

GIMNAZIJA ŠENTVID
LJUBLJANA

MERJENJE MOČI IN IZKORISTKA MODELA SOBNEGA KOLESA KOT ELEKTRIČNEGA GENERATORJA

RAZISKOVALNA NALOGA IZ FIZIKE

AVTORJA:

Grega Rotar, 3.C

Simon Premk, 3.B

MENTOR:

Goran Mitrović, prof.

Ljubljana, 2023/2024

ZAHVALA

Najlepša hvala prof. Goranu Mitroviću za vso pomoč in za vodenje skozi raziskovalno nalogo.

Hvala Klemnu Rotarju za pomoč pri praktični izdelavi sobnega kolesa in za prostor, ki nama ga je odstopil v uporabo.

Špecialna zahvala Anžetu Marinku za omogočen 3D tisk.

Hvala ravnatelju mag. Jaku Erkerju za odobreno sofinanciranje raziskave.

Hvala Jaku Torkarju za vse kolesarsko soudejstvovanje.

Hvala družini Rotar za pomoč pri umerjanju merilnika moči.

Hvala ddr. Francki Premk za lekturo.

<https://l.etiam.si/zahvala2024>

© 2024

KAZALO VSEBINE

MERJENJE MOČI IN IZKORISTKA MODELA SOBNEGA KOLESA KOT ELEKTRIČNEGA GENERATORJA	1
ZAHVALA	2
KAZALO VSEBINE	3
KAZALO SLIK	5
POVZETEK	7
ABSTRACT	7
1 UVOD	8
1.1 HIPOTEZE	8
2 TEORIJA	9
2.1 PRENOS MOČI PRI VRTENJU	9
2.1.1 ZOBNIŠKI PRENOS	9
2.1.2 JERMEČICA	10
2.2 PRETVORBA MEHANSKE ENERGIJE V ELEKTRIČNO	11
2.2.1 ODKRITJE INDUKCIJE, FARADAY, PRIMERI	11
2.2.2 MAGNETNI PRETOK	12
2.2.3 INDUKCIJSKI ZAKON	13
2.2.4 TRIFAZNA NAPETOST	14
2.3 VRTEČE MAGNETNO POLJE	17
2.4 ELEKTROMOTORJI IN DINAMO STROJI	19
2.4.1 ENOSMERNI ELEKTROMOTOR	19
2.4.2 IZMENIČNI ELEKTROMOTORJI	20
2.4.3 SINHRONI MOTOR	20
2.4.4 INDUKCIJSKI MOTOR	21
2.5 SOBNO KOLO (PROFESIONALNO)	22
2.5.1 ZGRADBA	22
2.5.2 PRIKAZ MERITEV	23
2.5.3 SENZORJI	23
2.5.4 MOČI KOLESARJEV	23
2.6 OPIS OPREME ZA EKSPERIMENTALNI DEL	25
2.6.1 MIKROKRMILNIKI	25
2.6.2 SENZORJI	26
2.6.3 PROGRAMSKA OPREMA IN PROGRAMSKI JEZIKI	29
3 EKSPERIMENTALNI DEL	31

3.1	UVOD, NAMEN RAZISKAVE, PRIČAKOVANI REZULTAT	31
3.2	MODEL SOBNEGA KOLESA.....	32
3.2.1	ZGRADBA KOLESA	32
3.2.2	UNIVERZALNI ELEKTROMOTOR	34
3.3	SENZORJI, ZASNOVA MERITEV	36
3.3.1	PROGRAMSKE FUNKCIJE ZA BRANJE ANALOGNIH VHODOV.....	36
3.3.2	PROGRAMSKE FUNKCIJE ZA KOMUNICIRANJE PREK SERIJSKIH KOMUNIKACIJ	38
3.3.3	SENZOR VHODNE MOČI	44
3.3.4	SENZORJI NA IZHODU	46
3.3.5	PRIKAZ IN BELEŽENJE PODATKOV	52
3.4	MERJENJE VSTOPNE MEHANSKE MOČI	56
3.5	MERJENJE ELEKTRIČNE MOČI.....	60
3.6	IZKORISTEK	62
3.6.1	KRIVULJA IZKORISTKA	63
3.6.2	UPORABA KRIVULJE IZKORISTKA ZA IZRAČUN VHODNE MOČI ...	67
4	RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK	68
5	VIRI	70

KAZALO SLIK

Indukcija pri premikanju vodnika v magnetnem polju	11
Približevanje ali oddaljevanje magneta povzroči sunek napetosti v tuljavi	11
Faradayev poskus in demonstracija pojava indukcije	11
Magnetni pretok	12
Razlaga Lenzovega pravila	13
Model generatorja sinusne izmenične napetosti	14
Časovna odvisnost magnetnega pretoka in inducirane napetosti v tuljavi	14
Trifazna napetost	15
Trifazna vtičnica in vtikač	15
Trifazni tok	16
Šolski trifazni generator	16
Vrteče magnetno polje – dve tuljavi	17
Vrtenje vektorja magnetnega polja – trenutne časovne slike	17
Trifazni zamik	18
Indukcijski asinhronski elektromotor	18
Enosmerni elektromotor	19
Preprost model šolskega enosmernega elektromotorja	19
Shematski prikaz izmeničnega sinhronega elektromotorja	20
Zgradba indukcijskega (asinhronskega) elektromotorja	21
Arduino Uno R4 Wi-Fi	25
DOIT ESP32 DEVKIT V1	26
Senzor toka ACS712	26
Hallovo pojav	26
Izhodna napetost v razmerju z zaznanim tokom	27
Primer merilnih celic	27
Modul z čipom HX711	27
Primer deformacije predmeta z nameščenimi merilnimi celicami	28
Wheatstonov mostič s štirimi merilnimi celicami	28
Žiroskop GY-521	28
Uporabniški vmesnik programa Fusion 360	29
Uporabniški vmesnik Arduino IDE 2	30
Pogled na sobno kolo od zadaj	32
Pogled iz strani na pogonski sklop in prestavno razmerje	33
Najin univerzalni elektromotor	35
Primer programa za nastavitev kanala kot VHODNI / IZHODNI	36
Primer funkcije za pridobitev napetosti na analognem kanalu	36
Primer funkcije za pridobitev dejanske napetosti na delilniku napetosti	37
Program za branje surovih vrednosti senzorja HX711	38
I2C vezava in prenos podatkov	39
Inicializacija I2C komunikacije	39
Konfiguracija in nastavitev območja meritev	40
Primer programa za pridobivanje surovih vrednosti MPU6050	41
Pretvorniki surovih vrednosti pospeškomera v berljive vrednosti	42
Pretvorniki surovih vrednosti žiroskopa v berljive vrednosti	42

Napravica za obdelavo podatkov vhodne moči	44
Graf navora na gonilki v odvisnosti od časa	45
Najin sistem senzorjev na izhodu	46
Vezava ACS712 z ESP32	47
Primer funkcije za branje električnega toka senzorja ACS712	47
Primer funkcije za branje električne napetosti	48
Vezava magnetnega stikala z mikrokrmilnikom	49
Primer funkcije za izračun obratov na minuto (RPM).....	49
Merjenje števila obratov na minuto	50
Primer programa za izračun vrtilne frekvence tahometra	51
Tahometer	51
Shematski prikaz povezljivosti sobnega kolesa	52
MQTT shema.....	52
Osnoven program za pošiljanje podatkov prek MQTT komunikacije	54
Celotni sistem merilnika vstopne mehanske moči	56
Celoten sistem za analiziranje podatkov.....	58
Graf umeritve merilnih celic	59
Sistem na izhodu	60
Napetost v odvisnosti od vrtilne frekvence elektromotorja	62
Shema generatorja s porabnikom.....	63
Izkoristek v odvisnosti od izhodne moči za nestrukturirane meritve	64
Izkoristek v odvisnosti od izhodne moči za strukturirane meritve	66

POVZETEK

Izdelala sva sobno kolo, ki generira elektriko. Podatki, ki bi se jih dalo pri takem sobnem kolesu meriti, so moč kolesarja, vrtilna frekvenca pedal, napetost izhodne elektrike ter njen tok. Iz tega je mogoče pridobiti električno moč. Dalo bi se meriti še vrtilno frekvenco elektromotorja. Izdelala sva merilnike za vse naštete komponente in sama napisala vse programe. Naredila sva mehanski prenos, da se nama elektromotor obrača. Z generiranjem elektrike sva uspela pognati žarnice, napajati računalnik in razvlažilec. Uspelo je tudi polnjenje pametnega telefona. Izračunala sva izkoristek in postavila izračun za poznavanje vhodne moči brez delovanja senzorja vhodne moči.

ABSTRACT

We made an exercise bike that generates electricity. Data that could be measured with such an exercise bike are the power of the rider, the rotation frequency of the pedals, the voltage of the output electricity and its current. Electrical power can be obtained from this. The rotation frequency of the electric motor could also be measured. We made meters for all the listed components and wrote all the programs ourselves. We made a mechanical transmission so that the electric motor turns to us. By generating electricity, we managed to run the light bulbs, power the computer and the dehumidifier. We also managed to charge the smartphone. We calculated the efficiency and set up a calculation for knowing the input power without the input power sensor operating.

1 UVOD

Gradnjo sobnega kolesa, ki generira elektriko, sva začela septembra 2023. Mislila sva celotno konstrukcijo ustvariti sama, od ogrodja kolesa do elektromotorja. Zaradi srečnega naključja izgradnja ogrodja ni bila potrebna. Idejo sva dobila med poletjem. Velika prednost, ki je omogočila vse delo, je bila, da sva bila oba navdušena nad idejo. Projekta sva se lotila zelo samostojno. Eden od naju je namreč obvladal programiranje. Drug razlog za samostojnost je bila tudi cena komponent v primeru, da jih ne bi izdelala sama. Mnogo za projekt potrebnih komponent sva imela na zalogi. Mesto, kjer se je ta zaloga večinsko nahajala, sva imela na voljo, kot delovni prostor za najino raziskovalno nalogo.

Generiranje elektrike je eno od splošno obravnavanih vprašanj v svetu znanosti. Podobno kot generiranje elektrike je za Slovence trenutno aktualno kolesarstvo, ki je v svojem vrhuncu. Zato sva se lotila nečesa, kar bi lahko obe temi povežalo. Predvsem v zimskem času, ko ceste vidijo le redkokatero kolo, večina kolesarjev, ki želijo ohraniti svojo telesno pripravljenost za naslednjo kolesarsko sezono, svoje treninge opravlja v objemu svojega doma, na sobnem kolesu. Ta sobna kolesa so narejena tako, da se relativno ogromne količine energije izgubijo.

Zajem te energije je možen, vendar ne s 100-% izkoristkom. Nobena pretvorba energije iz ene v drugo obliko nikoli ne omogoča takega izkoristka. Kolikšen je lahko izkoristek, je odvisno od energij, iz katerih in v katere se pretvarja. Izkoristek bi bil pri prehodu iz sobnih koles, ki izgubljajo energijo, na taka, ki energijo v veliki meri uporabijo, eden izmed glavnih dejavnikov za kolesarje.

Dober primer koristi sobnega kolesa je telefon. Večina ljudi ima vsaj enega. Kolikšen bi bil doprinos sobnega kolesa k polnjenju telefona? Da bi lahko z enim samim treningom napolnil telefone cele družine?

1.1 HIPOTEZE

1. Izkoristek električnega generatorja bo presegel vrednost 50 %.
2. Cena izdelave celotnega sobnega kolesa ne bo presegla 400 EUR.
3. Povprečen trenirani ljubiteljski kolesar lahko s sobnim kolesom napolnil dva ali več telefonov s 5000-mAh baterijo.
4. Izdelava sobnega kolesa lahko privede do mnogih nepredvidenih zapletov. Ti zapleti bi v najslabšem primeru lahko onemogočili končno izdelavo.

2 TEORIJA

2.1 PRENOS MOČI PRI VRTENJU

Generatorji elektrike delujejo na visokih obratih. Zaradi tega se je pri generaciji elektrike nemogoče izogniti visokohitrostnemu prestavnemu razmerju. Tako razmerje lahko povzroča velike težave, saj je izmed vseh delov generatorja najbolj občutljivo; kar se bo najprej pokvarilo, so prestave. Zakaj je to tako, je, ker so spremembe v navoru in vrtljajih tako velike, da so minimalni premiki kritični za delovanje.

Generatorji elektrike delujejo pri obratih, ki se vrtijo v območju med tisoč in nekaj deset tisočih obratih na minuto. Ker vhodno vrtenje nikakor ne more doseči nekaj deset tisoč obratov na minuto, je za to potrebno uporabiti visokohitrostna prestavna razmerja. Leta morajo pomnožiti vhodno hitrost vrtenja po potrebi tudi 1000-krat, kjer se izdelava močno komplicira, saj lahko zaradi nenatančne izdelave prehitro pride do izgub.

Visokohitrostna prestavna razmerja uporabljamo za pretvorbo velike količine navora v veliko število obratov in obratno. Pri idealnem prenosu se moč ohranja. Delo, ki ga opravi navor na določen člen, izračunamo z enačbo:

$$A = M\phi$$

Moč izračunamo kot vloženo delo na enoto časa:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{M\phi}{t}$$

Kot, opravljen v enoti časa, lahko izrazimo kot kotno hitrost:

$$\frac{\phi}{t} = \omega$$

Moč pri vrtenju člena v prestavnem razmerju je zato:

$$P = M\omega$$

2.1.1 ZOBNIŠKI PRENOS

Zobniški prenos je najpogostejše uporabljen način prenosa za visokoprestavna razmerja. Uporablja se za avtomobilske prestave, za prenose v elektrarnah ... Število zob določa, v kakšnem razmerju bosta zobnika med seboj. Kot primer lahko podamo razmerje kolesarskega prenosa. Na pogonskem sklopu, torej pri pedalih, bomo imeli dva zobnika. Eden naj ima 50 zob ter drugi 34. Ta zobnika se lahko vežeta na enajst različnih zobnikov, ki pogonski sklop povezujejo z zadnjo gumo in omogočajo poganjanje. Teh enajst zobnikov naj ima med 11 in 31 zobcev, dva sosednja zobnika naj se razlikujeta za dva zobca. Sedaj lahko vidimo, da pri uporabi razmerja 50/11 ob opravljenem enem obratu naše zadnje kolo naredi približno 4,5 obrata. Pri tem se z navorom zgodba ravno obrne, saj je na zadnjem zobniku 4,5-krat manjši navor kot na sprednjem. Ta razmerja se na enak način spreminjajo glede na uporabljene zobnike, vse do zobnikov 34/31, kjer se obrati in navor na pogonske sklope približno izenačijo.

Zobniki se uporabljajo tudi za spremembo smeri vrtenja določene gredi (npr.: avtomobilska prestava za vzvratno vožnjo).

2.1.2 JERMENICA

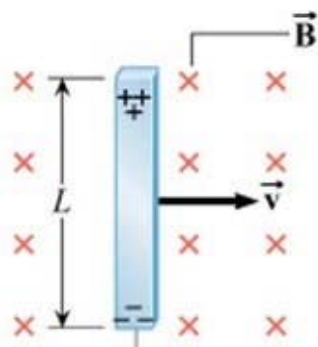
Jermenica je uporabljana za prenos vrtenja na razdalji. Ker so stiki med jermenskimi zobniki in jermenico manj občutljivi, je uporaba jermenice bolj trajna rešitev, se manj kvari. Jermenica je pogosto izdelana iz usnja ali umetnega usnja, kar pomeni, da se sčasoma obrabi, vendar se jo lahko nadomesti na že obstoječi zobniški sistem. Oba načina prenosa se lahko uporabljata za enak namen, prenos vrtljajev, vendar pod drugačnimi pogoji. Avtomobilski alternator je primer uporabe jermenice, zobniki bi omejili postavitve in po možnosti onemogočili izgradnjo. Zato je izbira pravilnega sistema pomembna.

2.2 PRETVORBA MEHANSKE ENERGIJE V ELEKTRIČNO

2.2.1 ODKRITJE INDUKCIJE, FARADAY, PRIMERI

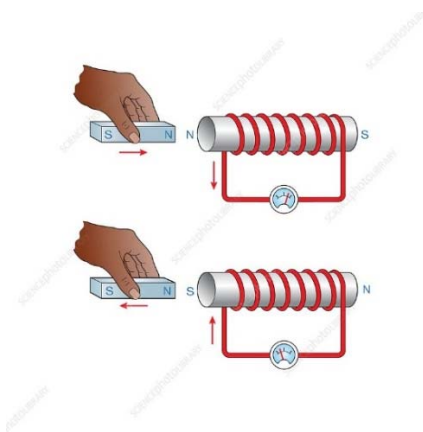
Pojav indukcije je odkril angleški znanstvenik Michael Faraday okrog leta 1830. Njegova eksperimentalna odkritja je matematično pojasnil James Clerk Maxwell, ki je elektromagnetne pojave matematično zapisal.

Faraday je v svojih uvodnih odkritjih indukcije dokazal, da se v vodniku, ki ga pomikamo v magnetnem polju, tako da ta seka magnetne silnice, inducira električna napetost.

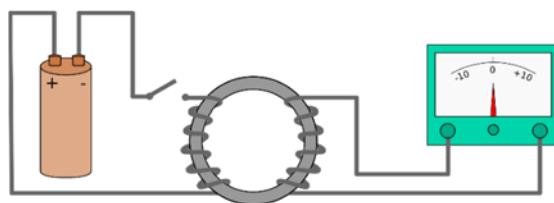


Slika 1 Indukcija pri premikanju vodnika v magnetnem polju

Faraday je kasneje svoja odkritja nadgradil in dokazal, da inducirana napetost nastane tudi v zanki ali tuljavi, ki jo relativno premikamo glede na smer magnetnega polja ali pa jo vstavimo v spreminjajoče magnetno polje. Ta odkritja so poleg razumevanja elektromagnetnih pojavov omogočila razvoj elektromotorjev, generatorjev električne napetosti in transformatorjev.



Slika 2 Približevanje ali oddaljevanje magneta povzroči suneč napetosti v tuljavi



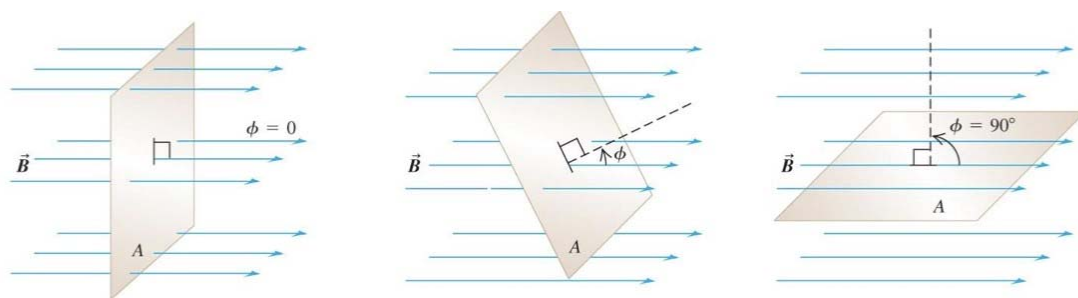
Slika 3 Faradayev poskus in demonstracija pojava indukcije

2.2.2 MAGNETNI PRETOK

Magnetni pretok Φ_M skozi izbrano ploskev definiramo kot skalarni produkt vektorja gostote magnetnega polja in vektorja površine ploskve,

$$\Phi_M = BS \cos \varphi$$

kjer je B gostota magnetnega polja, S površina ploskve in φ kot, ki ga oklepata vektor magnetnega polja in vektor ploskve.



Slika 4 Magnetni pretok

Enota za magnetni pretok je Wb . Lahko jo izrazimo tudi kot Vs ali Tm^2 .

Magnetni pretok predstavlja merilo za število magnetnih silnic, ki prebadajo ploskev. Pri izbrani ploskvi je največji, če silnice ploskev prebadajo pravokotno, in je enak nič (0) v primeru, ko silnice ležijo v ravnini ploskve.

Magnetni pretok lahko spreminjamo na različne načine, pri nespremenjeni legi zanke lahko spreminjamo gostoto magnetnega polja, zanki spreminjamo površino, jo zasučemo ali pa jo vrtimo v magnetnem polju. Kot bomo videli, je vsaka sprememba magnetnega pretoka povezana z nastankom inducirane napetosti. Pojav imenujemo elektromagnetna indukcija. Indukcija omogoča pretvarjanje mehanske energije v električno.

2.2.3 INDUKCIJSKI ZAKON

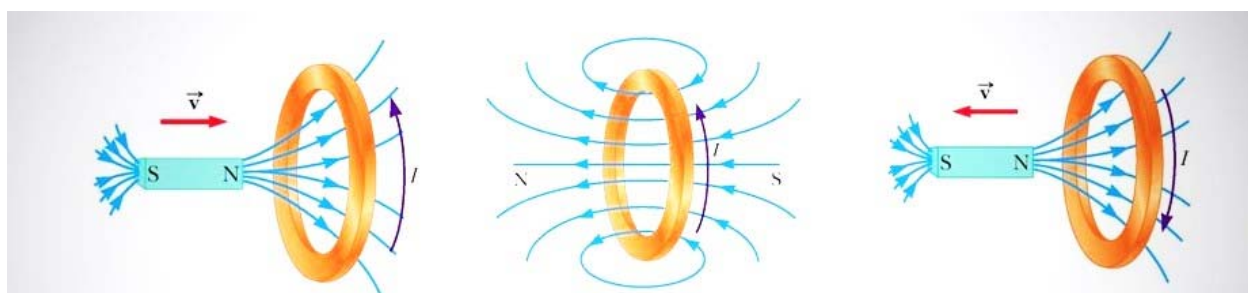
Medsebojni vpliv električnega in magnetnega polja opisujejo znamenite Maxwellove enačbe, ki predstavljajo temeljno razlago elektromagnetnih pojavov. Enačbe med drugim pojasnijo, da spreminjanje magnetnega polja inducira nastanek električnega polja. Pojav je znan kot elektromagnetna indukcija in je zapisan v obliki induksijskega zakona (Faradayev induksijski zakon).

Induksijski zakon razkrije, da vsaka sprememba magnetnega pretoka v zanki ali tuljavi povzroči nastanek inducirane napetosti. Magnetni pretok lahko spremenimo na različne načine, ki so navedeni v nadaljevanju. Zanko lahko zavrtimo, tako da v njej zmanjšamo ali povečamo magnetni pretok. Pri nespremenjeni orientaciji zanke spreminjamo gostoto magnetnega polja. Lahko pa tudi spreminjamo površino zanke. Če zanko vrtimo enakomerno v homogenem magnetnem polju, se v njej inducira sinusna izmenična napetost. Zakon matematično zapišemo kot:

$$U_i = \frac{-\Delta\Phi_M}{\Delta t}$$

Inducirana napetost v zanki ali tuljavi je enaka spremembi magnetnega pretoka v časovni enoti. Predznak v enačbi določa smer toka, v katero inducirana napetost požene električni tok v zanki.

Smer toka določimo z uporabo Lenzovega pravila. Pravilo pove, da inducirana napetost požene tok v takšni smeri, da zavira spremembo magnetnega pretoka.

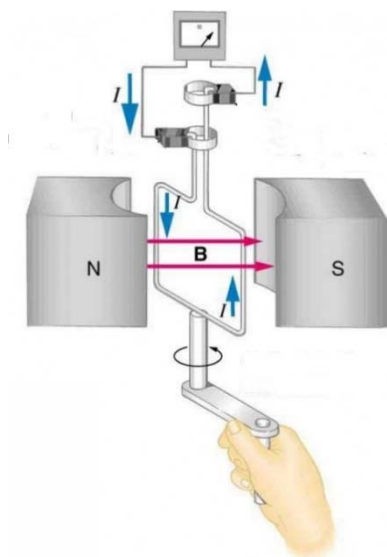


Slika 5 Razlaga Lenzovega pravila

2.2.3.1 INDUKCIJA PRI VRTENJU ZANKE V MAGNETNEM POLJU IN GENERATOR IZMENIČNE NAPETOSTI

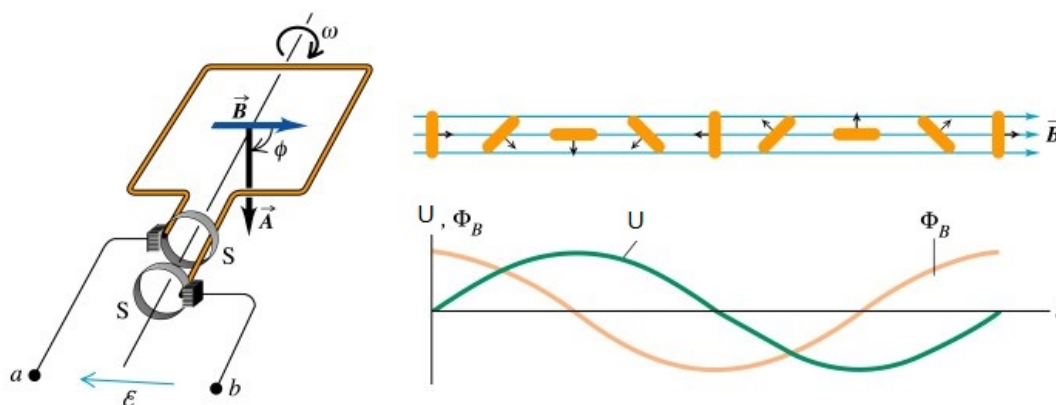
Pojav indukcije lahko izkoristimo za proizvodnjo sinusne izmenične napetosti, ki je eden izmed najpomembnejših načinov njene uporabe.

Generator izmenične napetosti je naprava, ki mehansko energijo pretvarja v električno. Ko zanko ali tuljavo enakomerno vrtimo v homogenem magnetnem polju, se v njej inducira sinusna izmenična napetost. Amplituda napetosti je odvisna od gostote magnetnega polja, števila ovojev, prečnega preseka tuljave in hitrosti vrtenja.



Slika 6 Model generatorja sinusne izmenične napetosti

Časovno odvisnost napetosti zapišemo z enačbo $U = U_0 \sin \omega t$, kjer je $U_0 = NBS\omega$ amplituda izmenične napetosti.

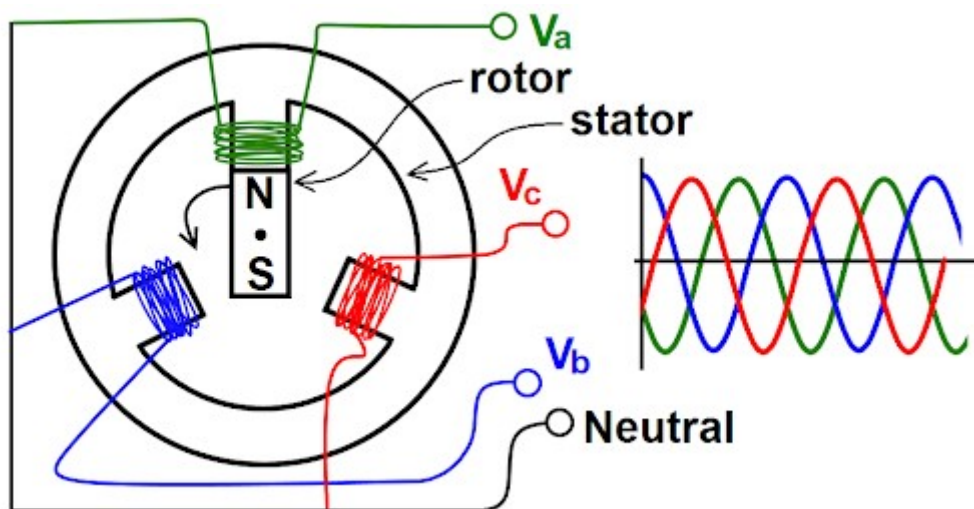


Slika 7 Časovna odvisnost magnetnega pretoka in inducirane napetosti v tuljavi

Magnetni pretok in inducirana napetost sta fazno zamaknjena za $\pi/2$. V trenutkih, ko je magnetni pretok enak 0, napetost doseže maksimalno vrednost in obratno.

2.2.4 TRIFAZNA NAPETOST

Generator trifazne napetosti je izumil in patentiral Nikola Tesla v 80. letih 19. stoletja. Izum je omogočil prenos električne energije na velike razdalje, kar z enosmernim tokom ni mogoče. Generator je osnova današnjega električnega omrežja. Generator trifazne napetosti sestavljajo tri tuljave, ki so razporejene pod kotom 120° . V sredini je magnet, ki se enakomerno vrti in v vsaki tuljavi inducira sinusno izmenično napetost.



Slika 8 Trifazna napetost



Slika 9 Trifazna vtičnica in vtikač

Napetosti so zaradi razporeditve tuljav fazno zamaknjene. Iz krajišč tuljav vodijo vodniki, trije fazni vodniki in en ničelni vodnik. Napetost med posameznim faznim vodnikom in ničelnim vodnikom imenujemo fazna napetost. Napetosti med posameznimi faznimi vodniki pa imenujemo medfazne napetosti. Amplitude medfaznih napetosti so višje od faznih. Medfazne napetosti uporabljamo za napajanje gospodinjskih aparatov, ki zahtevajo večjo moč, predvsem pa za pogon močnih strojev v industriji. Trifazni sistem, ki je napeljan v hiši ali industrijskem objektu, zahteva tudi posebne vtičnice, ki imajo pet priključkov. Običajne vtičnice imajo le tri priključke, ki jih povežemo z eno izmed faz, ničelni vodnik in ozemljitev.

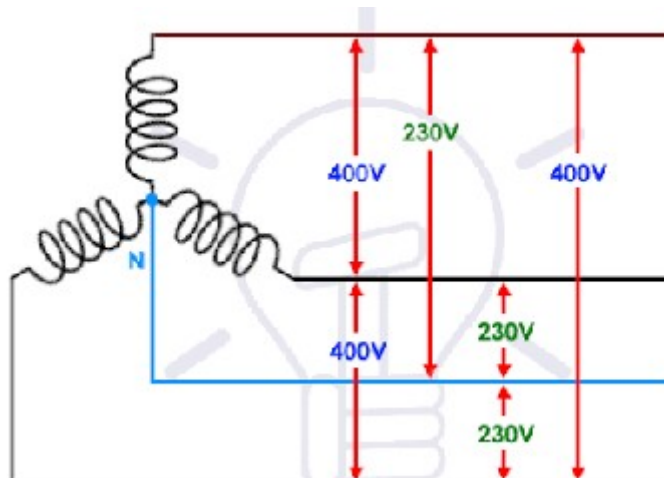
Napetosti posameznih faz poženejo po vodnikih tokove:

$$I_R = I_0 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_S = I_0 \cdot \sin(\omega t)$$

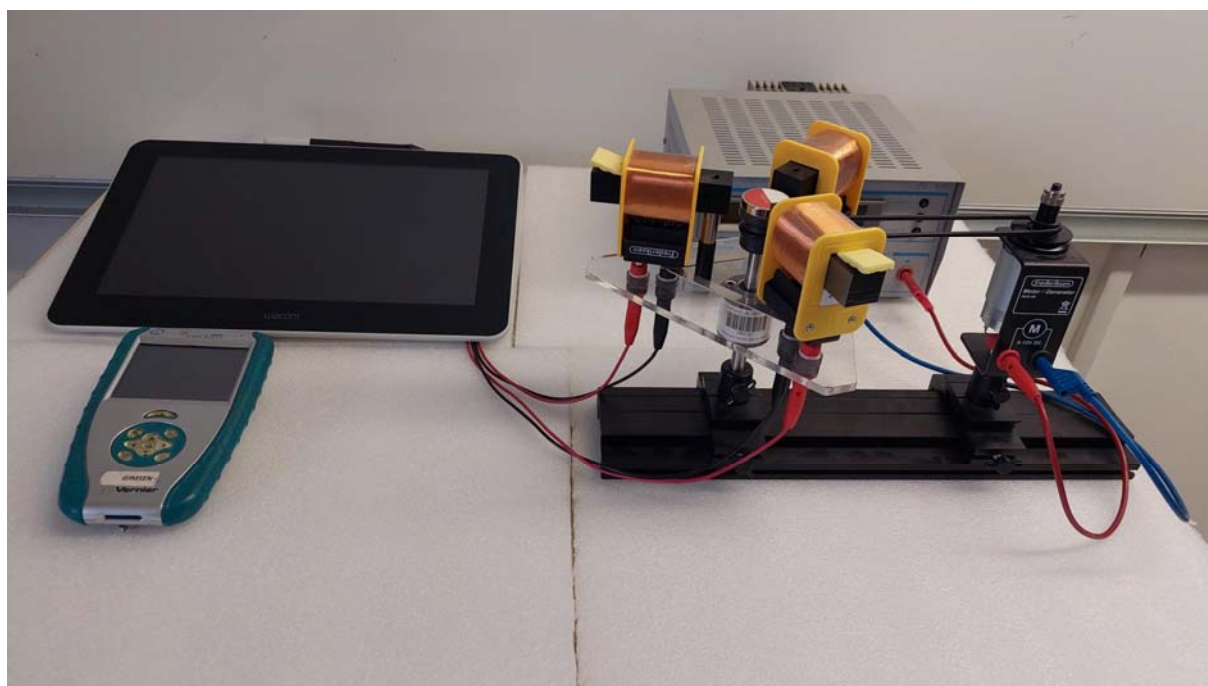
$$I_T = I_0 \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Tokovi so fazno zamaknjeni za 120° . Kratek račun pokaže, da je vsota vseh treh tokov enaka 0. Če vse tri tokove pripeljemo v en vodnik, se ti medsebojno izničijo in po njem ne teče tok. Zato ga tudi imenujemo ničelni vodnik.



Slika 10: Trifazni tok

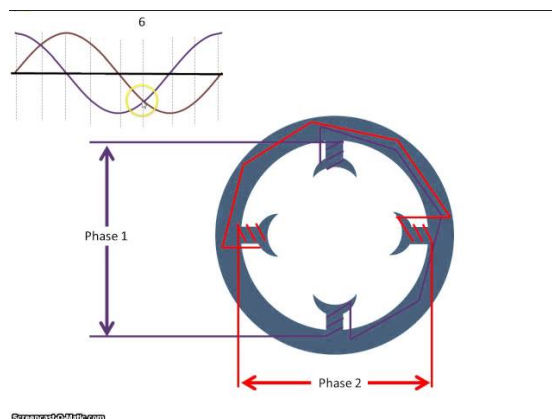
Trifazni sistemi so v primerjavi z enofaznimi bolj učinkoviti, za enako količino prenesene energije potrebujejo manj materiala. Nepogrešljivi so pri pogonih indukcijskih motorjev in strojev, ki zahtevajo veliko moč.



Slika 11 Šolski trifazni generator

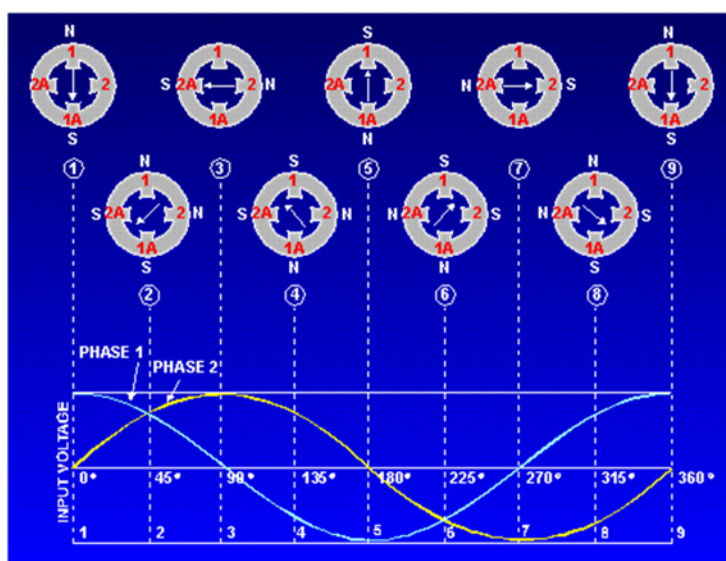
2.3 VRTEČE MAGNETNO POLJE

Dve tuljavi, postavljeni pravokotno druga na drugo in napajani s tokovoma, ki sta fazno premaknjena za 90° , povzročata v središču vrteče magnetno polje. Magnetno polje, ki ga ustvarja posamezna tuljava, niha sočasno s tokom. Ko magnetno polje v prvi tuljavi doseže maksimalno vrednost, je magnetno polje druge tuljave enako 0.



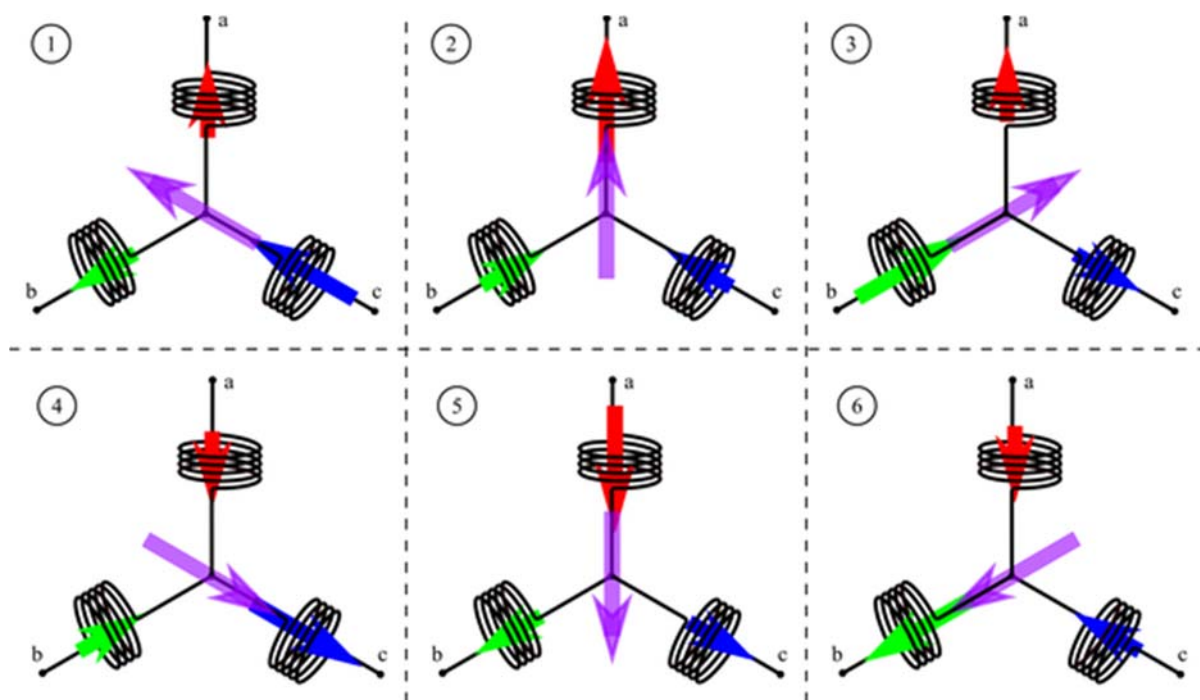
Slika 12 Vrteče magnetno polje – dve tuljavi

Če vektorsko seštejemo obe polji, vidimo da je rezultanta obeh polj vektor, ki se enakomerno vrti. Slika prikazuje zaporedne trenutke in vektor rezultante magnetnega polja.



Slika 13 Vrtenje vektorja magnetnega polja – trenutne časovne slike

Ustvarjanje vrtečega magnetnega polja z dvema tuljavama ima pomanjkljivosti. Zaradi neenakomernosti napajalnih tokov je sistem lahko nestabilen. Tesla je razvil sisteme, kjer je uporabljal več tuljav. Izkazalo se je, da je optimalna postavitev tista, kjer je uporabil tri tuljave, razporejene pod kotom 120° . Posamezna tuljava je priključena na izmenično napetost. Tudi tukaj tokovi v tuljavah ne nihajo sočasno, ampak so fazno zamaknjeni. Rezultante posameznih magnetnih polj ustvarjajo vrteče magnetno polje. Polje se vrti s frekvenco, s katero nihajo napetosti v tuljavah. Velikost rezultante magnetnega polja je stalna in neodvisna od časa.



Slika 14: Trifazni zamik



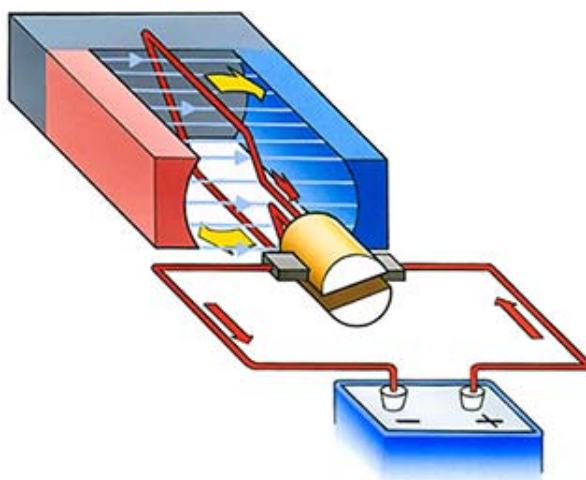
Slika 15 Indukcijski asinhronski elektromotor

Odkritje vrtečega magnetnega polja je pomembno pri izdelavi sinhronih elektromotorjev in asinhronskih indukcijskih motorjih.

2.4 ELEKTROMOTORJI IN DINAMO STROJI

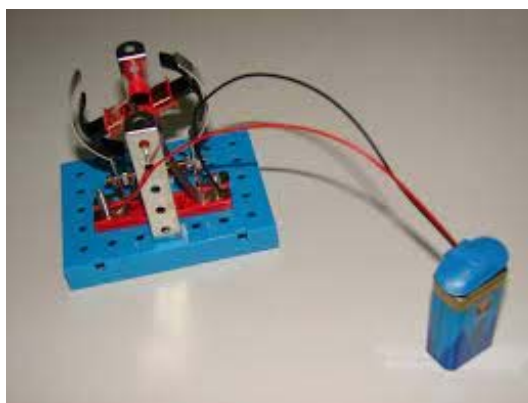
2.4.1 ENOSMERNI ELEKTROMOTOR

Elektromotor pretvarja električno energijo v mehansko. Najpreprostejši elektromotor je enosmerni. Sestavljajo ga tri komponente, stator, rotor in komutator. Stator je lahko trajni magnet ali pa elektromagnet in ustvarja magnetno polje, v katerega je nameščena zanka, ki predstavlja rotor oziroma vrteči del elektromotorja. Če skozi zanko teče električni tok, nanjo deluje magnetni navor. Ta je največji, ko ležijo silnice magnetnega polja v ravnini zanke, in je enak nič, ko silnice zanko pravokotno prebadajo. Ključni del elektromotorja je komutator, ki vsake pol obrata spremeni smer toka v zanki in s tem ohranja stalno smer magnetnega navora. Na ta način se zanka nemoteno vrti v isti smeri.



Slika 16 Enosmerni elektromotor

Pomanjkljivost enosmernega elektromotorja je, da prihaja do iskrenja na stiku krtačk in komutatorja, kjer se izgublja učinkovitost pretvorbe električne energije v mehansko.



Slika 17 Preprost model šolskega enosmernega elektromotorja

Z odkritjem izmenične napetosti in vrtečega magnetnega polja so znanstveniki razvili izmenične elektromotorje, ki so zelo izboljšali učinkovitost prenosa energije in omogočali tudi povečanje moči teh naprav.

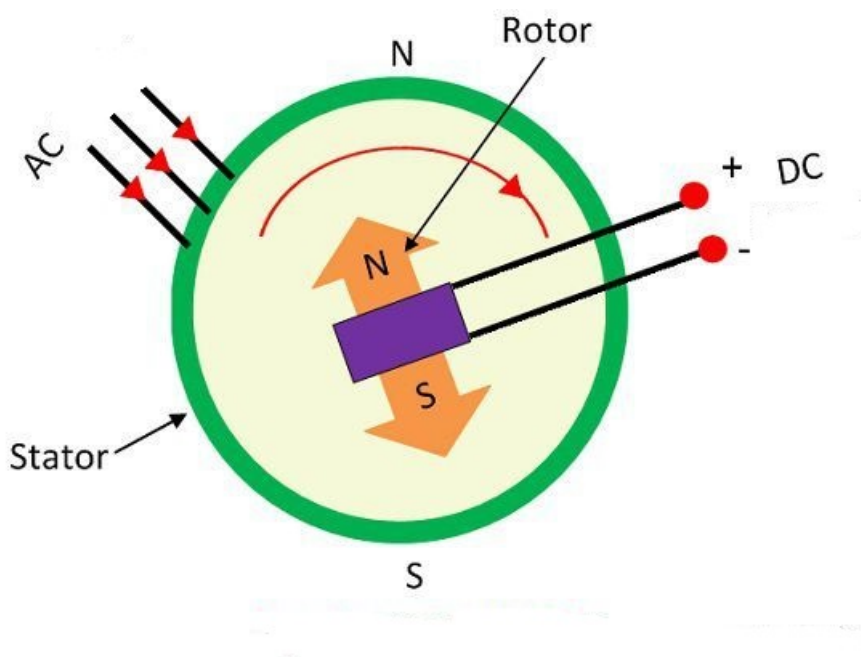
2.4.2 IZMENIČNI ELEKTROMOTORJI

Danes obstaja veliko različnih vrst izmeničnih elektromotorjev. V grobem ločimo dva tipa takšnih motorjev, sinhroni in asinhronski elektromotor. Pri sinhronem se rotor vrti z enako frekvenco, kot se vrti magnetno polje, pri asinhronskem pa se ti dve frekvenci razlikujeta. V nadaljevanju sledi osnovna razlaga obeh vrst izmeničnih elektromotorjev.

2.4.3 SINHRONI MOTOR

Na statorsko navitje sinhronnega izmeničnega elektromotorja so priključene tri fazne izmenične napetosti, ki ustvarijo vrteče magnetno polje. V magnetnem polju je nameščen rotor, ki je bodisi običajen trajni magnet bodisi tuljava, ki jo napaja vir enosmerne napetosti. Rotor sočasno sledi vrtenju magnetnega polja, na ta način dosežemo pretvarjanje električne energije v mehansko. Hitrost vrtenja je odvisna od napajalne napetosti in števila polov.

Sinhroni motorji, kjer je kot rotor nameščen trajni magnet, se uporabljajo za pogon motorjev, kjer je zahtevana stalna hitrost vrtenja. Motor sam od sebe ne more steči in potrebuje zunanji pogon, da doseže hitrost vrtenja magnetnega polja.

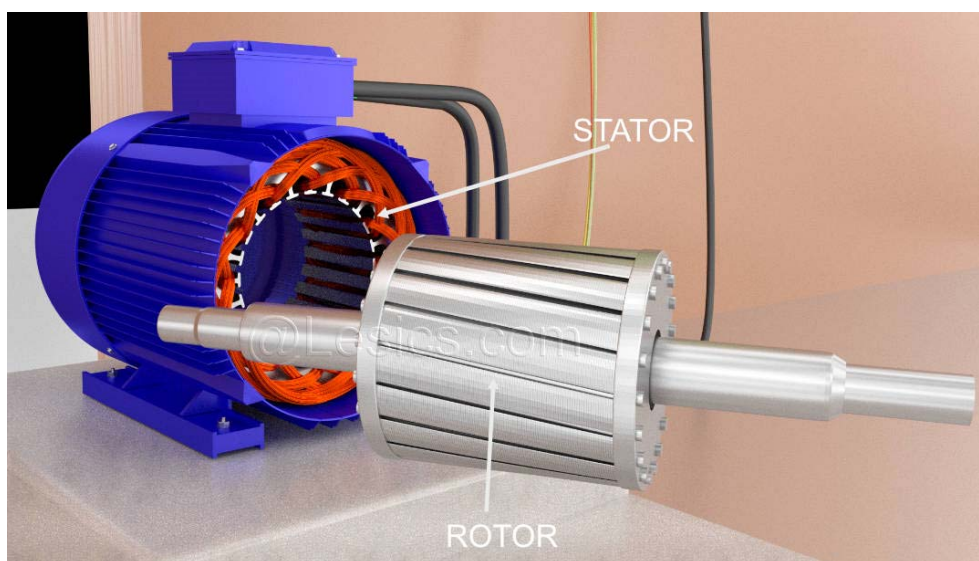


Slika 18: Shematski prikaz izmeničnega sinhronnega elektromotorja

2.4.4 INDUKCIJSKI MOTOR

Indukcijski oziroma asinhronski izmenični elektromotor je najbolj razširjen in uporaben elektromotor. Ima veliko prednosti pred drugimi vrstami elektromotorjev, predvsem zaradi odsotnosti komutatorja, kar zmanjšuje njegovo ceno in stroške vzdrževanja in visoke učinkovitosti.

Podobno kot pri sinhronem motorju je primarno navitje statorja priključeno na trifazno izmenično napetost, ki ustvari vrteče magnetno polje. Poglavitna razlika pa je v rotorju, ki ima obliko kletke. Ta je sestavljena iz velikega števila medsebojno povezanih kovinskih palic in ne potrebuje napajanja komutatorja in krtačk.



Slika 19: Zgradba indukcijskega (asinhronskega) elektromotorja

Zaradi spreminjanja magnetnega pretoka skozi rotor se v njem inducira lastno magnetno polje in kletka deluje kot magnet, ki poskuša slediti vrtečemu magnetnemu polju. Motor imenujemo asinhronski, ker vrtenje rotorja nekoliko zaostaja za vrtenjem magnetnega polja. Razlika med vrtilno hitrostjo rotorja in vrtilno hitrostjo magnetnega polja se imenuje slip. Vrednost slipa pri motorskem načinu obratovanja je med 0 (razbremenjen motor) in 1 (zavrt rotor), pri nazivni obremenitvi pa znese nekaj odstotkov.

Če bi bili obe frekvenci, hitrost vrtenja magnetnega polja in frekvenca vrtenja rotorja sinhronizirani, bi se tak motor zaustavil in ne bi bil uporaben.

Asinhroni motorji so danes uporabljeni za večino električnih pogonov. Vrtilna hitrost rotorja se z obremenitvijo nekoliko zmanjšuje.

2.5 SOBNO KOLO (PROFESIONALNO)

2.5.1 ZGRADBA

Po zgradbi lahko ločimo dve vrsti sobnih koles. Prva so ta, ki delujejo sama, brez dodanega kolesa. Pri drugih moramo za delovanje na napravo pričvrstiti lastno kolo.

V obeh kategorijah imamo sobna kolesa, katerih edina funkcija je zaviranje, ter taka, ki nam izmerijo in prikažejo vrsto podatkov in se lahko brezžično povežejo s programom. Program nam te podatke prikazuje in nam glede na vrsto programa, ki ga uporabljamo, te podatke sinhronizira z omrežjem, kjer lahko vozimo z drugimi, ki tako kot mi uporabljajo enak program. Takim sobnim kolesom pravimo pametna sobna kolesa.

Samostoječa sobna kolesa delujejo prek magnetne zavore. Pametna samostoječa sobna kolesa zavirajo kolesarja na principu elektromagnetov, ki jih lahko uporabnik sam poljubno nastavlja in glede na tok in napetost v elektromagnetih zavira svoje poganjanje. Za delovanje takih sobnih koles je potrebno dovajanje elektrike. Obstajajo tudi samostoječa sobna kolesa, ki ne potrebujejo elektrike za delovanje. So precej cenejša in prav tako slabša od druge različice sobnih koles. Za delovanje izkoriščajo navadne magnete. Njihova zaviralna sposobnost je omejena, ker je količina zaviranja določena glede na razdaljo magneta od vztrajnika. Uporabniku ne ponujajo analize in prikaza podatkov njegove vožnje.

Skupno vsem pametnim sobnim kolesom je, da lahko program, v katerem kolesarimo, samodejno nastavlja upor glede na izbiro zahtevnosti terena.

Nesamostoječa sobna kolesa delimo na tista, pri katerih obdržimo zadnje kolo, in tista, za katera je potrebno zadnje kolo odstraniti.

Pri sobnih kolesih, kjer zadnje kolo obdržimo, poznamo tri načine zaviranja. Zračno, magnetno in tekočinsko. Sobno kolo je zgrajeno iz nosilnih palic, ki jih pripnemo na zadnjo os kolesa in vrtljivega valčka, na katerega zadnje kolo postavimo. Ta valček deluje kot zavora na tri predhodno navedene načine. Najboljši način je zaviranje prek tekočine, ker je delovanje najtišje in gibanje tekoče, z veliko paleto zaviralnih možnosti.

Boljša različica nesamostoječih sobnih koles so ta, pri katerih je potrebno zadnje kolo odstraniti. Zaviranje deluje prek elektromagnetne zavore. Za delovanje potrebujejo dovajanje električne energije. Za občutek vožnje kot na cesti so v kolesih nameščeni vztrajniki, ki vožnjo približajo dejanski vožnji na cesti. Ob nenadni prekinitvi poganjanja vztrajnik poskrbi za zložno ustavitev vrtenja, namesto ustavitve kot z zavoro v sili. Delovanje s pomočjo elektromagnetov omogoča zajem velike količine uporabnih podatkov (moč, frekvenca vrtenja ...).

2.5.2 PRIKAZ MERITEV

Za namene raziskave je najbolj uporaben približek pametno sobno kolo, saj je količina zajetih podatkov največja. Pametna sobna kolesa prikazujejo trenutno stanje sobnega kolesa in s tem kolesarju omogočajo najučinkovitejši trening. Podatke kolesar vidi v primerni aplikaciji z zamikom, ki ga določa brezžična povezava in za katerega lahko privzamemo, da je skoraj nič. Aplikacijo za svoj izdelek določi proizvajalec. Spletne aplikacije kot so BKOOL, Rouvy, Zwift ..., omogočajo interaktivno vožnjo z drugimi kolesarji. Take aplikacije omogočajo prikaz podatkov v živo, le-ti pa so na primer kolesarjeva moč, čas vožnje, naklon ceste v interaktivni vožnji. V primeru, da kolesar poseduje dodatne merilne naprave, kot je merilnik kadence, merilnik za srčni utrip ..., so ti podatki lahko prikazani v predhodno navedenih aplikacijah. Ker je prikaz podatkov odvisen le od naprave, na kateri si naložimo svojo aplikacijo, lahko kolesar za interaktivno vožnjo uporablja tudi televizor.

2.5.3 SENZORJI

V pametnih sobnih kolesih so nameščeni senzorji za namene merjenja kolesarjeve trenutne moči, ki jo senzorji v boljših pametnih sobnih kolesih zaznajo tudi do 1000-krat na sekundo.

2.5.4 MOČI KOLESARJEV

Profesionalni kolesarji dosegajo moči, ki si jih še rekreativni kolesarji težko predstavljajo. Pa vendar, kadar ljudje slišijo kakšne moči lahko profesionalni kolesarji proizvedejo, menijo, da to ni tako veliko, kot so mislili. To se pogosto zgodi, ker so edine moči, ki so že slišali zanje, moči avtomobilskih motorjev. Prvič, avtomobili so 30-krat težji, drugič, kolesarjev ne poganja naftna zmes, ki bi bila vodilo za eksplozije v batih. Tako se moči profesionalnih kolesarjev merijo v wattih in ne v kilowattih. Vse moči so razporejene glede na dolžino intervala pri določeni moči in sama moč. Ko primerjamo kolesarje med seboj, pogosto navajamo njihove relativne moči, saj pri vzponih ni pomembna le absolutna moč, gravitacijska sila namreč preseže silo upora in je odvisna od mase kolesarja.

Največje relativne moči kolesarjev, ki jih za trenutek dosežejo elitni sprinterji, so nekje 25 W/Kg, najboljši od teh sprinterjev pridejo tudi do 27 W/Kg. Najpomembnejši so watt na kilogram pri vzponih. Glede na čas trajanja vožnje obstaja krivulja najboljših voženj vseh časov. Kot najboljšo vožnjo glede na težo jemljemo trening vožnjo Marca Pantanija na Monte Carpenio, ko je 16 minut in 22 sekund zdržal kar 8,05 W/Kg.

Največje absolutne moči, ki jih oddajo v eni sekundi najelitnejši sprinterji gredo do 2800 W. Kot primer daljšega časovnega intervala lahko vzamemo eno najboljših voženj v zgodovini (gledano glede na absolutno moč). Lance Armstrong je vzpon Alpe d'Huez peljal nekaj čez 37 minut in glede na izračune držal moč 495 W.

Dejstvo je, da so to nekatere izmed največjih moči človeka v zgodovini, zato je pomembno vedeti, da so dejanske moči kolesarjev med dirkami precej nižje. Moči med etapo se vrtijo okoli 300 wattov, rekreativni kolesarji zdržijo take moči na krajše odseke, kot so vzponi do ene ure. Profesionalni kolesarji na enake vzpone držijo moč v območju

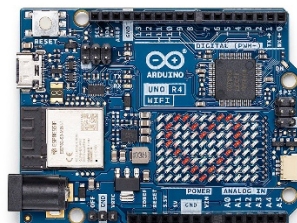
350–450 wattov, kjer je treba vedeti, da predstavlja 20 wattov velik učinek na končni čas vožnje.

2.6 OPIS OPREME ZA EKSPERIMENTALNI DEL

2.6.1 MIKROKRMILNIKI

Poglavitna uporabnost mikrokrmilnika, potrebnega za tovrsten projekt, je brezžična povezljivost. Senzorje je bilo treba nekje postaviti na vrtljive dele, kjer je žična povezava praktično neizvedljiva.

2.6.1.1 ARDUINO UNO R4 WI-FI



Slika 20: Arduino Uno R4 Wi-Fi

Arduino je 32-bitna razvojna plošča, ki vključuje 14 digitalnih vhodnih/izhodnih vrat in 6 analognih kanalov. Arduino podpira veliko število serijskih komunikacij, kar omogoča združljivost z različnimi senzorji, ki sva jih uporabila v raziskovalni nalogi.

Za programiranje Arduina sva uporabila programsko opremo Arduino Integrated Development Environment (IDE), ki omogoča programiranje mikrokrmilnika z programskim jezikom C++. Dokumentacija je odlična, zato je bilo zelo preprosto napisati prve programe in preizkusiti nekatere funkcionalnosti Arduina.

Arduino načeloma ne podpira brezžične komunikacije, kot so Wi-Fi, Bluetooth in BLE (Bluetooth Low Energy). Arduino Uno R4 Wi-Fi ima zato vgrajen dodaten mikrokrmilnik (EPS32), ki mu omogoča brezžično komunikacijo.

2.6.1.2 ESP32 WROOM32

ESP32 je mikrokontroler, ki ga je razvilo podjetje Espressif Systems. Čip podpira Wi-Fi, Bluetooth in BLE (Bluetooth Low Energy) brezžično povezljivost. ESP32 se pogosto uporablja na razvojnih kompletih (devkits), kar omogoča razvijalcem, da se osredotočijo na razvoj programske opreme in funkcionalnosti projekta, namesto da bi se ukvarjali z osnovno povezljivostjo in napajanjem.



Slika 21: DOIT ESP32 DEVKIT V1

V primerjavi z Arduino Uno R4 Wi-Fi je ESP32 veliko manjši, cenejši in zmogljivejši. Čeprav je ESP32 zmogljiv in v mnogih pogledih boljši od Arduina, je kljub vsemu manj primeren za začetnike, saj je težje najti dokumentacijo in primere programov.

Številni ESP32 razvojni kompleti omogočajo vključitev v protoboard in izdelavo prototipnih vezji na PCB-ju.

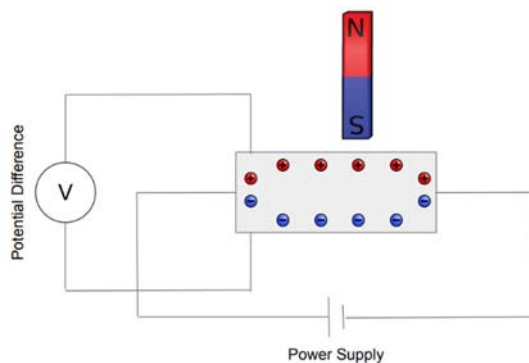
2.6.2 SENZORJI

2.6.2.1 SENZOR TOKA ACS712 20A



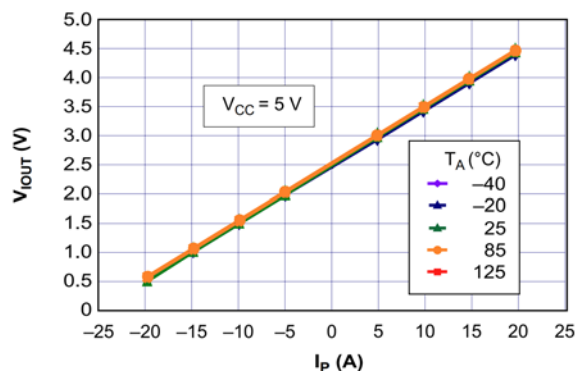
Slika 22: Senzor toka ACS712

ACS712 je senzor toka, ki omogoča merjenje tako izmeničnih (AC) kot tudi enosmernih (DC) tokov. Senzor toka deluje na osnovi Hallovega pojava.



Slika 23: Hallov pojav

Tok, ki ga želimo izmeriti, ustvari magnetno polje. Zaradi tega prihaja do premika nosilcev naboja v prevodniku. To se zgodi zaradi Lorentzeve sile, ki deluje na nosilce naboja, kadar so ti v gibanju in se gibljejo skozi magnetno polje. Nosilci naboja so tako premaknjeni na eno stran prevodnika, kar ustvari napetost, ki ji rečemo Hallova napetost. Ta napetost je zelo nizka, zato je potreben ojačevalnik napetosti, ki je vgrajen v senzorju. Izhodna napetost na senzorju je premo sorazmerna z zaznanim tokom.



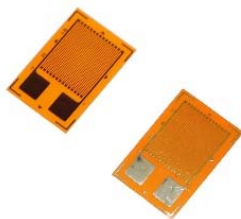
Slika 24: Izhodna napetost v razmerju z zaznanim tokom

Senzor podpira vhodne napetosti do 2,1 kV in tok do 20 A (obstaja tudi 5 A in 30 A različici). Senzorjev izhod je napetost med 0 in 5 V, ki je nato pretvorjena v tok prek naslednje enačbe:

$$I = \frac{U_{OUT} - 2,5V}{0,1V} A$$

U_{OUT} predstavlja napetost, prebrano na mikrokrmilniku. Vrednost $\frac{0,1V}{A}$ je navedena med lastnostmi senzorja in nam pove pretvornik napetosti v tok. Ker senzor lahko meri tudi negativne tokove, je izhodna napetost senzorja, ko ni toka, 2,5 V, tako da so negativni tokovi predstavljeni z napetostjo 2,5 V–0 V in pozitivni tokovi z vrednostmi med 2,5 V in 5 V.

2.6.2.2 MERILNE CELICE IN OJAČEVALNIK HX711



Slika 25 Primer merilnih celic

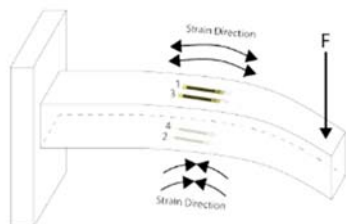


Slika 26 Modul z čipom HX711

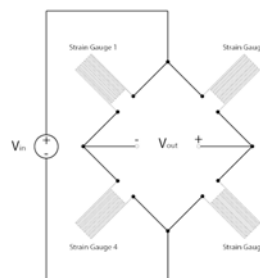
Merilne celice (strain gauges) se uporabljajo za merjenje učinka zunanjih sil na predmet, katerega deformacijo merimo. Merilna celica je na predmet pritrjena z močnim lepilom, zato so njene deformacije enake kot deformacije predmeta.

Osnovni princip delovanja merilne celice je, da se pri deformaciji spremeni upornost merilne celice. Razlike v upornosti, ki se pojavi pri deformaciji, so zelo majhne, zato se v praksi pogosto uporabi vezava merilnih celic v tako imenovan Wheatstonov mostič

(Wheatstone bridge). Takšna vezava omogoča, da povežemo 4 merilne celice in s tem dobimo variacijsko napetost glede na deformacijo.



Slika 27 Primer deformacije predmeta z nameščenimi merilnimi celicami



Slika 28 Wheatstonov mostič s štirimi merilnimi celicami

Slika 28 prikazuje vezavo merilnih celic. Z Wheatstonovim mostičem dosežemo spremembo napetosti (V_{out}). Ker želimo, da je sprememba napetosti čim večja oziroma da do spremembe pride, morajo biti merilne celice pravilno postavljene v mostiču. Merilne celice zato namestimo tako, da sta merilni celici 1 in 3 na eni strani deformacije (bi se obe krčile ali raztezale), merilni celici 2 in 4 pa bi bili ravno na drugi strani predmeta in bi bili deležni nasprotne deformacije. Izhodno napetost lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(\frac{R_3}{R_4 + R_3} + \frac{R_3 - R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

S tem dobimo izhodno napetost, katere vrednost je nekaj mV ali celo manj, saj se upornost merilnih celic spremeni zelo malo. Zaradi tega potrebujemo ojačevalnik napetosti, kot je to na primer HX711, ki je 24-bitni analogno-digitalni pretvornik (ADC). Senzor omogoča 128-x ojačenje pri vhodni napetosti $\pm 20\text{mV}$, 64x ojačenje pri vhodni napetosti $\pm 40\text{mV}$ ter 32-x ojačenje pri vhodni napetosti $\pm 80\text{mV}$. Senzor omogoča vzorčenje podatkov do 80Hz.

2.6.2.3 ŽIROSKOP GY-521 MPU-6050



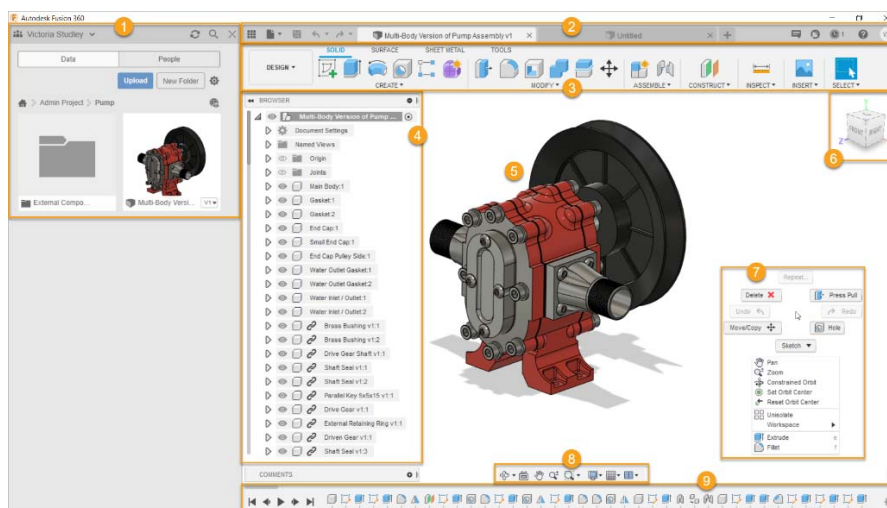
Slika 29: Žiroskop GY-521

GY-521 je modul, ki vsebuje senzorski čip MPU-6050. Ta čip sestavlja 3-osni žiroskop in 3-osni merilnik pospeška. Ima I²C vmesnik za komunikacijo z mikrokrmilnikom. Modul GY-521, ki vsebuje senzorski čip MPU-6050, predstavlja triosni senzor kotnih hitrosti z uporabniško programabilnim obsegom merjenja $\pm 250^\circ/\text{s}$, $\pm 500^\circ/\text{s}$, $\pm 1000^\circ/\text{s}$ in $\pm 2000^\circ/\text{s}$ in triosni digitalni izhodni merilnik pospeška z uporabniško programabilnim obsegom merjenja $\pm 2\text{g}$, $\pm 4\text{g}$, $\pm 8\text{g}$ in $\pm 16\text{g}$.

2.6.3 PROGRAMSKA OPREMA IN PROGRAMSKI JEZIKI

2.6.3.1 AUTODESK FUSION 360

Autodesk Fusion 360 je programska platforma, ki združuje različne vidike oblikovanja in inženiringa v enostaven in zmožljiv vmesnik. Ponuja številne funkcionalnosti, kot na primer 3D modeliranje, oblikovanje tiskanih vezji (PCB), simulacije in analize sil in še veliko več.



Slika 30 Uporabniški vmesnik programa Fusion 360

Ena izmed ključnih značilnosti Fusion 360 je raziskovanje različnih iteracij oblikovanja z uporabo preprostih orodij za 3D modeliranje. S tem omogoča oblikovalcem in inženirjem, da ustvarjajo kompleksne trirazsežne modele s povsem prilagodljivimi oblikami. Orodja za direktne, parametrične, površinske in proste oblike ponujajo širok spekter možnosti, prilagojenih različnim potrebam projekta. Fusion 360 omogoča tudi simulacije testiranja in s tem preverjanje trdnosti in obnašanja izdelkov pod obremenitvami ter posledično optimizacijo konstrukcije.

V sklopu 3D modeliranja Fusion 360 vključuje tudi orodja za upodabljanje, ki omogočajo realističen prikaz modelov. S tem uporabniki dobijo vpogled v končni izgled izdelka že v fazi oblikovanja, kar pripomore k boljšemu razumevanju estetskih in funkcionalnih vidikov.

Poleg 3D modeliranja Fusion 360 omogoča tudi oblikovanje tiskanih vezij (PCB). Integracija PCB dizajna v celotno platformo omogoča enostavno vključevanje in povezovanje elektronskih komponent z mehanskimi.

2.6.3.2 ARDUINO IDE 2 (INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT)

Arduino IDE 2 je odprtokodna programska oprema, ki jo je oblikoval Arduino.cc in se večinoma uporablja za pisanje, prevajanje in nalaganje kode v skoraj vse module Arduino ter tudi ESP32 razvojne kite in še številne druge mikrokrmilnike. Omogoča programiranje s programskima jezikoma C++ in C.



Slika 31 Uporabniški vmesnik Arduino IDE 2

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 UVOD, NAMEN RAZISKAVE, PRIČAKOVANI REZULTAT

V začetkih raziskovalnega dela sva se posvetila že obstoječim generatorjem elektrike. Nekateri viri so nama zagotovili, da so možni izkoristki električnih generatorjev, ki presegajo 90 %. V drugih virih so bili podatki o izkoristku do 70 %. Nekateri izmerjeni podatki pa so navajali okoli 50-% izkoristek. Lastnosti najinega sistema niso bile v najinih rokah, ker je to odvisno od elektromotorja ter prenosa, ki mehansko moč s pedal prenaša na elektromotor. V teoriji se v mehanskem delu, torej prenosu, ne bi smelo izgubiti veliko energije, vendar se je nekaj gotovo že tam izgubi. Majhne količine energije se izgubijo med prenosom elektrike po žicah, kar je posledica neke upornosti žic. Te izgube so premajhne, da bi jih bilo smiselno upoštevati glede na natančnost celotnega sistema sobnega kolesa, ker se merijo v promilih.

Želela sva si izdelati delujoče sobno kolo, ki bi ga kolesar v resnici lahko uporabljal za trening. Težava se je pojavila, ko sva elektromotor obremenila s porabniki, katerih skupna potrebna moč je presegala 200 W, kot kolesarja pa še vedno nisva čutila zadostne količine upora. Ugotovila sva, da najina težava ni bil prešibek elektromotor, ampak prenizki obrati, ki so bili sicer od 4000 do 10000 na minuto. Predelave prestavnega razmerja se še nisva lotila, ker bi bil ta proces predolgotrjen za najino trenutno časovno omejitev. Tako sva le predpostavila, da bi za dober upor potrebovala okoli 20000 obratov na minuto. Pustila sva prestavna razmerja in se lotila elektronike.

3.2 MODEL SOBNEGA KOLESA

3.2.1 ZGRADBA KOLESA



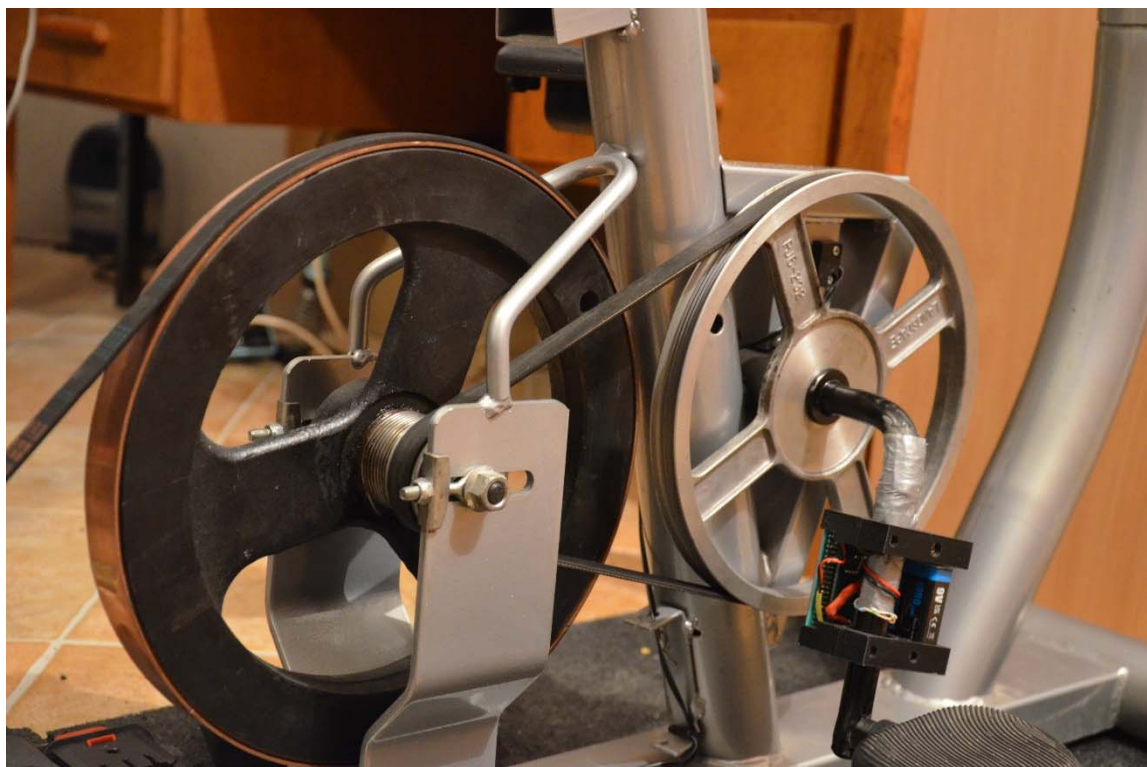
Slika 32 Pogled na sobno kolo od zadaj

Zgradba najinega sobnega kolesa se je od začetka septembra ves čas močno spreminjala. Gradnjo sobnega kolesa sva začela pri elektromotorju. To je bila edina komponenta, ki sva jo imela doma. Motor je namreč ležal v kleti, kjer je bil puščen po menjavi starega pralnega stroja. Ta elektromotor je prišel z eno od uporabljenih jermenic za sobno kolo, ki pa sva jo našla šele oktobra, po pridobitvi ogrodja celotnega sobnega kolesa.

Prvotni načrt za izdelavo sobnega kolesa je bil, da staro kolo, ki sva ga imela na voljo, predelava, mu dodava stojalo in vse skupaj pritrdiva na elektromotor. To bi bila izredno zahtevna naloga, saj je stabilnost sobnega kolesa izjemno pomembna, le to pridelati iz navadnega kolesa pa je težko. Celoten pogonski sklop bi morala prilagoditi za elektromotor, kar pomeni, da bi ga lahko zvarila naravnost na zobnike ali ga prek jermenice nekako povezala na zadnje zobnike ali verigo. Najinih mehanskih sposobnosti navsezadnje v tej fazi še ni bilo treba preizkušati na takem nivoju.

Prvi oktobrski petek sva izvedla akcijo brskanja po smetišču, tam se vedno kaj najde. Upala sva, da bova našla kak rezerven elektromotor. Drugi cilj je bil najti prenos za najino sobno kolo. Ko sva prišla prvič, sva našla nekaj manjših elektromotorjev in nekaj prestavnih sklopov, za katere sva imela v mislih, da bi lahko prav prišli za preizkuse in da bi jih lahko skurila. Razočarana sva odšla iz smetišča, ker je bil upravitelj precej neprijazen do naju; res nisva razumela, zakaj ne bi pustili odnesti delov s smetišča, da bi jih lahko ponovno uporabila. Nekaj časa sva si vzela, da sva pregledala ulov. Uspelo nama je skuriti enega od elektromotorjev. Nato sva nesla vse odpadke nazaj na smetišče in tokrat naju je že na začetku opazil upravitelj, zaradi česar se ni več jezil, ker je lahko zadostil svojemu statusu pomembnosti. Ločila sva odpadke in se malo razgledala. Na mestu, kjer prvič nisva opazila ničesar, je zdaj stalo delujoče sobno kolo, malo staro in brez sedeža. Vendar ogrodje je bilo.

Tako sva dobila vztrajnik, prestavno razmerje, celotno ogrodje. Sedež je manjkal že na začetku, krmilo (prostor za oprijem) pa sva uspela v nekaj minutah uničiti. S tem sva imela zagotovljene vse mehanske dele sobnega kolesa.



Slika 33 Pogled iz strani na pogonski sklop in prestavno razmerje

Sledilo je še vprašanje vse potrebne elektronike. Kljub lastni izdelavi vsa elektronika ne bi bila poceni. Potrebovala sva zalogo, da v primeru napake ne bi bilo potrebno ponovno naročanje delov, zato bi vse skupaj prišlo okoli 400 EUR. S profesorjem sva se dogovorila, da bo šola sofinancirala najino raziskovalno nalogo. Šola je pokrila del stroškov nabave elektronike.

Delo sva začela s mikrokrmilnikom Arduino Uno R4 WI-FI, ki se nama je zdel miniaturnen mikrokrmilnik. Na koncu sva ta mikrokrmilnik nadomestila s še manjšim ESP32 WROOM32, ker je bil prvotni mikrokrmilnik prevelik.

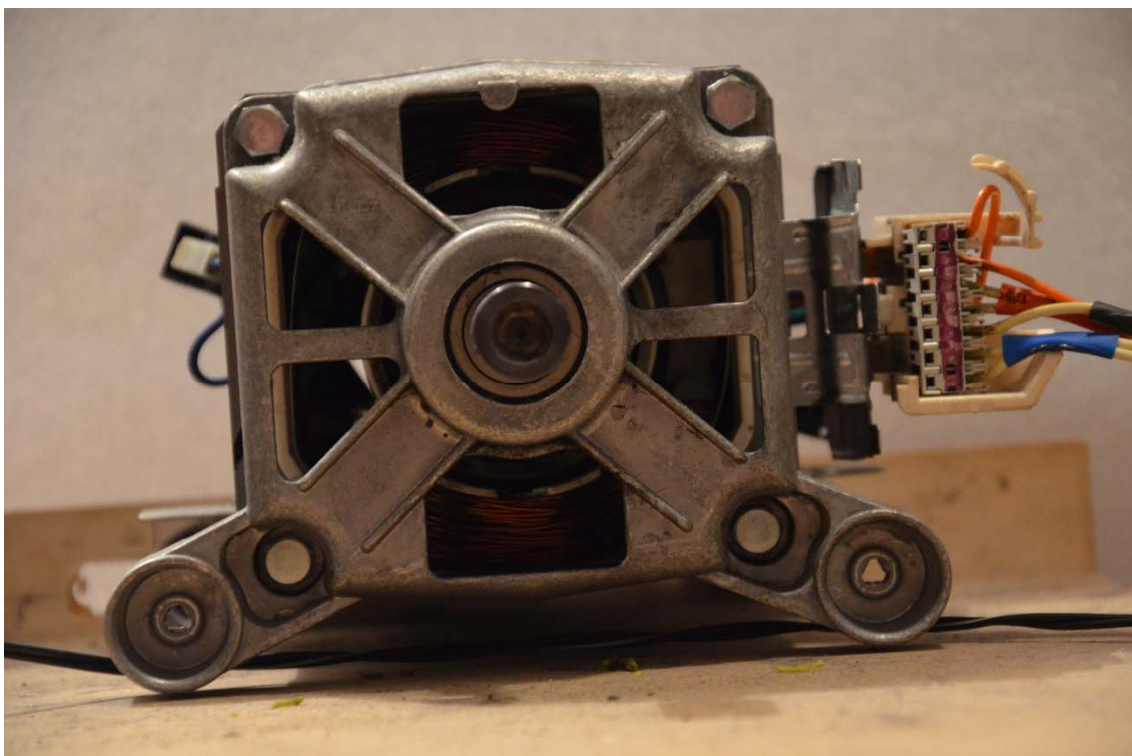
Končni model sobnega kolesa je zgrajen iz dveh enot. Enoti sta med seboj povezani prek jermena, ki je na eni strani pritrjen na elektromotor, na drugi pa na vztrajnik. Ena enota je elektromotor in vse komponente, ki so povezane z izhodno elektriko, to pomeni žice generirane napetosti, senzor za tok, senzor napetosti, tahometer, ki omogoča poznavanje števila vrtljajev elektromotorja, ter vse predhodno navedeno, povezano s povezovalnikom na enega od ESP32 WROOM32. Vse skupaj je za stabilnost pritrjeno na leseno ploščo. Druga enota je celotno ogrodje sobnega kolesa in merilnik vhodne moči. Pedala so s prvo jermenico pritrjena na vztrajnik, druga jermenica pa vrtenje iz vztrajnika prenese na elektromotor. Pri pedalih je nameščen tudi merilnik obratov, ki je povezan z mikrokrmilnikom iz prve enote. Merilnik moči je podrobno opisan v nadaljevanju.

3.2.2 UNIVERZALNI ELEKTROMOTOR

»Univerzalni elektromotor je vrsta elektromotorja, ki lahko deluje na izmenični ali enosmerni tok in uporablja elektromagnet kot stator za ustvarjanje magnetnega polja. Gre za komutiran serijsko navit motor, pri katerem so tuljave statorja zaporedno vezane z navitji rotorja prek komutatorja. Univerzalni motor je po konstrukciji zelo podoben motorju na enosmerni tok, vendar je nekoliko spremenjen, da omogoča pravilno delovanje motorja na izmenični tok. Ta vrsta elektromotorja lahko dobro deluje na izmenični tok, ker se bo tok v tuljavah polja in armaturi (in posledičnih magnetnih poljih) izmenjeval (obratna polarnost) sinhrono z napajanjem. Zato se bo nastala mehanska sila pojavila v dosledni smeri vrtenja, neodvisno od smeri uporabljene napetosti, vendar določena s komutatorjem in polarnostjo poljskih tuljav.« (Povzeto po Wikipediji)

3.2.2.1 UNIVERZALNI ELEKTROMOTOR KOT GENERATOR

Izkazalo se je, da je elektromotor pralnega stroja univerzalni elektromotor. Kot že omenjeno, ta motor ni sestavljen iz stalnih magnetov, temveč ga sestavljajo elektromagneti. Pri uporabi tovrstnega elektromotorja kot generatorja sva zato morala tuljave elektromotorja priključiti na električni tok. Ko so tuljave priključene na električni tok, se v motorju ustvari magnetno polje. Navitje rotorja je tuljava, ki je nameščena na rotorju motorja in je povezana s komutatorjem prek ščetk. Ko se rotor vrti, se na ščetkah ustvarita električna napetost in električni tok.



Slika 34 Najin univerzalni elektromotor

3.3 SENZORJI, ZASNOVA MERITEV

Najprej bi rada izpostavila, da meritve in senzorje deliva na dva sklopa: senzor vhodne moči, senzorji na izhodu. Pri senzorjih vhodne moči je zelo pomemben dejavnik možnost brezžične povezljivosti, saj bi bilo drugače s senzorji na gonilki v realnem času nemogoče komunicirati. Glavna enota senzorja vhodne moči in prav tako senzorjev na izhodu je mikrokrmilnik ESP32, saj omogoča vse potrebno za opravljanje meritev.

3.3.1 PROGRAMSKE FUNKCIJE ZA BRANJE ANALOGNIH VHODOV

Za vse meritve, razen za meritve vhodne moči, so uporabljeni senzorji z analognim izhodom ali delilniki napetosti. Pri branju teh meritev je treba uporabiti analogne kanale (pin) na ESP32. Pomembno je, da mikrokrmilniku ESP32 povemo, ali bomo kanal uporabljali kot vhodni (INPUT) ali izhodni (OUTPUT). Vedno kadar želimo brati podatke, moramo tako nastaviti kanal kot INPUT.

```
#define DOLOCEN_PIN 5

void setup() {
    // kadar ga želimo uporabiti kot vhodni pin
    pinMode(DOLOCEN_PIN, INPUT);
    // kadar ga želimo uporabiti kot izhodni pin
    pinMode(DOLOCEN_PIN, OUTPUT);
}
```

Slika 35 Primer programa za nastavitve kanala kot VHODNI / IZHODNI

ESP32 omogoča maksimalno analogni branje do 3,3 V z natančnostjo 12 bitov (kar pomeni 4096 diskretnih vrednosti), kar omogoča razlikovanje med vhodnimi napetostmi s presledkom približno 0,8 mV, kar zadostuje potrebam najinega projekta.

```
// pridobitev napetosti na analognem pinu
double pridobiNapetostNaPin(int pin)
{
    // analogRead vrne 12 bitno število
    int analog = analogRead(pin);
    double napetost = (3.3 / 4095) * analog;
    return napetost;
}
```

Slika 36 Primer funkcije za pridobitev napetosti na analognem kanalu

Z zgornjo funkcijo lahko tako dobiva napetost na analognem kanalu, vendar ta nikakor ne sme presegati 3,3 V, saj bi to uničilo mikrokrmilnik. Zato sva morala pri merjenju izhodne napetosti in pri merjenju napetosti na tahometru narediti delilnik napetosti. Napetost na analognem kanalu lahko pretvorimo v dejansko napetost na delilniku napetosti.

```

// pretvori napetost iz delilnika napetosti v dejansko napetost
double pretvoriVDejanskoNapetost(double napetost, double uporReferenca, double uporMeritev)
{
    // uporReferenca predstavlja referenci upor, na katerem ne merimo napetosti
    // uporMeritev predstavlja upor, na katerem merimo napetost
    double dejanskaNapetost = napetost * (1 + (uporReferenca / uporMeritev));
    return dejanskaNapetost;
}

```

Slika 37 Primer funkcije za pridobitev dejanske napetosti na delilniku napetosti

3.3.2 PROGRAMSKE FUNKCIJE ZA KOMUNICIRANJE PREK SERIJSKIH KOMUNIKACIJ

Senzor vhodne moči je sestavljen iz dveh senzorjev: žiroskopa (MPU-6050) in ojačevalnika za merilne celice (HX711). MPU-6050 uporablja standardno I2C komunikacijo, ki jo ESP32 podpira. HX711 uporablja nestandardno serijsko komunikacijo, vendar je kljub temu združljiv z ESP32.

3.3.2.1 HX711

Ker je za komunikacijo uporabljena nestandardna serijska komunikacija, sva se odločila vključiti knjižnico za povezovanje z senzorjem HX711, saj bi drugače porabila ogromno časa, da bi se posvetila dokumentaciji tega protokola.

```
// Vključimo knjižnico HX711.h
#include "HX711.h"

// Definiramo pine za HX711 vezavo
const int HX711_DOUT_PIN = 16; // DOUT pin povežemo na pin 16
const int HX711_SCK_PIN = 4;   // SCK pin povežemo na pin 4

// Ustvarimo objekt hx711_senzor tipa HX711
HX711 hx711_senzor;

// Nastavimo začetne nastavitve
void setup() {
    // Začnemo serijsko komunikacijo s hitrostjo 115200 bitov na sekundo
    Serial.begin(115200);
    // Začnemo komunikacijo s HX711 senzorjem, določimo DOUT in SCK pine
    hx711_senzor.begin(HX711_DOUT_PIN, HX711_SCK_PIN);
}

// Deklariramo spremenljivko za surovo težo
long surovaTeza;

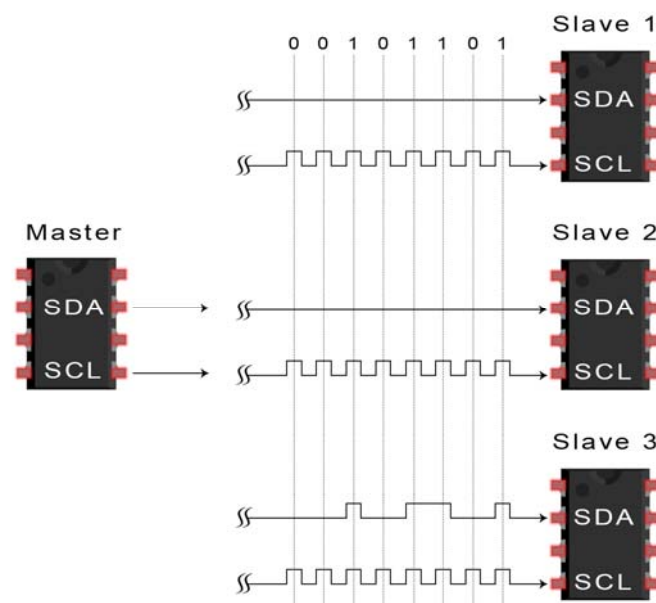
// Glavna zanka programa
void loop() {
    // Preverimo, ali je HX711 senzor pripravljen za branje
    if (hx711_senzor.is_ready()) {
        // Preberemo surovo težo iz senzorja
        surovaTeza = hx711_senzor.read();
        // Izpišemo besedilo "HX711 surova teza: " v serijski monitor
        Serial.print("HX711 surova teza: ");
        // Izpišemo prebrano surovo težo v serijski monitor
        Serial.println(surovaTeza);
    } else {
        // Če senzor ni na voljo ali ni priključen, izpišemo to sporočilo v serijski monitor
        Serial.println("HX711 senzor ni na voljo ali ni priključen.");
    }
    // Počakamo 1 sekundo, preden ponovno preverimo težo
    delay(1000);
}
```

Slika 38 Program za branje surovih vrednosti senzorja HX711

Uporabila sva knjižnico, ki je dostopna prek povezave: <https://l.etiam.si/hx711library>

3.3.2.2 ŽIROSKOP MPU-6050 IN I2C

Kot že omenjeno, žiroskop MPU-6050 uporablja I2C komunikacijo, ki za svoje delovanje potrebuje dve žici: podatkovno in sinhronizacijsko žico. Podatkovna žica (SDA) se uporablja za prenos podatkov med napravami, kot so digitalni senzorji, mikrokrmilniki itd. Prek te žice se pošiljajo tako ukazi kot tudi podatki med glavnimi (master) in podrejenimi (slave) napravami. Sinhronizacijska žica se uporablja za sinhronizacijo prenosa podatkov med napravami. Deluje kot ura za komunikacijo. Določa trenutke, kdaj se podatki pošiljajo ali prejemajo. Omogoča, da naprave uskladijo svoje delovanje in vedo, kdaj pričakovati podatke. Spodnja slika prikazuje I2C vezavo, in kako se podatki prenašajo prek žic.



Slika 39 I2C vezava in prenos podatkov

Privzeta kanala za I2C komunikacijo sta kanal 21 (SDA) in kanal 22 (SCL). Uporaba I2C komunikacije je dokaj preprosta z uporabo knjižnice **Wire.h**. Na začetku moramo knjižnico vključiti in programu povedati, da bomo uporabljali I2C komunikacijo.

```
// vključitev knjižnice Wire.h
#include <Wire.h>

void setup() {
  // defaultni 21 (SDA) in 22 (SCL) drugace dodaj kot parameter
  Wire.begin();
}
```

Slika 40 Inicializacija I2C komunikacije

Za določanje, s katero napravo želimo komunicirati, uporabljamo naslov, ki je enolično določen za vsako napravo v I2C omrežju. Ta naslov omogoča izbiro specifične naprave med napravami, ki so povezane v istem omrežju. Osnovni princip komuniciranja vključuje določanje ciljne naprave, izbiro registra in nato zapisovanje ali branja podatkov tega registra. Podrobne informacije o namenu in funkcijah določenega registra so na voljo v dokumentaciji ali specifikacijah za napravo.

Pri MPU-6050 čipu sva morala nastaviti register za upravljanje napajanja, register za konfiguracijo žiroskopa in register za konfiguracijo pospeškmera. Registre nastavimo tako, kot je prikazano na spodnji sliki.

```
// program za pridobivanje surovih vrednosti MPU-6050 senzorja
// vrednosti je potrebno pretvoriti v berljive vrednosti
// pretvorba je odvisna od nastavitve območja meritev
// in jo najdemo v dokumentaciji ali specifikacijah za napravo
#include <Wire.h>
#define MPU_ADDR 0x68;

void setup()
{
    // privzeti pin 21 (SDA) in 22 (SCL), drugace lahko dodamo pina kot parameter
    Wire.begin();

    // osnovna konfiguracija napajanja
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    // register za upravljanje napajanja
    Wire.write(0x6B);
    // "zbudimo" napravo iz spanja
    Wire.write(0b00000000);
    Wire.endTransmission();

    // konfiguracija žiroskopa
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    // register za nastavitve žiroskopa
    Wire.write(0x1B);
    // Bit 3 in 4 (od desne) za konfiguracijo območja meritev
    // 00 (0) +/- 250deg/s
    // 01 (1) +/- 500deg/s
    // 10 (2) +/- 1000deg/s
    // 11 (3) +/- 2000deg/s
    // območje meritev nastavljeno na +/- 2000deg/s
    Wire.write(0b00011000);
    Wire.endTransmission();

    // konfiguracija pospeškmera
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    // register za nastavitve pospeškmera
    Wire.write(0x1C);
    // Bit 3 in 4 (od desne) za konfiguracijo območja meritev
    // 00 (0) +/- 2g
    // 01 (1) +/- 4g
    // 10 (2) +/- 8g
    // 11 (3) +/- 16g
    // območje meritev nastavljeno na +/- 16g
    Wire.write(0b00011000);
    Wire.endTransmission();
}
```

Slika 41 Konfiguracija in nastavitve območja meritev

Ko smo nastavili osnovne registre, lahko začnemo z branjem podatkov. Na spodnji sliki je primer programa za branje vrednosti pospeškmera.

```
// program za pridobivanje surovih vrednosti MPU-6050 senzorja
// vrednosti je potrebno pretvoriti v berljive vrednosti
// pretvorba je odvisna od nastavitve območja meritev
// in jo najdemo v dokumentaciji ali specifikacijah za napravo
#include <Wire.h>
#define MPU_ADDR 0x68;

.... // izpuščen setup() in nastavljanje registrov

// spremenljivke za shranjevanje vrednosti pospeškmera
int16_t accelX, accelY, accelZ;

// spremenljivke za shranjevanje vrednosti žiroskopa
int16_t ziroX, ziroY, ziroZ;

void loop()
{
    // I2C naslov MPU
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    // izbran začetni register
    Wire.write(0x3B);
    Wire.endTransmission();
    // zahteva accel registre (3B - 40)
    Wire.requestFrom(MPU_ADDR, 6);
    // program caka da je na voljo vseh 6 bytov
    while (Wire.available() < 6);
    accelX = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
    accelY = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
    accelZ = (Wire.read() << 8 | Wire.read());

    // I2C naslov MPU
    Wire.beginTransmission(0b1101000);
    // izbran začetni register
    Wire.write(0x43);
    Wire.endTransmission();
    // zahteva ziro registre (43 - 48)
    Wire.requestFrom(0b1101000, 6);
    // program caka da je na voljo vseh 6 bytov
    while (Wire.available() < 6);
    ziroX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    ziroY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    ziroZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();

    // surove vrednosti pospeškmera in žiroskopa so shranjene v globalnih spremenljivkah
    delay(1000);
}
```

Slika 42 Primer programa za pridobivanje surovih vrednosti MPU6050

Surove vrednosti je treba pretvoriti v berljive vrednosti. Pretvornik najdemo v dokumentaciji.

AFS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	$\pm 2g$	16384 LSB/g
1	$\pm 4g$	8192 LSB/g
2	$\pm 8g$	4096 LSB/g
3	$\pm 16g$	2048 LSB/g

Slika 43 Pretvorniki surovih vrednosti pospeškomera v berljive vrednosti

FS_SEL	Full Scale Range	LSB Sensitivity
0	$\pm 250\text{ }^{\circ}/s$	131 LSB/ $^{\circ}/s$
1	$\pm 500\text{ }^{\circ}/s$	65.5 LSB/ $^{\circ}/s$
2	$\pm 1000\text{ }^{\circ}/s$	32.8 LSB/ $^{\circ}/s$
3	$\pm 2000\text{ }^{\circ}/s$	16.4 LSB/ $^{\circ}/s$

Slika 44 Pretvorniki surovih vrednosti žiroskopa v berljive vrednosti

Pomembno je, da uporabimo pravilen pretvornik glede na nastavljeno območje meritev. Območje meritve nastavimo tako, kot je prikazano na sliki (Slika 41 Konfiguracija in nastavitve območja meritev). Ko surove vrednosti delimo s pretvornikom, dobimo meritve v berljivih vrednostih.

3.3.2.2.1 PROGRAM MAGNETO 1.2 IN MATRIČNE OPERACIJE

Zavedava se, da senzorji tovarniško niso popolnoma umerjeni in niso izdelani popolno. Zato je treba senzor umeriti in nato uporabiti kalibracijsko matriko programa Magneto1.2. Da sva lahko umerila senzor, sva morala dobiti surove vrednosti pospeškomera v različnih orientacijah. Ko sva dobila nekaj čez sto meritev, sva jih uvozila v Magneto1.2. S programom sva dobila dve matriki: a in b. Matrika a predstavlja, koliko so X, Y, Z osi med sabo zamaknjene, saj je tovarniško nemogoče izdelati popoln senzor.

$$a = \begin{pmatrix} 0.994508 & 0.001218 & 0.003548 \\ 0.001218 & 0.994691 & -0.000662 \\ 0.003548 & -0.000662 & 0.996563 \end{pmatrix}$$

Matrika b pa predstavlja odstopanje (bias) od vrednosti, ki so pravilne. Matriko a lahko uporabiva tudi pri žiroskopu, saj so tam X, Y in Z osi enako zamaknjene. Odstopanja žiroskopskih vrednosti pa sva dobila tako, da sva senzor umirila in odštela/prištela toliko, da je kazalo 0.

$$b = (357.108853 \quad -23.930205 \quad 131.861592)$$

Zgornji b predstavlja biase, ki sva jih dobila s programom. Ker sva za kalibracijo uporabila surove vrednosti, sva tudi najprej opravila kalibracijsko enačbo na surovih podatkih, ki sva jih šele nato pretvorila v berljive vrednosti.

$$h_{kal} = a(h - b)$$

Zgornja enačba predstavlja, kako z uporabo matrike A in b dobimo kalibrirane vrednosti. Spremenljivka h predstavlja nekalibrirane vrednosti, h_{kal} pa predstavlja kalibrirane končne vrednosti, ki jih je treba le še pretvoriti v berljive podatke. Postopek matričnega množenja je zaradi lažje berljivosti najprej opisan brez programa in nato je na voljo še program za pridobivanje kalibriranih vrednosti.

Na začetku moramo od matrike h (meritve) odšteti matriko b. To storimo tako:

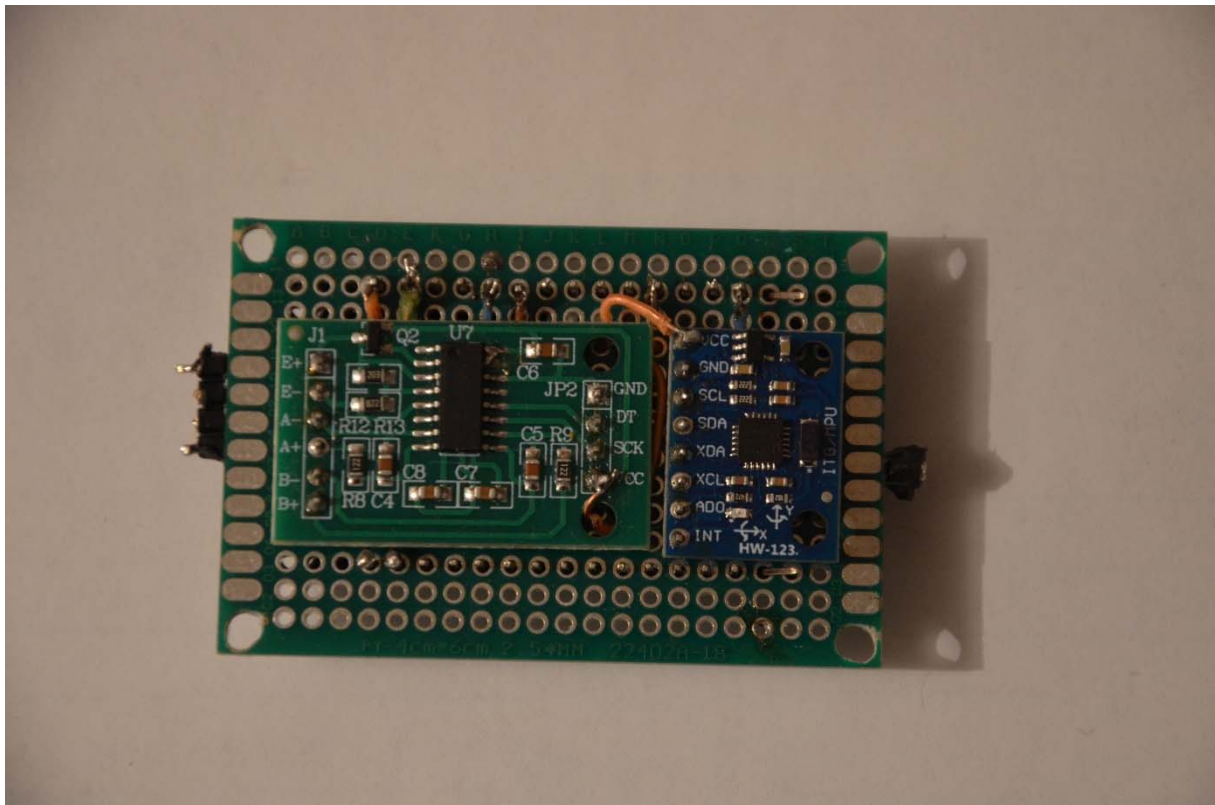
$$h' = \begin{pmatrix} x - b_x \\ y - b_y \\ z - b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

Ko odštejemo odstopanje, je treba matriko velikosti 3 x 1 ($h - b$) množiti z matriko velikosti 3 x 3 (a). To storimo tako:

$$h_{kal} = a \cdot h' = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax' + by' + cz' \\ dx' + ey' + fz' \\ gx' + hy' + iz' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{kal} \\ y_{kal} \\ z_{kal} \end{pmatrix}$$

Dimenzije matrike h_{kal} so enake dimenzijam začetne matrike h.

3.3.3 SENZOR VHODNE MOČI

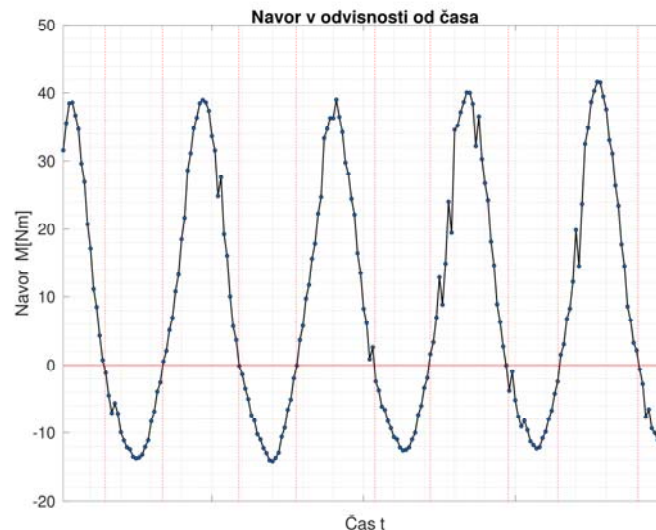


Slika 45 Napravica za obdelavo podatkov vhodne moči

Senzor vhodne moči sestavlja 5 glavnih enot: žiroskop (MPU-6050), merilne celice, ojačevalnik za merilne celice, mikrokrmilnik ESP32 in 9V polnilna baterija. Senzorji so med seboj povezani na PCB ploščici, ki je prek 3D tiskanega plastičnega nosilca pritrjena na gonilko.

Kot že samo ime pove, je glavna naloga senzorja merjenje vhodne moči. Za izračun vhodne moči pa potrebujemo dva podatka: kotno hitrost in navor. Za merjenje kotne hitrosti sva uporabila žiroskop MPU-6050, za merjenje navora pa merilne celice. O umeritvi merilnih celic je več napisano v poglavju o merjenju vhodne moči, zato tega postopka ne bova opisovala ponovno.

Sedaj sva imela vse potrebno, da sva se lotila programiranja vsega skupaj. Ideja je bila zasnovana tako, da bova vhodno moč dobivala s frekvenco 80 Hz, vendar se je izkazalo, da je za merjenje navora treba dobiti povprečje vrednosti v posameznem časovnem intervalu, saj se navor na gonilki skozi obrat obnaša kot sinusna funkcija.



Slika 46: Graf navora na gonilki v odvisnosti od časa

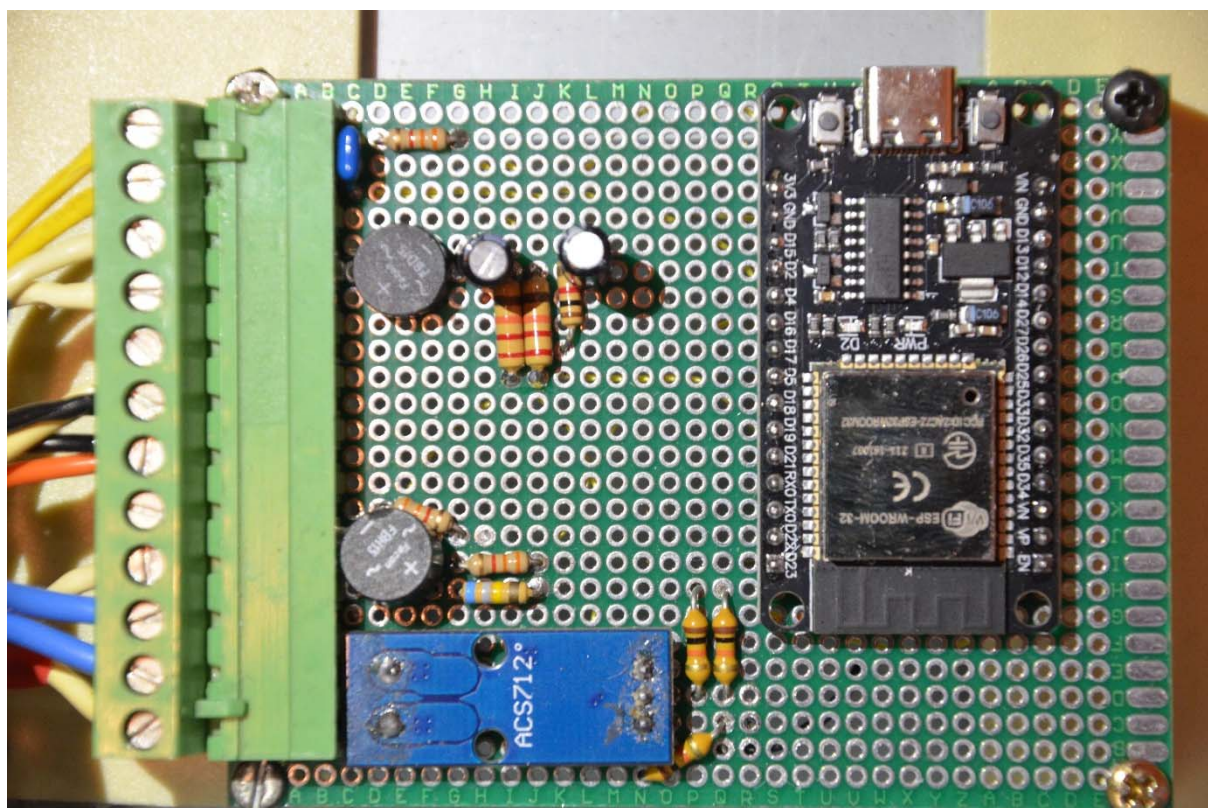
Graf sva pridobila z merjenjem sile na pedalu in pretvorbo lete v navor. S tem sva ugotovila, da moči ne bo mogoče meriti v posameznih točkah, vendar bo za to potreben algoritem, ki bo izračunal povprečje navora ob vsakem obratu. Ker je navor, ko je gonilka postavljena pravokotno s tlemi, enak 0, sva se odločila, da bova razdelila navor na odseke, kjer graf navora spremeni predznak iz pozitivnega v negativnega. S tem sva dobila vrednosti navora za približno en obrat. S povprečnim navorom in s povprečno kotno hitrostjo v tem času sva tako lahko izračunala moč. Ker pa sva izdelala merilnik vhodne moči samo na eni strani gonilke, je bilo treba predpostaviti, da je navor na drugi strani gonilke enak navoru na prvi strani gonilke. Zaradi tega sva morala izračunano moč podvojiti.

Merilni program za merjenje vhodne moči se na prvi pogled zdi preprost, a posamezne nianse, kot so merjenje povprečij in zaznavanje prehoda iz pozitivnih meritev v negativne, dodajo kompleksnost. Zaradi omejenega časa nisva mogla optimalno optimizirati in pripraviti berljivega programa, zato v tej raziskovalni nalogi ne bo podrobno razložen.

3.3.3.1 POVEZLJIVOST MERILNIKA VHODNE MOČI

Kot je bilo že večkrat izpostavljeno, je bila glavni kriterij za izbiro mikrokrmilnika za merilnik vhodne moči možnost brezžične povezljivosti. Odločila sva se, da za brezžično povezljivost uporabiva MQTT, ki je razložen v poglavju 3.3.5.

3.3.4 SENZORJI NA IZHODU



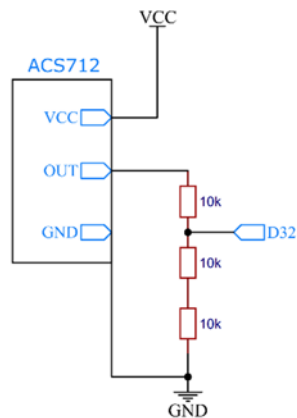
Slika 47 Najin sistem senzorjev na izhodu

Senzorji na izhodu vključujejo merjenje moči, frekvence vrtenja gonilke in elektromotorja. Izhodno moč meriva z merjenjem električne napetosti in električnega toka. Hitrost vrtenja gonilke dobiva z branjem magnetnega stikala, ki je sklenjeno ob prisotnosti magnetnega polja. Hitrost vrtenja elektromotorja pridobivava z branjem tahometra, ki je vgrajen v elektromotorju, katerega izhodna izmenična napetost se viša z višanjem obratov. Poleg merjenja podatkov na izhodu se prav tako uporablja za sprejemanje informacij senzorja vhodne moči in za pošiljanje vseh podatkov sobnega kolesa prek MQTT protokola.

3.3.4.1 MERJENJE ELEKTRIČNEGA TOKA

Za merjenje električnega toka uporablja senzor ACS712, ki temelji na Halloovem pojavu. Uporablja sva različico, ki omogoča merjenje do 20 A. Senzor priključimo popolnoma enako, kot bi priključili navaden merilnik toka. Senzor ima analogen izhod, ki ga je mogoče prebrati z mikrokrmilnikom, kot je ESP32, ki sva ga tudi uporabila. Opis izhoda in pretvorbe senzorjevega izhoda v tok je v opisu opreme za eksperimentalno delo.

Ker merilnik toka za napajanje potrebuje 5 V in ima lahko posledično 5 V izhod (pri 20 A), sva morala uporabiti delilnik napetosti za priključitev na analogni pin EPS32, saj je maksimalna napetost, ki jo EPS32 podpira, 3,3 V. 5 V za napajanje sva dobila iz VIN pina, saj je bil ESP32 napajan s 5 V iz USB-C priključka.



Slika 48 Vezava ACS712 z ESP32

Problem se je pojavil, ko sva opazila, da je izhodna napetost različnih napajalnikov različna in odstopa za nekaj 100 mV. Zaradi tega lahko pride do odstopanj pri priključitvi na različne napajalnike. Napako sva lahko programsko odpravila s spremembo ničelne vrednosti toka na polovico napajalne napetosti, na 2,5 V, in z odštevanjem odstopanj, ki sva jih določila eksperimentalno.

```
// pin na katerega je priključen senzor
#define TOK_PIN 32
// napetost na VIN pinu, ki se spreminja z napajalniki
#define NAPETOST_NAPAJANJA 4.76
// odstopanja so umerjena eksperimentalno
#define TOK_ODSTOPANJE -0.12
#define TOK_NAPETOST_ODSTOPANJE -0.165
// delilnik napetosti na izhodu ACS712
#define TOK_UPOR_MERITEV 20000
#define TOK_UPOR_REFERENCA 10000

double pridobiIzhodniTok()
{
    // napetost na ESP32 pinu z upoštevanjem odstopanj
    // pridobiNapetostNaPin --> glej poglavje Programske funkcije za branje analognih vhodov
    double napetostNaPin = pridobiNapetostNaPin(TOK_PIN) - TOK_NAPETOST_ODSTOPANJE;

    // dejanska napetost brez delinika napetosti
    // pretvoriVDejanskoNapetost --> glej poglavje Programske funkcije za branje analognih vhodov
    double dejanskaNapetost = pretvoriVDejanskoNapetost(napetostNaPin, TOK_UPOR_REFERENCA, TOK_UPOR_MERITEV);

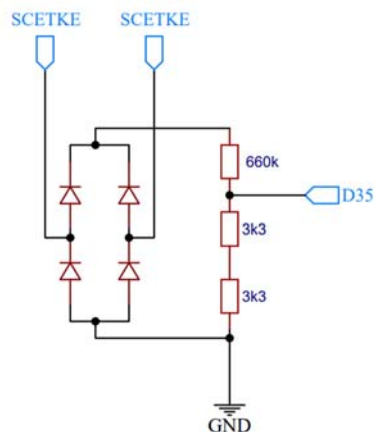
    // izračunan tok z upoštevanjem odstopanj
    double tok = (dejanskaNapetost - (NAPETOST_NAPAJANJA / 2)) / 0.1 - TOK_ODSTOPANJE;
    return tok;
}
```

Slika 49: Primer funkcije za branje električnega toka senzorja ACS712

Osnovni program za branje električnega toka senzorja ACS712 je v celoti dostopen na naslednji povezavi: <https://l.etiam.si/acs712>

3.3.4.2 MERJENJE ELEKTRIČNE NAPETOSTI

Za merjenje električne napetosti nisva uporabljala nobenega zato posebno namenjenega senzorja, temveč sva uporabila delilnik napetosti, da sva pridobila napetost od 0 do 3,3V, ki sva jo lahko izmerila z EPS32. Na začetku sva izmerila izhodno napetost z navadnim merilnikom napetosti, da sva ugotovila, v kakšnem razmerju je treba izdelati delilnik. Izkazalo se je, da lahko izhodna napetost pri visokih vrtljajih doseže tudi nekaj več kot 300 V, zato sva uporabila razmerje 1 : 100.



Zavedala sva se tudi, da morava uporabiti visoke vrednosti uporov, saj bi drugače sam merilnik porabil ogromno energije za merjenje. Tako sva dobila skupen upor merilnika napetosti, približno 660 kΩ, in porabo približno 140 mW. Poleg delilnika napetosti sva uporabila tudi diodni mostič, da sva zagotovila, da je na analognem vhodu vedno pozitivna napetost. Zaradi diodnega mostiča sva izračunani napetosti prištel 1,4 V, saj je padec na posamezni diodi 0,7 V. Napetost na analognem kanalu sva pretvorila v dejansko napetost.

```
#define NAPETOST_PIN 35

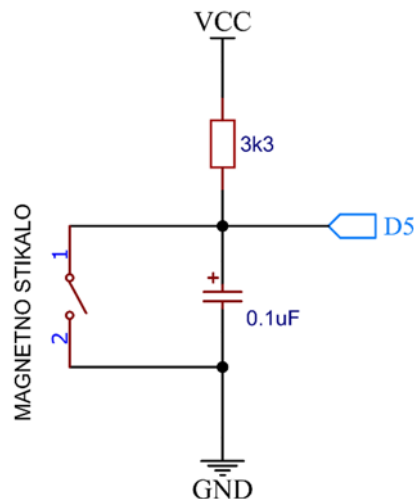
// delilnik napetosti za maksimalno 330V
#define NAPETOST_UPOR_REFERENCA 660000
#define NAPETOST_UPOR_MERITEV 6600

// pridobitev izhodne napetosti
double pridobiIzhodnoNapetost()
{
    // pridobiNapetostNaPin → glej poglavje Programske funkcije za branje analognih vhodov
    double pinVoltage = pridobiNapetostNaPin(NAPETOST_PIN);
    // dejanska napetost brez delilnika napetosti
    // pretvoriVDejanskoNapetost → glej poglavje Programske funkcije za branje analognih vhodov
    // napetosti je prištetih tudi 1,4V zaradi padca na diodnem mostiču
    return pretvoriVDejanskoNapetost(pinVoltage, NAPETOST_UPOR_REFERENCA, NAPETOST_UPOR_MERITEV) + 1.4;
}
```

Slika 50 Primer funkcije za branje električne napetosti

3.3.4.3 MERJENJE ŠTEVILA OBRATOV KOLESARJA

Za merjenje števila obratov na minuto (v nadaljevanju RPM) sva uporabila magnetno stikalo, ki je bilo nameščeno na sobnem kolesu, ki sva ga našla. Deluje tako, da se ob prisotnosti magnetnega polja stikalo sklene. Senzor je tako statično nameščen na okvirju sobnega kolesa, na gonilki pa je nameščen en magnet. Z merjenjem časa med posameznimi stiki stikala lahko izračunamo RPM. Magnetno stikalo je bilo na ESP32 vezano tako, kot predstavlja Slika 51.



Slika 51 Vezava magnetnega stikala z mikrokrmilnikom

Stikalo je vezano tako, da v je vrednost na kanalu D5 HIGH, ko je stikalo razklenjeno, in vrednost LOW, ko je stikalo sklenjeno. Poleg tega lahko v programu nastavimo maksimalen možen RPM in se s tem znebimo motenj v stikalu, ki včasih ob prisotnosti magneteta skače med sklenjenim in razklenjenim stanjem in kondenzator tega ne ublaži dovolj dobro.

```
double izracunajRpm(int casMS)
{
    // casMS predstavlja cas enega obrata v ms
    double rpm = 60.0 / (casMS / 1000.0);
    return rpm;
}
```

Slika 52 Primer funkcije za izračun obratov na minuto (RPM)

Čas enega obrata in preverjanje, ali gre za pristen stik, sta izvedena znotraj funkcije **loop()**. Pomembno je poudariti, da funkcija ne bo delovala pravilno, če se bo **loop()** funkcija izvajala prepočasi.

```
// pin magnetnega stikala
#define RPM_STIKALO_PIN 5

// maksimalen RPM, ki najvrjetneje ne bo presežen
// se uporablja zato, da ločimo dejanski obrat od lažnih stikov stikala
#define MAX_RPM 250.0
// čas enega obrata pri MAX_RPM
#define MIN_OBRAT_CAS ((1.0 / (MAX_RPM / 60.0)) * 1000.0)

...

// čas, ko je bilo stikalo nazadnje sklenjeno
unsigned int casZaznanegaObrata;
// čas enega obrata
unsigned int casObrata;
// vrednost RPM
double rpm;

void loop()
{
    // če je stikalo sklenjeno (LOW, ker je stikalo vezano na GND)
    if (digitalRead(RPM_STIKALO_PIN) == LOW)
    {
        // če je čas od zadnje meritve večji od minimalnega
        if (millis() - casZaznanegaObrata > MIN_OBRAT_CAS)
        {
            casObrata = millis() - casZaznanegaObrata;
            // izračun RPM, ki je shranjen v spremenljivko rpm
            rpm = izracunajRpm(casObrata);
            // posodobitev casZaznanegaObrata na trenutni čas
            casZaznanegaObrata = millis();
        }
    }
}
```

Slika 53 Merjenje števila obratov na minuto

Pozneje sva prišla do sklepa, da je nesmiselno uporabljati RPM, izmerjen z magnetnim stikalom, saj lahko namesto tega uporabiva precej bolj natančen podatek žiroskopa iz merilnika vhodne moči.

3.3.4.4 TAHOMETER

Tahometer je naprava za merjenje hitrosti vrtenja. Motor pralnega stroja ga je imel že vgrajenega, zato sva se ga odločila uporabiti. Za njegovo uporabnost sva poskrbela tako, da sva ga prek delilnika napetosti vezala z mikrokrmilnikom. Prebrano napetost sva pretvorila v število obratov na minuto in s tem pridobila podatek o vrtilni količini na najinem elektromotorju. Lahko bi obrate merila prek preračuna vhodne vrtilne količine,

saj pozna pretvorbo vrtenja prvega proti zadnjemu jermenskemu zobniku, katera znaša 72,8-kratno pohitritev vrtenja. Raje sva za merjenje izhodne vrtilne količine uporabila tahometer, zaradi večje natančnosti. Za pravilno delovanje tahometra sva poskrbela z umeritvijo. Dobila sva število $6061 \frac{1}{v_m}$, ki predstavlja, kolikšna je vrtilna frekvenca elektromotorja pri posamezni napetosti na ESP32 pinu.

```
// vrednost pridobljena s kalibracijo
// predstavlja RPM na V
#define RPM_NA_V 6061.0

double pridobiTahorPM(double napetostNaESP32) {
    double tahoRPM = 0.0;
    tahoRPM = napetostNaESP32 * RPM_NA_V;
    return tahoRPM;
}
```

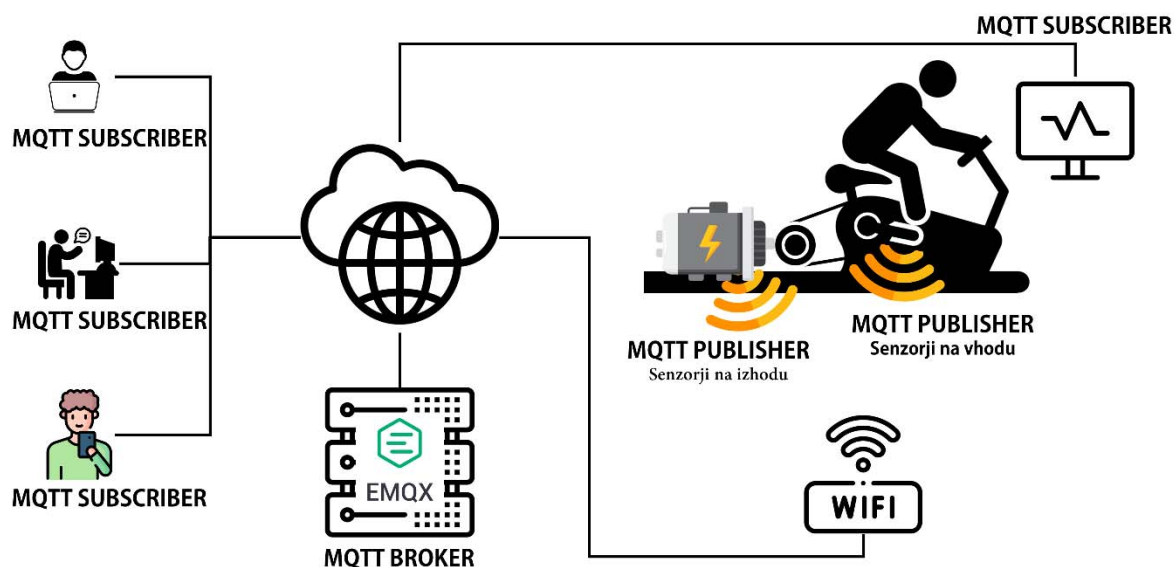
Slika 54 Primer programa za izračun vrtilne frekvence tahometra



Slika 55 Tahometer

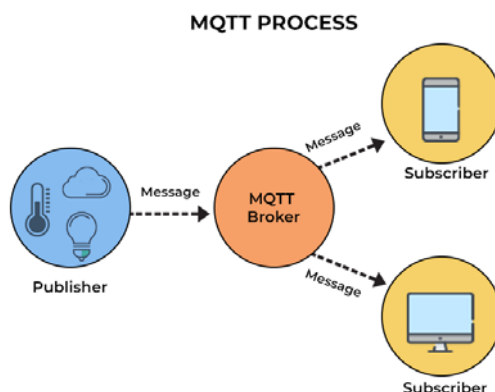
3.3.5 PRIKAZ IN BELEŽENJE PODATKOV

Odločila sva se, da bova prikaz podatkov sobnega kolesa omogočila prek interneta. Odločitev sva sprejela, saj sva menila, da je popolnoma neuporabno vgraditi v sobno kolo poceni zaslon, če lahko namesto tega uporabiva računalnik ali celo telefon.



Slika 56 Shematski prikaz povezljivosti sobnega kolesa

Prvotna zamisel je bila, da bi bila povezljivost s sobnim kolesom omogočena prek BLE (Bluetooth Low Energy), vendar tako ne bi bil povezljiv s čisto vsemi napravami. Med raziskovanjem po spletu sva naletela na MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), ki je komunikacijski protokol. Uporablja se za prenos sporočil med napravami prek interneta za prenos majhne količine podatkov. Naprava za merjenje na izhodu in naprava za merjenje kadence sta tako medsebojno neodvisni in pošiljata svoje meritve ločeno druga od druge.



Slika 57 MQTT shema

Kot je razvidno iz (Slika 57 MQTT shema), MQTT komunikacijo sestavljajo tri glavne enote.

3.3.5.1 MQTT ZALOŽNIK (PUBLISHER)

Založnik je naprava ali programska oprema, ki pošilja sporočila prek MQTT omrežja. Predstavlja vir sporočil za druge naprave in aplikacije v MQTT omrežju. Sporočila so poslana na določene teme (topics), na katere so naročeni naročniki (subscriber).

3.3.5.2 MQTT POSREDNIK (BROKER)

Posrednik je strežnik ali posredniška programska oprema, ki sprejema, usmerja in posreduje sporočila med založniki in naročniki. Omogoča povezavo med založniki in naročniki, ne da bi bili ti neposredno povezani med seboj. Posrednik pa za svoje delovanje potrebuje strežnik, ki ga ima v lasti eden od naju. Odločila sva se za uporabo EMQX brokerja, saj je brezplačen, preprost za namestitvev in podpira dvosmerno WebSockets tehnologijo, ki jo uporabljava pri prikazu meritev na spletni strani.

3.3.5.3 MQTT NAROČNIK (SUBSCRIBER)

Naročnik je naprava ali aplikacija, ki je naročena na določene teme (topics), iz katerih prejema podatke založnikov. Ker sva želela, da bi podatke prikazovala na spletni strani, sva na spletni strani uporabila povezavo do MQTT posrednika z dvosmerno WebSockets tehnologijo, ki omogoča učinkovito komunikacijo v realnem času spletne strani / aplikacije z MQTT posrednikom. Na naslednji strani je osnoven program za pošiljanje podatkov prek MQTT komunikacije.

```

// secrets.h vsebuje podatke, kot so SSID omrežja, geslo za omrežje,
// naslov MQTT posrednika, vrata MQTT posrednika, uporabniško ime in
// geslo za povezavo na MQTT posrednika. Te podatke uporabljamo v tem
// programu za vzpostavitev povezave z Wi-Fi omrežjem in MQTT posrednikom.
#include "secrets.h"

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

// Wi-Fi
const char *ssid = W_SSID; // SSID omrežja
const char *wifi_geslo = W_PASS; // Geslo za omrežje
WiFiClient wifiClient; // Ustvari objekt WiFiClient za povezavo

// MQTT Broker
const char *mqtt_broker = MQTT_BROKER; // Naslov MQTT posrednika (brokerja)
const int mqtt_port = MQTT_PORT; // Vrata MQTT posrednika
const char *topic = "test-tema"; // Tema, kamor bomo pošiljali sporočila
const char *mqtt_uporabnik = MQTT_UPORABNIK; // Uporabniško ime za povezavo MQTT
const char *mqtt_geslo = MQTT_GESLO; // Geslo za povezavo MQTT
PubSubClient mqttClient(wifiClient); // Ustvari objekt PubSubClient za povezavo

void setup() {
    Serial.begin(115200); // Začni komunikacijo s serijskim vmesnikom

    WiFi.begin(ssid, wifi_geslo); // Začni povezavo z Wi-Fi omrežjem
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { // Počakaj, da se povežemo
        Serial.print("."); // Izpiši piko, dokler se ne povežemo
        delay(500); // Počakaj 0.5 sekunde
    }

    Serial.println("Povezan na WiFi"); // Ko smo povezani, izpiši sporočilo

    // Povezovanje na MQTT posrednika
    mqttClient.setServer(mqtt_broker, mqtt_port); // Nastavi naslov in vrata posrednika

    // Ponavljaj, dokler ni klient povezan
    while (!mqttClient.connected()) {
        String client_id = "test-publisher"; // Določi identifikator klienta

        // Poskusi se povezati
        if (mqttClient.connect(client_id.c_str(), mqtt_uporabnik, mqtt_geslo)) {
            Serial.println("Povezan na MQTT posrednika"); // Če je povezava uspešna, izpiši sporočilo
        } else {
            Serial.print("Neuspešno s stanjem "); // Če je neuspešna, izpiši sporočilo
            Serial.print(mqttClient.state()); // in stanje klienta
            delay(2000); // Počakaj 2 sekundi
        }
    }
}

void loop() {
    // program pošlje sporočilo vsako sekundo
    mqttClient.publish(topic, String("Pozdravljen, svet!").c_str()); // Pošlji sporočilo v temo
    delay(1000); // Počakaj 1 sekundo
}

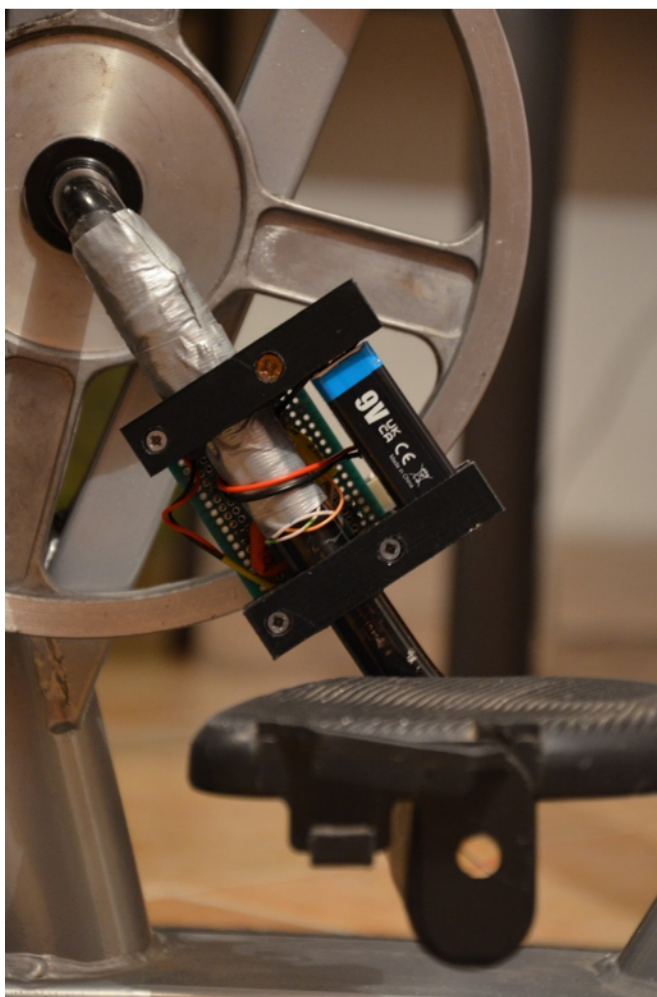
```

Slika 58 Osnoven program za pošiljanje podatkov prek MQTT komunikacije

Spletna stran je zelo preprosta in v realnem času prikazuje podatke meritev. Na spletni strani je tako mogoče spremljati podatke sobnega kolesa na katerikoli napravi, ki je povezana z internetom.

Za zbiranje in opravljanje analiz podatkov pa sva izdelala dodaten program, ki je podatke beležil v datoteko, da so bile kasneje možne obdelave podatkov.

3.4 MERJENJE VSTOPNE MEHANSKE MOČI



Slika 59 Celotni sistem merilnika vstopne mehanske moči

Merilnik moči je naprava, ki jo kolesarji uporabljajo za merjenje svoje vložene mehanske moči v vožnjo. Uporablja se veliko različnih vrst merilnikov moči. Najbolj razširjeni vrsti sta gonilka in pedala. Merilnik moči je bil za raziskovalno nalogo eden izmed ključnih elementov, zato sva ga nujno potrebovala. Sama nisva tekmovalna kolesarja, zato za svoje treninge ne uporabljava merilnikov moči, kar je pomenilo, da ga sama nisva imela. Cene merilnikov moči se za pedala začnejo pri 300 EUR. Za gonilko se merilniki moči začnejo pri 600 EUR. Zaradi tega sva se odločila, da se sama lotiva izgradnje merilnika moči.

Odločila sva se za izgradnjo merilnika moči na gonilki. Tak merilnik moči je bolj natančen od preostalih, in ker sva imela na zalogi le nerodna plastična pedala, sva preostale možnosti zavrnila. Gonilke nisva delala sama, ker je že obstoječa gonilka najdenega sobnega kolesa zadostovala pogojem za izdelavo. Res je, da je bila najina gonilka po prečnem prerezu skoraj popolnoma okrogla in nekoliko manjša od preostalih običajnih kolesarskih gonilk, vendar sva izračunala, da bi morala za namestitvev merilnih celic odstraniti le približno en milimeter od 1,6 centimetrskega premera, kar sva označila kot možno in tudi naredila. Uporabila sva krožno brusilko in

površino dokončno pripravila s P2000 brusilnim papirjem, saj merilne celice zahtevajo popolnoma ravno in gladko površino.

Za izdelavo merilnika moči sva naročila 50 merilnih celic. S tako napravico sva se srečala prvič in tako število je omogočilo večjo toleranco za učenje in napake. Naredila sva napako, ker sva naročila merilne celice, ki še niso imele pritrjenih žičk, kar je dodalo alinejo na seznam dela, ki sva ga morala opraviti. Število uničenih merilnih celic je pet, kar je, glede na občutljivost takih celic in podatek, da sva dve od teh petih celic uporabila kot testen primerek, dosežek. Tri od petih celic sva uničila pri nameščanju na gonilko, ker je bila natančnost pri spajkanju, zaradi velikosti merilnih celic, ki ne presega štirih milimetrov v daljši smeri, za prvih nekaj poskusov enostavno prevelika. Tako sva, po sedmih nameščenih merilnih celicah na gonilko uspela zapreti območje merilnih celic. S tem sva jih zaščitila pred neželenimi učinki okolja, kot je bilo na primer popraviljanje gonilke.

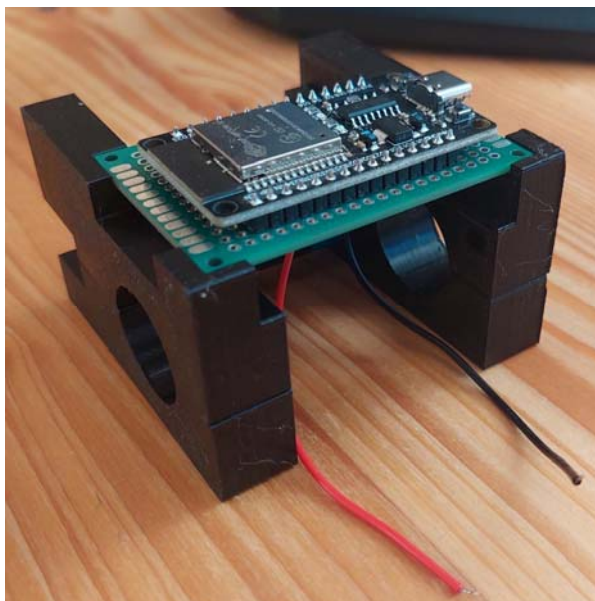
Postavitev merilnih celic na gonilki sva določila s programom Fusion 360. Uporabila sva funkcijo simulacij sil na določen model. Izdelala sva približek modela najine dejanske gonilke in nanjo simulirala obremenitve, ki so enake v realnosti. Točna vrednost obremenitve ni pomembna, saj sva simulacijo izvedla le za določanje največje deformacije na gonilki. Simulacija je pokazala, da je najboljše mesto za postavitev merilnih celic tik ob pregibu iz dela, ki drži pedala, na os.

Gonilko sva za nameščanje merilnih celic razstavila. Ugotovila sva, da naju tu čaka še ena težava. Ležaja sta bila stara. Enega od ležajev sva uspela dobro očistiti, drugega pa malo manj. Gonilko sva sestavila nazaj, da bi dokončala merilnik moči. Po nekaj obratih je gonilka začela pokati. Morala sva jo še enkrat razstaviti. Nepopolno očiščen ležaj je razpadel. Uspela sva ga zasilno popraviti, predvsem z uporabo lastne sile. Napaka ni bila takoj odpravljena. Zato sva gonilko še desetkrat razstavila in sestavila tako, da sva vedno nekaj spremenila in po enajstih poskusih nama je uspelo odpraviti napako.

Med popraviljanjem gonilke, ki je nisva popravila v enem dnevu, sva se lotila ogrodja merilnika moči. Odločila sva se za uporabo 3D printerja, ker sva kljub vsemu želela ustvariti nekaj, kar bi kot končni prototip dobro izgledalo. Model ogrodja najinega merilnika moči sva ustvarila v programu Fusion 360, ki sva ga predstavila že v teoretičnem delu naloge. V program sva uvozila že izdelane datoteke senzorjev in baterije, ki bi jih moralo ogrodje držati. Postavitev vseh komponent sva si vnaprej zamislila. S postavljenimi komponentami sva oblikovala ogrodje v merah, ki sva jih mislila uporabiti za model. Program je omogočil, da sva lahko izdelani model ogrodja izvozila naravnost v 3D tiskalnik, ki nama ga je omogočil prijatelj. Za to se mu najlepše zahvaljujemo. Za tiskanje štirih delov ogrodja je tiskalnik porabil približno 7 ur.

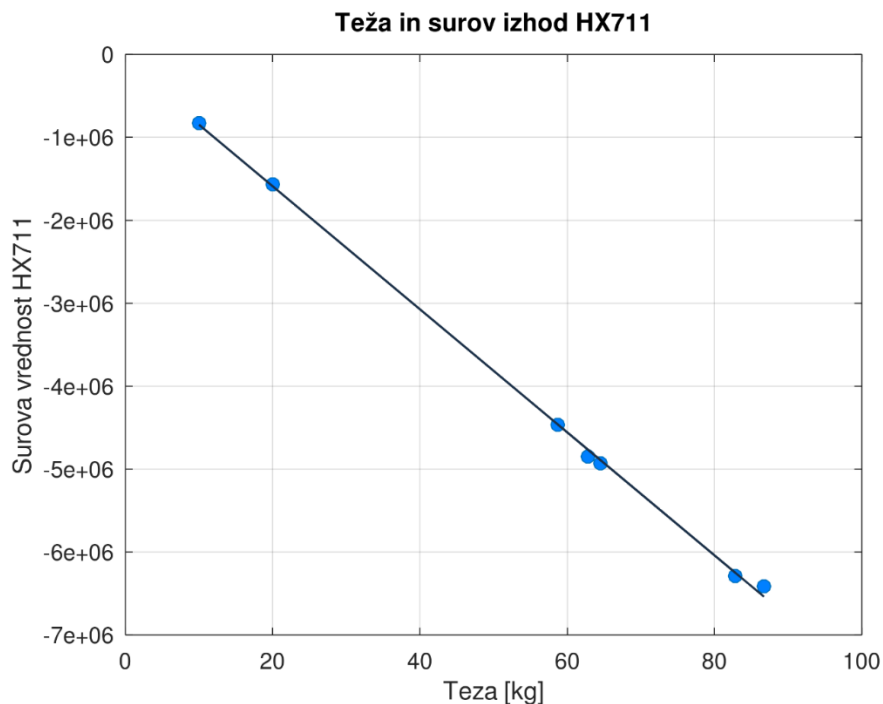
Na baterijo, ki sva jo namenila za merilnik moči, sva za določeno obdobje pozabila. Prišlo je do težave, ker sva za napajanje namenila 9-V alkalno baterijo, kar bi pomenilo, da bi morala merilnik moči ves čas razstavljati in menjavati baterijo, ko bi se nama ta izpraznila. Na srečo sva v trgovini z baterijami odkrila tako, ki nama je rešila to težavo. Polnilna 9 V baterija je poleg sposobnosti ponovne uporabe močno zmanjšala težo merilnika moči, ker je bila za opazen odtenek lažja od alkalne 9-V baterije.

Merjenje moči sva opravila prek enačbe $P = M\omega$. Navor sva zajela z merilnimi celicami, katerih delovanje sva opisala v teoretičnem delu. Navorno ročico sva določila z oceno, z merilno napako $\pm 0,2$ cm. Za merjenje kotne hitrosti sva uporabila žiroskop, ravno tako opisan v teoretičnem delu.



Slika 60: Celoten sistem za analiziranje podatkov

Merilnik moči sva morala po dokončanju programiranja umeriti. Umerjanje je potekalo s pomočjo domače tehtnice in veliko primerkov žive in nežive teže. Eno izmed pedal sva pritrdila z vrvjo, da sva onemogočila padce, in postavila pedala v pravilno rotacijo, ker je največja deformacija gonilke, ko so pedala v vodoravnem položaju. Težo sva postavila na pedala na tisti strani gonilke, kjer sva imela nameščen merilnik moči. Testne teže so bile: 10 kg, 20 kg, 58.7 kg, 62.8 kg, 64.4 kg, 82 kg in 86.8 kg. Graf umeritve je pokazal izjemno majhna odstopanja, v približku 0.5 kg, kar je manj kot 1 % živih tež.

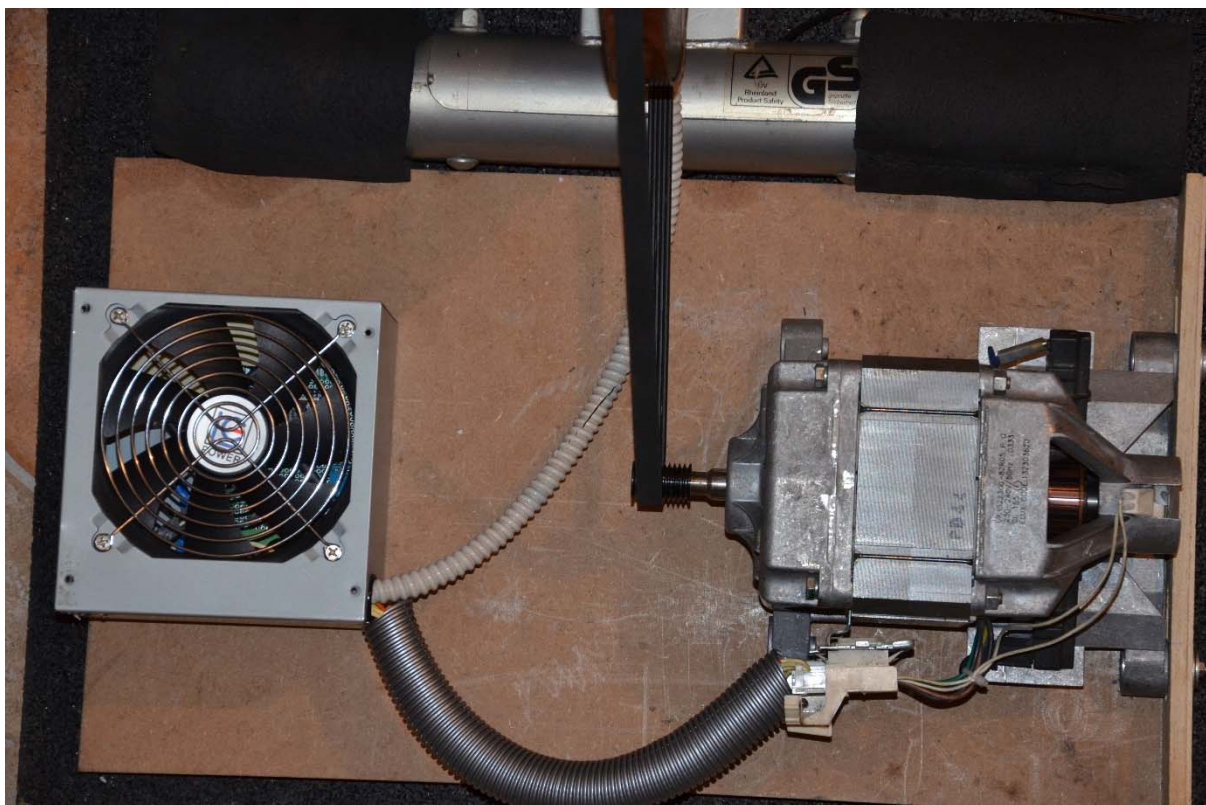


Slika 61: Graf umeritve merilnih celic

Drugi del umeritve je bilo umerjanje žiroskopa. To umerjanje sva opravila z vpenjanjem elektronike v stojalo, kjer sva za tem v času 10 minut opravila 115 meritev, ki so prek progama Magreto1.2 določile kalibracijske matrike za umeritev.

V predhodnem odstavku je bila opisana v resnici druga umeritev vseh senzorjev za merilnik moči. Pri prvem sistemu, ki je bil skoraj enak drugemu, se je zgodila praktična napaka, saj sva ob sestavljanju merilnika moči ustvarila neželen stik med baterijo in vezjem. To pa je povzročilo preveliko napetost na mikrokrmilniku, ki ga je tudi uničila. Tako sva morala celoten postopek izdelave merilnika vhodne moči ponoviti.

3.5 MERJENJE ELEKTRIČNE MOČI



Slika 62 Sistem na izhodu

Električna moč se računa kot zmnožek toka in napetosti. Najin celotni merilni sistem, ali pot do izdelave celotnega merilnega sistema se je začela z izdelavo merilnega sistema za izhodno napetost. Elektromotor, ki sva ga uporabljala, je bil motor pralnega stroja. To je pomenilo, da sva imela vse kable, ki so vodili iz elektromotorja, vsaj trikrat predolge za namene končnega izgleda. V začetni fazi pa je bilo to koristno, saj sva tako lahko po celotnih kletnih tleh zvezala mrežo porabnikov. Nekaj dela in uspela sva »razsvetliti svet«, žarnice so zagorele, kar je naznanilo prvi uspeh, generacija elektrike je uspela. V modernem svetu zveni to kot nekaj popolnoma enostavnega, vendar ni. Gledano skozi generacije, ki so prišle do teh odkritij, je bilo to ogromno dela. In za naju nekaj dela ravno tako, bila sva zelo vesela.

Po uspešno generirani elektriki sva se lotila izdelave sistema za merjenje te izhodne elektrike, ne da bi imela priključen ampermeter in voltmeter. Tako sva priključila senzor toka in napetosti. Ta senzorja sva prek mikrokrmilnika povezala z računalnikom. Sestavila sva program, ki je bral vse vrednosti in tudi izračunal celotno moč. Za zabavo sva postavila še spletno stran, prek katere sva lahko v živo prenašala vrednosti, ki sva jih pridobivala s kolesa. Zadnja stvar v izhodnem delu je bila še merjenje obratov elektromotorja. To sva izvedla s pomočjo tahometra. Mikrokrmilnik, ki sva ga uporabljala, je prenesel napetosti do 5 V. Tahometer pa je generiral napetosti do 40 V. Zato sva prek uporov poskrbela, da z gotovostjo v mikrokrmilniku ne bova presegla 3,3 V. Sedaj sva vse podatke lahko prikazovala na spletni strani.

Najin cilj je bila pridobitev meritve izkoristka. Tako sva za nekaj časa popolnoma opustila delo na meritvah izkoristka. Delala sva na vhodni moči. Po obdobju približno dveh mesecev, ko sva uspela izdelati celotno napravo za meritev vhodne moči, sva se vrnila na izdelavo sistema za izhodno napetost.

V vmesnem obdobju sva veliko število stvari iz sistema izhodne napetosti pozabila. Začela sva skoraj na novo. Če drugače pogledamo, sva se odločila popolnoma idealizirati celoten sistem, v okviru obstoječih zmožnosti. Zamenjala sva mikrokrmilnik, tako da sva prešla na manjšega. Celoten merilni sistem sva postavila na enotno ploščo za elektroniko, kjer je poleg senzorjev za tok in napetost postavljenih še nekaj drugih komponent, kot so kondenzator, nekateri uporniki ter žice. Celotni sistem žic, ki vodijo iz elektromotorja, sva skrajšala na 30 cm in jih prek povezovalnika vezala na ploščo za elektroniko. Ta sistem sva pokrila s škatlo ventilatorja iz starega računalnika, ki ima možnost vezave na ploščo za elektroniko, tako da ga lahko za zabavo uporabiva.

Sistema vhodne in izhodne moči sva povezala. Iz vhodnega sistema za merjenje moči sva podatke prenesla na izhodni sistem za merjenje moči, iz katerega vse podatke preneseva na računalnik in spletno aplikacijo, kjer bo najverjetneje možno spremljanje podatkov v živo. V stanju, ki trenutno določa najino sobno kolo, se podatki v veliki meri preoblikujejo že v mikrokrmilniku, ki jih potem v obdelanem stanju pošlje prek celotnega sistema naprej.

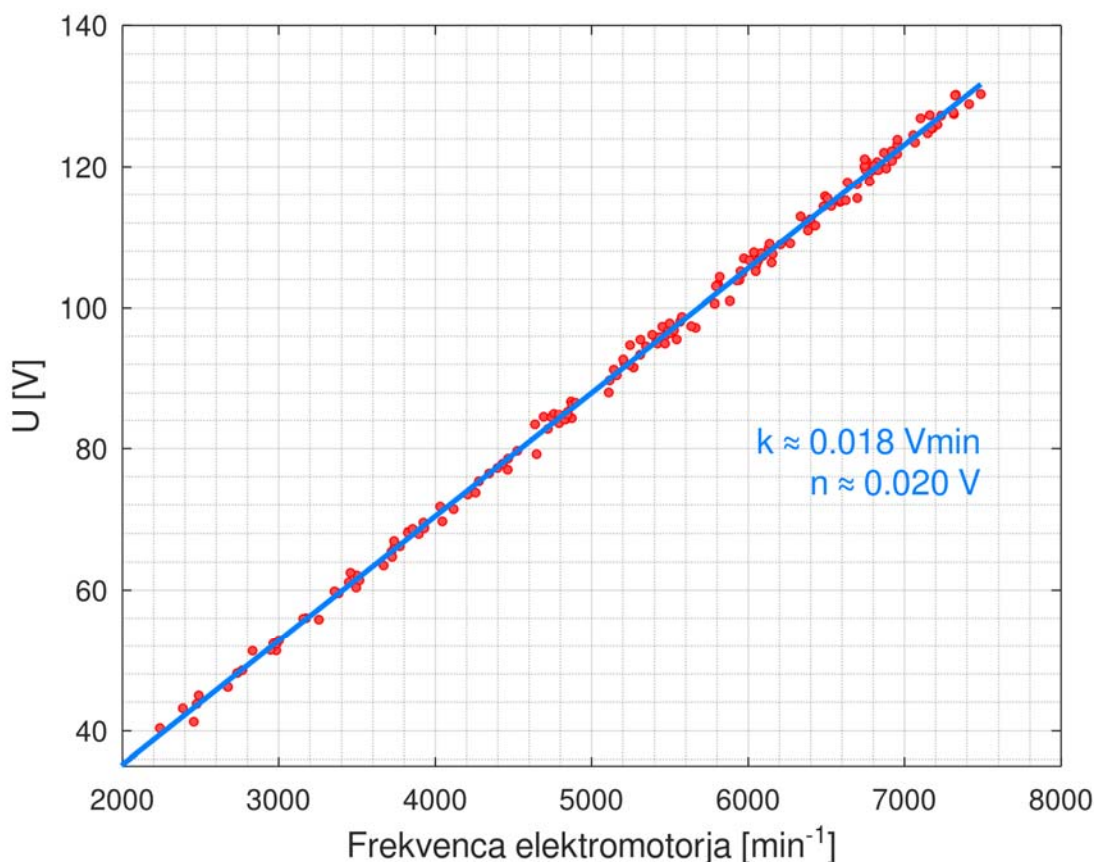
3.6 IZKORISTEK

Po kar precejšnji količini dela sva uspela izdelati sistem za merjenje izkoristka najinega sistema. Na žalost sva morala velik del dela, ki sva ga opravila, izpustiti, ker je že količina programiranja podvojila dolžino raziskovalne naloge. Za predstavu lahko poveva, da vsebuje eden izmed programov, ki je namenjen za obdelavo podatkov vhodne moči, prek 500 vrstic programiranja. Popolnoma izpuščeno je delo z montažo, spajkanje idr.

Za naju je pomembna le osnova izkoristka, zato se bova ukvarjala le s tem, koliko mehanske energije se pretvori v električno in ne kolikšen del se spremeni v toploto, koliko se izgubi po žicah ter vse podobne podrobnosti. Teste izkoristka sva opravila pri različnih obratih, močeh in obremenitvah. Za pomoč pri poganjanju sva prosila prijatelja, ki je bolj resen kolesar kot midva in nama je omogočil enakomerno poganjanje, ki je pomembno, da nama ni vse skakalo po svoje.

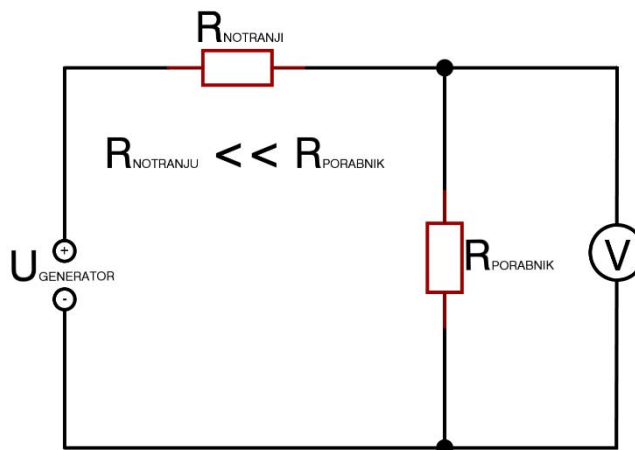
Najprej naju je zanimalo, ali izhodna napetost na elektromotorju brez porabnika z višjimi vrtiljaji linearno narašča. Opravila sva 165 meritev napetosti in vrtilne frekvence elektromotorja v razmiku 500 ms. Meritve sva nato narisala na grafu, kjer se je izkazalo, da napetost na elektromotorju brez porabnika tudi v praksi linearno narašča.

Napetost v odvisnosti od vrtilne frekvence elektromotorja



Slika 63 Napetost v odvisnosti od vrtilne frekvence elektromotorja

Ker je vsak vir napetosti nepopoln in ima določen notranji upor, naju je zanimalo, ali ima pri elektromotorju upor zadostno vrednost, da jo je vredno upoštevati. Izkazalo se je, da je notranji upor mnogo manjši od upora porabnikov, ki sva jih uporabljala, zato padec napetosti na notranjem uporju ne vpliva poglavitno na izhodno napetost. To sva ugotovila tako, da sva pri enakih vrtljajih elektromotorja priključila različne porabnike in opazovala padce izhodne napetosti. Te vrednosti so bile zanemarljive.



Slika 64 Shema generatorja s porabnikom

3.6.1 KRIVULJA IZKORISTKA

Merjenje izkoristka (η) sva opravila v dveh sklopih meritev. Cilj meritev je bil pridobiti izkoristek generatorja v različnih območjih vložene moči. Tako bi lahko to moč povezala s pridobljeno izhodno močjo.

Krivulje izkoristka pri različnih vrtilnih frekvencah elektromotorja nisva pridobila, saj nisva imela porabnika, ki bi pri različnih napetostih deloval z enako močjo.

3.6.1.1 NESTRUKTURIRANE MERITVE

Prvi sklop meritev so bile meritve, kjer nisva imela načrtanega cilja merjenja. Kolesar je pri prvem sistemu meritev ves čas poganjal kolo. V tem času sva midva dodajala in odstranjevala porabnike. Rekla sva mu, da ni potrebno poganjati enakomerno, zato so bile meritve opravljene pri različnih vrtilnih frekvencah. V tem delu meritev je bilo glavno, da poskusimo izmeriti vhodne in izhodne moči v različnih intervalih. Tako sva pridobila skupek meritev, ki sva jih lahko postavila v graf. Za analizo sva uvozila podatke v program Logger Pro. V graf sva postavila izkoristke $\frac{P_{\text{IZHOD}}}{P_{\text{VHOD}}}$ v odvisnosti od izhodne moči. V programu sva poskušala najti funkcijo, ki bi se najbolj prilegala točkam na grafu. Meritve izhodne moči so bile na intervalu $P_{\text{IZHOD}} \in (\sim 16 \text{ W}, \sim 120 \text{ W})$. Na tem intervalu se je izkazalo, da se točke na grafu najboljše prilegajo funkciji, vendar ne moreva z gotovostjo trditi, da izven intervala ne bo prišlo do velikih odstopanj:

$$\eta = \frac{P_{\text{IZHOD}}}{P_{\text{VHOD}}} \approx \frac{A}{x^2} + B$$

kjer x predstavlja izhodno moč, koeficienta A in B pa sta pridobljena iz eksperimentalnih meritev in sta odvisna od samih lastnosti sistema, kot na primer izgub pri jermenskem prenosu in pretvorbi mehanske energije v električno. Zaradi tega bi bil postopek pridobitve koeficientov na teoretičen način oziroma brez eksperimentalnih postopkov zelo obsežen in bi zahteval matematični model celotnega sistema. Zaradi obširnosti takega matematičnega postopka bi ga lahko izvedla kot samostojno raziskovalno nalogo.

V obsežne analize se zato nisva poglobila, temveč sva koeficiente pridobila iz eksperimentalnih meritev s programom Logger Pro. Vrednosti koeficientov sta približno sledeči:

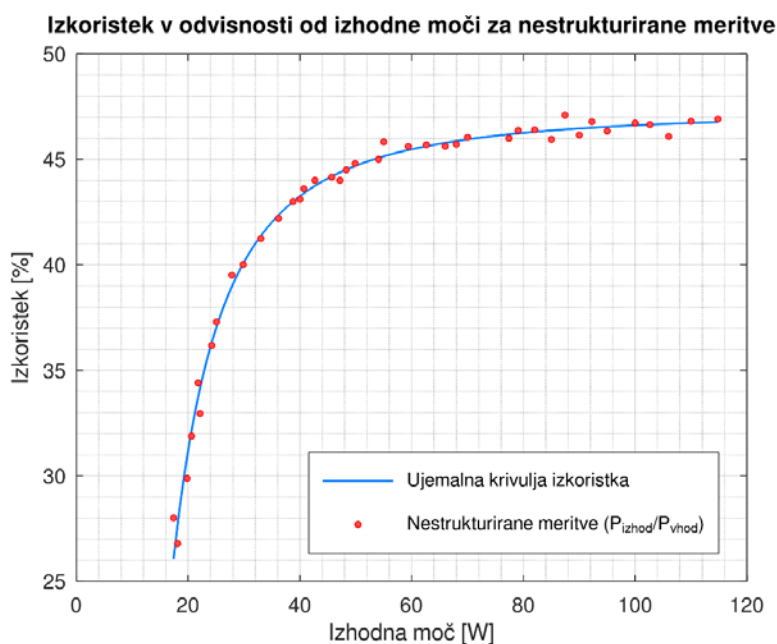
$$A \approx -64,1 W^2$$

$$B \approx 0,47$$

Celotna funkcija za izračun izkoristka pri določeni izhodni moči izgleda tako:

$$\eta \approx \frac{-64,1 W^2}{P_{IZHOD}^2} + 0,47$$

Kot že omenjeno, sva meritve opravila na določenem intervalu, saj izhodnih moči, manjših od 16 W, nisva pridobila, ker so se nama zdele te meritve popolnoma neuporabne. V praksi bi to za kolesarja pomenilo od 40 W do 50 W vhodne moči, kar lahko enačimo z 0. Izhodnih moči, večjih od 120 W, ravno tako nisva pridobila, saj je mehanska sposobnost kolesa onemogočila poganjanje prek 240 W vhodne moči. Enostavneje povedano, pri višjih močeh bi bila celotna konstrukcija prekomerno obremenjena, česar si nisva upala tvegati, saj bi lahko s tem uničila celoten model sobnega kolesa.



Slika 65 Izkoristek v odvisnosti od izhodne moči za nestrukturirane meritve

3.6.1.2 STRUKTURIRANE MERITVE

Drug sklop meritev sva načrtovala v naprej. Kolesar ima svoje območje vrtilne frekvence, kjer mu je poganjanje udobno nekje od 60 do 80 obratov na minuto (v nadaljevanju RPM). Merjenje v tem območju nama je prineslo prenizke moči, zaradi česar sva se odločila raztegniti območje meritev do 120 RPM. Meritve sva zajela pri 60 RPM, 80 RPM, 100 RPM in 120 RPM. Navedene vrednosti so bile ciljne vrednosti, česar ni bilo možno popolnoma natančno izvesti, zato so te vrednosti približki. Odstopanja so se gibala v območju okoli 2 %, z največjo vrednostjo odstopanja 5 %. Za premike po 20 obratov na minuto sva se odločila, saj bi lahko natančnost poganjanja preveč odstopala od ciljane vrednosti in sva tako preprečila prekrivanje posameznih meritev. Za točen ritem poganjanja sva poskrbela tako, da sva kolesarju vklopila metronom, kar je omogočilo poznavanje pravega ritma.

Prva merjenja sva opravila pri vrtilni frekvenci 60 RPM.

60 RPM	Nizka obremenitev	Visoka obremenitev
P_{vhod} [W]	68,7	159,2
P_{izhod} [W]	17,6	74,1
I [A]	0,24	1,06
U [V]	73,7	70,0
$U_{kolesar}$ [min^{-1}]	59,4	58,4
U_{motor} [min^{-1}]	4315	4248

Drugo merjenje sva opravila pri vrtilni frekvenci 80 RPM.

80 RPM	Nizka obremenitev	Visoka obremenitev
P_{vhod} [W]	70,0	174,4
P_{izhod} [W]	26,6	80,8
I [A]	0,27	0,86
U [V]	97,0	94,1
$U_{kolesar}$ [min^{-1}]	79,1	79,0
U_{motor} [min^{-1}]	5761	5755

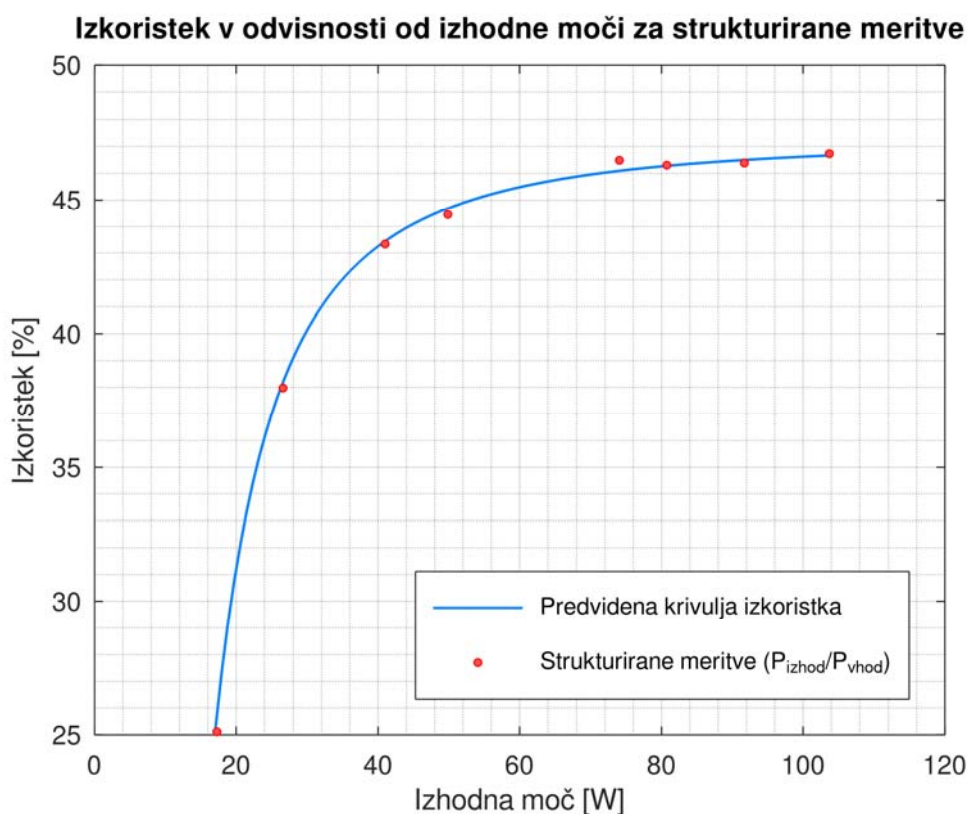
Tretje merjenje sva opravila pri vrtilni frekvenci 100 RPM.

100 RPM	Nizka obremenitev	Visoka obremenitev
P_{vhod} [W]	94,6	197,7
P_{izhod} [W]	41,0	91,7
I [A]	0,3	0,8
U [V]	130	121,6
$U_{kolesar}$ [min^{-1}]	98,3	95,1
U_{motor} [min^{-1}]	7158	6921

Zadnje merjenje sva opravila pri vrtilni frekvenci 120 RPM.

120 RPM	Nizka obremenitev	Visoka obremenitev
P_{vhod} [W]	112,2	221,9
P_{izhod} [W]	49,9	103,7
I [A]	0,33	0,7
U [V]	149,1	143,9
$U_{kolesar}$ [min ⁻¹]	119,4	118,7
U_{motor} [min ⁻¹]	8693	8640

Natančnost krivulje izkoristka, pridobljene z nestrukturiranimi meritvami, sva preverila s strukturiranimi meritvami. Izkoristke strukturiranih meritev sva postavila v graf, zraven pa narisala krivuljo predvidenega izkoristka. Izkoristki strukturiranih meritev so se lepo ujemali s predvideno krivuljo, zato sva sklenila, da je predvidena krivulja ustrezna.



Slika 66 Izkoristek v odvisnosti od izhodne moči za strukturirane meritve

3.6.2 UPORABA KRIVULJE IZKORISTKA ZA IZRAČUN VHODNE MOČI

Oba sklopa meritev sva opravila v istem dnevu, v časovnem razmaku 30 minut. To je bilo, kot se je izkazalo v nadaljnjem izdelovanju meritev, zelo pomembno, saj so meritve, ki sva jih opravljala različne dni, začele odstopati. Razlog za to so različni sobni pogoji na različne dneve. Izkazalo se je, da bi lahko meritve ponavljala z zelo majhnim odstopanjem, vendar bi bila za vsako merjenje potrebna kalibracija. Ta proces nama je ob prvem opravljanju porabil dve uri časa. Drugič sva vse postopke točno poznala, kljub temu je kalibracija trajala nekaj več kot eno uro.

Sklenila sva, da je kalibracija za redna ponavljanja močno predolgotrajen proces. Rešitev sva našla v nespreminjajočem izkoristku elektromotorja pri različnih pogojih. Ne glede na pogoje so bila odstopanja vedno zelo podobna. Oporno točko sva zato lahko vzela v sistemu merilnika izhodne moči. Ker sva uspela pridobiti krivuljo izkoristka v odvisnosti od izhodne moči, sva funkcijo te krivulje uporabila za izračun vhodne moči. Tako vhodne moči ne meriva več, senzor, ki je bil temu namenjen, uporabljava zgolj za merjenje kadence kolesarja (RPM).

Vhodno moč iz izhodne moči izračunava tako, da najprej izračunava izkoristek za določeno izhodno moč:

$$\eta \approx \frac{-64,1 W^2}{P_{IZHOD}^2} + 0,47$$

Kjer $P_{IZHOD} \in (\sim 16 W, \sim 120 W)$.

Vhodno moč izračunava tako, da uporabiva izkoristek:

$$P_{VHOD} \approx \frac{P_{IZHOD}}{\eta}$$

Kjer $P_{IZHOD} \in (\sim 16 W, \sim 120 W)$.

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČEK

Delo na projektu je v veliki meri doseglo najina pričakovanja. Začetek dela na projektu je za naju pomenil vstop v potovanje v neznano. Imela sva le cilj, ki sva ga želela doseči. Potovanje v neznano praviva, ker naju je zajelo v svoje širine. Videla sva začetek, konec nama je bil ves čas neznan. Dalj, ko je delo trajalo, več sva ga odkrila. Začela sva z vizijo generiranja elektrike. Vse, kar sva želela doseči, je bilo prižgati luč.

Zaradi naključij, ki sva jih prešla, je to uspelo že v prvih nekaj dneh dela. Veselje je bilo neizmerno. Z istim sistemom sva uspela celo napajati računalnik, kar nama je bilo še v dodatno veselje.

Tu sva šele ugotovila, da bi bilo zanimivo, če bi poznala podatke o elektriki, ki jo proizvaja. Tako sva dva meseca delala na sistemu za obdelavo podatkov o izhodni elektriki. Sistem je bil neroden, velik in neprenosljiv. Uporabljal je prvo različico programa za obdelavo teh podatkov. Po dveh mesecih sva ugotovila, da bi naju zanimala še izkoristek elektromotorja in njegova izhodna moč. Želene podatke sva imela tako zajete.

Za poznavanje izkoristka in moči sva morala izdelati še sistem za merjenje vstopne mehanske moči. Iz poznavanja vseh potrebnih komponent je vzkliklo vprašanje o stroških izdelave, saj potrebne elektronike ni bilo malo. S pomočjo šole sva pridobila kupno moč 400 EUR, česar nisva želela preseči. Sreča je, da nama tega denarja ni bilo treba porabiti za izdelavo ogrodja in sva ga lahko v celoti vložila v elektroniko. Zaloga dodatnih komponent je bila izredno pomembna, saj sva tako, kljub nekaj pokvarjenim komponentam, uspela ostati časovno v okviru načrtov. Ohranitev stroškov na minimumu pa je bila ravno tako uspeh, saj število pokvarjenih in potrebnih delujočih komponent ni preseglo števila komponent na zalogi.

Težko sama ocenjujemo, kateri del projekta je zahteval največ dela in truda, vendar si upava trditi, da je bila to izdelava merilnika vhodne moči. Ko sva se lotila raziskav za izdelavo, nisva verjela v uspeh, saj nisva verjela v delovanje merilnih celic. Merjenje deformacije kovine je bilo za naju popolnoma nepredstavljivo. Kljub pomislekom sva se lotila izdelave in po mnogih ovinkih in ovirah tudi uspela.

Opustitev sistema za merjenje izhodne elektrike je po uspešni izdelavi merilnika za vhodno moč pomenila potrebo po ponovni izdelavi. Zdel se nama je neuporaben, saj so bili kabli predolgi, cel sistem neprenosljiv in program ni zadostoval kriterijem. Tako sva celotni sistem ponovno izdelala, ustvarila nov program za obdelavo podatkov o izhodni elektriki in stari sistem minimalizirala.

Zadnja stvar, ki naju je čakala, je bilo merjenje izkoristka in moči. Meritve sva opravila kljub pomanjkljivi zgradbi sobnega kolesa. Nisva imela sedeža in krmila, tako da najin kolesar ni imel možnosti udobnega sedenja. V začetku sva mislila, da se izkoristek glede na obrate in moč ne bo spreminjal. Po izvedenih meritvah veva, da to ni bilo popolnoma res. Izkoristek se je namreč spreminjal. Močno je naraščal do vrednosti 40 W. Naprej je še kar naraščal, vendar je bilo naraščanje bolj zložno in se je proti koncu že skoraj izničilo. Najina predstava je bila, da bo izkoristek ves čas v vrednosti nekje 50 %. Z izdelavo meritev sva ugotovila, da z vhodno močjo do 250 W tega nikoli ne

doseževa. Maksimalen izkoristek, ki sva ga izračunala, bi bil približno 47 %. Pri izredno nizkih močeh bi bil izkoristek okoli 30 %.

Kot zanimiv primer sva naredila polnjenje telefonov. Priključila sva dva telefona s povprečno kapaciteto 5000 mAh. Uporabila sva izredno zmogljiva polnilca z zmožnostjo polnjenja do 60 W. Izhodna moč kolesarja je bila 100 W. Telefona je napolnil v času 50 minut. Primer je sicer iz vidika meritev neuporaben, njegova natančnost je majhna. Je pa zanimiv za širšo javnost, saj ji je tudi razumljiv.

Taki projekti nikoli ne dosežejo popolnega konca. Najino mejo je postavila časovna omejitev. Cilji še niso popolnoma doseženi, tako da se bo v prihodnosti delo še nadaljevalo.

5 VIRI

I²C. Pridobljeno 22.12.2023 iz: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>, 22.12.2023

ABX00087-datasheet.pdf, Arduino® UNO R4 WI-FI. Pridobljeno 20.12.2023 iz: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf>, 20.12.2023

SFUPTOWNMAKER, I2C. Pridobljeno 1.1.2024 iz: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. Pridobljeno 1.1.2024 iz: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>

Pridobljeno 13.1.2024 iz: <https://www.youtube.com/watch?v=wpAA3qeOYil>

InvenSense Inc., MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.1 (10.24.2011). Pridobljeno 2.1.2024 iz: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General%20IC/PS-MPU-6000A.pdf>

MPU6050 Accelerometer and Gyroscope Sensor Guide with Arduino Programming (2018). Pridobljeno 27.12.2024 iz: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module>

Understanding a Wheatstone bridge strain gauge circuit. Pridobljeno 7.1.2024 iz: <https://www.bestech.com.au/blogs/understanding-a-wheatstone-bridge-strain-gauge-circuit/>

An Arduino library to interface the Avia Semiconductor HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weight Scales. (24.11.2021); pridobljeno 25.1.2024 iz: <https://github.com/bogde/HX711>

(2022) Calibrating the Scale (Arduino with Load Cell). Pridobljeno 2.2.2024 iz: <https://randomnerdtutorials.com/arduino-load-cell-hx711/#calibrate-load-cell>

HBM Test and Measurement, How Does a Metal Foil Strain Gauge Work? (2018). Pridobljeno 7.2.2024 iz: <https://www.youtube.com/watch?v=H2wrDB0XDNk>

David Watson, Introduction to Arduino IDE (3.10.2018). Pridobljeno 21.11.2023 iz: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/10/introduction-to-arduino-ide.html>

How Electric Motors Work (2018). Pridobljeno 22.2.2024 iz: <https://www.dietzelectric.com/motors/>

Dane Nemač (2013), Proizvodnja električne energije s pomočjo cikličnih trenajažerjev. Pridobljeno 17.9.2023 iz: <https://www.fsp.uni-lj.si/COBISS/Diplome/Diploma22065910NemacDane.pdf>

Lesics, How do Universal Motors work?, (2015). Pridobljeno 29.2.2024 iz: <https://www.youtube.com/watch?v=0PDRJKz-mqE>