

Magnetická puška

L. Horký*, J. Kákona

Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*horkyladislav@seznam.cz

Abstrakt

Cílem příspěvku je čtenáři poskytnout stručný přehled typů urychlovačů na bázi magnetického pole, včetně principu jejich funkce. V první části se zabýváme především jejich vojenským využitím, účinností, diskutujeme praktická konstrukční omezení a s tím spojenou otázku velikostních měřítek. V druhé části následuje využití civilní. Hlavní závěry diskuse (týkající se měřítka) jsme odvozovali z myšlenkových experimentů a pokusů s dvěma typy urychlovačů sestavených z dostupných součástí, jejichž účinnost se pohybovala kolem 1%.

1 Úvod

Postupně probereme čtyři základní typy urychlovačů. U každého se zaměříme na jeho výhody, nevýhody, případně účinnost. V souvislosti s provedenými našimi i cizími experimenty se přitom pokusíme formulovat základní problémy, se kterými se konkrétní konstrukce potýká. Nakonec zmíníme civilní využití.

2 Třídění

Pracovně jsme urychlovače roztřídili do čtyř základních typů:

- mechanické (Gaussovo dělo – magnety a kuličky)
- elektrické kontaktní (Railgun – projektil uzavírá elektrický obvod)
- na bázi feromagnetismu (projektil je vtahován do mag. pole)
- indukční, na bázi vířivých proudů (projektil je vytlačován z mag. pole)

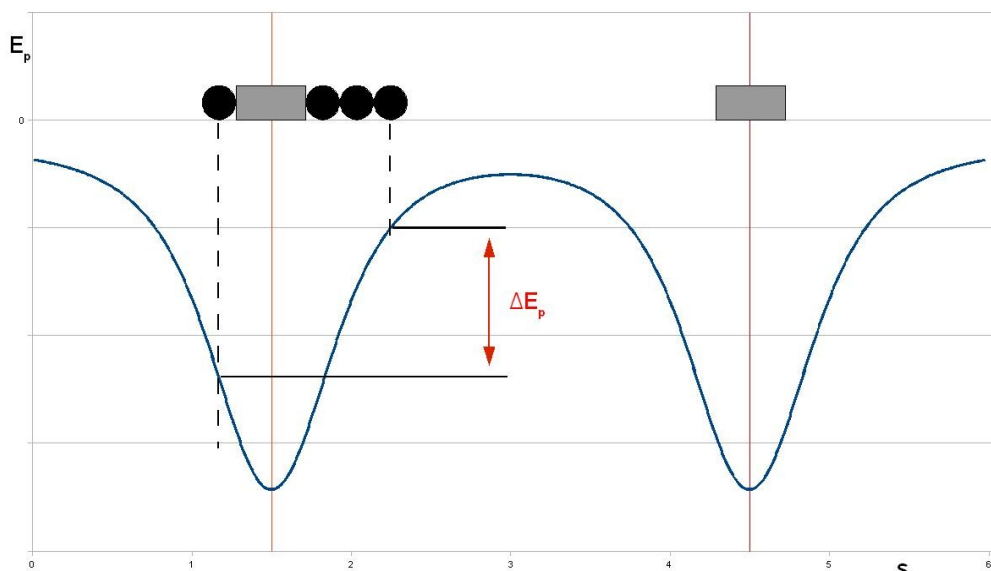
Pracovní je roztřídění proto, že zejména u posledního typu existuje velmi mnoho modifikací. Při demonstraci jsme byli nuceni vynechat druhý typ z důvodu vysokých nároků na energii (zdroj) a spínací prvky.

3 Gaussovo dělo

Princip je vidět na obrázku 1. Magnet tvoří pro feromagnetickou kuličku potenciálovou jámu, do níž kulička (napravo) padá - je přitahována k magnetu - a získává kinetickou energii. Tu pak prostřednictvím pružného rázu předá kuličce, která je v potenciálové jámě o něco výše. Prakticky se Gaussovo dělo jako urychlovač použít nedá, protože rozumně funguje jen v malých měřítkách. Hlavním problémem je zde tření, mechanické rázy (nejsou dokonale pružné, destrukce magnetů) a obtížná výroba velkých permanentních magnetů.

4 Railgun

Jedná se o lineární (ve smyslu konstantní síly) urychlovač, princip je opět vidět na obrázku 2. Projektil uzavírá elektrický obvod a stejně jako na drát protékáný proudem v magnetickém



Obr. 1, černé feromagnetické kuličky, šedý magnet (nalevo značí další sekci), ΔE_p značí získanou energii, graf je pouze orientační

poli na něj působí Lorentzova síla. Z obrázku je rovněž zřejmé, že napájení musí být na jednom konci kolejnic (rails, odtud název Railgun), protože záleží na směru proudu. Jediný výrazný konstrukční problém představuje nutné tření projektilu o hlaveň (kolejničky), což má za následek velké opotřebení obou částí (nízká životnost, deformace projektilu při výstřelu).

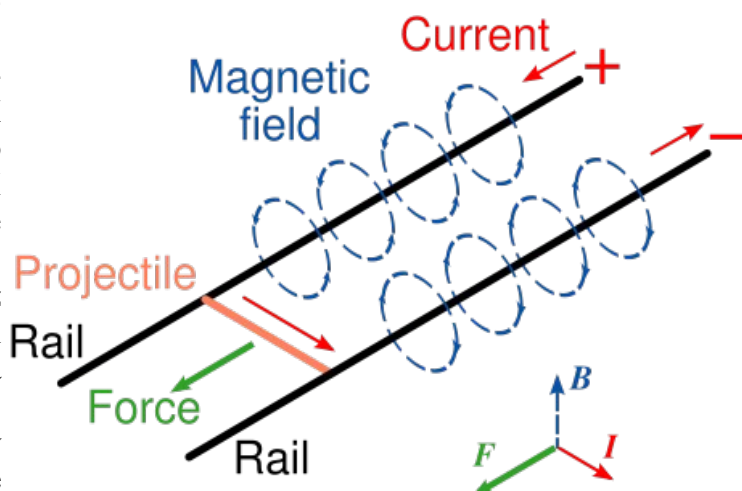
V praxi je tento typ urychlovače nejvýraznější kandidát pro výrobu kinetických zbraní (tzn. hlavní účinná energie projektilu je jeho kinetická, většinou ani nenese nálož, ústňová energie pro představu: desítky MJ). Možností je i konvenční vstřelení projektilu do urychlovače. Výhodnost tohoto řešení z hlediska úspory energie je zřejmá, americké námořnictvo však tuto zbraň testuje [1] hlavně kvůli menší a bezpečnější munici (bez výmetné nálože).

Účinnost Railgunu jsme se pokusili řádově odhadnout. Zahrnuli jsme geometrii urychlovače, proud i napětí jsme považovali za konstantní, stejně tak odpor jsem brali střední. Účinnost je pak přibližně dána následující formulí (nezapočítány všechny jevy!):

$$\eta = \left[\mu \ln \left(\frac{\text{průměr projektilu}}{\text{poloměr kolejnice}} + 1 \right) \right]^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{\text{délka hlavně}}{\text{hmotnost projektilu}}} \frac{U}{R^2}$$

Kde μ je permeabilita vzduchu a první člen je integrál mag. pole mezi kolejnicemi. Vidíme, že právě umocněná permeabilita účinnost snižuje až o devět řádů. Proti tomu můžeme bojovat hlavně snižováním odporu a zvyšováním napětí (kV-MV). Jako vylepšení konceptu by mohly posloužit přídavné cívky generující mag. pole ve stejném smyslu jako kolejničky (zvětšení síly působící na projektil). Reálný přínos jsme ale nepočítali.

Praktická konstrukce je možná až od větších měřítek, při malých rozměrech se projektil připeká a projevuje se hlavně odpor obvodu. Dále je problémem zdroj schopný dodávat dostatečný proud (více než kA) – kondenzátory s nízkým vnitřním odporem.



Obr. 2, schéma Railgunu

5 Feromagnetické

Jedná se o pulzní urychlovač. Feromagnetický projektil je umístěn za cívkou, kterou při výstřelu projde silný proudový impuls, čímž vznikne pulz magnetického pole, jenž vtáhne projektil do cívky. Důležité je, aby mag. pole zaniklo ve chvíli průletu projektilu středem cívky a nevtáhlo ho zpět. Výhodou je možnost umístění více sekcí (cívek) za sebe a relativně snadná realizovatelnost v malém měřítku. To se nám podařilo ověřit jak přímo experimentálně (prakticky pouze odhadované hodnoty součástek, bez větších výpočtů), tak nepřímo díky široké internetové komunitě [2], která v tomto oboru dosáhla použitelných výsledků na hobby úrovni.

Exaktnější přístup a větší měřítko u tohoto typu urychlovače narážejí na několik problémů. V předchozím odstavci jsme se zmínili o potřebě ostrého impulsu (ideálně obdélník). Ten můžeme získat buď zvyšováním napětí, nebo snižováním indukčnosti (v úvahu připadá pouze první možnost, kvůli dostatečné síle magnetického pole). Pulz také bude muset být s největší pravděpodobností tlumený (posunutí špičky do doby, kdy bude projektil blíže k cívce – větší síla, rychlý zánik pole), což snižuje maximální teoretickou účinnost. Co se týče projektilu, jeho vysoká permeabilita se projeví pouze při nižších intenzitách magnetického pole, což je přesně proti našim požadavkům. Dále se od vyšších intenzit začnou projevovat vířivé proudy, které také ubírají účinnost.

Celý systém je vysoce citlivý na i ovládací a spínací část. Při požadovaných úst'ových rychlostech 3 a více km/s se budeme při rozumných délkách urychlovače (jednotky až desítky metrů) i sekce (z hlediska účinnosti co nejkratší – siločáry mag. pole se snaží zaujmout co nejkratší délku s ohledem na prostředí, čím více se při pohybu projektilu zkrátí, tím větší na něj bude působit síla) se pohybujeme v řádech μs , což u silnoproudých spínacích prvků a senzorů může být problém. Matematické modelování je zřejmě také značně obtížné, hlavně kvůli permeabilitě projektilu, jejíž závislost na intenzitě mag. pole je silně nelineární, závisí i na teplotě a samotný projektil také ovlivňuje vlastnosti cívky. Problém se tedy přesouvá spíše spíše do oboru materiálů, než do oblastí jednoduššího modelování.

6 Indukční

Jedná se opět o pulzní urychlovač. Projektilem je v principu uzavřený závit cívky umístěný před pohonnou cívkou (p.c.). Při výstřelu projde p.c. proudový pulz, který naindukuje opačný proud do cívky projektilu [3] a vyvolá tak odpudivou sílu mezi projektilem a p.c. Opět možnost více sekcí.

V prvním přiblížení potřebujeme velký a rychlý náběh mag. pole. Tak se projektilu naindukuje největší proud a bude působit největší síla. Naproti tomu zanikat by magnetické pole mělo kolem projektilu pomalu, aby se neindukoval opačný proud – tento jev je v praxi v malých měřítkách potlačen samovolným zánikem proudu projektilem kvůli jeho odporu. Projektil také musí být zřejmě co nejlehčí (nám se osvědčil silný duralový kroužek vážící cca 30 g). Výhodou jsou nižší nároky na spínací část, než v předchozím případě, protože zde pozdní sepnutí příliš neuškodí.

Zajímavá je existence řady odrůd tohoto konceptu. Mezi nejzajímavější patří verze s jádrem (projektil je na něm navlečen), jež se experimentálně osvědčila (účinnost cca 1%), ale pro větší měřítko je nepoužitelná (pokud kalkuluje se silnými poli, ztrácí jádro smysl, navíc představuje konstrukční zátěž při více sekcích, působí na něj podobné síly jako na projektil). Dále klasická hlavňová verze (řada cívek kolem trasy projektilu). Ta je v malém měřítku nerealizovatelná. Do projektilu se nedaří kvůli slabé vazbě naindukovat velký proud, ten navíc rychle zaniká. Modelově to ukázal experiment, při kterém se duralový kroužek vznesl jen asi o 1 cm (oproti cca 40 cm při použití jádra), zato ve velkém měřítku přináší několik teoretických výhod. Masivnost projektilu by výrazně zmenšila jeho elektrický odpor a umožnila by

mu uchovat si naindukovaný proud i do další sekce, čímž by se zřejmě zvýšila její účinnost – ta bude u první sekce zřejmě dost malá. Poslední verzí je „otevřená“ koncepce, v níž se vodivý objekt pohybuje vlivem vířivých proudů nad souvislou plochou budících cívek (vířivé proudy ho nadzvedávají, vlny mag. pole postrkují). Ta se využívá především při transportu (viz [4]). Účinnost této verze může být zřejmě rozumná opět jen u větších měřítek.

Obecně je myšlenková optimalizace, nebo optimalizace „na papíře“ pro tento typ urychlovače velmi obtížná kvůli vysokému počtu vazeb v systému (indukce v projektilu závisí i na rychlosti jakou uniká z pole, což upravuje požadavky). Pokoušeli jsme se naprogramovat jednoduchou simulaci na počítači [3], ale výsledky jsme museli zavrhnout pro nedostatečnou znalost teorie.

7 Civilní využití

Urychlovače (převážně indukčního typu) jsou dnes využívány v dopravě (Maglev) [4]. Další využití jsou buď minoritní, nebo zatím zůstávají jen na papíře. Mezi minoritní patří například magneto-hydrodynamický pohon pracující na principu Railgunu (Yamato 1 [5]), kde projektil tvoří slaná voda. Zde jsou nutností zmíněné přídavné cívky, jelikož „projektil“ zabírá celou délku „hlavně“ a tak není možné zabezpečit konkrétní směr průtoku proudu kolejnicemi. Z toho, co zůstalo na papíře máme například střelbu satelitů do vesmíru pomocí (opět) indukčního urychlovače [6].

8 Závěr

Při studiu souvisejících materiálů ([7], web) se nám podařilo získat celkem komplexní přehled o problému magnetických urychlovačů. Myšlenkové experimenty s převodem teorie do praxe ukázaly naše mezery v teorii, zároveň však velmi zhruba načrtly směr, kterým by se měl pokusný konstruktér ubírat. Experimenty provedené v praxi považujeme spíše za modelové – konstrukce slušnějšího urychlovače, potažmo pušky, by zabrala i s příslušnými znalostmi mnohem více času. Myšlenkové i praktické pokusy také potvrdily celkovou vysokou technologickou náročnost výroby. Ta je příčinou odsouvání teoretických (koncepčních) problémů do pozadí, čímž trpí zejména účinnost konstruovaných systémů (i v internetové komunitě bychom čekali větší zájem o tuto část problému). Místo toho se řeší (neméně důležité) problémy inženýrské, hlavně z oblasti elektroniky. Že je výzkum relativně v začátcích vidíme právě z řady nedořešených „hardwarových“ problémů, nicméně doufáme, že značný zájem o něj (komunita, armáda) ho požene rychle vpřed.

Reference

- [1] http://www.experiencefestival.com/a/Railgun_-_Railguns_as_weapons/id/1356859
- [2] <http://www.coilgun.eclipse.co.uk>, <http://www.coilgun.info>
- [3] B. Sedlák, I. Štoll: *Elektřina a magnetismus*, Indukčně vázané obvody str. 291, Indukce solenoidu str. 217
- [4] <http://www.transrapid.de/>
- [5] http://www.mesj.or.jp/mesj_e/english/pub/english/pdf/mv23n011995p46.pdf
- [6] <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/5039-ocQRp2/webviewable/5039.pdf>
- [7] Braam M. Daniels,
http://www.coilgun.info/plim/braam_daniels_pulsed_linear_induction_motor.pdf