

ŠOLSKI CENTER VELENJE, GIMNAZIJA VELENJE
Trg mladosti 3
MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ SAŠA REGIJE

RAZISKOVALNA NALOGA

IONSKI POGON

Tematsko področje: FIZIKA, ASTRONOMIJA

Avtorja:

Rok Jurič, 3. A

Brin Kortnik, 3. A

MENTOR:

Peter Jevšenak, univ. dipl. inž. fizike

Velenje, 2024

Kortnik, B., Jurič R. Ionski pogon
Raziskovalna naloga, ŠCV, Gimnazija Velenje, 2024.

Raziskovalna naloga je bil opravljena na Šolskem centru Velenje, Gimnaziji Velenje.

Mentor: Peter Jevšenak, univ. dipl. inž. fizike

Datum predstavitve: marec 2024

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje, šolsko leto 2023/2024

KG ionski pogon / ionizacija / anoda / katoda

AV JURIČ, Rok / KORTNIK, Brin

SA JEVŠENAK, Peter

KZ Šolski center Velenje

ZA Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje

LI 2024

IN IONSKI POGON

TD Raziskovalna naloga

OP VI, 25 str., 28 sl., 8 vir.

IJ SL

JI sl / en

AI Ionski potisnik je vrsta pogona, ki se v praksi uporablja za pogon vesoljskih plovil v šibki težnosti. Deluje tako, da ione pospešuje z visokonapetostnim električnim poljem, kar ustvarja potreben potisk za premikanje plovila. Ta tehnologija se uporablja v vesoljski industriji in jo odlikujeta dolga življenjska doba in visoka učinkovitost. Na spletu lahko najdemo videoposnetke, na katerih posamezniki samostojno izdelujejo ionske potisnike, prilagojene delovanju v Zemljinem ozračju. Odločila sva se, da sama izdelava podobno napravo ter preizkusiva njeno praktično uporabnost. Potisnik je sestavljen iz dveh elektrod, na eni elektrodi se izvaja proces ionizacije, medtem ko nasprotno nabita elektroda pospešuje nastale ione. Najprej sva izdelala prototip, na katerem sva testirala različne oblike elektrod ter oddaljenost med elektrodama. Izkazalo se je, da je najbolje, če za ionizacijo uporabljamo elektrodo z večjim številom konic, ki so usmerjene proti nasprotni elektrodi. Najoptimalnejša razdalja med elektrodama je tik pred električnim prebojem. Po izvedenih poizkusih na prototipu sva izdelala manjši ionski pogon, ki sva ga pritrdila na ladjico. V praksi se je izkazalo, da je potisk dovolj velik, da se ladjica začne premikati, vendar pa hitrost ladjice ostaja relativno majhna. Pokazala sva, da je tak način pogona zmožen premikati vozilo tudi na površini Zemlje. Obstaja potencial, da se takšne naprave uporablja tudi v vsakdanjem življenju za pogon vozil z majhno maso.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje, šolsko leto 2023/2024

CX ion thruster / ionisation / anode / cathode

AU JURIC, Rok / KORTNIK, Brin

AA JEVŠENAK, Peter

PP Šolski center Velenje

PB Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje

PY 2024

TI Ion thruster

DT Raziskovalna naloga

NO VI, 25 p., 28 fig., 8 ref.

LA SL

AL sl / en

AB An ion thruster is a type of propulsion used in practice to propel spacecraft in low gravity. It works by accelerating ions with a high-voltage electric field, generating the thrust needed to move the spacecraft. This technology is characterised in the aerospace industry by its long lifetime and high efficiency. Videos of individuals can be found online independently building ion thrusters tailored to work in the Earth's atmosphere. We have decided to build a similar device ourselves and test its practicality. The thruster consists of two electrodes, one of which performs the ionisation process, while the oppositely charged electrode accelerates the resulting ions. We first built a prototype and tested different electrode shapes and distances between the two electrodes. It turned out that it was best to use an electrode with a larger number of spikes directed towards the opposite electrode for ionisation. However, the optimum distance between the electrodes appears just before electrical discharge. After experimenting with a prototype, we built a small ion drive and attached it to the boat. We have found out in practice that the thrust was sufficient to get the boat moving, but the speed of the boat remained relatively low. We have shown that this type of propulsion is capable of moving the vehicle even on the surface of the Earth. There is potential for such devices to be used in everyday life to propel low mass vehicles.

KAZALO

Vsebina

1	UVOD.....	1
2	PREGLED OBJAV	2
	2.1 Električna energija.....	2
	2.2 Delovanje ionskih potisnikov.....	3
3	MATERIALI IN METODE	5
	3.1 Influenčni stroj	5
	3.2 Načrtovanje in izdelava prototipa.....	7
	3.2.1 Oblike elektrod.....	8
	3.3 Pretvornik napetosti.....	9
4	REZULTATI	11
	4.1 Izdelava vozila	15
5	DISKUSIJA	18
6	ZAKLJUČEK/SKLEP.....	22
7	POVZETEK.....	24
8	SUMMARY	25
9	VIRI	26
	ZAHVALA	26

Kazalo slik

Slika 1: Koncept delovanja ionskega pogona [3]	4
Slika 2: Influenčni stroj	5
Slika 3: Postavitev sveč za pregled smeri vetra	6
Slika 4: Postavitev konice na anodo	6
Slika 5: Postavitev konice na katodo	6
Slika 6: Model prototipa ionskega pogona	7
Slika 7: Oblike anod	8
Slika 8: Oblike katod	8
Slika 9: Pretvornik napetosti	9
Slika 10: Preizkus pretvornika napetosti	10
Slika 11: Pogoji za preizkus	11
Slika 12: Postavitev elementov	11
Slika 13: Elektrostatični naboj pritegne zastavico	12
Slika 14: Anoda s tankimi žicami	12
Slika 15: Anoda s špicami, razdalja med elektrodama 5 cm	13
Slika 16: Odklon zastavice pri razdalji elektrod 4 cm	14
Slika 17: Odklon zastavice pri razdalji elektrod 3,5 cm	14
Slika 18: Delovanje naprave s 4,5 V baterijo kot virom napetosti	14
Slika 19: Tehnica pri neaktivni napravi, $m = 497,2$ g	15
Slika 20: Tehnica pri aktivni napravi, $m = 498,1$ g	15
Slika 21: Pogon št. 1: žebli in cevi z večjim premerom	16
Slika 22: Pogon št. 2: igle in cevi z manjšim premerom	16
Slika 23: Ladjica in namestitev pogona	16
Slika 24: Določanje hitrosti ladjice s pogonom št. 1	17
Slika 25: Določanje hitrosti ladjice s pogonom št. 2	17
Slika 26: Iskrenje med elektrodama v optimalnem položaju	18
Slika 27: Pospeševanje ionov	20
Slika 28: Pospeševanje elektronov	20

1 UVOD

Ionski pogon je sodobnejša tehnologija, ki se uporablja za potisk vesoljskih plovil. To tehnologijo odlikuje zanesljivost delovanja, ima enostavno zasnovo brez gibljivih delov in visokih temperatur, dolgo življenjsko dobo ter je visoko učinkovita. Zaradi majhne potisne sile je primerna za sonde, ki manevrirajo po medplanetarnem območju s šibko gravitacijo. Za vzletanje ali pristajanje plovil na večjih nebesnih telesih pa so potrebni drugi načini pogona.

Za ionski pogon sva najprej izvedela iz znanstvenofantastičnih serij in knjig, natančnejša poizvedba pa je pokazala, da je ideja živa tudi v praksi. Eno prvih vesoljskih plovil na ionski pogon je bila Nasina sonda Dawn, ki je leta 2007 poletela proti pasu asteroidov.

Nedavno sva opazila videoposnetke na platformi Youtube, na katerih so posamezniki samostojno sestavljali preproste ionske potisnike, prilagojene delovanju na Zemlji. Za doseganje visokih napetosti so uporabili poseben električni element, ki nizko enosmerno napetost pretvori v visoko enosmerno napetost in se lahko po dostopni ceni naroči kar prek spleta. Odločila sva se, da se sama lotiva izdelave ionskega potisnika, pri čemer želiva z izvajanjem eksperimentov pridobiti vpogled v potencial te tehnologije.

Najprej sva si zamislila izdelavo prototipa, s katerim bi preizkusila fizikalni koncept ter različne dejavnike, ki bi lahko vplivali na učinkovitost pogona. To so oblika elektrod, razdalja med elektrodama, izbira primerne napetosti, vezave več visokonapetostnih elementov, vpliv vremenskih pogojev ...

Za cilj raziskovalne naloge sva si zastavila, da na podlagi izkušenj s preizkusi na prototipu izdelava takšen ionski potisnik, ki bo zmožen preprosto vozilo, na primer voziček ali ladjico, spraviti v gibanje.

2 PREGLED OBJAV

2.1 Električna energija

Zamislimo si telo z nabojem e v električnem polju jakosti E , ki ga ustvarjata nasprotno naelektreni elektrodi. Če je telo prosto gibljivo, se začne pod vplivom električne sile pospešeno gibati proti elektrodi z nasprotnim predznakom naboja. Lahko rečemo, da se kinetična energija telesa povečuje na račun zmanjševanja električne energije. Električno energijo telesa izračunamo po enačbi:

...(1)

$$W_e = e \cdot E \cdot r = e \cdot \varphi$$

pri čemer je r razdalja v smeri silnic med telesom in nasprotno naelektreno elektrodo, φ pa električni potencial z enoto volt. Razlika dveh potencialov je napetost U , kar pomeni, da lahko spremembo električne energije, ki se spremeni v kinetično, zapišemo kot:

...(2)

$$\Delta W_e = e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Pri opisu snovi na atomskem nivoju kot enoto za energijo teles namesto joula raje uporabljamo elektron – volt (eV) [1]. Velja zveza:

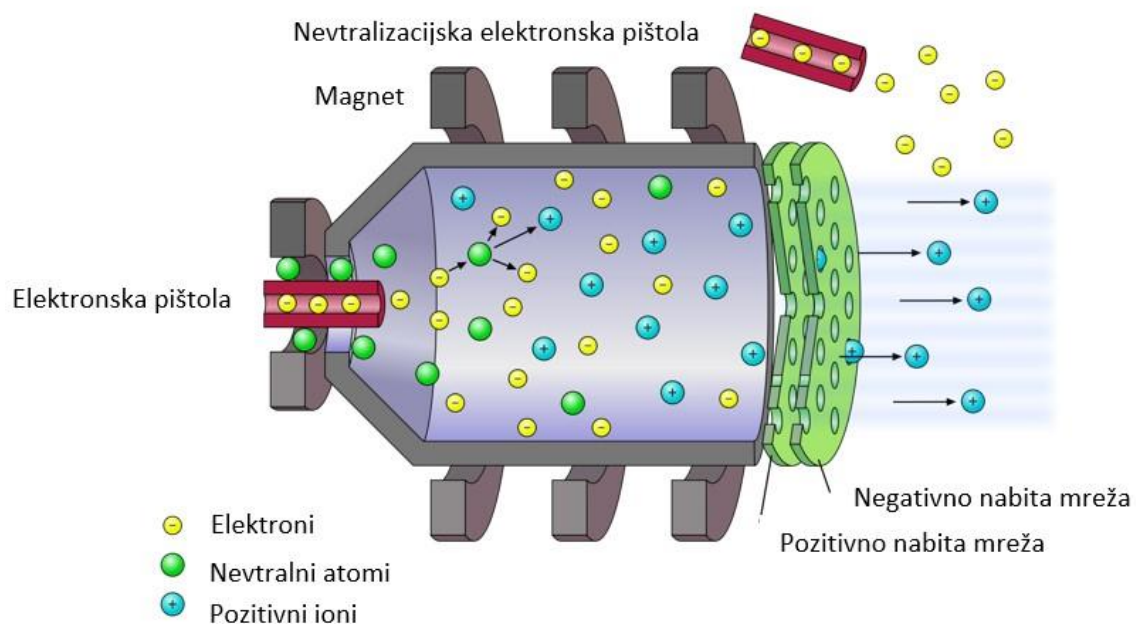
...(3)

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$$

2.2 Delovanje ionskih potisnikov

Ionski potisniki delujejo tako, da pospešujejo nabite delce s pomočjo električnega polja. Za delovanje ionskega potisnika potrebujemo dve fazi: ionizacijo in pospeševanje ionov. Ionizacija je proces, pri katerem nevtralen element (atom, molekula) pridobi negativen ali pozitiven naboj z dodajanjem ali odvzemanjem elektronov. Pri ionskem pogonu na Zemlji lahko izkoristimo kar molekule zraka, ki jih ioniziramo z močnim (koncentriranim) električnim poljem, ki se pojavi v bližini koničasto oblikovane pozitivne elektrode – anode pod visoko napetostjo. Električno polje jakosti približno 2 MV/m povzroči, da se začno elektroni trgati od molekul, kar povzroča nastanek težkih pozitivno nabitih ionov (v zraku so to molekule dušika in kisika) ter lahkih negativno nabitih elektronov. Za pospeševanje pozitivno nabitih ionov uporabimo negativno nabito elektrodo – katodo, ki pa ne sme imeti koncentriranega električnega polja (priporočena oblika plošče ali krogle), da se na njej ne izvaja ionizacija. Nastali pozitivni ioni tako pospešijo proti katodi, pri tem pa trkajo v nevtralne molekule zraka in usmerjajo njihovo gibanje v smeri svojega gibanja. Ione pritegne katoda nase, nevtralne molekule pa nadaljujejo pot skozi odprtine v katodi ter ustvarjajo veter in potencialno potisk.

V vesolju, kjer ni zraka, je za delovanje ionskega pogona potrebno potisno sredstvo. Najpogosteje se zaradi svoje stabilnosti in relativno visoke mase uporablja ksenon, kar omogoča učinkovito pospeševanje. Atome se lahko ionizira na več načinov, pri čemer se najpogosteje uporablja ultravijolično sevanje ali obstreljevanje z elektroni. Na sliki 1 je shematski prikaz ionskega potisnika. V komori poteka proces ionizacije z obstreljevanjem ksenona z elektroni. Nastale ione s pomočjo magnetnega polja usmerimo proti mrežastima elektrodama na desni strani, kjer jih električno polje pospeši od anode proti katodi. Ko ioni poletijo skozi odprtine v katodi, jih nevtraliziramo z elektroni, ki so se sprostili ob ionizaciji. Nevtralni atomi nato odletijo naprej direktno v vesolje.



Slika 1: Koncept delovanja ionskega pogona [3]

Potisna sila takšne naprave se meri v tisočinkah newtonov, je pa prednost ta, da lahko deluje dneve, tedne, mesece. Energijo za ionizacijo in pospeševanje lahko zagotavljajo kar solarni paneli na plovilu, tako da čas delovanja omejuje samo količina potisnega sredstva. Izkoristek pretvorbe električne energije v kinetično je kar okoli 90 %.

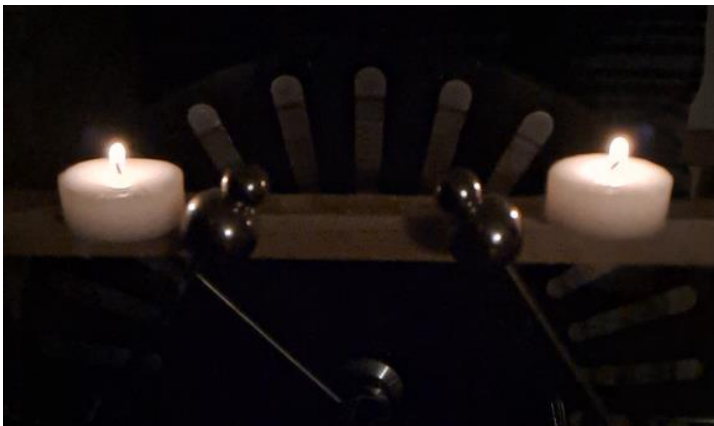
3 MATERIALI IN METODE

3.1 Influenčni stroj

Za prvi preizkus fizikalnih konceptov ionskega pogona sva uporabila šolski influenčni stroj (slika 2). Ko zavrtimo ročico in se v kondenzatorjih nabere dovolj električnega naboja, med katodo in anodo preskoči strela. Strela se pojavi naenkrat na celotni razdalji med elektrodama, ki sta v obliki kovinskih kroglic. To pomeni, da je prebojna jakost 2 MV/m dosežena v vseh točkah, na katerih opazimo strela. Jakost električnega polja med elektrodama mora biti zato razmeroma konstantna vsaj v bližini zveznice med kroglicama, ki sta na razdalji do 6 cm. Pozitivno elektrodo – anodo sva ovila v aluminijasto folijo in jo oblikovala v konico, ki je kazala proti katodi. Med konico anode in katodo je ostalo še približno 2 cm razdalje. Okoli elektrod sva postavila svečke, da bi lahko opazovala gibanje zraka z nagibanjem plamena (slika 3). V tem primeru, ko zavrtimo ročico influenčnega stroja, do strele ne pride. Se pa v smeri od koničaste anode proti katodi pojavi rahel veter, kar nazorno pokaže nagib plamena (slika 4). Ob koničasto oblikovani elektrodi očitno enak naboj ustvari močnejše električno polje kot ob elektrodi v obliki krogle, zato se tam molekule zraka prej ionizirajo, elektrone pritegne anoda, pozitivni ioni pa pospešijo proti negativni katodi. Pri tem trkajo v nevtralne molekule in usmerjajo njihovo gibanje v smeri svojega gibanja, kar ustvarja vetrič, ki vpliva na plamen. Nato sva konico prestavila na katodo in ponovila poskus (slika 5). Na najino presenečenje je bil učinek praktično identičen, le da se je upognil plamen na nasprotni strani, tj. v smeri potovanja elektronov.



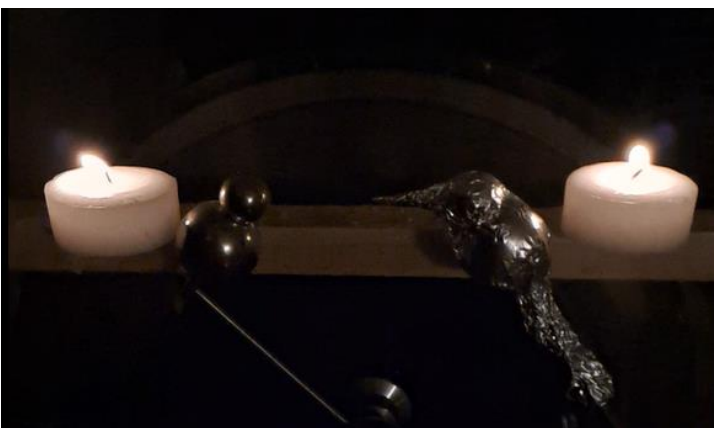
Slika 2: Influenčni stroj



Slika 3: Postavitev sveč za pregled smeri vetra



Slika 4: Postavitev konice na anodo

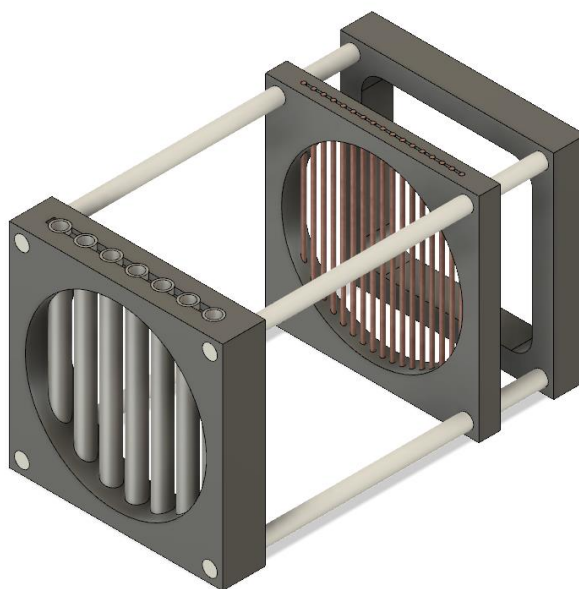


Slika 5: Postavitev konice na katodo

Iz izkušenj, ki sva jih pridobila na influenčnem stroju, lahko povzameva naslednje: visokonapetostna naprava z ustrezno geometrijo elektrod povzroči nastanek vetra, kar lahko (potencialno) izkoristimo za pogon ter da se veter pojavi stran od konice ne glede na predznak elektrod.

3.2 Načrtovanje in izdelava prototipa

Ko sva spoznala princip delovanja ionskega pogona, sva se lotila načrtovanja lastne različice. Prototip naj bi omogočal menjavo elektrod in spreminjanje razdalje med elektrodama.



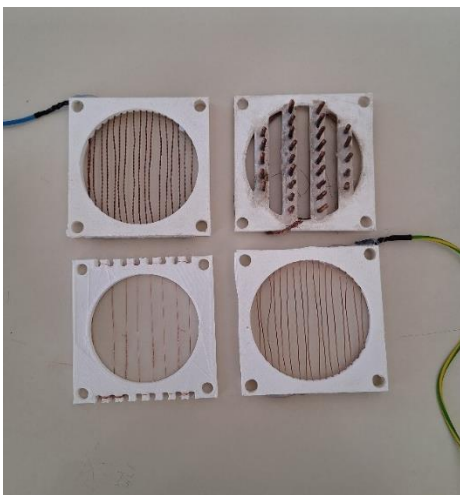
Slika 6: Model prototipa ionskega pogona

Tako sva v 3D-oblikovalniku Fusion 360 zasnovala model, prikazan na sliki. Lesene palice dolžine 20 cm služijo kot vodila, vzdolž katerih lahko drsijo elektrode. Okvir na desnem robu služi kot nosilec, ki drži palice na mestu, preostala okvirja pa sta predvidena kot osnova za namestitev kovinskih elektrod različnih oblik. Okvirje sva natisnila s 3D-tiskalnikom Anycubic Vyper 3D, za material sva izbrala plastiko PLA (Polylactic acid). Za izdelavo elektrod sva uporabljala baker in aluminij, glavno vlogo pri izbiri je imela predvsem razpoložljivost materialov, kot so žice različnih debelin, žebli, plošče, cevi, palice. Zamislila sva si štiri različne anode, kjer poteka ionizacija, in dve različni katodi za pospeševanje ionov. Posebnosti pri izdelavi posamezne elektrode sva upoštevala že pri tiskanju okvirja zanjo. Nato sva v okvirje vstavila kovinske dele ter vse skupaj povezala z žico. Za preprečitev ionizacije na zunanjem robu okvirja sva uporabila izolirni material. Na koncu sva dodala še kontaktne žice za povezovanje v električni krog.

3.2.1 Oblike elektrod

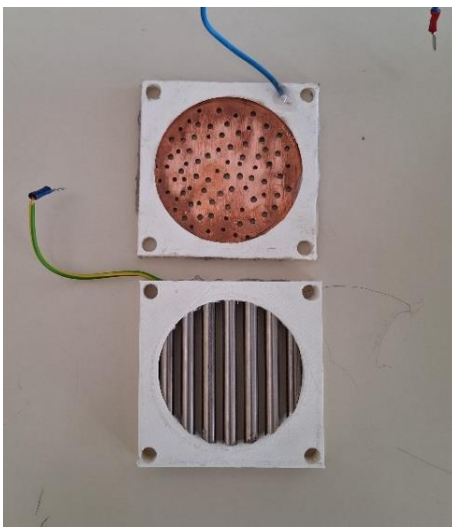
Najprej sva temeljito pregledala številne objave tako na platformi Youtube [4] [7] kot na spletu [8], kjer so bile prikazane različne oblike elektrod. Po premisleku sva se odločila za izdelavo takih elektrod, ki so se izkazale za učinkovite, hkrati pa so bile dovolj preproste za izdelavo.

Izdelala sva tri anode iz žic različnih debelin, četrto anodo pa sva izdelala s špicami – bakrenimi žebliji, saj sva iz izkušenj na influenčnem stroju ugotovila, da je takšna oblika učinkovita.



Slika 7: Oblike anod

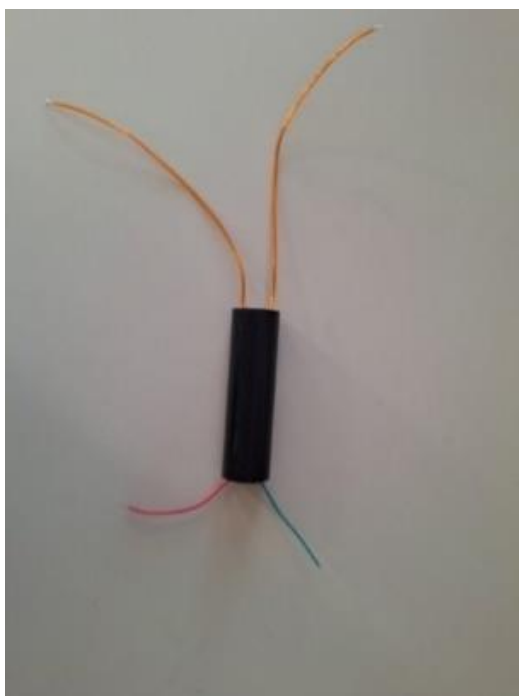
Prvo katodo sva izdelala iz aluminijastih palic. Za obliko druge katode, ki je navrtana bakrena ploščica, pa sva se določila po ogledu različnih funkcionalnih ionskih pogonov [2].



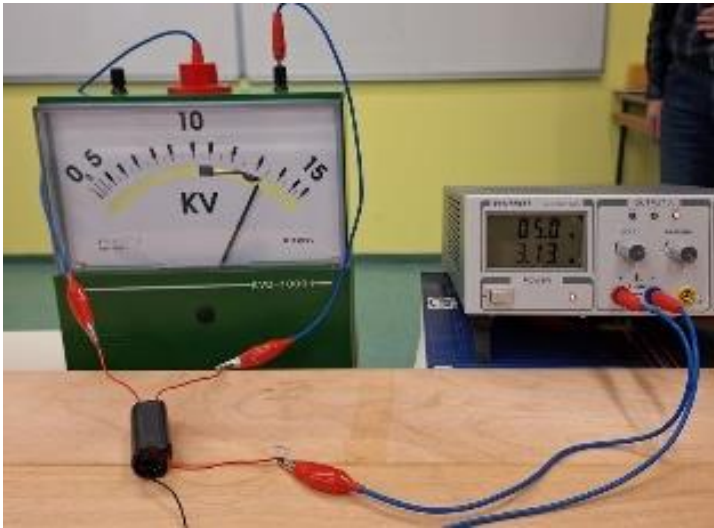
Slika 8: Oblike katod

3.3 Pretvornik napetosti

Za delovanje ionskega pogona potrebujemo visoko enosmerno napetost. Ta je potrebna tako za proces ionizacije kot za pospeševanje ionov. Po dostopni ceni (približno 4 € za kos) sva preko spleta naročila komplet električnih elementov, ki nizko enosmerno napetost pretvarjajo v visoko enosmerno napetost. Ta element deluje po načelu Teslovega transformatorja in oddaja visokonapetostni impulzni tok. Pri elementu na sliki 9 je spodaj nizkonapetostni del, na rdečo žičko priključimo pozitivni priključek, na zeleno žičko pa negativni priključek enosmerne vira napetosti. Priporočljiva vhodna napetost je od 3 V do 6 V, tok pa od 2 A do 5 A. Zgoraj na oranžnih žičkah imamo visokonapetostni izhod. Preizkus je pokazal, da pri vhodni napetosti 5,0 V in toku 3,13 A na izhodu dobimo dobrih 12 kV napetosti, kar je razvidno s slike 10. Proizvajalec navaja, da naj bo čas delovanja krajši od 5 sekund. Naročila sva dve pošiljki, elementi v drugi pošiljki so se nekoliko razlikovali od prvih tako po barvi žičk kot tudi po načinu delovanja. Zato so na slikah v nadaljevanju lahko elementi z žičkami različnih barv.



Slika 9: Pretvornik napetosti

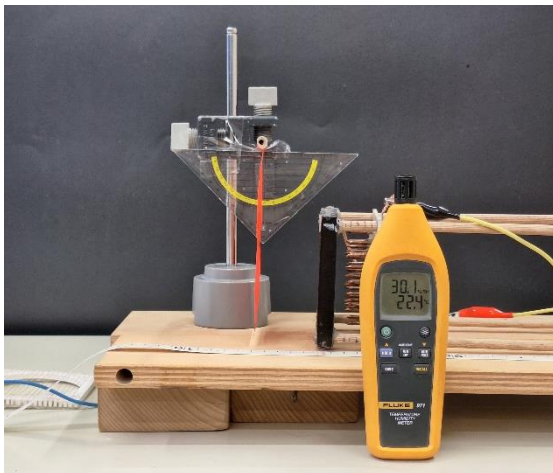


Slika 10: Preizkus pretvornika napetosti

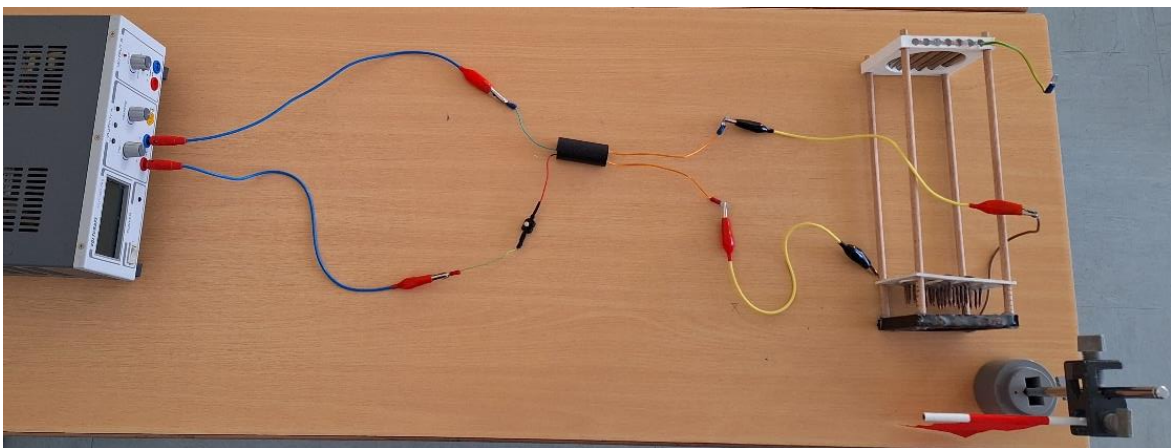
Element je razmeroma majhen in lahek, za napajanje pa je primerna tudi 4,5 V baterija, kar je pomembno za izdelavo neodvisnega vozila.

4 REZULTATI

Pri preizkušanju različnih konfiguracij elektrod sva potrebovala pokazatelja, kdaj nastane več vetra. Za to sva uporabila papirnato zastavico rdeče barve, ki sva jo pritrdila na stojalo ob geotrikotniku ter jo postavila 5 cm stran od katode. Več vetra pomeni več potiska in zastavica se odkloni za večji kot. Primerjalne preizkuse sva izvedla v prostoru s temperaturo 22,4 stopinj Celzija in 30,1 % vlažnostjo. Pogoji se med preizkušanjem niso bistveno spreminjali. Za izvir nizke enosmerne napetosti sva uporabila stabilen izvir VOLTCRAFT VLP-1303.



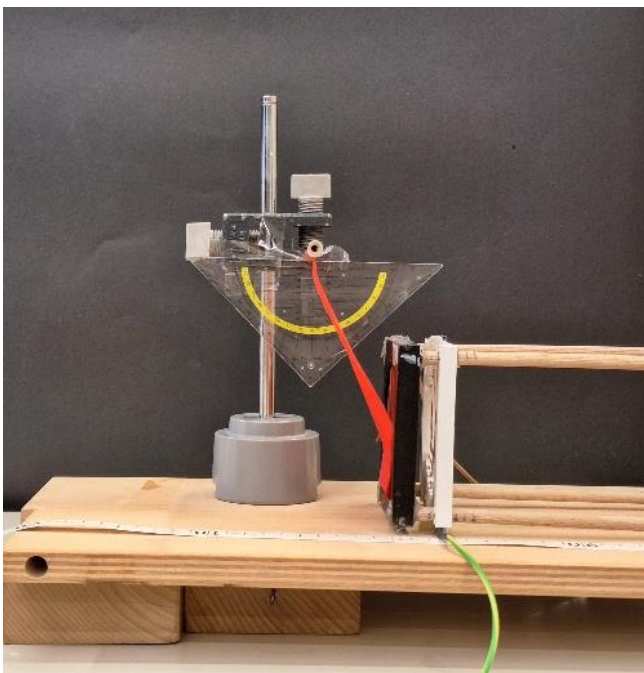
Slika 11: Pogoji za preizkus



Slika 12: Postavitev elementov

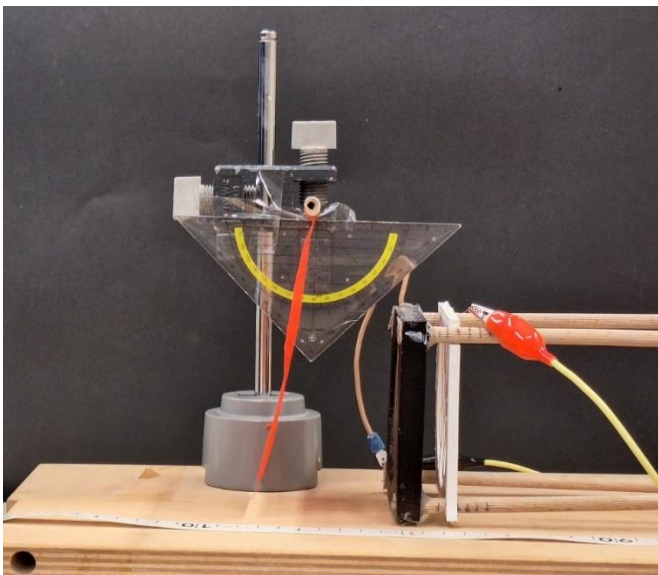
Izbrano anodo in katodo sva postavila na razdaljo 2 cm. Ta razdalja je bila dovolj velika, da ni prišlo do preboja. Celoten prototip sva dvignila na lesen podstavek, da ni prišlo na visokonapetostni strani do preboja na kovinsko ogrodje mize. Za začetek sva izbrala katodo z aluminijastimi palicami, med katerimi so reže za pretok zraka, ter anodo iz debelejših bakrenih žic.

Veter bi moral pihati stran od elektrod, a ker ga ni bilo oziroma je bil zelo šibek, je katoda pritegnila zastavico zaradi elektrostaticnega naboja. Rezultat je na sliki 13.



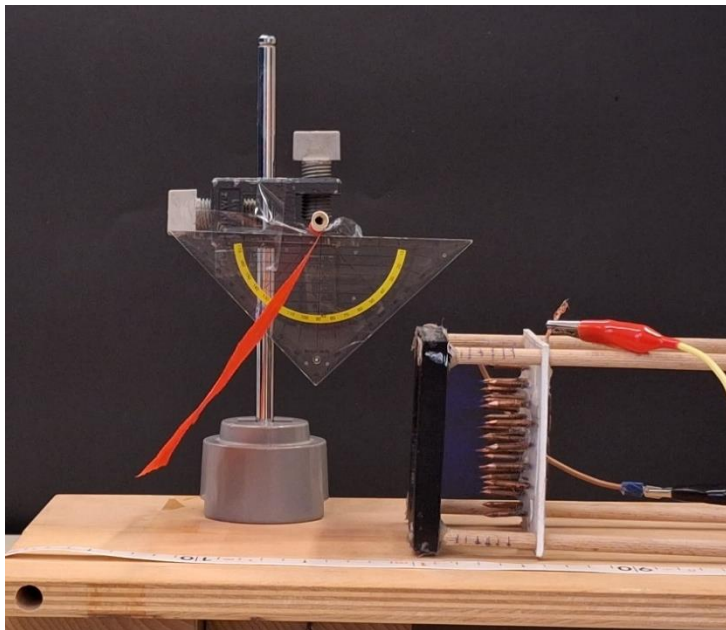
Slika 13: Elektrostatični naboj pritegne zastavico

Odklon zastavice v pravo smer je dala šele anoda z najtanjšimi žicami, slika 14. Odklon znaša 10° .



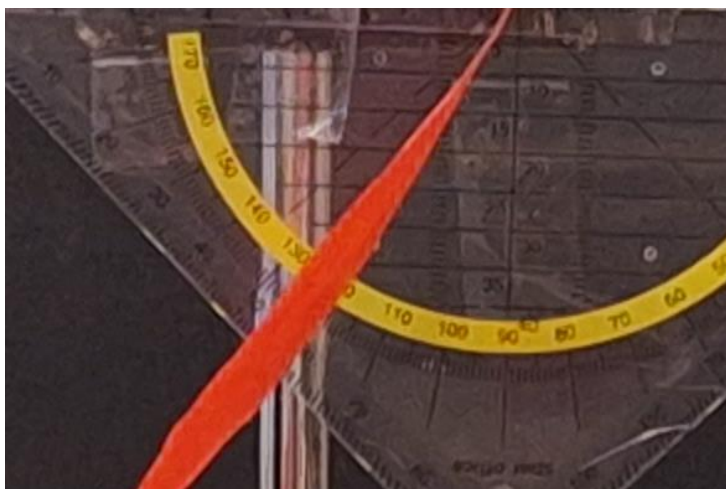
Slika 14: Anoda s tankimi žicami

Nazadnje sva preizkusila anodo z bakrenimi žbljji. Elektrodi sva postavila na začetno razdaljo 5 cm, s tem da je bila dolžina žbljev približno 2,5 cm. Na sliki 15 se je zastavica odklonila za 30° .

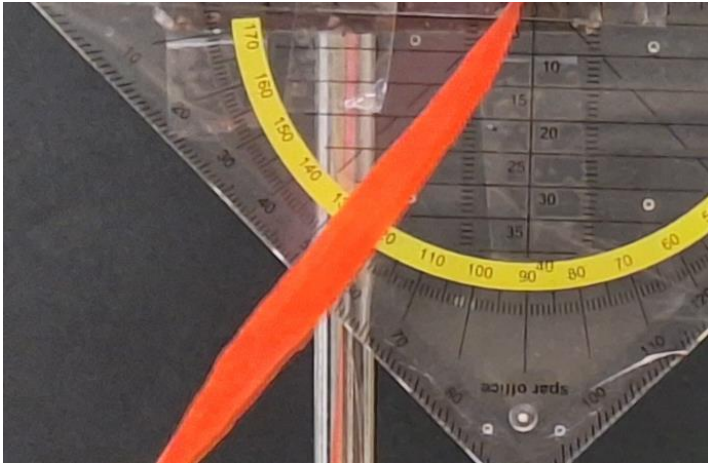


Slika 15: Anoda s špicami, razdalja med elektrodama 5 cm

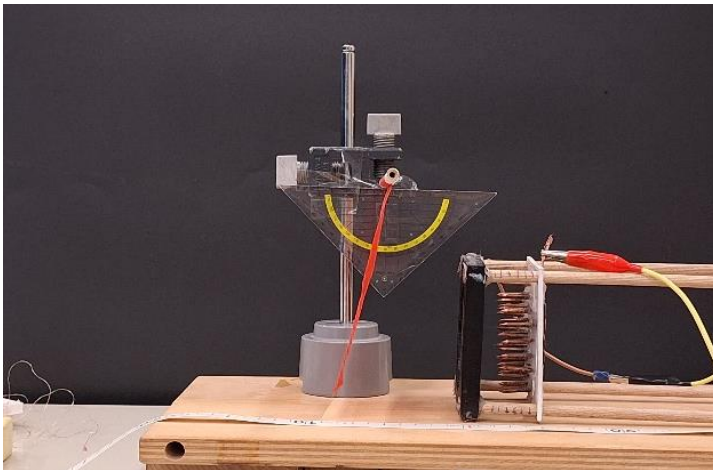
Nato sva postopno razdaljo med elektrodama zmanjševala do te mere, da še ravno ni prišlo do preboja. Ta meja je bila pri 3,5 cm, tako da so bile konice žbljev oddaljene od katode približno 1 cm. Pri razdalji 4 cm je odklon sredine zastavice približno 32° (slika 16). Pri razdalji 3,5 cm pa je odklon zastavice zagotovo še nekaj stopinj večji, ocenjujemo ga na 35° (slika 17).



Slika 16: Odklon zastavice pri razdalji elektrod 4 cm



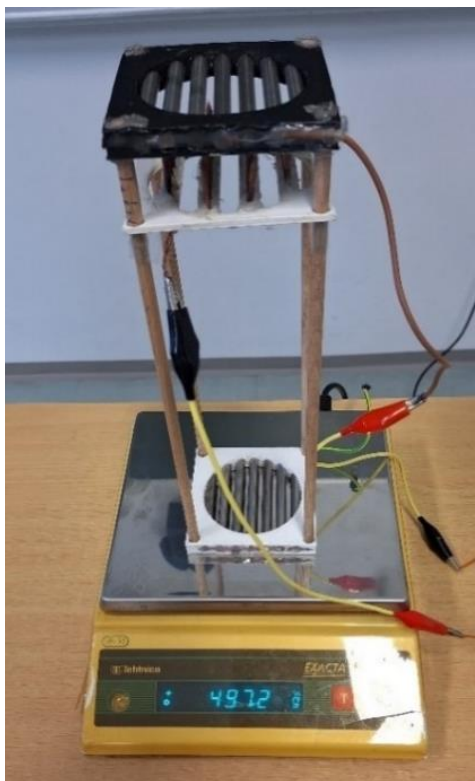
Slika 17: Odklon zastavice pri razdalji elektrod 3,5 cm



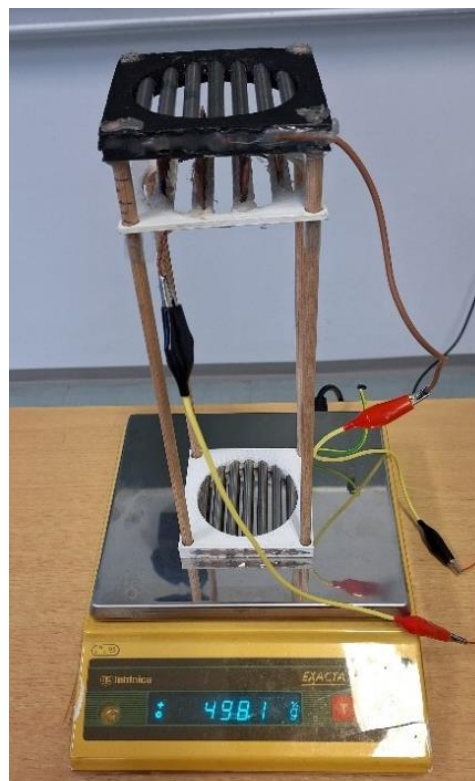
Slika 18: Delovanje naprave s 4,5 V baterijo kot virom napetosti

Na koncu sva napravo testirala še z baterijo z napetostjo 4,5 volta (slika 18). Razdaljo med elektrodama sva morala povečati na 4 cm, saj je vlažnost v prostoru narastla za nekaj odstotkov in pri razdalji 3,5 cm je že prihajalo do preboja. V tem primeru se je zastavica odklonila za 10° .

Zamenjava katode iz aluminijastih palic s katodo z bakreno ploščico z luknjicami se ni obnesla. Lahko, da je bilo vetra občutno manj zato, ker je bila ploščica kljub luknjicam premalo prepustna za zrak. Prototip s konfiguracijo, ki je ustvarila največ vetra, sva postavila navpično na občutljivo tehtnico z natančnostjo 0,1 g. Po vključitvi naprave je tehtnica pokazala za 0,9 g večjo maso, kar ustreza sili 9 mN. Primerjava je razvidna s slik 19 in 20.



Slika 20: Tehtnica pri neaktivni napravi, $m = 497,2 \text{ g}$

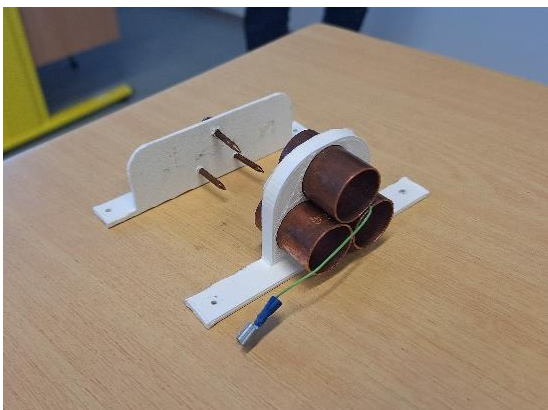


Slika 19: Tehtnica pri aktivni napravi, $m = 498,1 \text{ g}$

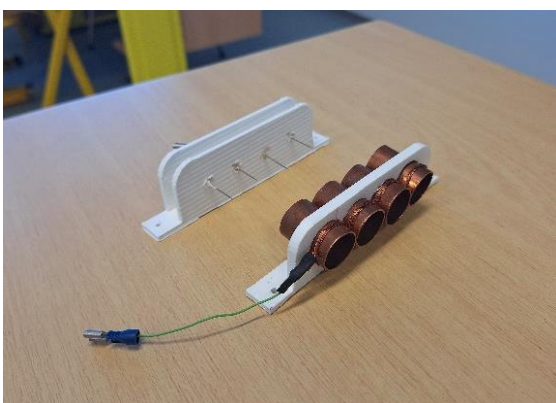
4.1 Izdelava vozila

Sila nekaj milinewtonov ne more spraviti v gibanje vozička z maso nekaj sto gramov, kolikor bi ta tehtal, tudi če bi nanj namestila pomanjšano različico ionskega potisnika z lastno baterijo, zato sva se raje odločila za izdelavo plovila.

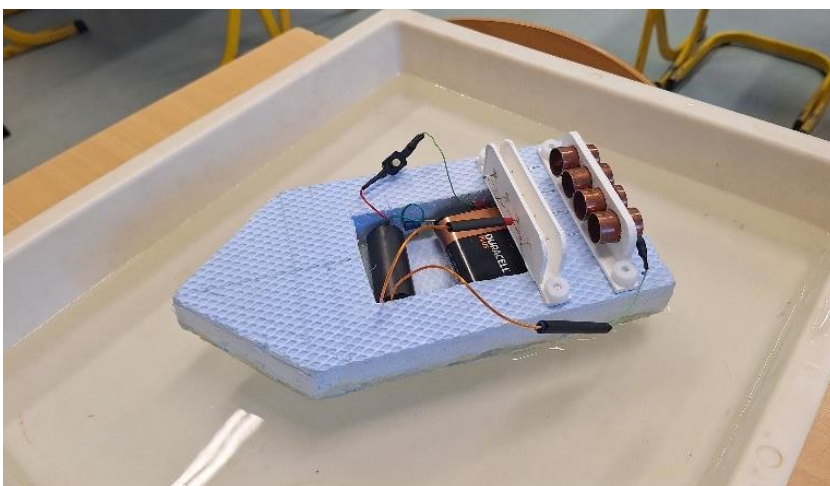
Oblikovala sva dva nova para elektrod. Pri izdelavi anod sva v obeh primerih uporabila špičaste predmete, enkrat že preizkušene bakrene žeblice, drugič pa še tanjše in daljše šivalne igle. Za izdelavo katod pa sva uporabila bakrene cevi dveh različnih premerov. Skozi cev bi lahko imel zrak prosto pot za pretakanje. Nova pogonska sklopa prikazujeta sliki 21 in 22. Plastične nosilne dele sva natisnila s 3D-tiskalnikom.



Slika 21: Pogon št. 1: žebli in cevi z večjim premerom



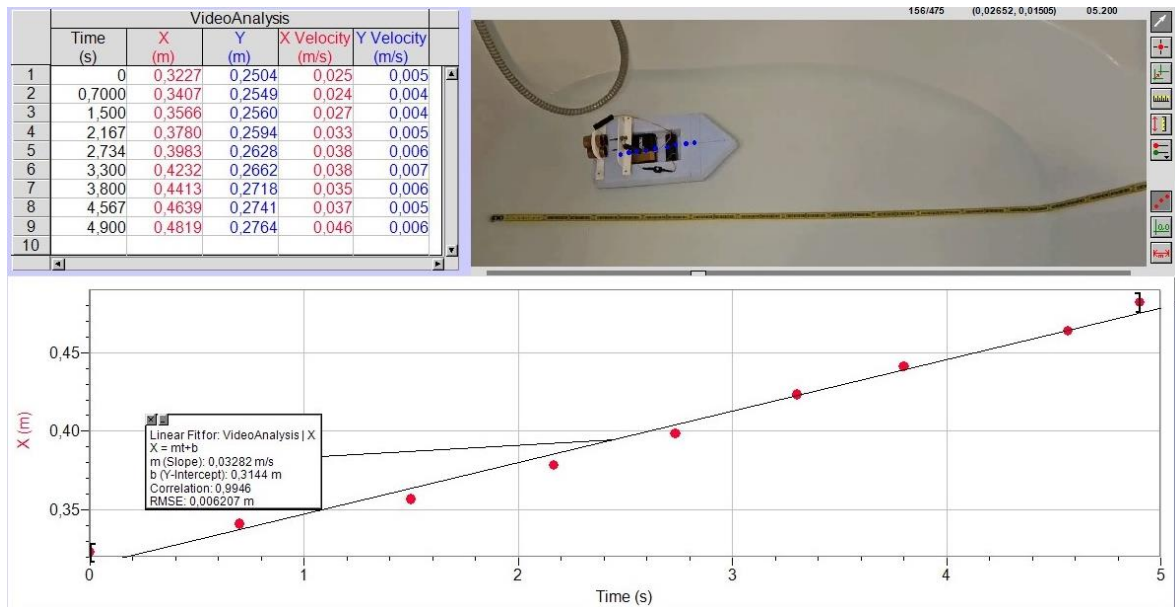
Slika 22: Pogon št. 2: igle in cevi z manjšim premerom



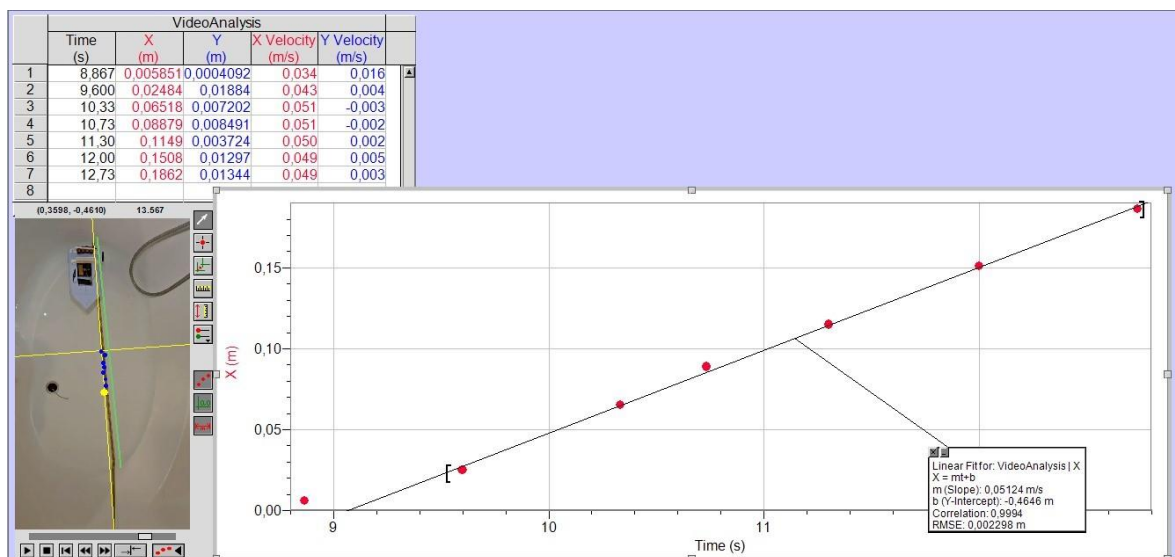
Slika 23: Ladjica in namestitev pogona

Ladjico, ki je na sliki 23, sva izdelala iz ekstrudiranega polistirena (stirodurja), saj ga je lahko oblikovati in ima zaradi majhne gostote veliko nosilnost. Na ladjico sva namestila pogon št. 1 ter v kadi preizkusila njegovo učinkovitost. Ladjica je dejansko začela pluti in z videoanalizo v programu LoggerPro sva določila njeno hitrost (slika 24). Naklon

premice na grafu $x(t)$ (angleško slope) predstavlja hitrost in znaša 3,2 cm/s. Nato sva na ladjico namestila še pogon št. 2 in ponovila postopek. S slike 25 je razvidno, da je ladjica tokrat plula s hitrostjo 5,1 cm/s.



Slika 24: Določanje hitrosti ladjice s pogonom št. 1



Slika 25: Določanje hitrosti ladjice s pogonom št. 2

5 DISKUSIJA

Iz preizkusov na prototipu in ladjici lahko prideva do naslednjih ugotovitev.

Ionizacija poteka najbolje na elektrodi, ki je tanka in koničasta. V najinem primeru se je najbolje obnesla anoda s šivalnimi iglami. Pri elektrodi za pospeševanje ionov pa je ključno, da je dovolj prepustna za zrak. Dobro sta se obnesli tako katoda iz aluminijastih palic z dovolj medsebojnega presledka kot katoda iz narezanih bakrenih cevi.

Najoptimalnejša razdalja med elektrodama je tik pred električnim prebojem, ko se opazi iskrenje modro vijolične barve, zaznati pa je tudi vonj ozona (slika 26). V praksi je to pomenilo razdaljo od enega do dveh centimetrov med konicami anode in katodo. Na prebojno razdaljo močno vpliva vlažnost zraka, vendar se s to odvisnostjo nisva podrobneje ukvarjala.



Slika 26: Iskrenje med elektrodama v optimalnem položaju

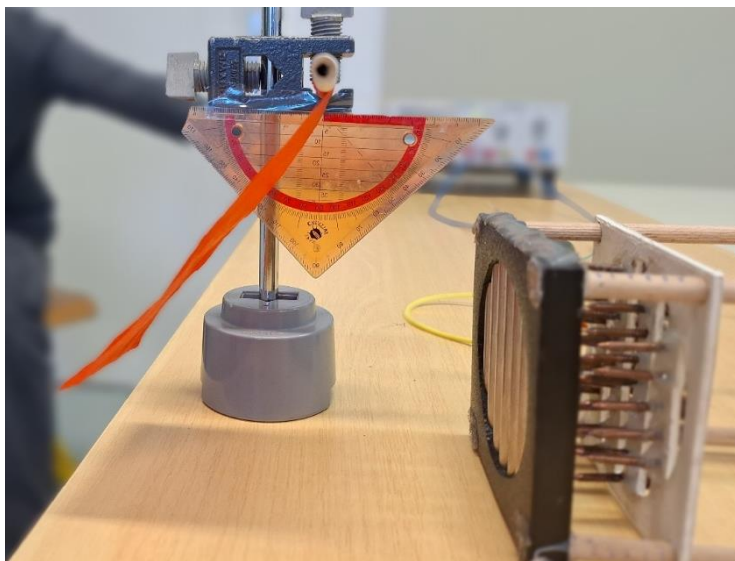
Prvi preizkusi so pokazali, da ni opaznih sprememb učinkovitosti pogona, če obrnemo predznak naboja na elektrodah. Če poteka ionizacija na anodi, potem v smeri katode pospešujejo pozitivno naelektrene molekule zraka. Če poteka ionizacija na katodi, potem v smeri anode pospešujejo elektroni. Ker ima elektron približno 60 000-krat manjšo maso od molekule dušika ali kisika, sva bila presenečena nad takšnim rezultatom. Po temeljitem premisleku pa sva prišla do naslednje možne razlage: povprečna prosta pot molekul zraka je pri normalnih pogojih ocenjena na 0,06 mikrometra [5]. To je tudi razdalja r , ki jo

elektron prepotuje med enim in drugim trkom z nevtralno molekulo pri gibanju proti anodi. Kinetično energijo, ki jo pridobi na taki poti, lahko ocenimo z enačbo (1):

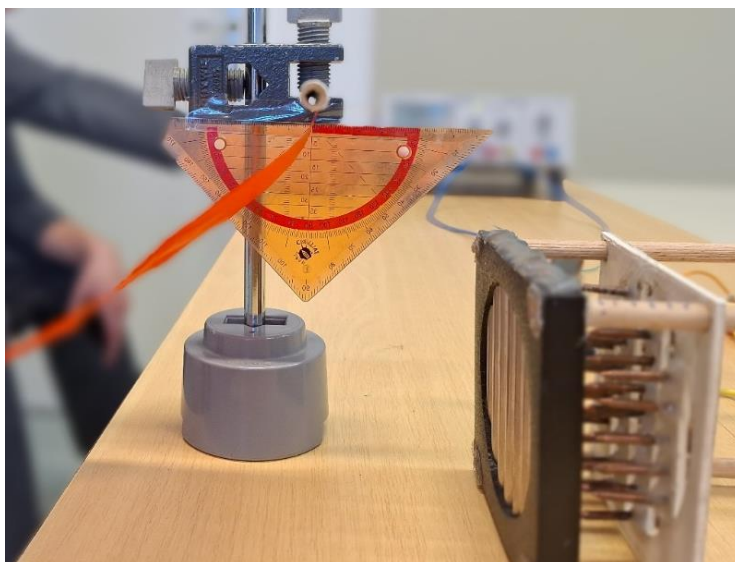
$$W_k = e_0 \cdot E \cdot r = \frac{2 \cdot M \cdot V}{m \cdot 0.06 \mu\text{m}} = 0.12\text{eV}$$

Tolikšna kinetična energija elektronov je premajhna, da bi elektroni lahko vzbujali tako atome dušika in kisika v molekulah kot tudi same molekule [6]. Potrebna energija za vzbujanje iz osnovnega v višja vzbujena stanja je več elektronvoltov. Vsa električna energija gre tudi v tem primeru v celoti v kinetično energijo, ki jo elektroni (očitno) podobno učinkovito kot (težji) ioni prenašajo na nevtralne molekule.

Pretvornik napetosti se je izkazal za zelo občutljiv element, ki se je pri izvajanju poizkusov mnogokrat pokvaril in smo morali naročiti novo pošiljko. Vzrok za okvare je bil najbrž v času delovanja, ki je mnogokrat presegal priporočenih 5 sekund, morda je bil premočan tokovni izvir, v nekaterih primerih pa so se poškodovale (strgale) vezne žičke. Izkazalo se je, da so z drugo pošiljko prispeli elementi z drugačnimi lastnostmi kot prvič. Predvsem so povzročili močnejši efekt ionskega vetra. Prav tako pa se je opazila očitna razlika moči vetra glede na to, na katero izmed elektrod priključimo pozitivni oziroma negativni priključek vira. Na sliki 27 je koničasta elektroda pozitivna in se pospešujejo pozitivni ioni. Pojavi se znaten veter, ki odriwa zastavico. Na sliki 28 pa sta priključka obrnjena, koničasta elektroda je negativna in se pospešujejo elektroni. Na prvi pogled je jasno, da je vetra več, odklon zastavice je vsaj za 10° večji, delovanje naprave pa je tišje. To je povsem v nasprotju s standardom na vseh ionskih pogonih, ki se uporabljajo v vesolju, kjer za pospeševanje uporabljajo katodo.



Slika 27: Pospeševanje ionov



Slika 28: Pospeševanje elektronov

Za cilj raziskovalne naloge sva si zastavila, da izdelava ionski potisnik, ki bo zmožen preprosto vozilo spraviti v gibanje. Najprej sva pomislila, da bi potisnik namestila na voziček z majhnim kotalnim uporom. Teža takega vozička bi bila predvsem zaradi teže baterije velikosti par newtonov. Da se voziček premakne, je potrebna potisna sila, večja od sile lepenja v ležajih koles. Za to pa je nekaj tisočink newtona premalo, tudi če so ležaji kakovostni, zato sva se hitro osredotočila na izdelavo plovila. Sila upora vode na plovilo narašča s hitrostjo plovila, a za sam premik iz mirovanja zadošča že minimalna sila. Prilagojen ionski potisnik se je za pogon ladjice iz stirodura dobro obnesel. Ladjica doseže največjo hitrost 5 cm/s, ko je opremljena z visokonapetostnim elementom iz druge

pošiljke, ionizacija poteka na iglah negativne elektrode in cevasta pozitivna elektroda pospešuje elektrone. Kot vir nizke napetosti je uporabljena 4,5 V baterija.

6 ZAKLJUČEK/SKLEP

Ugotoviva lahko, da sva z izdelavo ladjice, ki pluje na ionski pogon, dosegla cilj, ki sva si ga zastavila. Pri spopadanju s problemom sva pridobila tako nova teoretična kot praktična znanja in spretnosti. V veliko pomoč pri izdelavi ionskih potisnikov je bil 3D-tiskalnik, s katerim sva lahko izdelovala posamezni elektrodi prilagojeno plastično ogrodje.

Je pa seveda ostalo nekaj odprtih vprašanj, na katera še nisva našla odgovora.

Prvo vprašanje je, kako točno deluje element, ki ustvarja visoko napetost. Njegova zgradba in princip delovanja sta zavita v skrivnost, saj je težko karkoli najti na to temo. Tudi zaščitna plastika se ne da odstraniti, ne da bi močno poškodoval notranjo zgradbo. Zato je težko oceniti ali je ta tehnologija že dosegla svoj limit ali pa so še mogoče izboljšave. Najine izkušnje so, da so bili v drugi pošiljki nedvomno učinkovitejši elementi.

Med izvajanjem poizkusov sva opazila vpliv vlažnosti zraka na učinkovitost delovanja ionskega potisnika. Pri večji vlažnosti morata biti elektrodi na večji medsebojni razdalji, to pa malo zmanjša jakost vetra. Zato sva ionske potisnike načrtovala tako, da sva lahko spreminjala razdaljo med elektrodama. S skrbno načrtovanimi meritvami pri različnih odstotkih vlažnosti zraka bi se dalo priti do zanesljivejše ocene odvisnosti učinkovitosti potisnika od vlažnosti.

Preizkusila sva tudi idejo, da dva visokonapetostna elementa poveževa zaporedno in s tem v teoriji za dvakrat povečava izhodno napetost. Ideja je na prototipu kazala dobre rezultate, veter in potisk sta se ojačila. Je pa pri tem moral vir napetosti dovajati zelo velik tok, ki je bil na meji njegovih zmogljivosti. Če bi to uporabila na samostojnem vozilu, bi najbrž potrebovala tudi dve bateriji, baterije pa imajo veliko maso in jih je težko premikati. Zato sva se odločila, da najprej poizkusiva z enim elementom in eno baterijo.

Odprto ostaja vprašanje, zakaj je na Zemlji v zraku boljše pospeševati elektrone, v brezračnem prostoru vesolja pa ione.

Smiselno bi bilo tudi preizkusiti, koliko časa zagotavlja ena 4,5 V baterija maksimalen pogon ladjici. Vendar je problem zopet v visokonapetostnem elementu, ki naj bi deloval v manj kot petsekundnem intervalu, pa še tega v praksi ne moreva čisto potrditi. Število

elementov, ki so prenehali delovati, je že med običajnimi preizkusi kar naraščalo in naraščalo.

Rezultati preizkusov so pokazali, da je ionski pogon sicer sposoben premikati vozila tudi na površini Zemlje, vendar pa je hitrost premikanja relativno majhna. To je posledica majhne potisne sile, ki jo proizvede ionski pogon. Kljub temu obstaja potencial za uporabo takšnih naprav v vsakdanjem življenju, predvsem za pogon vozil z nizko maso. Tehnologija pretvarjanja nizke napetosti v visoko se morda lahko še izboljša tako glede doseganja še višjih napetosti kot daljšega časa delovanja. Če se še nekoliko poveča potisna sila, potem se bo zagotovo našla uporaba za enostaven in cenen pogon, ki ga lahko napajajo standardne baterije.

7 POVZETEK

Ionski potisnik je vrsta pogona, ki se v praksi uporablja za pogon vesoljskih plovil v šibki težnosti. Deluje tako, da ione pospešuje z visokonapetostnim električnim poljem, kar ustvarja potreben potisk za premikanje plovila. Ta tehnologija se odlikuje v vesoljski industriji po dolgi življenjski dobi in po visoki učinkovitosti. Na spletu lahko najdemo videoposnetke, kjer posamezniki samostojno izdelujejo ionske potisnike, prilagojene delovanju v Zemljinem ozračju. Pri tem uporabljajo poseben električni element, ki zagotavlja potrebno visoko napetost in se ga da naročiti po spletu. Odločila sva se, da sama izdelava podobno napravo ter preizkusiva njeno praktično uporabnost. Potisnik je sestavljen iz dveh elektrod, na eni elektrodi se izvaja proces ionizacije, medtem ko nasprotno nabita elektroda pospešuje nastale ione. Najprej sva izdelala prototip, na katerem sva testirala različne oblike elektrod ter oddaljenost med elektrodama. Preizkusi so pokazali, da je za ionizacijo najboljša elektroda z večjim številom dolgih in tankih konic, ki so usmerjene proti nasprotni elektrodi. Pri obliki elektrode za pospeševanje pa je najpomembnejše, da čim manj ovira pretok zraka. Pri iskanju optimalne razdalje med elektrodama se je izkazalo, da je potisk največji tik pred električnim prebojem. Po izvedenih poizkusih na prototipu sva izdelala manjši ionski potisnik, ki sva ga pritrdila na ladjico. V praksi se je izkazalo, da je potisk dovolj velik, da se ladjica začne premikati, vendar pa hitrost ladjice ostaja relativno majhna. Pokazala sva, da je tak način pogona zmožen premikati vozilo tudi na površini Zemlje. Obstaja potencial, da se takšne naprave uporablja tudi v vsakdanjem življenju za pogon vozil z majhno maso. Odprto je ostalo še kar nekaj vprašanj in veliko možnosti za nadaljnje preizkuse, kot je vpliv vlažnosti, kolikšna je poraba energije ter podrobnejša testiranja vpliva zaporedne vezave več pretvornikov napetosti. Ugotovitve teh poizkusov bi lahko pripomogle k še dodatni optimizaciji ionskega potisnika.

8 SUMMARY

An ion thruster is a type of propulsion that is used in practice to propel spacecraft in weak gravity. It works by accelerating ions with a high-voltage electric field, generating the necessary thrust to move the craft. This technology is distinguished in the aerospace industry by its long lifetime and high efficiency. Videos can be found online of individuals independently building ion thrusters tailored to operate in the Earth's atmosphere. They use a special electrical element that provides the necessary high voltage and can be ordered online. We decided to build a similar device ourselves and test its practical applicability. The thruster consists of two electrodes, one of which is used to carry out the ionisation process, while the oppositely charged electrode accelerates the resulting ions. We first built a prototype on which we tested different electrode shapes and the distance between the electrodes. The tests showed that the best electrode for ionisation is the one with the greater number of long and thin spikes directed towards the opposite electrode. However, the most important consideration for the shape of the accelerating electrode is that it should obstruct air flow as little as possible. When we were looking for the optimum distance between the electrodes, we found that wind was greatest just before the electrical discharge. After experimenting with the prototype, we built a smaller ion thruster and attached it to a boat. In practice, we found that the thrust was high enough to get the boat moving, but the boat speed remained relatively low. We have shown that this type of propulsion is capable of moving a vehicle even on the surface of the Earth. There is potential for such devices to be used in everyday life to propel low mass vehicles. There are still a number of unanswered questions and many opportunities for further testing, such as the effect of humidity, power consumption and more detailed testing of the effect of connecting several voltage converters in a series. The results of these experiments could help to further optimise the ion thruster.

9 VIRI

- [1] Mohorič, A., Babič, V., 2015. Fizika 3. Mladinska knjiga, Ljubljana.
- [2] Beyond NERVA, Gridded Ion Thrusters.
<https://beyondnerva.com/electric-propulsion/gridded-ion-thrusters/> (20. 2. 2024).
- [3] Electrostatic ion thruster
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Electrostatic_ion_thruster-en.svg (20. 2. 2024).
- [4] Integza, I built an ionic plasma thruster
<https://www.youtube.com/watch?v=mnCmvxt2jn8> (20. 2. 2024).
- [5] Molekularna zgradba plina.
https://physics.fe.uni-lj.si/students/literatura/1_8Termodinamika.pdf (20. 2. 2024).
- [6] Mozetič, M., Zaplotnik, R., Nitrogen and Ammonia.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nitrogen-molecule> (20. 2. 2024).
- [7] Plasma Channel, The Next Generation of Ionic Plasma Thrusters
<https://www.youtube.com/watch?v=yftKjkZHirc> (20. 2. 2024).
- [8] Zwitter, ionski raketni pogon.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwicj8_fqrqEAXM9QIHHavhBZUQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Ffiz.fmf.unilj.si%2F~xtomaz%2Fstrokovno%2F201906proteus&usg=AOvVaw3kcSETiDxsN_WjYE5GQTB8&opi=89978449 (20. 2. 2024).

ZAHVALA

Zahvaljujema se mentorju Petru Jevšenaku, ki nama je pomagal pri izvajanju poizkusov in pisanju raziskovalne naloge; Matjažu Žeraku, ki je sodeloval pri konceptu za izdelavo prototipa ter nakupu prve pošiljke pretvornikov napetosti; Polonci Glojek za lekturo in Darji Joger Avberšek za jezikovni pregled angleškega dela; mag. Ivanu Jovanu, ki nama je omogočil uporabo šolskega 3D-tiskalnika, s katerim sva lahko pospešila izdelavo delov za ionski potisnik.

Zahvaljujema se svojima družinama, ki sta naju spodbujali ter pomagali s kakšno idejo ali pa z nakupom materiala.