



Šolski center Nova Gorica
Gimnazija in zdravstvena šola

PREDELAVA SAMOHODNE KOSILNICE NA DALJINSKO VODENO KOSILNICO Z ELEKTRO POGONOM IN UGOTAVLJANJE EKONOMIČNOSTI TAKEGA POGONA

Raziskovalna naloga

Področje: elektrotehnika, elektronika in robotika



Erik Curk, David Bratina

Mentorja: Robert Vermiglio, Mirijam Pirc

Nova Gorica, šolsko leto 2024/25

Podatki o raziskovalni nalogi

Šola

Šolski center Nova Gorica, Gimnazija in zdravstvena šola
Cankarjeva 10, 5000 Nova Gorica

Avtorja

Erik Curk
curkerik06@gmail.com

David Bratina
david.bratina@sigraf.si

Mentorja

Robert Vermiglio
robert.vermiglio@scng.si

Mirijam Pirc
mirijam.pirc@scng.si

Področje raziskovanja

Elektrotehnika, robotika in elektronika

Zahvala

Za uspešno izdelavo raziskovalne naloge bi se radi iskreno zahvalili vsem, ki so omogočili, da smo projekt lahko izvedli in ga dokončali. Posebna zahvala gre profesorju Robertu Vermigliu za finančno podporo ter pomoč pri izdelavi in meritvah na robotski kosilnici. Prav tako se zahvaljujemo profesorici Mirijam Pirc, ki nam je s svojim znanjem pomagala pri zasnovi in pisanju raziskovalne naloge. Zahvaljujemo se tudi študentu fizike Kristjanu Vermigliu, ker nam je omogočil uporabo njegovega izvrstno napisanega programa za nadzor robotske kosilnice. Poleg tega izražamo hvaležnost podjetju Petrič, ki nam je omogočilo izdelavo kovinskih delov kosilnice. Na koncu se zahvaljujemo še našim sošolcem, ki so nesebično namenili svoj čas in nam pomagali pri izdelavi robotske kosilnice.

Kazalo

1. UVOD	1
1.1. Namen raziskovalne naloge	1
1.2. Hipoteze	1
2. DELOVANJE KOSILNIC Z ELEKTRIČNIM VODENJEM	2
3. UPORABLJENE KOMPONENTE	6
4. IZDELAVA KOSILNICE	7
4.1. Kosilnica kot osnova	7
4.2. Izbira motorja	7
4.3. Izbira baterije	9
4.4. Izbira mikrokrmilnika	10
4.5. Delovanje in povezava elektronike	10
4.5.1. Izbira primernih vodnikov	10
4.5.2. Tokokrogi in povezava	11
4.5.3. Opis in delovanje krmilnega sistema	13
4.5.4. Programiranje mikrokrmilnika	16
4.5.5. Varnostne zaščite	16
4.6. Razstavljanje	19
4.7. Izdelava ogrodja	19
4.8. Izdelava sprednjega dela	20
4.9. Prototipna faza	21
4.10. Izdelava zadnje različice	21
4.10.1. Izdelava močnejšega ogrodja	22
4.10.2. Napenjalni sistem za pasove	22
4.10.3. Urejanje sprednjega dela	22
4.10.4. Povezovanje električnega sistema	23
4.10.5. Povečanje oprijema	23
4.10.6. Dokončanje ohišja	23
4.10.7. Usposabljanje motorja	24
5. MERITVE	25
5.1. Merjenje vrtilne frekvence elektromotorja in pogonskega kolesa	25
5.2. Določitev razmerja med vrtilno frekvenco elektromotorja in vrtilno frekvenco pogonskega kolesa	26
5.3. Merjenje toka skozi kosilnico ob mirovanju	26
5.4. Merjenje toka iz baterije v električni sistem, v odvisnosti od vrtiljajev elektromotorja, ko je kosilnica na stojalu	27
5.4.1. Izračun hitrosti pri najnižjem toku skozi kosilnico	28
5.4.2. Izračun obratovalnega časa baterije pri najvišjem toku skozi kosilnico	28
5.4.3. Izračun obratovalnega časa baterije pri največji hitrosti	28
5.5. Merjenje sunkov toka skozi kosilnico med vožnjo po tleh	29
5.6. Merjenje toka iz baterije v električni sistem, v odvisnosti od hitrosti kosilnice med vožnjo po tleh	29
6. STROŠKOVNI IZRAČUN	32
7. UGOTOVITVE	34
8. ZAKLJUČEK	35
9. LITERATURA IN VIRI	36

Slike

Slika 2-1: Moderna robotska kosilnica znamke Husquarna [9].....	2
Slika 2-2: Skica prostora za košnje omejenega z žico [15]	2
Slika 2-3: Tehnologija Lidar na robotski kosilnici [4]	3
Slika 2-4: Prikaz vidnega polja VSLAM tehnologije na robotski kosilnici [12]	3
Slika 2-5: Prikaz komuniciranja med kosilnico, referenčno postajo in sateliti [9]	4
Slika 2-6: Profesionalna kosilnica na daljinsko vodenje [19]	5
Slika 4-1: Kosilnica Murray z motorjem Briggs & Stratton 500 series 158cc (Avtor fotografije: David Bratina).....	7
Slika 4-2: delovanje preprostega koračnega motorja [5].....	8
Slika 4-3: koračni motor s povratno zanko (leva) in brez povratne zanke (desna) [13]	8
Slika 4-4: Graf navora v odvisnosti od obratov na minuto podobnega koračnega motorja [17]	9
Slika 4-5: 56 V, 2,5 Ah Ego Power baterija [14].....	9
Slika 4-6: Arduino MEGA plošča [21]	10
Slika 4-7: Vijračni plato in tulci	11
Slika 4-8: Shema povezave primarnega tokokroga (Avtor sheme: Robert Vermiglio)	11
Slika 4-9: Nosilec baterije v programu za 3D modeliranje (Avtor fotografije: Erik Curk)	12
Slika 4-10: Senzorja za napetost baterije [1].....	12
Slika 4-11: Shema povezave treh sekundarnih krogov (Avtor sheme: Robert Vermiglio).....	13
Slika 4-12: Sprejemnik Flysky [7].....	14
Slika 4-13: Daljinski upravljalnik Flysky FS I6 [7]	14
Slika 4-14: Prikaz kanalov na daljinskem upravljalniku (Avtor sheme: Robert Vermiglio)	14
Slika 4-15: Sprejemnik ter razporeditev vhodnih in izhodnih kontaktov (pin-ov)	15
Slika 4-16: shema povezave krmilnika Arduino Mega in sprejemnika Flysky (Avto sheme :Robert Vermigio).....	15
Slika 4-17: Merjenje signala I-Bus med sprejemnikom in Aduinom (Avtor fotografij: David Bratina) .	16
Slika 4-18: Varovalke (Avtor fotografije: Erik Curk)	17
Slika 4-19: Shema povezave SSR releja za izklop motorja (Avtor sheme :Robert Vermiglio)	17
Slika 4-20: Shema povezave električnega sistema (Avtor sheme: Robert Vermiglio)	18
Slika 4-21: Električni sistem v kosilnici (Avtor fotografije: Erik Curk)	18
Slika 4-22: razstavljen kosilnica (Avtor fotografij: Erik Curk)	19
Slika 4-23: Izris stranice v programu Autodesk Inventor Professional (Avtor fotografije: Erik Curk) ...	19
Slika 4-24: Sestav ogrodja v modelirnem programu (Avtor fotografije: Erik Curk)	20
Slika 4-25: ogrodje iz lasersko izrezanih MDF plošč (Avtor fotografij: David Bratina).....	20
Slika 4-26: Slike kosilnice iz prve vožnje (Avtor fotografij: Erik Curk)	21
Slika 4-27: prenovljen napenjalni sistem (Avtor fotografij: Erik Curk).....	22
Slika 4-28: Izboljšan sprednji del kosilnice (Avtor fotografije: Erik Curk)	22
Slika 4-29: Izris diska za povečanje oprijema (Avtor fotografije: Erik Curk)	23
Slika 4-30: Izpopolnjen izris ogrodja v programu za modeliranje (Avtor fotografije: Erik Curk)	23
Slika 4-31: Izolirano ogrodje in dokončan pokrov (Avtor fotografije: David Bratina).....	24
Slika 5-1: Odsevni nalepki na kolesu in zobniku elektromotorja (Avtor fotografij: David Bratina)	25
Slika 5-2: Merilnik vtilne frekvence Voltcrat DT-10L (Avtor fotografije: David Bratina).....	25

Slika 5-3: Graf toka skozi kosilnico v odvisnosti od vrtilne frekvence motorja (Avtor grafa: David Bratina).....	27
Slika 5-4: Graf toka v odvisnosti od časa pri vožnji po tleh (Avtor grafa: David Bratina).....	29
Slika 5-5: Graf toka skozi kosilnico v odvisnosti od vrtilne frekvence motorja, ko se kosilnica premika po tleh (Avtor grafa:David Bratina).....	30

TABELE

Tabela 5-1: Poraba toka kosilnice pri različnih hitrostih vrtljajev motorja (Avtor tabele: Erik Curk) ...	27
Tabela 5-2: Poraba toka kosilnice pri različnih hitrostih vrtljajev motorja, ko se kosilnica premika po tleh z ustrežno hitrostjo (Avtor tabele: David Bratina).....	30
Tabela 6-1: Tabela stroškovnega izračuna po elementih (Avtor tabele: Erik Curk).....	32
Tabela I-1: Tabela toka, ki ga prenese vodnik glede na njegov presek [16]	38

Povzetek

V raziskovalni nalogi je opisan postopek nadgradnje nedelujoče samohodne bencinske kosilnice v kosilnico, pri kateri bencinski motor poganja rezilo za košnjo trave, elektromotor pa služi za pogon kosilnice, medtem ko daljinski upravljalnik omogoča njeno krmiljenje.

V prvem delu raziskovalne naloge je predstavljeno delovanje kosilnic z električnim vodenjem. Opisali smo uporabljene električne komponente ter varnostne zaščite, ki smo jih zagotovili pri delovanju kosilnice. Predstavili smo izdelavo ogrodja in sprednjega dela, ki služi kot držalo prednjih koles. Prav tako smo opisali celoten postopek izdelave kosilnice, vključno z izdelavo ogrodja, namestitvijo napenjalnega sistema, povezavo vseh električnih komponent ter način povečanja oprijema koles na podlagi.

V drugem delu raziskovalne naloge so predstavljene meritve vrtilne frekvence elektromotorja in pogonskega kolesa, ko je bila kosilnica dvignjena od tal. Naslednja meritev je zajemala merjenje toka skozi kosilnico v mirovanju ter merjenje toka pri vrtenju koles v zraku, v odvisnosti od vrtiljajev elektromotorja. Pri premikanju kosilnice po tleh smo merili tok ob sunkovitem pospeševanju. Na podlagi teh podatkov smo izračunali največjo porabljeno moč kosilnice. V zadnji meritvi smo izmerili povprečen tok skozi kosilnico pri enakomernem gibanju s konstantno hitrostjo ter iz teh podatkov izračunali čas njenega obratovanja.

V zadnjem delu raziskovalne naloge smo predstavili celoten stroškovni izračun, pri čemer smo upoštevali le ceno kupljenih delov, brez dodatnih stroškov dela. Opisali smo tudi možne izboljšave, s katerimi lahko kosilnico nadgradimo v samovozno kosilnico.

Ključne besede: Električen pogon, daljinsko upravljanje, predelava, izdelava, koračni elektromotorji, merjenje

Abstract

The research paper describes the process of upgrading a non-functional self-propelled petrol lawnmower into a mower in which the petrol engine powers the cutting blade, while an electric motor is used for propulsion, and the mower is controlled via a remote controller.

In the first part of the paper, the operation of electrically controlled lawnmowers is presented. We described the electrical components used and the safety protections implemented for the mower's operation. The construction of the frame and the front section, which serves as a holder for the front wheels, is presented. We also described the entire process of building the mower, including the construction of the frame, the installation of the tensioning system, the connection of all electrical components, and the modification used to improve the traction of the drive wheels on the surface.

In the second part of the paper, we present the measurements of the rotational frequency of the electric motor and the drive wheel when the mower was lifted off the ground. The next measurement involved recording the current drawn by the mower while it was stationary, as well as examining the relationship between the current supplied by the lawnmower battery and the electric motor's rotational frequency while the wheels were spinning freely in the air. While the mower was moving on the ground, we measured the current during sudden acceleration. Based on these data, we calculated the mower's maximum power consumption. In the final measurement, we recorded the average current through the mower during steady movement at constant speed and, based on these data, calculated its operating time.

In the final part of the paper, we presented a complete cost analysis, considering only the price of purchased parts, leaving out additional labor costs. We also described possible improvements that could upgrade the mower into a fully autonomous self-driving mower.

Keywords: Electric drive, remote control, modification, production, stepper motors, measurement

1. Uvod

Ideja za projekt samohodne kosilnice na daljinsko vodenje je nastala iz potrebe po lažji košnji trave pod niskimi krošnjami dreves na neravnem terenu. V raziskovalni nalogi bomo opisali izdelavo daljinsko vodene kosilnice, njeno delovanje ter komponente, ki smo jih pri izdelavi uporabili.

Zanimalo nas je, kako narediti kosilnico, ki bi bila konkurenčna že obstoječim, hkrati pa smo želeli ostati znotraj določenega proračuna.

Kosilnico smo tudi testirali in izmerili razne veličine pod različnimi pogoji, ter jo primerjali s komercialno dostopnimi robotskimi kosilnicami.

1.1. Namen raziskovalne naloge

Namen naše raziskovalne naloge je bil izdelati daljinsko vodeno kosilnico, ki bi uporabljala elektromotor za pogon in bi omogočala lažjo košnjo na zahtevnem terenu in v tesnih prostorih, kot na primer pod niskimi krošnjami. Želeli smo izmeriti razne veličine kot so vrtilna frekvenca, tok in napetost elektromotorja ter hitrost kosilnice. Te vrednosti bi merili v stanju mirovanja, med delovanjem kosilnice in ob sunkovitem pospeševanju ter s primerjavo podatkov dobili ustrezne podatke o moči kosilnice in času delovanja.

Z uporabo koračnih motorjev s povratno zanko za pogon kosilnice pa smo želeli ugotoviti smiselnost in učinkovitost takega pogonskega sklopa.

Pri tem pa smo tudi želeli, da bi bil naš izdelek cenovno bolj dostopen kot alternativni izdelki na trgu, kar smo želeli dokazati z analizo trga in stroškovnim izračunom.

1.2. Hipoteze

Pri raziskovalni nalogi smo postavili naslednje hipoteze:

- Obratovalni čas kosilnice bo vsaj 1 uro.
- Uporaba koračnih motorjev s povratno zanko za pogon kosilnice je bolj učinkovita, kot uporaba koračnih motorjev brez povratne zanke.
- Daljinsko vodeno kosilnico lahko uporabljamo kot samovozno kosilnico.
- Elektromotor v naši kosilnici bo proizvedel dovolj navora pri maksimalni obremenitvi kosilnice.
- Kosilnica bo pri nižjih hitrostih premikanja dlje časa obratovala.

2. Delovanje kosilnic z električnim vodenjem

Kosilnice z električnim pogonom delujejo na podobnem principu, vendar se razlikujejo po načinu vodenja. Obstajajo robotske kosilnice, katerih smer določa program na podlagi različnih informacij o okolici, pridobljenih na več načinov, ter daljinsko vodene kosilnice, pri katerih smer košnje nadzira človek.

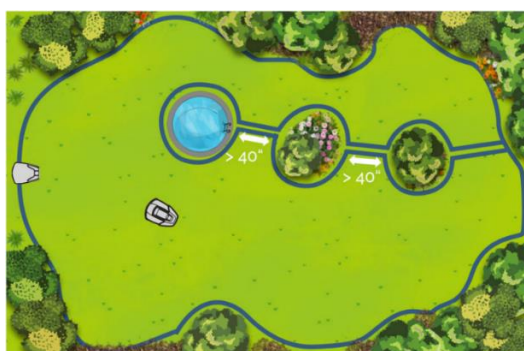
Robotske kosilnice delujejo avtonomno, pri čemer uporabljajo razne tehnologije za navigacijo, program pa z uporabo algoritma določi optimalno pot košnje. Moderne robotske kosilnice vsebujejo vrsto senzorjev za prepoznavanje okolice, kot so senzori za nagib, dvižni senzor, razni senzori za zaznavanje trkov z okolico, senzor za dež in razne senzore za določitev lege v prostoru.



Slika 2-1: Moderna robotska kosilnica znamke Husquarna [9]

Tehnologije za navigacijo se razlikujejo po ceni, natančnosti in količini pokritega prostora. Poznamo mnoge, najbolj uporabljene pa so:

- Omejevanje prostora košnje z žico. Žica je pod napetostjo, ki jo kosilnica zazna in tako ve, kje je rob travnate površine. Ta način je eden izmed najbolj uporabljenih in je cenovno zelo dostopen. Kosilnica s samo to tehnologijo pa ima mnogo pomanjkljivosti, kot je na primer pomanjkanje aktivnega prilagajanja oviram, zato se ta sistem največkrat uporablja v kombinaciji z drugimi. Omejeni smo tudi z maksimalno dolžino žice in posebej moramo paziti, da je krog zmeraj neprekinjen.



Slika 2-2: Skica prostora za košnje omejenega z žico [15]

- Lidar Slam (Light Detection and Ranging Simultaneous Localization and Mapping) sistem. S pomočjo izstreljevanja laserskih žarkov in zaznavanja njihovega odboja ta sistem zelo natančno izrisuje okolico. Tak sistem je v teoriji zelo uporaben pri načrtovanju okolice, ima pa mnogo slabosti, zato je malo uporabljan. Nekatere izmed slabosti so ogromna količina podatkov in velika procesna moč, potrebna za delovanje sistema, visoka cena in občutljivost senzorja na zunanje vremenske pogoje. Ta sistem pa zelo pogosto vidimo pri robotskih

sesalcih, saj v notranjih prostorih vreme nima vpliva na senzorje, ravne stene v notranjosti pa omogočajo lažji izris in posledično manjšo potrebo po procesni moči.



Slika 2-3: Tehnologija Lidar na robotski kosilnici [4]

- VSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) sistem. Uporaba tega sistema je v porastu, saj je cenovno dostopen, in omogoča hitro prilagajanje okoliškim razmeram. V osnovi deluje tako, da robot prek kamer opazuje okolje in z zbiranjem podatkov oblikuje navidezen zemljevid okolice. Ta tehnologija potrebuje veliko procesne moči za obdelavo velikih slikovnih podatkov, zato so potrebni učinkoviti algoritmi in zmogljiva oprema, kar je slabost takih sistemov. V nasprotju z Lidar sistemom, pri katerem okoliška svetloba nima vpliva, pri VSLAM-u igra ta veliko vlogo, zato je ob pomanjkanju svetlobe sistem neuporaben.



Slika 2-4: Prikaz vidnega polja VSLAM tehnologije na robotski kosilnici [12]

- RTK (Real-Time Kinematics) sistem. Temelji na uporabi satelitskih sistemov za določanje lokacije. Od navadnih GPS navigacijskih sistemov pa se razlikuje v natančnosti, saj lahko določa pozicijo do 1 cm natančno. Pri navadnem GPS sistemu naprava komunicira neposredno s sateliti, pri RTK sistemu pa komunicira s sateliti in še z vsaj eno referenčno postajo v bližini. S pomočjo te referenčne postaje, ki tudi komunicira s sateliti, lahko izračuna in izloči razne merilne napake, do katerih pride pri določitvi lege, ter tako doseže centimetrsko natančnost. Vse te dobre lastnosti pa ne pomenijo, da je ta tehnologija brez pomanjkljivosti. Sistem potrebuje stalno neprekinjeno povezavo s sateliti in referenčno postajo, kar je lahko v nekaterih okoljih problem. Postavljanje in upravljanje pa zahteva veliko znanja. Cene te tehnologije so visoke, kosilnice, ki uporabljajo to tehnologijo pa sodijo med najboljše.



Slika 2-5: Prikaz komuniciranja med kosilnico, referenčno postajo in sateliti [9]

Vsaka tehnologija ima svoje prednosti in slabosti, zato optimalne rešitve dobimo s kombiniranjem. Večina kosilnic nižjega cenovnega razreda uporablja samo mejno žico, ko pa pridemo v višji cenovni razred, najpogosteje zasledimo uporabo RTK sistema v kombinaciji z VSLAM sistemom. Tudi take kosilnice pogosto omogočajo uporabo mejne žice, ampak preostala dva sistema omogočata košnjo na večji površini in hitro izogibanje oviram.

Na ravni površini, brez ovir, RTK in VSLAM sistema nista nujna, ko pa se srečamo s kompleksnimi oblikami travnate površine z ovirami in nakloni pa se pokaže njuna uporabnost. Glavna težava kosilnice brez teh tehnologij je ta, da ko ni pri žici, sama ne ve kje se nahaja. Če je njena pot od roba do roba motena, kar se zgodi pri zdrsu ali kakršnemkoli premiku ter obratu, tega kosilnica ne bo zaznala in bo pot nadaljevala, kot da še zmeraj potuje po začrtani poti naravnost. Če pa poznamo lokacijo na centimeter natančno, te težave izločimo. To je zelo uporabno pri košnji velikih površin, ko so razdalje od roba do roba velike in pri kompleksih travnatih površinah z ovirami in nakloni, na katerih so zdrsi in premiki pogosti.

Za uporabo daljinskega vodenja smo se odločili na osnovi površine, ki jo hočemo kositi. Kot že omenjeno, je naša površina izjemno razgibana, z veliko ovirami in višjo travo. Čeprav vsi avtonomni sistemi omogočajo hitro prilagajanje in upravljanje, nikoli ne bodo dosegli natančnosti in prilagodljivosti, ki ju omogoča človeški nadzor. Robotske kosilnice tudi kosijo po sistemu, da skoraj vsak dan pokosijo le par milimetrov trave, zato njihova rezila niso močna in primerna za košnjo višje trave, kot bi jo mi želeli.

Kosilnice na daljinsko vodenje predstavljajo idealno rešitev za košnjo težjih terenov brez fizičnega napora. Take kosilnice po večini sestavlja bencinski motor, ki lahko poganja večje rezilo in električen pogon, s katerim uporabnik prek daljinskega upravljalnika usmerja kosilnico.

Pogonski del je sestavljen iz električnih motorjev, elektronike, potrebne za upravljanje z njimi, baterije ter koles ali gosenic. Gosenice so pogosta izbira proizvajalcev, saj preprečujejo zdrse in omogočajo dober nadzor nad vozilom. Obračanje takega pogona je po 'tankovsko', to pomeni, da se ena gosenica vrti hitreje kot druga, kar povzroči obrat kosilnice. Naša kosilnica ima kolesa, spredaj dve gibljivi, zadaj pa pogonski, ki obračata kosilnico po istem principu kot gosenice.



Slika 2-6: Profesionalna kosilnica na daljinsko vodenje [19]

Daljinsko vodene kosilnice so pogosto težke, večje, narejene za večje površine, drage in namenjene za profesionalno rabo, saj je za upravljanje potrebno precej znanja. Take kosilnice na trgu dosegajo cene nekaj tisoč EUR, kar se nam je zdelo za domačo rabo preveč. Iskali smo cenovno bolj dostopno rešitev in se odločili narediti svojo daljinsko vodeno kosilnico, ki uporablja bencinski motor za pogon rezila in elektromotor za pogon koles.

3. Uporabljene komponente

Nedelujoča bencinska kosilnica, ki smo jo uporabili kot osnovo za našo kosilnico, je bila kosilnica Murray z motorjem Briggs & Stratton 500 series 158 cc. Za to, da smo kosilnico nadgradili v daljinsko vodeno kosilnico z elektro pogonom, smo kupili razne električne komponente ter druge potrebne elemente. Ogradje in razne elemente smo naredili sami, z uporabo laserskega rezalnika, 3D tiskalnika in stružnice.

Kupljeni električni komponenti:

- Koračni motorji s povratno zanko Nema34 12 Nm
- Gonilniki koračnih motorjev HBS860H
- Arduino MEGA
- Baterija Ego 56 V 2,5 Ah
- Varovalke
- Glavno stikalo
- SSR releji
- 100W DC/DC "step down" napajalnik
- Merilec napetosti Flysky
- Prikazovalec napetosti baterije
- Daljinski upravljalnik Flysky FS I6 s sprejemnikom
- Razne žice in konektorji

Ostali kupljeni elementi:

- Zobati jermen
- Zadnja kolesa
- Gibljiva kolesa
- Aluminijski profil
- Navojne palice, vijaki in matice

3D natisnjeni elementi:

- Nosilec Ego baterije
- Pokrov škatle z elektroniko
- Distančniki sprednjih koles
- Pokrovi zobatih jermenov
- Pokrovčki koles

Lasersko izrezani elementi:

- Ogradje škatle z elektroniko
- Napenjalci jermenov
- Nosilci sprednjih koles

Postružena dela:

- Osi, ki držita zadnji kolesi

4. Izdelava kosilnice

4.1. Kosilnica kot osnova

Postopek izdelave naše kosilnice smo začeli z uporabo samohodne bencinske kosilnice Murray z motorjem Briggs & Stratton 500 series 158cc, ki nam je bila na voljo. Menili smo, da bo dobra osnova zaradi močnega bencinskega motorja, ki lahko kosi visoko travo in železnega ogrodja, ki predstavlja dobro in trdno podlago za nadgradnjo.

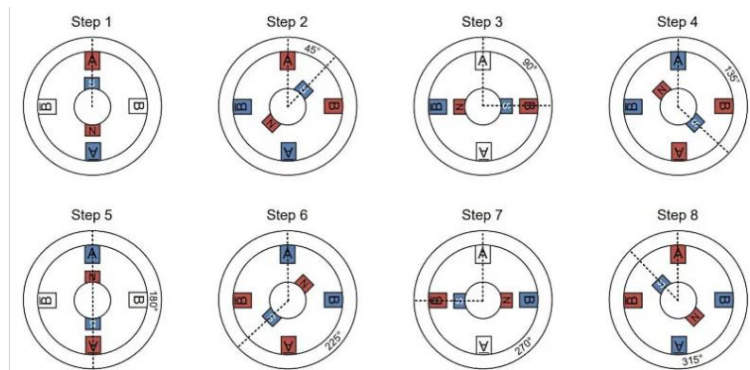


Slika 4-1: Kosilnica Murray z motorjem Briggs & Stratton 500 series 158cc (Avtor fotografije: David Bratina)

4.2. Izbira motorja

Pred začetkom dela na projektu smo se morali odločiti kakšen motor bo poganjal našo kosilnico. Zaradi najboljših izkoristkov se zdi najbolj smiselna izbira navadnih DC motorjev, mi pa smo imeli na razpolago dva koračna motorja s povratno zanko. Ostala sta nam od nedokončanega projekta in odločili smo se ju uporabiti. Želeli smo tudi preizkusiti uporabnost in učinkovitost takih motorjev v pogonski vlogi.

Koračni motor je elektromotor, ki se vrti z majhnimi koraki. Deluje na principu elektromagnetov. V notranjosti motorja so tuljave, ki se izmenično napajajo, kar povzroči premikanje rotorja iz enega položaja v drugega. Vsak korak oziroma impulz toka premakne motor za določen kot. Posledično je tako motor zelo natančen in primeren za naprave, kjer je treba natančno določiti položaj, kot so 3D-tiskalniki, CNC-stroji in robotski sistemi.



Slika 4-2: delovanje preprostega koračnega motorja [5]

Kljub prednostim koračnih motorjev pri natančnem pozicioniranju pa imajo tudi svoje slabosti. Prva težava je slab izkoristek energije, druga pa je izguba natančne pozicije ob preobremenitvi. Posebnost naših koračnih motorjev je, da imata povratno zanko. Z uporabo povratne zanke se delno izognemo omenjenim težavam.

Če ima motor povratno zanko, pomeni, da ima motor enkoder, ki gonilniku motorja sporoča točno pozicijo osi. Ko gonilnik pošlje pulz toka v elektromotor, se ta obrne za en korak, enkoder pa informacijo o premiku pošlje nazaj gonilniku. Gonilnik tako prejme povratno informacijo, ali se je koračni motor obrnil ob poslanem pulzu. Gonilnik lahko tako dovaja najmanjši potreben tok za premik motorja. Ob povečanju obremenitve, se število poslanih impulzov in narejenih premikov ne bo ujemalo, zato bo gonilnik dovajal dodatni tok ter napetost, za povečanje navora, dokler motor ne opravi zahtevanega premika.

Pri koračnem motorju brez povratne zanke pa gonilnik ne pozna točne pozicije motorja. Na gonilniku motorja določimo maksimalen tok, ki ga motor lahko porablja. Gonilnik ravno tako pošilja pulze v tuljave, ki po majhnih korakih obračajo elektromotor. Ta pa ne pozna točne pozicije elektromotorja. Ker motor ne pozna obremenitve, dovaja v tuljave konstanten maksimalen tok, kar povzroči velike izgube v obliki toplote, saj se dovajana moč ne konstantno porablja za ustvarjanje navora. Ob mirovanju gonilniki prav tako dovajajo tok v tuljave elektromotorja, kar ustvari držalni navor, s tem pa tudi velike izgube brez opravljenega dela. Če obremenitev motorja presega maksimalno moč motorja, ta preskoči korak in posledično izgubi pozicijo. Ker gonilnik ne dobi nobene povratne informacije o izgubi pozicije elektromotorja, ta nadaljuje delovanje izven točnosti.

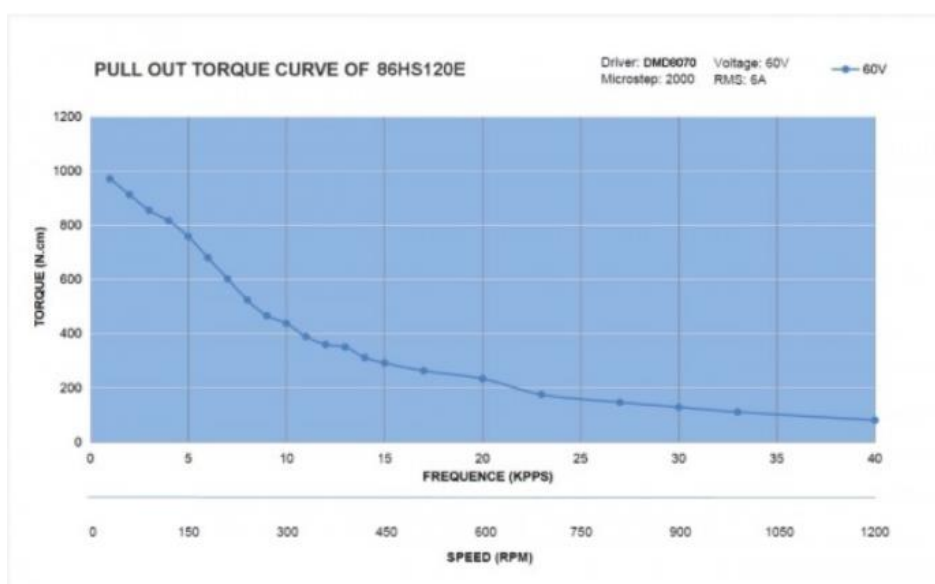
Uporaba povratne zanke torej izloči težavo izgumbe pozicije, močno pa zmanjša tudi izgube energije. Gonilnik lahko prilagaja porabo toka glede na obremenitev, s tem pa občutno zmanjša porabo energije. Ker naša kosilnica za napajanje uporablja baterijo, je to ključnega pomena, saj lahko tako podaljšamo čas delovanja kosilnice. Zaključimo lahko, da so koračni motorji s povratno zanko veliko bolj primerni za uporabo pri pogonu kot brez povratne zanke.



Slika 4-3: koračni motor s povratno zanko (leva) in brez povratne zanke (desna) [13]

Na voljo smo imeli dva koračna motorja Nema34 12 Nm s povratno zanko. Ta motor ima kot koraka $1,8^\circ$, kar pomeni, da lahko dobimo 200 pozicij/korakov na vrtljaj. Vsaka faza črpa 6,0 A pri 3,6 V, kar omogoča držalni navor 12,0 Nm.

Koračni motorji niso narejeni za obratovanje pri visokih obratih, omogočajo pa visok navor pri nizkih obratih. V našem primeru nismo potrebovali višjih obratov, temveč nižje in velik nadzor nad hitrostjo. Kljub nizkim hitrostim, pri katerih motor obratuje, so bile te še vedno previsoke in smo posledično reducirali obrate prek zobatega jermena. Z redukcijo pa smo tudi povečali navor na pogonskih kolesih.



Slika 4-4: Graf navora v odvisnosti od obratov na minuto podobnega koračnega motorja [17]

Poleg motorjev smo imeli tudi njihove ustrezne gonilnike.

4.3. Izbira baterije

Pri izboru baterije smo iskali že uveljavljen sistem, ki nam bi omogočal pogon sistema pri maksimalni moči vsaj eno uro. Pri raziskavi trga smo odkrili platformo Ego Power, ki ponuja široko izbiro baterij in orodij. Nas so zanimala 56 V baterije, izbrali pa smo 2,5 Ah različico.



Slika 4-5: 56 V, 2,5 Ah Ego Power baterija [14]

4.4. Izbira mikrokrmilnika

Mikrokrmilnik deluje kot središče našega sistema. Prejema signal iz sprejemnika in ga pretvori v navodila za obračanje motorjev. Za upravljanje smo izbrali mikrokrmilnik Arduino MEGA.

Arduino Mega je mikrokrmilniška plošča, ki ponuja odprtokodno platformo za izdelovanje prototipov in ustvarjanje. Temelji na mikrokrmilniku ATmega2560. Ima 54 digitalnih vhodno/izhodnih pinov, 16 analognih vhodov, 16 MHz kvarčni oscilator, USB povezavo, priključek za napajalnik, ICSP priključek in gumb za ponovni zagon. Deluje na napetosti 5 V, vhod pa sprejema napetosti od 7-12 V, zato smo morali 56 V iz baterije pretvoriti v napetost 12 V.

Plošča se programira z Arduino programskim okoljem. Programiranje poteka v poenostavljeni različici programskega jezika C++.



Slika 4-6: Arduino MEGA plošča [21]

4.5. Delovanje in povezava elektronike

Električni sistem je sestavljen iz motorjev, baterije, mikrokrmilnika, sprejemnika in oddajnika ter raznih manjših komponent. Opisali bomo delovanje električnega sistema, varnostne ukrepe, ki smo jih morali upoštevati ter pomembne povezave med komponentami.

4.5.1. Izbira primernih vodnikov

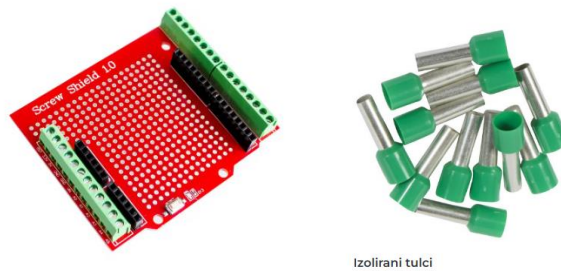
Za povezavo komponent smo najprej morali izbrati ustrezno debelino vodnikov (žice), da bi preprečili tokovne preobremenitve. Do tega pride, če je žica, ki povezuje porabnika in vir, pre drobna za prenos potrebnega toka. V tem primeru se žica lahko pregreje, kar povečuje tveganje za požar.

Debeline žic so delno določene s konektorji, ki so priloženi posameznim gonilnikom ali motorjem, bodisi pa so določeni glede na maksimalne tokove, ki se lahko pojavijo v vezju. Dve najbolj obremenjeni povezavi sta med baterijo ter razdelilno dozo, ter med dozo in gonilniki motorjev.

Glede na specifikacije komponent in izkušnje z njimi smo izračunali, da največji tok iz baterije ne bo presegal 10 A, zato smo po Tabela I-1 izbrali primeren presek žice za ta tok, ki je 2.5 mm². Za povezavo med razdelilno dozo in gonilniki smo ocenili, da bo največja poraba toka 5 A, zato smo z uporabo podatkov iste tabele izbrali presek vodnika 1.5 mm².

Pri krmilnem delu, smo uporabili že priložene kable, oziroma smo uporabili 0,5 mm² vodnike. Za pritrjevanje krmilnih vodnikov na Arduino smo uporabili vijačni plato, ki se ga namesti na krmilnik. Vodnike smo pred vijačenjem zaščitili s tulci, ki dodatno ojačajo spoj in povečajo odpornost proti vibracijam, ki se med košnjo pojavljajo. Tam, kjer vijačnega platoja ni bilo mogoče uporabiti, smo

vodnik priključili v krmilnik, tako, da smo izdelali mehanski spoj s posebnimi kleščami, nato pa vse zalili z vročim lepilom. Celoten krmilnik smo nato na ohišje pritrtili s pomočjo 3D tiskanega ohišja.



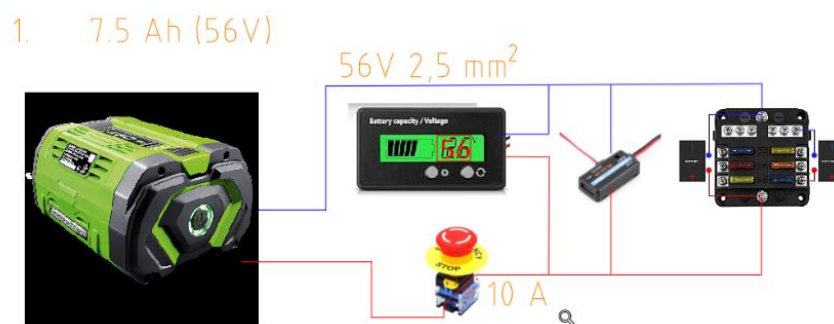
Slika 4-7: Vijačni plato in tulci [21]

4.5.2. Tokokrogi in povezava

Ožičenje stroja je izdelano tako, da imamo en primarni tokokrog in več sekundarnih. To pomeni, da se naše napajanje deli na več posameznih zank (tokokrogov), kot so na primer med baterijo in razdelilno dozo, ter med dozo in gonilniki. Taka razdelitev nam omogoča implementiranje varovalk in stikal, ki varujejo naš sistem pred preobremenitvijo.

4.5.2.1. Primarni tokokrog

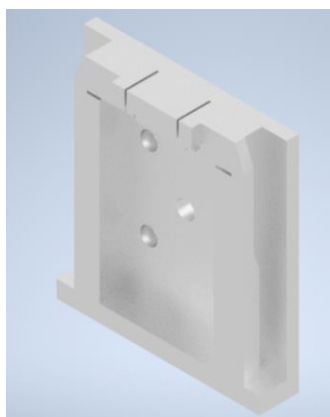
Primarni tokokrog dovaja napajanje za vse komponente v sistemu. Sestavljen je iz baterije, ki je prek močnostnega stikala povezana z razdelilno dozo. Stikalo je nameščeno kot varnostni element, saj v primeru nepravilnega delovanja predstavlja najhitrejšo možnost za izklop. Prikaz povezave primarnega sistema je viden na naslednji shemi.



Slika 4-8: Shema povezave primarnega tokokroga (Avtor sheme: Robert Vermiglio)

Napajanje pogonskega dela kosilnice je narejeno s pomočjo snemljive baterije EGO. Baterija se vsakokrat sname iz ohišja napolni s pomočjo polnilca in zopet vstavi v nosilec nameščen na kosilnici.

Tok, ki ga sistem uporablja je omejen na 10 A, zato mora biti spoj med baterijo in vodniki narejen togo in hkrati omogočati hitro menjavo baterije. V ta namen smo 3D stiskali posebno vodilo v katerega se vstavi baterijo. Baterija fiksno naseda na vodilo in omogoča zanesljiv spoj. Na naslednji sliki je prikazan nosilec baterije v programu za 3D modeliranje.



Slika 4-9: Nosilec baterije v programu za 3D modeliranje (Avtor fotografije: Erik Curk)

Ko smo nosilec natisnili in pritrdili na kosilnico, smo ugotovili, da je spoj kosilnice in baterije ustrezno tog. V reže na nosilcu smo vstavili kotnike iz nerjaveče pločevine, ki omogočajo dober kontakt med baterijo in ožičenjem primarnega kroga. Kotnike smo izdelali s pomočjo laserskega rezalnika in jih upognili v krivilnem stroju.

Ker je nerjaveča pločevina slab prevodnik električnega toka, smo izvedli še meritve padca napetosti v kontaktu pri toku 5 A. Napetost na kontaktih je malenkostno padla za 0,1 V. Spremljali smo tudi dvig temperature na stičnih točkah. Po enournem prevajanju toka 5 A so imeli kontakti temperaturo približno 30 °C.

Za uporabo nerjavečega jekla smo se odločili zaradi korozivne odpornosti in potrebne mehanske nosilnosti. V primeru, da bi zaradi vibracij prišlo do slabšega kontakta, je predvideno dodatno pritrdjevanje baterije z gumijastim trakom.

Ko je baterija napolnjena ima napetost 56 V, ko je popolnoma izpraznjena pa 49 V. Da se baterija ne bi izpraznila pod dopustno mejo, ima vgrajen BMS (Battery management system), ki baterijo izklopi pri napetosti 49 V. Za optimalno delovanje želimo baterijo izprazniti do 10 %-20 % energije. V tem primeru bi bila napetost okoli 50 V. V ta namen smo na kosilnico vgradili dva merilna sistema. Prvi je fizično nameščen LCD zaslon, ki prikazuje trenutno stanje napetosti baterije. Tako imamo vizualno kontrolo stanja baterije. Prek LCD zaslona lahko vidimo tudi, če je kosilnica vklopljena oziroma izklopljena. Druga kontrola napetosti pa deluje prek Flysky telemetrije. To je sistem prek katerega nadziramo smer vožnje, več o delovanju tega sledi v naslednjih poglavjih. Poseben senzor meri napetost v primarnem tokokrogu in podatke sporoča sprejemniku /oddajniku signalov, ki nato pošlje vrednosti daljinskemu upravljalniku, ta pa podatke prikaže na ekranu. Daljinski upravljalca omogoča tudi nastavitve zvočnega alarma, ki se sproži, ko baterija doseže minimalno nastavljeno vrednost. V našem primeru bi bila ta vrednost 50 V.



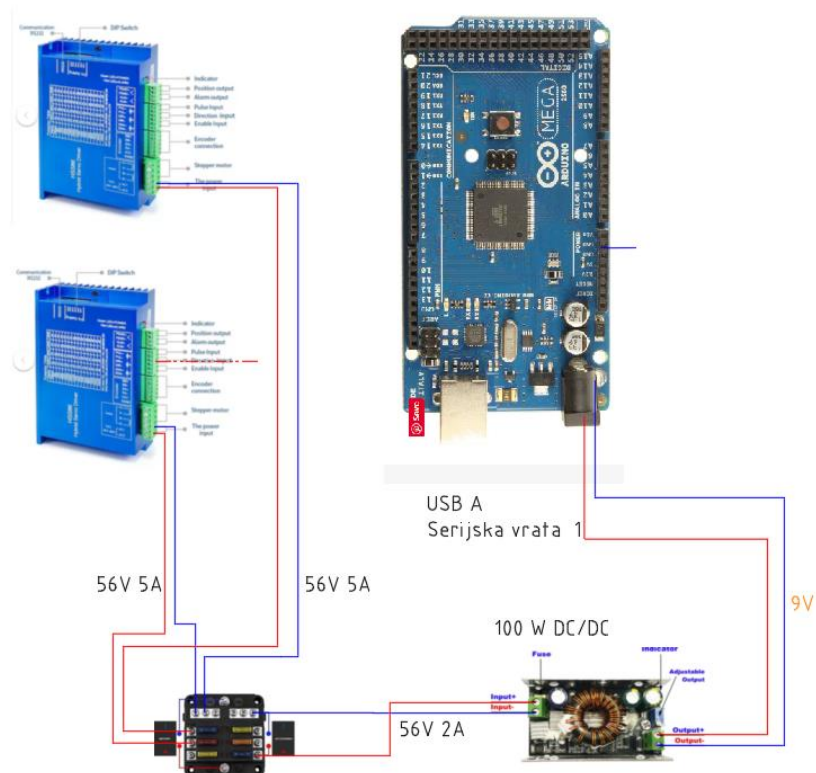
Slika 4-10: Senzorja za napetost baterije [1]

4.5.2.2. Sekundarni tokokrog

Kosilnica ima tri sekundarne kroge. Sekundarni krogi za razliko od primarnega prevajajo manjše tokove in napajajo posamezne komponente.

Prva dva tokokroga povezujeta razdelilno dozo s posameznimi gonilniki elektromotorjev. Povezava je pod napetostjo 56 V, maksimalen tok je pa omejen z varovalko 5 A. Gonilnika motorjev sprejmeta nominalni/maksimalni tok 7,2 A, varovalka bi tako izklopila delovanje pred razvitjem maksimalne moči.

Tretji sekundarni tok pa poteka iz razdelilne doze do 100 W DC/DC "step down" napajalnika, ki sprejme napetost 56 V iz baterije in jo pretvori na 9 V. Maksimalna moč, ki jo tak napajalnik prenese, pa znaša 100 W. Ta pretvornik smo potrebovali, saj naš mikrokontroler Arduino Mega sprejme napetosti le od 7 V do 12 V, idealno 9 V.



Slika 4-11: Shema povezave treh sekundarnih krogov (Avtor sheme: Robert Vermiglio)

Sama razdelilna doza omogoča še tri dodatne tokokroge. Na tak način je nadgradnja kosilnice zelo enostavna.

4.5.3. Opis in delovanje krmilnega sistema

4.5.3.1. Daljinski upravljalnik

Kosilnico krmilimo z daljinskim upravljalnikom. Za daljinsko upravljanje smo izbrali oddajnik in prejemnik Flysky FS I6, ki omogoča dvostranski prenos podatkov. Z upravljalnikom torej hkrati krmilimo kosilnico in od nje prejemo podatke o njenem delovanju.

Daljinski upravljalnik ima že prednastavljene nastavitve za krmiljenje raznih vozil, plovil, letal ... Za nas je prišla v poštev nastavitve za vozilo.



Slika 4-12: Sprejemnik Flysky [7]



Slika 4-13: Daljinski upravljalnik Flysky FS I6 [7]

Kot je razvidno iz slike ima upravljalnik veliko gumbov in lastni LCD zaslon. Če hočemo izkoristiti celotno funkcionalnost potrebujemo veliko znanja, poskušali pa bomo opisati osnovne funkcije, ki jih omogoča.

Spodnji del daljinskega upravljalnika z ekranom služi za upravljanje z nastavitvami in branje raznih podatkov, zgornji del pa služi vnašanju in spreminjanju raznih vrednosti, ki jih nato pošljemo v sprejemnik na kosilnico. Glavni dve kontroli sta krmilni palici, ki sta dva drseča upora. Če ju napajamo, lahko merimo spreminjanje napetosti in s tem dobimo analogne vrednosti, ki predstavljajo pozicijo palic. Če ta analogni signal spremenimo v digitalno obliko, spremembe napetosti zavzamejo vrednosti od 0-1023. Dve palčki, ki se premikata v smereh gor, dol, levo in desno, skupaj tvorita 4 kanale.

DALJINSKI UPRAVLJALEC



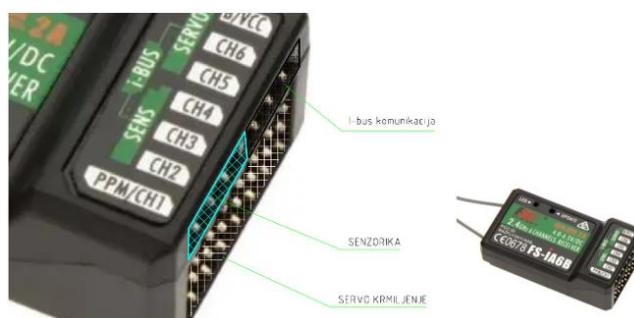
Slika 4-14: Prikaz kanalov na daljinskem upravljalniku (Avtor sheme: Robert Vermiglio)

Odločili smo se, da bo leva krmilna palica v smereh gor in dol (kanal 4) določala maksimalno hitrost kosilnice. Pomik palice v smereh levo in desno (kanal 3), pa bo omogočal obrat kosilnice okoli svoje osi. Desna krmilna palica v smereh gor in dol (kanal 2) aktivno določa hitrost gibanja kosilnice, v smereh levo in desno (kanal 1) pa določamo smer gibanja. Vsi ti kanali zasedajo digitalne vrednosti od 0 – 1023, medtem ko gumbi in stikala zasedajo vrednosti 1 ali 0.

S pomočjo radijskega signala ti podatki pridejo do sprejemnika. Radijski signal našega upravljalnika deluje na frekvenci 2,4 GHz, in sicer v frekvenčnem pasu od 2,4055 do 2,4750 GHz. Frekvenčni pas je torej širok 69,5 MHz. Da je sistem še bolj varen sta oddajnik in sprejemnik »uparjena«. To pomeni da signala ne more motiti druga naprava. Komunikacija poteka po posebnem protokolu.

Signal torej preko radijskih valov prepotuje do sprejemnika, ta pa ponuja dve možnosti nadaljnega ukrepanja. Prva možnost je, da pošlje podatke prek tako imenovane I-BUS serijske komunikacije do krmilnika, druga pa je, da neposredno krmili servo motorje. Druga možnost je bolj enostavna, zato je zelo uporabljena med modelarji pri izdelavi letal, helikopterjev, vozil,...

Na sliki spodaj so prikazani posamezni priklopi (pin-i) sprejemnika. Za nas so uporabni samo zgornji priklopi. Trije so za komunikacijo I-BUS in trije za prikllop senzorjev.

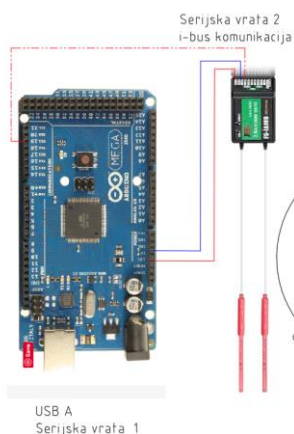


Slika 4-15: Sprejemnik ter razporeditev vhodnih in izhodnih kontaktov (pin-ov)

(Avtor sheme: Robert Vermiglio)

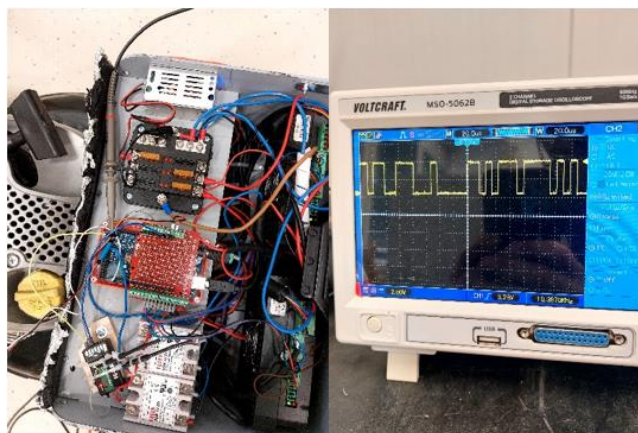
4.5.3.2. Povezava s krmilnikom

Ko smo imeli podatke, smo potrebovali še krmilnik, ki bo te podatke znal prebrati in jih poslati naprej. Tu smo naleteli na prvo težavo. Arduino UNO s katerim smo želeli krmiliti kosilnico je imel samo ena serijska vrata. Serijska vrata potrebujemo za sprejem digitalnih podatkov od sprejemnika, prav tako pa jih potrebujemo tudi za programiranje in analizo delovanja krmilnika. Torej bi pri uporabi Arduina Una morali preklapljati med vhodi, saj lahko sprejme informacije le iz ene naprave. Da bi se tej težavi izognili, smo se odločili uporabiti malce bolj zmogljiv krmilnik Arduino MEGA, ki ima štiri serijska vrata.



Slika 4-16: shema povezave krmilnika Arduino Mega in sprejemnika Flysky (Avto sheme :Robert Vermiglio)

Sprejemnik se napaja preko 5 V izhoda na Arduinu, na vhodu 19 pa sprejema komunikacijo preko I-Bus protokola. Sam protokol deluje s hitrostjo 115200 bps. Vsako sekundo se torej lahko pošlje 115200 bitov. V same podrobnosti protokola se nismo spuščali. Za zanimivost smo le izmerili signal I-BUS z osciloskopom.



Slika 4-17: Merjenje signala I-Bus med sprejemnikom in Aduinom (Avtor fotografij: David Bratina)

Druga serijska vrata potrebujemo za programiranje kosilnice in analizo njenega delovanja. V ta namen smo izdelali poseben USB priklop na ohišju kosilnice, tako, da lahko programiramo krmilnik brez da bi bilo potrebno dvigniti pokrov elektronike. USB vrata smo tudi ustrezno protiprašno zaščitili.

4.5.4. Programiranje mikrokrmilnika

Za branje, obdelavo in prevajanje podatkov iz sprejemnika smo morali napisati nov program. Pisanje programov za mikrokrmilniške plošče Arduino poteka v programskem jeziku Arduino IDE, ki ima osnove v C++ in C.

Potrebovali smo program, ki bi prebral podatke I-BUS iz sprejemnika, ter iz njih izračunal vrednosti, ki bi predstavljale navodila za delovanje ter jih nato poslal skozi digitalne izhode v gonilnika za motorja.

Kot dijaki tehniške gimnazije imamo iz programiranja le osnovno znanje, zato nam je pisanje take kode predstavljalo prevelik zalogaj. Pri tem nam je pomagal študent FMF v Ljubljani, Kristjan Vermigilio, ki nam je izdelal brezhiben program.

4.5.5. Varnostne zaščite

Ker smo želeli, da je naš sistem varen in zaščiten pred motnjami in nezgodami smo vgradili razne varnostne sisteme.

Najbolj hiter izklop, v primeru napačnega delovanja, predstavljajo varovalke. Varovalke so umeščene v vsak tokokrog, razlikujejo pa se po količini toka, ki ga spustijo skozi.

V primarnem tokokrogu smo se odločili omejiti tok na 10 A. Teoretično bi se lahko pojavil maksimalni tok 12 A ob delovanju vseh porabnikov na največji moči. Pri meritvah smo ugotovili, da je največja konica toka okoli 5 A, kar potrди pravilno izbiro komponent.

Prva dva sekundarna tokokroga smo omejili na 5 A, saj smo pri meritvah izmerili največjo porabo toka 2,5 A. Če bi tok presegel 5 A, bi to bila posledica nepravilnega delovanja. Tretji sekundarni krog, ki napaja »step down« napajalnik je varovan z 2 A varovalko, ki je ravno tako nameščena v razdelilni dozi.

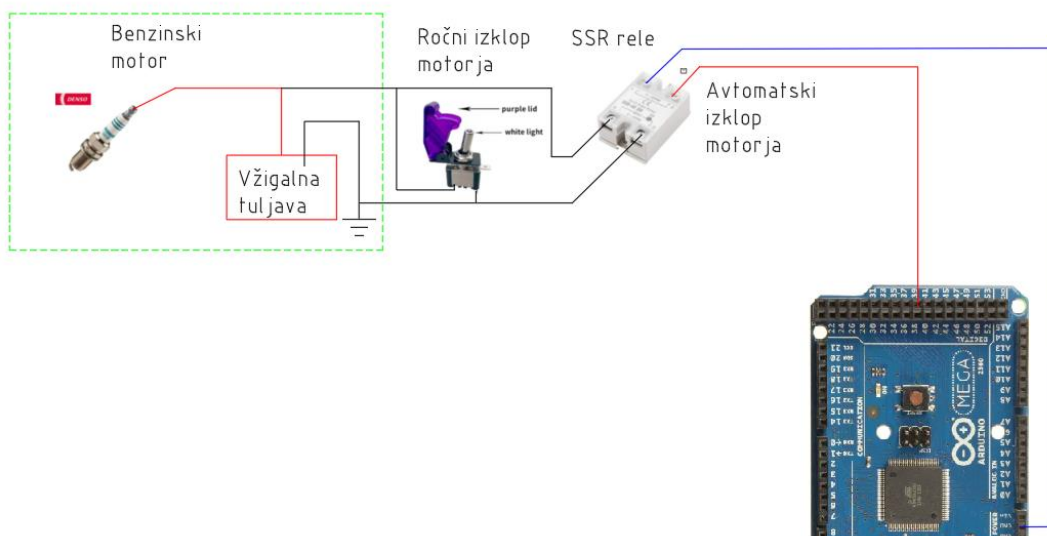


Slika 4-18: Varovalke (Avtor fotografije: Erik Curk)

Druga zaščita sta varnostni stikali nameščeni na zunanosti ohišja. Imamo varnostno stikalo, ki izklopi primarni tokokrog in varnostno stikalo za izklop kosilnice. Omogočata hiter izklop celotne naprave ob nepravilnem delovanju.

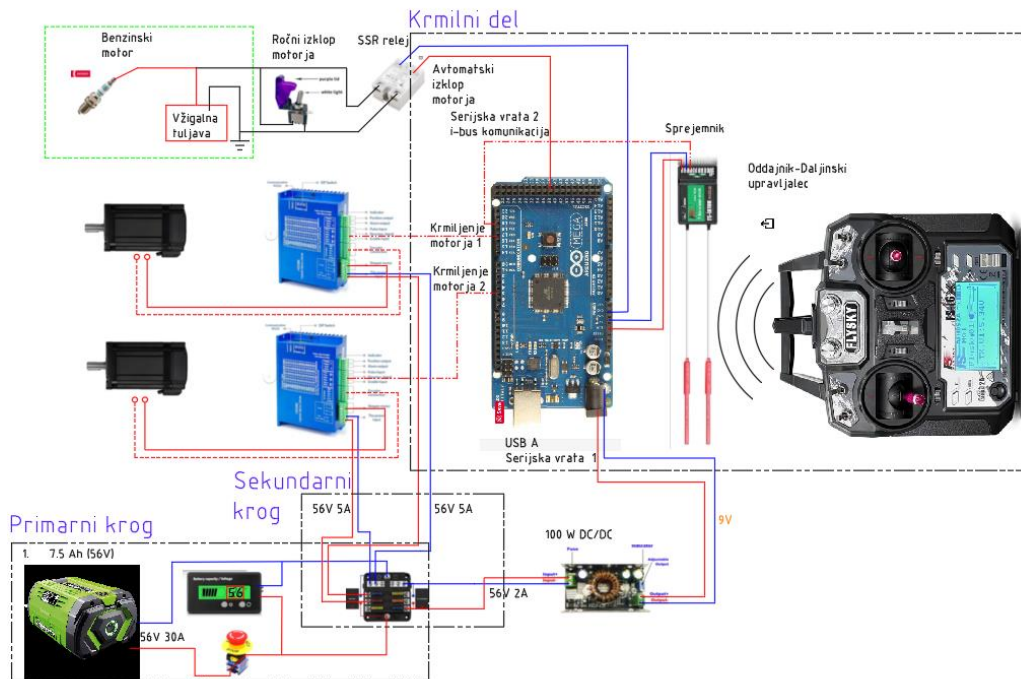
Tretja zaščita pa je narejena s pomočjo ene izmed funkcij daljinskega upravljalnika, ki pošlje v sistem določene ukaze ob izgubi signala. V tem primeru vnesemo v sprejemnik zaporedje vrednosti, ki jih bo ta poslal Arduino MEGA kontrolerju, ko je signal prekinjen. V našem primeru smo nastavili varnostne vrednosti na kanalih 1,2 in 3 na 500, na kanalu 4 pa na 0. To smo naredili z namenom, da bi se kosilnica ob prekinitvi signala ustavila.

Dodali smo tudi nov – peti kanal, ki ga na upravljalniku upravlja gumb. Signal iz tega kanala je 0 ali 1, upravlja pa se s SSR relejem. Tak rele smo izbrali da bi se izognili morebitnim motnjam, saj ima tak rele povsem ločena tokokroga. V rele sta speljani ozemljitev in napajanje za svečko motorja, kar pomeni, da bi ob preklopu releja prišla vžigalna svečka v kratak stik z ohišjem. Posledično bi iskra nehala nastajati in motor takrat ugasne. To nam omogoča, da prek funkcije, ki omogoča pošiljanje prej določenih ukazov ob izgubi povezave ugasnemo motor. Prav tako lahko ugasnemo motor prek daljinskega upravljalnika, v ta krog pa smo tudi umestili fizično stikalo, ki omogoča ročni izklop motorja.

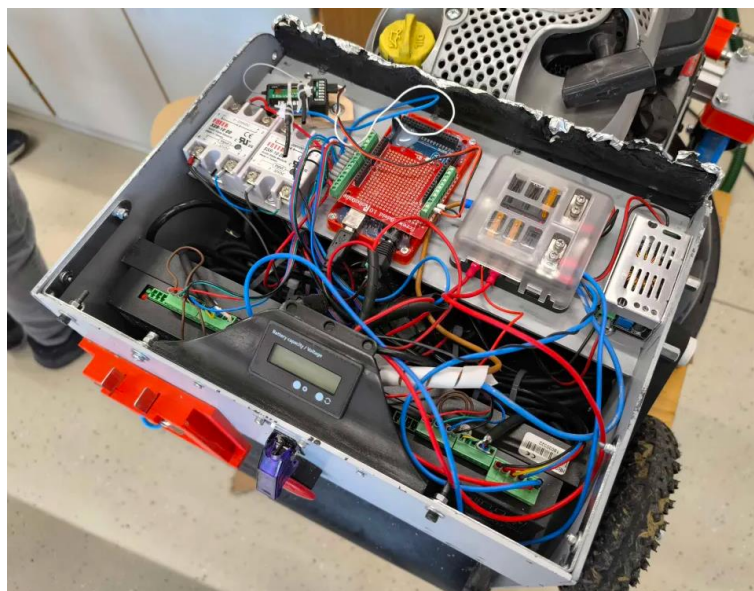


Slika 4-19: Shema povezave SSR releja za izklop motorja (Avtor sheme :Robert Vermiglio)

S tem smo imeli povezavo končano in shema celotnega električnega sistema je prikazana na naslednji sliki.



Slika 4-20: Shema povezave električnega sistema (Avtor sheme: Robert Vermiglio)



Slika 4-21: Električni sistem v kosilnici (Avtor fotografije: Erik Curk)

4.6. Razstavljanje

Ko smo končali z načrtovanjem električnega dela kosilnice, smo se posvetili izdelavi ohišja. Pred začetkom modeliranja smo morali kosilnico očistiti in razstaviti.

Izpraznili smo vse tekočine v motorju, sneli kolesa, pogonske osi in ročaje.



Slika 4-22: razstavljena kosilnica (Avtor fotografij: Erik Curk)

4.7. Izdelava ogrodja

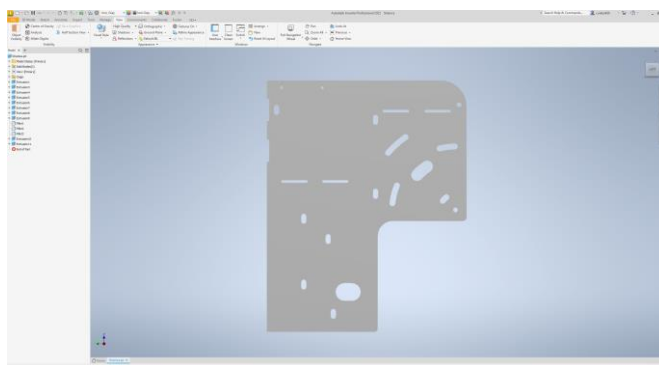
Ko smo imeli kosilnico razstavljeno, smo si lahko ogledali ohišje ter se dogovorili o poziciji motorjev in ostalih komponent.

Ko smo načrtovali izdelavo ogrodja, smo morali imeti v mislih naslednje pogoje:

- okvir mora biti čimbolj odporen na zunanje dejavnike,
- težišče mora ostati čim bolj nizko,
- notranja razporeditev mora zavzemati čim manj prostora,
- okvir mora podpirati motorje, ki imajo 5 kg,
- za prenos prek pasa mora biti tudi napenjalni sistem,
- na zunanosti mora biti baterija, stikalo za hitri izklop in USB izhod za programiranje,
- cela kosilnica mora biti 4cm od tal.

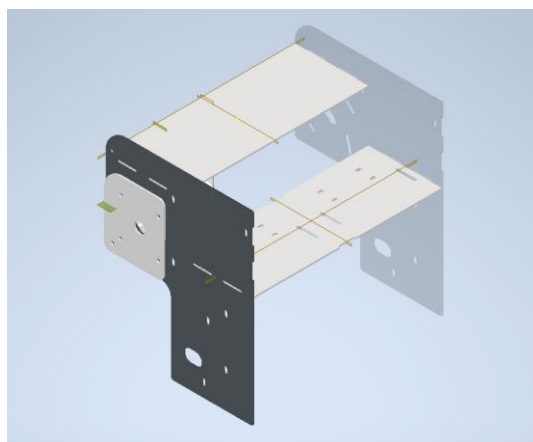
Za načrtovanje smo uporabili program Autodesk Inventor Professional 2025.

Največjo težavo nam je povzročalo merjenje posameznih dimenzij, kajti ohišje kosilnice ni bilo povsem ravno. To je otežilo natančno načrtovanje. Da bi si olajšali delo, smo iz kartona izrezali približno obliko stranske plošče, nanj pa smo nato načrtali prvo verzijo. To skico smo nato slikali in jo kot sliko vstavili v program za risanje. Tam smo obliko obrisali, določili mere in dopolnili skico z ustreznimi luknjami ter utori. Dobili smo tudi 3D model motorjev, kar nam je olajšalo izris.



Slika 4-23: Izris stranice v programu Autodesk Inventor Professional (Avtor fotografije: Erik Curk)

Ko smo imeli stranske plošče izrisane, smo naredili v programu sestav. Plošči smo postavili na pravo širino ter med niju postavili motorje. Bili smo veseli, ko smo videli, da se vse prilega v okvir z minimalnimi ostanki prostora. Kot strojniki, smo se zavedali pomembnosti toleranc, zato smo vedno prišteli te pri izrisu.



Slika 4-24: Sestav ogrodja v modelirnem programu (Avtor fotografije: Erik Curk)

Ko smo s pomočjo sestava narisali še ostale potrebne plošče, smo vse lasersko izrezali iz 3 mm MDF plošč. MDF plošče so odlična izbira za prototipne izdelke, saj so cenovno dostopne in je z njimi zelo lahko delati. Do težav pa pride, ko z njimi želimo podpirati večjo težo ali graditi kaj strukturno pomembnega, saj so po trdnosti nekje med kartonom in lesom. Plošče se zvijajo in ne prenesejo večjih obremenitev, zato je bila pritrditev motorjev z maso 5 kg nanje, začasna rešitev. Stranski plošči smo zato ojačali z navojnimi palicami, ki so delno pomagale pri podpori motorjev. Na zunanji strani smo izdelali napenjalni sistem, ki deluje tako, da celoten motor zamaknemo okoli vrtilišča, pri čemer naj bi nam v prihodnosti pomagal vijak.

Iz PLA plastike smo še natisnili držalo za baterijo ter osi za kolesa. Tako smo dobili vse elemente, potrebne za prvi preizkus povezave elementov v delujoč sistem.



Slika 4-25: ogrodje iz lasersko izrezanih MDF plošč (Avtor fotografij: David Bratina)

4.8. Izdelava sprednjega dela

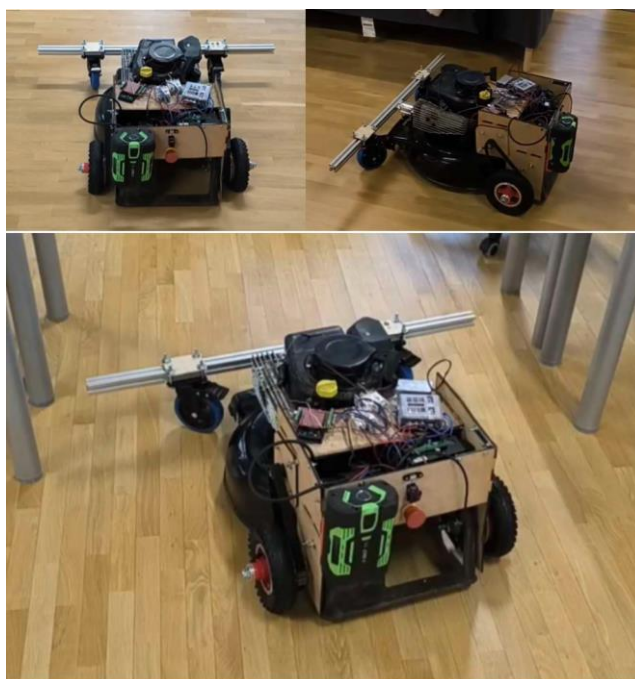
Preden smo lahko prvič vozili kosilnico po tleh, smo morali končati še sprednji del. Sprednji kolesi smo želeli imeti vrtljivi, da bi omogočili zavijanje z zadnjimi kolesi. Po skupnem premisleku smo se odločili, da za držalo sprednjih koles uporabimo aluminijast profil, ki bo z distančnikom dvignjen od kosilnice. Po izračunu višine distančnika smo se lotili njegove izdelave. Kljub temu, da se zdi, da bo izdelava preprosta, naloga ni bila lahka zaradi nepravilne oblike prednjega dela. Izdelali smo tri prototipe predenj smo prišli do končnega zadovoljivega izdelka.

4.9. Prototipna faza

Ko smo imeli prednji del končan, smo lahko povezano kosilnico prvič položili na tla in videli kako izgleda na kolesih. Marsikatera stvar je bila nedokončana, toda glavne stvari so delovale in lahko smo jo prvič peljali po prostoru.

Za nas je bil to pomemben trenutek, saj smo lahko videli, ali pri vožnji kosilnice vse deluje. Pri prvi testni vožnji smo se veliko naučili. Opazili smo, da program, ki pretvarja signale iz daljinskega upravljalnika v signale za motorje ne deluje povsem pravilno in potrebni so bili popravki. Videli smo tudi, da sprednja kolesa večkrat ovirajo gibanje kosilnice v zeleni smeri, kar je bilo tudi treba popraviti.

Kljub vsem napakam se je kosilnica premikala, kar nam je dalo novo motivacijo za nadaljevanje del na kosilnici.



Slika 4-26: Slike kosilnice iz prve vožnje (Avtor fotografij: Erik Curk)

4.10. Izdelava zadnje različice

Prototipna verzija je bila pokazatelj, da smo na pravi poti, hkrati pa smo opazili mnoge pomanjkljivosti. Skupaj smo naredili seznam stvari, ki smo jih morali izboljšati oziroma narediti, da bi kosilnica bila tudi uporabna.

Glavne naloge so bile:

- izdelati stabilno ogrodje,
- urediti napenjali sistem za pasove,
- omejiti gibanje prednjih koles,
- urediti povezavo električnega sistema v škatli,
- popraviti program za upravljanje z motorji,
- narediti obroče, ki bi šli čez zadnja kolesa za dodaten oprijem na travi,
- estetsko urediti kosilnico in skončati manjše detajle, ki so ostali,
- usposobiti motor.

4.10.1. Izdelava močnejšega ogrodja

Pri izdelavi novega ogrodja smo uporabili enako postavitev, le z nekaj manjšimi spremembami. Največja sprememba je bila uporaba drugega materiala. Izbirali smo med vezano ploščo, pločevino, aluminijem, plastiko in jeklom. Po prvih testiranjih smo lahko videli dejanske obremenitve, ki jih mora okvir prenesti. Izkušenj smo vedeli, da plastika, vezana plošča in pločevina ne zmorejo zadovoljiti naših potreb. Ostala sta nam aluminij in jeklo. Pri izbiri je igrala ključno vlogo cena, saj aluminij stane občutno več kot jeklene plošče. V bližini smo imeli tudi dostop do laserskega rezalnika za jeklene plošče pri podjetju Petrič. Za potrebnih obremenitev smo izbrali debelino plošč 3 mm.

Ko smo dobili lasersko izrezane plošče, smo jih pobarvali in sestavili s kotnimi profili.

4.10.2. Napenjalni sistem za pasove

Z uporabo jeklenih plošč smo hkrati tudi rešili problem napenjalnega sistema. Ker je bil sestav izjemno trden, smo lahko premikali motorja in s tem napenjali pasova.



Slika 4-27: prenovljen napenjalni sistem (Avtor fotografij: Erik Curk)

4.10.3. Urejanje sprednjega dela

Ker smo videli, da se obračajoča sprednja kolesa ne obnesejo, smo jih povezali z navojno palico, pri tem je bilo potrebno narediti še nekaj novih kosov. Hkrati smo profil odrezali na pravo dolžino in naredili ustrezne nosilce za kolesa.



Slika 4-28: Izboljšan sprednji del kosilnice (Avtor fotografije: Erik Curk)

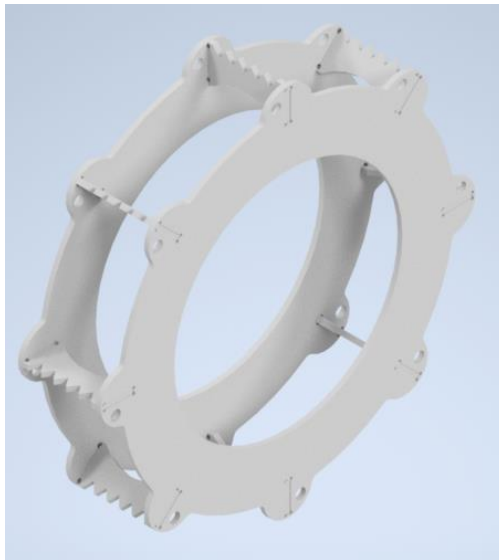
4.10.4. Povezovanje električnega sistema

Električni sistem je bil skoraj končan, le preseliti smo morali komponente v novo ogrodje in pri tem paziti na urejenost povezav. Dodali smo še izhod USB za programiranje Arduina in prikazovalnik napetosti baterije.

4.10.5. Povečanje oprijema

Naši motorji ponujajo ogromno navora, kar lahko postane na spolzki travnati površini problem, želeli pa smo tudi dodatno zvišati kosilnico.

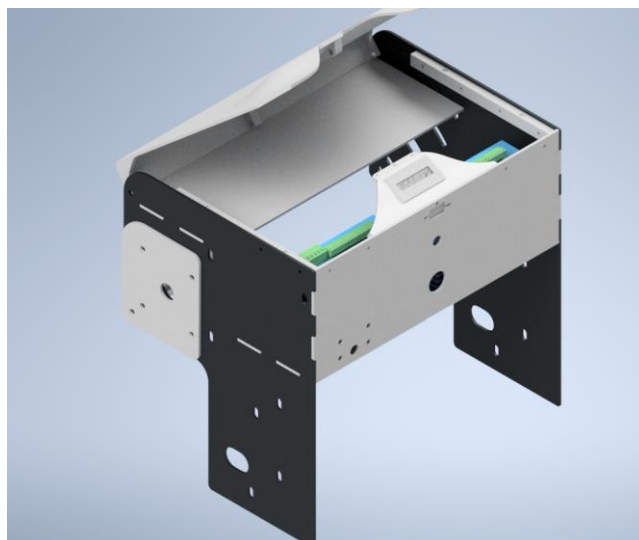
Prišli smo do rešitve, da bi na pogonska kolesa pritrčili železne diske. S tem bi povečali oprijem in dvignili višino kosilnice.



Slika 4-29: Izris diska za povečanje oprijema (Avtor fotografije: Erik Curk)

4.10.6. Dokončanje ohišja

Da bi komponente dodatno zaščitili smo naredili še pokrov in toplotno izolirali prednjo ploščo.



Slika 4-30: Izpopolnjen izris ogrodja v programu za modeliranje (Avtor fotografije: Erik Curk)



Slika 4-31: Izolirano ogrodje in dokončan pokrov (Avtor fotografije: David Bratina)

4.10.7. Usposabljanje motorja

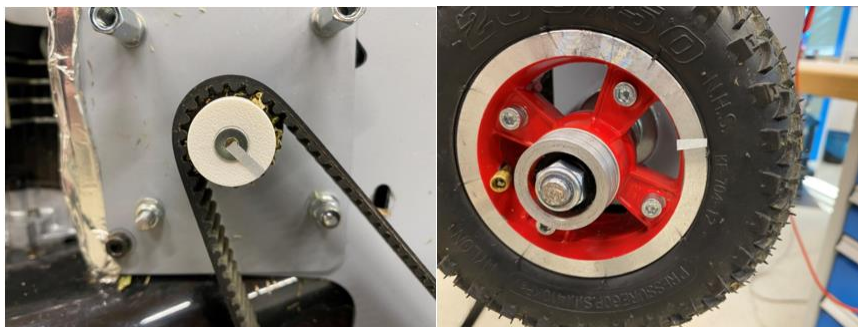
Z namenom, da bi kosilnica res lahko kosila, smo morali usposobiti bencinski motor. Popraviti smo morali nekaj poškodb, ki so nastale na motorju pred leti. Ko smo to uredili, je bila kosilnica pripravljena za testiranje.

5. Meritve

V tem poglavju bomo opisali merjenje vrtilne frekvence elektromotorja in toka skozi kosilnico pri različnem delovanju kosilnice. Pri prvi meritvi toka je kosilnica mirovala, pri naslednji pa je bila dvignjena od tal in so se kolesa vrtela v zraku. Nato smo merili porabo toka, ko je kosilnica pri vožnji po tleh sunkoma pospeševala, ter pri zadnji meritvi se je po tleh enakomerno gibala. Predstavili bomo rezultate meritev in izračunali razmerje med vrtilno frekvenco elektromotorja in vrtilno frekvenco pogonskega kolesa, moč, ki jo električni sistem potrebuje, ko kosilnica miruje ter obratovalne čase kosilnice pri različnih hitrostih gibanja kosilnice.

5.1. Merjenje vrtilne frekvence elektromotorja in pogonskega kolesa

Pri merjenju vrtilne frekvence elektromotorja v_m in pogonskega kolesa v_k , smo postavili kosilnico na podstavek, tako, da so se pogonska kolesa vrtela v zraku. V tem primeru je elektromotor vrtel samo pogonska kolesa, ne pa tudi premikal kosilnice. Posebno odsevno nalepko smo prilepili na zobnik elektromotorja ter na pogonsko kolo kosilnice.



Slika 5-1: Odsevni nalepki na kolesu in zobniku elektromotorja (Avtor fotografij: David Bratina)

Merilnik vrtilne frekvence VoltcraftDT-10L deluje tako, da oddaja svetlobni signal, ki se od odsevne nalepke na opazovanem elementu odbije, ko ta opravi pot enega obrata, merilnik pa meri čas med dvema odbojema. Merilnik nato izračuna vrtilno frekvenco glede na izmerjen čas po formuli $v = \frac{1}{t_0}$.



Slika 5-2: Merilnik vtilne frekvence Voltcrat DT-10L (Avtor fotografije: David Bratina)

Pri največji hitrosti koles kosilnice smo izmerili vrtilno frekvenco elektromotorja 484 ob/min. Po tem merjenju nas je zanimalo razmerje med vrtilno frekvenco elektromotorja in vrtilno frekvenco pogonskega kolesa.

5.2. Določitev razmerja med vrtilno frekvenco elektromotorja in vrtilno frekvenco pogonskega kolesa

Kosilnico smo zagnali in pognali kolesa kosilnice na najvišjo hitrost. Z merilnikom vrtilne frekvence smo nato izmerili frekvenco ν_k na pogonskem kolesu. Poleg merilnika Voltcraft smo uporabili tudi multimeter Peak Tech 2025A, da smo ob merjenju vrtilne frekvence izmerili še skupni tok in napetost, ki ju kosilnica porablja ob delovanju. Dobili smo meritve:

Pogonsko kolo: 134,2 ob/min ; $I=1,386$ A

Električni motor: 484,0 ob/min ; $U=56,0$ V

Pri izračunu razmerja i_1 med vrtilno frekvenco elektromotorja in vrtilno frekvenco pogonskega kolesa smo pričakovali rezultat podoben mehanskemu prestavnemu razmerju zobnikov na elektro motorju in pogonskem kolesu.

$$i_1 = \frac{\nu_m}{\nu_k} = \frac{484,0 \text{ Hz}}{134,2 \text{ Hz}} = 3,607 \quad (5.1)$$

Da bi preverili točnost prejšnjega izračuna, smo izračunali še mehansko prestavno razmerje i_2 med številom zob na zobniku kolesa n_2 in številom zob na zobniku elektromotorja n_1 . Nato smo rezultata i_1 in i_2 primerjali.

Pogonsko kolo: $n_2=72$; el. motor: $n_1=20$

$$i_2 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{72}{20} = 3,600 \quad (5.2)$$

$i_1=3,607$; Prestavno razmerje izračunano iz merjenja vrtilne frekvence.

$i_2=3,600$; Prestavno razmerje izračunano iz števila zob na vsakem zobniku.

Iz teh meritev lahko razberemo, da je razlika med rezultatoma izjemno majhna. To potrjuje, da je merilni inštrument za vrtilno frekvenco dobro umerjen in posledično so tudi naši izračuni precej natančni, brez večjih napak.

5.3. Merjenje toka skozi kosilnico ob mirovanju

To meritev smo izvedli z namenom, da bi izvedeli skupno porabo pogonskega sistema kosilnice ob mirovanju. Porabniki, ki so trošili moč baterije, so bili: mikrokrmilnik Arduino Mega, ki upravlja robotsko kosilnico, gonilniki koračnih elektromotorjev, in drugi manjši elektronski porabniki, ki so zadolženi za delovanje kosilnice. Tok smo merili neposredno iz baterije, v časovnem intervalu 30 s, da bi se prepričali, da je res konstanten. Izmerili smo tok $I_{mir.} = 0,224$ A medtem ko je napetost na bateriji znašala $U_{bat.} = 56$ V.

$$\nu_m = 0 \text{ ob/min ; } U_{bat.} = 56 \text{ V ; } I_{mir.} = 0,224 \text{ A}$$

$$P_{sistema} = U_{bat.} * I_{mir.} = 56 \text{ V} * 0,224 \text{ A} = 12,5 \text{ W} \quad (5.3)$$

Moč, ki jo kosilnica porablja ob mirovanju je torej $P_{sistema} = 12,5 \text{ W}$. Poznamo, da je kapaciteta baterije $I_{bat.} * t_{bat.} = 2,5 \text{ Ah}$ pri napetosti $U_{bat.} = 56 \text{ V}$, zato lahko izračunamo, koliko časa bi kosilnica ostala prižgana v mirovanju.

$$t = \frac{W_{baterije}}{P_{sistema}} = \frac{U_{bat.} * I_{bat.} * t_{bat.}}{P_{sistema}} = \frac{56 \text{ V} * 2,5 \text{ A} * 3600 \text{ s}}{12,5 \text{ W}} = \frac{500 \text{ kJ}}{12,5 \text{ W}} = 40000 \text{ s} = 11,2 \text{ h} \quad (5.4)$$

5.4. Merjenje toka iz baterije v električni sistem, v odvisnosti od vrtljajev elektromotorja, ko je kosilnica na stojalu

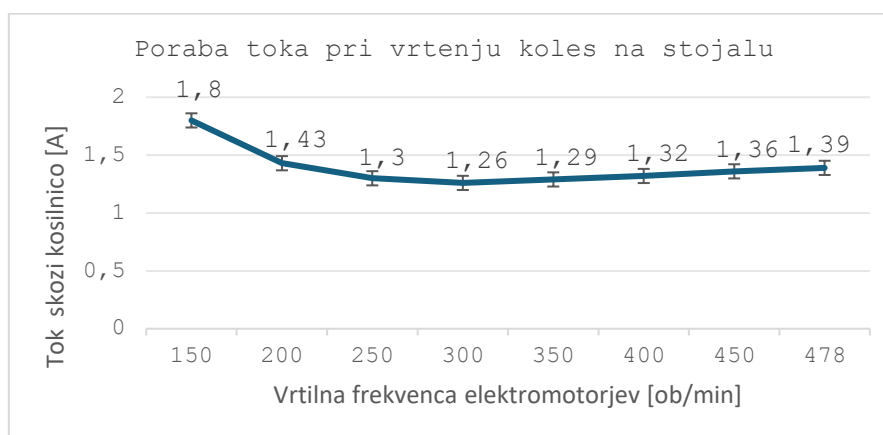
Meritve smo izvajali, ko je bila kosilnica dvignjena, kar pomeni, da so se kolesa vrtela v zraku, ne da bi premikala kosilnico. To smo naredili, ker bi ob premikanju kosilnice bilo pridobivanje in branje podatkov skoraj nemogoče. Zavedali smo se, da bo tok skozi kosilnico večji, ko bo ta na tleh, vendar menimo, da se že iz izmerjenih podatkov v teh pogojih lahko razbere različne lastnosti motorjev kot tudi celotnega sistema.

Najprej smo merili tok pri določenih obratih motorja. Obrate na motorju smo večali za korak 50 ob/min in ob tem beležili vrednosti toka.

Tabela 5-1: Poraba toka kosilnice pri različnih hitrostih vrtljajev motorja (Avtor tabele: Erik Curk)

Vrtilna frekvenca [ob/min]	Napetost baterije [V]	Poraba toka [A]
150	52,9	1,80
200	52,9	1,43
250	52,9	1,30
300	52,9	1,26
350	52,9	1,24
400	52,9	1,32
440	52,9	1,36
485	52,9	1,34

Iz teh podatkov smo nato izdelali naslednji graf.



Slika 5-3: Graf toka skozi kosilnico v odvisnosti od vrtilne frekvence motorja (Avtor grafa: David Bratina)

5.4.1. Izračun hitrosti pri najnižjem toku skozi kosilnico

Iz meritev smo prebrali, da je kosilnica najbolj varčna takrat, ko je tok najmanjši, pri vrtilni frekvenci elektromotorja v_m od 250 do 400 ob/min. To so bili precej spodbudni podatki, saj je nadaljnji izračun pokazal, da bo kosilnica porabljala najmanj moči pri hitrosti $v = 3,1$ km/h. S približno to hitrostjo tudi kosimo največ časa.

$$v_m = 300 / \text{min} ; i_2 = 3,6 \text{ (prestavno razmerje)} ; d = 0,2 \text{ m (premer kolesa)}$$

$$v = \frac{v_m}{i_2} \cdot \text{obseg kolesa} = \frac{v_m}{3,6 \cdot 60} \cdot d \cdot \pi = \frac{300}{3,6 \cdot 60 \text{ s}} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot \pi = \frac{0,87 \text{ m}}{\text{s}} \quad (5.5)$$

$$v = 3,1 \text{ km/h}$$

V tej formuli smo delili vrtilno frekvenco elektromotorja s prestavnim razmerjem 3,6 in dobili frekvenco pogonskega kolesa s premerom 0,2 m. Frekvenco pogonskega kolesa smo iz minut pretvorili v sekunde in na koncu še pomnožili z obsegom pogonskega kolesa ter dobili hitrost kosilnice.

5.4.2. Izračun obratovalnega časa baterije pri najvišjem toku skozi kosilnico

Iz grafa na Slika 5-3 lahko preberemo, da je maksimalni tok $I_{max1} = 1,85$ A. Iz merilnika vrtilne frekvence smo takrat odčitali $v_m = 150$ ob/min. Iz teh podatkov lahko pridobimo maksimalno porabljeno moč kosilnice P_{max1} in čas obratovanja t_{max1} pri taki moči.

$$I_{max1} = 1,8 \text{ A} ; v_m = 150 \text{ ob/min} ; U_{bat.} = 56 \text{ V}$$

$$P_{max1} = U_{bat.} \cdot I_{max1} = 56 \text{ V} \cdot 1,8 \text{ A} = 101 \text{ W} \quad (5.6)$$

$$t_{max} = \frac{W_{baterije}}{P_{max1}} = \frac{500 \text{ kJ}}{101 \text{ W}} = 4950 \text{ s} = 1,4 \text{ h} \quad (5.7)$$

Pri formuli za t_{max} smo upoštevali kapaciteto baterije in jo delili z maksimalno porabljeno močjo ter dobili obratovalni čas pri največji moči.

5.4.3. Izračun obratovalnega časa baterije pri največji hitrosti

Želeli smo izračunati obratovalni čas baterije t_1 pri najvišji vrtilni frekvenci elektromotorjev v_{max} in posledično tudi najvišji hitrosti košnje v_{max} . V praksi je taka hitrost previsoka za košnjo, toda želeli smo ugotoviti čas obratovanja, če kosilnico potisnemo do zgornje meje obratovanja.

$$v_{max} = 478 / \text{min} ; i_2 = 3,6 ; d = 0,2 \text{ m} ; U_{bat.} = 56 \text{ V}$$

$$v_{max} = \frac{v_{max}}{i_2} \cdot \text{obseg kolesa} = \frac{v_{max}}{3,6 \cdot 60} \cdot d \cdot \pi = \frac{478}{3,6 \cdot 60 \text{ s}} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot \pi = 1,39 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.8)$$

Iz grafa na Slika 5-3 ocenimo, da je pri največji vrtilni frekvenci $v_{max} = 478 / \text{min}$ tok skozi kosilnico $I_1 = 1,39$ A. Iz tega toka in $U_{bat.}$ lahko izračunamo moč električnega pogona P_1 pri največji vrtilni frekvenci v_{max} .

$$P_1 = I_1 \cdot U_{bat.} = 1,39 \text{ A} \cdot 56 \text{ V} = 77,8 \text{ W} \quad (5.9)$$

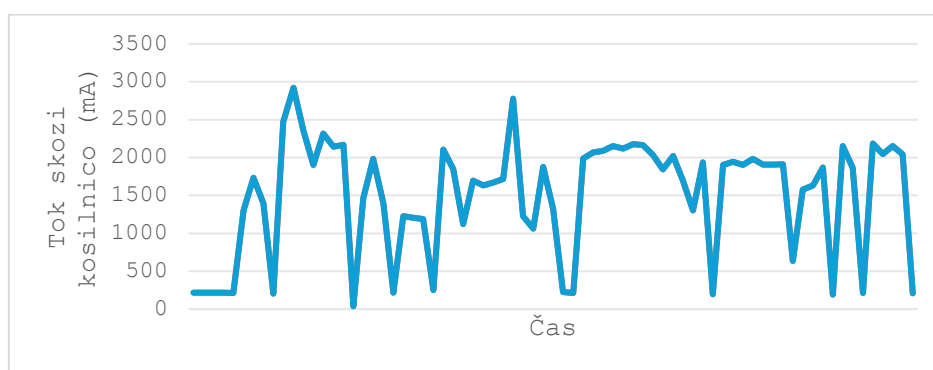
Iz P_1 in energije baterije $W_{baterije}$ lahko izračunamo obratovalni čas baterije t_1 pri teh pogojih.

$$t_1 = \frac{W_{baterije}}{P_1} = \frac{500 \text{ kJ}}{77,8 \text{ W}} = 6427 \text{ s} = 1,8 \text{ h} \quad (5.10)$$

Formula (5.10) nam pove, da bi pri maksimalni vrtilni frekvenci elektromotorja in najvišji hitrosti kosilnice, čas košnje t_1 znašal 1,8 h. Vedeli smo, da tega časa pri realnih obremenitvah na tleh ne bi dosegli, saj je kosilnica v zraku in kolesa ne premikajo nobene teže. Poleg tega nismo upoštevali sunkov toka, ki se pojavljajo pri pospeševanju, ti pa porabijo veliko moči in posledično zmanjšajo čas obratovanja.

5.5. Merjenje sunkov toka skozi kosilnico med vožnjo po tleh

Po merjenju na stojalu smo kosilnico spustili na tla, kjer smo izvajali zadnje merjenje toka. Pri tem merjenju smo želeli izmeriti največji sunek toka I_{max2} , ki gre skozi kosilnico. To smo dosegli tako, da smo kosilnico sunkovito pospeševali. Ob tem sta gonilnika koračnih elektromotorjev pošiljala velik tok v oba elektromotorja, da sta lahko pospešila celotno težo kosilnice. Meritve smo izvajali tako, da smo hodili ob kosilnici s prenosnim računalnikom, ki je bil priključen na multimeter, ki je meril skupni tok, program pa nam je izrisoval graf toka v odvisnosti od časa.



Slika 5-4: Graf toka v odvisnosti od časa pri vožnji po tleh (Avtor grafa: David Bratina)

Iz grafa odčitamo največji izmerjeni tok $I_{max2} = 2,92 \text{ A}$. Iz tega toka in napetosti baterije $U_{bat.} = 56 \text{ V}$ lahko izračunamo največjo moč P_{max2} , ki jo kosilnica porabi med premikanjem.

$$P_{max2} = U_{bat.} * I_{max2} = 56 \text{ V} * 2,92 \text{ A} = 163,5 \text{ W} \quad (5.11)$$

Od te moči odštejemo moč kosilnice, ko se kolesa ne vrtijo $P_{sistema}$ in dobimo vrednost $P_{max.el.}$ ki predstavlja moč, ki jo elektromotorja porabljata med največjim pospeševanjem kosilnice.

$$P_{max.el.} = P_{max2} - P_{sistema} = 163,5 \text{ W} - 12,5 \text{ W} = 151,0 \text{ W} \quad (5.12)$$

5.6. Merjenje toka iz baterije v električni sistem, v odvisnosti od hitrosti kosilnice med vožnjo po tleh

Pri zadnjem delu merjenj in izračunov smo merili tok skozi kosilnico pri različnih hitrostih potovanja. Kosilnico smo vozili po tleh, kjer je kosilnica prevozila razdaljo 5 m s konstanto hitrostjo. Ob tem smo merili čas potovanja in povprečen tok iz baterije v električni sistem. Naslednji izračun velja za primer, ko je bila hitrost gibanja kosilnice najmanjša.

$$v_1 = \frac{s}{t} = \frac{5 \text{ m}}{21,2 \text{ s}} = 0,24 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.13)$$

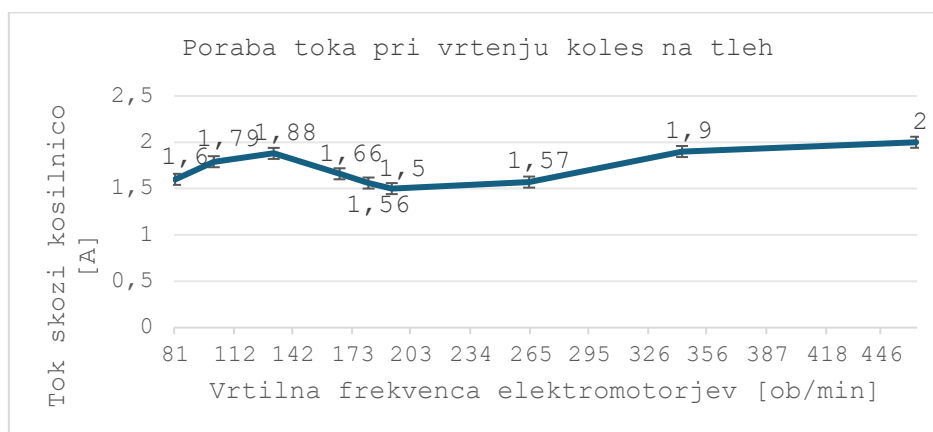
$$v_{m1} = \frac{v_1 * i_2 * 60}{\pi * d_k} = \frac{0,24 \text{ m} * 3,6 * 60}{\pi * 0,2 \text{ m min}} = 83 \frac{\text{ob}}{\text{min}} \quad (5.14)$$

Najprej smo iz poti s in časa t izračunali hitrost premikanja kosilnice v_1 . Iz dobljene hitrosti v_1 , prestavnega razmerja jermenskega prenosa i_2 ter iz premera pogonskega kolesa kosilnice d_k smo izračunali vrtilno frekvenco elektromotorjev v_{m1} .

Meritve in ustrezni rezultati izračunov so zapisani v Tabela 5-2. Slika 5-5 pa prikazuje graf porabe toka v odvisnosti od vrtljajev motorja.

Tabela 5-2: Poraba toka kosilnice pri različnih hitrostih vrtljajev motorja, ko se kosilnica premika po tleh z ustrezno hitrostjo (Avtor tabele: David Bratina)

Čas gibanja na poti 5m [s]	Poraba toka [A]	Hitrost [m/s]	Vrtilna frekvenca [ob/min]
21,2	1,60	0,24	83
17	1,79	0,29	101
13	1,88	0,38	132
10,3	1,66	0,49	167
9,5	1,56	0,53	181
8,9	1,50	0,56	193
6,5	1,57	0,77	265
4,9	1,90	1,02	355
3,7	2,0	1,35	470



Slika 5-5: Graf toka skozi kosilnico v odvisnosti od vrtilne frekvence motorja, ko se kosilnica premika po tleh (Avtor grafa: David Bratina)

Iz podatkov v Tabela 5-2 smo razbrali, da je najmanjša poraba toka (1,5 A do 1,6 A) pri hitrosti od 0,5 m/s do približno 0,8 m/s. Iz tega sklepamo, da kosilnica porabi najmanj moči in lahko pokosi največjo površino, ko se giblje po tleh z največjo hitrostjo, ki znaša približno 0,8 m/s kar je 2,9 km/h. Podoben rezultat smo dobili tudi pri meritvi, ko je bila kosilnica na stojalu. Takrat je znašala hitrost pri najnižjem toku (Tabela 5-1) 3,1 km/h.

V primeru, da se kosilnica giblje po tleh s hitrostjo 0,8 m/s in je poraba toka 1,6 A, izračunamo obratovalni čas baterije 1,6 h. Če upoštevamo, da bi kosilnica pospeševala okoli 10 % do 20 %

obratovalnega časa in bi bila poraba toka okoli 3,0 A (Slika 5-4), bi dobili najkrajši obratovalni čas baterije 1,3 h.

Kosilnico smo pri košnji tudi dejansko testirali in izkazalo se je, da je teoretičen izračun obratovalnega časa 1,3 h skoraj enak dejanskemu času delovanja kosilnice. Sklepamo, da smo v našem izračunu pravilno upoštevali hitrost kosilnice pri kateri normalno kosimo, ko elektromotorji potiskajo celotno težo kosilnice, kot tudi pospeševanje kosilnice, ko je vrednost toka skoraj dvakratna glede na enakomerno gibanje kosilnice.

6. Stroškovni izračun

V spodnji Tabela 6-1 so posamezni elementi, ki smo jih morali kupiti pri izdelavi kosilnice na daljinsko upravljanje. Celoten strošek kupljenih elementov znaša 1.010,93 EUR.

Ko vrednost naše kosilnice primerjamo z ostalimi podobnimi na trgu opazimo, da je kosilnic s podobnimi funkcijami zelo malo, kar otežuje primerjavo. Na trgu je dosti manjših, manj zmogljivih kosilnic z avtonomnim delovanjem, ki z našo niso primerljive. Kosilnice na daljinsko upravljanje so po večini narejene za profesionalno rabo, kar pomeni, da so večje in težje za upravljanje, hkrati pa so tudi njihove cene višje. Na trgu smo dobili le nekaj primerljivih kosilnic, te pa vse stanejo čez 2.200 EUR. V primerjavi s temi je naša kosilnica bolj ekonomična in ohranja vse zmogljivosti, ki jih druge kosilnice ponujajo, tudi če bi v vrednosti upoštevali delo, ki bi ga opravili ob večjih serijah izdelave.

Tabela 6-1: Tabela stroškovnega izračuna po elementih (Avtor tabele: Erik Curk)

Artikel / element	Kos	Cena EUR	Vrednost EUR
Kosilnica Murray	1	150,00	150,00
Koračna motorja Nema34 12Nm s povratno zanko in gonilnikoma	1	223,50	223,50
Arduino MEGA	1	51,90	51,90
Baterija Ego 56V 2.5Ah	1	139,00	139,00
Polnilec baterije Ego	1	69,00	69,00
Varovalke ploščate za avto	3	0,15	0,45
Škatla za varovalke	1	18,45	18,45
100W DC/DC "step down" napajalnik	1	14,71	14,71
Merilec napetosti z displayom in alarmom	1	9,21	9,21
BAOLIHUI 125 mm vrtljiva kolesa	2	10,25	20,50
Flysky FS-i6X s sprejemnikom	1	58,02	58,02
FOTEK SSR-10dd relay	2	4,15	8,30
Varnostno stikalo 10A	1	9,20	9,20
Prekucno stikalo z varnostnim pokrovom	1	1,15	1,15
Vijačni plato za Arduino MEGA	1	2,42	2,42
Zobati jermne HTD 620-5M	2	4,08	8,16

Pogonska kolesa	2	31,78	63,56
Plastika za tiskanje	1	42,00	42,00
Razne žice	1	3,00	3,00
Navojne palice	3	1,80	5,40
Razni vijaki in matice	1	8,00	8,00
Aluminijst profil 25x25	1	3,00	3,00
Zaščitna folija proti toplotnem sevanju	1	2,00	2,00
Lasersko izrezane plošče okvirja	1	80,00	80,00
Postružene osi koles	2	10,00	20,00
Skupna vrednost:			1.010,93

7. Ugotovitve

Hipoteza 1: Obratovalni čas kosilnice bo vsaj 1h.

Da, hipotezo smo potrdili. Pri najbolj realnih pogojih obratovanja kosilnice je izračun obratovalnega časa baterije s kapaciteto 2,5 Ah, dal vrednost 1,3 ure.

Hipoteza 2: Uporaba koračnih motorjev s povratno zanko za pogon kosilnice je bolj učinkovita, kot uporaba koračnih motorjev brez povratne zanke.

Da, hipotezo smo potrdili. Povprečna poraba toka v celotni kosilnici med delovanjem znaša 1,5 A. Če bi uporabljali motorje brez povratne zanke, bi bili primorani določiti stalen tok na gonilnikih motorjev, ki bi v idealnem primeru bil enak maksimalni porabi toka naše kosilnice, to je okoli 3 A.

Hipoteza 3: Daljinsko vodeno kosilnico lahko uporabljamo kot samovozno kosilnico.

Ne, hipotezo smo ovrgli. Ob določitvi stalne poti, ki bi naredila kosilnico samovozno, lahko pride v nekaterih primerih do zdrsa pogonskega kolesa. Stalno nadziranje, poznavanje in natančno določanje pozicije koračnih motorjev in s tem pozicije pogonskih koles, so zaradi možnosti zdrsa nemogoči.

Hipoteza 4: Elektromotor v naši kosilnici bo proizvedel dovolj navora pri maksimalni obremenitvi kosilnice.

Da, hipotezo smo potrdili. Gonilnik motorja v našem primeru porablja največ 1,5 A. Lahko pa bi porabljal do 7,2 A. Poraba toka je sorazmerna z navorom, ki ga elektro motor potrebuje za pogon.

Hipoteza 5: Kosilnica bo pri nižjih hitrostih premikanja dlje časa obratovala.

Ne, hipotezo smo ovrgli. Meritev toka pri različnih vrtilnih frekvencah motorjev nam je pokazala, da je poraba toka najmanjša pri višji vrtilni frekvenci (270 ob/min pri vožnji po tleh). Pri višji vrtilni frekvenci motorjev je tudi hitrost košnje višja. Manjša poraba toka pri višji hitrosti omogoči daljši obratovalni čas baterije.

8. Zaključek

Med izdelavo raziskovalne naloge smo se veliko naučili. Predvsem smo bolje spoznali delovanje robotskih kosilnic in način, kako lahko izdelamo svojo lastno robotsko kosilnico. Za njeno izdelavo je bilo potrebno široko strokovno znanje, od mehanike in elektrotehnike do splošne fizike. Skozi proces sestavljanja in umeščanja posameznih delov v kosilnico ter z meritvami vrtilne frekvence elektromotorjev in toka smo pridobili poglobljen vpogled v delovanje in zmogljivost izdelane robotske kosilnice.

Ugotovili smo, da je bil izbrani tip koračnih motorjev primeren za pogon naše robotske kosilnice, saj omogoča, da baterija deluje dlje kot eno uro. Glavni razlog za to je uporaba koračnih motorjev s povratno zanko, ki omogočajo delovanje pri nižjem toku. Poleg tega smo spoznali, da kosilnica ne more biti popolnoma samovozna, saj lahko pri vodenju pride do zdrsov, kar povzroči napačno določanje njene pozicije v sistemu. Nazadnje smo ugotovili, da je obratovalni čas baterije daljši pri višji vrtilni frekvenci elektromotorjev kot pri nižji. Iz te ugotovitve sklepamo, da se mora kosilnica gibati z dovolj visoko hitrostjo, ker s premajhno hitrostjo manj pokosimo in baterija se prej izprazni.

Delovanje naše kosilnice bi lahko še izboljšali. Nadgradili bi jo lahko s sistemom, podobnim RTK sistemu, in jo tako spremenili v samovozno kosilnico. Ena od trenutnih pomanjkljivosti je nezmožnost komunikacije med programom v sistemu kosilnice in EGO baterijo. To bi bilo mogoče rešiti z uporabo dveh dodatnih pinov na bateriji, ki bi omogočala prenos informacij med kosilnico in baterijo. Pomanjkljivost našega merjenja je bila, da je moral biti računalnik z merilnikom ves čas priklopljen na kosilnico, kar nam ni omogočalo izvajanja meritev zunaj laboratorija. To težavo bi lahko odpravili z namestitvijo merilnika Go Direct na kosilnico, ki bi ga brezžično povezali z računalnikom. Tako bi lahko meritve opravljali tudi med delovanjem kosilnice v naravi.

Zaključujemo z željo, da bi kosilnica dobro obratovala in služila svojemu namenu. Veselilo bi nas, če bi ideja izdelave robotske kosilnice pritegnila zanimanje mlajših generacij. Upamo, da bi jim bila naša raziskovalna naloga v pomoč pri izdelavi in izboljšavi njihovih lastnih robotskih kosilnic.

9. Literatura in viri

- [1]: Amazon: https://www.amazon.de/Battery-Capacity-Voltage-Indicator-Monitors/dp/B08L8RDW17/ref=sr_1_3_sspa?crid=357XCJ77ZM3PE&dib=eyJ2ljojMSJ9.LUMlslIGSD30MGvS-HgcwDwtMvuNEImleOT89ErHFucFX3RHQcMzapluVS7lgcHnhOHLhdFk7l5Zc8wtRdQ18NfRey2ATDeDVAb8s7JwbR6ulsdZ891lBgURUxnTxnHqMHtdk6MurQm-vq7MWdiPtNZHCC59_9yeYOUoEnZK9zAY_w8VvLdozoytAiiX8AaX10NgbwWSC1JXySMv-lhXClt8wDHkCk8qpJVmjL0nc8jILNmJi0FnjNRQBoiHk5stTW-_jbNMD76qQwqGQedZYiuKZBso93XY_HrwNkw_7VU.kEQ6ERK04WPSvnLTnaGeNt3BlcWLXOndC4cFl_li97E&dib_tag=se&keywords=battery%2Bdisply%2Bvopltage%2B12v&qid=1742159028&spr.efix=battery%2Bdisply%2Bvopltage%2B12v%2Caps%2C86&sr=8-3-spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcf9hdGY&th=1
- [2]: Conrad Arduino UNO Navodila: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/sl/000191789ML03/navodila-za-uporabo-191789-arduino-a000073-plosca-uno-rev3-smd-core-atmega328.pdf>
- [3]: Conrad Arduino Guide: <https://www.conrad.si/sl/guides/razvojni-kompleti/arduino.html>
- [4]: Dreametech: <https://www.dreametech.com/pages/dreame-ces-2024>
- [5]: EE Power Stepper Motors: <https://eepower.com/technical-articles/stepper-motors-part-2-motor-drive-circuit-types-and-operation/#>
- [6]: Egopower <https://www.egopowerplus-as.com/izdelek/ego-power-2-5ah-baterija/>
- [7]: Flysky: <https://www.flysky-cn.com/fsi6x>
- [8]: GNS Components News: <https://si.gnscomponent.com/news/what-is-an-rtk-what-is-the-difference-between-26038778.html> (16. julij 2019)
- [9]: Husqvarna EPOS: <https://www.husqvarna.com/si/izvedite-vec/husqvarna-epos/>
- [10]: J. STROPNIK. Dinamika. Ljubljana. TZS. 1998
- [11]: J. STROPNIK. Zbirka formul, veličin in preglednic iz mehanike. Ljubljana. Državni izpitni center. 2015
- [12]: Navimow Blog. <https://navimow.segway.com/en-si/blogs/navimow-blog/rtk-technology-the-core-of-accurate-positioning-for-robot-mowers-but-is-that-enough> (18. januar 2025)
- [13]: NKX Motor: <https://www.nkxmotor.si/shop/koracni-motorji/nema34/nema-34-bipolarni-koracni-motor-12nm/>
- [14]: Peaktech: <https://www.peaktech.de/uk/PeakTech-P-2025-A-True-RMS-digital-multimeter-6.000-Counts-1000V-AC-DC-10A-AC-DC-USB/P-2025-A>
- [15]: Robolever Guide: <https://robolever.com/creating-off-limits-islands-for-your-robotic-mower-a-visual-guide/>

- [16]: Simkab: <https://www.simkab.com/l/pg-to-metric-and-awg-to-mm-conversions/>
- [17]: Soprolec NEMA 34 Motor: <https://www.soprolec.com/en/shop/m86hs120e-86hs120e-nema-34-12-nm-stepper-motor-2316#attr=435,444,440,437,445,436,442,443,439,438,1782,441>
- [18]: A. PIŠEK: Navigacijski model robotske kosilnice: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=81789&lang=slv>
- [19]: Wikimedia RoboFlail: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RoboFlail_remote-controlled_mower.jpg
- [20]: Z. ŽALAR. Elektrotehnika: učbenik za srednje poklicno, poklicno-tehniško, srednje strokovno in gimnazijsko izobraževanje. Ljubljana. Bookstore.si. 2022
- [21]: 3D Svet Arduino MEGA: <https://www.3dsvet.eu/izdelek/arduino-mega-2560-type-b-usb-ch340/>
- [22]: 3D Svet Arduino UNO: <https://www.conrad.si/sl/guides/razvojni-kompleti/arduino.html>

Dodatek I: Tabela toka v odvisnosti od preseka vodnika

Tabela I-1: Tabela toka, ki ga prenese vodnik glede na njegov presek [16]

Table 1: American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz