

# Izrada makete vozila na električni pogon s regenerativnim kočenjem

---

**Markov, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:932444>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Antonio Markov**

Zagreb, godina 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. Ing.

Studenti:

Antonio Markov

Zagreb, godina 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija uz korištenje navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing. na pomoći te mentorstu pri izradi ovog rada.

Antonio Markov



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antonio Markov**

JMBAG: **0035233727**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada makete vozila na električni pogonom s regenerativnim kočenjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Assembly of a model vehicle with electrical propulsion and regenerative braking capability**

Opis zadatka:

Istosmjerni (DC) elektromotori s uzbudnim permanentnim magnetima na statoru imaju široku primjenu u pogonima malih snaga (snage manje od 200 W) te su posebno prikladni za razvoj i testiranje elektromotornih pogona malih vozila zbog jednostavnosti upravljanja naponom armature putem pulsno-širinske modulacije (engl. PWM) te razmjerno velikog otpora kruga armature zbog čega ne može doći do značajnih strujnih preopterećenja pri pokretanju iz mirovanja, odnosno kod regenerativnog kočenja. Stoga bi istosmjerni elektromotorni pogon male snage s regenerativnim kočenjem bio prikladan za dizajn makete vozila na električni pogon s mogućnošću rekuperacije električne energije u bateriju tijekom kočenja. U radu je potrebno napraviti sljedeće:

1. Dati glavne značajke istosmjernog elektromotora s permanentnim magnetima i opisati upravljanje brzinom vrtnje motora za slučaj upravljanja naponom primjenom PWM-a.
2. Izvesti i opisati dinamički model istosmjernog elektromotora pogodan za dizajn sustava upravljanja električkom snagom tijekom regenerativnog kočenja.
3. Odabrati odgovarajuće komponente elektromotornog pogona (elektromotore, senzore, energetske pretvarače i mikrokontrolersku upravljačku jedinicu) te dizajnirati i izraditi sustav električne propulzije makete cestovnog vozila.
4. Izraditi i eksperimentalno ispitati sustav upravljanja elektromotornog pogona makete vozila u uvjetima normalne vožnje i pri regenerativnom kočenju.
5. Dati odgovarajuće zaključke rada i predložiti pravce budućeg razvoja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danijel Pavković

*Danijel Pavković*

Predsjednik Povjerenstva:

*Damir Godec*  
Prof. dr. sc. Damir Godec

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVE ISTOSMJERNOG MOTORA .....	2
3. MODELIRANJE DC MOTORA U MATLAB-U .....	7
3.1. Osnove regenerativnog kočenja.....	7
3.2. Matematička podloga simulacije DC motora .....	8
3.3. Određivanje momenta tereta .....	11
3.4. Odabir istosmjernih motora .....	13
3.5. Rezultati simulacije.....	16
4. Odabir komponenti .....	17
4.1. L298N Motor Driver.....	17
4.2. Turnigy 1500mAh 3S baterija.....	19
4.3. Mikrokontroler Dasduino Core.....	20
4.4. INA219 senzor struje i napona .....	21
4.5. NRF24L01+ radio komunikacijski modul.....	22
4.6. 500mAh Li-ion baterija.....	23
5. IZRADA MAKETE .....	24
5.1. Izrada vozila.....	24
5.2. Izrada daljinskog upravljača .....	29
5.3. Programiranje makete i daljinskog upravljača.....	31
6. TESTIRANJE MAKETE VOZILA.....	32
7. ZAKLJUČAK .....	38
LITERATURA.....	39
PRILOG .....	40

## POPIS SLIKA

Slika 1 Faradayev zakon na zavojnici koja rotira u magnetskom polju.....	2
Slika 2 Prikaz Lorentzove sile .....	3
Slika 3 Pojednostavljen prikaz elektromotora sa permanentnim magnetima .....	4
Slika 4 Komutator .....	4
Slika 5 Ovisnost napona na motoru o popunjenosti PWM signala.....	5
Slika 6 Shema H.mosta .....	6
Slika 7 Graf mehaničke karakteristike motora.....	6
Slika 8 mehanička karakteristika istosmjernog motora pri regenerativnom kočenju .....	7
Slika 9 Sustav istosmjernog motora s nezavisnom konstantnom uzбудom .....	8
Slika 10 Blok dijagram SIMULINK modela .....	10
Slika 11 SIMULINK model DC motora .....	10
Slika 12 SIMULINK model armature DC motora.....	11
Slika 13 SIMULINK model energetskog pretvarača "choppera" .....	11
Slika 14 Model sila na kotaču.....	12
Slika 15 Pololu 12V CB Metal Gearmotor .....	13
Slika 16 Karakteristika Pololu 12V CB motora.....	14
Slika 17 Graf rezultata SIMULINK simulacije .....	16
Slika 18 H-most L298N drivera.....	17
Slika 19 L298N motor driver.....	18
Slika 20 Turnigy 3S 1500mAh baterija .....	19
Slika 21 Dasduino Core mikrokontroler .....	20
Slika 22 Pinout Dasduino Core mikrokontrolera.....	20
Slika 23 INA219 senzor struje i napona .....	21
Slika 24 Princip rada INA219 senzora.....	22
Slika 25 NRF24L01+ modul.....	22
Slika 26 500 mAh Li-ion baterija .....	23
Slika 27 Shema spoja komponenti vozila .....	24
Slika 28 Schematic spoja komponenti na vozilu .....	25
Slika 29 Ender 3 S1 3D printer .....	25
Slika 30 Šasija vozila .....	26
Slika 31 Držać poklopca .....	26
Slika 32 Poklopac vozila.....	27
Slika 33 Držać baterije.....	27
Slika 34 Osovina prednjeg kotača.....	28
Slika 35 Spoj makete vozila.....	28
Slika 36 Sklopljena maketa vozila .....	29
Slika 37 Shema spajanja komponenti daljinskog upravljača.....	29
Slika 38 Shema spajanja komponenti na daljinskom upravljaču.....	30
Slika 39 Tijelo daljinskog upravljača.....	30
Slika 40 Izrađen daljinski upravljač.....	31
Slika 41 Graf izmjenjenih vrijednosti INA219 senzora u realnom vremenu.....	32
Slika 42 Graf struje ovisnosti o popunjenosti PWM signala .....	33
Slika 43 Graf ovisnosti struje sustava o popunjenosti PWM-a (MATLAB) .....	35
Slika 44 Graf struje ovisno o vremenu pri kretanju .....	36
Slika 45 Graf struje ovisno o vremenu pri kočenju .....	37

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Karakteristikei Pololu 12V CB Metal Gearmotor-a pri 12V .....	13
Tablica 2 Upravljanje L298N motor driverom .....	18
Tablica 3 Karakteristike L298N motor drivera .....	18
Tablica 4 Karakteristike Turnigy 1500mAh 3S baterije .....	19
Tablica 6 Karakteristike Dasduino Core-a.....	21
Tablica 7 Karakteristike INA219 senzora.....	21
Tablica 8 Karakteristike NRF24L01 modula.....	23



## POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
$\Phi$	Wb	Magnetski tok
$B$	T	Magnetska indukcija
$A$	m <sup>2</sup>	Površina
$\omega$	rad/s	Kutna brzina
$e$	V	Inducirani napon
$F$	N	Sila
$l$	m	Dužina
$I$	A	Jakost električne struje
$E$	V	Elektromotora sila
$M$	Nm	Moment
$I_b$	A	Struja baterije
$\Delta V$	V	Razlika napona $E$ i referentnog napona
$V_A$	V	Napon armature
$R_A$	$\Omega$	Otpor armature
$L_A$	H	Induktivitet armature
$I_A$	A	Struja armature
$J$	kgm <sup>2</sup>	Moment tromosti
$M_t$	Nm	Moment tereta
$F_K$	N	Sila podloge na kotač
$F_{tr}$	N	Sila trenja
$\mu$		Faktor trenja
$m_v$	kg	Masa vozila
$d_k$	m	Promjer kotača
$n$	okr/min	Broj okretaja u minuti
$P$	W	Snaga
$K_m$	Nm/A	Konstanta momenta

$K_E$	Vs/rad	Konstanta elektromotorne sile
$K_a$	A/V	Konstanta armature
$T_a$	s	Vremenska konstanta armature
$K_l$		Konstanta prijenosnog omjera
$f_{ch}$	Hz	Frekvencija choppera
$K_{ch}$	V/V	Konstanta choppera
$T_{ch}$	s	Vremenska konstanta chooppera
$\omega_0$	rad/s	Početna kutna brzina
$U_{ch0}$	V	Početni napon choppera
$U_r$	V	Referentni napon
$I_{a0}$	A	Početna struja armature
$C$	mAh	Kapacitet baterije
$m_b$	kg	Masa baterije
$I_{max1}$	A	Maksimalna struja pri pokretanju vozila
$T_E$	s	Elektromehanička vremenska konstanta
$\zeta$		Prigušenje
$\Omega_n$	rad/s	Vlastita frekvencija
$J_k$	kgm <sup>2</sup>	Moment tromosti kotača
$J_{ek}$	kgm <sup>2</sup>	Ekvivalentan moment tromosti

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisana je izrada makete vozila na električni pogon s regenerativnim kočenjem. Električne komponente makete odabrane su prema dinamičkom modelu odabranih elektromotora napravljenom u MATLAB-u. Odabrana su dva istosmjerna elektromotora male snage sa reduktorima prijenosnog omjera 25:1. Zatim je prikazan način na koji su odabrane elektroničke komponente spojene, te opisana metoda kojom će se mjeriti struja, napon i snaga u sustavu. Konstrukcija vozila izrađena je aditivnom metodom uz pomoć 3D printera. Maketa se kontrolira preko daljinskog upravljača putem radio komunikacije. Nakon njene izrade razvijeni su programi temeljeni na Arduino platformi pomoću kojih je cijeli sustav upravljan. Naposljetku maketa je ispitana za vršna opterećenja sustava pri pokretanju i kočenju.

Ključne riječi: maketa vozila, električni pogon, istosmjerni pogon s permanentnim magnetima, regenerativno kočenje.

## **SUMMARY**

This paper describes the creation of a mock-up model of an electrically powered vehicle with regenerative braking capability. The electrical components of the model were selected according to the dynamic model of the selected electric motors made in MATLAB. Two low-power direct current electric motors with 25:1 transmission ratio reducers were selected. Then the way in which the selected electronic components are connected is shown, and the method by which the current, voltage and power in the system will be measured is described. The construction of the vehicle was made using the additive method with the help of a 3D printer. The model is controlled via a remote control via radio communication. After its creation, programs based on the Arduino platform were developed, with which the entire vehicle system was controlled by.

Finally, the mock-up was tested for peak system loads during starting and braking.

Keywords: vehicle model (mock-up), electric drive, DC motors with permanent magnets, regenerative braking

## **1. UVOD**

Razvoj vozila pogonjenih električnim motorima vrlo je aktualno u današnje doba. Razvoj električnih ili hibridnih vozila cilj je skoro svakog proizvođača vozila transportne ili industrijske namjene. Glavne prepreke širokoj uporabi ovakvih vozila je njihov domet. Da bi postigla sličan domet vozilima pogonjenim motorima na unutarnje izgaranje moraju imati velike i teške baterije koje zahtijevaju mnogo vremena da se napune. Način na koji proizvođači umanjuju ove nedostatke je razvojem baterija koje mogu podnijeti veće brzine punjenja i poboljšanje efikasnosti vozila razvojem sustava koji pune bateriju pri regenerativnom kočenju. Takav sustav nije često primijenjen na vozilima male snage, no u ovom radu napraviti će se maketa vozila male snage koje koristi isti princip za povećanje efikasnosti. Istosmjerni (DC) elektromotori sa uzbuđim permanentnim magnetima na statoru imaju široku primjenu u raznim pogonima male snage. Nalaze se u malim vozilima, mobilnim robotima, alatima, kućanskim uređajima i slično. Vrlo su pogodni za razvoj pogonskih sustava malih vozila radi jednostavne kontrole pomoću pulsno širinske modulacije (eng. PWM) i razmjerno velikog otpora armature radi kojeg ne može doći do značajnih strujnih preopterećenja pri pokretanju iz mirovanja i pri regenerativnom „generatorskom“ kočenju. Stoga su prikladni za razvoj makete električnog vozila sa regenerativnim kočenjem koje ima mogućnost vraćanja struje u bateriju. Najprije će se napraviti MATLAB simulacija odabranih motora da bi se odredilo kolika je struja pri regenerativnom kočenju, te prema njoj odrediti kakve baterije i ostale elektroničke komponente će se koristiti. Nakon izrade makete testirat će se može li maketa izdržati strujna opterećenja pri kretanju iz mirovanja te regenerativnom kočenju i koliko struje uspijevamo dobiti. Maketa prikazuje kako bi se mogla povećati efikasnost raznih malih vozila i mobilnih robota koji koriste slične električne pogone gdje primjena takvih sustava prikupljanja energije nije česta.

## 2. OSNOVE ISTOSMJERNOG MOTORA

Rad istosmjernog elektromotora zasniva se na dva temeljna principa:

1. Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije
2. Lorentzovoj sili na naboj u gibanju

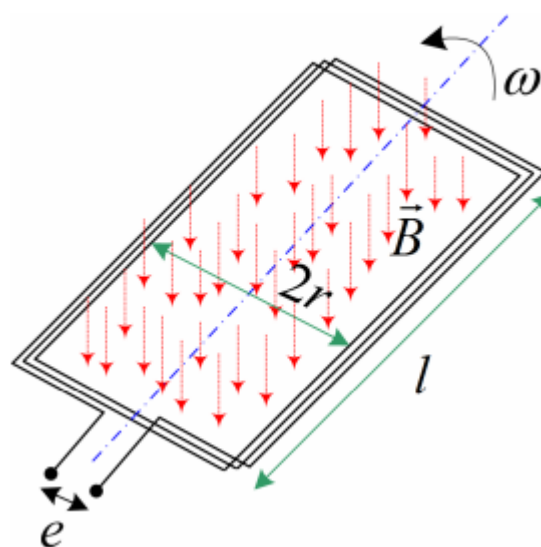
Faradayev zakon elektromagnetske indukcije opisuje vezu između induciranog napona  $e$  u vodiču, zavojnici i promjeni toka magnetskog polja  $\Phi$  (indukcije  $B$ ). Ako se zavojnice žice na statoru rotiraju u homogenom magnetskom polju permanentnih magneta na statoru tok polja kroz zavojnicu možemo opisati jednadžbom (2.1):

$$\Phi(t) = B \cdot A \cdot \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

Gdje je  $B$  indukcija magnetskog polja,  $A$  površina zavojnice, a  $\omega$  kutna brzina rotacije zavojnice sa  $N$  namotaja. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije nalaže da je inducirani napon:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

'-' u jednadžbi dolazi od Lenzovog pravila, inducirani napon nastoji suzbiti vlastiti uzrok tj. promjenu toka polja.



Slika 1 Faradayev zakon na zavojnici koja rotira u magnetskom polju

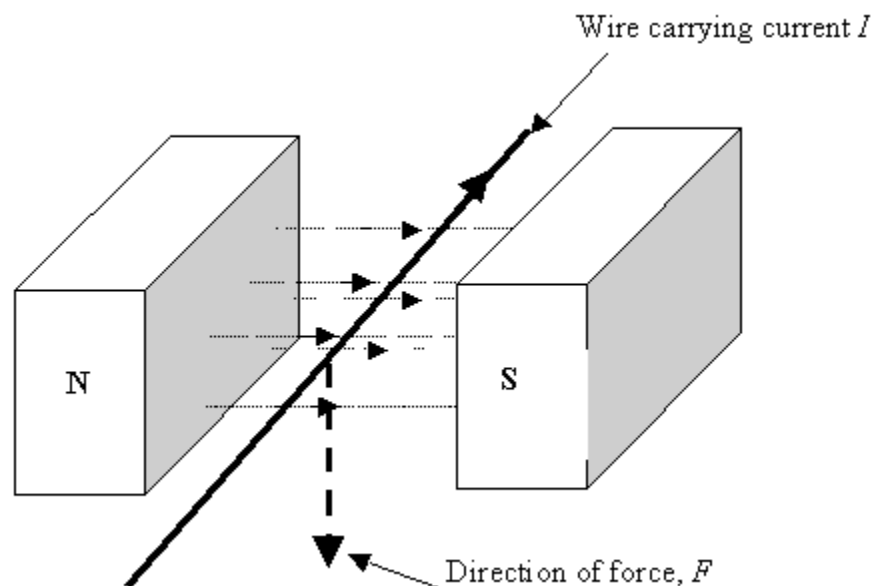
Tok struje  $I$  kroz vodič uzrokuje magnetsko polje. Ako se vodič kroz koji se giba naboj, odnosno kroz koji teče struja nađe u magnetskom polju na njega djeluje sila. Ta sila zove se Lorentzova sila te je opisana jednadžbom:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.3)$$

Iznos sile ovisi o kutu između vodiča i smjera magnetskog polja, te je najveći kada su okomiti:

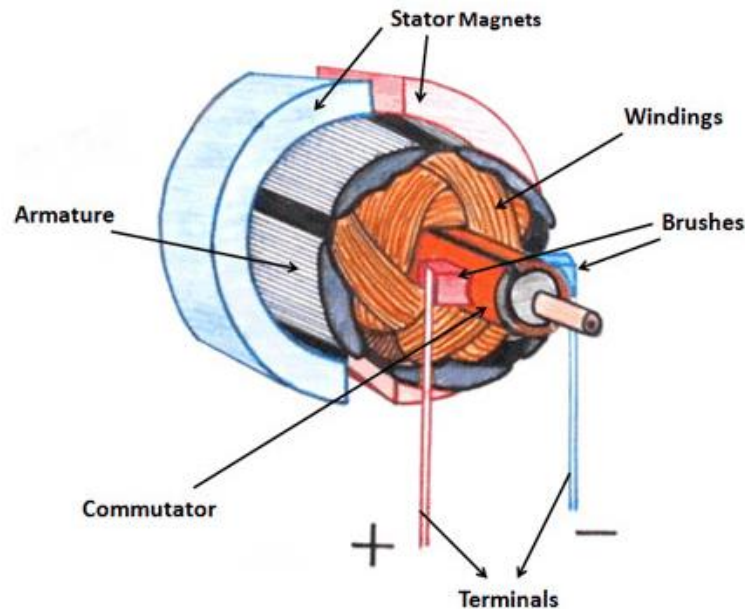
$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2.4)$$

Smjer sile se određuje prema pravilu desne ruke gdje ispruženi prst pokazuje smjer magnetskog polja, palac smjer struje, a smjer vektora sile izlazi iz dlana.



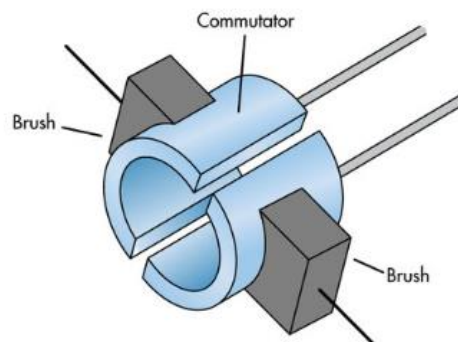
Slika 2 Prikaz Lorentzove sile

Istosmjerni motor sa permanentnim magnetima sastoji se od: statora na kojem se nalaze magneti, rotora u kojem su uloženi vodiči namota armature, komutatora i četkica koje su spojene na napajanje motora.



Slika 3 Pojednostavljen prikaz elektromotora sa permanentnim magnetima

Protok struje kroz navoje armature u magnetskom polju statora stvara silu koja zakreće rotor. Rotor bi se prestao kretati kada bi se magnetsko polje koje nastaje radi protoka struje kroz zavojnicu poravnalo s magnetskim poljem statora, odnosno kut između vodiča i toka polja bio bi  $0^\circ$  te bi sila po formuli (2.3) bila nula. Ovo se izbjegava komutatorom koji rotacijom između četkica spojenih na izvor napajanja stalno mijenja smjer struje kroz navoje, a time i smjer magnetskog polja rotora.



Slika 4 Komutator



Motor ima generatorski i motorni režim rada. Kada struja teče iz napajanja kroz napon armature i time stvara moment motor je u motornom režimu rada. Kada vanjska sila rotira rotor motora i time inducira napon u njemu motor se nalazi u generatorskom režimu.

Izrazi za inducirani napon (elektromotornu silu  $E$ ) i okretni moment rotora:

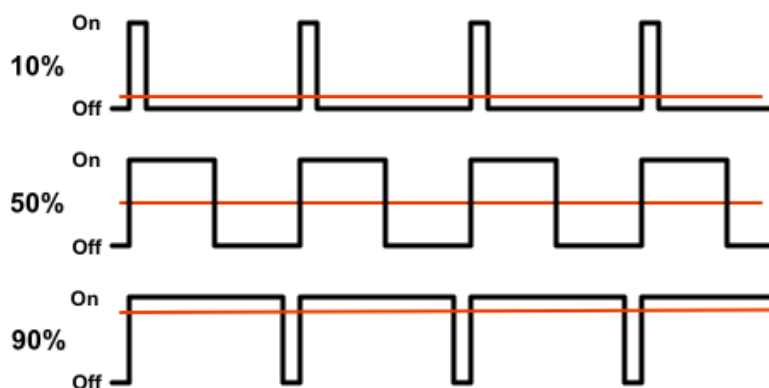
$$E = k_E \cdot \Phi \cdot \omega \quad (2.5)$$

$$M = k_m \cdot \Phi \cdot I \quad (2.6)$$

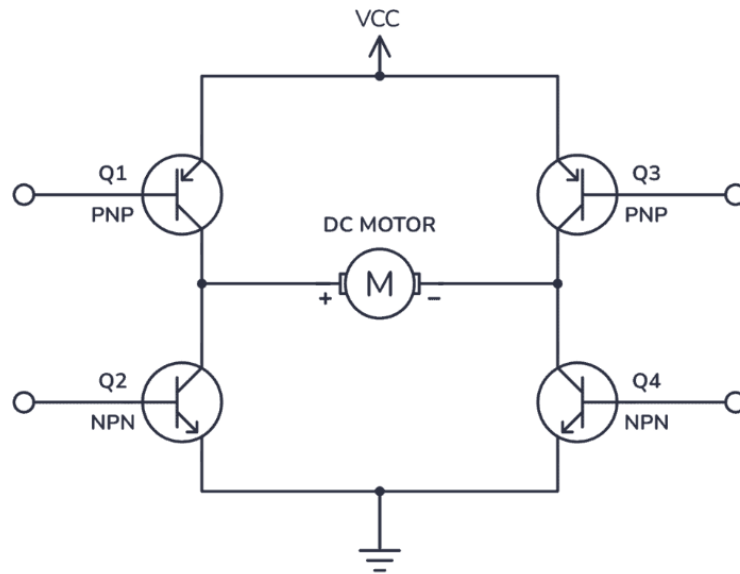
Konstanta elektromotorne sile i konstanta momenta dane su identičnim izrazima koji vrijede ako je brzina vrtnje zadana kao kutna brzina rotora  $\omega$ .  $p$  = par polova,  $z$  = zbroj vodiča,  $a$  = broj paralelnih grana armaturnog namota:

$$k_E = k_M = \frac{z \cdot p}{2 \cdot a \cdot \pi} \quad (2.7)$$

Brzina motora upravlja se preko napona na četkicama motora. Napon upravljamo pulсно širinskom modulacijom (eng. PWM) preko elektroničkog energetskog pretvarača zvanog H-most. Preko H-mosta upravljamo naponom tako što uključujemo par tranzistorskih sklopki koje propuštaju struju iz napajanja prema motoru. Smjer struje ovisi o tome koji par sklopki se uključuje, a brzina motora ovisi o iznosu napona koji dolazi na motor. Uključivanje sklopki određujemo upravljačkom jedinicom. U ovom slučaju to je ATmega328P mikroprocesor. Napon na motoru je proporcionalan popunjenosti perioda PWM signala kojeg šaljemo s upravljačke jedinice na tranzistorske sklopke. Tako da ako je popunjenost PWM signala 50% a napajanje 12V napon na motoru će biti 6V. Crvena linija u sljedećoj slici prikazuje napon napajanja na motoru ovisno o popunjenosti PWM signala.



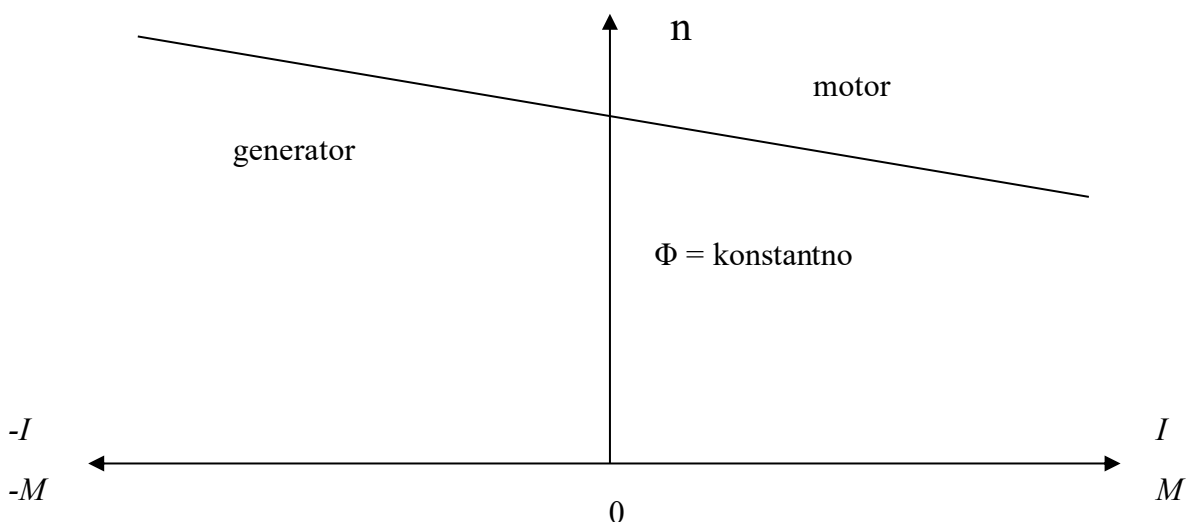
Slika 5 Ovisnost napona na motoru o popunjenosti PWM signala



Slika 6 Shema H.mosta

Ako PWM signal sa upravljačke jedinice šaljemo na par tranzistorskih sklopki Q1Q4 motor će se okretati u jednom smjeru, a slanjem PWM signala na par sklopki Q3Q4 motor se okreće u suprotnom smjeru.

Brzina motora također ovisi o momentu. Ovisno o momentu koji opterećuje elektromotor, njegova brzina propada. Ovu ovisnost možemo vidjeti na grafu mehaničke karakteristike motora. Na x-osi grafa nalazi se moment, a na y-osi broj okretaja tj. brzina. Nakošena linija predstavlja meh. karakteristiku motora. Nagib karakteristike ovisi o otporu armature, dok njen položaj s obzirom na y-os ovisi o naponu dovedenom na motor. Tu je također vidljivo da upravljanjem tim naponom mijenjamo brzinu motora.

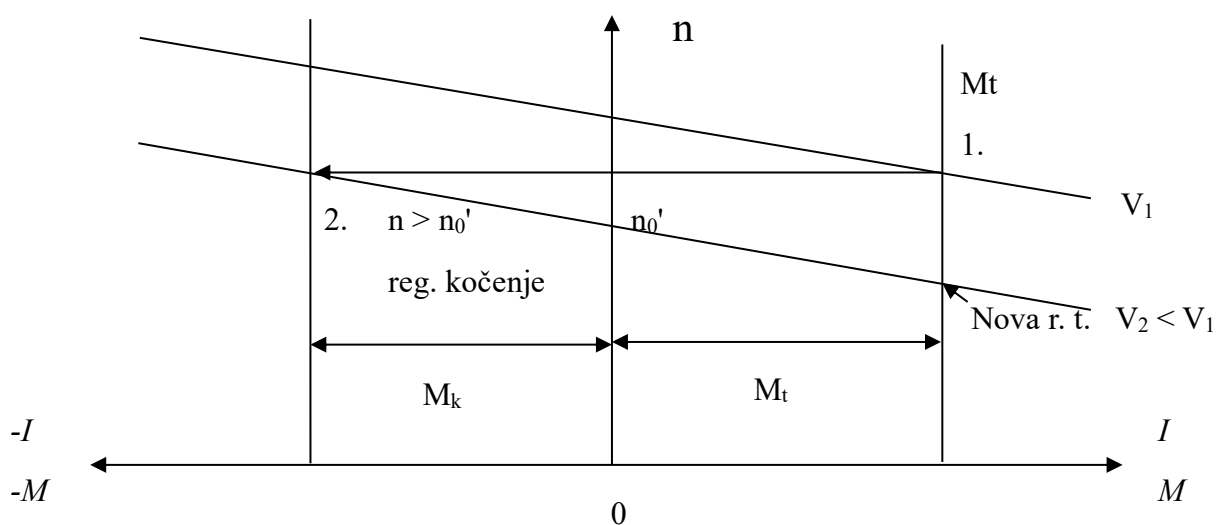


Slika 7 Graf mehaničke karakteristike motora

### 3. MODELIRANJE DC MOTORA U MATLAB-U

#### 3.1. Osnove regenerativnog kočenja

Najveće strujno opterećenje sustava događati će se pri pokretanju iz mirovanja i pri regenerativnom kočenju. Da bi se mogle odabrati komponente koje će se staviti u sustav mora se predvidjeti kolika će biti najveća strujna opterećenja. Koristeći simulaciju regenerativnog kočenja napravljenu u MATLABU-u odrediti će se kolika će ta opterećenja biti.



Slika 8 mehanička karakteristika istosmjernog motora pri regenerativnom kočenju

Motor pri određenom momentu tereta stabilizira se u odgovarajućoj radnoj točki. Kada se smanji napon napajanja motora on prelazi na novu meh. karakteristiku no njegova brzina se ne može promijeniti jednako brzo. Na novoj karakteristici pri istoj brzini motor je prešao u generatorski režim rada. Struja i moment postaju negativni te motor usporava dok ne dođe do nove radne točke koja odgovara stalnom momentu tereta ( $M_t$ ), ali na novoj karakteristici. Nova brzina motora biti će naravno manja od prijašnje u toj točki. Razlog negativnog toka struje, odnosno toka struje iz motora prema napajanju koje je u ovoj maketi baterija, je jer je elektromotorna sila razvijena pri prijašnjem naponu veća od napona nove karakteristike. Struja prestaje teći iz motora prema bateriji u trenutku kada motor postaje sporiji od brzine praznog hoda ( $n_0'$ ) na novoj karakteristici te se vraća u motorni režim rada.

### 3.2. Matematička podloga simulacije DC motora

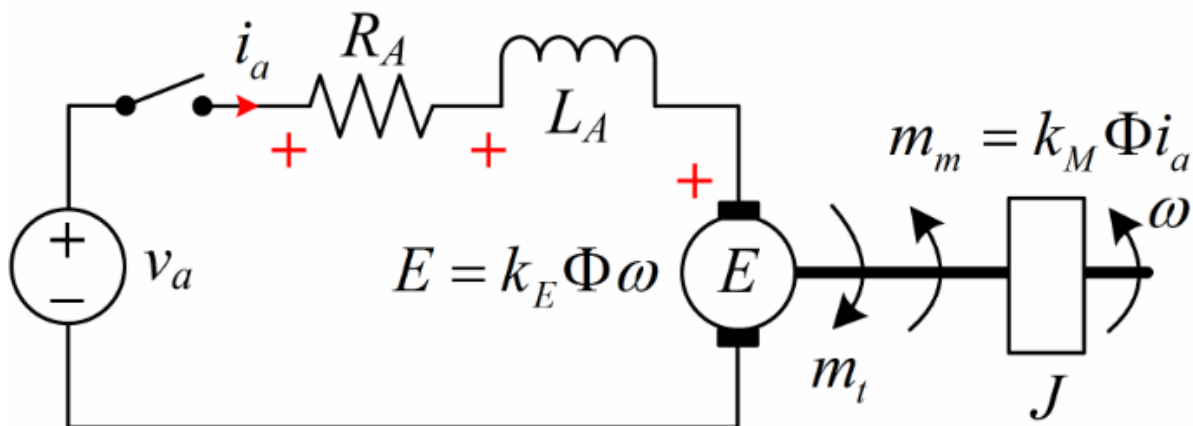
Formula kojom ćemo izračunati struju koja teče prema bateriji je:

$$I_b = \frac{\Delta V}{R_A + 2R_d + R_b} \quad (3.1)$$

$$\Delta V = E - V_R \quad (3.2)$$

Gdje je:  $I_b$  – Struja prema bateriji,  $R_A$  – otpor armature motora,  $R_d$  – otpor sklopki pretvarača,  $R_b$  – unutarnji otpor baterije.

Model elektromotora napravljen u MATLAB Simulink-u zasniva se na matematičkim jednadžbama koje opisuju dinamički model istosmjernog motora.



Slika 9 Sustav istosmjernog motora s nezavisnom konstantnom uzбудom

$$V_A(t) = E(t) + R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} \quad (2. \text{ Kirchoffov zakon za napone}) \quad (3.3)$$

$$E(t) = k_E \cdot \Phi \cdot \omega(t) \quad (\text{Faradayev zakon}) \quad (3.4)$$

$$m(t) = k_M \cdot \Phi \cdot i_A(t) \quad (3.5)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = m(t) - m_t(t) \quad (2. \text{ Newtonov zakon}) \quad (3.6)$$

Navedene jednadžbe opisane su u vremenskoj domeni, Laplaceovom transformacijom pretvorene su u jednadžbe u s-domeni koje će se koristiti u SIMULINK modelu istosmjernog motora.

U s-domeni jednadžbe glase:

$$V_A(s) = E(s) + R_A i_A(s) + L_A s i_A(s) \quad (3.7)$$

$$E(s) = k_E \cdot \Phi \cdot \omega(s) \quad (3.8)$$

$$m(s) = k_M \cdot \Phi \cdot i_A(s) \quad (3.9)$$

$$J s \omega(s) = m(s) - m_t(s) \quad (3.10)$$

Ključne jednadžbe za izradu modela su:

Struja armature dobivena iz (3.7):

$$i_A(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{L_A}{R_A}\right)s} (V_A(s) - E(s)) = \frac{K_A}{1 + T_a s} (V_A(s) - E(s)) \quad (3.11)$$

Rotacijska dinamika motora dobivena iz (3.10):

$$\omega(s) = \frac{1}{J s} (m(s) - m_t(s)) \quad (3.12)$$

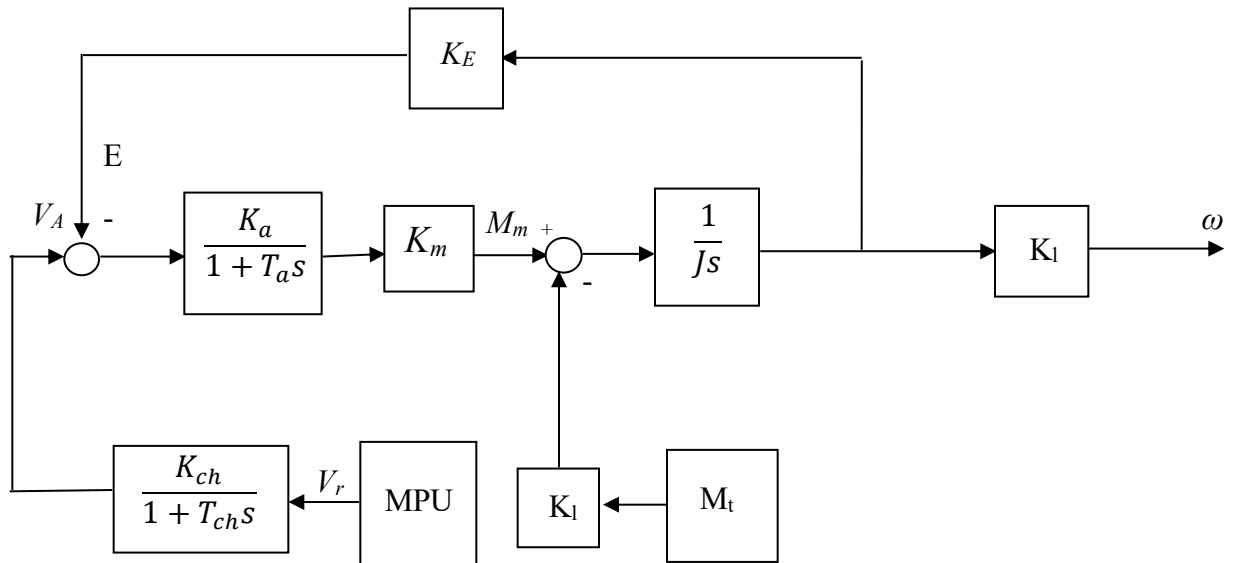
Razvijeni moment motora (3.9)

Inducirani napon (elektromotorna sila) (3.8)

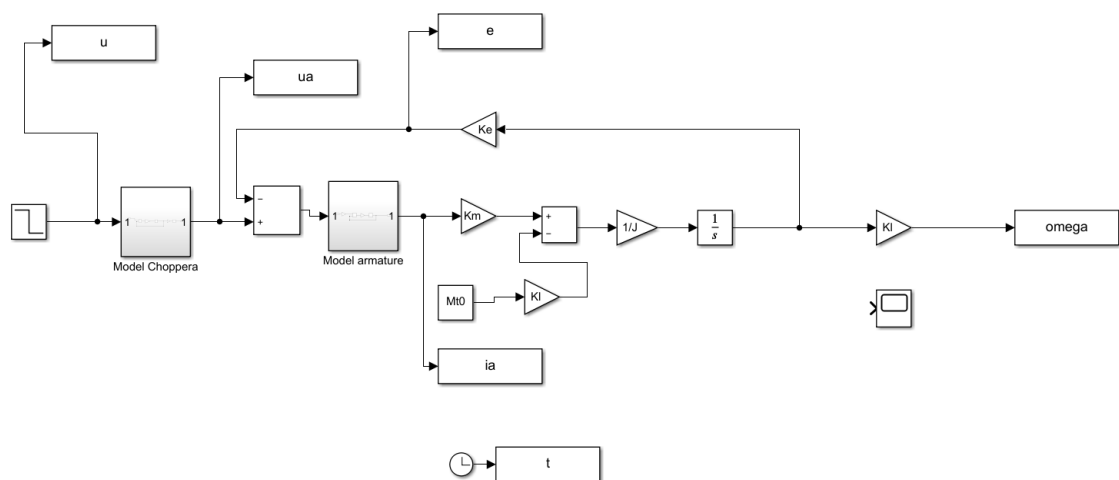
Napon armature iz električnog energetskog pretvarača (Choppera):

$$V_A(s) = \frac{K_{ch}}{1 + T_{ch}} V(s) \quad (3.13)$$

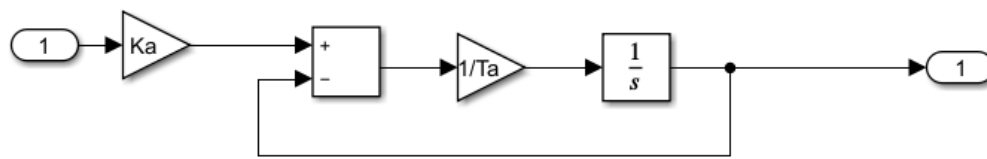
SIMULINK model napravljen iz prijašnjih jednažbi:



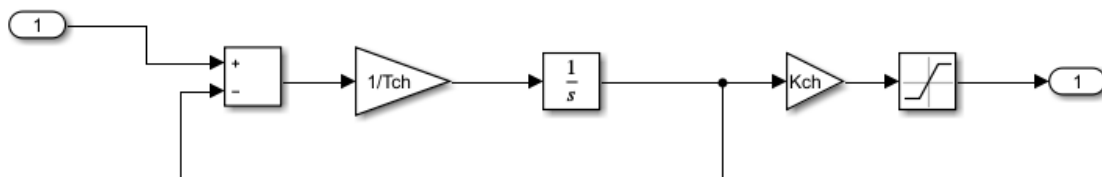
Slika 10 Blok dijagram SIMULINK modela



Slika 11 SIMULINK model DC motora



Slika 12 SIMULINK model armature DC motora



Slika 13 SIMULINK model energetskeg pretvarača "choppera"

### 3.3. Određivanje momenta tereta

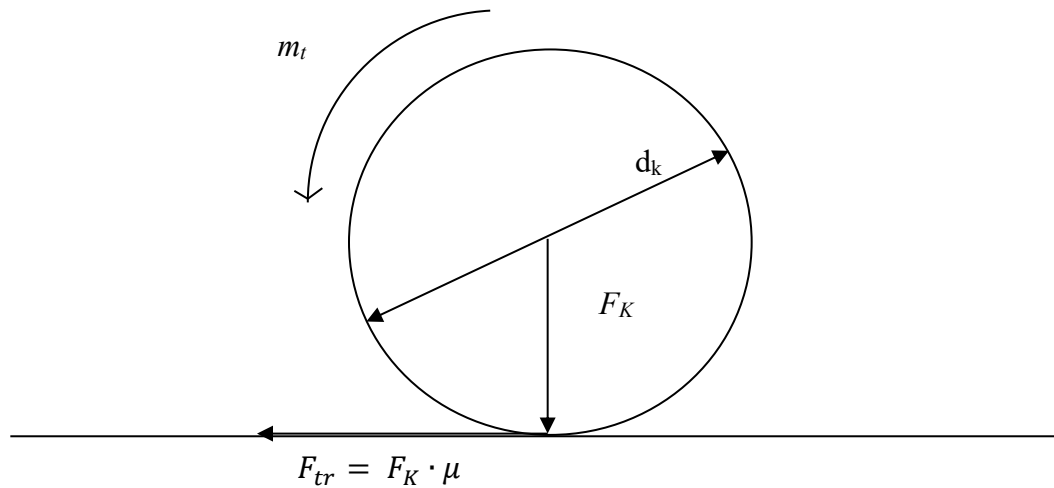
Pokretanje makete ostvarit će se pomoću dva istosmjerna dc motora sa reduktorom. Radi odabira DC motora koji su sposobni pokretati vozilo, te za osnovu simulacije mora se unaprijed pretpostaviti moment tereta. Moment tereta računati će se kao moment potreban za savladavanje statičkog trenja.

Za proračun potrebno je prvo odrediti silu trenja koju svaki kotač ostvaruje s podlogom. Pretpostavit će se da je masa vozila  $m_v = 1\text{ kg}$ . Ako se pretpostavi ravnomjerna raspodjela mase u vozilu sila na svakom kotaču određuje se prema sljedećem izrazu:

$$F_K = \frac{m_v g}{4} \quad (3.14)$$

$$F_K = 2.4525\text{ N} \quad (3.15)$$

Izračun sile trenja na kotač odrediti će se prema sljedećem modelu:



Slika 14 Model sila na kotaču

Moment tereta izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$M_t = \frac{d_k}{2} \cdot F_{tr} \quad (3.16)$$

Pretpostavlja se da se vozilo giba po betonu, te je koeficijent trenja jednak  $\mu = 0.7$ . Sila trenja se izračunava prema izrazu:

$$F_{tr} = F_K \cdot \mu \quad (3.17)$$

$$F_{tr} = 1.71675 \text{ N} \quad (3.18)$$

Promjer kotača makete  $d_k = 0.65 \text{ m}$ . Moment tereta izračunat je prema izrazu (3.16) te iznosi:

$$M_t = 0.055 \text{ Nm} \quad (3.19)$$



### 3.4. Odabir istosmjernih motora

Motori koji ćemo koristiti za ovu maketu su Pololu Metal Gearmotor 20Dx41L 12V CB. Odabrani motori su mali, lagani te sadrže reduktor s prijenosnim omjerom 25:1. Ovim odabirom uštedeno je na težini i prostoru unutar makete.

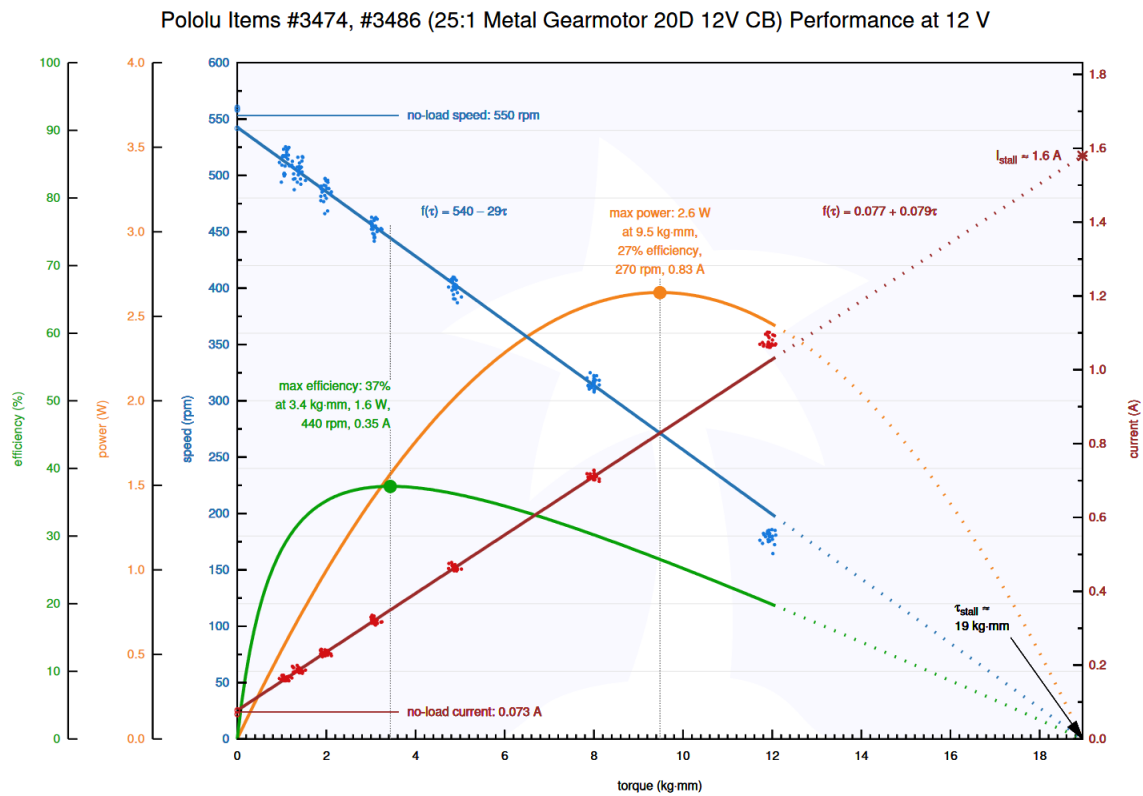


Slika 15 Pololu 12V CB Metal Gearmotor

Tablica 1 Karakteristikei Pololu 12V CB Metal Gearmotor-a pri 12V

KARAKTERISTIKA	IZNOS
Napon	$U = 12 \text{ V}$
Prijenosni omjer reduktora	$N = 25:1$
Brzina praznog hoda	$n = 550 \text{ okr/min}$
Struja bez opterećenja	$I = 0.08 \text{ A}$
Maksimalna snaga	$P = 2.6 \text{ W}$
Maksimalna struja	$I = 1.6 \text{ A}$
Moment	$M = 0.1869 \text{ Nm}$
Otpor	$R = 7.5 \Omega$
Induktivitet	$L_A = 1.4 \text{ mH}$
Moment inercije	$J = 6.8 \cdot 10^{-9} \text{ kgm}^2$

Odabrani motori mogu ispostaviti veći moment od momenta potrebnog za pokretanje vozila  $M_t$  te zadovoljavaju uvjete. Prema karakteristici motora radna točka za izračunati moment tereta nalaže da će maksimalna brzina makete biti 410 okr/ min.



Slika 16 Karakteristika Pololu 12V CB motora

Parametri motora potrebni za izvođenje simulacije:

$$P = 2.6W \quad (3.20)$$

$$U = 12 V \quad (3.21)$$

$$n_n = 13750 \text{ okr/min (brzina motora prije reduktora)} \quad (3.22)$$

$$I_a = 0.55 A \quad (\text{struja armature pri toj radnoj točki}) \quad (3.23)$$

$$R_a = 7.5 \Omega \quad (3.33)$$

$$L_a = 1.4 \text{ mH} \quad (3.34)$$

$$K_a = 1 / R_a = 0.1333 \text{ A/V} \quad (3.35)$$

$$T_a = L_a / R_a = 0.1867 \text{ ms} \quad (3.36)$$

$$J = 6.8 \cdot 10^{-9} \text{ kgm}^2 \quad (3.37)$$

$$\omega_n = n \cdot \pi / 30 = 1439.3 \text{ rad/s} \quad (3.39)$$

$$M_n = P / \omega_n = 0.0018 \text{ Nm} \quad (3.40)$$

$$K_m = M_n / I_a = 0.033 \text{ Nm/A} \quad (3.41)$$

$$K_E = (U - I_a \cdot R_A) / \omega_n = 0.0055 \text{ Vs/rad} \quad (3.42)$$

$$K_l = 1/25 \text{ (konstanta prijenosnog omjera)} \quad (3.43)$$

Parametri energetskog pretvarača „choppera“ :

$$f_{ch} = 976.56 \text{ Hz (frekvencija arduino PWM za procesor ATmega328P)} \quad (3.43)$$

$$K_{ch} = 2 U / 2u_{\max} = 2.4 \text{ ( ulazni „referentni“ napon pretvarača } u_{\max} = (-5V, 5V)) \quad (3.44)$$

$$T_{ch} = 1 / f_{ch} = 1.02 \cdot 10^{-3} \text{ ms} \quad (3.45)$$

Izračun početnih vrijednosti potrebnih za simulaciju zasniva se na zadanim vrijednostima početne brzine i momenta tereta. Zadani moment tereta jednak je izračunatom momentu tereta  $M_{t0} = 0.55 \text{ Nm}$ , brzina zadat će se prema karakteristici na grafu sa slike 16. gdje za navedeni moment tereta brzina iznosi  $n_0 = 410 \text{ okr / min}$ . Početna kutna brzina  $\omega_0$  izračunata je prema sljedećem izrazu:

$$\omega_0 = K_l \cdot \left( \frac{n_0 \cdot \pi}{30} \right) = 1073.4 \text{ rad/s} \quad (3.46)$$

Početni napon iz energetskog pretvarača:

$$U_{cho} = K_E \cdot \omega_0 + \frac{m_{t0} \cdot K_l}{K_a} = 10.9 \text{ V} \quad (3.47)$$

Početni referentni napon:

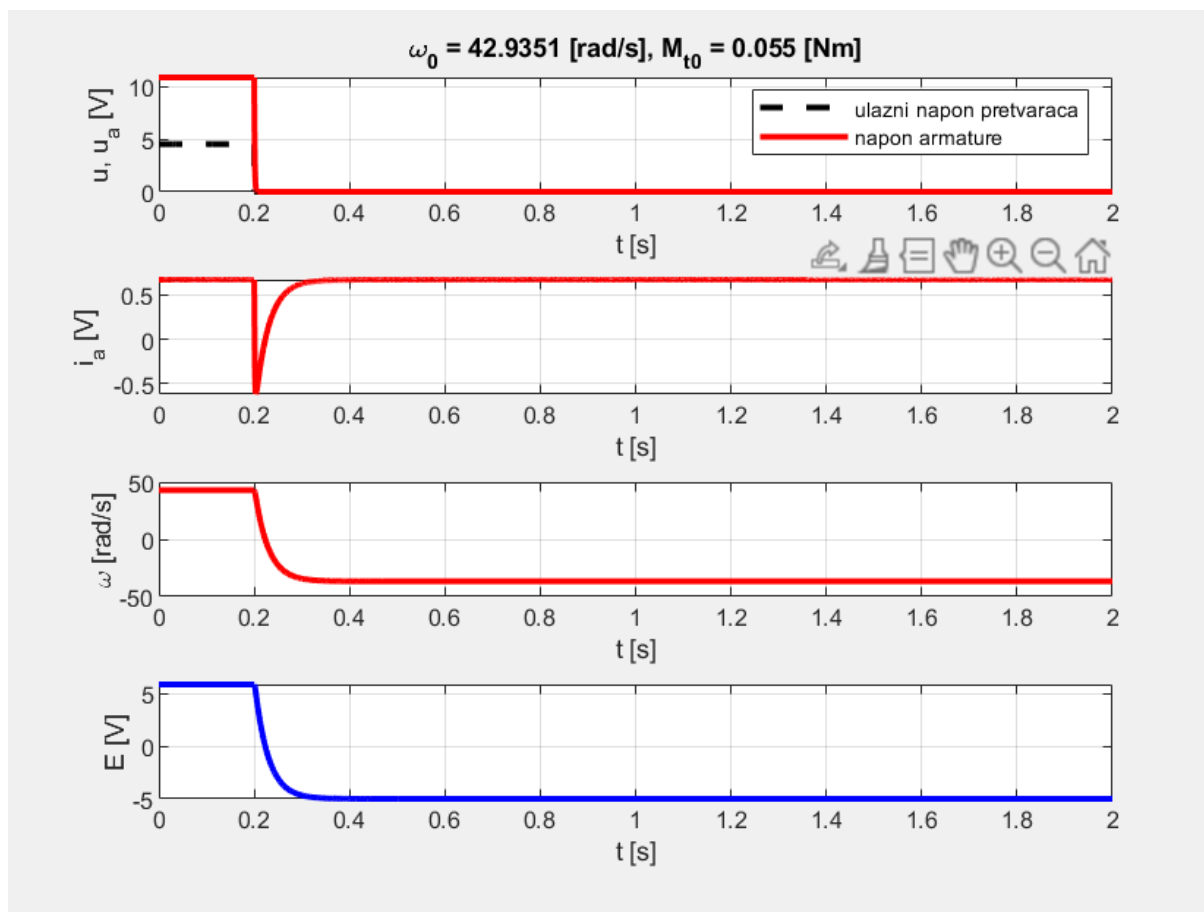
$$U_r = \frac{U_{cho}}{K_{ch}} = 4.54 \text{ V} \quad (3.48)$$

Početna struja armature:

$$I_{a0} = \frac{m_{t0} \cdot K_l}{K_m} = 0.67 \text{ A} \quad (3.49)$$

### 3.5. Rezultati simulacije

Simulacija traje 2 sekunde te je napravljena za slučaj gdje vozilo koči sa maksimalne brzine na nulu u 0.2-oj sekundi, odnosno staje. Na sljedećem grafu mogu se vidjeti napon armature  $U_a$ , referentni napon  $U_r$ , Struja armature  $I_a$ , kutna brzina  $\omega$  i elektromotorna sila  $E$ , sve u ovisnosti o vremenu  $t$  (s).



Slika 17 Graf rezultata SIMULINK simulacije

Rezultati koji su očitani iz simulacije su napon armature pri kočenju koji iznosi:

$$U_a = 0 \text{ V} \quad (3.50)$$

Iznos elektromotorne sile pri početku koćenja:

$$E = 5.87 \text{ V} \quad (3.51)$$

Struja armature pri početku koćenja:

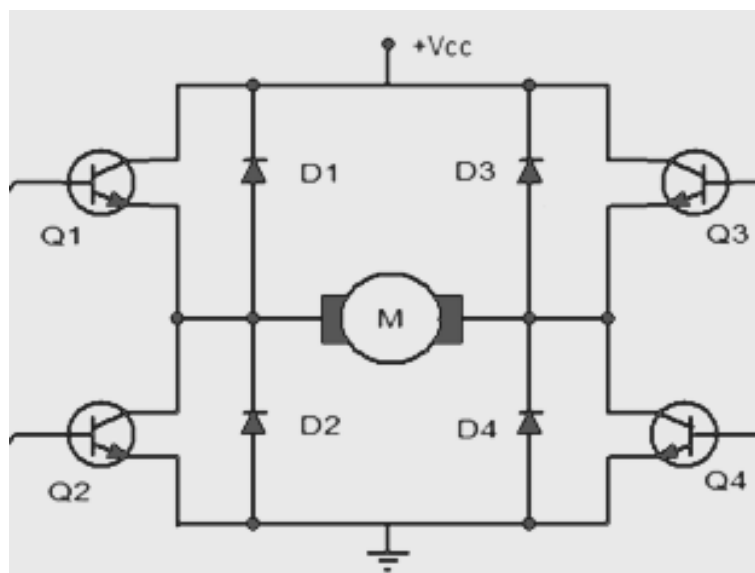
$$I_a = -0.6 \text{ A} \quad (3.52)$$

## 4. Odabir komponenti

Prema rezultatima simulacije iz prethodnog poglavlja odabrane su komponente korištene za izradu makete vozila sa električnim pogonom koje mogu podnijeti opterećenja kretanja iz mirovanja i regenerativnog „generatorskog“ kočenja. Odabrane komponente su hobističke ,te potencijal svih komponenti nije sasvim iskorišten. Efikasnost cijelog sustava mogla bi se znatno poboljšati korištenjem drugih, za izradu ovog rada to nije bilo moguće.

### 4.1. L298N Motor Driver

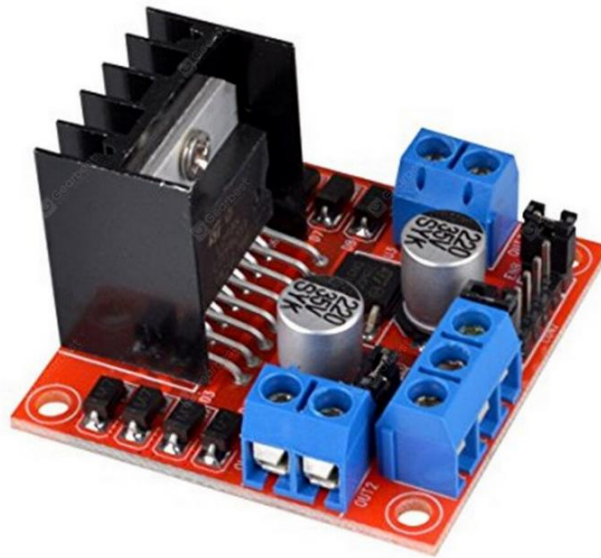
L298N motor driver je modul sa mogućnosti upravljanja dva istosmjerna elektromotora, te omogućuje četvero kvadrantni rad motora. Upravljanje je ostvareno pomoću dva H-mosta nalik onome prikazanom u 2. poglavlju. Upravljanje L298N modulom ostvaruje se preko mikrokontrolera pomoću 6 pinova. Za svaki motor dva pina označena „IN“ šalju digitalni signal kojim se određuje u kojem smjeru će se elektromotor vrtjeti dok treći analogni pin „EN“ šalje pulsno širinsku modulaciju koja upravlja naponom na motoru, odnosno brzinom motora.



Slika 18 H-most L298N drivera

Tablica 2 Upravljanje L298N motor driverom

IN1	IN2	
0	0	Motor koči
1	0	Motor se vrti unaprijed
1	1	Motor koči
0	1	Motor se vrti unazad



Slika 19 L298N motor driver

Tablica 3 Karakteristike L298N motor drivera

PARAMETRI	IZNOS
Napon	$U_s = 4.5-35V$
Napon upravljačkih pinova	$U = 4.5-7V$
Maksimalna struja	$I = 2A$
Otpor	$R_d = 1.45 \Omega$
Maksimalna snaga	$P = 35 W$

## 4.2. Turnigy 1500mAh 3S baterija

Baterija mora biti pažljivo odabrana kako ne bi došlo do preopterećenja ili požara. Da bi se takav događaj izbjegao mora se odabrati baterija koja može podnijeti struju pri kretanju iz mirovanja i povratnu struju pri kočenju. Li-Po baterije kakva je odabrana puno su osjetljivije na punjenje, te podnose znatno manje struje nego pri pražnjenju.

Tablica 4 Karakteristike Turnigy 1500mAh 3S baterije

KARAKTERISTIKE	IZNOS
Napon	$U = 12.6V$
Brzina pražnjenja	20C
Težina	$m_b = 125g$
Otpor	$R_b = 12 m\Omega$
Kapacitet	1500mAh



Slika 20 Turnigy 3S 1500mAh baterija

Opterećenje pod kojim će baterija biti izračunato je preko izraza (3.1) gdje je  $\Delta V$  razlika između elektromotorne sile pri kočenju (3.51) i napona pri kočenju (3.50).  $R_b$  je otpor baterije,  $R_d$  otpor sklopki,  $R_a$  otpor armature motora, a  $I_b$  struja koja puni bateriju:

$$I_b = \frac{\Delta V}{R_A + 2R_d + R_b} = \frac{5.87}{7.5 + 2 \cdot 1.45 + 0.0012} = 0.56A \quad (4.1)$$

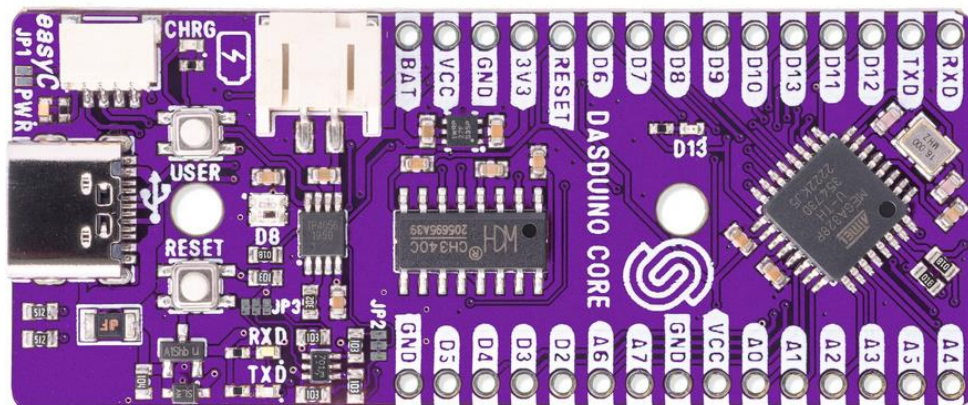
Uzimajući u obzir da su dva motora baterija se puni pri:

$$\frac{2I_b}{1.5 Ah} = \frac{1.12 A}{1.5 Ah} = 0.747C \quad (4.2)$$

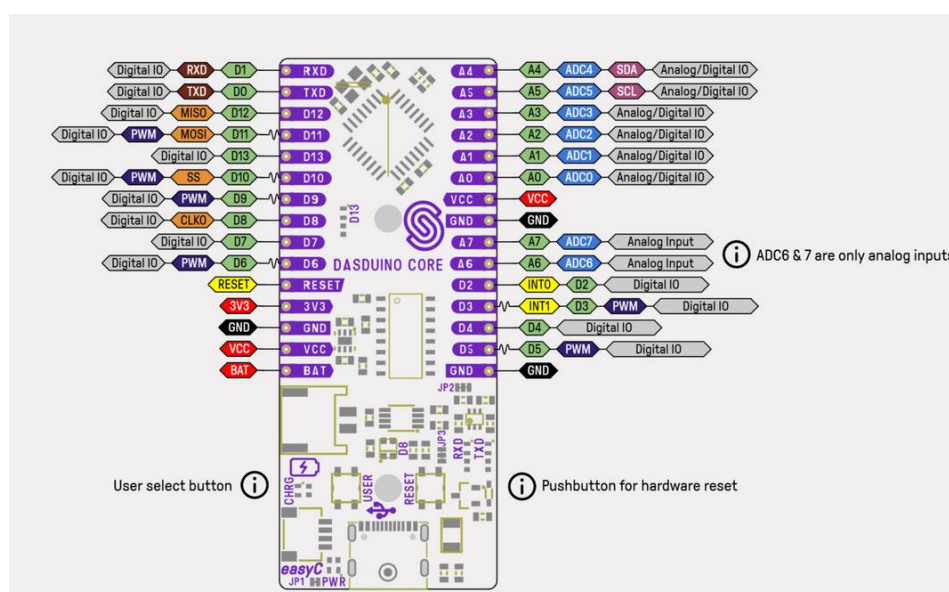
Baterija se puni pri brzini 0.747 C što osigurava da neće doći do požara ni pri najvećoj struji kočenja. Odabrana baterija sastoji se od tri serijski spojene baterijske ćelije.

### 4.3. Mikrokontroler Dasduino Core

Svi sustavi i popratni moduli kontrolirani su preko mikrokontrolerske pločice Dasduino Core koja koristi vrlo česti ATmega328P mikroprocesor. Pločica se programira pomoću Arduino programskog sučelja te njegovo mnoštvo integriranih funkcija i popratnih biblioteka za razne module znatno pojednostavljuje spajanje i komunikaciju sa svim sustavima vozila. Isti mikrokontroler koristi se na vozilu i daljinskom upravljaču.



Slika 21 Dasduino Core mikrokontroler



Slika 22 Pinout Dasduino Core mikrokontrolera



Tablica 5 Karakteristike Dasduino Core-a

KARAKTERISTIKE	IZNOS
Mikroprocesor	Atmel ATmega328
Radni napon	5V/3.3V
Ulazno/izlazni pinovi	22 digitalna (8 analognih)
Komunikacija	UART/SPI/I2C
Radni takt	16MHz
Ulazni napon	3.7V-7V

#### 4.4. INA219 senzor struje i napona

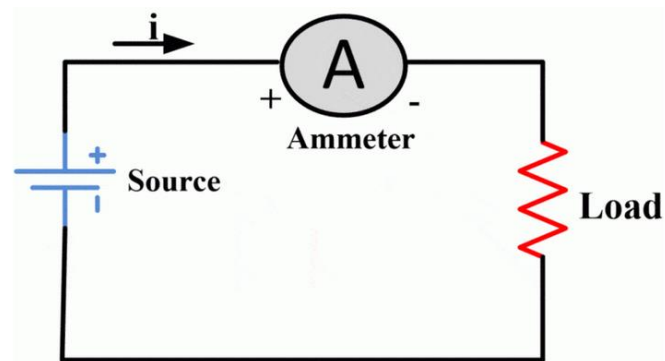
INA 219 senzor struje i napona je modul koji omogućava jednostavno mjerenje napona i struje koja izlazi ili ulazi u bateriju. Spaja se sa mikrokontrolerom preko I2C komunikacije, te se direktno napaja preko 5V izlaza Dasduino Core pločice. Očitavanje struje, napona i snage vrši se preko ampermetra i „Shunt“ otpornika. Princip rada je da ampermetar očita struju, napon se računa preko očitane struje i očitanoog pada napona na 0.1  $\Omega$ -om otporniku koristeći Ohm-ov zakon. Konačno sa izračuna i snaga te se sve informacije šalju mikrokontroleru.



Slika 23 INA219 senzor struje i napona

Tablica 6 Karakteristike INA219 senzora

KARAKTERISTIKE	IZNOS
Napon napajanja	3.3V – 5V
Maksimalan napon	26V
Maksimalna struja	3.2A
Otpor „Shunt“ otpornika	0.1 $\Omega$



Slika 24 Princip rada INA219 senzora

#### 4.5. NRF24L01+ radio komunikacijski modul

NRF24L01+ modul omogućuje dvostranu radio komunikaciju između dva mikrokontrolera. Za kontrolu koristi se biblioteka unutar arduino programskog sučelja koja znatno pojednostavljuje slanje podataka. Moduli nisu sposobni slati i primiti podatke u isto vrijeme tako da postoje kratki nedostaci u razmijenjenim podacima. Nužno je paralelno spojiti kondenzator na naponske pinove ovog modula kako bi se osigurala bolja naponska karakteristika, time i pouzdanija radiokomunikacija. Komunikacija sa mikrokontrolerom vrši se preko SPI komunikacijskog protokola.



Slika 25 NRF24L01+ modul

Tablica 7 Karakteristike NRF24L01 modula

KARAKTERISTIKE	IZNOS
Frekvencija	2400-2525 MHz
Napon	3.3V
Struja	11.3mA
Brzina	2Mbps/1Mbps/250kbps
Domet	100m

#### 4.6. 500mAh Li-ion baterija

Mala 500mAh Litij ionska baterija koristi se za napajanje Dasduino Core pločice na maketi vozila. Svi moduli na vozilu napajaju se preko Dasduino Core pločice, osim L298N koji se napaja preko iste baterije kao istosmjerni motori. Baterija ima jednu baterijsku ćeliju te joj je napon 3.7V.

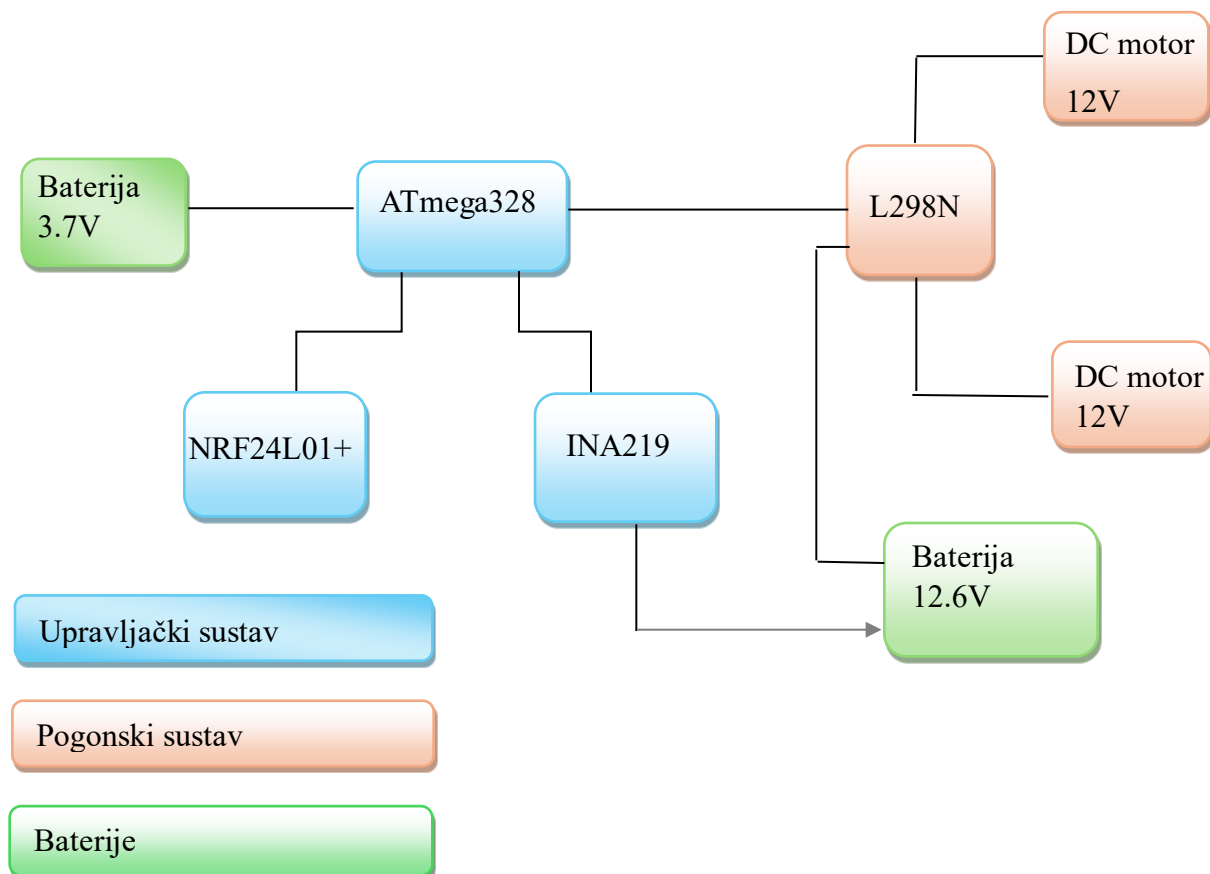


Slika 26 500 mAh Li-ion baterija

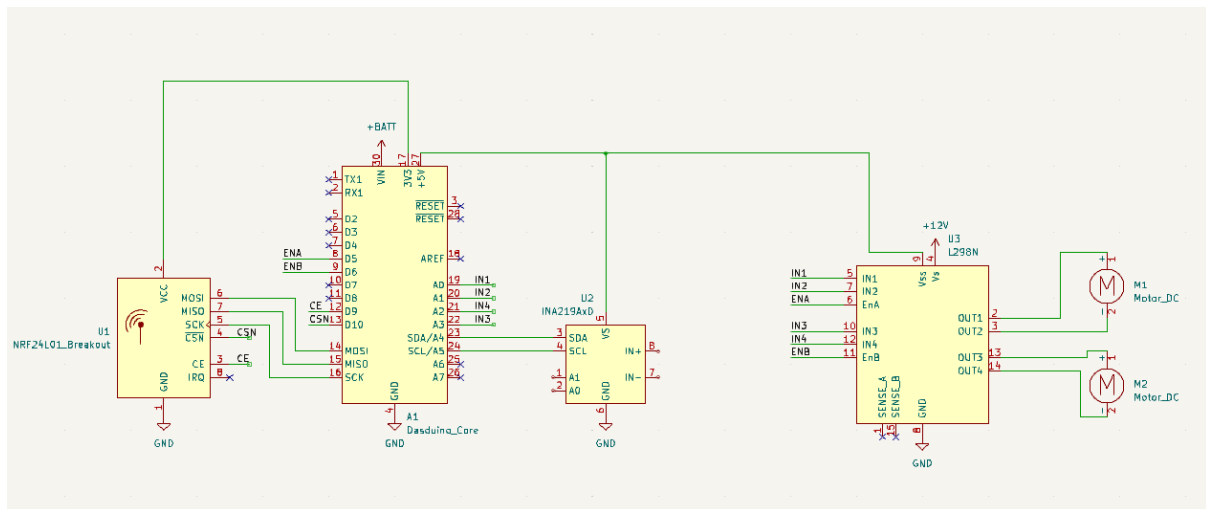
## 5. IZRADA MAKETE

### 5.1. Izrada vozila

Vozilo je sastavljena sa komponentama navedenim u prethodnom poglavlju. Na vozilu se mogu prepoznati odvojeni pogonski sustav i upravljački sustav. Pogonski sustav sastoji se od 1500 mAh Li-Po baterije, L298N energetskog pretvarača i dva 12V istosmjerna DC motora. Upravljački sustav sastoji se od Dasduino Core mikrokontrolera, INA219 senzora, NRF24L01+ radiokomunikacijskog modula i 500mAh Li-ion baterija koja ga napaja. Komponente su spojene prema sljedećoj shemi:



Slika 27 Shema spoja komponenti vozila

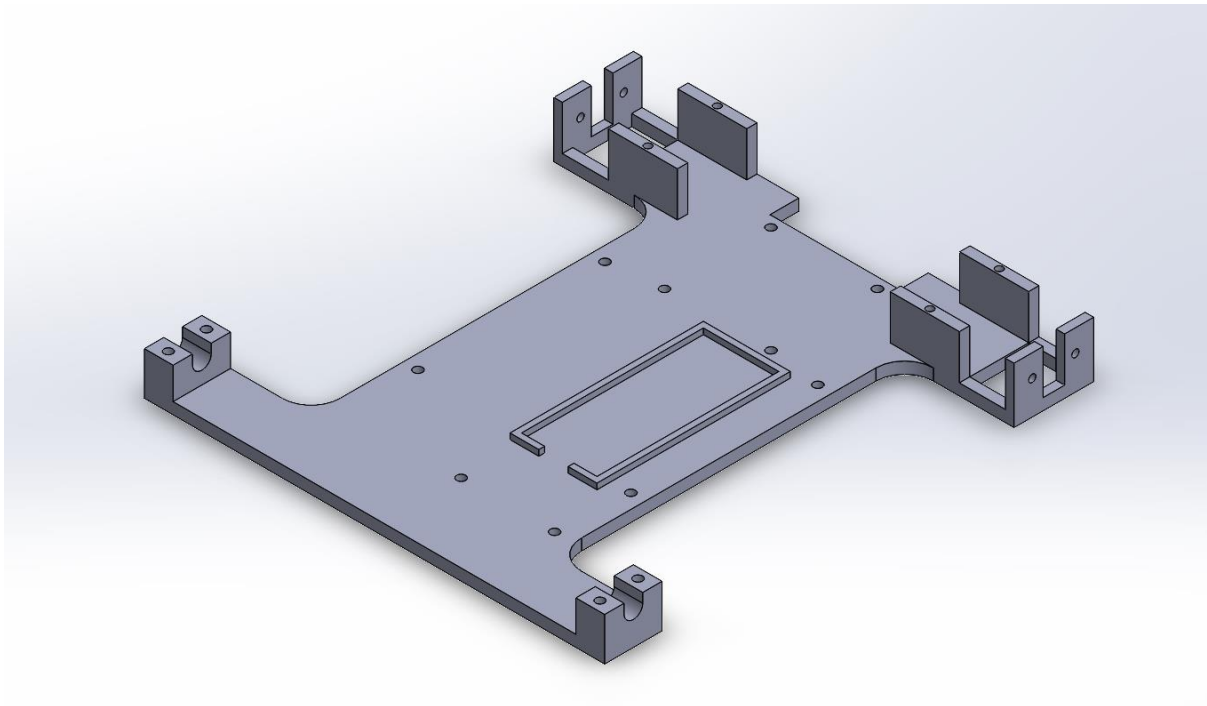


Slika 28 Schematic spoja komponenti na vozilu

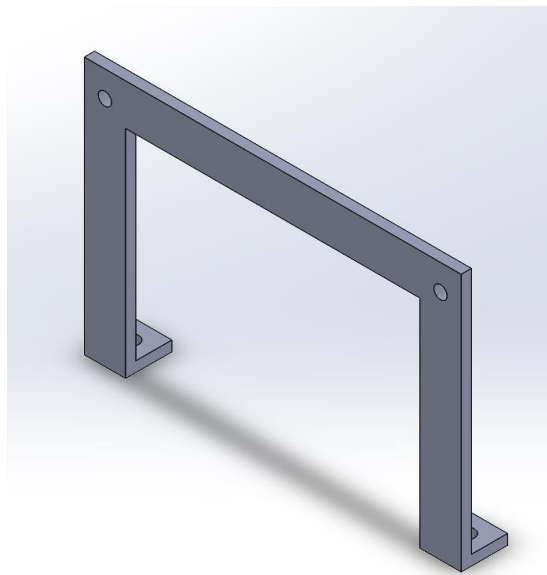
Šasija vozila i ostale strukturalne komponente izrađene su od PLA plastike aditivnom metodom 3D printanja. Čvrstoća PLA plastike zadovoljava za ovakvu svrhu. Model 3D printera koji se koristio je Creality Ender 3 S1. Svi isprintani dijelovi dizajnirani su u SolidWorks CAD programu.



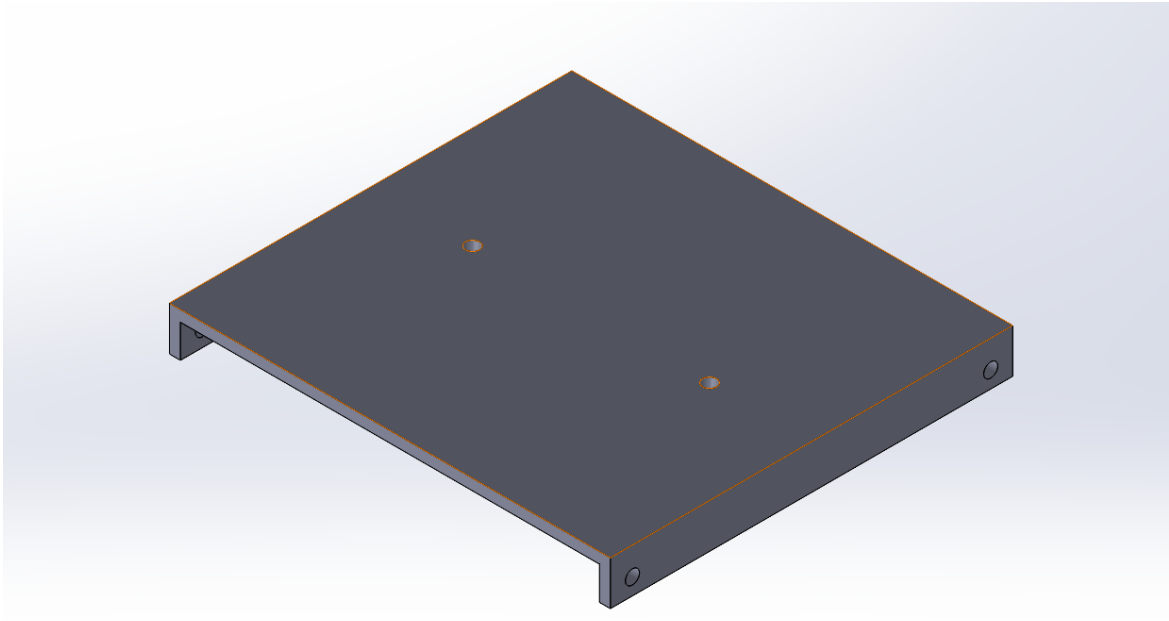
Slika 29 Ender 3 S1 3D printer



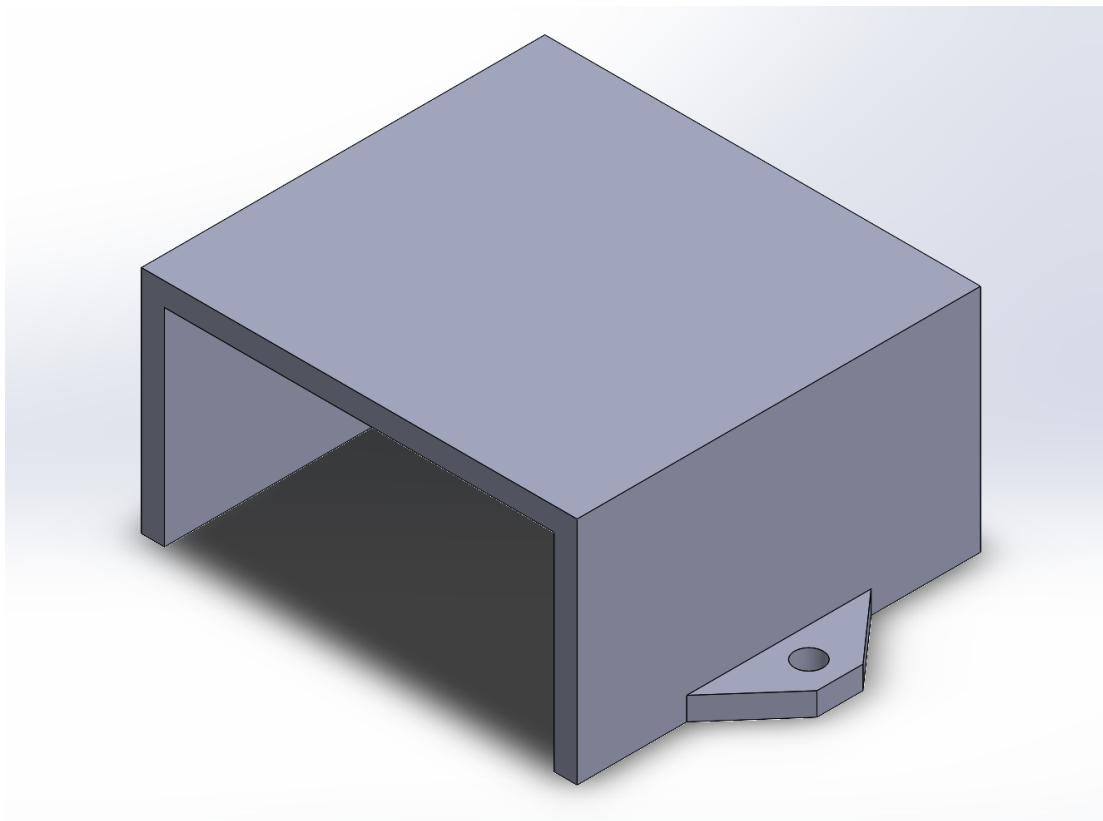
Slika 30 Šasija vozila



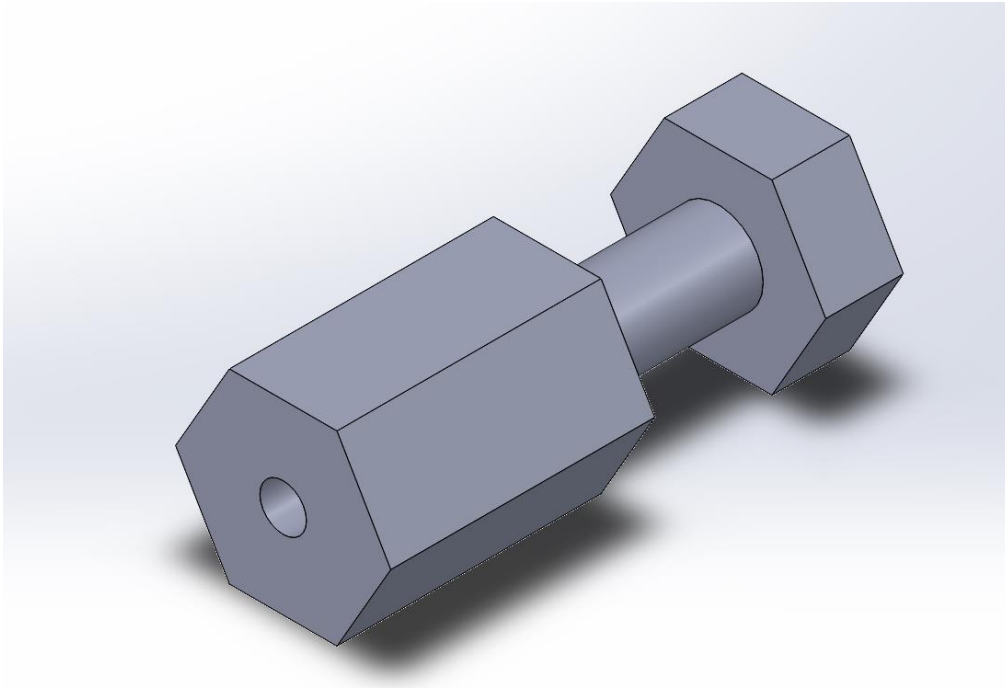
Slika 31 Držać poklopca



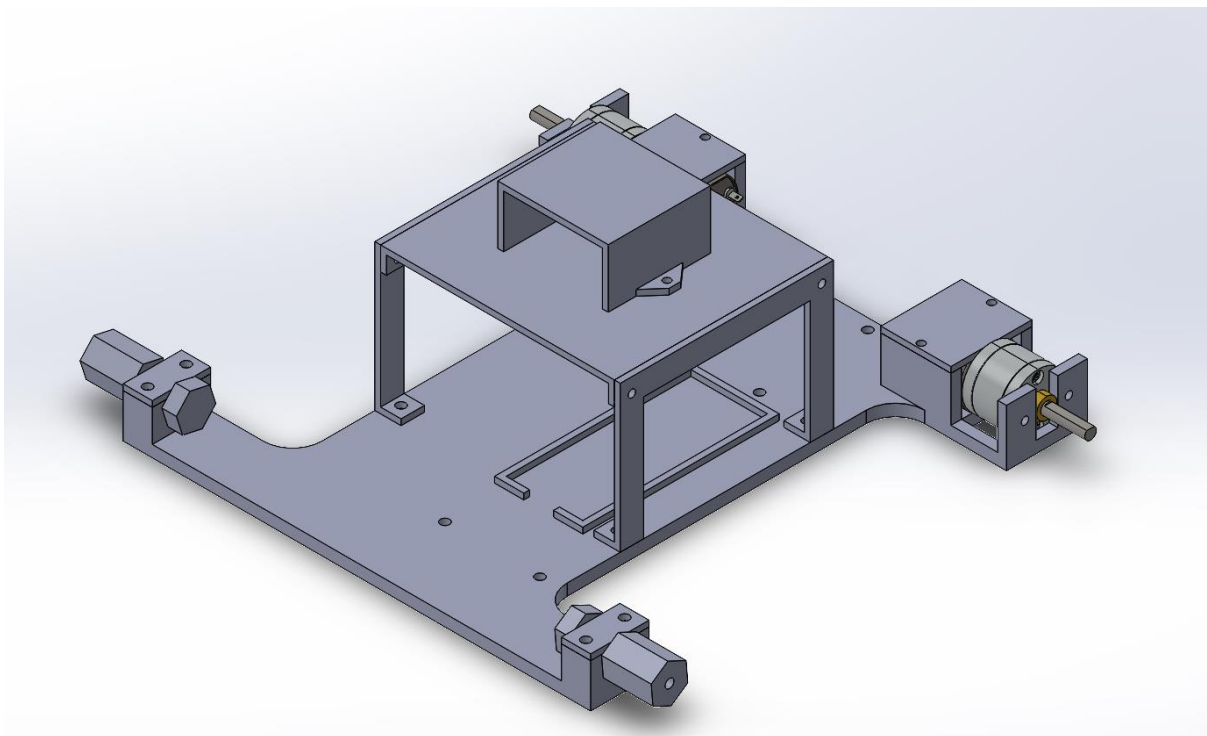
Slika 32 Poklopac vozila



Slika 33 Držać baterije

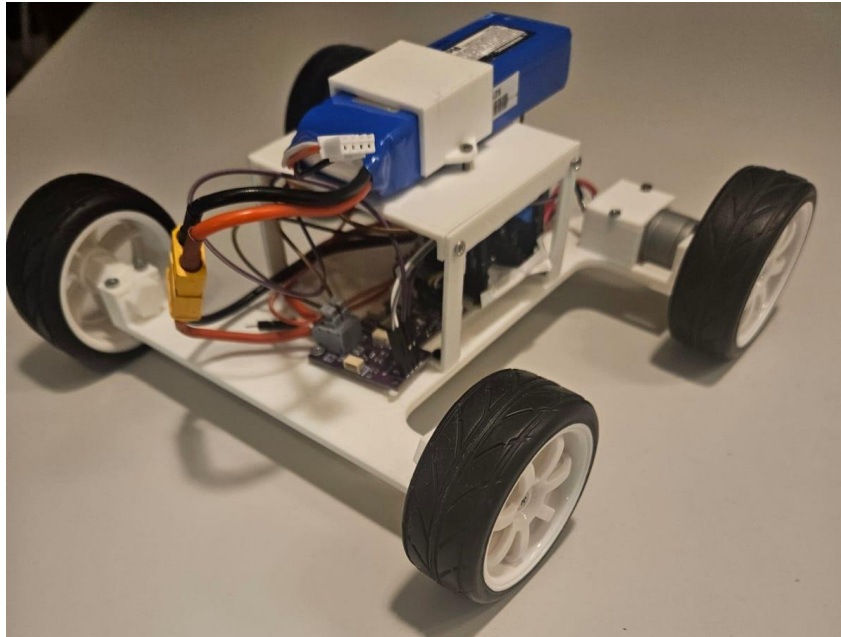


Slika 34 Osovina prednjeg kotača



Slika 35 Spoj makete vozila

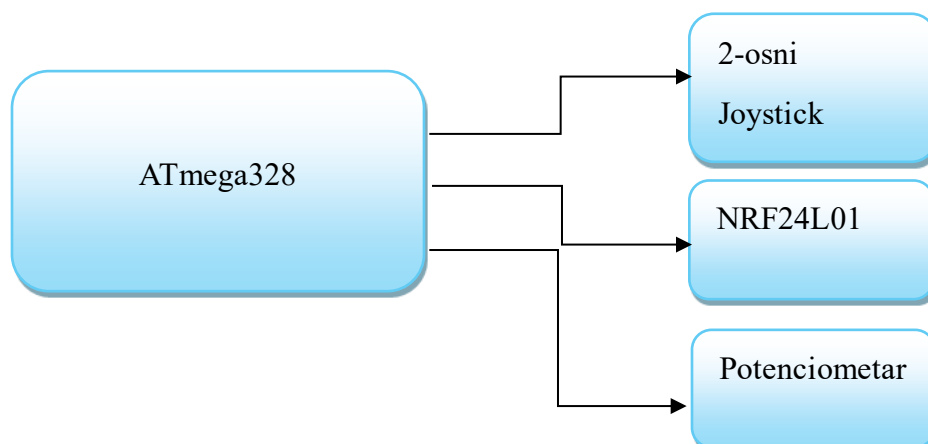




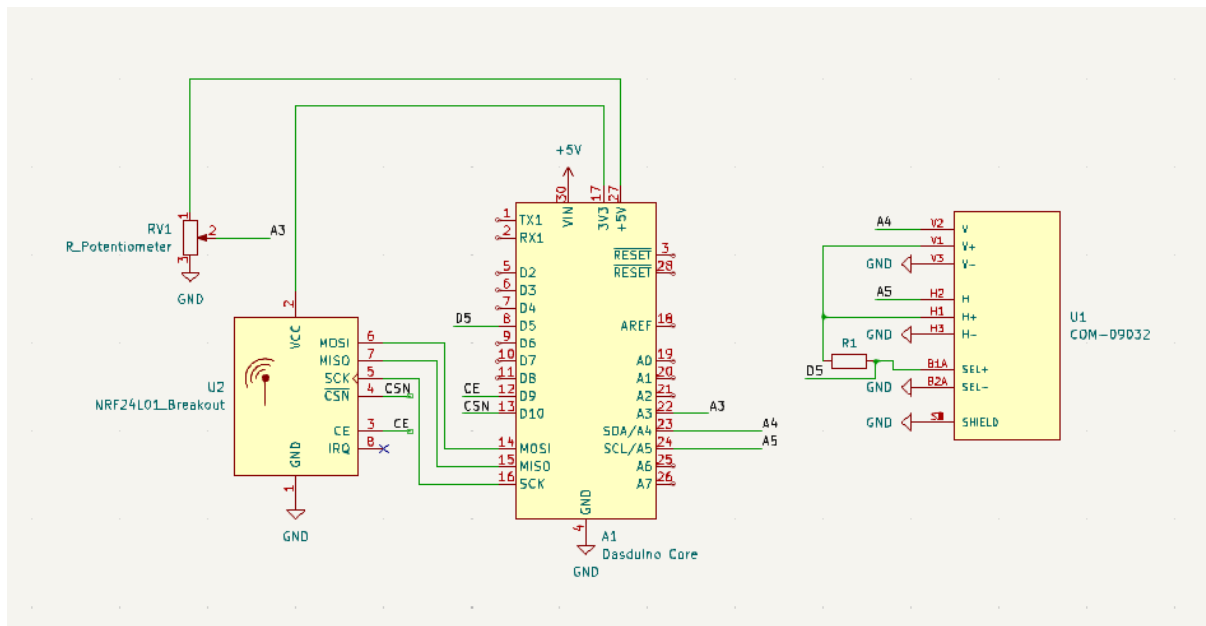
Slika 36 Sklopljena maketa vozila

## 5.2. Izrada daljinskog upravljača

Daljinski upravljač sadrži isti mikrokontroler kao i vozilo (Dasduino Core), 2-osni joystick, potencijometar i NRF24L01+ radiokomunikacijski modul. Daljinski upravljač spaja se na računalo kako bi se sa njega mogli očitati podatci struje, napona i utrošene snage poslani sa vozila. Po potrebi može se napajati istom 500mAh baterijom korištenom za napajanje upravljačkog sustava vozila

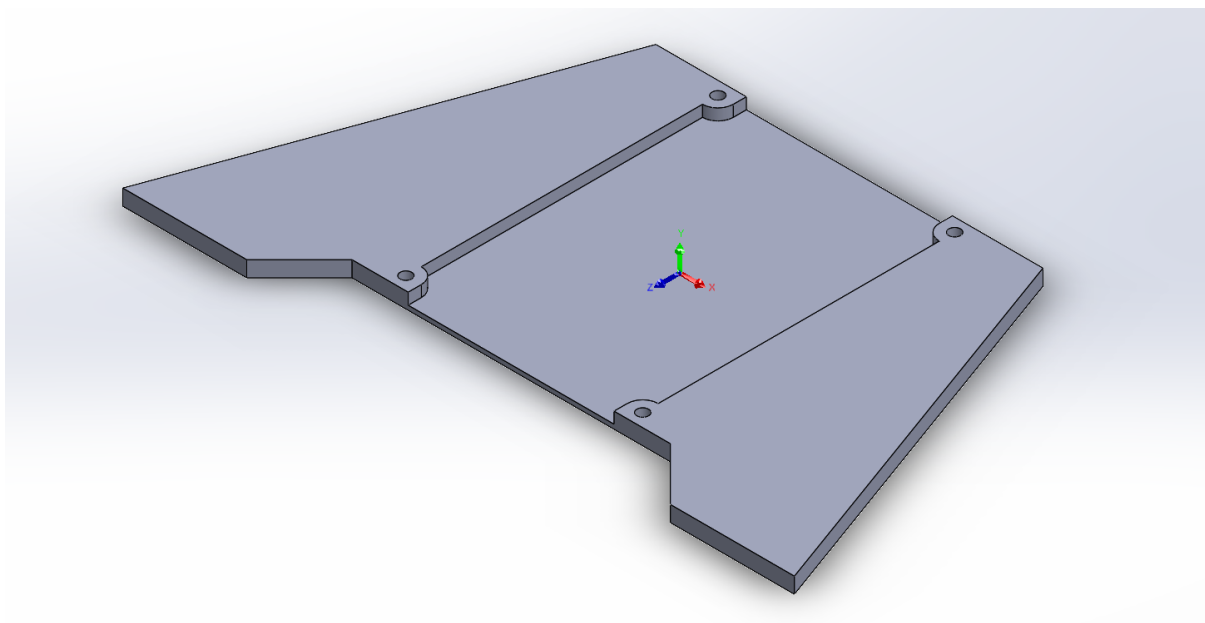


Slika 37 Shema spajanja komponenti daljinskog upravljača

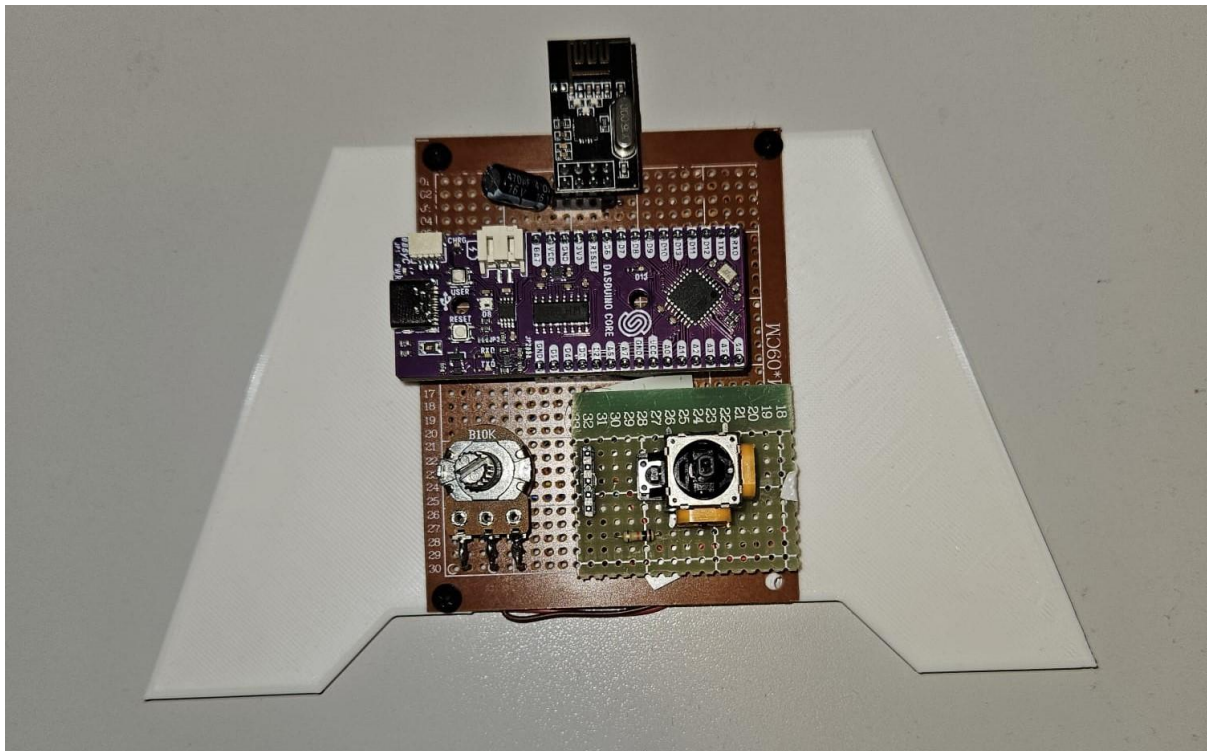


Slika 38 Shema spajanja komponenti na daljinskom upravljaču

Tijelo daljinskog upravljača također je izrađeno od PLA plastike pomoću 3D printera.



Slika 39 Tijelo daljinskog upravljača



Slika 40 Izrađen daljinski upravljač

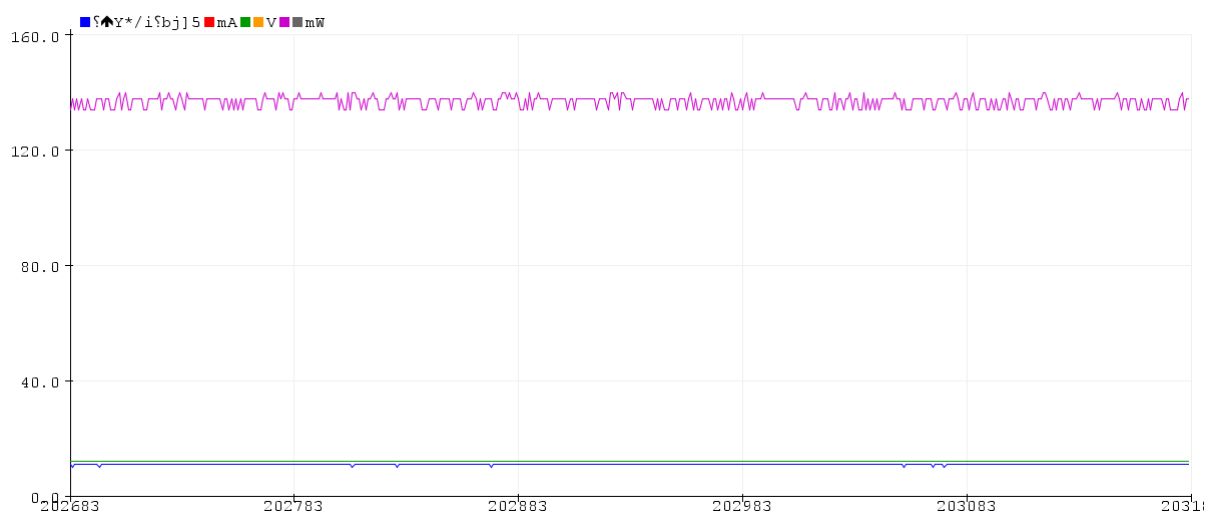
### 5.3. Programiranje makete i daljinskog upravljača

Upravljački sustav makete i daljinski upravljač isprogramirani su u programskom sučelju Arduino IDE. Korištene su razne biblioteke kako bi se pojednostavnio proces programiranja. Kod je osmišljen na način da korisnik sa upravljača pomoću upravljačke ručice određuje smjer u kojem će se vozilo gibati te pomoću potencijometra odredi popunjenost PWM signala, odnosno brzinu vozila. Ti podatci konstanto se šalju putem radio frekvencije na vozilo gdje ih mikrokontroler obrađuje te prema njima upravlja istosmjernim motorima. Kada korisnik spusti referentnu brzinu pomoću potencijometra motori kreću regenerativno kočiti. Pritisak botuna na upravljačkoj ručici spušta referentnu brzinu na 0. Mikrokontroler na vozilu cijelo vrijeme bilježi iznosi struje, napona i snage koji dolaze sa senzora INA219 te ih šalje radiokomunikacijom prema upravljaču. Radi ne mogućnosti da radio moduli šalju i primaju podatke u isto vrijeme dolazi do šuma ( $< 5$  ms) u mjerenim podacima očitanim sa upravljača. Cijeli Arduino kod može se naći u prilošku.

## 6. TESTIRANJE MAKETE VOZILA

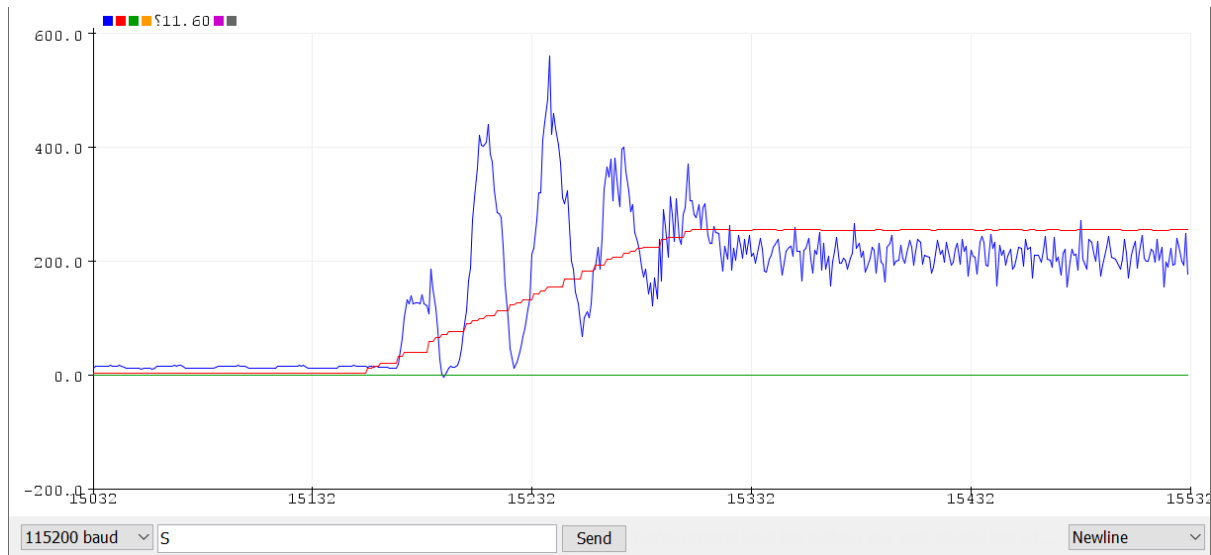
Izrađena maketa vozila teži  $m_v = 0.59\text{kg}$  te je lakša od predviđene mase od 1 kg radi čega će i moment opterećenja na istosmjerne DC motore biti manji. Armatura struja koja je proporcionalna momentu tereta također biti će manja. Iako je strujno opterećenje vozila pri vožnji manje od očekivanog potrebno je testirati hoće li doći do preopterećenja pri kretanju iz mirovanja ili pri regenerativnom „generatorskom“ kočenju. Testiranje će se provesti ubrzavanjem vozila iz mirovanja najvećim mogućim ubrzavanjem, odnosno maksimalnim naponom (100% popunjenost PWM perioda) i kočenjem zadavanjem referentne brzine 0 kada je vozilo već pri maksimalnoj brzini. Podatci će biti očitani sa kontrolera te prikazani u MATLAB grafu radi bolje razlučivosti. Prije testiranja prethodno navedenih slučajeva provjerit će se prati li brzina motora referentni napon zadan PWM-signalom.

Senzor INA219 spojen je na izlazu pozitivnog pola baterija te očitava protok struje cijelog sustava, napon na bateriji i potrošnju snage cijelog sustava. Izmjerene vrijednosti poslane daljinskom upravljaču prikazane su na grafu u realnom vremenu sa strujom sustava  $I$  (A) označeno plavo, naponom baterije  $U_b$  (V) označeno zeleno i snagom  $P$  (mW) označeno rozo.



Slika 41 Graf izmjerenih vrijednosti INA219 senzora u realnom vremenu

Sljedeći graf snimljen je direktno sa daljinskog upravljača te prikazuje potrošnju struje (plavo) u ovisnosti o popunjenosti PWM signala (referentnom naponu) koji poprima vrijednosti od 0-255.



Slika 42 Graf struje ovisnosti o popunjenosti PWM signala

Oscilatoran odziv struje može se potencijalno objasniti preko prijenosne funkcije armaturnog kruga dobivene iz blok dijagrama na slici 10, koja poprima oblik  $DT_2$  člana:

$$G_{ia} = \frac{I_A(s)}{V_A(s)} = \frac{K_A J s}{K_A K_E K_M + J s + T_A J s^2} \quad (6.1)$$

Definiranjem elektromehaničke vremenske konstante:

$$T_E = \frac{J}{K_A K_E K_M} \quad (6.2)$$

Te uvođenjem jednadžbe (6.2) u (6.1) dobije se:

$$G_{ia} = \frac{I_A(s)}{V_A(s)} = K_A \frac{T_E s}{1 + T_E s + T_A T_E s^2} \quad (6.3)$$

Uspoređivanjem nazivnika jednadžbe (6.3) sa sljedećim izrazom kako bi se dobilo prigušenje sustava  $\zeta$ :

$$1 + \frac{2\zeta}{\Omega_n} s + \frac{s^2}{\Omega_n^2} \quad (6.4)$$

Dobiveni izraz za prigušenje sustava glasi:

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_E}{T_A}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{J}{T_A K_A K_E K_M}} \quad (6.5)$$

Moment tromosti koje će se koristiti u izrazu (6.5) za izračun prigušenja je ekvivalentni moment tromosti sustava dobiven prema jednadžbi (6.6). :

$$J_k = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 \quad (\text{moment tromosti kotača})$$

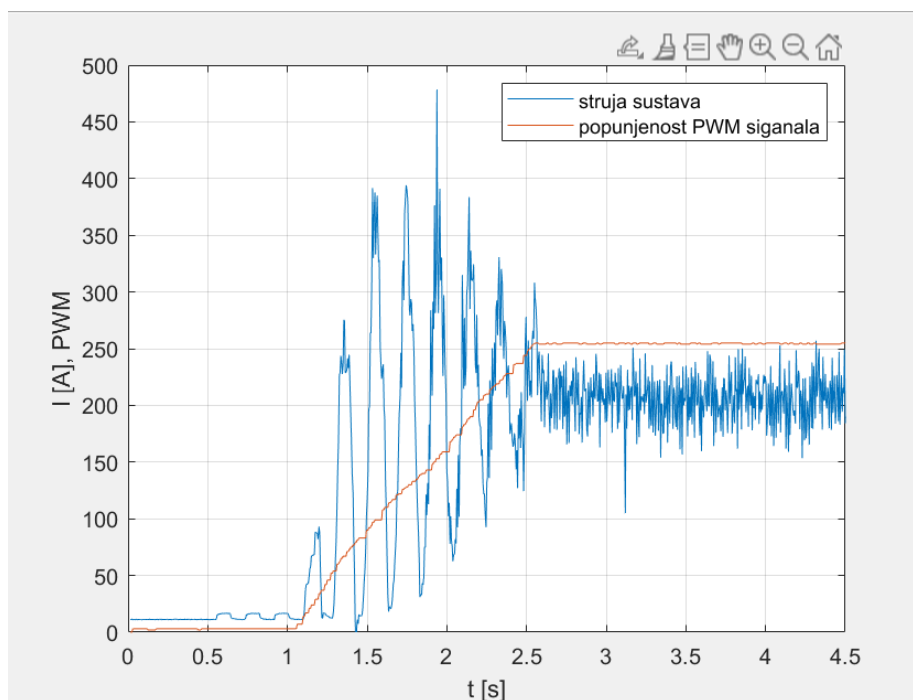
$$J_{eq} = \left( J + \frac{2J_k}{K_l^2} + m_v \left( \frac{d_k}{2} \cdot K_l \right)^2 \right) = 9.98 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2 \quad (6.6)$$

Izračunato prigušenje sustava prema izrazu (6.5) sa uvrštenim (6.6) iznosi:

$$\zeta = 0.7433 \quad (6.7)$$

Pri malim momentima inercije prema izrazu (6.5) dominantna dinamika sustava određena je odnosom vremenske konstante armature  $T_A$  i elektromehaničke vremenske konstante  $T_E$ . Također je vidljivo je da vrlo mali iznos momenta tromosti utječe na dobivanje prigušenja manjeg od 1. Motori sa iznosom prigušenja manjim od 1 mogu imati oscilatoran odaziv struje armature pri skokovitim promjenama napona koje u ovom slučaju nastaju radi pulsno širinske modulacije, no taj efekt bi bio uočljiv tek kada bi faktor prigušenja bio 0.1 ili manji.

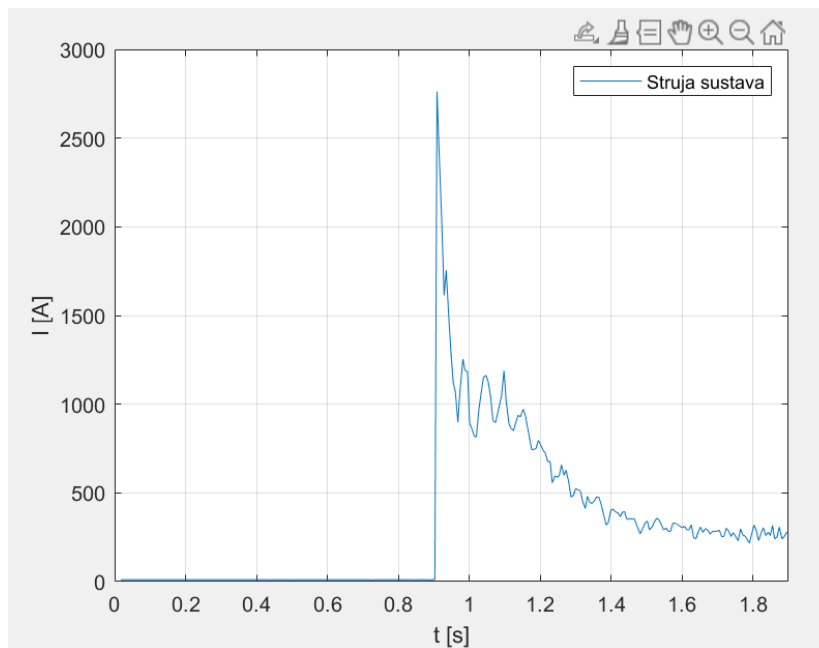
U ovom slučaju se vjerojatno radi o sporadičnom proklizavanju pogonskih kotača prilikom zaleta vozila, a zbog ne idealne adhezije kotača i podloge. Uslijed gubitaka kontakta (smanjenja trenja) motor biva naglo rasterećen pa dolazi do njegovog zaleta na veću brzinu čime se povećava inducirana elektromotorna sila (EMS). Zbog toga dolazi do smanjenja struje (i okretnog momenta), te se trenje kotača vraća u stabilni dio karakteristike. Ovaj proces se ponavlja sve dok vozilo ne ubrza do stacionarne brzine longitudinalnog gibanja.



Slika 43 Graf ovisnosti struje sustava o popunjenosti PWM-a (MATLAB)

Utvrđeno je da vozilo funkcionira kao očekivano te da promjenom popunjenosti PWM signala mijenjamo brzinu istosmjernih DC motora.

Sljedeći graf prikazuje strujno opterećenje sustava pri pokretanju iz mirovanja u najgorem slučaju, odnosno s najvećim ubrzanjem. Ovo je postignuto postavljanjem maksimalnog referentnog napona u trenutku kada vozilo stoji.



Slika 44 Graf struje ovisno o vremenu pri kretanju

Vršno strujno opterećenje pri kretanju iz mirovanja prema prijašnjem grafu iznosi:

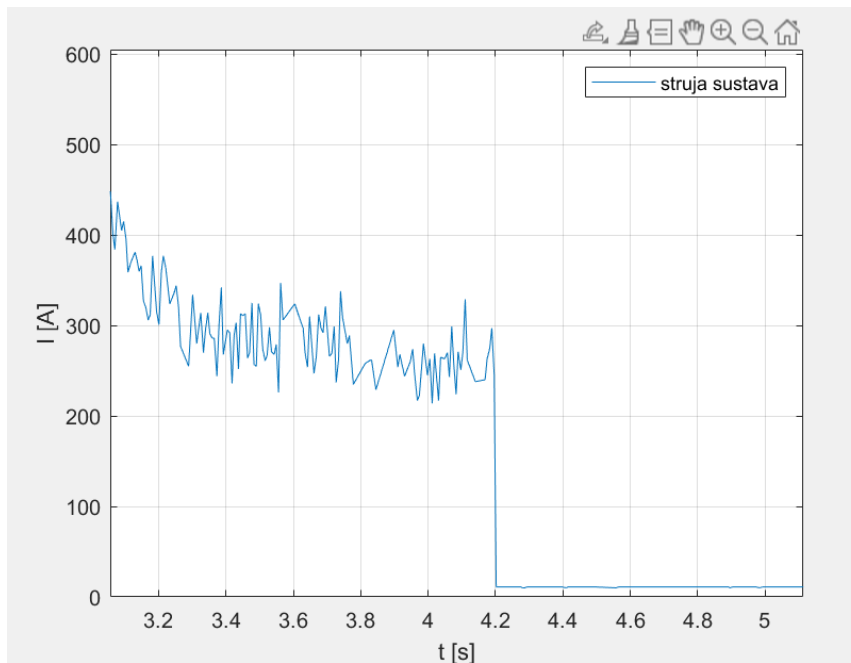
$$I_{max1} = 2.75 \text{ A.} \quad (6.8)$$

Ova vrijednost ne preopterećuje ikoje komponente vozila. Najbliže dolazi do maksimalne vrijednosti struje L289N modula. Vršna dozvoljena vrijednost struje po H-mostu modula je 2A. U provedenom eksperimentu vršna vrijednost po H-mostu iznosila je

$$\frac{I_{max1}}{2} = 1.375 \text{ A} < 2 \text{ A} \quad (6.9)$$



Sljedeći graf prikazuje strujno opterećenje sustava pri maksimalnom kočenju koje se postiže postavljanjem referentnog napona na vrijednost  $U_r = 0$  kada se vozilo kreće maksimalnom brzinom.



Slika 45 Graf struje ovisno o vremenu pri kočenju

Iz grafa vidljivo je da pri kočenju sa maksimalne brzine struja ne postiže negativnu vrijednost. Regenerativno kočenje se događa ali radi niske efikasnosti izabranih DC motora i velikog pada napona od 2V pri prolasku struje kroz H-most iznos postignute elektromotorne sile nije dovoljan da preokrene smjer struje u bateriju.

## **7. ZAKLJUČAK**

Dizajniran pogonski sustav sa istosmjernim DC motorima makete sposoban je krenuti iz mirovanja, postići značajnu brzinu te regenerativno kočiti bez strujnih preopterećenja. Pri regenerativnom kočenju razlika potencijala između relativno slabe elektromotorne sile dobivene u odabranim ne efikasnim elektromotorima i baterije, te veliki pad napona između baterije i motora dovodi do slučaja da maketa nije sposobna puniti bateriju tijekom regenerativnog kočenja. Struja dobivena tijekom kočenja potrošena je prolaskom kroz H-most, te je njezini jedini vidljiv utjecaj ugrijavanje njegovih komponenti. Sustav iskorištavanja kinetičke energije koje vozilo sadržava tijekom gibanja za punjenje baterije putem regenerativnog kočenja je izvediv. Uvođenjem baterije većeg napona smanjili bi utjecaj velikog pada napona prolaskom struje kroz H-most ne efikasnog L298N modula, te bi se postigao potpuni potencijal DC motora. Također uvođenjem DCDC boost konvertera mogla bi se nova veća elektromotorna sila dalje povećati i osigurati da postigne veći iznos od napona baterije. U tom slučaju struja bi krenula teći iz motora u bateriju. Navedenim promjenama maketa bi bila sposobna puniti bateriju tijekom regenerativnog kočenja.

Razvoj sustava koji iskorištavaju kinetičku energiju vozila tijekom regenerativnog kočenja iznimno je bitno za sva električna vozila. Umanjivanje negativnih utjecaja koje težina baterije električnih vozila uvodi ovakvim sustavima važan je element u poboljšavanju njihove efikasnosti. Poboljšanja efikasnosti koristeći ovaj princip nisu česti na malim električnim vozilima kao što je ova maketa, ali jesu izvedivi i mogli bi biti češće implementirani. Osposobljavanje makete za punjenje baterije regenerativnim kočenjem izvedivo je prijašnje navedenim promjenama i to na cjenovno prihvatljiv način.

## LITERATURA

1. Pavković, Danijel – Elektrotehnika, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2024.
2. Pololu 20D 12V 25:1 DC motor <https://www.pololu.com/product/3474>
3. L298N motor driver, [https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298\\_H\\_Bridge.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf)
4. Turnigy 1500 mAh Li-Po baterija, [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-1500mah-3s-20c-lipo-pack.html?store=en\\_us](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-1500mah-3s-20c-lipo-pack.html?store=en_us)
5. Dasduino Core mikrokontroler, <https://soldered.com/product/dasduino-core/>
6. NRF24L01+ radiokomunikacijski modul, <https://soldered.com/product/nrf24l01-module-24ghz/>
7. INA219 senzor, <https://soldered.com/product/voltage-current-sensor-ina219-breakout/>
8. 500 mAh Li-ion baterija, <https://soldered.com/product/li-ion-battery-500mah-3-7v/>
9. Creality Ender 3 S1, <https://www.creality.com/products/creality-ender-3-s1-3d-printer>
10. Koeficijent trenja među materijalima, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2011/1/012034/pdf>
11. Arduino biblioteke, <https://forum.arduino.cc/>
12. Joško Deur, Danijel Pavković, Nedjeljko Perić, Martin Jansz, Davor Horvat (2004.) An Electronic Throttle Control Strategy Including Compensation of Friction and Limp-Home Effects. IEEE TRANSACTIONS OF INDUSTRY APLICATIONS, vol. 40, No. 3.
13. Danijel Pavković, Mihael Cipek, Zdenko Kljaić, Tomislav Josip Mlinarić, Mario Hrgetić i Davor Zore (2018.) Damping Optimum-Based Design of Control Strategy Suitable for Battery/Ultracapacitor Electric Vehicles. Energies 2018,11,2854

## **PRILOG**

- I. Arduino kod
- II. Tehnička dokumentacija

```
Kod vozila:
#include "Wire.h"
#include "Adafruit_INA219.h"
#include "SPI.h"
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
//definiranje INA219 senzora
Adafruit_INA219 ina219;

//definiranje pinova prvog motora
#define motor1in1 A2
#define motor1in2 A3
#define motor1enA 6
//definiranje pinova drugog motora
#define motor2in1 A1
#define motor2in2 A0
#define motor2enB 5

//Postavljanje adresa radiokomunikacije
RF24 radio(9, 10); // CE, CSN
const byte address[][6] = {"00010", "00011"};

//Definiranje paketa slanih preko radiokomunikacije
struct recievedData{
    byte xrdata;
    byte yrdata;
    byte button;
    byte Speed;
};
recievedData rdat;
```

```
int xdata;
int ydata;
int Speed;
int button;

struct povratno{
    float struja;
    byte napon;
    byte snaga;
};

povratno pdat;

void setup() {
    //Postavljanje parametara radiokomunikacije
    Serial.begin(115200);
    radio.begin();
    radio.setAutoAck(false);
    radio.openWritingPipe(address[1]);
    radio.openReadingPipe(1, address[0]);
    radio.setDataRate(RF24_2MBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);

    //Serial.println("Mjerenje struje: ");
    ina219.begin();
    pinMode(motor1in1, OUTPUT);
    pinMode(motor1in2, OUTPUT);
    pinMode(motor1enA, OUTPUT);
```

```
pinMode(motor2in1, OUTPUT);
pinMode(motor2in2, OUTPUT);
pinMode(motor2enB, OUTPUT);
}

void loop() {
  //Primanje podataka za kontolu vozila
  radio.startListening();
  if(radio.available()){
    radio.read(&rdat, sizeof(recievedData));
    xdata = rdat.xrdata;
    ydata = rdat.yrdata;
    Speed = rdat.Speed;
    button = rdat.button;

  }

  //Gibanje unaprijed
  if (xdata >= 160){
    int speedF = Speed;
    digitalWrite(motor1in1, HIGH);
    digitalWrite(motor1in2, LOW);
    analogWrite(motor1enA, speedF);
    digitalWrite(motor2in1, HIGH);
    digitalWrite(motor2in2, LOW);
    analogWrite(motor2enB, speedF);

  }
```

```
//Gibanje unazad
else if(xdata <= 153){
    int speedF = Speed;
    digitalWrite(motor1in1, LOW);
    digitalWrite(motor1in2, HIGH);
    analogWrite(motor1enA, speedF);
    digitalWrite(motor2in1, LOW);
    digitalWrite(motor2in2, HIGH);
    analogWrite(motor2enB, speedF);
}
//Mirovanje
else {
    digitalWrite(motor1in1, LOW);
    digitalWrite(motor1in2, LOW);
    analogWrite(motor1enA, 0);
    digitalWrite(motor2in1, LOW);
    digitalWrite(motor2in2, LOW);
    analogWrite(motor2enB, 0);
}

//Očitanje vrijednosti struje,napona i snage
float struja = 0;
float napon = 0;
float snaga = 0;
struja = ina219.getCurrent_mA();
napon = ina219.getBusVoltage_V();
snaga = ina219.getPower_mW();
```



```
//Slanje izmjerenih vrijednosti  
radio.stopListening();  
pdat.struja = struja;  
pdat.napon = napon;  
pdat.snaga = snaga;  
radio.write(&pdat,sizeof(povratno));  
  
}
```

```
Kod radio upravljača:
#include "SPI.h"
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"

//Postavljanje adresa radiokomunikacije
RF24 radio(9,10); // CE, CSN

const byte address[][6] = {"00010","00011"};

//Definiranje paketa slanih preko radiokomunikacije
struct Data {
    byte xdata;
    byte ydata;
    byte button;
    byte Speed;
};

struct povratno {
    float struja;
    byte napon;
    byte snaga;
};

Data dat;
povratno pdat;

unsigned long currentMillis;
unsigned long prevMillis;
```

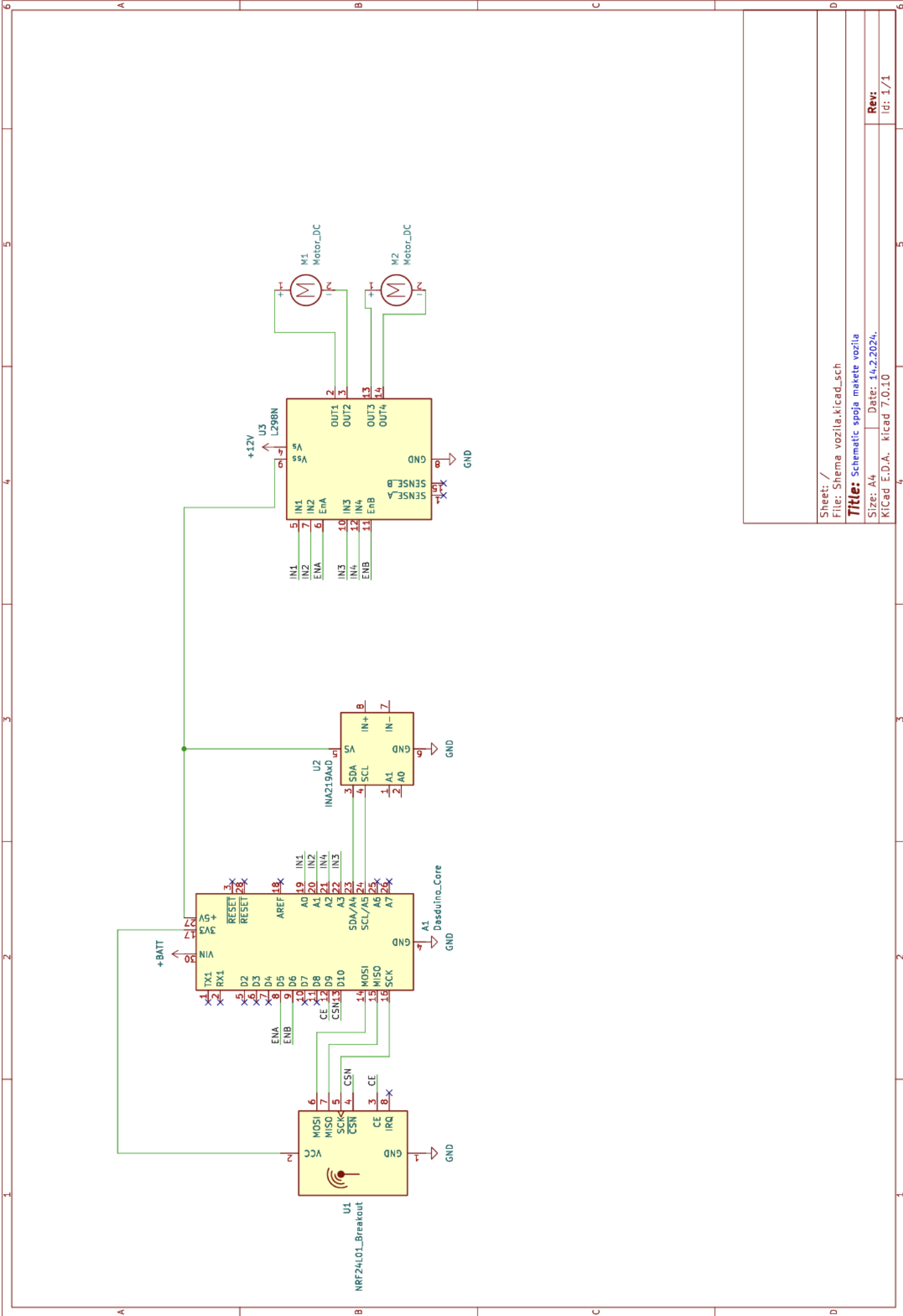
```
void setup() {
  //Postavljanje parametara radiokomunikacije
  Serial.begin(115200);
  radio.begin();
  radio.setAutoAck(false);
  radio.openWritingPipe(address[0]);
  radio.openReadingPipe(1,address[1]);
  radio.setDataRate(RF24_2MBPS);
  radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);

  dat.xdata = 145;
  dat.ydata = 145;
  dat.button = 0;

  //Definiranje pinova Joysricka i potencijometra
  pinMode(5, INPUT_PULLUP);
  pinMode(A3, INPUT_PULLUP);
}

void loop() {
  //Slanje podataka za kontrolu vozila
  radio.stopListening();
  currentMillis=millis();
  if(currentMillis - prevMillis > 10){
    prevMillis=currentMillis;
    if(digitalRead(5)==HIGH){
      dat.Speed=map(analogRead(A3),0,1023,0,255);
    }else{
      dat.Speed=0;
    }
  }
}
```

```
}  
    dat.xdata=map(analogRead(A4),0,1023,0,255);  
    dat.ydata=map(analogRead(A5),0,1023,0,255);  
    dat.button = digitalRead(5);  
  
    radio.write(&dat,sizeof(Data));  
  
}  
//Primanje izmjerenih vrijednosti  
radio.startListening();  
if (radio.available()){  
    radio.read(&pdat, sizeof(povratno));  
    int struja = -pdat.struja;  
    int napon = pdat.napon;  
    int snaga = pdat.snaga;  
    Serial.print(struja);Serial.print(",");Serial.print("mA");Serial.print(",");  
    Serial.print(napon);Serial.print(",");Serial.print("V");Serial.print(",");  
    Serial.print(snaga);Serial.print(",");Serial.println("mW");  
  
}  
    delay(5);  
} //end of loop
```



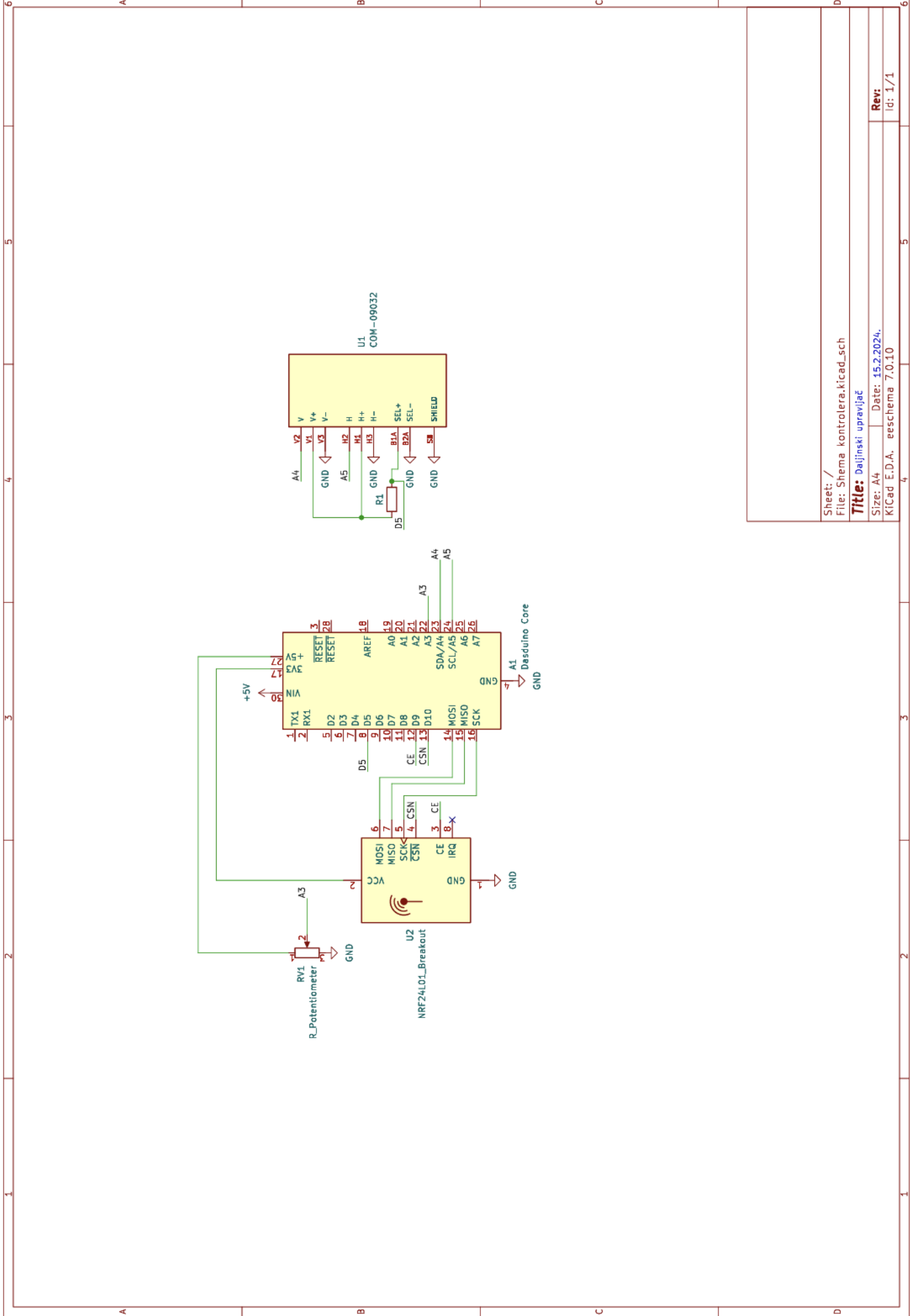
Sheet: /  
 File: Shema vozila.kicad\_sch

**Title:** Schematic spoja makete vozila

Size: A4    Date: 14.2.2024.

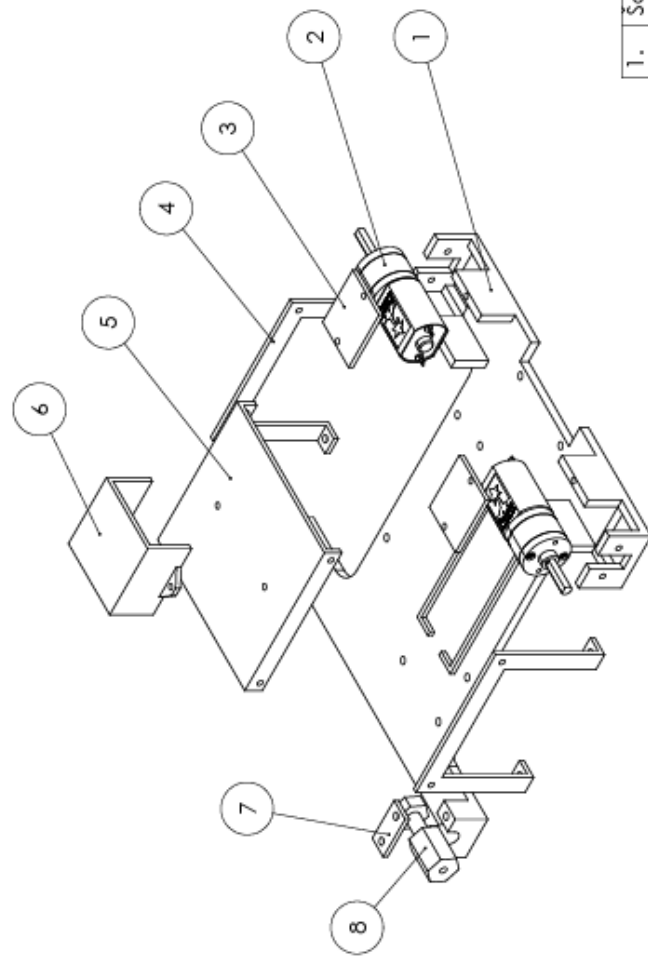
KiCad E.D.A.    kicad 7.0.10

Rev: 1/1  
 Id: 1/1



Sheet: /  
 File: Shema kontrolera.kicad\_sch  
**Title:** Daljinski upravljač  
 Size: A4  
 Date: 15.2.2024.  
 KICad E.D.A. eeschema 7.0.10

**Rev:**  
 Id: 1/1



1.	Šasija makete														
2.	Pololu 12V 20D CB DC motor														
3.	Poklopac motora														
4.	Okvir makete														
5.	Poklopac makete														
6.	Držač baterije														
7.	Poklopac prednje osovine														
8.	Prednja osovina														
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Črtani broj	Norma	Materijal	Sirove dimenzije	Masa								
	Projektor	13.2.24	Antonio Markov												
	Razradio														
	Črtao														
	Pregledao														
	Vodio u radu														
	Objekt:	Objekt broj: ZAVRŠNI RAD													
		R. N. broj:													
	Napomena:	Materijal: PLA Masa: 270 g													
		Naziv: Sklop makete vozila													
		Mjerilo originala 1:2													
		Črtani broj:													
		Kopija													
		Format: A4													
		Listova: 1													
		List: 1													