

ŠOLSKI CENTER CELJE



Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

Raziskovalna naloga
SOLENOID ENGINE

Avtorja:

Nejc VOVK, M-4. c

Aljaž ROGL, M-4. c

Mentorja:

mag. Andro Glamnik, univ. dipl. inž.

mag. Matej Veber, univ. dipl. inž.

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje 2018

I ZAHVALA

Rada bi se zahvalila Petru Roglu in Janezu Vovku za pomoč pri dobavi materiala za izdelek. Prav tako bi se rada zahvalila Frideriku Urlepu za obdelavo nekaterih komponent. Zahvala gre tudi Šolskemu centru Celje, in sicer Srednji šoli za strojništvo, mehatroniko in medije za neomejeno uporabo 3D-tiskalnika ter profesorjem za pomoč in vodenje pri uporabi strojev. Zahvalila bi se rada tudi Brigiti Renner, prof., za lektoriranje te raziskovalne naloge in Simoni Tadeji Ribič, prof., za lektoriranje povzetka v angleščini.

II POVZETEK

Raziskovalna naloga vsebuje vprašanja, teorije in hipoteze, ki sva si jih zastavila pred začetkom izdelave te naloge. Vsebuje tudi podrobnejši prikaz projektiranja ter pomembnost izdelave prototipa oz. prikaza principa delovanja. Cilj same naloge je bil izdelati t. i. *solenoid engine*, kar v grobem prevodu pomeni motor s pogonom elektromagnetne tuljave. Cilj je bil tudi implementirati hlajenje, ki naj bi po najini hipotezi izboljšalo izkoristek samega motorja. Dodala sva tudi »mehanski pwm« za krmiljenje hitrosti. Zanimalo naju je tudi, kolikšno število vrtljajev lahko motor doseže in v kakšne namene ga lahko uporabimo, saj teorija pravi, da zaradi majhnega navora praktičnost ni zagotovljena. Pridobila sva znanje na mnogih področjih, ki nama bo vsekakor koristilo pri nadaljnjem izobraževanju.

Ključne besede: projektiranje, prototip, princip delovanja, krmiljenje, znanje

III ABSTRACT

Project work assignment contains issues, theories, and hypothesis, that we issued to ourselves before starting. It also contains a detailed view of planning and the importance of the prototype design – working principle. The goal of this assignment was to design and build a *solenoid engine*, which roughly translates to engine with the electromagnetic coil drive. Another goal was to implement a cooling system, which, looking at our hypothesis, could greatly improve efficiency of the engine. What we also implemented, was the so called »mechanical PWM«, for the speed control. We wanted to find out how many rotations per minute does the engine create and what is the practical application of the motor. The theory says, that because of poor torque, the engine isn't necessarily practical, so we are going test this theory. We acquired knowledge on many different aspect of science, that will undoubtedly benefit us at further education.

IV KAZALO

1 UVOD	1
1.1 PREDSTAVITEV	1
1.2 HIPOTEZE	1
2 PREDSTAVITEV POTEKA DELA IN RAZVOJ IZDELKA	2
2.1 VERZIJA 1.0.....	2
2.2 VERZIJA 2.0.....	3
2.3 VERZIJA 3.0.....	5
3 IZDELAVA PROTOTIPA	7
3.1 PROJEKTIRANJE IN SESTAVA	7
4 PRINCIP DELOVANJA	10
4.1 PRVI ZAGON.....	11
5 ANALIZA	12
5.1 ANALIZA ŠTEVILA OBRATOV.....	12
5.1.1 <i>Meritve</i>	12
5.1.2 <i>Ugotovitve</i>	13
5.2 VZTRAJNOSTNI MOMENT VZTRAJNIKA.....	13
5.3 NAVOR SOLENOIDA	15
6 MOTOR V8	17
6.1 GLAVNI NOSILEC OSI	17
6.2 OJNICA	19
6.3 NOSILEC SOLENOIDA.....	21
7 STROŠKI RAZISKOVALNE NALOGE	22
8 TRENUTNA FAZA IZDELAVE	23
9 NAČRTI ZA PRIHODNOST	26
10 ZAKLJUČEK	27
11 VIRI IN LITERATURA	28

V KAZALO SLIK

Slika 1: "Prvotna zamisel sklopa solenoid-ojnica-gred, verzija 1.0"	2
Slika 2: "Spremenjen sklop z dodanim električnim vezjem, verzija 2.0"	3
Slika 3: "Detajlirana skica sklopa ojnice in ekscentričnega kolesa, verzija 2.0"	3
Slika 4: "Primer tehnične risbe dela prototipa, verzija 2.0 (AutoCad)"	4
Slika 5: "Model verzije 2.0 za izdelavo (SolidWorks)"	4
Slika 6: "Končni 3D-print nosilca gredi prototipa v2.0"	5
Slika 7: "Dokončni dizajn prototipa, pripravljen za izdelavo, verzija 3.0"	5
Slika 8: "Tahometer"	7
Slika 9: "Nosilec solenoid-a v3.0"	8
Slika 10: "Nosilec osi prototip v3.0"	8
Slika 11: "Ojnica v3.0"	8
Slika 12: "Pretvarjanje in razporeditev datoteke za 3D-print"	9
Slika 13: "Prototip, priklopljen"	10
Slika 14: "Solenoid ob priključitvi na napetost"	11
Slika 15: "Osnovni položaj solenoida"	11
Slika 16: "Prototip s pripravo za merjenje obratov na levi ter PWM na desni strani"	11
Slika 17: "Tabela meritev števila obratov pri največji širini pulzov PWM"	12
Slika 18: "Tabela meritev števila obratov pri najmanjši širini pulzov PWM"	12
Slika 19: "Graf spreminjanja hitrosti vrtenja"	13
Slika 20: "Vztrajnika, implementirana na modelu"	14
Slika 21: "Graf navora solenoida v odvisnosti od kota zasuka motorja"	16
Slika 22: "Segment nosilca osi"	17
Slika 23: "Aluminijasta zasnova"	18
Slika 24: "Lomljena os oz. ročica"	18
Slika 25: "Model ojnice 1.0"	19
Slika 26: "Model ojnice 2.0"	19
Slika 27: "Celotna zasnova z enim solenoidom"	20
Slika 28: "Prvi model nosilca solenoida s hlajenjem"	21
Slika 29: "3D-print zasnova nosilca solenoida"	21
Slika 30: "Prva fizična oblika prvotnega nosilca"	21
Slika 31: "Končna fizična oblika nosilca solenoida"	21
Slika 32: "Tabela stroškov"	22
Slika 33: "Delavniška risba letev"	24

Slika 34: "Delavniška risba držala letve"	25
---	----

VI KAZALO TABEL

Tabela 1: »Tabela meritev števila obratov pri največji širini pulzov PWM«	12
Tabela 2: »Tabela meritev števila obratov pri najmanjši širini pulzov PWM«	12
Tabela 3: »Tabela stroškov«	22

VII IZJAVA*

Mentorja, mag. Andro Glamnik in mag. Matej Veber, v skladu z 2. in 17. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljava, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Solenoid engine, katere avtorja sta Nejc Vovk, Aljaž Rogl:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo (-ičino) dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje

Celje, _____

žig šole

Podpis mentorja(-ice)

Podpis odgovorne osebe

* POJASNILO

V skladu z 2. in 17. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja(-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja(-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor(-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.

VIII SEZNAM SIMBOLOV IN KRATIC

PWM – pulse width modulation (pulzno-širinska modulacija)

AC – alternating current (izmenični tok)

DC – direct current (enosmerni tok)

1 UVOD

Dandanes obstaja mnogo najrazličnejših motorjev oz. pogonov, izdelanih na najrazličnejše načine, v glavnem pa jih poganjajo bodisi elektrika bodisi fosilna goriva. Solenoid engine je eden tistih, čigar delovanje zajema principe obeh, kar bova v tej raziskovalni nalogi tudi natančno predstavila. Najin glavni cilj je motor učinkovito sestaviti in ga krmiliti, v nadaljevanju pa na njem opravljati različne meritve, kot so analiza hitrosti, učinkovitost delovanja, vpliv hlajenja, implementacija v vsakdanje življenje ipd. Eden izmed glavnih ciljev je tudi pridobiti znanje za načrtovanje od skice do zagona izdelka. Ker sva motor financirala z lastnimi sredstvi, sva dobila tudi predstavo o ceni zasnove nekega novega izdelka.

1.1 PREDSTAVITEV

Motor, kakršnega sva izdelala, se v praksi prav pogosto ne uporablja, zato sva morala največ storiti sama. Na začetku sva izdelala veliko število skic, da sva dobila predstavo o velikosti in izgledu. Odločila sva se izdelati motor s pogonom osmih elektromagnetnih tuljav, na principu osemvaljnega motorja na notranje izgorevanje. Za tekoče delovanje sva dodala tudi vztrajnik in gibanje »omehčala« z ležaji. Problem je nastal že pri izdelavi prototipa, saj sva ugotovila, da je za pravilno in dosledno delovanje potrebno narediti več kot le eno verzijo le-tega. Najino delo je vključevalo tudi uporabo 3D-tiskalnika »Makerbot Replicator«, ki ga imamo v šoli.

1.2 HIPOTEZE

Kot je bilo že omenjeno, je najin cilj motor najprej izdelati in uspešno zagnati, nato pa se bova posvetila različnim analizam. Postavila sva nekaj trditev, ki jih bova po končani nalogi ovrgla ali pa potrdila, in te so:

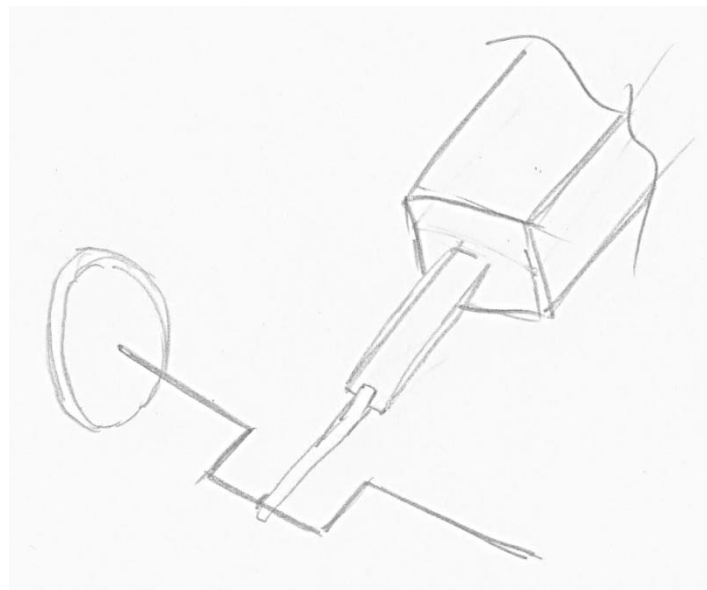
- motor doseže veliko število vrtljajev,
- motor ima nizek navor,
- z dodanim hladilnim sistemom se izkoristek izboljša.

2 PREDSTAVITEV POTEKA DELA IN RAZVOJ IZDELKA

Glavni cilj je bil torej projektirati, sestaviti, analizirati. Naloga je predstavljala izziv na več področjih, zato sva morala obdelati vsakega posebej. Začela sva z izrisom skic, ki so nama bile izhodišče za nadaljnje delo. Dizajn prototipa v več prvotnih primerih ni zagotavljal ustrezne oz. željene učinkovitosti delovanja, zato sva ga večkrat spremenila. Spodnje skice prikazujejo razvoj prvotnega dizajna prototipa po kronološkem zaporedju.

2.1 VERZIJA 1.0

Prva slika prikazuje prvo verzijo dizajna (1.0). Preprosta oblika z lomljeno gredjo, ki zagotavlja ekscentričnost. Vztrajnik na levi strani je nedimenzioniran, prav tako skica še ne vsebuje električnega vezja ali regulacije hitrosti. Zamisel se je obnesla za neučinkovito, zaradi nedobavljivosti oz. nezmožnosti izdelave tovrstne gredi, ki bi zagotavljala željeno kakovost.



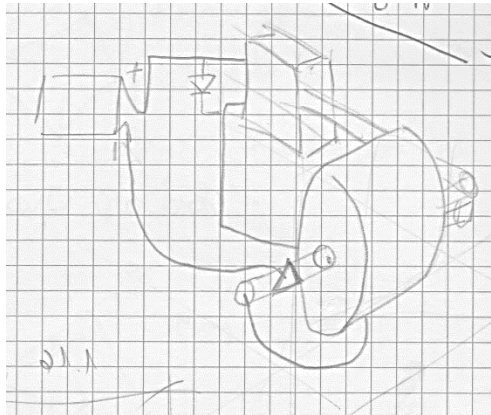
Slika 1: "Prvotna zamisel sklopa solenoid-ojnica-gred, verzija 1.0"

(Osebni vir)

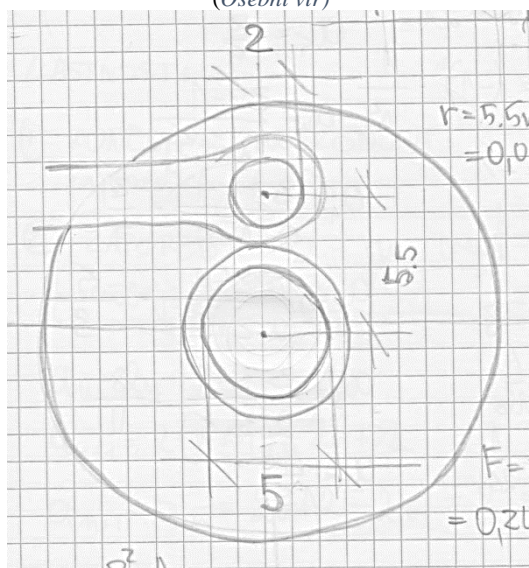
SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

2.2 VERZIJA 2.0

Naslednja verzija (2.0), na skici spodaj, že vsebuje banalno predstavo električnega vezja. Prav tako vsebuje tudi večji oz. masivnejši vztrajnik. Na kontaktih tuljave je vzporedno vezana dioda za zaščito solenoida. Kasnejše ugotovitve so pokazale, da dioda ni potrebna, saj je verjetnost, da bo v tuljavo stekel tok v drugi smeri, zelo majhna.



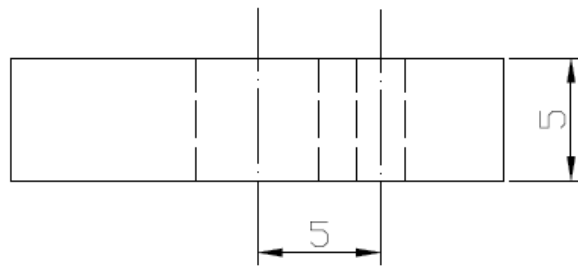
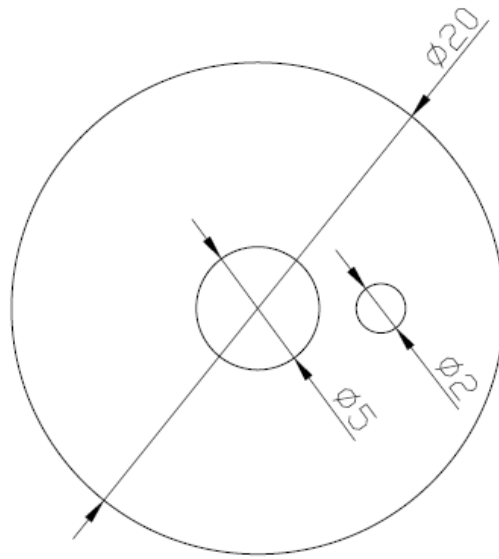
Slika 2: "Spremenjen sklop z dodanim električnim vezjem, verzija 2.0"
(Osebni vir)



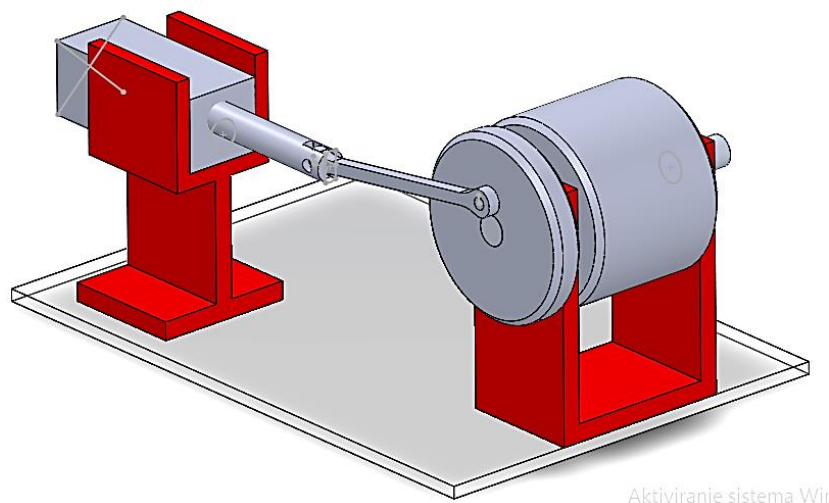
Slika 3: "Detajlirana skica sklopa ojnice in ekscentričnega kolesa, verzija 2.0"
(Osebni vir)

Ta verzija prototipa je bila tudi izvedena oz. sestavljena. Pred samo izdelavo sva za boljšo predstavo vsak del načrtovala v programu *SolidWorks*, nekatere posamezne dele pa tudi v *AutoCad*. Ta verzija prototipa je svojo neučinkovitost pokazala v prevelikem trenju med gredjo in nosilcem ter slabo dimenzionirani ojnici.

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga



Slika 4: "Primer tehnične risbe dela prototipa, verzija 2.0 (AutoCad)"
(Osebni vir)



Slika 5: "Model verzije 2.0 za izdelavo (SolidWorks)"
(Osebni vir)

SOLENOID ENGINE

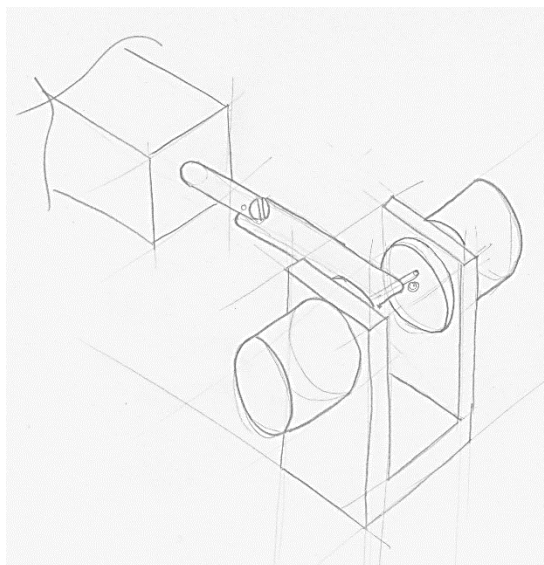
Raziskovalna naloga



Slika 6: "Končni 3D-print nosilca gredi prototipa v2.0"
(Osebni vir)

2.3 VERZIJA 3.0

Pri tretji različici sva upoštevala vse napake prejšnjih. Z dodanim novim vztrajnikom sva zagotovila večji vztrajnostni moment in s tem teoretično bolj gladko delovanje. Pogon bata sva prestavila v sredino nosilca in s tem zagotovila delovanje bata brez momenta na gred. To je povzročilo delovanje brez zatikanja.



Slika 7: "Dokončni dizajn prototipa, pripravljen za izdelavo, verzija 3.0"
(Osebni vir)

Ta verzija je bila izdelana in zagnana. Zagon je bil po nekajkratni nastavitvi napetosti in toka uspešen. Motor je deloval. Za napajanje sva uporabila napajalno enoto, pri kateri sva nastavljala napetost in tok. Ugotovila sva, da potrebuje motor za zagon nekoliko večji tok, kot se troši med delovanjem. Zaznala sva tudi gretje tuljave, kar sva tudi predvidevala.

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

Za natančno predstavo sva morala narediti tudi mnogo izračunov, ki bodo predstavljeni pozneje v nalogi. Po končanem in analiziranem prototipu sva se lotila izdelave motorja V8.

3 IZDELAVA PROTOTIPA

3.1 PROJEKTIRANJE IN SESTAVA

Za nadaljnjo predstavo in snovanje prototipa sva njegovo konstrukcijo zasnovala in tudi narisala v programu *SolidWorks*, ki sva se ga po krajših vajah naučila uporabljati. Pri izdelavi verzije 3.0 (kasneje tudi uspešno zagnani verziji) sva že iz samega izhodišča zasnovala konstrukcijo dveh vztrajnikov, ki ju poganja ekscentrično pritrjena ojnica. Uporaba dveh vztrajnikov je delovanje naredila bolj "gladko". Verzija 3.0 z dvema vztrajnikoma nama je ponudila dve možnosti, in sicer narediti ločeno prototipno različico mehanskega PWM-ja in merjenje obratov prototipa s pomočjo laserskega merilca.



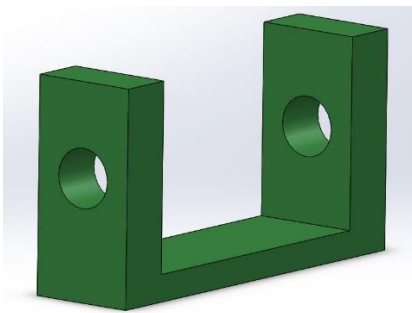
Slika 8: "Tahometer"
(Osebni vir)

Uporabila sva laserski merilec obratov ali tahometer, znamke *Voltcraft*, model *DT – 10L*. Deluje na principu zaznavanja povratnih impulzov oz. odboja laserskih žarkov. Glede na

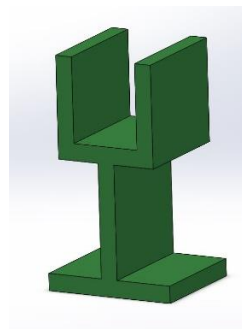
SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

frekvenco impulzov in čas, izračuna število obratov na minuto ter absolutno število obratov. Površino vztrajnika sva morala prilagoditi zahtevam merilca; odbojna nalepka, ki pomaga laserju zaznati odboj žarka od površine.

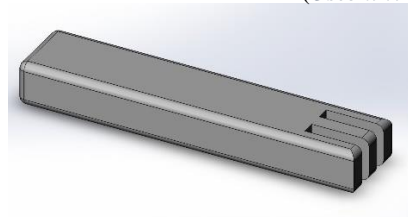
S preizkusom delovanja mehanskega PWM-ja sva pridobila tudi znanje ter osnovno zasnovo za končni izdelek. Za izdelavo konstrukcije sva končno risbo oz. *part*, vrste ".SLDPRT", ki ga uporablja program *SolidWorks*, pretvorila v verzijo ".makerbot", ki ustreza parametrom 3D-tiskalnik naprave, ki sva jo uporabljala v šoli. Te dokumente sva pretvorila s pomočjo programa *MakerBot*, čigar znamke je tudi sam 3D-tiskalnik. Parametre in podlago, na katero naprava tiska, je bilo potrebno prilagoditi modelu *MakerBot 5th Gen Replicator*. Vsi deli, ki jih vsebuje prototip, so bili narejeni posamezno. Za izdelavo vsakega je 3D-tiskalnik v povprečju potreboval cca. 60 minut. Za sestavo prototipa sva poleg izdelanih elementov potrebovala še: ležaje, os, vztrajnike, ekscentrična koluta, kable, mehanski PWM in podlago, za katero sva uporabila PVC-steklo. Pri sestavi sva prišla do manjšega problema, morala sva namreč izračunati natančno razdaljo med solenoidom in ekscentričnimi koluti. Po izračunih in manjšem preizkušanju sva ta problem razrešila in elemente pritrdila na podlago. Po ožičenju celotnega sistema, preizkušanju in čim boljši sinhronizaciji mehanskega PWM-ja, z aktivnostjo solenoida, sva dosegla cilj delujočega, robustno zgrajenega prototipa, na katerem lahko izvajava in simulirava kakršnakoli delovanja, ki pridejo v poštev v končnem izdelku.



Slika 9: "Nosilec solenoida v3.0"
(Osebni vir)



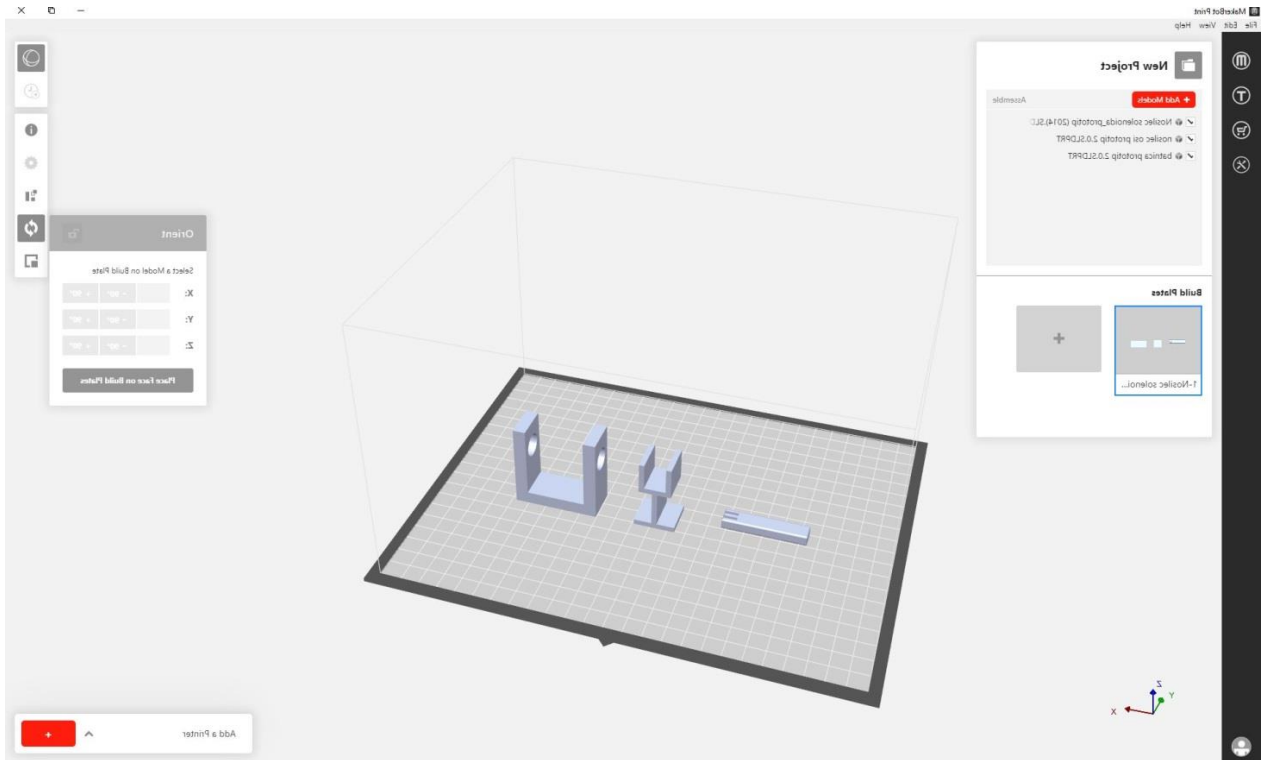
Slika 10: "Nosilec osi prototip v3.0"
(Osebni vir)



Slika 11: "Ojnica v3.0"
(Osebni vir)

SOLENOID ENGINE

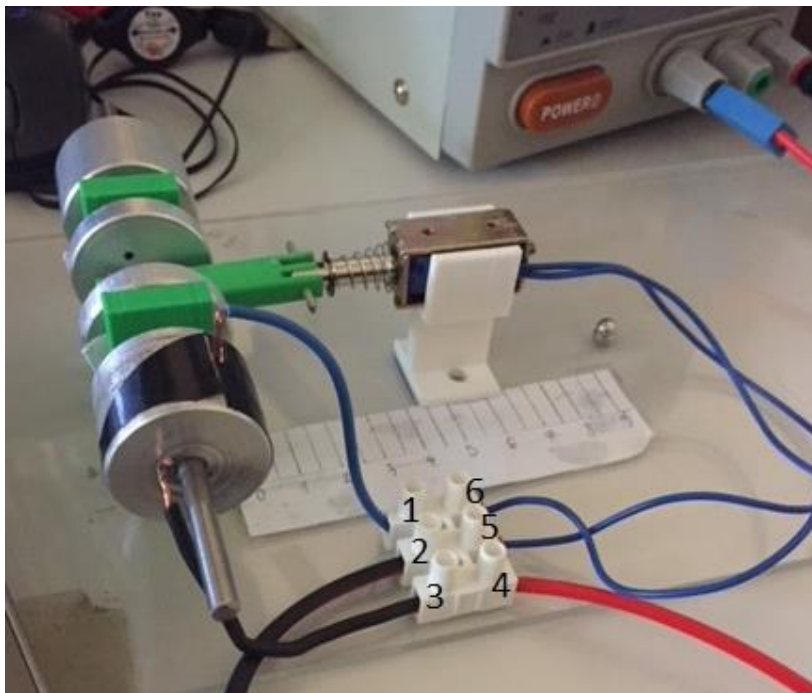
Raziskovalna naloga



Slika 12: "Pretvarjanje in razporeditev datoteke za 3D-print"
(Osebni vir)

4 PRINCIP DELOVANJA

Princip delovanja motorja je precej preprost in v veliki veličini podoben delovanju motorja z notranjim izgorevanjem. Kot izvršilni člen sva uporabila solenoid tipa *pull*, kar pomeni, da bat ob priključitvi na enosmerno napetost zavzame notranji položaj (glej sliko 11). V breznapetostnem stanju pa svojo vlogo odigra vzmet, ki bat potisne v prvotno pozicijo (glej sliko 10). Motor je v osnovnem stanju v položaju slike 8. Za en obrat motorja sta potrebna dva zaporedna giba bata – noter in ven. Napajalnik vklopimo, vendar se ne zgodi nič, saj se kontakt, ki je priklopljen na vrstno sponko številke 1, dotika površine vztrajnika, ki je izoliran (črno območje). Ko le-temu dodelimo vrtilni moment in ustrezen zagonski tok, motor začne delovati. Tok namreč steče skozi kontakt št. 2 do kontakta št. 5 skozi solenoid (tuljavo) in preko kontakta št. 6 v kontakt št. 1. Tu gre tok, ob položaju bata, ki pripada prevodni površini vztrajnika, preko kontaktov 3–4 v ozemljitev. Pozorna sva morala biti, da je bil ozemljitveni kontakt (št. 2) sklenjen z vztrajnikom, prav tako pa tudi kontakt št. 1. Eden izmed ciljev najine naloge je bil tudi krmiliti hitrost motorja. To sva dosegla tako, da sva prilagodila prevodno površino vztrajnika. Kjer je večja kontaktna površina (površina, kjer je kontakt št. 1 v stiku s prevodno površino), se bo motor vrtel z večjimi obrati. Kadar je ta površina manjša, se bo vrtel z manjšimi.



Slika 13: "Prototip, priklopljen"
(Osebni vir)

5 ANALIZA

Po zagotovitvi doslednega in natančnega delovanja sva se začela ukvarjati z analitičnim raziskovanjem. Odgovoriti sva morala na vrsto predhodno zastavljenih vprašanj: število obratov na minuto, gretje solenoida, vpliv hlajenja, optimizacija PWM-ja, povečanje/zmanjšanje toka/napetosti, trenje na kontaktih ipd.

5.1 ANALIZA ŠTEVILA OBRATOV

5.1.1 Meritve

Merjenje obratov je potekalo z laserskim merilcem obratov ali tahometrom. Po predhodni pripravi površine merjenca z odbojno nalepko sva merjenje lahko pričela. Razdelila sva ga v več kategorij oz. meritev pod različnimi pogoji. Glavna spremenljivka je bila širina pulza PWM (velikost prevodne površine na vztrajniku). Znotraj teh dveh kategorij meritev sva ločeno uvajala še naslednje spremenljivke: ohlajenost solenoida, čistoča kontaktov. Meritev je bila pod vsakim pogojem opravljena večkrat, navedene pa so povprečne vrednosti. Rezultati so predstavljeni v spodnjih tabelah.

Tabela 1: "Tabela meritev števila obratov pri največji širini pulzov PWM"

	T_{\max}	Očiščen kont.	Neoč. kont.
T_{\min}	/	1794 min ⁻¹	1516 min ⁻¹
Neoč. kont.	1450 min ⁻¹	/	/
Očiščen kont.	1512 min ⁻¹	/	/

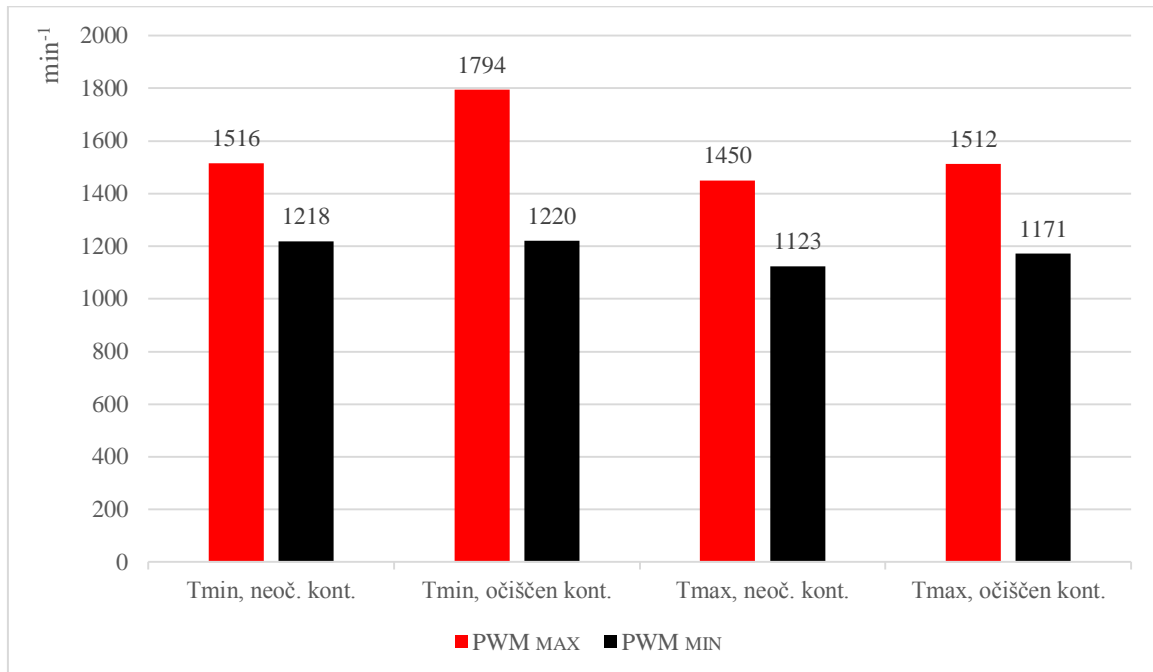
Tabela 2: "Tabela meritev števila obratov pri najmanjši širini pulzov PWM"

	T_{\max}	Očiščen kont.	Neoč. kont.
T_{\min}	/	1220 min ⁻¹	1218 min ⁻¹
Neoč. kont.	1123 min ⁻¹	/	/
Očiščen kont.	1171 min ⁻¹	/	/

SOLENOID ENGINE

Raziskovalna naloga

Za boljšo predstavo sva pripravila tudi grafični prikaz spreminjanja števila obratov glede na dane spremenljivke.



Slika 17: "Graf spreminjanja hitrosti vrtenja"
(Osebni vir)

Definicija kratic:

- T_{min} – solenoid na sobni temperaturi
- T_{max} – solenoid na visoki temperaturi
- Očiščen kont. – zbrušena kontaktna površina na vztrajniku in kontaktni žici
- Neoč. kont. – nezbrušena kontaktna površina na vztrajniku in kontaktni žici

5.1.2 Ugotovitve

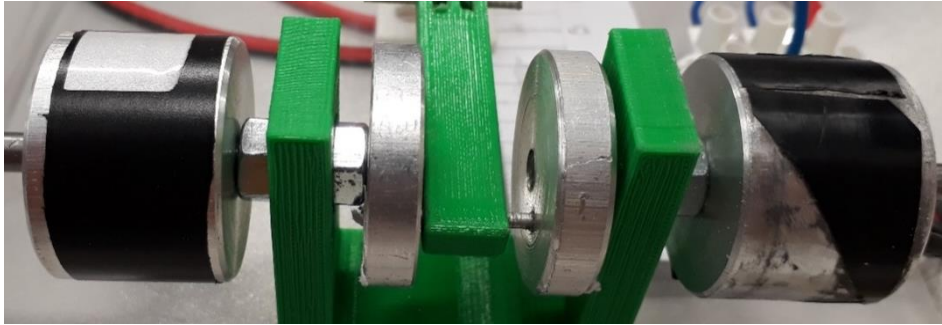
Najine ugotovitve glede hitrosti vrtenja motorja so v glavnini ustrezale hipotezam. Motor je deloval z najvišjo hitrostjo, ob pogojih, da je bila širina pulza PWM največja, kontakti zbrušeni in solenoid ohlajen. Najina pričakovanja je preseglo maksimalno število obratov. Zanimivo je, da so razlike pri različnih pogojih večje, ko je PWM nastavljen na največjo hitrost (PWM_{max}), ko pa je nastavljen na najmanjšo (PWM_{min}), so razlike minimalne.

5.2 VZTRAJNOSTNI MOMENT VZTRAJNIKA

Po definiciji je vztrajnik mehanska naprava za učinkovito shranjevanje rotacijske energije. V zadnji verziji najinega prototipa sva ugotovila, da je en aluminijast vztrajnik, s premerom $\phi 30$ in dolžino 24 mm, premalo. Z namenom izboljšati delovanje sva namesto uporabe

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

masivnejšega vztrajnika dodala še enega aluminijastega. S tem sva zagotovila tudi simetrijo in posledično izničila dodatne obremenitve. Pri zagonu in nadaljnjem delu prototipa sva lahko potrdila, da sta se vztrajnika izkazala kot ustrezna, saj sta izpolnila pogoje, ki sva jih zahtevala.



Slika 18: "Vztrajnika, implementirana na modelu"
(Osebni vir)

Za primerjavo sva izvedla tudi kalkulacijo masnega vztrajnostnega momenta vztrajnika iz svinca (Pb). Zatem sva primerjala trenutni vztrajnostni moment vrtečega se aluminijastega vztrajnika in svinčenega. Zaradi primerjave in natančnega izračuna sva upoštevala le en vztrajnik iz vsakega materiala.

Odčitala sva gostote obeh elementov: $\rho_{(Al)} = 2700 \frac{kg}{m^3}$, $\rho_{(Pb)} = 11340 \frac{kg}{m^3}$. Glede na ta dva podatka ter podatke o dimenzijah, sva, začevši z volumnom, izračunala maso posameznega vztrajnika. Sledeč postopek je pripadal aluminijastemu vztrajniku:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times h; \text{ predpis za volumen}$$

$$m_{(Al)} = \rho_{(Al)} \times V$$

$$m_{(Al)} = \frac{\pi d^2}{4} \times h \times \rho_{(Al)}$$

$$\underline{m_{(Al)}} = \frac{\pi \times (0,03 \text{ m})^2}{4} \times 0,024 \text{ m} \times 2700 \frac{kg}{m^3} = \underline{0,046 \text{ kg}}$$

Dobila sva torej maso aluminijastega vztrajnika. Postopek ponovimo, z upoštevanjem gostote svinca.

$$m_{(Pb)} = \rho_{(Pb)} \times V$$

$$m_{(Pb)} = \frac{\pi d^2}{4} \times h \times \rho_{(Pb)}$$

$$\underline{m_{(Pb)}} = \frac{\pi \times (0,03 \text{ m})^2}{4} \times 0,024 \text{ m} \times 11340 \frac{kg}{m^3} = \underline{0,192 \text{ kg}}$$

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

Sedaj lahko primerjamo maso svinca z maso aluminija pri enakih dimenzijah. $m_{(Pb)} = 0,192$ kg, $m_{(Al)} = 0,046$ kg. Očitno razliko lahko opazimo že pri masi. Vprašala sva se, kako bo to vplivalo na vztrajnostni moment, in ugotovitve zapisala.

Vztrajnostni moment je veličina, ki ima težnjo upirati se kotnemu pospeševanju (kovinsko kolo zavrtimo težje kot leseno). Najprej sva to veličino izračunala za aluminij.

$$I_{z(Al)} = \frac{1}{2}m_{(Al)} \times r^2$$
$$I_{z(Al)} = \frac{1}{2} \times 0,046 \text{ kg} \times (0,015 \text{ m})^2 = 5 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2 = 0,000005 \text{ kgm}^2$$

Nato sva enako storila še za svinec.

$$I_{z(Pb)} = \frac{1}{2}m_{(Pb)} \times r^2$$
$$I_{z(Pb)} = \frac{1}{2} \times 0,192 \text{ kg} \times (0,015 \text{ m})^2 = 2 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2 = 0,00002 \text{ kgm}^2$$

Po izračunu sodeč, bi imel vztrajnik iz svinca kar štirikrat večji vztrajnostni moment kot vztrajnik iz aluminija. To še ne pomeni, da bi imel motor s tovrstnim vztrajnikom večji izkoristek, saj bi porabil za premagovanje vztrajnosti razliko energije, ki jo vztrajnik iz aluminija shrani.

5.3 NAVOR SOLENOIDA

Solenoid deluje na ekscenter z enako silo ob vsakem obratu, vendar nanj ne deluje vedno z enakim momentom. Želela sva ugotoviti, kakšna je sprememba momenta solenoida na določeni točki v obratu. Izračun le-tega je zanimiv, saj vidimo dejansko sposobnost solenoida ob premagovanju vztrajnosti.

Najprej sva morala izračunati največji moment solenoida, t. j. moment, ko je ročica najdaljša. Navedena vlečna sila solenoida je 7 N. Z upoštevanjem ročice 5 mm v najbolj oddaljeni točki in uporabo enačbe za moment dobimo sledeče:

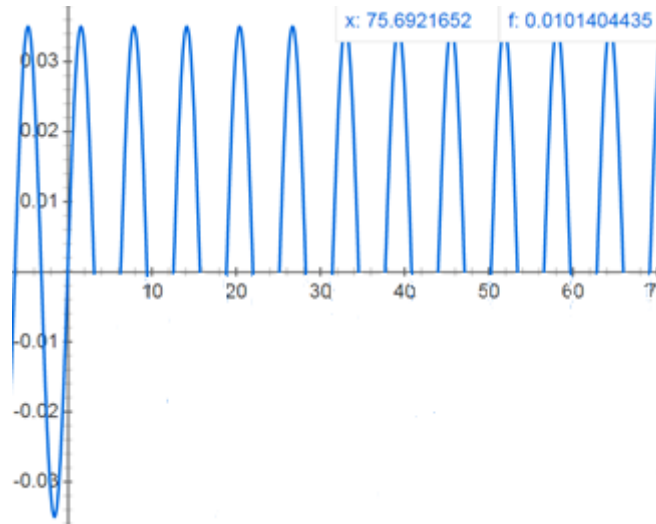
$$M = F \times r$$
$$M = 7 \text{ N} \times 0,005 \text{ m} = 0,035 \text{ Nm}$$

Izračunan navor je torej 0,035 Nm. Ta vrednost je ključna pri zasnovi predpisa za spreminjajoč se navor pri gibanju solenoida oz. vrtenju. En obrat motorja je enak 2π rad, torej se motor s startom v začetni legi pri 0 rad giblje po sinusoidi. Z upoštevanjem momenta v skrajni legi dobimo sledečo enačbo:

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

$$M = \frac{7 \times \sin(\alpha)}{200}; \alpha[\text{rad}]$$

Navedena enačba (funkcija) nam omogoča izračun navora solenoida pri določenem kotu zasuka, kjer mora biti kot zasuka (α) podan v radianih.



Slika 19: "Graf navora solenoida v odvisnosti od kota zasuka motorja"
(Osebni vir)

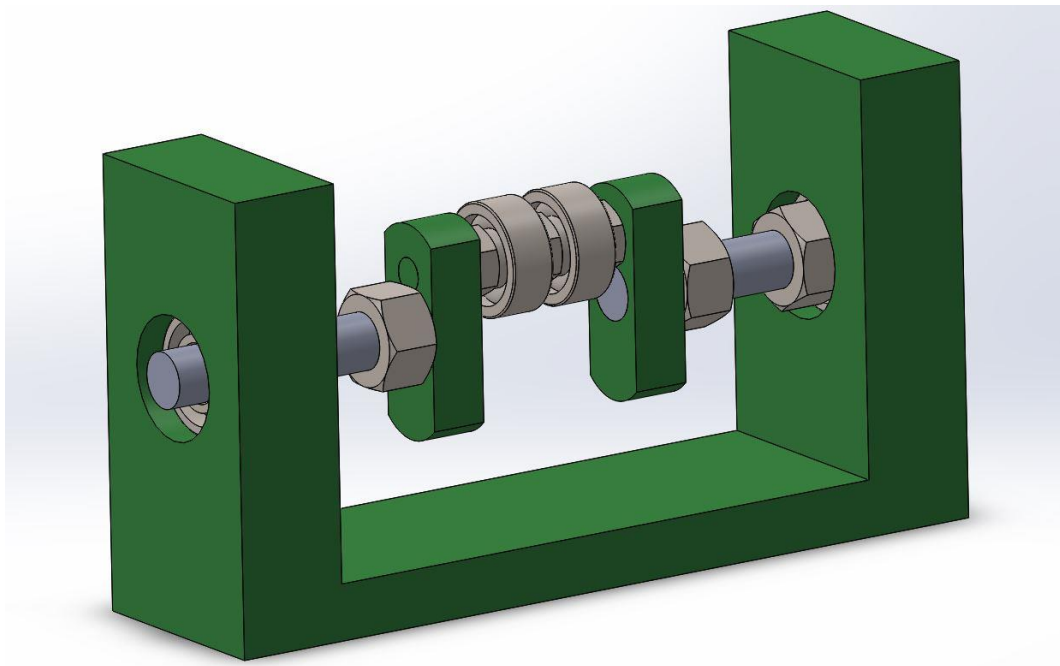
Opravimo lahko tudi preizkus. Zanima nas navor solenoida pri kotu 45° ali $\frac{\pi}{4}$ rad. Vstavimo v enačbo in izračunamo:

$$M = \frac{7 \times \sin(\alpha)}{200}$$
$$M = \frac{7 \times \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}{200} = \frac{7 \times \frac{\sqrt{2}}{2}}{200} = \frac{7\sqrt{2}}{400} \approx 0,0247 \text{ Nm}$$

6 MOTOR V8

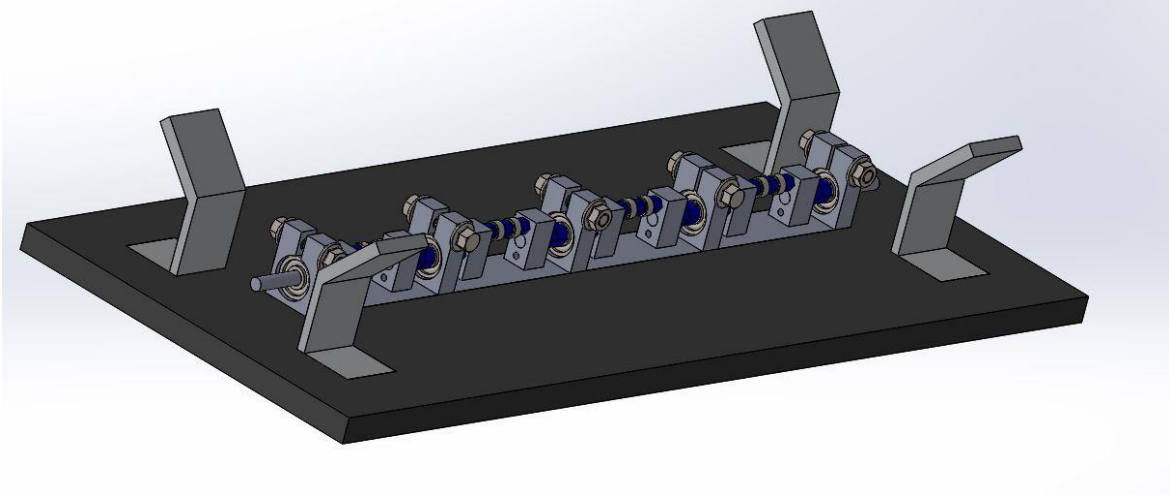
6.1 GLAVNI NOSILEC OSI

Po raznih preizkusih in testiranjih na prototipu sva se lotila zasnove končnega izdelka. Pričela sva z osnovo oz. podlago, na katero bodo montirani elementi, in bo zagotavljala čim manjšo prevodnost. Kot podložni material sva uporabila PVC-steklo. Najprej sva morala zasnovati nosilec osi, saj so od njegove dimenzije odvisne dimenzije drugih elementov motorja. Sprva sva kot material za izdelavo nosilca osi nameravala uporabiti aluminij, da bi bila zadeva čim robustnejša (glej sliko 22). Po tržni raziskavi glede dobave materiala, potrebne za izdelavo nosilca, sva prišla do ugotovitve, da bi bila nabava in kasnejše obdelovanje velik finančni in tehnični zalogaj. Vseskozi sva imela cilj stremeti k čimbolj cenovno ugodni izdelavi izdelka. Zato sva se odločila izdelati samo en segment celotnega nosilca. Omenjeni segment sva skonstruirala in ga izdelala v *MakerBot* obliki (glej sliko 21). Po preizkušanju omenjenega segmenta sva ugotovila, da bi nosilec, izdelan s pomočjo 3D-tiskalnika, zadostoval najinim pogojem oz. obremenitvam motorja.



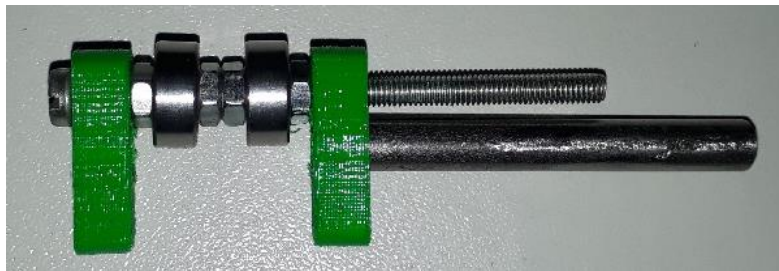
Slika 20: "Segment nosilca osi"
(Osebni vir)

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga



Slika 21: "Aluminijasta zasnova"
(Osebni vir)

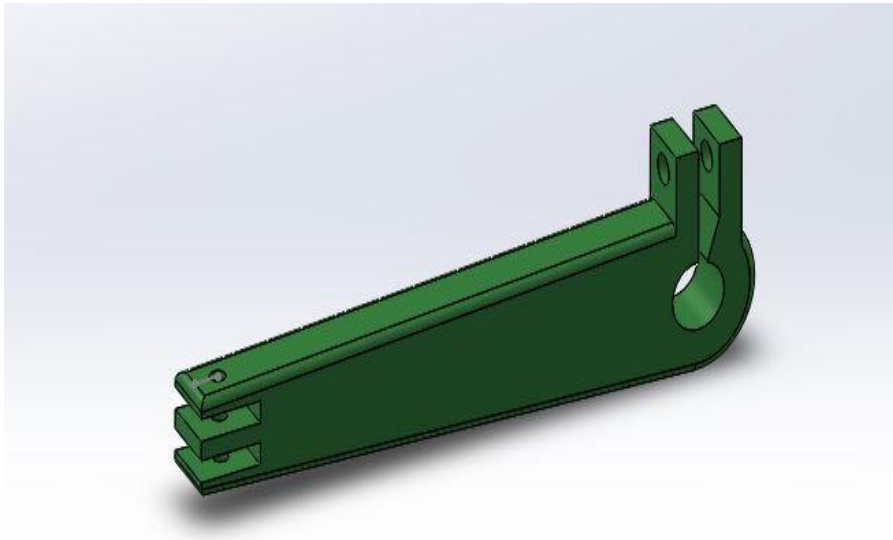
V konstrukcijo nosilca osi sva vključila visokokakovostne ležaje, ki se v osnovi uporabljajo pri naprednih rezkalnih napravah. Omenjeni ležaji so nama podali možnost vzdržati visoke vrtljaje, ki jih je motor dosegal. V konstrukcijo nosilca sva vključila tudi aluminijasto os, na katero sva pritrdila najin koncept lomljene osi (v nadaljnjem besedilu ročica) oz. dva ekscentrično natisnjena elementa, ki sta ustrezala hodu bata solenoida. Omenjena elementa sva v programu povezala s pomočjo navojne palice, nanjo pa sva z uporabo vijajčne zveze pritrdila dva ležaja (glej sliko 23).



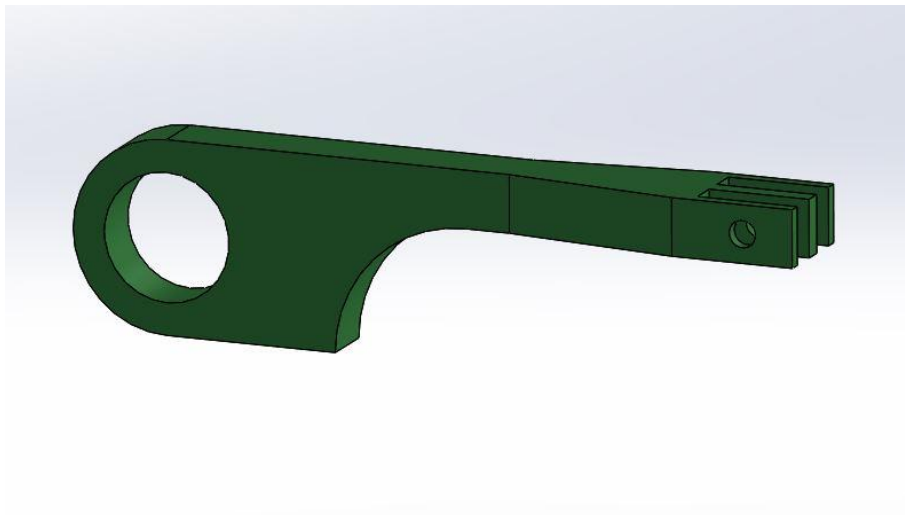
Slika 22: "Lomljena os oz. ročica"
(Osebni vir)

6.2 OJNICA

Na ležaje sva pritrdila ojnico, ki je povezovala najin aktuator oz. solenoid z ročico. Uporaba ležajev na ročici nama je omogočila gladko delovanje in minimalno trenje med ojnico in osjo. Ojnico sva skonstruirala in natisnila v dveh različnih modelih, po preizkušanju pa je zahtevam ustrezal drugi model ojnice oz. model 2.0.



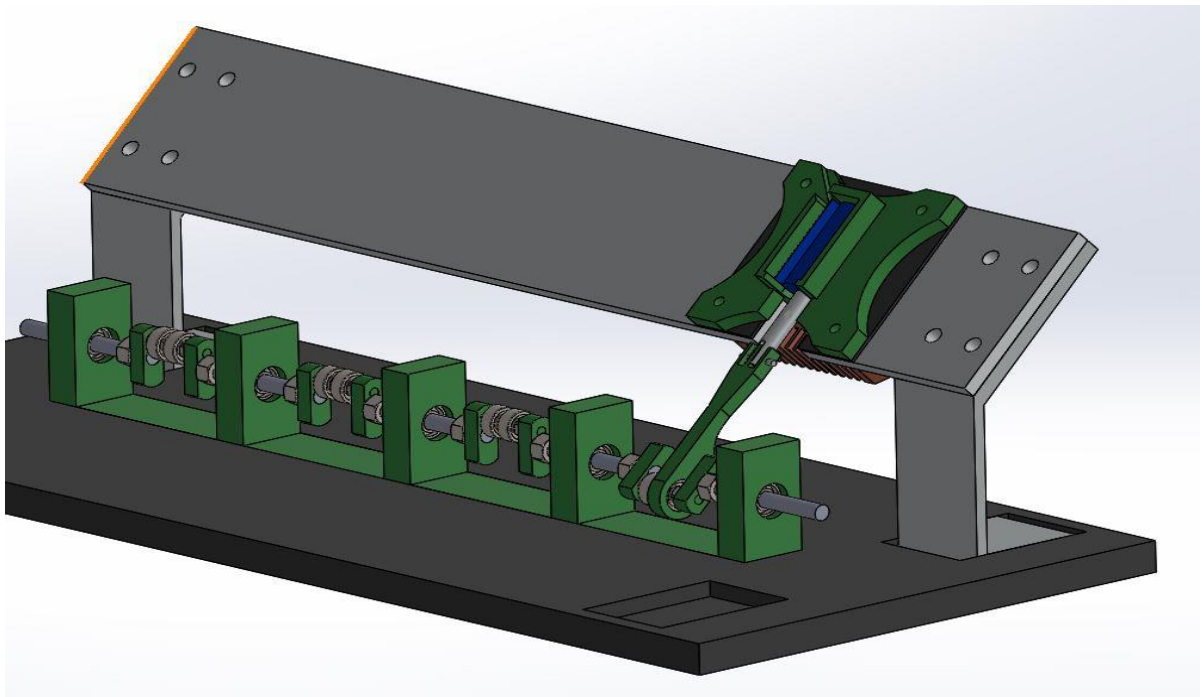
Slika 23: "Model ojnice 1.0"
(Osebni vir)



Slika 24: "Model ojnice 2.0"
(Osebni vir)

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga

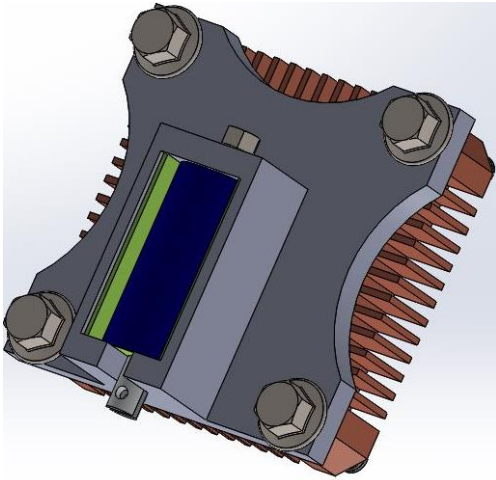
Dolžino ojnice je bilo potrebno prilagoditi hodu solenoida, njegovi oddaljenosti in kotu, pod katerim je bil z nosilcem pritrjen. Kot, pod katerim so bili nameščeni aktuatorji motorja oz. solenoidi, sva pridobila tako, da sva delila celoten krog 360° (2π rad) z osmimi solenoidi. S tem sva pridobila kot 45° ($\frac{\pi}{4}$ rad), saj se morajo ti aktivirati s takšnim faznim zamikom. Glede na izračunani kot in oddaljenost omenjenih elementov sva prilagodila dimenzije nosilca solenoida, nosilce pritrdilne letve in letev, na katero sva pritrdila nosilce aktuatorjev. Odločila sva se, da bova letev in nosilec izdelala iz aluminija, saj bosta elementa primorana vzdržati vibracije delovanja motorja in zagotavljati konstantno trdnost. Kasnejšo obdelavo letve sva morala prilagajati dimenzijam nosilca solenoida, da bi ta nudil maksimalen izkoristek ventilatorja za hlajenje. Za preprečevanje oz. minimalno vibriranje med nosilcem solenoida in letvijo sva pri spajanju omenjenih elementov med njiju namestila tanko plast gume, ki naj bi preprečila tudi površinsko obrabo med elementoma. Kot prvi korak sva skonstruirala ogrodje in ga v programu *SolidWorks* namestila na ustrezno razdaljo za nemoteno delovanje ojnice.



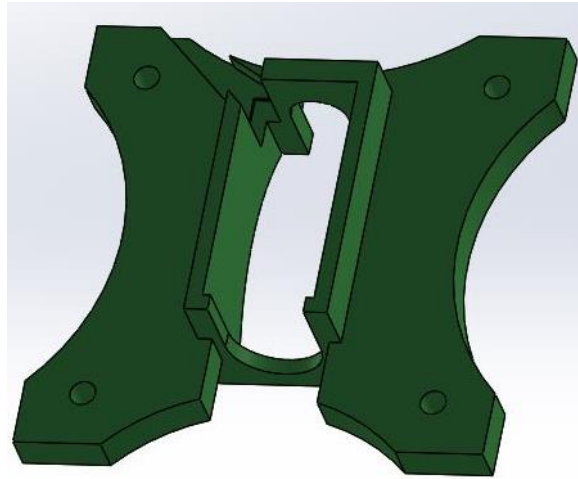
Slika 25: "Celotna zasnova z enim solenoidom"
(Osebni vir)

6.3 NOSILEC SOLENOIDA

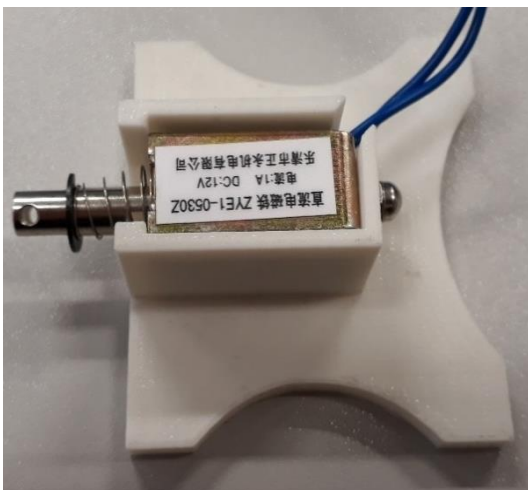
Nosilec solenoida sva skonstruirala na več načinov. Cilj je bil čim boljši izkoristek ventilatorja in njegovega hladilnika. Pri tem sva prišla do modela, ki bi solenoidu omogočal stik s hladilnikom ventilatorja. Nosilec je moral tudi omogočati pritrditev ventilatorja in nosilca na nosilno letev, kar predhodni modeli niso, prav tako niso omogočali stičnega hlajenja in vodila za kable. Nosilec sva prav tako izdelala s pomočjo 3D-tiskalnika.



Slika 26: "Prvi model nosilca solenoida s hlajenjem"
(Osebni vir)



Slika 27: "3D-print zasnova nosilca solenoida"
(Osebni vir)



Slika 28: "Prva fizična oblika prvotnega nosilca"
(Osebni vir)

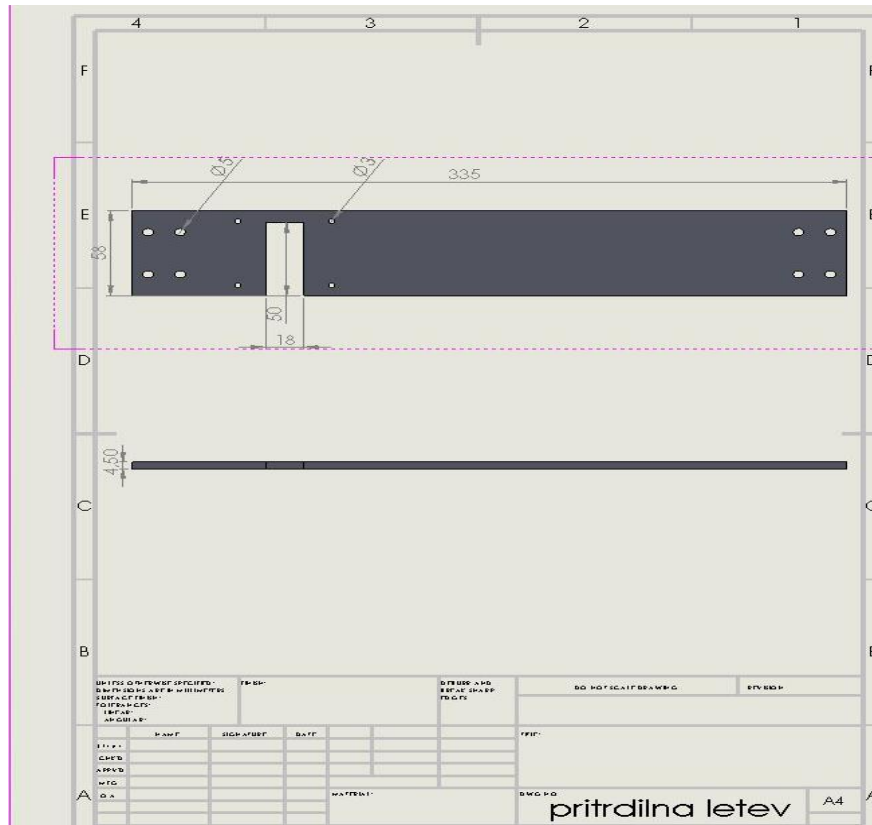


Slika 29: "Končna fizična oblika nosilca solenoida"
(Osebni vir)

8 TRENUTNA FAZA IZDELAVE

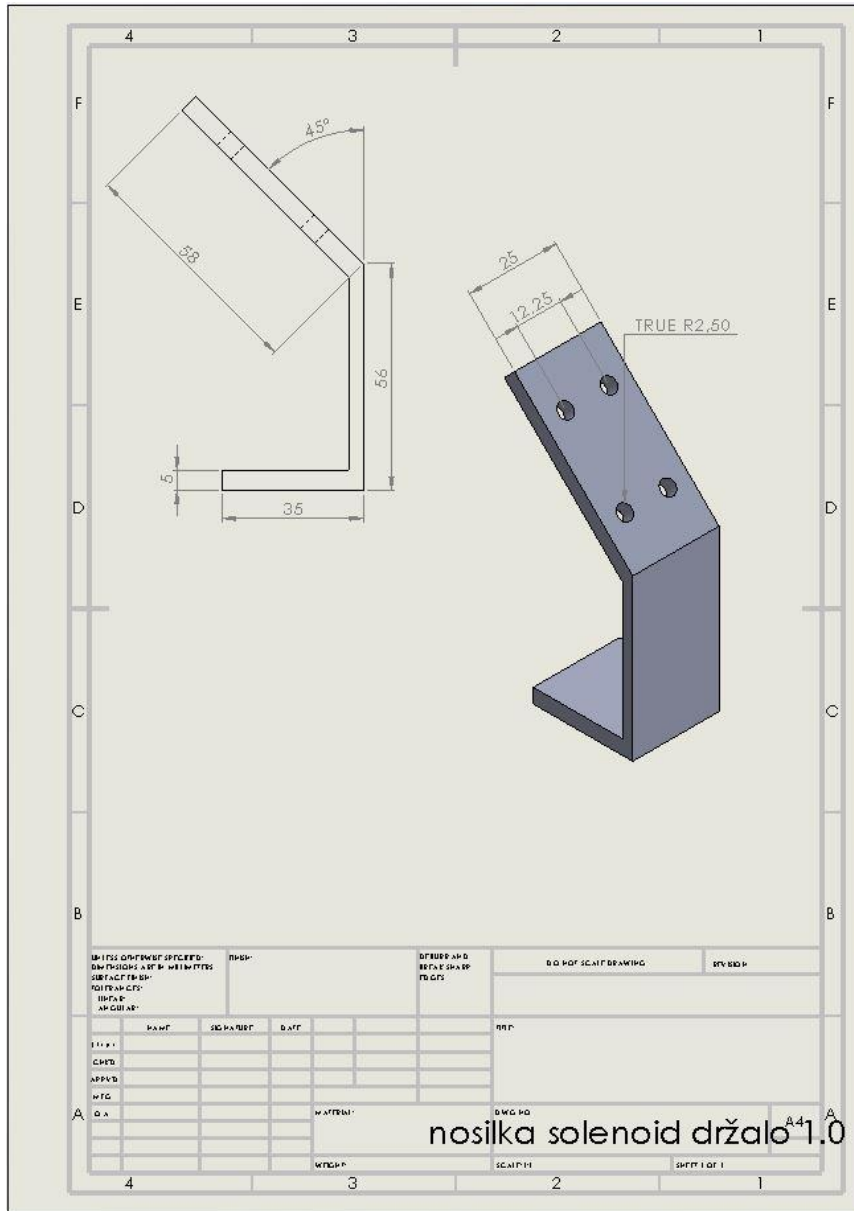
Izdelava končnega izdelka je še v postopku. Zavedala sva se, da bo potrebno ogromno časa za izdelavo željenega izdelka, saj so elementi iz različnega materiala npr. nosilec letve in letev sta iz aluminija, katerega obdelavo sva naročila v lokalnem podjetju. Do plastičnih oz. 3D natisnjenih elementov sva imela neomejen dostop s šolskim 3D-tiskalnikom, kar nama je omogočilo dokaj hitro izdelavo zasnovanih elementov. Komponente, kot so solenoidi in ventilatorji, sva naročila preko *Amazon.de*, trenutno pa še čakava na drugi del pošiljke. 3D natisnjeni elementi, ki so implementirani v končni izdelek, so že izdelani. Čakava še na izdelavo aluminijastih delov (letev in nosilec letve), ki sva jih naročila v podjetju *SICO* (glej *sliko 32 in sliko 33*). Za končno montažo oz. sestavo izdelka potrebujeva vse sestavne dele, saj jih je potrebno prilagoditi na optimalne mere za gladko delovanje motorja. Najino končno mnenje je, da sva slabo ocenila čas izdelave vseh elementov in zamude pošiljk iz *Amazon.de*, kar je pripeljalo do zamude v izdelavi končnega izdelka pred oddajo dokumentacije raziskovalne naloge.

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga



Slika 30: "Delavniška risba letev"
(Osební vir)

SOLENOID ENGINE
Raziskovalna naloga



Slika 31: "Delavniška risba držala letve"
(Osební vir)

9 NAČRTI ZA PRIHODNOST

V izhodišču sva načrtovala, da bova izdelala prototip motorja in na njem izvajala analize ter preizkuse. Po preizkušanju načina delovanja na prototipu sva načrtovala izdelati 8-valjni motor, katerega hitrost bi regulirala preko mehanskega PWM. Prav tako bi v delovanje motorja implementirala hlajenje, saj sva pri preizkušanju vpliva hlajenja na prototipu ugotovila, da poveča oz. vzdržuje konstantne vrtljaje. Cilj je bil tudi narediti čim ugodnejšo in robustnejšo verzijo omenjenega motorja. Zgoraj navedene plane nama je uspelo izvesti.

Po sestavi končnega izdelka načrtujemo njegovo delovanje tudi izboljšati z vezavo varistorjev, ki naj bi po tezah preprečili iskrenje na kontaktih motorja in ki bi tudi omočili nemoten pretok toka. Zaradi nizkega začetnega navora motorja ga je bilo potrebno prvotno ročno zavrteti za zagon. To bi preprečila z implementacijo zaganjalnika, preko katerega bi z aktivacijo tipke zagotovila motorju zagon brez ročnega poseganja v sistem. Na končnem izdelku nameravamo tudi izvajati razne poskuse, kot sva jih na prototipu. Na izhod motorja načrtujemo namestiti tudi kakšne aktuatorje npr. vetrnico in dinamo za poganjanje drugih manjših naprav (ventilatorje, luči itd.). Navsezadnje pa želiva še estetsko izboljšati ogrodje oz. zunanji izgled motorja, kar bi tudi zmanjšalo dostopnost v premikajoče se dele motorja.

10 ZAKLJUČEK

Raziskovalna naloga nama je poleg strokovnega znanja na področju strojništva in elektrotehnike razširila obzorje tudi na področjih ekonomije ter sodelovanja z ljudmi. Kot sva pričakovala, sva dobila osnovne ideje o nastanku novega produkta od ideje do delovanja in ugotovila, da dejstvo o spodletelih preizkusih pred uspehom res drži. Čeprav bo končni izdelek izdelan nekoliko kasneje, sva prepričana, da se lahko s pridobljenim znanjem lotiva kateregakoli zahtevnejšega projekta. Dobila sva tudi izkušnje na znanstvenem področju raziskovanja, saj sva z analizami ter poskusi pridobila zamisli in širino o tem, koliko znanstvenega dela lahko nek projekt zahteva. S projektom sva pridobila razgledanost na področju organizacije in odločanja, saj lahko s pravimi odločitvami pridemo prej do željenega rezultata. Konkretno sva se soočila s problemi pridobitve različnih materialov in njihove večkratne obdelave za dosego željenega delovanja. Morala sva biti kritična, saj sva želela narediti izdelek kakovosten in zanesljiv, kar nama je uspelo že pri prototipu. Meniva, da sva pridobila izvrstno referenco za prihodnost, na katero se bova večkrat tudi ozrla, misleč na uspešno izpeljan prvi projekt.

11 VIRI IN LITERATURA

- [1] KRAUT, B. *Krautov strojniški priročnik*. 15. izdaja. Ljubljana: Littera picta, 2011.
- [2] *Mehatronika*. 1. izdaja. Ljubljana: Založba Pasadena, 2009.
- [3] *Wolfram alpha*. (online). (citirano 17. 1. 2018). Dostopno na naslovu:
<https://www.wolframalpha.com/>