

58. SREČANJE MLADIH RAZISKOVALCEV SLOVENIJE

Alternativni načini shranjevanja električne energije

Raziskovalno področje: **FIZIKA**

Raziskovalna naloga

Avtor: **David Kores Urlep**

Mentor: **Aljoša Kancler, prof.**

Šola: **Prva gimnazija Maribor**

Maribor, april 2024

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE	2
KAZALO SLIK.....	4
POVZETEK.....	5
ZAHVALA	6
1. UVOD	6
1.1 Namen raziskovalne naloge	6
1.2 Hipoteze	6
2. METODE SHRANJEVANJA ENERGIJE	7
2.2. Baterija	8
2.3 Vodikove celice.....	10
2.4 Superkondenzator.....	11
2.5 Pesek.....	12
3. Vztrajnik	14
3.1 Zgradba vztrajnika.....	15
3.1.1 Rotor vztrajnika.....	17
3.1.2 Ležaji	18
3.1.3 Motor/Generator.....	20
4. Eksperiment	22
4.1. Namen eksperimenta	22
4.2 Pripomočki oz. potrebščine	22
4.2.1 Vztrajnik.....	23

4.2.2 Elektromotor/generator	24
4.2.3 Izvedba eksperimenta	25
4.2.4 Varnost pri delu	28
4.2.5 Izboljšave eksperimenta	28
5. Rezultati	30
6. OVREDNOTENJE HIPOTEZ	32
7. DRUŽBENA ODGOVORNOST	33
8. ZAKLJUČEK	33
9. LITERATURA IN VIRI.....	34
10. VIRI SLIK	36
11. PRILOGE	37

KAZALO SLIK

Slika 1 Alkalne baterije	8
Slika 2 Galvanski člen.....	9
Slika 3 Gorivna celica	10
Slika 4 Peščena baterija.....	12
Slika 5 NASA G2 Flywheel	14
Slika 6 Structure and components of a flywheel	16
Slika 7 Kroglični ležaj.....	18
Slika 8 MABUCHI RS-540SH-7520 Brushed Motor 90W	20
Slika 9 Izdelava ogrodja	22
Slika 10 Izdelava vztrajnika	23
Slika 11 Načrt za ogrodje	24
Slika 12 Graf proizvedene napetosti	26
Slika 13 Eksperiment	28

POVZETEK

Smo v času, ko se iščejo vedno novi ekološki načini pridobivanja energije, predvsem električne. Seveda je večina virov za proizvodnjo električne energije (vetrna, sončna) trenutne narave in ni na razpolago takrat, ko bi jo potrebovali. Zato jo je potrebno shranjevati. Na voljo so različne možnosti, ki so različno učinkovite in okolju prijazne.

Trenutni trend je način shranjevanja v električne hranilnike (baterije), te pa so lahko ekološko sporne in cenovno neugodne, zato sem se v okviru svoje raziskave lotil iskanja različnih načinov shranjevanja energije, od klasičnih pa tudi novejših, kot je npr. shranjevanje energije v pesek ali superkondenzator, ter njihovo učinkovitost primerjal z baterijami.

Raziskovalna naloga ima tudi didaktičen namen, saj se ob raziskovanju spoznamo s tematiko, ki jo obravnavamo v srednji šoli. V ospredju je kinetična in rotacijska energija vztrajnika, prožnostna energija vzmeti, delo pri stiskanju plina, električna energija, indukcija. Prav tako izpostavim povezavo med pretvorbami različnih energij in končnim izkoristkom.

Raziskavo sem poskušal podpreti in teorijo preveriti eksperimentalno z namenom, da ugotovim, kateri način shranjevanja energije je primeren tudi za domačo uporabo.

ZAHVALA

Zahvalil bi se rad svojemu mentorju in profesorju fizike, ki me je med pisanjem raziskovalne naloge usmerjal in spodbujal, staršem, ki so me vzpodbujali in bratu, ki mi je pomagal pri iskanju in razumevanju literature. Prav tako bi se rad zahvalil profesorici slovenščine, ki je raziskovalno naložo lektorirala.

1. UVOD

1.1 Namen raziskovalne naloge

Potreba po električni energiji se vztrajno povečuje. Od nje je odvisnih vedno več delov vsakdanjega življenja, od transporta, kuhanja in razsvetljave do ogrevanja in komunikacije. Ker pa proizvodnja in povpraševanje po električni energiji nista usklajena, je v času manjše porabe energijo treba shraniti za čas, ko povpraševanje ponovno naraste, proizvodnja pa je manjša. Najpopularnejši in trenutno eden izmed najučinkovitejših načinov shranjevanja energije so baterije. Kljub njihovim многим dobrim lastnostim pa imajo baterije nekaj negativnih vplivov na okolje, kot sta uporaba velikih količin redkih kovin in toksičnost do narave. Znanstveniki zato raziskujejo nove načine shranjevanja energije, med katerimi se pozornost posveča tudi mehanskemu vztrajniku, ki lahko shrani velike količine energije v kratkem časovnem obdobju in jih nato hitro pretvori nazaj v električno energijo.

Namen te raziskovalne naloge je ugotoviti, ali je shranjevanje energije z doma izdelanim vztrajnikom podobno učinkovito kot uporaba konvencionalne polnilne baterije in kolikšna je maksimalna meja za količino shranjene energije v vztrajniku ter v katerem primeru je bolj smiselno uporabiti vztrajnik namesto klasične električne baterije.

1.2 Hipoteze

Ob raziskovanju virov in izdelavi vztrajnika sem si postavil tri hipoteze:

1. Baterije niso edini način za shranjevanje energije, obstajajo okolju prijaznejši načini.
2. Količina shranjene energije v vztrajniku se veča, če povečamo priključno napetost pogona vztrajnika.
3. Izkoristki pri vztrajniku so podobni kot pri komercialnih polnilnih baterijah.

2. METODE SHRANJEVANJA ENERGIJE

Električno energijo se v elektrarnah, kot so jedrske in termoelektrarne, ki za zdaj še dominirajo v energijskem proizvodnem sektorju, proizvaja bolj ali manj konstantno, drugi električni viri, predvsem vetrna in sončna, pa so variabilni. Ker pa je povpraševanje po električni neuskrajeno s proizvodnjo, se presežek proizvedene energije shranjuje do časa, ko je potreba po njej ponovno večja. Shranjevanje presežne električne energije je napram njeni nepotrebni konstantni porabi prav tako ugodnejše za okolje in finančno manj potratno. Trenutno so najučinkovitejši način za shranjevanje energije baterije, saj zavzemajo malo prostora in so zmožne shraniti večjo količino električne energije kot drugi načini, zato so danes najpopularnejše in posledično najmnožičneje proizvedene. Vendar pa so zaradi nekaterih negativnih vplivov, kot je izlitje toksičnih kemikalij, ki jih baterije povzročijo na okolje, znanstveniki začeli raziskovati alternativne načine za shranjevanja, pri čemer električno energijo pretvorijo v druge oblike s pomočjo mehanskih, termičnih ali pa elektromagnetnih procesov. Najvidnejši primeri, ki jih bom na kratko predstavil, so vodikove celice, superkondenzatorji, peščene baterije in vztrajnik, katerega učinkovitost bom tudi eksperimentalno preveril.

2.2. Baterija

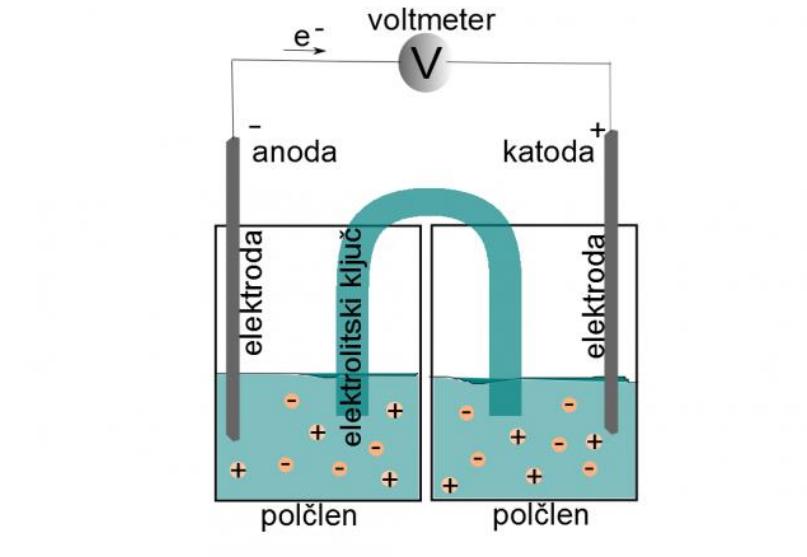
Baterije so naprave, ki spreminjajo kemično energijo v električno. So galvanski členi, v katerih potekajo spontane redoks reakcije. Galvanski člen je sestavljen iz dveh med seboj povezanih polčlenov, kjer na enem poteka kemični proces oksidacije, v drugem pa redukcije. Polčlen je sestavljen iz kovinske ploščice, imenovane elektroda, potopljene v raztopino soli uporabljene kovine. Katoda je pozitivna elektroda na kateri poteka redukcija, medtem ko je anoda negativna elektroda in na njej poteka oksidacija. V preprostem galvanskem členu sta elektrodi povezani s prevodnikom, ki omogoča prenos elektronov. Preko prevodnikov je na baterijo priključen porabnik, npr. žarnica.



Slika 1: Alkalne baterije

V galvanskem členu potekajo spontane redoks reakcije, to so reakcije, pri katerih se spremeni oksidacijsko število posameznega elementa. V njem potečeta kemijska procesa redukcije, pri čemer se oksidacijsko število elementa zmanjša in element sprejme elektrone, in oksidacije, pri kateri element odda elektrone in se mu oksidacijsko število poveča. Vendar so v nekaterih galvanskih členih z dovajanjem električnega toka redoks reakcije reverzibilne. Takšne baterije imenujemo ponovno polnilne baterije ali akumulatorji. Imajo sposobnost, da se elektrodi ob ponovnem polnjenju vrnejo v prvotno stanje pred redoks reakcijami. Primarne baterije nimajo zmožnosti vrnitve, zato jih ne moremo ponovno napolniti. Baterije prav tako ločimo glede na elemente, ki so uporabljeni v polčlenih. Primarne baterije so navadno alkalne (AAA, AA ...) (Slika

1), ki za elektrolit uporablja cink in manganov dioksid, medtem ko so sekundarne baterije svinčeni akumulatorji, Li-Polimer (litij-polimerne), Li-Ion (litij-ionske), NIMH in druge (Slika 2).



Slika 2: Galvanski člen

Glavni prednosti baterij sta gotovo učinkovitost shranjevanja energije in prostorska učinkovitost, kot ju imajo baterije velikosti AAA ali še manjše, ki se uporabljajo v napravah, kot so ure ali mobilni telefoni. Kljub temu pa imajo kot vsaka vrsta tehnologije tudi nekaj slabih lastnosti, ki lahko privedejo do nevarnosti ljudem in okolju. Najpogosteje se zgodi, da primarne baterije, ki niso namenjene polnjenju, namerno ali nehote poskušajo napolniti, kar lahko privede do eksplozije. Zato je pomembno, da se baterije ločuje od ostalih odpadkov in se jih primerno reciklira, saj lahko drugače pride do nesreč, kot je spontana eksplozija ali izlitje toksičnih kemikalij iz baterij [14, 17].

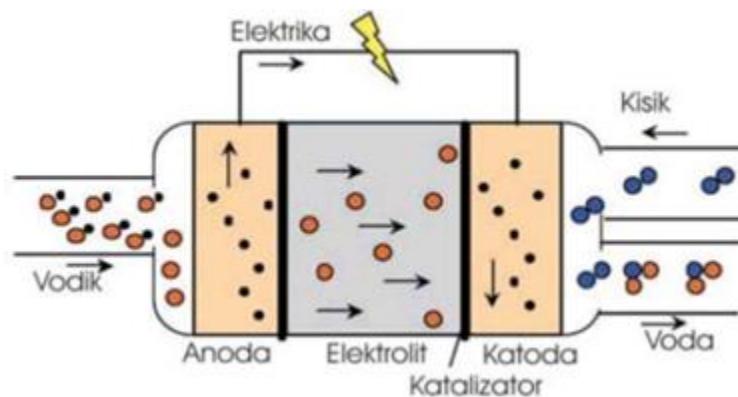
2.3 Vodikove celice

Vodik je najpomembnejši element v naravi. Najdemo ga v vodi, ogljikovodikih, vseh ostalih pomembnih spojinah, ki omogočajo življenje. Brez njega ne bi bilo fuzije v zvezdah in posledično življenja na Zemlji. Elementarnega vodika H_2 ne najdemo v naravi, zato ga za proizvodne namene pridobivamo z reakcijo elektrolize vode, kjer se vodo s pomočjo induciranega električnega toka loči na elementarna vodik in kisik:



Trenutno se uporablja šest različnih vrst gorivnih celic: alkalne, metanolne, celice s staljenim ogljikom, celice s fosforjevo kislino, trdno kislinske celice in celice z membrano za izmenjavo protonov. Vsaka se razlikuje od druge po načinu delovanja.

Vodik lahko nato shranimo kot plin ali v obliki tekočega vodika pod visokim tlakom. Za proizvodnjo električne energije se uporabi naprava, imenovana gorivna celica, ki izkorišča kemijske reakcije vodika za nastanek električne energije. Postopek je obraten elektrolizi in se imenuje hidroliza, katerega glavna produkta sta voda in večja količina sproščene energije (Slika 3).



Slika 3: Gorivna celica

Vodik je najčistejše gorivo, saj pri njegovem izgorevanju ne nastajajo emisije, ampak samo voda in energija. Le to se lahko uporabi v prenosnih akumulatorjih, za rezervno napajanje, v transportu ali celo v prenosnih napravah, kot so mobilni telefoni, tablični računalniki in prenosniki.

Vendar je treba omeniti, da je vodik, kljub temu da ne proizvaja nikakršnih emisij, zelo nevaren plin, saj lahko nekontrolirana reakcija vodika s kisikom povzroči eksplozijo. Zato raziskujejo načine, kako narediti vodikove celice čim varnejše in tako dostopne širši javnosti

[5,6].

2.4 Superkondenzator

Superkondenzator je visokozmogljiv kondenzator, ki ima veliko večjo kapaciteto v primerjavi z baterijami ali normalnimi kondenzatorji. Ena elektroda je zgrajena iz poroznega materiala, ki ima zaradi votlinic večjo površino, medtem ko je druga elektroda tekoč kemični prevodnik, med njima pa je tanka izolacijska plast, ki loči obe elektrodi. Za doseganje visoke kapacitete je le ta plast izjemno tanka, običajno desetinko nanometra. Kapaciteto kondenzatorja, ki je povezana s površino elektrod in razdaljo med njima, lahko izračunamo z enačbo

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (3),$$

kjer je S površina elektrod, d razdalja med njima in ϵ označuje dielektričnost. Superkondenzatorji se uporabljam za namene, kadar želimo shraniti veliko električne energije v kratkem časovnem obdobju pri velikih napetostih [7].

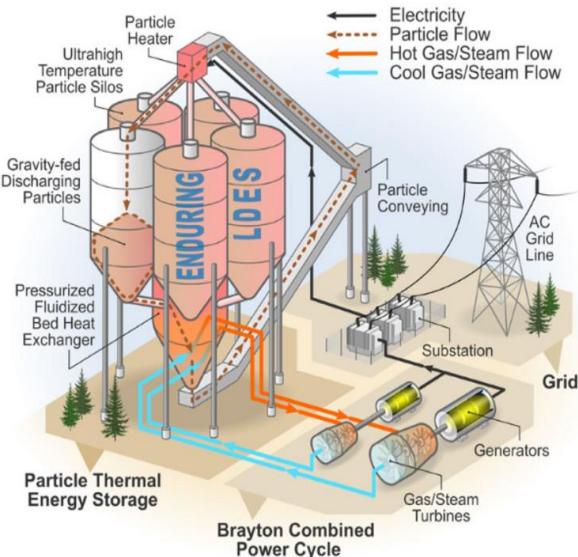
2.5 Pesek

Peščene baterije so zelo nov način shranjevanja električne energije. Delujejo na principu pretvorbe električne energije v toplotno, ki jo nato shranimo v obliki notranje energije snovi. Za ponovno uporabo jo iz toplotne spremenimo nazaj v električno po principu termoelektrarne ali pa jo uporabimo kot termalno energijo za ogrevanje. Kot snov uporabimo pesek ali pesku podobne materiale namesto kapljevin (npr. vode), ker jih lahko segrejemo do visokih temperatur (do 800 °C), kar je čez temperaturo vreliča kapljevin. Zato lahko v enako velikem rezervoarju kljub manjši specifični toploti peska hranimo veliko več energije kot pri kapljevinah.

Shranjevanje in uporaba shranjene energije se odvija v treh fazah (Slika 4):

- pretvorba električne energije v toploto,
- shranjevanje energije (s toploto segrevamo pesek),
- poraba shranjevanje energije.

Pesek se segreje do 800 °C s pomočjo napeljave cevi, v katerih se segreva zrak s pomočjo električnih kondenzatorjev in cevmi za prenos toplote (baker).



Slika 4: Peščena baterija

Rezervoar, v katerem je pesek shranjen, je dobro izoliran, da so toplotne izgube čim manjše v obdobju shranjevanja. Tako lahko pesek ostane vroč več mesecev, vendar se bo količina shranjene energije s časom shranjevanja zmanjševala [12].

Ko želimo energijo uporabiti, jo lahko uporabimo v obliki toplotne energije ali pa s pomočjo turbin na vroč zrak pretvorimo nazaj v električno. Del te energije se pri pretvorbi iz električne v toplotno in nato zopet v električno izgubi, kar je odvisno od izkoristka grelnika in generatorja.

Peščene baterije, čeprav dokaj nov način shranjevanja električne energije, imajo velik potencial. Čeprav so v primerjavi s klasičnimi baterijami neizmerno večje, so vendarle cenejše za izdelavo in uporabo. Prav tako je to način, ki je okolju prijaznejši, saj ga ne onesnažuje s kemičnimi snovmi.

Trenutno je v uporabi le nekaj peščenih baterij in so dokaj nov pogled na shranjevanje energije. Uporabljam se za shranjevanje toplotne energije, ki se nato lahko uporabi za ogrevanje stanovanjskih stavb, bazenov in dovajanje pare in visokih temperatur v industriji. Za proizvodnjo elektrike so potrebne parne turbine, vendar se po navadi ne uporabljam zaradi prevelikih izgub [10, 11, 12, 13].

3. Vztrajnik

Vztrajnik je del stroja, največkrat je v obliki cilindra ali okrogle plošče, v kateri se shranjuje rotacijska energija z vrtenjem rotorja oziroma cilindra.

Sistem vztrajnika se uporablja za shranjevanje energije na mnogo različnih načinov. Uporablja se kot kratkoročni sistem za shranjevanje električne energije, npr. v vetrnih elektrarnah v času, ko je proizvedena energija večja od potrošnje, npr. med močnimi vetrovi. Med drugim se je takšen sistem v Evropi uporabljal tudi v transportu (v avtobusih in avtomobilih) za shranjevanje energije pri zaviranju. Vztrajniki se uporabljajo tudi v vojaške namene na nekaterih ameriških letalonosilkah, kjer shranjujejo energijo in pomagajo pri izstrelitvi letal z letalonosilke. Zaradi zmožnosti, da v zelo kratkem času sprejmejo in dajo veliko energije, se uporabljajo v nekaterih zabaviščnih parkih, prav tako pa na motorističnih dirkah, kot je 24 ur Le Mansa, za shranjevanje energije med zaviranjem, ki se nato uporabi pri pospeševanju. Vztrajnik je raziskovala in uporabljala tudi ameriška vesoljska agencija NASA, saj so iskali različne načine za shranjevanje energije na vesoljnih plovilih (Slika 5) [16].



Slika 5: NASA G2 Flywheel

3.1 Zgradba vztrajnika

Vztrajnik je zgrajen iz osnovnih komponent, ki so ogrodje, vrteči se rotor, ležaji, motor in generator (Slika 6). Vsi elementi morajo biti natančno zgrajeni, da pride do čim manjših tresljajev in izgub energije pri vrtenju vztrajnika.

V vztrajnik se energija dovede s pomočjo motorja, ki rotor požene do določene hitrosti. S spremenjanjem mase, oblike, prav tako pa tudi materiala rotorja lahko shranimo različno količino energije. Odvisna je od vztrajnostnega momenta in kotne hitrosti:

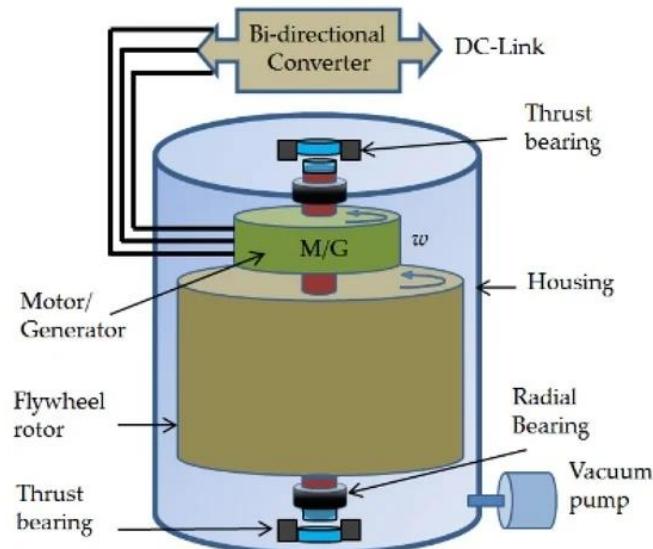
$$W_r = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (4),$$

pri čemer je W_r rotacijska kinetična energija, J vztrajnostni moment in ω kotna hitrost rotorja. Količino shranjene energije lahko povečamo s povečanjem kotne hitrosti ali vztrajnostnega momenta [8].

Oblike rotorja se lahko razlikujejo, kot so votli cilindri, krogla, palice in plošče. Vsaka izmed oblik ima določeno enačbo za izračun vztrajnostnega momenta [1].

Tabela 1: Enačbe za izračun vztrajnostnega momenta (vir: <https://oxscience.com/moment-of-inertia/>)

Valj	$J = \frac{1}{2}mr^2$
Votel cilinder	$J = \frac{1}{2}m(b^2 - a^2)$
Krogla	$J = \frac{2}{5}mr^2$
Okroglal palica z dolžino l	$J = \frac{1}{12}ml^2$
Tanka plošča z dolžino l in širino š	$J = \frac{1}{12}m(l^2 + \check{s}^2)$



Slika 6: Structure and components of a flywheel

Ko želimo shranjeno energijo zopet uporabiti, vztrajnik priključimo na generator (lahko tudi brez krtačnega motorja, ki ni priključen na baterijo) za proizvodnjo električne energije. Proizvedeno energijo dobimo v velikih količinah, vendar v zelo kratkem časovnem obdobju. Za čim manjšo izgubo rotacijske energije rotorja se uporabijo čim kvalitetnejši ležaji, za zmanjšanje trenja mnogokrat tudi magnetni. Prav tako se vztrajnik lahko vgradi v vakuumsko posodo in se s tem zmanjša vpliv zračnega upora.

3.1.1 Rotor vztrajnika

Rotor vztrajnika je običajno valj ali disk, ki ima pri vrtenju mehansko energijo v obliki kinetične rotacijske energije. Za izračun te energije mora biti znan vztrajnostni moment J rotorja, ki je odvisen od oblike rotorja. Ker so po navadi le takšni v obliki diska oziroma valja, se lahko vztrajnostni moment izračuna s pomočjo enačbe:

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (5)$$

Izračun za doma izdelan vztrajnik:

$$m = 516 \text{ g} = 0.516 \text{ kg}$$

$$r = 6.2 \text{ cm} = 0.062 \text{ m}$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 0.516 \text{ kg} \cdot (0.062 \text{ m})^2 = 9.92 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Z izbiro določene mase (m) ter polmera (r) vplivamo na količino shranjene energije [1].

Maksimalna hitrost, s katero se lahko rotor vztrajnika vrati, je določena z lastnostjo materiala, iz katerega je zgrajen vztrajnik, imenovana natezna trdnost σ . Potrebna je varnostna rezerva, da obremenitev, ki jo doživlja rotor med vrtenjem, ostane pod mejo trdnosti materiala rotorja. Maksimalno obremenitev/stres lahko izračunamo z:

$$\sigma_{max} = \rho r^2 \omega^2 \quad (6)$$

σ je natezna trdnost, ki jo doživlja rotor in ρ gostota materiala rotorja. Zaradi različnih oblik rotorja, se uporabi faktor K, ki je različen za vsako obliko. Maksimalna specifična energija se izračuna

$$W_m = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} [\text{J/kg}] , \quad (7)$$

gostota energije pa z enačbo

$$W_{gostota} = K \sigma_{max} [\text{J/m}^3] \quad (8)$$

[1, 3]

3.1.2 Ležaji

Ležaji so element stroja, ki omejujejo gibanje na območje in zmanjšujejo trenje med gibljivimi komponentami stroja. Omogočajo lahko gibanje okoli osi ali pa lajšajo gibanje po prostoru. Glede na vrsto ločimo več različnih tipov ležajev, ki so magnetni, hidravlični, zračni, prav tako pa kroglični in hibridni.

Magnetni ležaji se uporabljajo v turbinah, zračnih kompresorjih, nekaterih motorjih in v visoko hitrostnih vztrajnikih. Prav tako so zelo uporabni v turboreakcijskih motorjih, kjer je potreben odpor na visoke temperature. Najpomembnejša uporaba magnetnih ležajev je v umetnih srcih [4].

Kroglični ležaji se pogosto uporabijo v centrifugalnih črpalkah, v ventilatorjih računalnikov, prav tako po v letalstvu za komercialna, zasebna in vojaška letala za menjalnike in gredi nekaterih reaktivnih motorjev. V nekaterih primerih se uporablja tudi v urah in v parnih lokomotivah. Vendar se ne uporablja le za transport, ampak tudi za rezervne delove, kot so rolke in številne igrače [18, 19].



Slika 7: Kroglični ležaj

V vztrajniku je pomembno, da vsebuje kvalitetne ležaje, ki čim bolj zmanjšajo trenje in s tem zmanjšajo izgubo, ki nastane ob vrtenju rotorja in generiranju elektrike. Za najučinkovitejše delovanje se uporabijo magnetni ležaji, ki nimajo fizičnega stika in imajo zelo majhno trenje.

3.1.3 Motor/Generator

V današnjem svetu se uporablja različni električni motorji. Najbolj znana elektromotorja sta krtačni in brezkrtačni. Oba motorja uporablja enosmerni električni tok za ustvarjanje mehanske sile. Vsi električni motorji temeljijo na magnetnih silah, ki jih povzročajo tokovi v tuljavah. Hitrost, s katero se motor vrati, je mogoče spremenjati s spremnjanjem dovedene napetosti.

V eksperimentu sem uporabil krtačni elektromotor, saj je manj zapleten za uporabo in cenejši kot brezkrtačni (Slika 8).



Slika 8: MABUCHI RS-540SH-7520 Brushed Motor 90W

Motor se vrati, ko električni tok teče skozi tuljavo, navito okoli gredi, obdane z magneti. Električni tok okrog tuljave ustvari magnetno polje in motor se zaradi pravilnega položaja magnetov začne vrteti.

Elektromotorji se uporablja v orodjih, transportu, igracah in drugih napravah. Tako se brezkrtačni motorji uporabljajo v električnih in hibridnih vozilih, električnih letalih, gramofonih, trdih diskih in predvajalnikih DVD/CD, prav tako pa v igracah in modelih na radijsko vodenje [15, 20].

Elektromotor je bil prav tako uporabljen kot generator. Generator deluje na principu indukcije, ki je pojav, pri katerem nastane električno polje v vodniku, ki se giblje v magnetnem polju ali zanki, skozi katero se spreminja magnetni pretok. V generatorju v skladu s Faradayevim zakonom nastane inducirana napetost U_i . S premikanjem vodnika v magnetnem polju nastane inducirana napetost, ki poganja inducirani tok. Ta zakon lahko zapišemo z enačbo

$$U_i = \frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}, \quad (9)$$

kjer je $\Delta\Phi_m$ sprememba magnetnega pretoka v časovnem intervalu Δt . Pri nihanju vodnika v magnetnem polju pa nastane izmenična napetost, kjer inducirani tok spreminja smer, podobno pa dobimo pri vrtenju tuljave v magnetnem polju, kjer je inducirana napetost odvisna od frekvence vrtenja,

$$U_i = N \cdot \omega BS(\sin\omega t), \quad (10)$$

pri čemer je maksimalna inducirana napetost enaka

$$U_{imax} = N \cdot \omega BS. \quad (11)$$

V enačbah (10) in (11) N označuje število navojev v tuljavi, B magnetno polje in S ploščino zanke.

4. Eksperiment

4.1. Namen eksperimenta

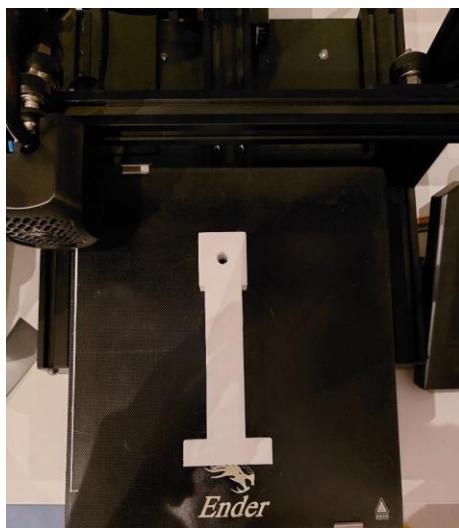
V okviru raziskovalne naloge sem želel eksperimentalno preveriti zastavljene hipoteze. Ugotavljal sem učinkovitost shranjevanja energije v vztrajnik ter njeno pretvorbo v električno. Fizikalno gledano je potekala pretvorba električne energije (vir napetosti) v mehansko (vrtenje vztrajnika) s pomočjo elektromotorja, ki poganja vztrajnik, nato pa pretvorba mehanske energije vztrajnika z indukcijo v električno energijo.

4.2 Pripomočki oz. potrebščine

Za izvedbo eksperimenta sem sestavil napravo, za katero potrebujemo vztrajnik in elektromotorček, ki bo služil tudi kot generator. Za delovanje potrebujemo še vir napetosti, stikalo, porabnik ter meritnik toka in napetosti.

Naprava je zgrajena iz 3D-tiskanega ogrodja, kovinskih krogličnih ležajev, kovinske gredi, brusnega kamna, ki služi kot vztrajnik ter krtačnega elektromotorja.

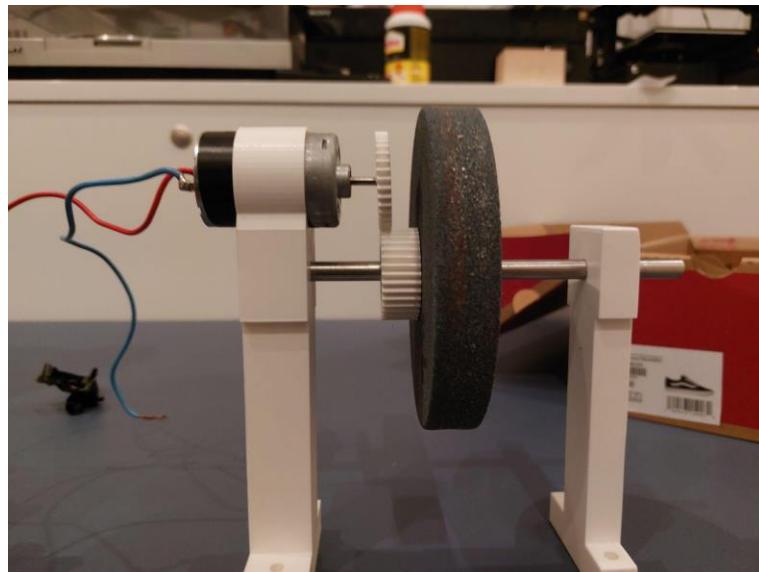
V programu za načrtovanje (Fusion360) sem narisal načrte za ogrodje (Slika 11), katere sem nato s pomočjo 3D-tiskalnika znamke Ender3 V2 natisnil v plastiki PLA (Slika 9).



Slika 9: Izdelava ogrodja

4.2.1 Vztrajnik

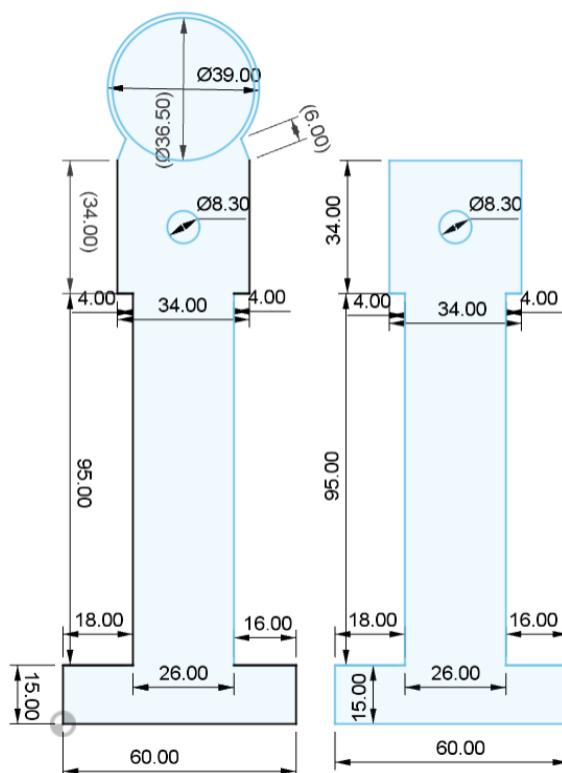
Za enakomerno vrtenje s čim manj tresljaji potrebujemo vztrajnik, ki je simetrično oblikovan. Kot vztrajnik sem uporabil brusni kamen, saj lahko prenese visoke hitrosti, ki jih dosegamo pri shranjevanju energije. V rotor sem vstavil dva kovinska kroglična ležaja, ki sta omogočila prosto vrtenje brusnega kamna. Nato sem vztrajnik namestil na kovinsko gred, na kateri se nahajata dve skrčki, ki onemogočita nezaželeno premikanje rotorja (Slika 10).



Slika 10: Izdelava vztrajnika

4.2.2 Elektromotor/generator

Za elektromotor sem uporabil elektromotorček, ki služi tudi kot generator. Namestil sem ga na vrh ogrodja. Prenos vrtenja med motorjem in vztrajnikom omogočata dva zobnika. Z izbiro velikosti zobnikov lahko določamo prestavno razmerje in s tem tudi hitrost vrtenja generatorja. Elektromotor sem povezal s stikalom, ki je povezano z virom napetosti in porabnikom.



Slika 11: Načrt za ogrodje

4.2.3 Izvedba eksperimenta

Prvi del eksperimenta predstavlja pretvorbo električne energije v mehansko oziroma proces shranjevanja energije za kasnejšo uporabo. Ugotavljal sem učinek shranjevanja energije, ki jo dovedem v vztrajnik iz vira napetosti pri različnih napetostih (1,5 V; 2 V; 2,5 V) v 20 sekundah dovajanja. Vloženo energijo izračunamo po enačbi ($A = U_v \cdot I \cdot t$) , zato sem meril še električni tok I(Slika 13).

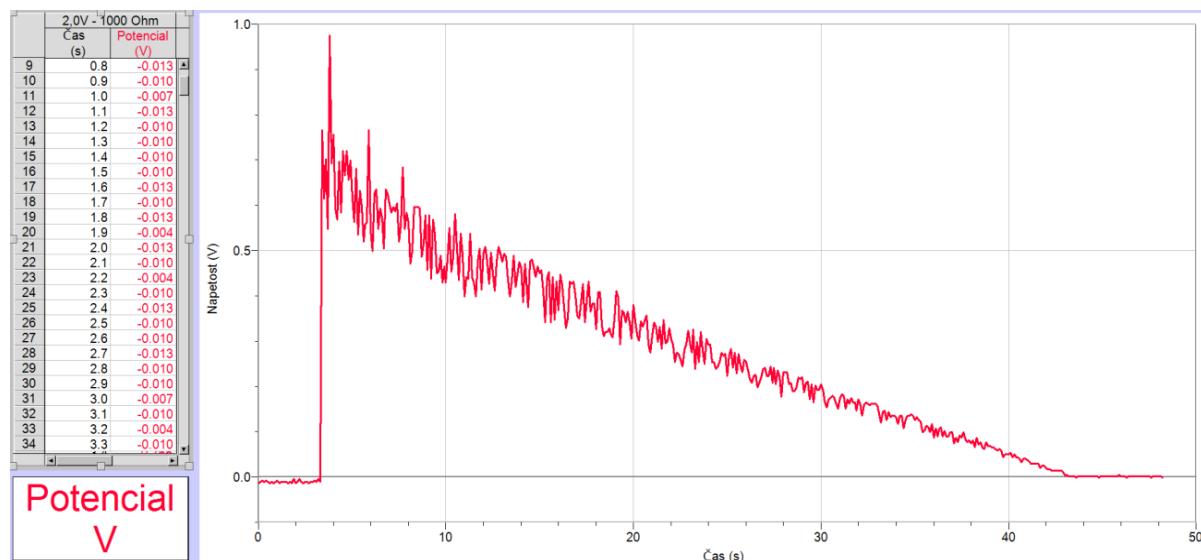
Rotacijsko kinetično energijo izračunamo po enačbi ($W_r = \frac{1}{2}J\omega^2$). Vztrajnostni moment J izračunamo po enačbi, kotno hitrost pa določimo posredno z merjenjem frekvence vrtljajev vztrajnika. Frekvenco sem meril z ultrazvočnim merilnikom.

Tabela 2: Rezultati meritev in rezultati računov za delo in rotacijsko kinetično energijo

Čas [s]	U_v [V]	I [A]	Št. obratov	U_p [V] (100Ω)	U_p [V] (1000Ω)	$t_{ust.}$ [s]	A_{vl} [J]	W_r [J]
20	1	2,3	6	0,163	-	11	46	0,02
	1	2,5		-	0,2	13,5	50	0,02
	1,5	4,3	11	0,44	-	25	129	2,4
	1,5	4,1		-	0,414	24	123	2,4
	2	6,7	16	0,79	-	41	268	5,1
	2	6,8		-	0,765	45	272	5,1
	2,5	8,5	18	0,947	-	41	425	6,4
	2,5	8,5		-	1,01	40	425	6,4

V tabeli nam podatki prikazujejo čas, v katerem sem vztrajnik pognal, U_v je vložena napetost, I tok iz električnega vira v elektromotor, U_p proizvedena napetost z 100 in 1000Ω upornikom. Prav tako je napisano povprečno število obratov na sekundo, vloženo delo A_{vl} , čas ustavljanja in rezultat za kinetično rotacijsko energijo W_r .

V drugem delu eksperimenta sem ugotavljal učinek pridobljene električne energije pri pretvorbi iz mehanske z električno indukcijo. Za natančnejše merjenje sem uporabil merilni sistem Vernier, kjer sem na različnih porabnikih (različen električen upor) meril inducirano napetost. Inducirana napetost je odvisna od hitrosti vrtenja vztrajnika, le ta pa se s časom zmanjšuje, saj se zaradi "črpanja energije" zmanjšuje rotacijska energija vztrajnika. Graf spremnjanja inducirane napetosti je predstavljen na sliki (Slika 12).



Slika 12: Graf proizvedene napetosti

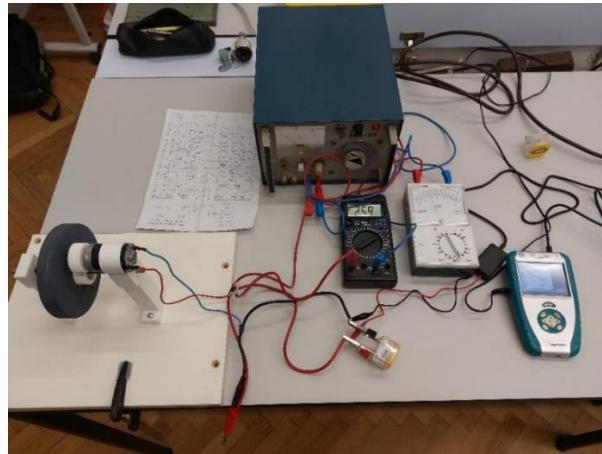
Energija in delo, ki ju pridobimo iz vztrajnika, sta odvisna od napetosti in vrednosti upora porabnika. Ker se napetost spreminja, za izračun proizvedene električne energije uporabimo povprečno napetost, ki je polovica maksimalne, saj se napetost spreminja enakomerno s časom, lahko pa povprečno napetost določimo s pomočjo programa LogerPro.

Uporabil sem porabnika z električnim uporom 100Ω in 1000Ω . Pri računanju sem uporabil enačbo $A = P \cdot t$, pri čemer je $P = \bar{U} \cdot I = \bar{U} \cdot \frac{\bar{U}}{R}$. Iz tega sledi, da je enačba za delo, ki ga je opravil vztrajnik, $A = \frac{\bar{U}^2}{R} \cdot t$

Tabela 3: Rezultati proizvedenega dela in napetosti pri različnih uporih

U_v [V]	U_p [V] – 100Ω	U_p [V] – 1000Ω	$t_{ust.}$ [s]	A_{pr} [J]
1	0,163	-	11	0,003
1	-	0,2	13,5	0,001
1,5	0,44	-	25	0,048
1,5	-	0,414	24	0,004
2	0,79	-	41	0,256
2	-	0,765	45	0,026
2,5	0,947	-	41	0,368
2,5	-	1,01	40	0,041

Izgube, ki nastanejo v vztrajniku, so posledica tresljajev, ki nastanejo pri visokih obratih rotorja, trenja v ležajih in segrevanja elektromotorja. Iz tega razloga je proizvedena električna energija manjša od dovedene.



Slika 13: Eksperiment

4.2.4 Varnost pri delu

Zaradi velike hitrosti, pri kateri se rotor vztrajnika vrti, sem pri eksperimentiranju uporabljal zaščitna očala. Vztrajnik je bil dobro pritrjen na delovno površino z mizarsko spono, saj so tresljaji povzročili premikanje plošče, na katero je bil privijačen vztrajnik. Prav tako ob eksperimentiranju nisem stal neposredno pred rotorjem, temveč ob strani.

Pri delu z elektriko sem bil posebej previden, da so vse povezave pravilno povezane in da ni prišlo do kratkega stika. Električno napeljavo je preveril profesor fizike.

4.2.5 Izboljšave eksperimenta

Izgube, ki nastanejo pri vztrajniku so posledica trenja, tresljaja in segrevanja.

Trenje bi lahko zmanjšal z uporabo magnetnih ležajev, ki bi količino trenja močno zmanjšali. Namesto magnetnih ležajev bi lahko kroglične kovinske ležaje po vsakem preizkusu ponovno naoljil.

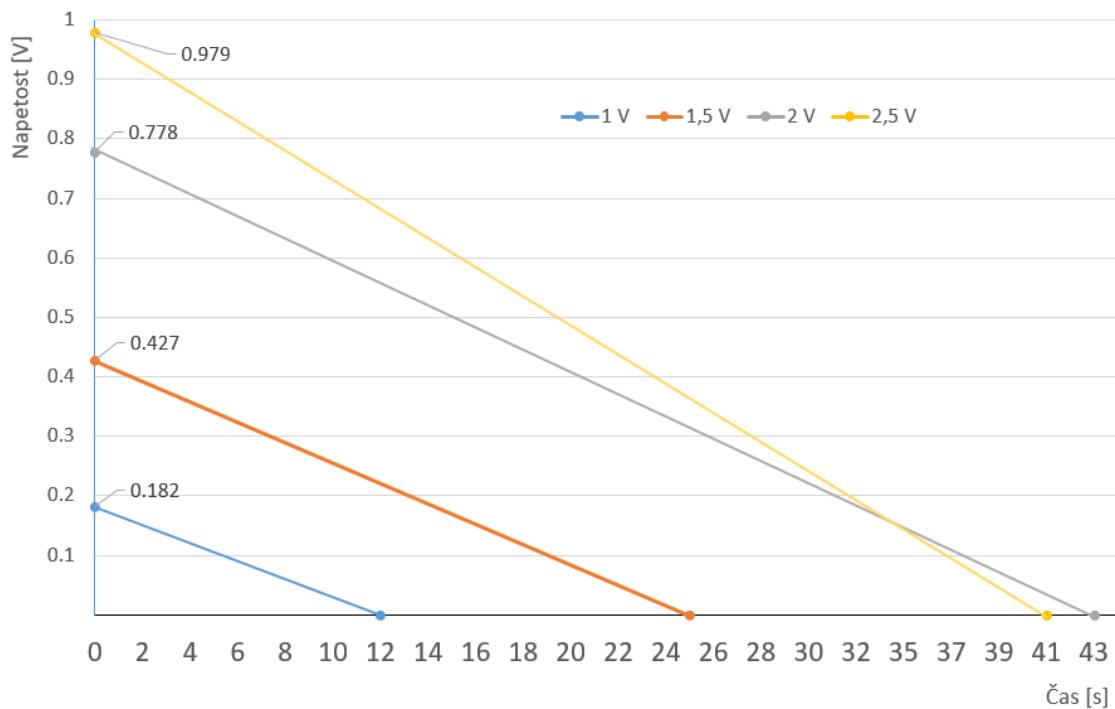
Tresljaji so nastali zaradi prešibke konstrukcije ogrodja. Ogrodju bi lahko dodal podporne elemente, ki bi bolje preneslo obremenitev pri visokih vrtljajih vztrajnika. Prav tako bi na ploščo lahko pritrdiril gumijaste podložke, ki bi dodatno zmanjšale učinke tresljajev.

Elektromotorju, ki je prav tako služil kot generator, bi dodal kolesarsko dinamo, ki je namenjena proizvodnji električne energije. Dinamo bi na vztrajnik povezal s pomočjo jermena, saj se pri jermenskem prenosu ne izgubi toliko energije, kot pa pri zobnikih.

5. Rezultati

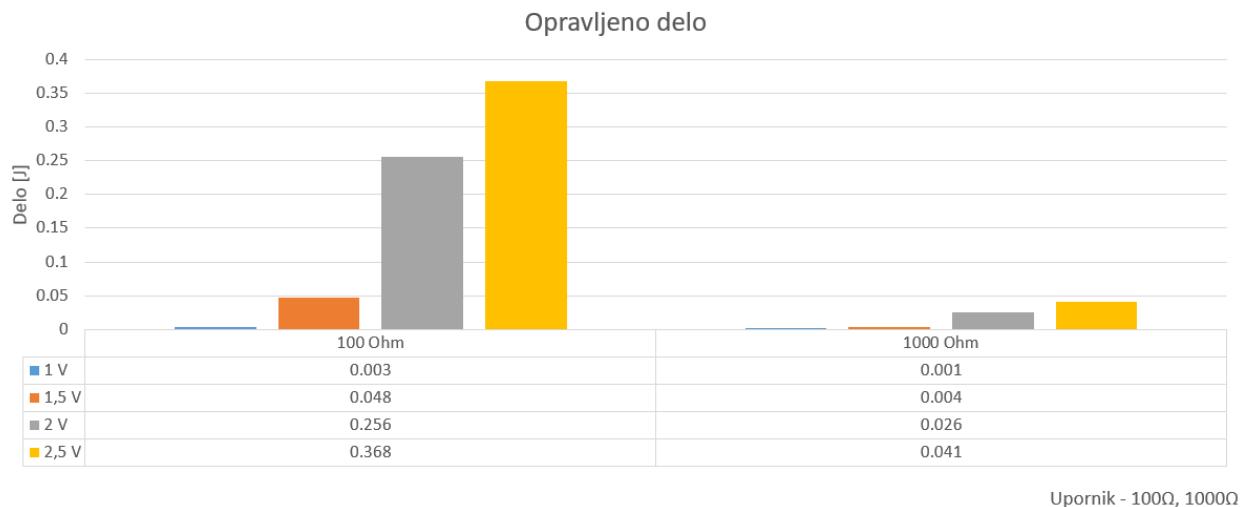
V prvem delu eksperimenta nam rezultati pokažejo, da se proizvedena napetost med 100-ohmskim in 1000-ohmskim uporom ne razlikuje za veliko, po večini za 0,02V, kar je zanemarljivo. Prav tako nam izračuni pokažejo, da je zaradi izgub pri trenju, segrevanju in tresljajih pretvorba v rotacijsko kinetično energijo eksperimentalnega vztrajnika le okrog 1% porabljene električne energije. Vztrajnik sem pri eksperimentiranju poganjal 20 sekund, po izključitvi vira pa je rotor poganjal generator med 11 do 45 sekund, odvisno od višine dovedene napetosti. Pri dovedeni napetosti dveh volтов se je vrtel najdlje, kar 45 sekund, pri napetosti enega volta pa 13,5 sekunde.

Izmerjeni rezultati nam pokažejo, da je največ mehanske energije shranjene v vztrajnik, če ga poženemo z napetostjo 2,5 V in najmanj z 1 V.



Graf 1: Spreminjanje proizvedene napetosti glede na čas ustavljanja vztrajnika

Rezultati drugega dela eksperimenta nam pokažejo, da je proizvedena električna energija izjemno majhna. Prav tako opazimo, da je le-ta pri 1000Ω uporniku manjša kot pa pri 100 Ohm . To se zgodi, saj pri isti napetosti teče manjši tok, posledično pa se zmanjšata moč P in opravljeni delo.



Graf 2: Spreminjanje dela glede uporabe različnih upornikov

6. OVREDNOTENJE HIPOTEZ

1. Z raziskovanjem različne literature in virov sem ugotovil, da baterije niso edini način shranjevanja energije, saj obstajajo tudi vztrajniki, superkondenzatorji, vodikove celice in novejši način peščenih baterij. Čeprav nekateri načini še niso zelo raziskani, so v prihodnosti lahko zelo učinkoviti načini shranjevanja električne energije. Hipotezo, da baterije niso edini način za shranjevanje energije, sem potrdil.
2. Količina shranjene energije v vztrajniku se z večanjem dovedene napetosti poveča. To je zaradi večje kotne hitrosti, s katero se lahko rotor vztrajnika vrati. Hipotezo, da se količina shranjene energije v vztrajniku veča z večanjem dovedene napetosti, sem potrdil.
3. Izkoristek v vztrajniku je mnogo manjši kot pa pri komercialnih polnilnih baterijah. Tresljaji, trenje in segrevanje privedejo do velikih izgub. Z boljšo izdelavo vztrajnika, s pomočjo boljših ležajev, težjim rotorjem, močnejšim motorjem in generatorjem ter trdnejšim ogrodjem, ki bi bolje preneslo tresljaje, bi se izgube dalo zmanjšati. Zadnjo hipotezo, da so izkoristki vztrajnika podobni kot pri komercialnih baterijah, sem ovrgel.

7. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Vztrajniki so zanimiv način shranjevanja energije in z njimi pomagamo pri varovanju okolja pred kemičnim onesnaženjem, ki bi se lahko zgodilo zaradi baterij.

Prav tako naprave, podobne vztrajniku, pritegnejo mlajše generacije in jih motivirajo za učenje fizike, tehnike in kemije.

8. ZAKLJUČEK

V svoji raziskovalni nalogi sem raziskoval različne načine shranjevanja električne energije. Poučil sem se o delovanju baterij, vodikovih celic, peščenih baterij, superkondenzatorjev in vztrajnikov. Pri raziskovanju sem uporabil teoretični in znanstveni pristop. Za eksperiment sem s pomočjo 3D-tiskalnika izdelal vztrajnik, katerega sem nato preizkusil.

Seznanil sem se z delovanjem vztrajnika in njegovimi ključnimi deli. Preučeval sem odvisnost proizvedene energije in vložene energije. Ugotovil sem, da je izkoristek mojega vztrajnika premajhen za uporabo in so komercialne baterije primernejše za domačo uporabo.

V prihodnje bi pri izdelavi vztrajnika uporabil boljše ležaje za zmanjšanje trenja in boljši motor ter generator. Prav tako bi izdelal močnejše ogrodje, ki bi bolje preneslo tresljaje pri velikih hitrostih rotorja vztrajnika.

9. LITERATURA IN VIRI

1. Amiryar, M., & Pullen, K. (2017, marec 16). *A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications*. MDPI. Spletni vir: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/3/286> (13.11.2023)
2. Bellini, E. (2021, september 1). *Storing wind, solar power with silica sands*. pv-magazine. <https://www.pv-magazine.com/2021/09/01/storing-wind-solar-power-with-silica-sands/> (17.1.2043)
3. Bolund, B., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2005, marec 2). *Flywheel energy and power storage systems*. ScienceDirect.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000146> (5.1.2024)
4. Breńkacz, Ł., Witanowski, Ł., Drosińska-Komor, M., & Szewczuk-Krypa, N. (2020, november 20). *Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review*. ScienceDirect.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327020308098?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=84992d212f29c2ed (14.12.2023)
5. Carrette, L., Friederich, A., & Stimming, U. (2000, december 20). *Fuel Cells: Principles, Types, Fuels, and Applications*. Chemistry Europe. [https://doi.org/10.1002/1439-7641\(20001215\)1:4%3C162::AID-CPHC162%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1439-7641(20001215)1:4%3C162::AID-CPHC162%3E3.0.CO;2-Z) (16.10.2023)
6. Felseghi, R. A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., Trufin, C. N., & Filote, C. (2019, december 3). *Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications*. MDPI. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4593> (30.10.2023)
7. Hadartz, M., & Julander, M. (n.d.). *Battery-Supercapacitor Energy Storage*. <https://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/Hadarz&JulanderMSc.pdf> (2.11.2023)
8. Ilmiawan, F. A., & Zaki, S. A. (2023, junij 1). *Application of Flywheel Energy Storage on Generator-Set / Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/2762 (29.12.2023)

9. *Moment of inertia: Definition, formulas & Equation.* (n.d.). Ox Science. <https://oxscience.com/moment-of-inertia/> (19.11.2023)
10. Petrillo, A. (2023, januar 18). *Heating Buildings With Solar Energy Stored in Sand.* IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/polar-night-energy-sand-battery> (9.12.2023)
11. Tetteh, S., Yazdani, M. R., & Santasalo-Aarino, A. (2021, julij 3). *Cost-effective Electro-Thermal Energy Storage to balance small scale renewable energy systems.* ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21005557> (14.12.2023)
12. *What is a sand battery? — Polar Night Energy.* (n.d.). Polar Night Energy. <https://polarnightenergy.fi/sand-battery> (15.12.2023)
13. White, C. (2023, januar 19). *Sand Batteries Heat Up Buildings in Finland Using Solar Energy.* Science Times. <https://www.scientetimes.com/articles/41929/20230119/sand-batteries-heat-up-buildings-finland-using-solar-energy.htm> (12.12.2023)
14. Wikipedia. (2023, junij 10). *Galvanski člen.* Wikipedia. https://sl.wikipedia.org/wiki/Galvanski_člen (2.11.2023)
15. Wikipedia. (2023, december 26). *DC motor.* Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/DC_motor (31.12.2023)
16. Wikipedia. (2024, januar 5). *Flywheel energy storage.* Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage# (18.01.2024)
17. Wikipedia. (2024, januar 7). *Electric battery.* Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_battery (16.1.2024)
18. Wikipedia. (2024, januar 9). *Magnetic bearing.* Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing (13.1.2024)
19. Wikipedia. (2024, januar 24). *Bearing (mechanical).* Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_\(mechanical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_(mechanical)) (1.2.2024)
20. Wikipedia. (2024, januar 24). *Brushless DC electric motor.* Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor (25.1.2024)

10. VIRI SLIK

1. *Batteries.* (n.d.). Chembook (Dr. McCord).
<http://chembook.org/page-nonav.php?chnum=7§=9> (27.12.2023)
2. Čevdek, A. (n.d.). *Galvanski člen.* OpenProf.com.
https://si.openprof.com/wb/galvanski_%C4%8Dlen?ch=652 (13.9.2023)
3. Berdajs, D. (2021, maj 9). *Gorivne celice – STROJNIK.SI.* strojnik.si.
<https://strojnik.si/blog-clanki/gorivne-celice/> (17.1.2024)
4. Ellis, D. (2022, julij 11). *Can sand batteries be scaled commercially? / Energy Magazine.* Energy Digital Magazine. <https://energydigital.com/renewable-energy/can-sand-batteries-be-scaled-commercially> (18.11.2023)
5. Amiryar, M., & Pullen, K. (2017, marec 16). *A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications.* MDPI.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/7/3/286> (13.10.2023)
6. *Types of Bearings and Their Applications.* (2019, maj 25). JVN Bearings FZE.
<https://jvnbearings.com/types-of-bearings-and-thier-applications/> (1.2.2024)
7. HobbyKing.com. (n.d.). *MABUCHI RS-540SH-7520 Brushed Motor 90W.* HobbyKing.com.
https://hobbyking.com/en_us/mabuchi-rs-540sh-7520-brushed-motor.html (3.12.2023)
8. Wikipedia. (2024, januar 5). *Flywheel energy storage.* Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage# (7.1.2024)

11. PRILOGE

Priloga 1: Načrt za pisanje raziskovalne naloge

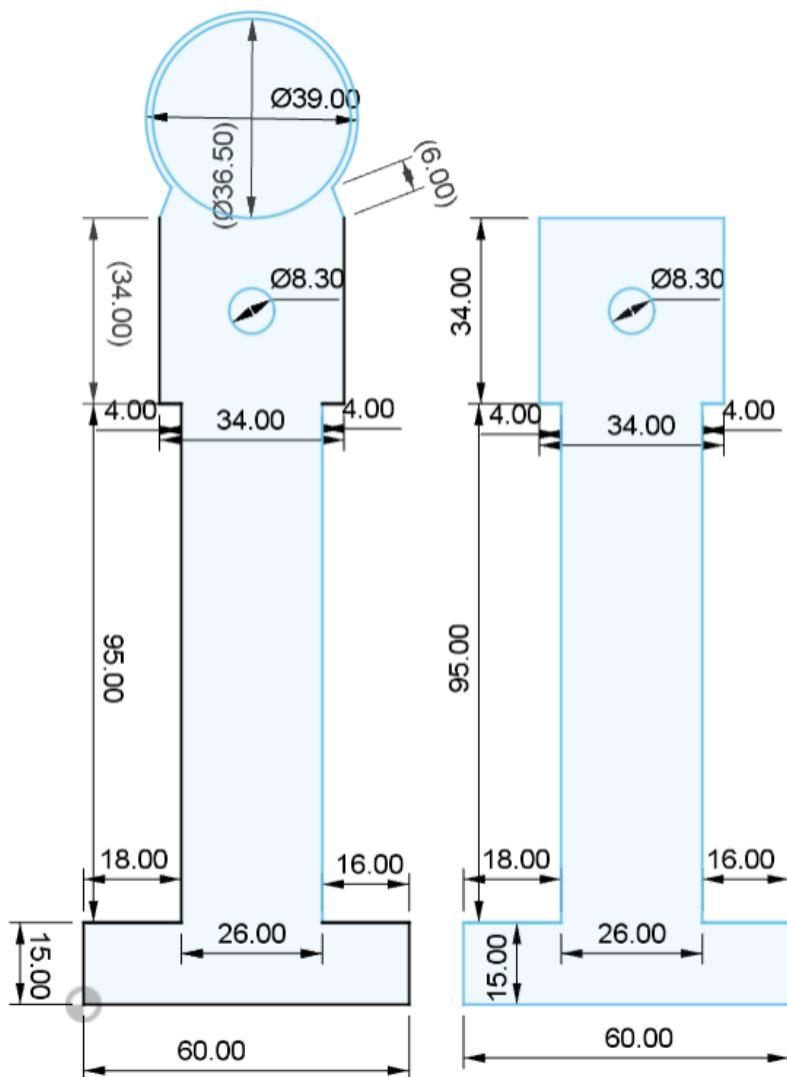
Priloga 2: Načrt za izdelavo ogrodja vztrajnika

Priloga 3: Tabele in grafi meritev eksperimenta

Priloga 1: Načrt za pisanje raziskovalne naloge



Priloga 2: Načrt za izdelavo ogrodja vztrajnika



Priloga 3: Tabele in grafi meritev eksperimenta

