetet becsavartam a hengertartó oldalfalába, a neki készített menetbe, majd csatlakoztattam őket az elosztóhoz.

Az alábbi fényképen a motor látható összeszerelt állapotban (18. ábra).



18. ábra

Az összeszerelt motor

5. Működési vizsgálat

A motort a gyorscsatlakozón keresztül egy 6 bar nyomású sűrített levegőt tartalmazó kompresszorral csatlakoztattam, egy levegő előkészítő egységen keresztül. Ezen egy szelep található, amely segítségével lecsökkenthető a kimeneti oldal nyomása, én ezt 2 bar-ra állítottam. Az elzáró szelep óvatos nyitásával beindítottam a motort, ami szinte azonnal, a legkisebb elfordításra indult, mivel a működési elvéből illetve a hengerek számából adódóan indításkor nincs szükség külső segítségre. Ennek oka, hogy a motor mindig olyan pozícióban áll meg, amelyben valamelyik hengeren a beömlő nyílás fedésben van a táplevegő furatával, így az megadja a motor indulásához szükséges impulzust. Az első megfigyelésem az volt, hogy az elzáró szeleppel rendkívül nehézkes a motor fordulatszámának szabályozása, azt ugyanis csak 90°-ban lehet elfordítani. Ekkora szögérték nem elegendő finombeállításokhoz, inkább csak nyitásra-zárásra alkalmas, illetve akkor alkalmazható, ha nem áll rendelkezésre egyéb lehetőség. A következőkben inkább a levegő előkészítő egység szelepével változtattam a motorra jutó levegőnyomást.

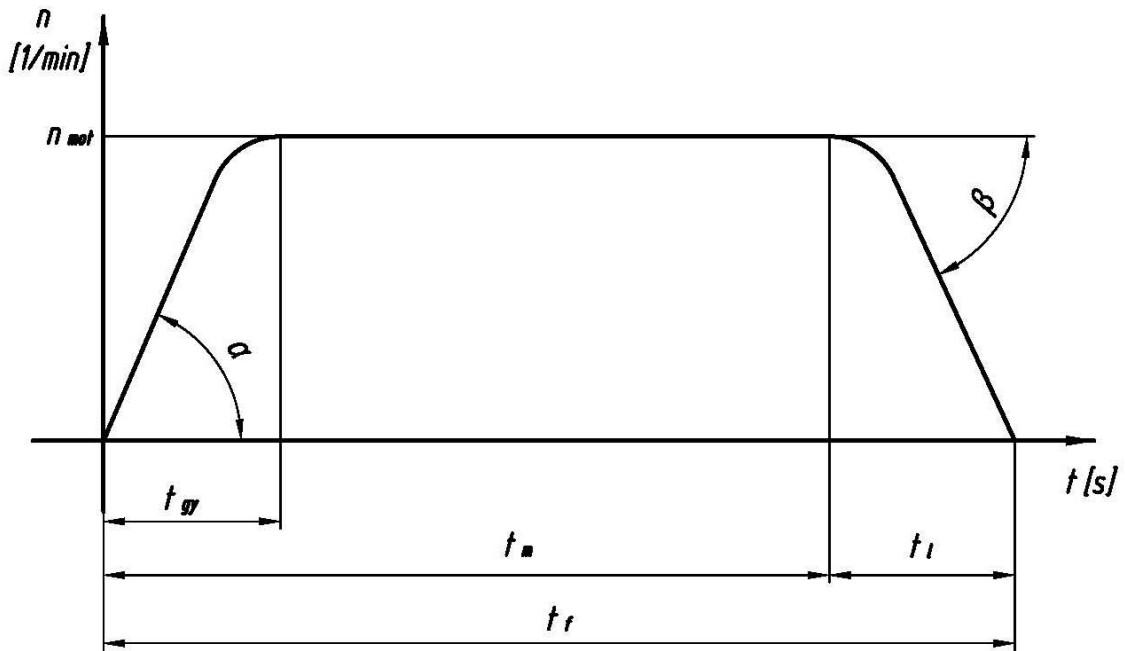
A motor első ránézésre stabilan és könnyedén járt, a levegőnyomás változtatására azonnal reagált, azonban a hengerek megkenése ellenére is fémesen nyikorgó hangot hallatott. Átvizsgálás után kiderült, hogy a dugattyúrudak érintkezési felületei a hengerekkel ellentétben nem lettem megkenve és ezek súrlódása adta a kellemetlen hangot. Ennek korrigálásához le kellett szerelni mind a három hengert, majd a dugattyúrudak végeit, furataik melletti felületeket, illetve ezek központosításáért felelős csapot is meg kellett kenni szilikon zsírral. A hengerek visszaszerelése után a probléma megszűnt.

Huzamosabb idejű járatás után további észrevétel volt, hogy a dugattyúk kitolják a zsírt a löketek végére. Erre utaló jel volt, hogy a hengerfuratok főtengeley felőli oldalán, a hengerpaláston, valamint a felső holtpontoknál, a kimenő levegő furatok körül zsír jelent meg. Ez nagyon rossz előjel volt, hiszen ha a dugattyúk kihordják maguk mellől a kenésükre szolgáló zsírt, akkor kenés nélkül nagymértékű kopással kell majd számolni. A hőfejlődés azért nem jelentős, mert a motor meghajtására szolgáló sűrített levegő szobahőmérsékletű, így erős hűtésként szolgál a motor számára, amely nagyobb fordulatszám esetén a levegő gyorsabb cserélődése miatt még jelentősebb.

További vizsgálatok elvégzéséhez egy fordulatszámológót kaptam, amellyel az idő múlásának ismeretében percenkénti fordulatszámot tudtam mérni. Ez a műszer egy egyszerű analóg, mutatós mérőóra volt, amelynek bemenő tengelyére különböző toldatokat lehet szerelni annak érdekében, hogy különböző alakú tengelyvégekhez lehessen illeszteni. Használata következőképpen nézett ki. Elsőként ki kellett választani a toldatok közül azt, amelyik a legjobban illeszkedik a motor főtengeleyének tengelycsonkjához. Mivel a forgácsolás során, viszonylag hosszú alkatrészből lévén szó, meg kellett támasztani szegnyeregbe rögzíthető forgó csúccsal, így a tengely végébe előzetesen központfuratot kellett készíteni. A forgó csúcs kúpos kialakítású, így a központ furat is az, ezért a toldatok közül a kúpos végű illeszkedett bele a legjobban. Ennek a fordulatszámológóra történő felhelyezése és a motor asztalhoz történő lerögzítése után nekiláttam a mérés elvégzésének.

Analóg műszer lévén a fordulatszám meghatározásához ismernem kellett a mérés eleje és vége között eltelt időt, amely meghatározásához egy stopperórát használtam. A mérést a következőképpen végeztem. A levegő előkészítő egység szelepén beállítottam egy – viszonylag pontos – nyomás értéket, majd az elzáró szelep megnyitásával elindítottam a motort. Egyik kezemmel a stopperórát indítottam, míg ezzel egy időben a

másikkal a fordulatszámológát nagy erővel nekiszorítottam a motor tengelycsonkjához. 25 másodperc elteltével elvettem a fordulatszámológát a tengelycsonkról, illetve ezzel egy időben nagy erővel megszorítottam a számláló tengelyét. Azért kellett nagy erővel a tengelycsonknak szorítani, illetve a tengelyét megszorítani, hogy minél jobban kiküszöböljem a számláló felgyorsulásából és lelassulásából adódó mérési hibát. Mivel a mérés célja a konstans fordulatszám megállapítása, azok a körülfordulások, amelyeket a számláló ezen kívül megtesz, nem tartoznak a konstans fordulatszámra megtett körülfordulásokhoz, így mérési hibát okoznak. Az alábbi ábrán látható a fordulatszámológát tengely fordulatszámának változása az idő függvényében, a mérés időtartama alatt (19. ábra).



19. ábra

A mérőóra tengelye fordulatszámának változása az idő függvényében

Az ábra jelölései: t_{gy} – a tengely gyorsulási szakasza, t_l – a tengely lassulási szakasza, t_m – a mérés időtartama, t_f – a tengely forgásának ideje, α – a tengely szöggyorsulása, β – a tengely szögsebességének csökkenése („szögllassulása”)

A mérés során a számláló órájáról leolvasott érték gyakorlatilag megegyezik a fenti ábrán látható függvény alatti területtel, azaz annak integráljával, amelyből és a forgás teljes idejének ismeretében az átlagos fordulatszám az alábbi összefüggéssel meghatározható meg:

$$n_{\text{átl}} = \frac{\int_0^{t_f} n(t) dt}{t_f}.$$

A konstans fordulatszám meghatározásához azonban csak a $t=t_m-t_{gy}$ szakasz alatt megtett körülfordulások számára lenne szükségem, ennek mérése azonban analóg, mutatós számlálóval szinte kivitelezhetetlen. Ennek oka a szöggyorsulásokból adódik.

Ideális esetben elképzelhető olyan mérés, amely során nincs gyorsulási szakasz, azaz csak a konstans fordulatszámon megtett körülfordulások számát mérjük. Ilyenkor nem lenne se gyorsulási, se lassulási szakasz, azaz a függvény kezdete és vége is függőlegesen egyenes lenne. Ebben az esetben a konstans fordulatszám az alábbi összefüggés szerint alakul:

$$n_{\text{konst}} = \frac{\left[\int_0^{t_f} n(t) dt - \left(\int_0^{t_{gy}} n(t) dt - \int_{t_m}^{t_f} n(t) dt \right) \right]}{t_m - t_{gy}}.$$

Egy esetleges elméleti megoldás lehetne a gyorsulási szakaszok kiküszöbölésére, ha a járó motor tengelycsonkjához már előzetesen forgásba hozott számláló-tengelyt szorítunk neki. Ekkor azonban a fordulatszám pontos meghatározásához ismerni kell a mérés előtt és után megtett körülfordulások számát, amelyeket az összesen megtett körülfordulások számából levonva, illetve az állandó fordulatszámon tartott forgás ideje ismeretében a konstans fordulatszám kiszámítható. A mérést a következőképp lehetne elvégezni. A fordulatszámot előzetesen valamilyen módon forgásba hozzuk, amellyel egy időben az eltelt időt is mérni kezdjük. Ezt követően a számláló tengelyét nekiszorítjuk a motor tengelycsonkjának akkor, amikor a mutató elér egy általunk kiválasztott értéket és ezzel egy időben az addig eltelt időt is le kell olvasnunk. Járnunk hagyjuk őket egy meghatározott ideig, majd hirtelen elvesszük a számlálót a tengelycsonktól, leolvassuk az eltelt időt és közben fékezni is kezdjük a tengelyt. A tengely megállásakor ismét leolvassuk az időt. Az így rögzített adatok ismeretében meghatározhatjuk a konstans fordulatszámot, viszont a leírásból is észrevehető, hogy maga a mérés kivitelezése szinte lehetetlen, hiszen egyszerre ennyi felé figyelni senki nem képes.

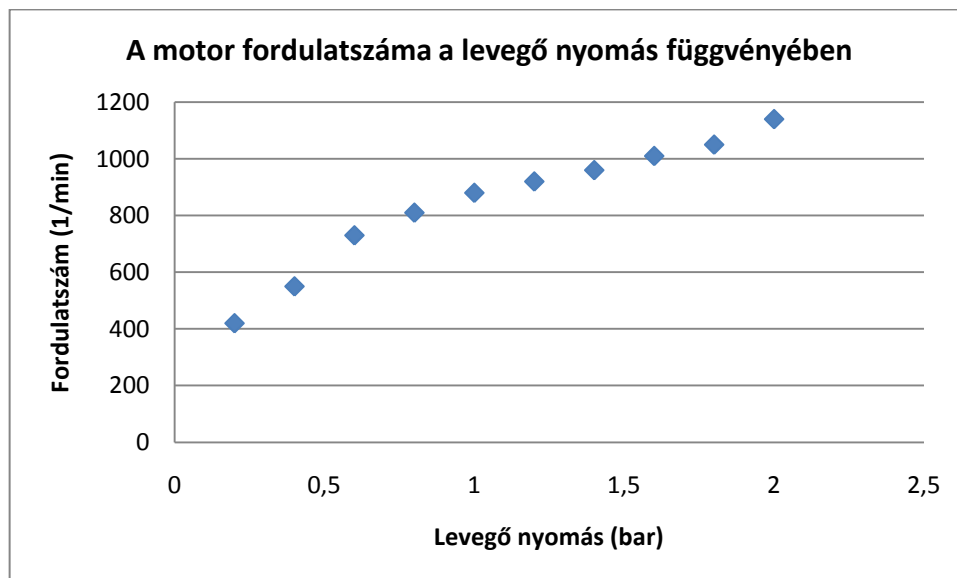
Így tehát mivel el nem kerülhető a gyorsulási és lassulási szakasz, jelentősen csökkenthető a feljebb említett módszerrel. Ezáltal a függvény kezdeti és befejező szakaszának meredekségét olyan mértékűre lehet növelni, amely alatti terület már elhanyagolható lesz a teljes függvény alatti területhez képest, így közelítve a pontos értékhez. Ezzel a módszerrel is eltérünk a valós értéktől, amely eltérés a következőképp számítható:

$$x_{\%} = \frac{\int_0^{t_f} n(t) dt - \int_{t_{gy}}^{t_m} n(t) dt}{\int_0^{t_f} n(t) dt} \cdot 100.$$

Az elkövetett mérési hibát még tovább csökkenthetjük, ha a konstans fordulatszámon végzett mérést elegendően hosszú ideig végezzük. Ennek köszönhetően a teljes függvény alatti terület sokkal nagyobb lesz, amelyhez képest a gyorsulási és lassulási szakaszok alatti terület viszont elhanyagolható. Ezáltal a pontos fordulatszámhoz sokkal közelebbi értéket kapunk eredményül. A konkrét mérések során minden esetben egy-egy percig szorítottam a számlálót a motor tengelyéhez, így a konstans fordulatszám közvetlenül leolvasható volt.

Az alábbi táblázatban és diagramon láthatók az egyes nyomásokon mért fordulatszámok (20. ábra).

P [bar]	n [1/min]
0,2	420
0,4	550
0,6	730
0,8	810
1	880
1,2	920
1,4	960
1,6	1010
1,8	1050
2	1140



20. ábra

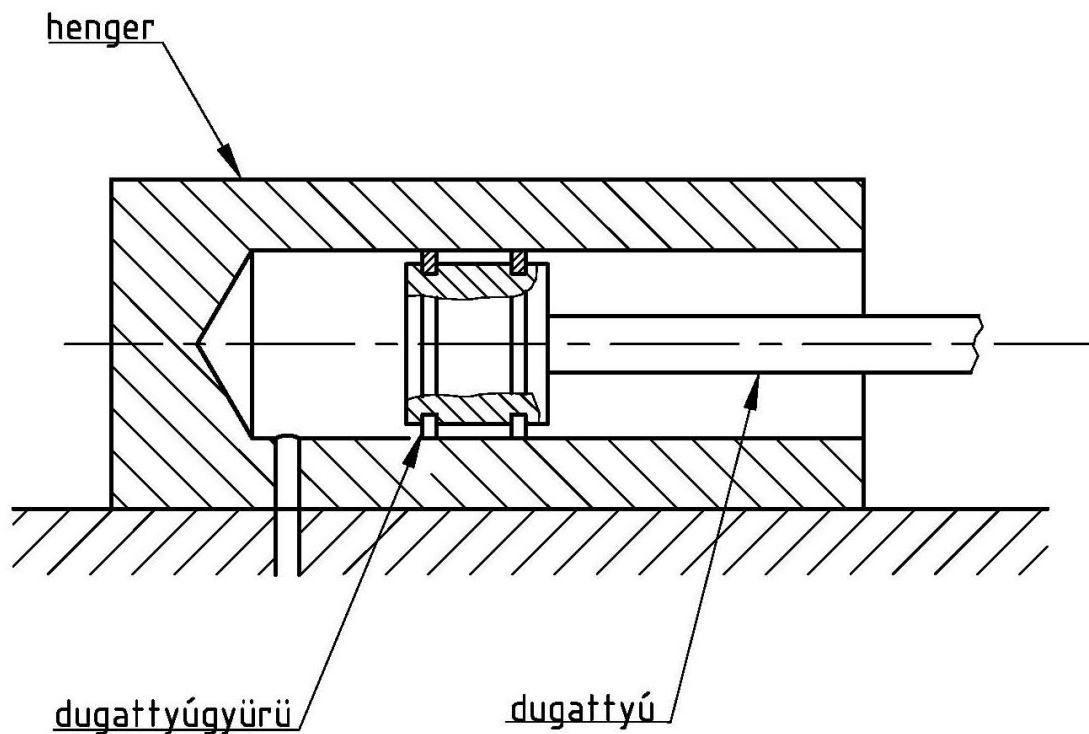
A motor fordulatszáma a levegőnyomás függvényében

A mérés során minden lépésnél 0,2 bar-os értékkel növeltem a nyomást, majd megmértem a motor fordulatszámát. A motor indítónyomása 0,2 bar volt, ami azt jelenti, hogy ekkora túlnyomás szükséges a motorban lévő nyugvásbeli súrlódások legyőzésére. Ez alatt a motor nem képes üzemelni. A mérés felső határát 2 bar-ban határoztam meg, ugyanis ekkora nyomásnál adódó 1140 1/min nagyságú fordulatszámon már akkora rezgések ébrednek a motorban, hogy az veszélyezteti annak biztonságos üzemelését. Ilyen mértékű tartós rezgések mellett a motor csavarkötései gyorsan kilazulhatnak, amely balesetveszélyes lehet.

A motor több alkalommal történő huzamosabb járása után arra a jelenségre lettem figyelmes, holtjáték alakult ki a hengerek és a dugattyúk között. Ennek oka a két alkatrész rendkívüli mértékű kopása. A probléma okozója valószínűleg az anyagminőség kiválasztásban keresendő, hiszen az alumínium és a réz is viszonylag puha fém, így a kopásállósága is rossznak mondható. A tervezéskor számoltam

bizonyos mértékű kopással a két alkatrész között, de korántsem ilyen mértékűvel, hiszen mindez összességében egy üzemóránynak sem tekinthető idő alatt következett be. A probléma kiküszöbölésére több megoldás is elképzelhető, amelyek kombinációja jobb eredményre vezethet.

Elsőként a dugattyúk gyűrűzése merült fel (21. ábra). Ez az alkatrész minden belsőégésű motorban megtalálható, amelyekből legalább 2 db található minden dugattyún. Feladatuk az égéstér és a forgattyús ház mozgás közbeni teljes mértékű elszigetelése (kompresszió-gyűrű), valamint a hengerfalon lévő kenőolajfilm réteg létrehozása (olajgyűrű). Ezeken felül még a dugattyú üzembiztos megvezetése is a feladataik közé tartozik, hiszen alkalmazásukkal maga a dugattyú nem is érintkezik közvetlenül a hengerfallal. Saját esetemben inkább ez utóbbi lenne a feladatuk, ugyanis ha egy kemény, edzett, tehát kopásálló alkatrészt helyezek a dugattyú és a hengerfal közé, azzal megakadályoznám azok érintkezését, vele együtt a súrlódást is, amely a kopást okozza. Ennek a megoldásnak a hátránya az lenne, hogy a változatlanul hagyott hengerfuratok a dugattyúkkal ellentétben tovább kopnának, így a probléma csak részben oldódna meg.

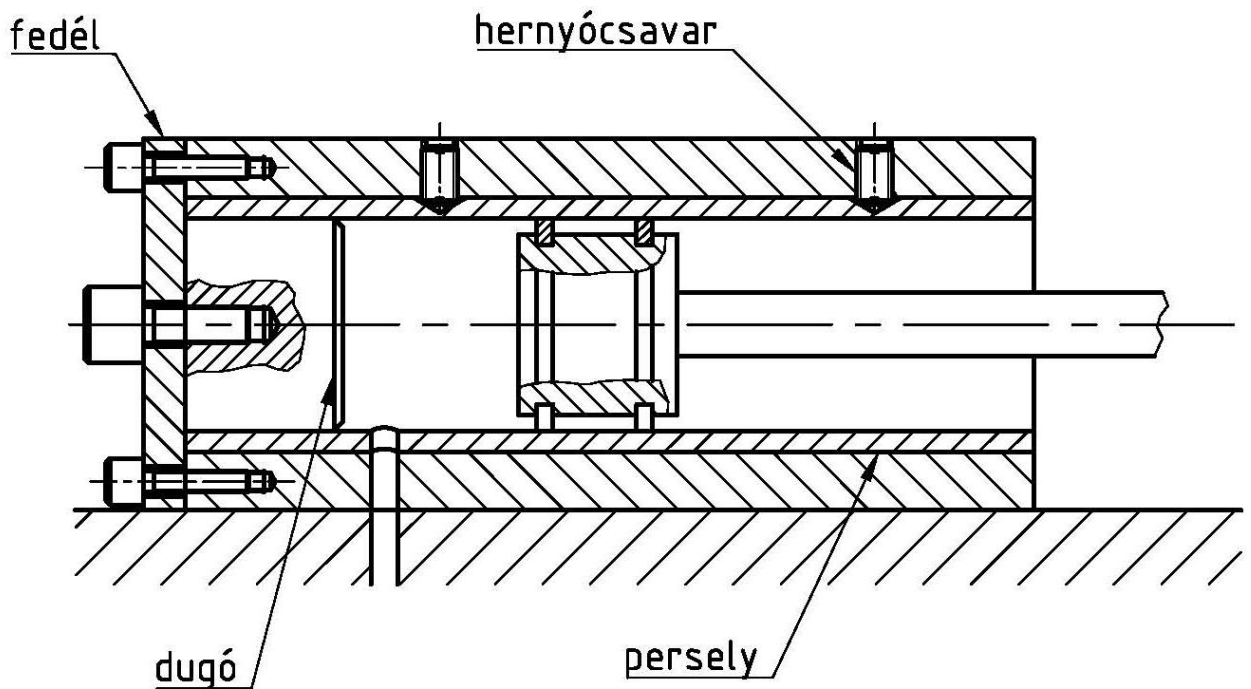


21. ábra

A dugattyúk gyűrűzése

Egy másik lehetőség a hengerek perselyezése lenne (22. ábra). Az elképzelés hasonló a gyűrűzéshez, azonban itt a hengerekbe kerülne egy új alkatrész, egész pontosan egy acél cső. Ennek a csőnek a belső átmérője illeszkedne a dugattyúgyűrűk külső átmérőjéhez, ugyanolyan módon, mint a jelenlegi dugattyú-henger illesztésnél. A hossza a hengerfurat hosszával egyezne meg, viszont a korábbi zsákfurattal ellentétben az utólagos átalakítás során a hengerekben átmenő furat készülne. Azért ilyen megoldással, mert a hengerek furatainak elkészítését rendkívül megnehezítette a nyersanyagok négyzet keresztmetszete. A megmunkálatlan négyzeteket ugyan még be lehetett fogni az esztergagép tokmányába, azonban a kész hengereket, amelyek furata

nem középen helyezkedik el, nem lehetne központosan befogni. Ez esetben csak oszlopos fűrőgépen lehetne a hengerek felfúrását elvégezni, amellyel azonban nem lehet olyan méretpontos furatmélységet elérni, amelybe az előzetesen elkészített persely pontosan illeszkedne. Ezért tehát a perselyek hossza megegyezne a hengerek teljes hosszával, amelyekben oldalról vagy felülről egy hernyócsavarral rögzíthető lennének mind tengelyirányban, mind elfordulás ellen. Ha a teljes henger átfúrásra kerülne, akkor nyilván a dugattyú feletti térrészből elszökne a levegőnyomás, ezért azt le kell zárni egy viszonylag vékony és tömítéssel ellátott fedéllel. A fedelet négy csavarral, a hengerek négy sarkában lehetne rögzíteni. Mivel az átfúrással jelentősen megnőne a dugattyú feletti térrész térfogata, ezzel együtt az oda bekerülő levegő mennyisége is, amelynek következtében több időre lenne szüksége a levegőnek, hogy a rendelkezésére álló nagyobb térfogatot megtöltse. Ennek következtében valószínűleg csökkenne a motornak az eredeti állapothoz képest, azonos nyomáson mért fordulatszáma (valamint a fenti motor fordulatszám – levegőnyomás függvény meredeksége). A probléma elkerülése érdekében egy dugót kell a hengertérbe helyezni, amely kitölti a szabad térrészt és visszaállítja az eredeti térfogatot.



22. ábra

A hengerek perselyezése

A fenti megoldásoktól eltérő módszer lenne még az érintett alkatrészek újbóli legyártása, azonban nem az eredeti anyagokból, hanem például edzett acélból. Az érintkező felületek a jelenlegi megoldáshoz hasonlóan illesztve lennének egymáshoz, azonban az alkalmazott hőkezelésnek köszönhetően sokkal kopásállóbbak lennének, így a probléma elkerülhető lenne. Az acél sűrűsége azonban majdnem háromszorosa az alumíniumnak, így az új alkatrészek tömege is háromszorosa lenne az eredetiekének. Ez nem csak a motor szállíthatóságát nehezítené meg, hanem a fent említett perselyezési módszerhez hasonlóan csökkenne a motor fordulatszáma. A nagyobb tömegű alkatrészek ugyanis azonos erők mellett csak lassabban tudnának mozogni, ráadásul az érintett alkatrészek újbóli legyártása rendkívül idő- és munkaigényes lenne. Ez a megoldás tehát nem alkalmazható.

6. Összefoglalás

A dolgozat célja egy olyan pneumatikus működésű csillagmotor tervezése és elkészítése volt, amely egyszerű, javarészt tömb és henger jellegű alkatrészekből áll, így mind tervezés, mind gyártás szempontjából könnyen elkészíthető. Pneumatikus berendezés lévén a motort sűrített levegő hajtja, amely szállítható, így működése bárhol, bárkinek bemutatatható.

A motor tervezése Autodesk cég Inventor 2010 nevű parametrikus tervező szoftverével történt, amelyet elterjedten alkalmaznak az ipar szinte minden területén az egyes tervezési feladatok, részfeladatok megoldására. A konstrukció kidolgozása során figyelembe vettem a csillagmotorok szerkezeti, működési sajátosságait, azonban a könnyű gyárthatóság érdekében olyan vezérlési módot választottam, amely ugyan a valóságos csillagmotorokban nem található meg, ennek ellenére az elkészült motor ugyanúgy működőképes. Az említett vezérlés miatt a berendezés inkább tekinthető kétütemű motornak, mint négyüteműnek, hiszen a kétütemű motorokhoz hasonlóan furatok fedése és eltakarása révén juttatjuk a sűrített levegőt a hengerekbe.

A motor alapanyagául alumíniumot a kis sűrűség miatt és rozett a feltételezett jobb kopásállóság miatt választottam. A tömb jellegű alkatrészek gyártásához egyetemes marógépet, a hengeres alkatrészek gyártásához egyetemes esztergagépet használtam, mivel az ilyen motorhoz hasonló kis darabszámú, egyedi, egyszerű alkatrészek gyártása időigényesebb lenne CNC megmunkáló gépeken. Ekkor ugyanis minden egyes alkatrésze külön programot kellene írni, amely inkább sorozatgyártás esetén tenné gazdaságossá a gyártást.

Az összeszerelés során általánosan M6 méretű csavarokat használtam, azon belül is belső kulcsnyílásút és hatlapfejűt, valamint csavarbiztosítás céljából a hengerekbe csavart menetes száraz végeit ragasztóval is elláttam.

A motor tesztelése mellett méréseket is végeztem, amelynek során a (p) levegőnyomás függvényében mértem a motor (n) stacioner fordulatszámát, ezen adatokat táblázatba rendeztem és grafikonon ábrázoltam. A p - n függvénykapcsolat jó közelítéssel lineárisnak adódott.

A motor többszöri huzamosabb ideig tartó járatása után arra a megállapításra jutottam, hogy dugattyú és a hengerfal, a két súrlódásnak leginkább kitett alkatrész rendkívüli mértékben megkopott. Ezért a berendezés fontos továbbfejlesztési lehetőségének oka, hogy az alumínium-réz anyagpárosítás nem váltotta be maradéktalanul a hozzá fűzött reményeket, így a következő lépés a dugattyúk gyűrűzése és a hengerek perselyezése lenne, ami nagymértékben javítaná a motor működését.

7. Felhasznált irodalom:

- [1] <http://www.argep.hu/trend/GUDE/Guede-50015-Kompresszor-400-10-50-C.html>
- [2] http://www.approvvigionamenti.it/en/ecatalog/descrarticoli.php?start=3140&max_righe=10&descrizione=cylinder&lingua=GB&hcode=&CostruttoreRicerca=&prm=ric_ft&ArticoloRicerca=&DescrizioneRicerca=&direzione=&ordinamento=&nosort=1&inizia_contiene
- [3] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Csillagmotor>
- [4] <http://www.rc-book.com/es/wiki/number-cylinders>
- [5] <http://www.animatedengines.com/oscillatingsteam.shtml>
- [6] Dr. Komáromy Zsigmond, László Lajos: Technológiai tervezés, Skandi-Wald kiadó, 2007

Függelék