



UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

SEMINAR

Ionski pogon

Avtor:
Jože BUH

Mentor:
Dr. Primož ZIHERL

17. junij 2009

Kazalo

1	Uvod	3
2	Princip delovanja	3
3	Zgodovina razvoja in uporabe	9
4	Uporaba	10
5	Zaključek	13

Povzetek

Ionski pogon je tip pogona za vozila v vesolju. Njegovo bistvo je tok ionov, pospešenih z visokonapetostnimi pospeševalnimi mrežami. Poznajo elektrostatične in elektromagnetne pogone, ki se ločijo po načinu povspeševanja ionov. Elektrostatični uporabljajo Coulombovo silo, da pospešijo nabite delce v smer električnega polja. Proizveden potisk je zelo majhen v primerjavi z kemičnimi raketami, vendar ima ta vrsta pogona zelo velik specifični impulz. Zaradi visokih energijskih potreb in možnosti delovanja zgolj v vakuumu se ionski pogon uporablja le v vesolju.

Abstract

An ion thruster is a form of electric propulsion used for spacecraft propulsion that creates thrust by accelerating ions. Ion thrusters are characterized by the way they accelerate the ions using either electrostatic or electromagnetic force. Electrostatic ion thrusters use the Coulomb force and accelerate the ions in the direction of the electric field. The thrust created in ion thrusters is very small compared to conventional chemical rockets, but a very high specific impulse, or propellant efficiency, is obtained. Due to their relatively high power needs, given the specific power of power supplies, and the requirement of an environment void of other ionized particles, ion thrust propulsion is currently practical only in outer space.

1 Uvod

Ionski pogon pospešuje ione s Culombovo silo do visokih hitrosti, zaradi česar dobro izkoristi pogonsko maso. V tem seminarju bomo predstavili način delovanja tega pogona, ki se danes hitro razvija. Opisal bom tudi zgodovino razvoja, odprave, ki dandanes uporabljajo prednosti to tehnologijo, in obete za prihodnost. Prednost ionskega pogona je predvsem v majhni masi goriva, ki jo potrebujemo za odpravo globoko v vesolje. Slabosti pa so majhen potisk, ki omejuje uporabnost pogona na posebne vrste odprav, ter visoka energijska zahtevnost. Trenutno potekajo raziskave za zamenjavo solarnih celic z jederskim reaktorjem kot virom energije.

2 Princip delovanja

Raketna enačba

Na začetku 20. stoletja je Ciolkovski izpeljal enačbo rakete [1], vodilno enačbo za pogon z raketnim motorjem. Enačba omogoča izračun končne hitrosti rakete iz mase praznega plovila m_0 , skupne mase pogonskega sredstva in plovila M ter izpušne hitrosti pogonskega sredstva v_{izp} . Raketni potisk T je nasprotno enak časovnemu odvodu gibalne količine pogonskega sredstva

$$T = -\frac{d}{dt}(m_p v_{izp}) = -v_{izp} \frac{dm_p}{dt}, \quad (1)$$

kjer je m_p masa pogonskega sredstva in v_{izp} hitrost sredstva pri izpustu merjena v sistemu plovila. Skupna masa plovila je ob vsakem času enaka vsoti mase praznega plovila, m_0 in mase preostalega pogonskega sredstva:

$$M(t) = m_0 + m_p. \quad (2)$$

Ko se pogonsko sredstvo porablja, se skupna masa spreminja

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dm_p}{dt} \quad (3)$$

Vstavimo enačbo (3) v enačbo (1) in silo izrazimo z 2. Newtonovim zakonom, da dobimo

$$M \frac{dv}{dt} = -v_{izp} \frac{dM}{dt} \quad \text{oziroma} \quad dv = v_{izp} \frac{dM}{M}. \quad (4)$$

Za gibanje v ravni črti enačbo integriramo od začetne hitrosti v_z do končne v_k . Ob tem se masa spremeni od začetne mase $m_0 + m_p$ do končne mase m_0 , ko pogonskega sredstva zmanjka, tako dobimo zgoraj omenjeno raketno enačbo:

$$\Delta v = v_z - v_k = v_{izp} \ln \left(\frac{m_0}{m_0 + m_p} \right), \quad (5)$$

kar je moč zapisati kot potrebno pogonsko maso za doseg določene končne hitrosti ob danem v_{izp}

$$m_p = m_0 [\exp(\Delta v / v_{izp}) - 1]. \quad (6)$$

Izpušna hitrost kemičnih raket je omejena z energijo, ki je shranjena v kemičnih vezeh pogonskega sredstva, tipične vrednosti so tu do 4 km/s [1]. Električni pogon pa po drugi strani ločuje pogonsko maso od energije, ki je potrebna za povspesevanje teh delcev. Moderni ionski pogoni, ki kot pogonsko sredstvo uporabljajo ksenon, imajo v_{izp} tipično od 20 do 40 km/s enako oziroma 10-20 km/s pri Hallovih pogonih [1]. Dramatične koristi visoke izpustne hitrosti so vidni iz enačbe (6). Pri misiji srečanja z asterooidom, kjer je potrebno 500 kg pospešiti do hitrosti 5 km/s, bi pri kemični raketi z $v_{izp} = 3$ km/s potrebovali 2147 kg pogonskega goriva. Ionski pogon z $v_{izp} = 30$ km/s pa bi isto misijo izpolnil z le 91 kg ksenona [1].

Kot merilo učinkovitosti potiska glede na potrebno maso uvedemo specifični impulz I_{sp} [1], ki je definiran kot

$$I_{sp} = \frac{v_{izp}}{g}, \quad (7)$$

kjer je g gravitacijska konstanta. Specifični impulz ima nenavadno enoto sekunde. Čim večji je I_{sp} , tem manj pogonskega sredstva je potrebnega za doseg določene spremembe v hitrosti, kar je razvidno iz enačbe (6).

Vrste in primerjava električnih pogonov

Električne pogone delimo glede na metodo povspesevanja pogonske mase. Te metode se v grobem deli na elektrotermalne, elektrostatične in elektromagnetne. Nekatero tehnične značilnosti različnih električnih pogonov so zbrane v tabeli 1. Električni pogoni se delijo na [1]:

- **Resistojet** — je elektrotermalna naprava. Pogonsko sredstvo je segreto s pomočjo uporovno grete komore in se pospeši zaradi toplotnega raztezanja.
- **Ionski pogon** — v uporabi je več tehnik za ionizacijo večine pogonskega sredstva. Ioni se potem elektrostatično ločijo iz plazme in pospešijo do visokih hitrosti pri napetostih, ki presegajo 10 kV. Ionski pogoni imajo visoko energijsko učinkovitost (60-80 %).
- **Hallov pogon** — Ta tip elektrostatičnega pogona izkorišča ionizacijo zaradi Hallovega prečnega polja. Električno polje, ki je postavljeno prečno na magnetno, pospeši ione do visokih izhodnih hitrosti. Naprava je enostavnejša za izdelavo kot ionski pogon, v_{izp} pa je manjša kot pri ionskem pogonu.

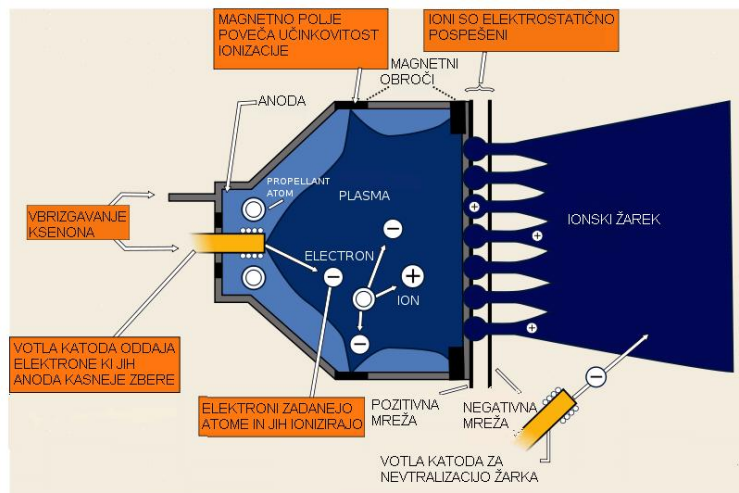
- **Electrospray/Field Emission Electric Propulsion Thruster** — Ta tip pogona proizvaja zelo majhen potisk (manj kot 1 mN). Pri electrospray pogonu iz prevodnega tekočega pogonskega sredstva (tipično gre tu za indij ali cezij) izločimo ione, medtem ko se tekočina potiska skozi iglo in se jih elektrostatično pospeši.
- **Pulsed Plasma Thruster** — PPT je elektromagnetni pogon, ki izkorišča pulzno ionizacijo, da ionizira del trdnega pogonskega sredstva.

vrsta pogona	specifični impulz [s]	vhodna moč [kW]	območje izkoristka [%]	pogonsko sredstvo
hladen plin	50-75	-	-	različno
kemičen	300-450	-	-	različno
resistojet	300	0,5-1	65-90	N ₂ H ₄
arcjet	500-600	0,9-2,2	25-45	N ₂ H ₄
ionski pogon	2500-3600	0,4-4,3	40-80	ksenon
Hallov pogon	1500-200	1,5-4,5	35-60	ksenon
PPT	850-1200	do 0,2	7-13	teflon

Tabela 1: Tipični operativni parametri za bolj pogosto uporabljene pogone. [1]

Osnovna geometrija ionskega pogona

Ionski pogon je v osnovi sestavljen iz treh komponent: generatorja plazme, pospeševalnih rež ter nevtralizacijske katode. Na sliki 1 je shematični presek ionskega pogona, ki za ionizacijo uporablja princip bombardiranja z elektroni. Anoda poskrbi, da elektroni odtečejo iz ionizacijske komore, ione pa pospeševalne mreže pospešijo tako, da tvorijo žarek potiska. Generator plazme je na visoki pozitivni napetosti v primerjavi z vesoljsko ladjo, zato mora biti zaščiten z zaslonko, da preprečimo nabiranje naboja v zadnjem delu plovila. Nevtralizacijska katoda je nameščena na zunanji strani pogona in poskrbi, da se elektroni rekombinirajo z ioni in vesoljska ladja ostane električno nevtralna.

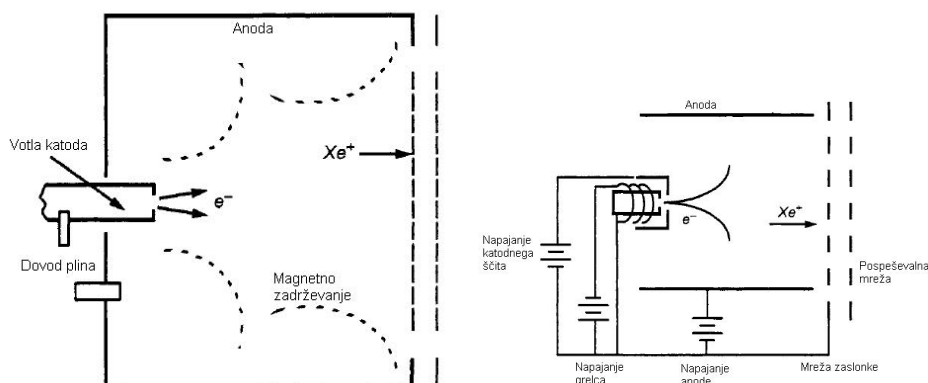


Slika 1: Shematska slika ionskega pogona z osnovnimi sestavnimi deli. Na levi strani v pogon vstopa ksenon. Iz votle katode izhajajo elektroni in atome ksenona ionizirajo. Pospeševalne mreže pospešijo ionizirane atome. Ko ti zapustijo pogon jih elektroni, ki izhajajo iz nevtralizacijske katode nevtralizirajo [2].

Proizvodnja plazme

Osnovno geometrijo generatorja plazme pri ionskem pogonu lahko ponazorimo z klasičnim enosmernim generatorjem plazme, ki deluje na principu izbijanja elektronov s hitrimi elektroni. Elektroni izhajajo iz votle katode in se pospešijo zaradi anode, ki obdaja ionizacijsko komoro. Nevtralni pogonski plin vbrizgamo v komoro in manjšo količino tudi skozi votlo katodo. Elektroni, ki izhajajo iz katode, ionizirajo pogonski plin. Da povečamo presek za ionizacijo, uporabimo neko vrsto magnetnega zadrževanja elektronov ob anodi, da ti prepotujejo večjo pot po ionizacijski komori. Pomembno je, da so elektroni postavljeni v primerno magnetno polje, da povečajo učinkovitost ionizacije in obenem poskrbijo za dovolj negativnega naboja na anodi, tako da pogoji za ionizacijo ostanejo stabilni.

Za delovanje ionizacijske komore je potrebnih več virov napetosti. Shema je na sliki 2 desno. Napetost na grelcu katodo greje in se ugasne, ko se proces ionizacije začne. Zadrževalna elektroda, ki obdaja votlo katodo, ščiti katodo pred bombardiranjem elektronov iz ionizacijske komore. Vir napetosti, ki je priključen na votlo katodo in anodo, ponavadi deluje v tokovno reguliranem režimu, da poskrbi za stabilen potisk pri različnih močeh obratovanja pogona.



Slika 2: Ilustracija ionizacijske komore. Elektroni izhajajo iz votle katode in ionizirajo plin v komori. Anoda odvečne elektrone zbere. Ione pospeševalne mreže pospešijo tako da tvorijo izpust (levo). Shematska slika napajanja za ionizacijsko komoro (desno) [1].

Nastanek in prenos potiska

Pri ionskem pogonu ione elektrostatično pospešimo skozi pospeševalne mreže. Za električno polje med pospeševalnima mrežama velja Poissonova enačba:

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0} = \frac{qn_i(x)}{\epsilon_0}, \quad (8)$$

kjer je ρ gostota naboja v prostoru, q je naboj iona in n_i je ionska številska gostota. Enačbo (8) je moč integrirati od zaslonke do pospeševalne mreže.

$$E(x) = \frac{q}{\epsilon_0} \int_0^x n_i(x') dx' + E_{zasl}, \quad (9)$$

kjer je E_{zasl} električno polje pri zaslonki. Če je zaslonka popoln prevodnik, potem je površinska gostota naboja na njej

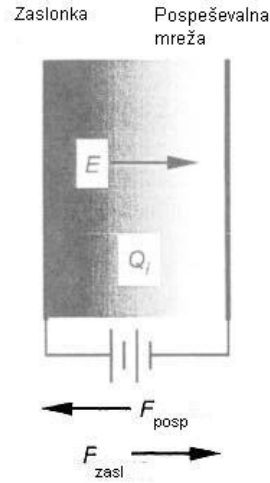
$$\sigma = \epsilon_0 E_{zasl}. \quad (10)$$

Površinski naboj nastane zaradi privlačnih sil naboja v pospeševalni komori. Sila na enoto površine na zaslonko je produkt gostote naboja in povprečne jakosti električnega polja

$$Z_{zasl} = \sigma \frac{(E_{zasl} + 0)}{2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{zasl}^2. \quad (11)$$

Podobno na pospeševalno mrežo deluje sila

$$F_{posp} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 E_{posp}^2 \quad (12)$$



Slika 3: Shematična slika pospeševalnega območja v ionskem pogonu. Potenciala na zaslonki in pospeševalni mreži ustvarjata električno polje E . Znotraj pospeševalnega naboja je gostota naboja Q_i [1].

in je tako sila na plovilo enaka (slika 3)

$$T = -\frac{1}{2}\epsilon_0 \left(E_{posp}^2 - E_{zasl}^2 \right). \quad (13)$$

Potisk je sila, ki jo pogon zagotavlja plovilu. Ker se masa plovila spreminja zaradi porabe goriva, je potisk enak časovnemu odvodu gibalne količine kot pravi enačba (1). Hitrost ionov v izpustu je veliko večja kot hitrost katerih koli nenabitih delcev, ki izhajajo iz plovila, zato lahko zapišemo

$$T = \frac{dm_p}{dt} v_{izp} \approx \dot{m}_i v_i, \quad (14)$$

kjer je m_i masa ionov in v_i hitrost ionov.

Iz ohranitve energije sledi za hitrost ionov [1]:

$$v_i = \sqrt{\frac{2qV_b}{M}}, \quad (15)$$

kjer je V_b efektivna napetost, preko katere smo ione pospešili, q naboj in M masa iona. Ker velja za maso ionov $\dot{m}_i = I_b M/q$, lahko za zgolj enkrat ionizirano pogonsko sredstvo ($q = e$) zapišemo

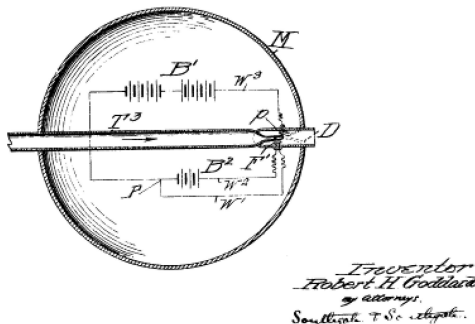
$$T = \sqrt{\frac{2M}{e}} I_b \sqrt{V_b}, \quad (16)$$

kjer je I_b tok ionov. Za ksenon je v brezdimenzijskih enotah $\sqrt{2M/e} = 1.65 \times 10^{-3}$ [1].

3 Zgodovina razvoja in uporabe

Ideje o hitrih nabitih delcih kot viru potiska so se pojavile že v začetku prejšnjega stoletja v delih Konstantina Ciolkovskega (1857-1935) [3]. V delu 'Dela o raketni tehnologiji' [4] je ta ruski znanstvenik leta 1911 zapisal: "Možno je, da bomo čez čas uporabljali elektriko za proizvodnjo velikih hitrosti za delce, izstreljene iz rakete." Večji tehnološki problemi so v kasnejših letih omejevali uresničevanje te vizije. Energijska zahtevnost ionskega pogona je bila prevelika za takratne zmožnosti energijskih virov, poleg tega pa ionski pogon lahko deluje le v vakuumu vesolja in le redki laboratoriji so si lahko privoščili vakumske prostore, kjer bi lahko izvajali poizkuse z tehnologijo ionskega pogona [3]. Med drugo svetovno vojno se je razvoj osredotočil na kemične rakete, ki so obetale možnost vojaške uporabe.

Pionir na področju razvoja ionskega pogona je bil Američan Robert Hutchings Goddard (1882-1945). Goddard je prijavil več patentov, med drugim tudi metodo za proizvodnjo električno nabitih delcev in patent "Metode in sredstva za proizvodnjo nabitih tokov plina", sestavni del kate-rega je tudi prvi dokument o elektrostatičnem pospeševalniku ionov (slika 4).



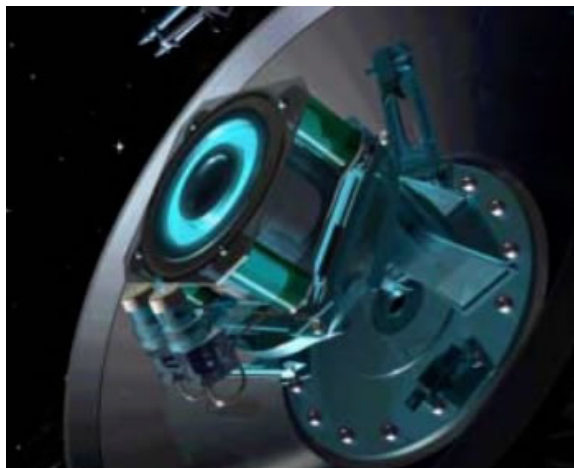
Slika 4: Robert H. Goddard (levo). Prvi svetovni dokumentiran elektrostatični pogon (desno). Shematični prikaz Goddardove tretje variante pogona iz leta 1917. Pogonsko sredstvo se vbrizga skozi cev (T^3), naboj je toku dodan iz katode (F^1), vir energije za katode je (B^2) celota je zaprta v kovinsko kroglo (M), ki je na visokem potencialu, za kar skrbi vir napetosti (B^1). Predznak naboja M je isti kot naboj ionov, zato ioni odletijo stran z veliko hitrostjo, sorazmerno z razliko potencialov [3].

V povojnem obdobju se je razvoj pospešil zaradi zrelosti relevantnih fizikalnih disciplin (atomske fizike, kvantne mehanike, znanosti o materialih, elektroinženirstvo). Eden glavnih raziskovalcev na tem področju je bil

Ernest Stuhlinger [3], ki je predlagal ionski pogon za potovanje vesoljske ladje do Marsa. Kot vir energije za proizvodnjo in pospeševanje ionov bi služila jedrska energija. V tem času se je tudi izoblikovalo spoznanje, da je za nekatere misije, kot je vzdrževanje orbite in misije globoko v vesolje, majhen potisk z velikimi izpustnimi hitrostmi ni le zadosten, ampak celo zaželen. Danes je veliko satelitev v zemeljski orbiti opremljenih z ionskimi pogoni Hallovega tipa. Za to je zaslužna predvsem nekdanja Sovjetska zveza, ki je tovrstne pogone razvila za vzdrževanje pozicije satelitov [5].

4 Uporaba

Električni pogon postaja glavna vrsta pogona za misije globoko v vesolje zaradi prihrankov pri masi in stroških poletov. Ti prihranki izhajajo iz visokega specifičnega impulza v primerjavi z kemičnimi raketami. Prvi primer uporabe električnega pogona, kot glavi pogon, je bila sonda Deep Space 1 agencije NASA. V Evropski vesoljski agenciji so kmalu sledili s sondo SMART 1, ki je uporabljala električen pogon (EP) Hallovega tipa, kakeršen je prikazan na sliki 5. Skupni proračun odprave SMART 1 je 75 milijonov



Slika 5: Pogon sonde SMART 1 med testom na zemlji. Ta električen pogon je Hallovega tipa. Modri sijaj so izhajajoči ioni, ki se rekombinirajo z elektroni, ki jih oddaja neutralizacijska katoda [6].

evrov [7]. Tako skromen proračun zahteva skrbno načrtovanje in uporabo naprednih tehnologij, kot je EP. ESA tudi načrtuje odpravo na Merkur [7], ki bi trajala 3.5 let in bi upotrabljala EP. V Rusiji [5] imajo dolge izkušnje z uporabo ionskih pogonov za vzdrževanje položaja komunikacijskih satelitov. EP namreč nima alternative pri pogonih, kjer je zahtevana življenska doba 15 let in več.

Misije, ki zahtevajo dolgo potovanje in kasnejše zaviranje in vtirjanje v

orbito planeta oziroma vrnitev vzorcev na Zemljo, zahtevajo visok specifični impulz pogona, kar omogoča EP. Nasina študija [8] za odpravo nabiranja vzorcev jedra kometa in vrnitev na Zemljo je pokazala, da bi bilo za optimizacijo odprave in ob najmanjšem dodatnem tveganju potrebno izboljšati karakteristike preizkušene pogona, ki je poganjal sondo DS1. Specifični impulz pogona bi bilo potrebno povečati z 3100 s na 3800 s, maksimalno moč motorja iz 2,3 na 3,2 kW. Obenem bi bilo potrebno maso goriva povečati z 80 na 180 kg, kar podaljša čas obratovanja pogona in zahteva razvoj pospeševalnih mrež, da so bolj odporne na ionsko erozijo. Največje koristi prinese povečanje specifičnega impulza.

Tudi dolgoročni načrti za človeške odprave na Mars predvidevajo uporabo jedrskega električnega pogona [9].

Vzdrževanje pozicij satelitov

Vzdrževanje pozicij satelitov je še posebej pomembno za komunikacijske satelite ter za satelite, ki opazujejo Zemljo in za Mednarodno vesoljsko postajo (ISS). Mednarodna vesoljska postaja je sicer prevelika, da bi jo lahko vzdrževali na želeni poziciji z ionskim pogonom, ta način pa je primeren za komunikacijske satelite [10]. Ko enkrat sateliti pridejo v geostacionarno orbito, perturbacije povzročijo, da satelit odplava iz zelene pozicije. Zaradi visokih stroškov, ki jih povzroči prevoz velikih količin goriv v vesolje, se za vzdrževanje pozicije čedalje bolj uporabljajo ionski in Hallovi pogoni.

Glavni popravek, ki je potreben, je v smeri sever-jug. Odstopanje od zelene pozicije v tej smeri nastane zato, ker geostacionarne orbite ne ležijo v ravnini ekliptike niti v ravnini v kateri Luna kroži okoli Zemlje. Gravitacijski privlaki Lune in Sonca bi inklinacijo orbite brez popravkov spremenili za slabo stopinjo na leto. Značilen čas treh pritiskov je 26,5 let in satelit bi se v tem času nabral 15° inklinacije. Ta bi zopet postala 0 po dodatnih 26,5 letih.

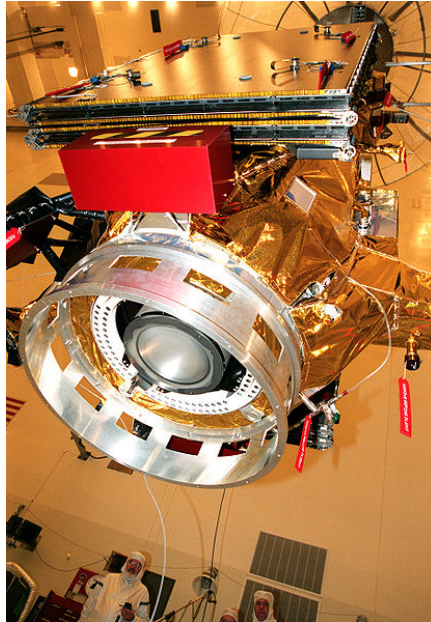
V smeri vzhod-zahod nastajajo odstopanja od zelene lokacije zato, ker zemeljski ekvator ni popolnoma okrogel. Zaradi tega sateliti drsijo proti eni od dveh longitudinalnih stabilnih točk.

Vzdrževanje pozicije v smeri sever-jug zahteva precej več energije kot v smeri vzhod-zahod, zato imajo nekateri starejši sateliti popravljanje pozicije le v energijsko manj zahtevni smeri. Kljub temu je to dovolj, da je satelit z določne točke na Zemlji viden ves čas.

Deep space 1

Deep Space 1 (DS1) je bil izstreljen iz Cape Caneverala 24. oktobra 1998 (slika 6). Med zelo uspešno misijo je testiral 12 novih tehnologij [11]. Sonda se je srečala z kometom Borrelly in na Zemljo poslala do sedaj najboljše slike

kometa. Misija se je zaključila 18. decembra 2001. Kot glavni vir potiska je uporabljala solarni ionski pogon.



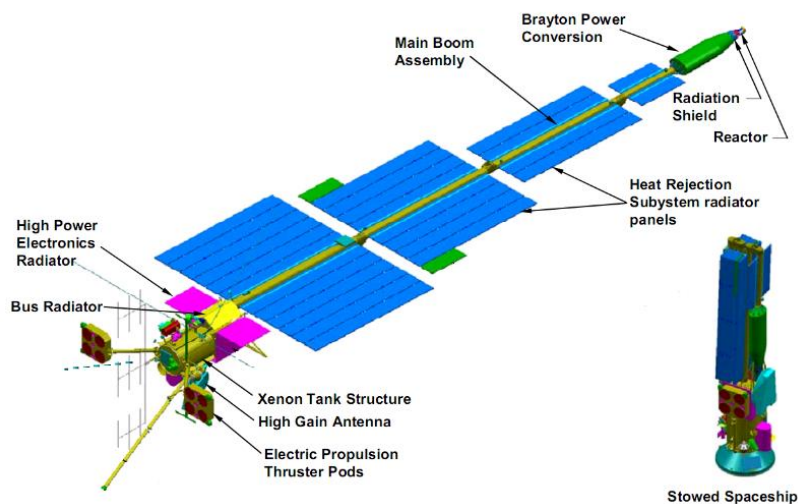
Slika 6: Sestavljena sonda Deep Space 1. Spodaj je dobro viden ionski pogon. V zgornjem delu slike so zložene solarne celice, ki zagotavljajo energijo za obratovanje pogona [12].

Pospeševalne mreže so bile pri tej sondi na napetosti 1300 V in so pospeševale ioniziran ksenon do hitrosti 35 km/s, kar je desetkrat krat hitreje kot pri izpuhu konvencionalne kemične rakete. Poraba goriva je bila 0,25 kg/dan. Sila, ki jo je proizvajal ionski pogon, je bila le 92 mN, a je z 81 kilogrami ksenona sondo DS1 pospešilo do hitrosti 4.5 km/s, kar je rekord v absolutni spremembi hitrosti za katero koli plovilo [8]. Pogon je deloval skupno 678 dni, specifičen impulz (I_{sp}) pogona je bil 3000 s, masa sonde je 373,7 kg in moč, pri kateri je obratovala 2500 W. Ionski pogon je po 4.5 minutah odpovedal zaradi kratkega stika na omrežju za proizvodnjo ionov. Po večkratnem ponovnem zagonu motorja je bila napaka odpravljena in pogon je od takrat dalje deloval brezhibno. Obstajala je tudi bojazen, da bi curek ionov motil komunikacijske naprave na krovu sonde, vendar motenj niso zaznali.

Prometheus

Projekt Prometheus (slika 7) je projekt agencije NASA za razvoj nuklearnega električnega pogona [13]. Za razliko od sonde DS1 bi bil glaven vir energije jedrski fisijski reaktor. Tovrstno tehnologijo so že razvijali v

petdesetih in šestdesetih letih prejšnjega stoletja v okviru projektov, kot sta NERVA in Project Orion, razvoj so opustili zaradi finančnih in političnih razlogov (leta 1963 prepoved jedrskih testiranj).



Slika 7: Plovilo z jedrskim električnim pogonom v konici. Velike panele služijo odvajanju toplote. Zadaj je shramba za ksenon in ionski pogon. Na sliki desno je zloženo plovilo, kot bi ga prenesli v orbito [14].

Danes imamo tehnologijo nuklearnega električnega pogona (NEP) za najverjetnejšega kandidata za prihodnje človeške odprave na Mars. S kemičnimi raketami bi potovanje na Mars trajalo 6 mesecev, z NEP pa bi isto pot lahko opravili v 2 mesecih. Krajši čas potovanja je za človeške odprave zelo pomemben, saj zmanjša količino potrebne hrane in zalog kisika. NEP bi olajšal in pocenil tudi odprave brez človeške posadke. Trenutna raketna tehnologija ne dovoljuje, da bi vesoljska sonda dosegla Pluton in se vtirila v njegovo orbito. Zelo težko je na primer tudi vtiriti sonde v orbite okoli jupitrovih lun, kar bi uporaba NEP olajšala.

5 Zaključek

Ionski pogoni so prepotovali dolgo pot razvoju v zadnjih štiridesetih letih. Danes se jih največ uporablja za vzdrževanje pozicij satelitov. Z misijo Deep Space 1 so se ionski pogoni uveljavili kot zanesljiv pogon za potovanje v globine vesolja. V prihodnosti bodo igrali glavno vlogo pri misijah globoko v vesolje. Najverjetneje bo nuklearni ionski pogon tisti, ki bo ponesel prve ljudi na Mars.

Literatura

- [1] D. M. Goebel in I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsions* (Wiley, New Jersey, 2008).
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Ion_thruster, dostopno dne 7. 5. 2009
- [3] E. Y. Choueiri, *J. Propul. Power* **20**, 193 (2004).
- [4] T. M. Mel'kumov, *Pioneers of Rocket Technology, Selected Works* (Akademija znanosti SSSR, Moskva, 1964).
- [5] A. S. Koroteev, O. A. Gorshkov, V. N. Akimov, A. A. Sinistin, V. M. Murashako, B. A. Arkhipov in V. N. Vinogradov, *Acta Astronautica* **54**, 25 (2003).
- [6] <http://www.technovelgy.com>, dostopno dne 17. 5. 2009
- [7] G. P. Whitcomb, *Acta Astronautica* **52**, 79 (2003).
- [8] J. Brophy, *Acta Astronautica* **52**, 309 (2003).
- [9] A. G. Accettura, C. Bruno, S. Casotto in F. Marzari, *Acta Astronautica* **54**, 471 (2004).
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_stationkeeping, dostopno dne 6. 5. 2009
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Deep_Space_1, dostopno dne 7. 5. 2009
- [12] <http://nmp.nasa.gov/ds1/>, dostopno dne 7. 5. 2009
- [13] <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/PrometheusProj.html>, dostopno dne 6. 5. 2009
- [14] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JIMO_spacecraft.png, dostopno dne 6. 5. 2009