

Napęd Elektroaerodynamiczny - Napędzany przez Maxwella i Coulomba

Wglądy przedstawione w tym eseju pochodzą z dziesiątek eksperymentów przeprowadzonych przez autora w latach 2016–2018, w których badano napęd elektroaerodynamiczny z wykorzystaniem szerokiego zakresu źródeł zasilania (prąd zmienny i stały), geometrii elektrod oraz typów emiterów jonów. Te badania osiągnęły kulminację w budowie wirnika o średnicy 80 cm przedstawionego poniżej, który osiągnął prędkość obrotową 18 obr/min przy napięciu poniżej 6 kV i zaledwie około 100 mW mocy elektrycznej wejściowej.

Ta kampania eksperymentalna ujawniła, że wydajność zależy znacznie bardziej od rozkładu i geometrii pól elektrostatycznych niż od ruchu powietrza czy samego prądu jonowego. Obserwacje te położyły podwaliny pod teoretyczne przeformułowanie napędu elektroaerodynamicznego, które następuje poniżej.

Napęd Elektroaerodynamiczny - Cichy Silnik

Napęd elektroaerodynamiczny (EAD) - często nazywany ciągiem elektrohydrodynamicznym (EHD) lub „wiatrem jonowym” - to jedna z tych rzadkich technologii, które wyglądają jak science fiction: urządzenie, które porusza się cicho przez powietrze bez ruchomych części, bez spalania i bez widocznego spalin. Publiczność usłyszała o nim po raz pierwszy na początku lat 2000. poprzez domowe projekty „lifterów”, a ponownie w 2018 r., gdy MIT zademonstrowało „samolot jonowy” ślizgający się po sali gimnastycznej.

Jednak podstawowa fizyka ma dłuższą i bardziej złożoną historię. Prawie wiek wcześniej Thomas Townsend Brown i Paul Biefeld zaobserwowali, że kondensatory wysokiego napięcia mogą generować mały, ale trwały ciąg. Brown przypisał ten efekt „antygrawitacji”. Współczesna nauka, uzbrojona w prawa Maxwella i Coulomba, uznaje, że prawda jest subtelniejsza - i w wielu aspektach głębsza.

Napęd EAD nie polega na dmuchaniu powietrza jonami. Polega na **rzeźbieniu pól elektrycznych** tak, aby wynikające z nich **napięcia elektrostatyczne** wytwarzały netto siłę mechaniczną. W tym sensie urządzenia EAD są napędzane przez Maxwella i Coulomba: przez geometrię i dynamikę samego pola elektrycznego.

Nieporozumienie Dotyczące Wiatru Jonowego

Zapytaj większość inżynierów o napęd EHD, a usłyszysz prostą historię: ostry emiter wytwarza jony poprzez wyładowanie koronalne; te jony przyspieszają w kierunku elektrody kolektora, zderzając się po drodze z neutralnymi molekułami powietrza i przekazując im

pęd. Neutralny gaz porusza się - tak zwany „wiatr jonowy” - a zgodnie z trzecim prawem Newtona urządzenie doświadcza równej i przeciwnej siły ciągu.

Ten obraz nie jest błędny, ale niekompletny.

W praktyce jony niosą zaniedbywalną masę. Ich zderzenia z neutralnymi są częste, tak, ale pęd przekazywany na zderzenie jest minimalny. Co ważniejsze, **nie działa znacząca siła mechaniczna bezpośrednio na końcówkę igły lub kolektor**. „Wiatr” jest produktem ubocznym, a nie źródłem napędu.

Prawdziwy silnik tkwi w **polu elektrycznym**, które przyspiesza te jony - w redystrybucji energii elektrostatycznej, gdy powstaje i płynie ładunek przestrzenny.

Ciśnienie Pola i Tensor Napięć Maxwella

Równania Maxwella opisują, jak pola elektryczne magazynują i przekazują pęd poprzez **tensor napięć Maxwella**:

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

Integracja tego tensora na powierzchni dowolnego ciała daje netto **ciśnienie elektrostatyczne** działające na nie. To ciśnienie - a nie ruch powietrza - pcha napęd EHD do przodu.

Gdy występuje wyładowanie koronalne, wokół emitera powstaje chmura jonów. Te jony wykonują dwie kluczowe czynności:

1. **Częściowo ekranują pole elektryczne emitera.** Lokalna siła pola spada w pobliżu końcówki, ale pozostaje silna w otaczającej objętości.
2. **Distortują ogólną geometrię pola.** Po jednej stronie emitera linie pola kończą się na pobliskich naładowanych powierzchniach lub uziemionych strukturach. Po drugiej stronie rozciągają się na zewnątrz, częściowo zneutralizowane przez ładunek przestrzenny.

Wynikiem jest **brak równowagi w ciśnieniu elektrostatycznym** w systemie emiter-kolektor - netto siła. Pęd płynie z pola do elektrod, a nie poprzez zderzenia molekularne.

Prawo Coulomba w Działaniu

Na najprostszym poziomie siły zaangażowane są opisane prawem Coulomba:

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

Każdy naładowany element powierzchni struktury EHD przyciąga lub odpycha każdą inną naładowaną region w swoim otoczeniu. Całkowity ciąg jest sumą wektorową tych

niezliczonych interakcji kulombowskich, ciągle przebudowywanych przez poruszające się jony modulujące pole.

W stanie stacjonarnym korony cienka otoczka dodatnich jonów znajduje się między emitерem wysokiego napięcia a stosunkowo ujemnym kolektorem (lub otaczającym środowiskiem). Te jony służą jako **pośrednicy**: częściowo ekranują przyciąganie między emitерem a kolektorem, a poruszając się, ciągle resetują asymetrię pola. Stałe wejście elektryczne utrzymuje ten brak równowagi, przekształcając energię potencjalną elektrostatyczną w siłę mechaniczną.

Lekcje z NASA i Granice Paradigmy Wiatru Jonowego

Na początku lat 2000. NASA i jej kontrahenci wróciły do urządzeń typu Biefeld-Brown w ramach badań Gravitec i Talley AIAA. Używając asymetrycznych kondensatorów wysokiego napięcia w środowiskach atmosferycznych i próżniowych, eksperymenty miały sprawdzić, czy efekt utrzymuje się bez powietrza.

Wyniki były jednoznaczne - i niezamierzenie pouczające.

W trybie atmosferycznym wirniki osiągały ledwie mierzalne obroty (1–2 obr/min) i ciąg w zakresie 10–100 μN - rzędy wielkości poniżej tego, co oczekiwano, gdyby urządzenia naprawdę wykorzystywały efekt grawitacyjny. Ruch był całkowicie przypisywany konwencjonalnemu wyładowaniu koronalnemu i słabemu wiatrowi jonowemu.

W próżni, przy ciśnieniach do 10^{-6} Torr, ruch ustawał całkowicie. Wszelkie przejściowe sygnały śledzono do odgazowywania lub resztkowego ładunku powierzchniowego. Bez molekuł powietrza do podtrzymywania jonizacji pole elektrostatyczne stawało się symetryczne, a siła znikła.

Badacze stwierdzili, że ciąg skaluje się mniej więcej liniowo z gęstością powietrza - znalezisko często cytowane do „obalenia” napędu EHD jako niemożliwości w próżni. Ale to, co naprawdę pokazało, było głębsze: **bez medium do przenoszenia ładunku przestrzennego pole elektryczne traci asymetrię, która wytwarza gradienty ciśnienia elektrostatycznego.**

Innymi słowy, te wczesne testy przypadkowo potwierdziły **interpretację tensora napięć Maxwella** napędu elektroaerodynamicznego. To nie grawitacja działała, ani zwykły ciąg jonowy - liczyła się obecność **braku równowagi pola mediowanego ładunkiem.**

Urządzenia Gravitec, zbudowane dla prostoty i symetrii, brakowały znaczącego *zbiornika ładunku* lub *dieletryka kształtującego pole*. Ich otwarte geometrie rozpraszały linie pola w otoczeniu, marnując większość energii elektrostatycznej.

W przeciwieństwie do tego, opisany tutaj wirnik EPS-aluminium koncentrował ładunek wzdłuż dobrze zdefiniowanej przewodzącej powłoki, pozwalając regionowi ładunku przestrzennego *rzeźbić* lokalne pole. Wynik: użyteczny ciąg poniżej 6 kV i około 100 mW - wydajność prawie dwa rzędy wielkości lepsza pod względem efektywności energetycznej.

Te wyniki odbijają spójny temat: **efektywność elektroaerodynamiczna wynika nie z napięcia czy przepływu powietrza, lecz z kontroli topologii ładunku i geometrii pola.**

Efekt Zbiornika Ładunku

Lekka folia na sztywnym, izolującym rdzeniu zachowuje się jak więcej niż tylko przewodnik - tworzy **dużo-powierzchniowy zbiornik ładunku**, który wzmacnia asymetrię pola elektrycznego. W obecnym projekcie spieniony polistyren (EPS) służy wyłącznie jako **lekki wspornik strukturalny**, z całą powierzchnią owiniętą folią aluminiową, która jest **elektrycznie ciągła z zasilaniem wysokiego napięcia**. EPS dodaje zaniedbywalną funkcję elektryczną; jego wartość tkwi w umożliwieniu dużej przewodzącej powierzchni przy minimalnej masie.

Ta rozległa przewodząca powłoka magazynuje ładunek bezpośrednio ze źródła zasilania, pozwalając wyładowaniu koronalnemu działać przeciwko **wstępnie naładowanemu polu elektrostatycznemu** zamiast budować je od zera w każdym cyklu. Wysoka powierzchnia folii dramatycznie zwiększa efektywną pojemność - rzędu 10–100 pF cm⁻², w zależności od tekstury powierzchni i krzywizny - i przekształca umiarkowane napięcie aplikowane w znacznie silniejszy lokalny gradient pola elektrycznego.

Gdy korona zapala się, folia działa jako stabilna referencja potencjału. Emitowane jony lekko modulują lokalne pole, ale go nie dominują; zamiast tego, zmagazynowany ładunek powierzchniowy utrzymuje stałą asymetrię, wytwarzającą ciągły ciąg przy bardzo niskiej mocy.

Z perspektywy tensora napięć Maxwella siła jest proporcjonalna do całki siły pola i jego gradientu:

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

i duża, dobrze naładowana folia maksymalizuje oba składniki bez potrzeby wyższego napięcia czy prądu. To wyjaśnia, dlaczego wirnik niskiej mocy i niskiego napięcia mógł osiągnąć znaczną rotację: zastąpił **zmagana energię elektrostatyczną** ciężkimi stratami prądu jonowego konwencjonalnych geometrii „wiatru jonowego” - praktyczną formę *efektywności elektrostatycznej*.

Geometria Efektywności

Efektywność napędu EHD nie jest określana przez prędkość przepływu powietrza, lecz przez **jak efektywnie kształtowane jest pole elektryczne**. Kluczowe parametry obejmują:

- **Asymetria Pola:** Netto komponent kierunkowy gradientu ciśnienia elektrostatycznego.
- **Rozkład Gęstości Ładunku:** Jak chmura jonów modyfikuje to pole poprzez częściowe ekranowanie.

- **Sprężenie Pojemnościowe:** Całkowity zmagazynowany ładunek na przeciwległych powierzchniach na wolt aplikowany.
- **Kanały Strat:** Straty koronalne, rekombinacja i wycieki dielektryczne.

Projektowanie, które ogranicza i kształtuje pole - np. umieszczając szeroką, przeciwnie naładowaną powierzchnię blisko emitera - może osiągnąć poprawy rzędów wielkości w ciągu na wat. Pole elektryczne wykonuje pracę; jony jedynie umożliwiają polu pozostanie asymetrycznym i dynamicznym.

Ponowne Rozważanie Biefeld-Brown

Wczesne obserwacje Browna dotyczące ciągu z asymetrycznych kondensatorów poprzedzają nasze współczesne zrozumienie fizyki plazmy. Bez ram tensora napięć Maxwella czy dynamiki ładunku przestrzennego naturalne było myślenie, że efekt może obejmować grawitację. Fakt, że napędy EHD wytwarzają siłę „przeciwko” wektorowi pola (i czasem pionowo w górę), tylko pogłębił tajemnicę.

Widziane przez współczesną soczewkę „antygrawitacja” Browna była po prostu widocznym ciśnieniem elektrostatycznym. Podobieństwo w formie matematycznej - zarówno energie potencjalne grawitacyjne jak i elektrostatyczne spadają jak $1/r^2$ - czyniło zamieszanie historycznie zrozumiałym, ale fizyka jest całkowicie elektromagnetyczna.

Perspektywy i Współczesny Kontekst

Ostatnie analizy i dyskusje między kolegami wzmacniają to przeformułowanie napędu elektroaerodynamicznego jako **fenomenu gradientu pola** zamiast silnika wiatru jonowego. W klasycznych konfiguracjach liftera prądy koronalne rzędu miliamperów przy dziesiątkach kilowoltów dają gęstości ciągu w zakresie mikro- do mili-newtonów na wat - odzwierciedlenie tego, jak mało energii pola elektrycznego kończy się jako skierowane napięcie mechaniczne. W przeciwieństwie do tego, wirnik EPS owinięty folią przekształca to samo prawo fizyczne w proces *napędzany ładunkiem*: szeroka przewodząca powierzchnia utrzymuje silny gradient E przy minimalnym prądzie, wymieniając straty dryfu na zmaganą energię pola.

To rozróżnienie odbija szerszą zmianę we współczesnych badaniach. **Akutatory wyładowań barierowych dielektrycznych** w kontroli aerodynamicznej czerpią również swoją siłę powierzchniową z tensora napięć Maxwella zamiast z objętościowego przepływu powietrza, osiągając efektywności 10–100 N kW⁻¹, gdy geometria elektrody jest dostrojona do asymetrii. **Geometrie elektrod pływających i ograniczające** badane w ONERA i w programach EHD UE pokazują dwu- do pięciokrotne wzrosty ciągu poprzez kształtowanie otoczki jonowej - dokładnie logika projektowa wirnika zbiornika ładunku. A w **środowiskach powietrza rzadkiego**, takich jak górna stratosfera czy atmosfera marsjańska, gdzie ciąg jonowy słabnie, ale napięcie elektrostatyczne pozostaje, powierzchnie bogate w ładunek mogą utrzymywać napęd długo po awarii konwencjonalnych projektów.

Fizyka ładnie pasuje do ramowego pędu Poyntinga klasycznego elektromagnetyzmu: ciąg odpowiada gradientowi gęstości energii pola,

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

co oznacza, że system czerpie pęd bezpośrednio z pola elektromagnetycznego. Jony są katalizatorami utrzymującymi brak równowagi, nie masą reakcji samą w sobie. To wyjaśnia, dlaczego w eksperymentach próżniowych, gdzie pole staje się symetryczne, ciąg znika - składnik ∇E zapada się. Odwrotnie, w wirniku zbiornika folii, skóra pojemnościowa utrzymuje E stromą i kierunkową, wytwarzając około **0.1–1 mN** ciągu równoważnego momentu obrotowego z zaledwie **100 mW** mocy wejściowej - 10–100 razy efektywniejszego niż urządzenia ciągu jonowego.

Parametr	Konwencjonalny Projekt Wiatru Jonowego	Wirnik Zbiornika Ładunku Foliowego	Implikacja
Napięcie	20–50 kV	< 6 kV	Niższe ryzyko przebicia, łatwiejsza skalowalność
Moc	1–10 W	≈ 0.1 W	10–100× wyższy ciąg / W
Mechanizm Ciągu	Zderzenia jon-neutralne	Gradient pola (napięcie Maxwella)	W dużej mierze niezależny od gęstości powietrza
Kluczowy Włłącznik	Szczelina emiter-kolektor	Pojemnościowy zbiornik foliowy	Zmagazynowany ładunek > prąd przejściowy
Efektywność (N kW ⁻¹)	0.01–0.1	1–10 (wnioskowana)	Możliwa dla mikro-UAV

Takie porównania podkreślają zwrot koncepcyjny: **od napędu napędzanego prądem do napędzanego ładunkiem**, od poruszania materii do kształtowania pól. Następną granica to to, co można nazwać *architekturą elektrostatyczną* - wykorzystanie optymalizacji obliczeniowej i zaawansowanych materiałów (emiterów nanorurek węglowych, foli wzorzystych, dielektryków metamateriałowych) do maksymalizacji $\int E \cdot \nabla E$. Hybrydowe tryby impulsowe DC mogą dalej wykorzystywać magazynowanie ładunku przejściowego, jednocześnie redukując produkty uboczne chemiczne.

Wniosek - Napędzany przez Maxwella i Coulomba

Napęd elektroaerodynamiczny nie jest egzotyczną ciekawostką czy anomalią pseudonaukową. To bezpośrednie manifestacja praw Maxwella i Coulomba - makroskopowa maszyna, która przekształca energię potencjalną elektrostatyczną w ruch poprzez kontrolowaną asymetrię pola.

Gdzie wczesni wynalazcy widzieli „antygrawitację”, a nowoczesne projekty „wiatr jonowy”, prawdziwa historia jest prostsza i głębsza: **poła elektryczne posiadają napięcie**. Ukształtuj to napięcie, a możesz pociągnąć siebie przez powietrze bez ruchomych części, bez paliwa i bez dźwięku.

To cicha genialność napędu elektroaerodynamicznego - naprawdę, **napędzany przez Maxwella i Coulomba**.

Bibliografia

1. Talley, C. et al. *Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere*. AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. *Electrokinetic Apparatus*. U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. *Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion*. *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. *Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. *EHD Flow Control and Plasma Actuators*. NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: *Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control*. Internal Reports 2018–2023.