

# Elektroaerodynamický pohon – poháněný Maxwellovými a Coulombovými zákony

Poznatky prezentované v tomto eseji vycházejí z desítek experimentů provedených autorem v letech 2016 až 2018, které zkoumaly elektroaerodynamický pohon s širokou škálou zdrojů energie (střídavý a stejnosměrný proud), geometrií elektrod a typů emitů iontů. Tyto výzkumy vyvrcholily konstrukcí 80cm rotoru zobrazeného níže, který dosáhl rotační rychlosti 18 ot/min s napětím méně než 6 kV a pouze asi 100 mW elektrického vstupního výkonu.

Tato experimentální kampaň odhalila, že výkon závisí mnohem více na distribuci a geometrii elektrostatických polí než na pohybu vzduchu nebo samotném iontovém proudu. Tyto pozorování položila základ pro následující teoretické přeformulování elektroaerodynamického pohonu.

## Elektroaerodynamický pohon – tichý motor

Elektroaerodynamický (EAD) pohon – často nazývaný elektrohydrodynamický (EHD) tah nebo „iontový vítr“ – je jednou z těch vzácných technologií, které vypadají jako sci-fi: zařízení, které se tiše pohybuje vzduchem bez pohyblivých částí, bez spalování a bez viditelného výfuku. Veřejnost o něm poprvé slyšela na počátku 2000. let prostřednictvím zahradních projektů „lifterů“ a znovu v roce 2018, kdy MIT demonstroval „iontový letadlový model“ klouzající přes tělocvičnu.

Přesto má podkladová fyzika delší a složitější historii. Téměř o století dříve Thomas Townsend Brown a Paul Biefeld pozorovali, že vysokonapěťové kondenzátory mohou generovat malý, ale trvalý tah. Brown tento efekt přisuzoval „antigravitaci“. Moderní věda, vyzbrojená Maxwellovými a Coulombovými zákony, uznává, že pravda je jemnější – a v mnoha ohledech hlubší.

EAD pohon není o foukání vzduchu ionty. Je to o **tvarování elektrických polí**, takže výsledné **elektrostatické napětí** produkuje čistou mechanickou sílu. V tomto smyslu jsou EAD zařízení poháněna Maxwellovými a Coulombovými zákony: geometrií a dynamikou samotného elektrického pole.

## Mýtus o iontovém větru

Zeptáte-li se většiny inženýrů na EHD pohon, uslyšíte jednoduchý příběh: ostrý emitör produkuje ionty prostřednictvím korónového výboje; tyto ionty se zrychlují směrem k sběrné elektrodě, při tom narážejí na neutrální molekuly vzduchu a přenášejí jim hybnost. Neutrální plyn se pohybuje – takzvaný „iontový vítr“ – a podle Newtonova třetího zákona zažívá zařízení stejnou a opačnou sílu.

Tento obrázek není špatný, ale je neúplný.

V praxi mají ionty zanedbatelnou hmotnost. Jejich kolize s neutrálními částicemi jsou časté, ano, ale hybnost přenášená na kolizi je malá. Ještě důležitější je, že **žádná významná mechanická síla nepůsobí přímo na špičku jehly nebo sběrač**. „Vítr“ je vedlejší produkt, ne zdroj pohonu.

Skutečný motor spočívá v **elektrickém poli**, které ty ionty zrychluje – v přerozdělení elektrostatické energie, jak se tvoří a proudí prostorové náboje.

## Tlak pole a Maxwellovo napětí

Maxwellovy rovnice popisují, jak elektrická pole ukládají a přenášejí hybnost prostřednictvím **Maxwellova tenzoru napětí**:

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

Integrací tohoto tenzoru přes povrch jakéhokoli tělesa získáme čistý **elektrostatický tlak** působící na něj. Tento tlak – ne pohyb vzduchu – je to, co tlačí EHD thruster vpřed.

Když dojde k korónovému výboji, kolem emitoru se vytvoří oblak iontů. Tyto ionty dělají dvě klíčové věci:

1. **Částečně stíní elektrické pole emitoru.** Místní intenzita pole klesá poblíž špičky, ale zůstává silná v okolní oblasti.
2. **Zdeformují celkovou geometrii pole.** Na jedné straně emitoru končí siločáry na blízkých nabitých površích nebo uzemněných strukturách. Na druhé se protáhnou ven, částečně neutralizované prostorovým nábojem.

Výsledek je **nerovnováha v elektrostatickém tlaku** na systému emitor–sběrač – čistá síla. Hybnost proudí z pole k elektrodám, ne prostřednictvím molekulárních kolizí.

## Coulombův zákon v akci

Na nejjednodušší úrovni jsou zapojené síly popsány Coulombovým zákonem:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Každý nabitý povrchový prvek EHD struktury přitahuje nebo odpuzuje každou jinou nabitou oblast ve svém okolí. Celkový tah je vektorovým součtem těchto nespočetných Coulombových interakcí, neustále přetvářených pohyblivými ionty, které modulují pole.

V ustáleném stavu koróny sedí tenká vrstva kladných iontů mezi vysokonapětovým emitorem a relativně záporným sběračem (nebo okolím). Tyto ionty slouží jako **zprostředkovatelé**: částečně stíní přitažlivost mezi emitorem a sběračem a pohybem neustále obnovují

asymetrii pole. Stálý elektrický vstup udržuje tuto nerovnováhu, přeměňují elektrostatickou potenciální energii v mechanickou sílu.

## Lekce z NASA a limity paradigmatu iontového větru

Na počátku 2000. let NASA a její dodavatelé znovu prozkoumali zařízení typu Biefeld-Brown v rámci studií Gravitec a Talley AIAA. Pomocí vysokonapěťových asymetrických kondenzátorů v atmosférickém i vakuovém prostředí měly experimenty otestovat, zda efekt přetrvává bez přítomnosti vzduchu.

Výsledky byly jednoznačné – a neúmyslně odhalující.

V atmosférickém režimu rotory dosáhly sotva měřitelné rotace (1–2 ot/min) a tahu v rozsahu 10–100  $\mu\text{N}$  – o řády nižší, než by se očekávalo, pokud by zařízení skutečně využívalo gravitační efekt. Pohyb byl plně přisuzován konvenčnímu korónovému výboji a slabému iontovému větru.

Ve vakuu, při tlacích až do  $10^{-6}$  Torr, pohyb úplně ustal. Jakékoli přechodové signály byly vysledovány k odplynění nebo reziduálnímu povrchovému náboji. Bez molekul vzduchu k udržení ionizace se elektrostatické pole stalo symetrickým a síla zmizela.

Vyšetřovatelé dospěli k závěru, že tah se zhruba lineárně škáluje s hustotou vzduchu – zjištění často citované k „vyvrácení“ EHD pohonu jako nemožnosti ve vakuu. Ale to, co skutečně demonstrovalo, bylo něco hlubšího: **bez média k přenosu prostorového náboje ztrácí elektrické pole asymetrii, která produkuje gradienty elektrostatického tlaku.**

Jinými slovy, tyto rané testy náhodou potvrdily **interpretaci Maxwellova napětí** elektroaerodynamického pohonu. Nebylo to gravitace, ani pouhý iontový tah – byla to přítomnost **nerovnováhy pole zprostředkované nábojem**, která měla význam.

Zařízení Gravitec, postavená pro jednoduchost a symetrii, postrádaly jakýkoli významný *rezervoár náboje* nebo *tvarující dielektrikum*. Jejich otevřené geometrie rozptylovaly siločáry do okolí a plýtvaly většinou elektrostatické energie.

Naproti tomu zde popsany EPS–hliníkový rotor soustředil náboj podél dobře definované vodivé kůže, což umožnilo oblasti prostorového náboje *tvarovat* lokální pole. Výsledek: použitelný tah při méně než 6 kV a zhruba 100 mW – výkon téměř o dva řády lepší v energetické účinnosti.

Tyto zjištění odrážejí konzistentní téma: **účinnost elektroaerodynamiky nevychází z napětí nebo proudění vzduchu, ale z kontroly topologie náboje a geometrie pole.**

## Efekt rezervoáru náboje

Lehká fólie přes tuhý, izolační jádro se chová nejen jako vodič – tvoří **rezervoár náboje velké plochy**, který zesiluje asymetrii elektrického pole. V současném designu slouží expanzní polystyren (EPS) čistě jako **lehká struktura podpory**, jeho celý povrch je obalen hliníkovou fólií, která je **elektricky spojitá s vysokonapěťovým zdrojem**. EPS přidává za-

nedbatelnou elektrickou funkci; jeho hodnota spočívá v umožnění velkého vodivého povrchu při minimální hmotnosti.

Tato rozsáhlá vodivá kůže ukládá náboj přímo ze zdroje energie, což umožňuje korónovému výboji fungovat proti **přednabitému elektrostatickému poli** místo aby ho budoval od nuly v každém cyklu. Vysoká plocha fólie dramaticky zvyšuje efektivní kapacitu – na úrovni 10–100 pF cm<sup>-2</sup>, v závislosti na textuře a křivosti povrchu – a přeměňuje skromné aplikované napětí v mnohem silnější lokální gradient elektrického pole.

Když koróna vznikne, fólie slouží jako stabilní referenční potenciál. Vyslané ionty mírně modulují lokální pole, ale neovládají ho; místo toho uložený povrchový náboj udržuje stálou asymetrii, která produkuje kontinuální tah při velmi nízkém výkonu.

Z pohledu Maxwellova napětí je síla úměrná integrálu intenzity pole a jeho gradientu:

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

a velká, dobře nabitá fólie maximalizuje oba členy bez nutnosti vyššího napětí nebo vyššího proudu. To vysvětluje, proč mohl nízkovýkonový, nízkonapěťový rotor dosáhnout významné rotace: nahradil **uloženou elektrostatickou energii** za těžké ztráty iontového proudu konvenčních geometrií „iontového větru“ – praktickou formu *elektrostatické účinnosti*.

## Geometrie účinnosti

Účinnost EHD thrusteru není určena rychlostí proudění vzduchu, ale **tom, jak efektivně je tvarováno elektrické pole**. Klíčové parametry zahrnují:

- **Asymetrie pole:** Čistá směrová složka gradientu elektrostatického tlaku.
- **Distribuce hustoty náboje:** Jak oblak iontů modifikuje toto pole částečným stíněním.
- **Kapacitní spojitost:** Celkový náboj uložený na protilehlých površích na volt aplikovaný.
- **Kanály ztrát:** Ztráty koróny, rekombinace a únik dielektrikem.

Designy, které omezují a tvarují pole – například umístěním širokého, opačně nabitého povrchu blízko emitru – mohou dosáhnout zlepšení tahu na watt o řády. Elektrické pole dělá práci; ionty pouze umožňují, aby pole zůstalo asymetrické a dynamické.

## Přehodnocení Biefeld–Brown

Brownovy rané pozorování tahu z asymetrických kondenzátorů předchází našemu modernímu porozumění fyzice plazmatu. Bez rámce Maxwellova napětí nebo dynamiky prostorového náboje bylo přirozené myslet si, že efekt může zahrnovat gravitaci. Skutečnost, že EHD thrustery produkují sílu „proti“ vektoru pole (a někdy vertikálně nahoru) jen prohloubila tajemství.

Viděno dnešní optikou byl Brownova „antigravitace“ jednoduše elektrostatický tlak učiněný viditelným. Podobnost v matematické formě – jak gravitační, tak elektrostatická potenciální energie klesá jako  $1/r^2$  – učinila zmatení historicky pochopitelným, ale fyzika je zcela elektromagnetická.

## Perspektivy a moderní kontext

Nedávné analýzy a diskuse mezi kolegy posilují toto přeformulování elektroaerodynamického pohonu jako **fenoménu gradientu pole** spíše než iontového motoru větru. V klasických konfiguracích lifterů korónové proudy řádu miliamperů při desítkách kilovoltů dávají hustoty tahu v rozsahu mikro- až mili-newtonů na watt – odraz toho, jak málo elektrické energie pole končí jako směrované mechanické napětí. Naproti tomu EPS rotor obalený fólií přeměňuje stejný fyzikální zákon v *nábojem řízený* proces: široký vodivý povrch udržuje silný  $\mathbf{E}$ -gradient s minimálním proudem, vyměňuje ztráty driftu za energii uloženého pole.

Toto rozlišení odráží širší posun v současném výzkumu. **Aktuátory s dielektrickou bariérovou výbojem** v aerodynamické kontrole také odvozují svou povrchovou sílu z Maxwellova napětí spíše než z objemového proudění vzduchu, dosahují účinností 10–100 N kW<sup>-1</sup>, když je geometrie elektrod vyladěna pro asymetrii. **Geometrie s plovoucí elektrodou a uzavřením** studované v ONERA a v rámci EU programů EHD ukazují dvojnásobné až pětinasobné zvýšení tahu tvarováním iontové vrstvy – přesně logika designu rotoru s rezervoárem náboje. A v **řidkých atmosférách**, jako je horní stratosféra nebo martiánská atmosféra, kde iontový tah slábne, ale elektrostatické napětí zůstává, mohou povrchy bohaté na náboj udržet pohon dlouho poté, co konvenční designy selžou.

Fyzika se pěkně shoduje s Poyntingovým rámcem hybnosti klasické elektromagnetismu: tah odpovídá gradientu hustoty energie pole,

$$\mathbf{F} \approx \epsilon_0 \int (\mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}), dV$$

což znamená, že systém čerpá hybnost přímo z elektromagnetického pole. Ionty jsou katalyzátory udržující nerovnováhu, ne reakční hmota samotná. To vysvětluje, proč ve vakuových experimentech, kde se pole stává symetrickým, tah mizí – člen  $\nabla \mathbf{E}$  se zhroutí. Naproti tomu v rotoru s fóliovým rezervoárem kapacitní kůže udržuje  $\mathbf{E}$  strmé a směrové, produkující zhruba **0.1–1 mN** ekvivalentního tahu z pouhých **100 mW** vstupního výkonu – 10–100krát vyšší účinnost než iontové tahové zařízení.

| Parametr                | Konvenční design iontového větru | Rotor s fóliovým rezervoárem náboje | Implikace                                 |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Napětí</b>           | 20–50 kV                         | < 6 kV                              | Nižší riziko průrazu, snadnější škálování |
| <b>Výkon</b>            | 1–10 W                           | ≈ 0.1 W                             | 10–100× vyšší tah / W                     |
| <b>Mechanismus tahu</b> | Kolize iont–neutrální            | Gradient pole (Maxwellovo napětí)   | Velmi nezávislý na hustotě vzduchu        |

| Parametr                       | Konvenční design iontového větru | Rotor s fóliovým rezervoárem náboje | Implikace                       |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Klíčový enabler                | Mezera emitordsběrač             | Kapacitní fóliový rezervoár         | Uložený náboj > přechodný proud |
| Účinnost (N kW <sup>-1</sup> ) | 0.01–0.1                         | 1–10 (odvozeno)                     | Možné pro mikro-UAV             |

Takové srovnání zdůrazňuje konceptuální otočku: **od proudem řízeného k nábojem řízenému pohonu**, od pohybu hmoty k tvarování polí. Další hranice je to, co by se dalo nazvat *elektrostatickou architekturou* – použití výpočetní optimalizace a pokročilých materiálů (emitory z uhlíkových nanotrubek, vzorované fólie, metamateriálové dielektrika) k maximalizaci  $\int \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}$ . Hybridní pulzní DC módy by mohly dále využít přechodné ukládání náboje při snižování chemických vedlejších produktů.

## Závěr – poháněný Maxwellovými a Coulombovými zákony

Elektroaerodynamický pohon není exotickou zvědavostí nebo pseudovědeckou anomálií. Je to přímé projevení Maxwellových a Coulombových zákonů – makroskopický stroj, který přeměňuje elektrostatickou potenciální energii v pohyb prostřednictvím kontrolované asymetrie pole.

Kde raní vynálezci viděli „antigravitaci“ a moderní projekty „iontový vítr“, je skutečný příběh jednodušší a hlubší: **elektrická pole mají napětí**. Tvarujte to napětí a můžete se protáhnout vzduchem bez pohyblivých částí, bez paliva a bez hluku.

To je tichý genius elektroaerodynamického pohonu – skutečně **poháněný Maxwellovými a Coulombovými zákony**.

## Reference

1. Talley, C. et al. *Hodnocení Biefeld–Brownova efektu: Testy asymetrických kondenzátorových thrusterů ve vakuu a atmosféře*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Elektrokinetický přístroj*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Let letadla s pevným iontovým pohonem*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Kontrola proudění vzduchu nestabilními plazmovými aktuátory*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD řízení proudění a plazmové aktuátory*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Elektrohydrodynamický pohon a řízení proudění*. Interní zprávy 2018–2023.