

# Iontový pohon

Zajan Ondřej\*, Popelová Dominika  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1  
\*zaja153@gmail.com, dominika.popelova@gmail.com

## Abstrakt

Cílem naší práce bylo seznámení s teorií funkce iontového pohonu, oblastmi jeho využití a následovný pokus o praktickou realizaci pohonu. Úspěšně se nám podařilo sestrojít funkční prototyp iontového pohonu při využití urychlovacích mřížek a vzduchu jako hnacího plynu.

## 1 Úvod

### 1.1 Obecné informace

Iontový pohon je pohonnou jednotkou vesmírných lodí a sond, která pracuje na principu akce a reakce. Využívá paprsků iontů urychlených na desítky  $km/h$ . Nejjednodušším typem je elektrostatický iontový pohon, v němž jsou ionty inertního plynu urychlovány rozdílem elektrostatického potenciálu na elektrodách ve tvaru mřížek [1]. Iontový pohon má mnohem vyšší specifický impuls (poměr tahu k množství spotřebovaného paliva za sekundu) než u chemických raket, ale menší tahovou sílu. Tento typ pohonu obvykle uděluje zrychlení v řádu  $0,01 m/s^2$ , proto je v současnosti používán spíše v dlouhodobých misích. Na životnost iontového pohonu má vliv rychlost narázů urychlených částic na elektrody a množství nesené pracovní látky. Aby se elektrody nepotřebovaly příliš rychle, není vhodné využívat příliš velké rozdíly potenciálů na mřížkách. Obvykle se používá napětí kolem  $5 kV$ .

### 1.2 Historie

Za oficiálního autora elektrického raketového pohonu je považován K. E. Ciolkovskij [1], který o myšlence využití elektrického pole pro tah rakety spekoval již v roce 1911. Myšlenka urychlení nabitých částic pomocí elektrického pole však patří H. Goddardovi [1], který si v roce 1917 iontový pohon nechal patentovat. První iontový motor vyvinul na základě duoplazmatronu Harold R. Kaufman v NASA. Roku 1964 byl s tímto motorem proveden suborbitální let na palubě lodi Space Electric Rocket Test 1. Motor pracoval 31 minut a poté loď spadla zpět na Zem [1].

### 1.3 Princip elektrostatického iontového pohonu

Do komory motoru je vstřikován hnací plyn, který je ionizován ostřelováním vysoce energetickými elektrony [2]. Ty lze vyrobit buď emitováním katodou a urychlením elektrickým polem při letu k anodě, nebo urychlením oscilujícím elektrickým polem, indukovaným střídavým magnetickým polem cívky a mikrovlnným ohřevem. Kladné ionty hnacího plynu se pohybují směrem k záporně nabitým mřížkám. Urychlení iontů je dále zvyšováno rozdílným elektrickým potenciálem první a druhé mřížky [2]. Poté jsou urychlené ionty směřovány směrem k výstupní trysce. Po průletu mřížkou jsou však urychlené kationty zbrzdovány záporným napětím. Tento jev je potlačován vstřikováním elektronů těsně za prostor mřížky do neutralizátoru, kde dochází ke spojení s urychlenými kationty za vzniku elektricky neutrálních atomů, které opouštějí výstupní trysku motoru [2].

## 2 Fyzikální principy

### 2.1 Ionizace

Proces tvorby kladných nebo záporných iontů, které se v iontovém pohonu využívají, se nazývá ionizace. Při ní neutrální částice ztratí nebo přijme elektrony. Existuje mnoho způsobů, jak ionizaci docílit. Ve většině typů ionizace musí být částici dodáno dostatečné množství energie, aby došlo k uvolnění valenčního elektronu. Tato energie musí být větší než ionizační potenciál, který se mění v závislosti na protonovém čísle prvku. Pokud energie předaná atomu bude menší než ionizační potenciál, může dojít k excitaci atomu, tedy k přechodu elektronu na vyšší energetickou hladinu.

#### 2.1.1 Ionizace srážkou s elektronem

Tohoto typu ionizace využívá většina iontových zdrojů, protože je snadno technicky realizovatelný. Ve vakuu mohou být elektrony snadno urychleny na energii postačující k ionizaci. Při srážce elektronu s atomem mu elektron předá část energie a může dojít ke vzniku elektronu a kladného iontu.

### 2.1.2 Ionizace za vzniku záporných iontů

Tento typ ionizace může nastat v případě srážky elektronu s elektronegativnější částicí. Elektron se na této částici zachytí a vznikne tak záporný iont. Příkladem elektronegativní částice může být molekula kyslíku [3]. Při zachycení elektronu k částici dochází k uvolnění energie, která se nazývá také elektronová afinita. Ta bývá obvykle mnohem menší než ionizační energie neutrálního atomu. Například ionizační energie pro neutrální molekulu  $O_2$  je 12,2 eV, zatímco elektronová afinita pro záchyt elektronu na neutrální molekulu  $O_2$  je pouze 0,44 eV [3].

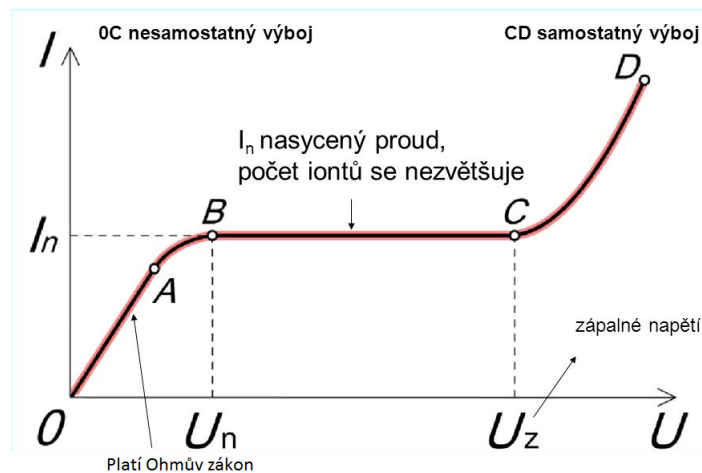
### 2.1.3 Další typy ionizace

Další typ ionizace je způsoben srážkou s iontem nebo atomem. Princip je velmi podobný jako při ionizaci srážkou s elektrony. Ionizovat atomy lze i pomocí intenzivního svazku fotonů, tento princip se nazývá foto-ionizace. Jiným typem může být ionizace elektrickým polem, k níž dochází vlivem kvantově mechanického jevu zvaného tunelování.

## 2.2 Výboje v plynech

Plyn je při normální teplotě tvořen neutrálními atomy nebo molekulami a je velmi dobrým izolátorem. Pro umožnění průchodu proudu ve vnějším elektrickém poli je třeba ionizačního činidla. Může jím být ultrafialové, rentgenové, gama nebo kosmické záření, vysoká teplota, silné elektrické pole nebo částice s vysokou energií. Vzduch je běžně částečně ionizován účinkem kosmického záření a radioaktivity zemské kůry [4]. V 1  $cm^3$  vzniká každou sekundu asi 10 kladných iontů a elektronů. Pokud se ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, vzniká elektrický proud jako uspořádaný pohyb kladných iontů k záporně nabitě katodě a záporných iontů a elektronů ke kladně nabitě anodě [5].

Elektrický proud v plynu, který je udržován jen po dobu působení ionizátoru, se nazývá nesamostatný výboj. Jakmile přestane ionizátor působit, převládne rekombinace nad ionizací a elektrický proud zaniká. Elektrické vlastnosti ionizovaného plynu je možné měřit v ionizační komoře, s jejíž pomocí se dá měřit voltampérová charakteristika výboje (Obr. 1). Je-li napětí malé, většina iontů zanikne kvůli rekombinaci dříve, než dorazí na elektrody.



Obr. 1: Voltampérová charakteristika výboje [6]

V této fázi platí Ohmův zákon. S rostoucím napětím se pohyb elektronů zrychluje, až při určitém napětí jich převážná část nestačí rekombinovat a doletí k elektrodám. Komořou prochází nasycený proud, který se při dalším růstu napětí dlouho nemění. K dalšímu zvýšení proudu dochází až po překročení zápalného napětí. Příčinou zvýšení proudu je ionizace nárazem, kdy elektrony a ionty vzniklé ionizací narážejí na neutrální molekuly, kterým předávají kinetickou energii získanou při urychlení elektrickým polem [4]. Jsou-li urychleny dostatečně, mohou dosáhnout ionizačního potenciálu. Počet iontů tak lavinovitě narůstá a výboj pak pokračuje i bez přítomnosti vnějšího ionizátoru. Takový výboj se nazývá samostatný.

### 2.2.1 Paschenův zákon

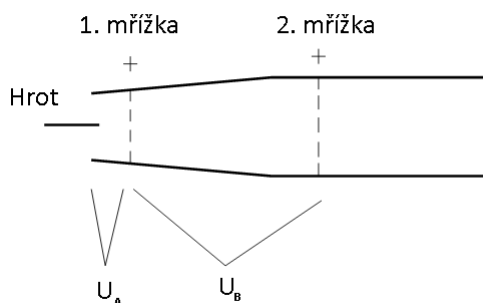
Paschenův zákon je rovnice, která udává průrazné napětí, tedy napětí potřebné ke vzniku elektrického výboje mezi dvěma elektrodami v plynu, jako funkci tlaku a vzdálenosti elektrod [8].

$$U = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]} \quad (1)$$

$U$  je napětí,  $p$  je tlak,  $d$  je vzdálenost mezi elektrodami,  $\gamma$  je koeficient sekundární elektronové emise, tedy počet sekundárních elektronů produkovaných iontem ( $10^{-2}$ ),  $A$  a  $B$  jsou koeficienty závislé na daném plynu (pro vzduch platí  $A = 112.50 (kPa \cdot cm)^{-1}$ ,  $B = 2737.50 V/(kPa \cdot cm)$ ). Graf této rovnice se nazývá Paschenova křivka. Derivací podle součinu  $p \cdot d$  a porovnáním s nulou dostaneme minimální průrazné napětí pro daný plyn.

### 3 Experiment

Rozhodli jsme se postavit elektrostatický iontový pohon, kde jsme využili vzduchu jako hnacího plynu. Při realizaci bylo nejprve nutné zvolit vhodnou hlavní konstrukci pohonu. Využili jsme malé PET lahve, které jsme uřízli dno, aby jí mohl proudit ionizovaný vzduch (Obr. 2). Mezi hrot a první mřížku jsme vložili napětí  $U_A = 20 kV$ , aby docházelo k požadované ionizaci vzduchu. Za první mřížku jsme vložili druhou a mezi ně jsme vložili napětí  $U_B = 100 kV$ , aby se ionizovaný vzduch co nejvíce urychlil. Pomocí Paschenova zákona (1) jsme spočítali, že vzdálenost mezi první a druhou mřížkou by měla být přibližně 15 cm, aby nedocházelo k lavinovému průrazu, který by zničil zdroj. Do víčka lahve jsme namontovali hrot a kousek od něho první mřížku, přičemž jsme tuto



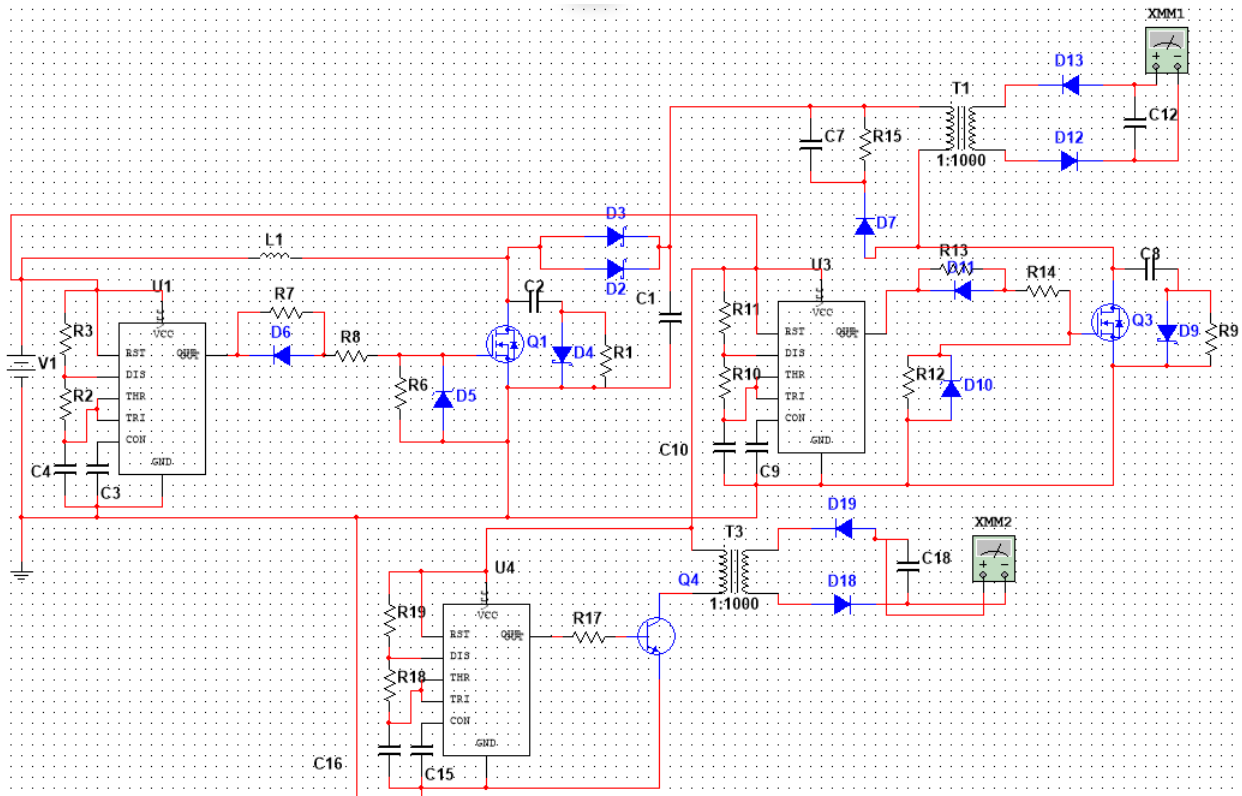
Obr. 2: Průřez hlavní konstrukce pohonu

vzdálenost ručně nastavovali. Aby v tomto místě ionizace probíhala co nejvíce, celkem jsme do víčka dali sedm hrotů. Hroty jsme vytvořili co nejvíce špičaté, aby hustota elektrického náboje na špičce hrotu byla co největší. K napájení celého pohonu nám sloužil 200 W stejnosměrný adaptér od počítače. Ve zdroji pohonu dominují tři časovací obvody NE555 ( $U_1$ ,  $U_3$ ,  $U_4$ ), které slouží ke spínání měniče a k nastavování frekvencí transistorů připojených k transformátorům. Pro generování napětí  $U_A$  jsme využili vysokofrekvenčního transformátoru z CRT obrazovky (Na obr. 3 T3), kde je proud z napájecího adaptéru  $V_1$  spínán přes bipolární transistor  $Q_4$ , který je ovládán pomocí časovacího obvodu  $U_4$ . Proud je poté usměrněn pomocí diod  $D_{18}$  a  $D_{19}$ , vyfiltrován pomocí kondenzátoru  $C_{18}$  a poslán na hrot pohonu.

Při generování napětí  $U_B$  jsme použili zapojení spínaného propustného měniče ovládaného unipolárním transistorem  $Q_1$  a časovacím obvodem  $U_1$ . Měnič jsme zapojili přímo na adaptér  $V_1$  a dále jsme zesílené napětí transformovali přes transformátor  $T_1$  (zapalovací cívka z automobilu), spínaný přes unipolární transistor  $Q_3$ , který je ovládán přes časovač  $U_3$ . Vysoké napětí z transformátoru  $T_1$  jsme poté usměrnili pomocí diod  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  a pak jsme ho poslali přímo na urychlovací mřížku. Kondenzátor  $C_{12}$  jsme v obvodu nepoužili, neboť nám již pro jeho konstrukci nezbýval čas.

Jelikož unipolární transistory jsou náchylnější na zničení, museli jsme k nim přidat ochranné obvody. Při konstrukci ochranných obvodů pro unipolární transistory jsme si vzali příklad z teorie ochranných obvodů [11].

Pro měření tahu našeho pohonu jsme použili elektrickou kuchyňskou váhu. Pohon jsme umístili svisle na váhu a podepřeli tak, aby urychlené ionty mohly volně unikat. Zkoumali jsme, jak se tíha mění v závislosti na poloze hrotů a přiložených napětí  $U_A$ ,  $U_B$ . Toto měření bylo bohužel velmi nepřesné, proto jsme ve většině měření naměřili nulový tah. Několikrát se nám ale podařilo dosáhnout tahu 20–30 mN a při nepatrné manipulaci s hroty dokonce 50 mN.



Obr. 3: Zdroj pohonu

## Reference

- [1] Kol. autorů, Iontový motor, [https://cs.wikipedia.org/wiki/Iontov%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Iontov%C3%BD_motor)
- [2] Kol. autorů, Elektrostatický iontový pohon, [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatick%C3%BD\\_iontov%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatick%C3%BD_iontov%C3%BD_motor)
- [3] J. Khun, V. Scholtz, Nízkoteplotní plazma V – srážky v plazmatu, [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012\\_47\\_pla.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_47_pla.php)
- [4] J. Reichl, M. Všeticka, Nesamostatný a samostatný výboj v plynu, <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/282-nesamostatny-a-samostatny-vyboj-v-plynu>
- [5] D. Čápka, Elektrický proud v kapalinách a plynech, <https://www.itnetwork.cz/maturitni-otazka-fyzika-elektricky-proud-kapalinach-plynech>
- [6] A. Růžička, Vedení elektrického proudu v plynech, <http://slideplayer.cz/slide/2421895/>
- [7] Anonym, Ionizace vzduchu - úvodní článek, <http://ionizace.blogspot.cz/2013/03/ionizace-vzduchu-uvodni-clanek.html>
- [8] Kol. autorů, Paschen's law, [https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27s_law)
- [9] Anonym, Elektrický oblouk a jeho zhášení, [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/esp/el\\_oblouk.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/el_oblouk.pdf)
- [10] J. Kronjaeger, Measuring high voltages by spark length, <http://www.kronjaeger.com/hv/hv/msr/spk/>
- [11] Anonym, Ochrana tranzistorů a MOSFETů, <http://danyk.cz/mosfety.html>