

## NAUČNI ČLANCI

### ELEKTROMAGNETNI TOP – ISTRAŽIVAČKI PROJEKT ILI USKORO U UPOTREBI?

Bakić P. *Selena*, J. P. Jugoimport-SDPR, Beograd  
Paligorić L. *Anastas*

UDC: 623.421::621.318.3  
623.421:537.862

#### Sažetak:

*Više od jednog veka istraživači u mnogim zemljama sveta bave se istraživanjem i razvojem elektromagnetnog (EM) topa koji bi bio u mogućnosti da lansira projektil vrlo velikim brzinama. U publikovanoj stručnoj literaturi veći broj radova odnosi se na teorijska razmatranja pojedinih fenomena električnog pogona projektila i na hardverska rešenja električnih uređaja i komponenata, a manje su dostupni javnosti radovi koji se odnose na borbenu upotrebu, koncepciju rešenja i mogućnosti primene takvog oružja u borbenim sistemima vojske. U radu se ukazuje na osnovne probleme projektovanja takvog sistema naoružanja i saopštavaju se informacije na osnovu kojih se može proceniti da li će, kada i na kakvoj platformi EM top biti uveden u operativnu upotrebu.*

*Ključne reči: artiljerijsko oruđe, konvencionalni top, elektromagnetni top, EM top, šinski EM top, solenoidni EM top, elektrotermički top, tenkovski EM top, brodski EM top, generator, kondenzator, kompulzator, APDSFS projektil, KE projektil, razorni projektil.*

#### Uvod

U članku je prikazano aktuelno stanje razvoja elektromagnetnih topova (EM topovi) i izneto mišljenje o temi koja duže od jednog veka intrigira pronalazače i projektante, a uzbuđuje zaljubljenike u naoružanje: da li će i kada EM top napustiti laboratorije i biti primenjen u praksi – kao naoružanje nekog od borbenih sistema kopnene vojske (vatrene podrške, protivno-

klopne borbe, protivvazdušne odbrane) i mornarice (dejstvo po ciljevima na vrlo velikim daljinama) ili će, možda, predstavljati jednu od komponenti sve-mirskog oružja u nekom od „štitova“ potencijalnih sukobljenih strana (što nije predmet ovog rada)? U radu se razmatra samo aspekt stvaranja uslova za lansiranje projektila zahtevanom brzinom, bez upuštanja u domene dinamike sistema pri lansiranju i efikasnosti dejstva projektila na cilju.

Neposredan povod za razmatranje statusa razvoja i mogućnosti upotrebe EM topa bio je članak „Karakteristike trzanja elektromagnetnog topa“, objavljen u VTG broj 4, 2009 [1]. Već sam naslov rada je stručno intrigantan, jer najavljuje razmatranje pojave koja nije bitno svojstvo EM topa. Naime, sam princip dejstva rada EM topa ne uvodi u sistem značajniji impuls trzanja, te se može zaključiti da je dužina trzanja EM topa zanemarljivo mala. Stoga, sasvim je logično pitanje svrsishodnosti razmatranja pojave koja ne utiče na mogućnost praktične primene EM topa! Pri tome se u [1], bez ikakve analize i poređenja funkcije i dejstva na cilju, konstatuje da EM top ima značajne prednosti u odnosu na konvencionalni (klasičan) top.<sup>1</sup> Sem toga, u radu se upoređuju trzanja EM topa i konvencionalnog topa (uvođenjem u razmatranje impulsa trzanja i analizom primene i efikasnosti gasne kočnice) na netipičan i teorijski nedovoljno korektan način.<sup>2</sup>

Navedena stručna intrigantnost rada [1] bila je povod za detaljnije analize većeg broja radova koji su objavljeni o EM topovima. Deo teksta u uvodnom delu rada [1] preuzet je iz članka „Savremeni uređaji za ispaljivanje projektila velikim i vrlo velikim brzinama“, koji je objavljen u časopisu *Naučno-tehnički pregled* pre više od 20 godina [2]. Internet pretraživanje pokazuje da je ostatak rada skoro doslovan prevod članka „*Comparison of the recoil of conventional and electromagnetic cannon*“, objavljenog u časopisu *Shock and Vibration* 2001. godine [3]. Iz članka [3] preuzete su i slike (6 od

<sup>1</sup> Primera radi, nisu tačni navodi koji se odnose na: konstrukciju i izradu sklopa cevi i punjača (jer će ti sklopovi kod EM topa biti složeniji i skuplji); tvrdnju da EM top nema plamen na ustima cevi pri lansiranju projektila (naprotiv, EM top ima plamen na ustima cevi, a i druge pojave detektuju položaj topa); navodnu prednost što EM top ne treba da ima sklop protivtrzajućeg uređaja (taj sklop klasičnog topa je jednostavniji i jeftiniji u odnosu na složene, masivne, zapreminski velike i ekstenzivno skupe mašine koje su potrebne EM topu da se stvori mehanička energija i izvrši njena konverzija u električnu energiju); tvrdnju o malom broju stručnih radova o EM topovima (ona je netačna, jer je u poslednjih dvadeset godina objavljeno više od 100 veoma kompetentnih članaka o EM topovima).

<sup>2</sup> Tvrdnja da EM top nema zadnjak i zatvarač nije tačna. Zbog prenošenja struje sa jedne na drugu šinu pomoću armature sa plazmom, EM top mora da ima i zadnjak i zatvarač, da bi se „uhapsila“ plazma i usmerila ka ustima cevi (čime se izazivaju oštećenja unutrašnjosti cevi veća nego kod klasičnog topa), te je predložen izraz za impuls trzanja diskutabilan. Nije prihvatljivo da se funkcija, efikasnost i veličina udarnog talasa gasne kočnice topa 155 mm simulira na topu 20 mm, pre svega zbog velike razlike u količini i vremenu isticanja barutnih gasova, a time i u dinamici strujanja i isticanja gasova. Efikasnost gasne kočnice ne može biti veća od 100%. Ona u najboljim konstrukcijama može da bude do 70%, ali se pri tome formira veliki natpritisak barutnih gasova oko oruđa. Nelogično je poređenje klasičnog i EM topa pri početnim brzinama do 2500 m/s, jer su te brzine više od 2,5 puta veće od početnih brzina projektila koji se ispaljuju iz oruđa 155 mm M198 i M109. Sve ove primedbe odnose se i na rad [3] koji je, nesumnjivo, bio osnova za formiranje teksta [1].

ukupno 7), pa čak i literatura koju navodi autor rada [3]. Nije jasno zašto autori članka [1], objavljenog u VTG-u, nisu citirali dva osnovna izvora za svoj tekst, a pri tome su preuzeli odgovornost za stručni kvalitet rada!

Težnja autora ovoga rada je da se, ne ulazeći u polemiku o etičkim normama i drugim kodeksima sa onima koji ne uvažavaju opšteprihvaćene kriterijume i pravila, čitaocima stave na uvid relevantni tehnički podaci i stručne analize koje se odnose na aktuelni trenutak projektantskih i tehnoloških napora u oblasti elektromagnetnog lansiranja projektila i odgovarajuće procene opravdanosti i prihvatljivosti upotrebe oruđa zasnovanih na tom principu u borbenim sistemima različite namene.

## Tendencije u razvoju pogona i projektila klasičnih oruđa

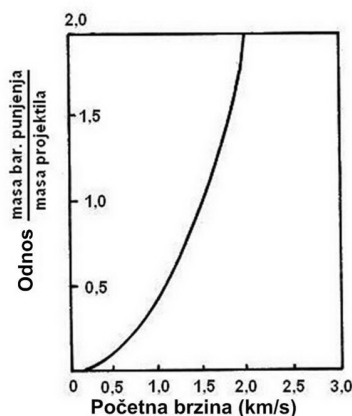
U svojoj skoro milenijumskoj istoriji vatreno oružje, čiji je kraljevski reprezent top, razvijalo se korišćenjem baruta kao pogonskog sredstva za lansiranje projektila. Projektanti su pažljivo pratili zahteve korisnika, pa su, zahvaljujući novim proizvodnim tehnologijama i tehničkim inovacijama (koje se odnose na oruđa/lansere, projekte i barute), povećavali domet artiljerijskih oruđa opšte vatrene podrške, odnosno probojnost protivoklopnih i tenkovskih topova. Istraživanja koja su vršena u kanadskom centru za odbrambena istraživanja,<sup>3</sup> američkom balističkom institutu u Aberdinu<sup>4</sup> i francusko-nemačkom institutu u Saint Louisu<sup>5</sup> (sedamdesetih godina prošlog veka) pokazala su da, čak i ako bi se postigao veći napredak u fizičko-hemijskim svojstvima baruta, realizacija topova (pogodnih za operativnu upotrebu) sa početnim brzinama projektila većim od 2000 m/s nije prihvatljiva zbog velikih dimenzija i masa barutnih punjenja [2]. Na slici 1 prikazan je dijagram eksponencijalnog porasta odnosa mase barutnog punjenja i mase projektila u funkciji početne brzine, sačinjen na osnovu napred navedenih istraživanja. Uočava se da je za brzinu 1650 m/s taj odnos 1, a za brzinu 2000 m/s već 2. Primera radi, iz danas vrlo naprednog rešenja južnoafričke samohodne top-haubice 155 mm G-6 (balistički sistem sa cevi dužine 52 kalibra, zapremina barutne komore 25 litara), razornim projektilem ERFB-BT nominalne mase 44 kg, najvećim barutnim punjenjem mase 21 kg (6 modularnih punjenja M64) i početnom brzinom od 995 m/s postiže se domet 38 400 m. Projektilem ERFB-BB, nominalne mase 45,5 kg, istim barutnim punjenjem mase 21 kg i početnom brzinom 1015 m/s, postiže se

<sup>3</sup> Opit je vršen iz eksperimentalnog topa 81,3 mm sa cevi dužine 50 kalibara. Sa odgovarajućim barutnim punjenjem i pritiskom od 4140 bara ostvarena je početna brzina projektila 2423 m/s [4].

<sup>4</sup> Korišćenjem produžene varijante cevi tenkovskog topa 120 mm M256 i projektila smanjene mase dobijena je početna brzina od 2790 m/s [4].

<sup>5</sup> Ostvarena je početna brzina od 3000 m/s [4].

domet 50 150 m. Navedeni podaci za odnos masa barutnog punjenja i projektila i ostvarenu početnu brzinu odgovaraju dijagramu sa slike 1. Ako bi se tražilo povećanje brzine na oko 2000 m/s, masa barutnog punjenja trebalo bi da bude oko 90 kg, što bi zahtevalo da zapremina barutne komore bude veća od 110 litara (odnosno 4,5 puta veća nego u realizovanom rešenju oruđa G-6). Očigledno je da takvo balističko rešenje nije prihvatljivo za operativnu upotrebu oruđa vatrene podrške.



Slika 1 – Dijagram porasta odnosa mase barutnog punjenja i mase projektila u funkciji porasta početne brzine

Za razliku od oruđa podrške, koja uglavnom koriste razorne projektele, protivoklopni i tenkovski topovi prvenstveno koriste projektele koji treba da probiju oklop (kupole ili tela) protivničkog borbenog vozila ili zidove protivničkih utvrđenja na daljinama do 2000 m. Za izvršenje tih zadataka, pored projektila punjenih eksplozivom i sa specijalnim funkcijama dejstva (kumulativni mlaz, Hopkinson efekat), koriste se i projektili koji dejstvuju kinetičkom energijom udara (u daljem tekstu KE projektil) u tvrdu prepreku, tj. pancirnu ploču oklopnog vozila. U poslednje tri decenije prošlog veka sve vodeće tehnološke zemlje sveta vrlo intenzivno su razvijale municiju na bazi kinetičke energije, jer ona ima dopunsku prednost – nije osetljiva na elektronsko ometanje, što je slučaj sa kumulativnim projektilima (HEAT) čija je „slaba tačka“ elektronika u upaljaču. Najviše uspeha imali su Rusi i Amerikanci. Tako su za topove tenkova zapadnih zemalja razvijeni potkalibarni projektili 105 mm i 120 mm, a za tenkove istočnih zemalja potkalibarni projektili<sup>6</sup> 100 mm i 125 mm tipa APDSFS. KE pro-

<sup>6</sup> Glavni delovi sklopa potkalibarnog projektila su: obloga, penetrator (jezgro) i krilni stabilizator. Po izlasku projektila iz cevi obloga se odvaja, a ka cilju leti penetrator sa stabilizatorom. Za projektele kalibra 120 mm do 125 mm prečnik penetratora je od 26 mm do 32 mm, da bi se ostvarila što veća specifična energija udara.

jektili prve generacije imali su penetrator od tvrdog metala, a penetratori projektila druge generacije izrađuju se od teškog metala – volframa ili osiromašenog uranijuma (kako bi se povećala specifična KE udara). Metak 125 mm jugoslovenske proizvodnje sa KE projektilom M88 prve generacije imao je karakteristike: početna brzina 1785 m/s, masa projektila 5,86 kg, masa barutnog punjenja 10,445 kg (uključujući i deo mase sagorljive čaure). Budući da odnos masa barutnog punjenja i projektila iznosi 1,783, a početna brzina 1785 m/s, može se konstatovati da se dijagram na slici 1 korektno može primeniti i na KE projektele.

Dobri poznavaoци projektovanja tenkovskih topova 120 mm i 125 mm (dužine sklopa cevi do 7,5 metara, mase do 3 tone, dopušteni pritisak barutnih gasova do 6400 bara, mali balistički vek cevi zbog velikog habanja cevi pri gađanju KE projektilom – oko 8 grama pri ispaljenju jednog metka, a pri tome cena sklopa cevi čak do 160 000 eura) znaju da svako dalje (a pri tome neznatno) povećanje već postignutih početnih brzina zahteva znatno povećanje mase, gabarita i cene cevi, čime se kompromituje mogućnost njihove operative upotrebe. Dostignuti konstrukcioni i tehnološki nivo tenkovskih topova 120 mm i 125 mm i njihove municije prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1

Osnovni podaci o tenkovskim topovima i njihovoj municiji sa KE projektilima

Zemlja	SAD/ Nemačka	Francuska	Rusija/Slovačka	Kina	Jugoslavija
Kalibar topa (mm)	120	120	125	125	125
Oznaka topa	Rh 120 /M256	CN120F1	2A46M	2A46M	2A46M
Dužina cevi (kalibara/mm)	L44 / 5280 L55 / 6600	L52 / 6240	L51 / 6375	L51 / 6375	L51 / 6375
Tip cevi	Glatka	Glatka	Glatka	Glatka	Glatka
Najveći pritisak barutnih gasova u cevi (bara)	6430	6425	5200	5400	5200
Masa sklopa projektila sa jezgrom od volframa (kg)	8,35 (oznaka DM 53)	6,2	7,05	7,44	5,68 (oznaka M88) <sup>7</sup>
Masa jezgra (penetratora) (kg)	4,6	4,4		4,03	3,6
Početna brzina (m/s)	1670 (iz L44) 1750 (iz L55)	1780	1700	1740	1785
KE na ustima cevi (kJ)	12785	9822	10838	11263	9049
Probojnost (mm) <sup>8</sup>	640	640	560	560	350

<sup>7</sup> U konkretnom slučaju reč je o municiji prethodne generacije, u kojoj je jezgro (penetrator) od tvrdog metala.

Na osnovu podataka iz tabele 1 mogu se usvojiti sledeći zaključci bitni za kvalitet realizovanih rešenja najmoćnijih sistema tenkovskih topova i KE municije:

- energija KE projektila na ustima cevi je u granicama od 9 MJ do 13 MJ,
- penetrator najuspešnijih rešenja KE projektila ima masu oko 4 kg, prečnik je oko 30 mm, te je kontaktna površina sudara projektila sa ciljem oko  $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,
- pad početne brzine razmatranih KE projektila na daljini do 2000 m je oko 100 m/s, te je najveća brzina penetratora od volframa pri udaru u ploču oko 1650 m/s,
- udarna energija KE projektila klasičnog topa na cilj udaljen 2000 m je oko 5445 kJ, odnosno specifična energija udara je  $770,7 \cdot 10^{+4} \text{ kJ/ m}^2$ ,

Realizovana rešenja tenkovskih topova i municije (tabela 1), uz napred navedena teorijska istraživanja, očigledno pokazuju da je upotreba baruta kao pogonskog goriva ograničena do dobijanja početnih brzina oko 1800 m/s. Stoga je nejasno zašto autori radova [3] i [1] upoređuju ponašanje konvencionalnog i EM topa pri brzinama projektila od 1800 m/s do 2500 m/s, imajući u vidu činjenicu da se barut ne koristi kao gorivo u tom rasponu brzina!

Alternativne mogućnosti povećanja početne brzine projektila jesu primena tečnog goriva ili lakog gasa (umesto baruta). Nažalost, rezultati dosadašnjih istraživanja nisu potvrdili mogućnost pouzdanog i bezbednog korišćenja tih goriva u konvencionalnim topovima (detaljnije o statusu upotrebe tih goriva u [2], [4] i [5]). Ovaj rad se bavi samo mogućnošću primene EM topa za postizanje vrlo velikih brzina lansiranja projektila.

Iz teorije sudara dva čvrsta tela poznato je da pri povećanju udarne brzine iznad 2000 m/s (pa sve do 3000 m/s) lokalni pritisak postaje veći od granice otpornosti (tečenja) materijala, te se tela u sudaru ponašaju po zakonima hidrodinamike. Pri vrlo velikim brzinama sudara (većim od 12 000 m/s) energija se tako brzo oslobađa da se tela u sudaru lokalno ponašaju po zakonima gasodinamike [7]. Više o teoriji sudara čitalac može da sazna u radovima [2] i [7].

## Osnovni principi dejstva EM topova

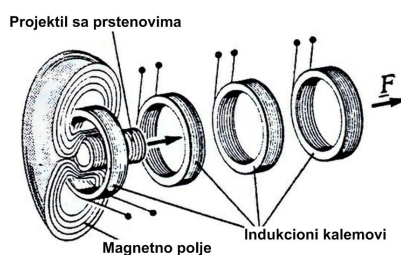
Prve ideje o oružju koje nazivamo EM top nastale su krajem XIX veka. Pre Prvog svetskog rata objavljeno je 45 patenata o EM topu.<sup>9</sup> Postoje dva tipa EM topova: najpre su realizovani laboratorijski modeli solenoidnog topa (Coil Gun), a kasnije efikasniji modeli šinskog topa (Rail Gun).

<sup>8</sup> Podaci o probojnosti potkalibarnog projektila sa jezgrom od teškog metala (volframa), koje deklarišu proizvođači, teško su proverljivi, ali se može prihvatiti da je realan zahtev da probija homogenu pancirnu ploču uslovne debljine  $\geq 550 \text{ mm}$  na daljini od 2000 m (vertikalno postavljenu na osu gađanja).

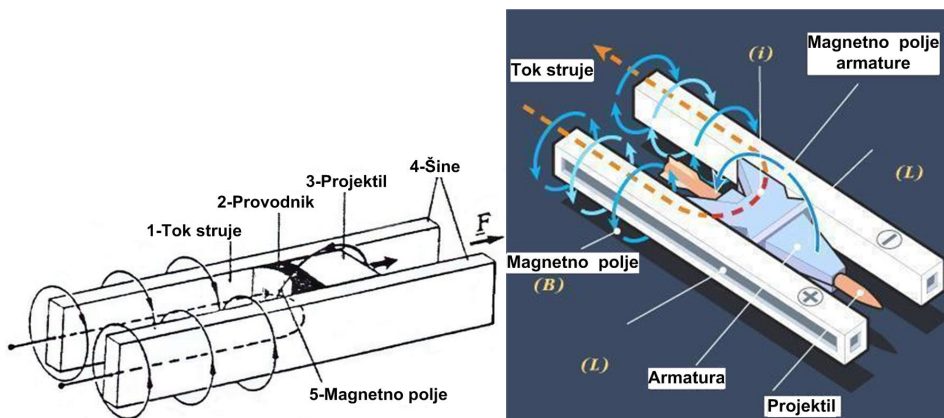
<sup>9</sup> Jedan od prvih datira iz 1901. godine. Autor je bio norveški profesor fizike Birkeland, a njegov solenoidni EM top je i danas izložen u norveškom Tehničkom muzeju u Oslu [2], [4].

Solenoidni top sastoji se od cevi oko koje su na određenim rastojanjima postavljeni indukcionni kalemovi. Sukcesivnim propuštanjem napona kroz kalemove formira se magnetno polje usled indukovanja struje u prstenovima na projektilu, te se formira potisna električna sila koja ubrzava projektil u cevi.

Šinski top<sup>10</sup> sastoji se od dve paralelne šine, između kojih klizi projektil. Da bi se iniciralo kretanje projektila kroz jednu šinu se propusti jednosmerna struja, zatim ona prolazi kroz armaturu<sup>11</sup> (provodnik, sa ili bez plazme) između šina i zatim se vraća kroz drugu šinu. Magnetno polje formirano oko šina u kombinaciji sa tokom struje stvara potisnu silu koja ubrzava armaturu sa projektilom. Za šira saznanja o principima, dejstvu i opremi EM topova čitaoci se upućuju na kumulativnu naučno-tehničku informaciju „Elektromagnetni topovi“ [4].



Slika 2 – Funkcionalna šema solenoidnog EM topa

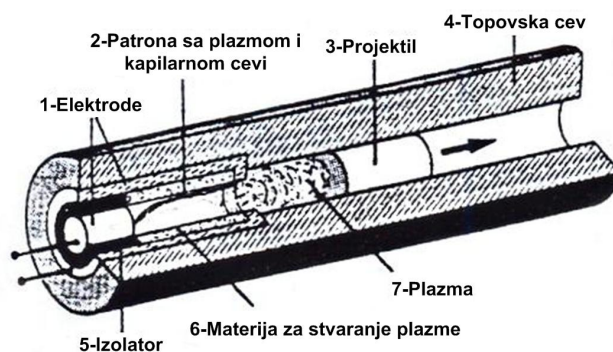


Slika 3 – Funkcionalna šema EM šinskog topa

<sup>10</sup> Pronalazač šinskog topa je francuz André Louis-Octave Fauchon-Villeplée, sa svoja tri patenta iz 1920. godine.

<sup>11</sup> Termin „armatura“ podrazumeva element koji provodi struju između dve šine. Može biti od čvrstog materijala ili je hibrid plazme i čvrstog materijala.

Mnogo kasnije, kada je postalo izvesno da su osnovni problemi EM topova formiranje potrebne električne energije na ustima cevi topa i njeno akumuliranje u mašinama prihvatljivih dimenzija, obimna istraživanja usmerena su na razvoj „hibridnih“ EM topova, najpre elektrotermičkog (ET) topa, a zatim elektrotermičko-hemijskog (ET-H) topa.<sup>12</sup>



Slika 4 – Funkcionalna šema ET topa

ET top sastoji se od klasične topovske cevi sa elektrodama, komore sa plazmom, zadnjaka i ostalih delova oruđa. Struja se uvodi u fluid pomoću patrone (napunjenje plazmom) sa tankom niti u polietilenskoj kapilarnoj cevi. Pri prodoru strujnog talasa eksplodira kapilarna cev, što dovodi do stvaranja toplih polietilenskih para, a zatim plazma (pod vrlo visokim pritiskom i pri temperaturama preko 3000 K) ubrzava projektil do brzina znatno većih od 2000 m/s.

ET-H top je nastao tako što se veći deo pogonske energije dobio u procesu hemijske reakcije, te se od ET topa razlikuje po načinu korišćenja egzotermnih radnih fluida. Razvoj ET-H topova započet je u američkim firmama GDLS<sup>13</sup> i FMC<sup>14</sup> početkom osamdesetih godina prošlog veka. Obe firme su za razvoj svojih eksperimentalnih modela koristile američki tenkovski top M256 i kondenzator kao izvor električnog impulsnog napona. Sredinom osamdesetih godina u istraživačkom centru firme FMC patentiran je koncept razvoja ET-H topa oznake CAP,<sup>15</sup> a zatim su realizovani i ispitivani do sredine devedesetih godina modeli topova 105 mm i 120 mm, radi ocene mogućnosti njihove primene u tenkovima [9].

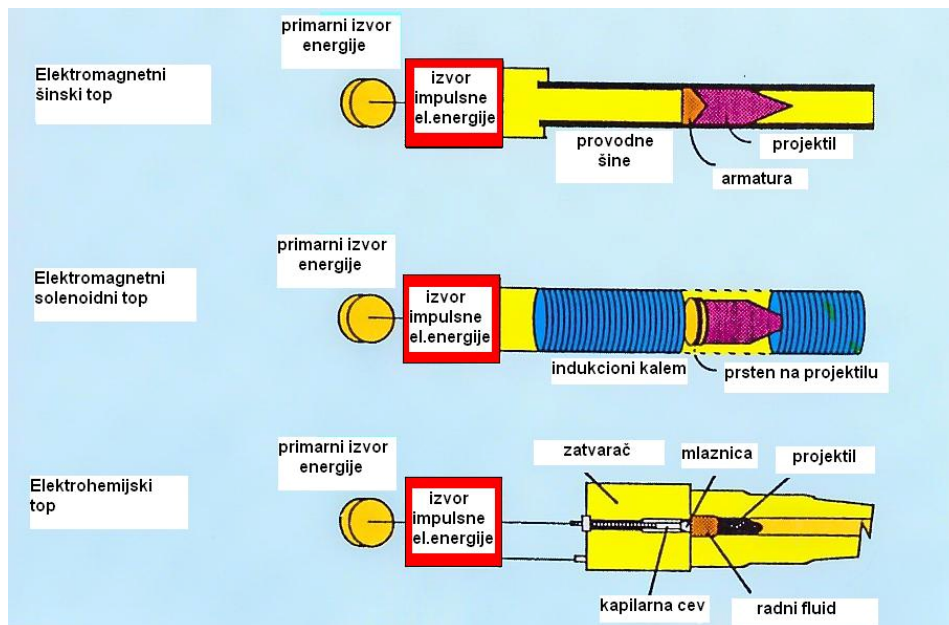
<sup>12</sup> Početna istraživanja vršio je Nemač Muck 1945. godine, a tokom šezdesetih godina registrovani su prvi patenti za zagrevanje helijuma pomoću električnog luka u firmi GEC (General Electric corporation).

<sup>13</sup> GDLS – General Dynamics Land Systems.

<sup>14</sup> FMC – Ford Motor Corporation.

<sup>15</sup> CAP (Combustion Augmented Plasma – plazma pojačanog sagorevanja).





Slika 5 – Šematski prikaz rešenja EM topova:

### Propao pokušaj naoružavanja tenka klasičnim topom 75 mm ARES – šansa za EM top

Ne ulazeći u detaljnije analize koncepcije rešenja tenkova, može se konstatovati da su krajem dvadesetog veka realizovana optimalna rešenja osnovnog borbenog tenka u tehnološki vodećim zemljama sveta (na osnovu raspoloživih tehnologija). Pri tome se došlo do zaključka da je dalje povećanje mase tenkova neprihvatljivo sa stanovišta borbene upotrebe, a dalje povećanje cena (za zapadne tenkove poslednje generacije ona je veća od 5 miliona eura) ekonomski neprihvatljivo. Pošto se masa tenka utvrđuje na osnovu željenog nivoa balističke zaštite i energije projektila na ustima cevi, početkom osamdesetih godina prošlog veka došlo se na ideju da se umesto kupole naoružane topom velikog kalibra ugradi automatski oružni sistem manjeg kalibra, koji može da obezbedi lansiranje projektila sa istom ili većom kinetičkom energijom. Tako je kompanija Paccar u okviru projekta ELKE (*ELevated Kinetic Energy*) ugradila spolja, na gornju ploču oklopnog tela, automatski top 75 mm ARES sa novom generacijom KE projektila [6], sa ciljem da se smanji ukupna masa tenka i da udarna energija projektila na cilju bude prihvatljiva. Ipak, operativna ispitivanja prototipa ukazala su na borbene nedostatke zbog kojih korisnici nisu prihvatili predloženi koncept rešenja (nezaštićena i podignuta silueta automatskog topa bila je „laka“ meta za dejstvo naoružanja protivnika, komandir nije imao mogućnost

kružnog osmatranja, optoelektronska panoramska sprava nije zadovoljila, složeno rešenje automatskog punjača i potreba uvođenja daljinske komande su ekstenzivno povećali cenu). Napuštanjem koncepta ELKE pojavila se (možda) poslednja šansa za eventualnu afirmaciju EM topa.

## Definisanje zahteva za projektovanje tenkovskog EM topa

Bitna i osnovna razlika konvencionalnog i EM topa je princip dejstva. Konvencionalni top je, u osnovi, toplotna mašina u kojoj hemijska energija baruta u procesu sagorevanja oslobađa toplotu u zatvorenom prostoru barutne komore i formira pritisak barutnih gasova, te se potiskivanjem projektila u cevi toplotna energija transformiše u mehaničku energiju. Cilj dobrog balističkog projektovanje jeste da projektil napusti usta cevi sa što većom kinetičkom energijom. Koeficijent korisnosti toplotne energije baruta u konvencionalnom topu je oko 28% do 35%.<sup>16</sup>

Princip rada EM topa je složeniji i svodi se na sledeću šemu transformacije primarne energije u mehaničku energiju projektila (razmotren je slučaj ugradnje EM topa u tenk):

- toplotna energija dizel goriva ili kerozina u dizel motoru ili gasnoj turbini pretvara se u mehaničku energiju; koeficijent korisnosti dizel motora je oko 40%, a gasne turbine oko 30%;

- mehanička energija dizel motora (ili gasne turbine) transformiše se u impulsnu električnu energiju (za kasnije formiranje magnetnog polja) pomoću homopolarnog generatora jednosmerne struje ili pomoću kompulzatora<sup>17</sup>; koeficijent korisnosti generatora je 80% do 90%;

- za akumuliranje električne energije (potrebne za ispaljivanje većeg broja projektila) koriste se kondenzatori, induktori ili akumulatori, zavisno od rešenja EM topa; poželjno vreme za ponovno popunjavanje potrošene energije je do 5 minuta;

- u EM topu (odgovarajuće konstrukcije) formira se jednosmerna struja kratkog impulsa i velikog intenziteta (za lansiranje projektila), a električna energija se transformiše u mehaničku energiju projektila; koeficijent korisnosti je oko 20%;

<sup>16</sup> Toplota sagorevanja topovskih baruta je 3,2 do 4,5 kJ/g, zavisno od toplotne moći i vrste upotrebljenog baruta. U slučaju opaljenja metka 125 mm sa KE projektilom M88 i pripadajućim barutnim punjenjem oslobađa se toplotna energija od oko 31,59 MJ (računajući sa koeficijentom toplote 3,6 MJ/kg). Imajući u vidu kinetičku energiju projektila na ustima cevi (9,049 MJ – videti tabelu 1) dobija se da je koeficijent korisnosti klasičnog tenkovskog topa oko 28,6%. Balističkim rešenjem samohodne top-haubice 155 mm NORA-B52 ostvaren je stepen korisnosti od oko 34%.

<sup>17</sup> Kompulzator je novi tip generatora sa znatno smanjenom impendansom i dodatnim stacionarnim kalemom. Pored stvaranja struje kratkog impulsa, a velikog intenziteta, koristi se i za vremensko induktivno akumuliranje energije.

– ukupni koeficijent korisnosti EM topa je, dakle, 5% do 7% (to je odnos dobijene energije EM projektila na ustima cevi prema ulaznoj energiji primarnog izvora);

– na osnovu prethodnih razmatranja, autori ovoga rada smatraju da princip funkcije EM topa treba i eventualno može da se operativno primeni (ukoliko se ostvare određeni zahtevi) pre svega za lansiranje projektila koji na cilj deluju kinetičkom energijom udara. Primena principa EM topa na samohodna oruđa vatrene podrške (primer: top-haubica 155 mm)<sup>18</sup> i samohodna oruđa namenjena za protivvazduhoplovnu odbranu (primer: dvocevni top 30 mm do 40 mm)<sup>19</sup> eksplicitno zahteva da prethodno budu rešeni brojni tehnički problemi vezani za mogućnost ispaljivanja razornih projektila (detaljnije u poglavlju o broskom EM topu).

Može se zaključiti da bi projektni zadatak za razvoj EM topa namenjenog za osnovno naoružanja tenka trebalo da se svede na razmatranje mogućnosti ispunjavanja sledećih zahteva:

a) udarna energija projektila EM topa treba da bude jednaka ili veća od udarne energije najuspešnijeg KE projektila realizovanog za klasičan tenkovski top. Ovaj zahtev se svodi na definisanje potrebne energije projektila na „ustima“ cevi EM topa, imajući u vidu koeficijent korisnosti (odnosno ukupni koeficijent korišćenja primarne energije) EM topa;

b) definisanje i akumuliranje potrebne električne energije za izvršenje projektovane brzine gađanja iz EM topa u slučajevima:

da najveća brzina gađanja bude 6 metaka za jedan minut,

da može da se ostvari produženi režim gađanja od 4 metka/minut u trajanju do 3 minuta;

c) pronalaženje kondenzatora ili neke druge mašine odgovarajućeg tipa i snage potrebnog za akumuliranje energije neophodne za izvršenje funkcije EM topa u traženom vremenu i pri zadatom režimu gađanja ( $\Sigma$ energije  $\geq$  (a) + (b));

d) definisanje zapremine i mase EM topa i kompletne prateće opreme potrebne za:

– izvor energije (savremeni tenk koristi dizel motor ili gasnu turbinu),

– transformaciju mehaničke u električnu energiju (homopolarni generator ili kompulzator),

<sup>18</sup> Sa projektilom tipa ERFB-BB (sa generatorom gasa) ostvaren je domet do 55 km, a sa projektilom tipa V-LAP (sa generatorom gasa i raketnim motorom) do 67 km. Dalji razvoj je usmeren na povećanje preciznosti i tačnosti pogađanja ciljeva na tako velikim daljinama (upaljač sa mogućnošću korigovanja putanje), a ne na zamenu baruta kao pogonskog goriva.

<sup>19</sup> Već je u upotrebi klasična municija takvih tehničkih karakteristika, koja (zahvaljujući automatskim punjačima topova i velikoj brzini gađanja) ima vrlo efikasno dejstvo po vazдушnim ciljevima na visinama do 3 km i daljinama do 4 km. Dalji razvoj usmeren je na povećanje efikasnosti uništenja ciljeva na navedenim daljinama (blizinski upaljač, sa mogućnošću programiranja kada je projektil u letu), a za dejstvo na većim daljinama i visinama ekonomski je prihvatljivija primena vođenih PA raketa.

- akumuliranje (stokiranje) potrebne energije za funkciju EM topa (kondenzator, akumulator),
- transformaciju električne energije u mehaničku, odnosno kretanje projektila režimom koji obezbeđuje projektovanu energiju na ustima cevi EM topa, u funkciji raspoloživog prostora i ukupne mase savremenog tenka.

## Analiza mogućnosti naoružavanja tenka EM topom

Eksplicitne odgovore na pitanja koja proističu iz razmatranja mogućnosti definisanih projektnih zahteva mogu da daju samo oni istraživači koji raspolažu svim potrebnim znanjima za projektovanje EM topa i raspolažu sopstvenim iskustvom u razvoju svih komponenata opreme koje su neophodne za navedene transformacije energije u procesu funkcije EM topa. Budući da autori ne pretenduju da poseduju takva ekspertiska znanja, ponuđeni odgovori su formirani na osnovu analize podataka i saznanja iz raspoložive stručne literature.

Značajan doprinos razmatranju mogućnosti realne primene EM topa predstavlja rad „*Aspects of Modern Tank Design*“<sup>20</sup> [8]. Za predmet ovog rada (slučaj ugradnje EM topa u tenk umesto konvencionalnog topa 120/125 mm) korisne su sledeće konstatacije navedene u tom izvoru:

- potrebna KE projektila na ustima cevi EM topa je oko 20 MJ;
- potrebna akumulirana električna energija za opaljenje jednog projektila (uz pretpostavku da je koeficijent korisnosti 30%<sup>21</sup> i da je za konverziju te energije u KE projektila potrebno samo nekoliko milisekundi) iznosi oko 70 MJ;
- potrebna akumulirana električna energija za opaljenje je: za brzinu gađanja 10 projektila/minut oko 610 MJ; pri brzini gađanja 4 projektila/minut oko 190 MJ;
- vreme za dopunjavanje kondenzatora ili druge mašine za akumuliranje energije (vrši se tokom gađanja): za režim 10 projektila/minut oko 410 sekundi; za režim 4 projektila/minut oko 125 sekundi.

Svi navedeni podaci izračunati su za slučaj korišćenja generatora čija je izlazna snaga 1,5 MW. Bitan je i podatak da je raspoloživi prostor u telu budućeg osnovnog borbenog tenka (prema projektu firme Krauss Maffei) bio 8,8 m<sup>3</sup> za smeštaj sledećih podсистема: pogonske grupe

<sup>20</sup> Rad je nastao korišćenjem saopštenja autora (dipl. inženjera zaposlenog u firmi Krauss Maffei) na Simpozijumu PAPUA 21, organizovanog sa ciljem da se u formi „okruglog stola“ obezbedi rasprava najistaknutijih eksperata u oblasti razvoja oklopnih vozila.

<sup>21</sup> Veći broj autora smatra da je taj koeficijent korisnosti manji i da iznosi samo 20%.

(snage 1,1 MW), sistema mašina za proizvodnju i akumuliranje električne energije za EM top, rezervoara za gorivo (1100 litara), akumulatora, bočnih reduktora, sistema za hlađenje i grejanje.

Uporednom ocenom nedostataka koji se javljaju primenom klasičnog i EM topa autor rada [8] daje značajnu prednost konvencionalnom rešenju. Po njemu, nedostaci klasičnog topa su: buka pri opaljenju metka, zaostali gasovi (CO) u kupoli posle opaljenja metka, eksploziv u razornim projektilima municijskog kompleta. Nedostaci EM topa su: potreban izvor velike energije, uređaji za uključivanje struje visokog intenziteta, akumuliranje električne energije, elektromagnetni fluks, magnetna signatura, IR signatura, velika zapremina i velika masa potrebne opreme EM topa.

Slične i druge informacije korisne pri donošenju ocene o mogućnosti primene EM topa mogu se naći u članku „*Future tank guns – Part II: Electromagnetic and electrothermal guns*“ [9], u kojem se konstatuje da su problemi zapremine i mase vrlo velika prepreka za operativnu primenu EM topa. Tako, na primer, ET top čija je energija na ustima cevi 9 MJ, zahteva da se za jedno opaljenje raspolaže akumuliranom električnom energijom od 30 MJ, imajući u vidu ostvareni koeficijent korisnosti električne energije od oko 30%. Sa kapacitetom akumuliranja 3 kJ/kg, masa kondenzatora je bila čak oko 10 000 kg!

Ocenjujući da je u dogledno vreme moguć napredak u tehnologiji akumuliranja električne energije (procena je data početkom devedesetih godina) Centar za elektromehaniku Univerziteta u Teksasu (CEM-UT) načinio je idejno rešenje tenka sa šinskim topom 100 mm i energijom na ustima cevi 15 MJ, u kojem bi se potrebna električna energija akumulirala sistemom kondenzatora i bipolarnih akumulatora, sa procenom da će se dobiti gustina energije od 15 kJ/kg (kondenzatori) i 135 kJ/kg (akumulatori). Koncept ovog rešenja bio je tenk sa daljinski komandovanom kupolom (sa ugrađenim EM topom) bez posade. Za pogon tenka bilo je planirano korišćenje gasne turbine snage 1100 kW, a procenjena masa tenka sa borbenim kompletom bila je 49,6 tona. Alternativno rešenje predstavlja tenk sa sličnom konfiguracijom, ali se umesto sistema kondenzator/akumulator za akumuliranje energije koriste dva kompulzatora, kako bi se masa tenka smanjila na 47,8 tona.

Razmatranje oba koncepta rešenja sugerise da se problemi mase i gabarita mogu savladati tek dopunskim i obimnim razvojem komponenta u narednom periodu. Pred toga, autor u [9] upozorava da treba rešiti i druge tehničke probleme, kao što su:

- razvoj prekidača, kliznih kontaktora i fleksibilnih kablova za prenos struje jačine do 4MA,
- zaštita posade tenka (odgovarajućim pregradama) od struje visokog napona,

– zaštita mašina sa velikom brzinom rotacije i mašina za akumuliranje velike količine električne energije od dejstva projektila koji bi probili oklop tenka.

Konačno, za donošenje odluke je relevantno i pitanje cene, pa se navodi podatak da samo kondenzator za akumuliranje energije od 30 MJ košta više od jednog miliona američkih dolara [9].

Konsultovanjem raspoložive literature (mada, verovatno, nije izvršen potpuni pregled štampane literature i/ili potpuno i sveobuhvatno internet pretraživanje) i kritičkim razmatranjem objavljenih podataka autori ovoga rada smatraju da se mogu formulisati sledeće konstatacije i procene o statusu do sada realizovanih EM topova namenjenih za naoružavanje tenkova:

– budući da su već realizovana operativna rešenja tenkovskih klasičnih topova sa energijom projektila na ustima cevi od oko 13 MJ (videti tabelu 1), minimalan zahtev bio bi da se projektuje EM top sa istom energijom projektila na ustima cevi;

– da bi se ostvario isti efekat dejstva na cilju (probijanje oklopa tenka na daljini 2 km, kao i dejstvo iza oklopa) projektil EM topa trebalo bi da ima približno istu udarnu energiju kao KE projektil klasičnog topa.<sup>22</sup> Ipak, bez dopunskih analiza dinamike lansiranja i efekata na cilju ne može se korektno oceniti ponašanje penetratora (manje mase, a veće brzine) pri sudaru sa oklopom tenka na istoj daljini;

– da bi se ostvario režim gađanja od 6 metaka za jedan minut potrebno je da se u kondenzatoru (ili drugom uređaju) akumulira električna energija od najmanje 367 MJ;<sup>23</sup>

– da bi se formirala i akumulirala navedena energija potrebno je da se u tenk ugradi pogonska grupa (dizel motor i/ili gasna turbina) čija je snaga bar 6,116 MW, odnosno 6116 kW;<sup>24</sup>

– danas se kao izvor mehaničke energije mogu koristiti gasne turbine snage 1100 kW i/ili dizel motori snage 882 kW, prilagođeni za ugradnju u tenk. Očigledno je da je raspoloživi prostor tipičnog osnovnog borbenog tenka 5 do 6 puta manji od prostora u koji bi se smestila pogonska grupa snage veće od 6000 kW;

– procene vodećih istraživačkih centara u svetu (prvenstveno u SAD) da će tokom poslednje dekade ili do kraja dvadesetog veka biti učinjen značajan tehnološki napredak u domenu smanjenja dimenzija i mase električnih mašina za dobijanje i akumuliranje električne energije nisu se ostvarile.<sup>25</sup>

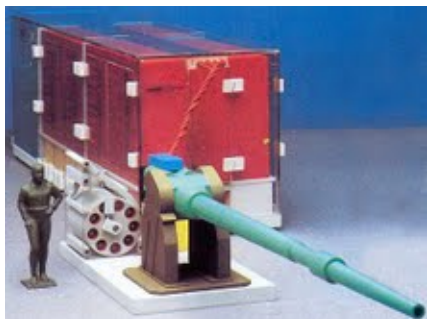
<sup>22</sup> U konkretnom slučaju udarna energija KE projektila klasičnog topa na navedenoj daljini je oko 7100 kJ.

<sup>23</sup> Računajući da se konverzija mehaničke energije pogonske grupe tenka u električnu energiju generatora vrši sa koeficijentom korisnosti 85%, a zatim električne energije u mehaničku energiju projektila sa koeficijentom korisnosti 25%.

<sup>24</sup> Po definiciji, snaga se dobija podelom rada (energije) sa vremenom u kojem se taj rad izvrši ( $W=J/s$ ), u konkretnom slučaju za 60 sekundi.

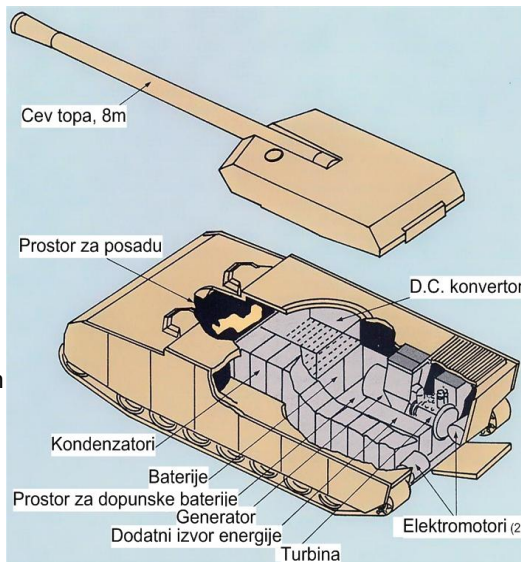
<sup>25</sup> Iako je, na primer, firma Maxwell u periodu 1985. do 1990. smanjila zapreminu svojih kondenzatora sa 1,72 m<sup>3</sup> na 0,17 m<sup>3</sup> (za 1MJ).





Slika 6 (gore) – Model ET-H topa 120 mm energije od 9MJ, sa automatskim punjačem (9 opaljenja za 3 minuta) i modulom akumulirane struje u ISO kontejneru

Slika 7 (desno) – Koncept rešenja borbenog tenka mase 49,6 tona naoružanog šinskim EM topom čija je energija na ustima cevi 15 MJ



### Jugoslovenske reference u oblasti istraživanja EM topova

U periodu od 1985. do 1990. godine istraživači Instituta za fiziku iz Zemuna i Vojnotehničkog instituta Kopnene vojske JNA iz Beograda u okviru zajedničkog istraživačkog projekta izradili su tri elektrodinamička akceleratora (EM topa) oznake EDA. Provera koncepta funkcionisanja izvršena je 1985. godine na laboratorijskom modelu šinskog EM topa EDA-0 (masa projektila 0,3 g, dužina šina 250 mm, poprečni presek 6x6 mm). Krajem 1987. godine realizovan je novi model EM topa EDA-1, u okviru projekta istraživanja eksperimentalnih metoda za dijagnosticiranje funkcija EM topa pri lansiranju projektila. U periodu do 1990. godine izvršeno je 50 opaljenja. Postignuti su, za to vreme, vrlo dobri rezultati: brzina 3000 m/s sa projektilom mase 0,7 g (odnosno 3,15 kJ energije na ustima cevi) i brzina 2500 m/s sa projektilom mase 1,1 g (odnosno 3,44 kJ). Bilo je planirano da se iz narednog modela EM topa EDA-2 lansira projektil mase 1 g brzinom 7000 m/s. Zbog događaja tokom devedesetih godina nije poznato da li su planirani radovi na projektu završeni.

Na osnovu prethodne analize stanja razvoja sistema EM topova namenjenih za ugradnju u tenk može se zaključiti da su do sada realizovani samo laboratorijski modeli EM topova, da tek treba rešavati borbeni pod-sistem (konstrukciju šinskog topa i sklopa projektila – armatura, nosač projektila i sam strelasti projektil), a da je određen napredak ostvaren jedino u osvajanju tehnologija izrade komponenata podsistema za formiranje i akumuliranje električne energije. Prema najavama Istraživačke laboratorije američke kopnene vojske, u okviru projekta razvoja budućeg

MBT,<sup>26</sup> čiji se razvoj planira do 2015. godine, nova generacija kompulzatora trebalo bi da bude integralna komponenta EM topa [10]. Nažalost, nema ideja koje bi rešile problem primarnog izvora energije velike snage, a male mase i zapremine.

## Brod kao platforma za ugradnju EM topa

Na osnovu iskustava stečenih na razvoju tenkovskog EM topa američki istraživači su u periodu posle 2000. godine započeli istraživanja koja bi dovela do funkcionalnog modela brodskog EM topa. Razlozi su više nego očigledni – brod je adekvatnija platforma od tenkovske za ugradnju gabaritno velikih i još uvek teških funkcionalnih modela EM topova. Snaga brodskih motora je znatno veća od snage tenkovskog motora, pa se jednostavnije rešava zahtev za velikom primarnom snagom potrebnom za formiranje električne energije.

Maja 2003. pomoćnik američkog sekretara za mornaricu zatražio je od Komiteta za brodska istraživanja da se izvrši procena tehnologija u oblasti EM topova. S timu vezi, trebalo je da se izradi [11]:

- pregled i procena tehničkih i operacionih karakteristika potrebnih da bi se ostvario borbeno efektivan sistem EM topa za brodsku upotrebu,
- pregled aktuelnog i očekivanog stanja tehnologija i procena ostvarivanja zahtevanih karakteristika, kao i mogućnosti proizvodnje i održavanja sistema EM topa,
- procena tehničkih i razvojnih rizika (neizvesnosti) u proizvodnji projektila koji bi mogli uspešno da izvrše borbeni zadatak (lansiranje na cilj sa zahtevanom preciznošću).

Izrađena studija je pokazala da postoje značajni projektantski i tehnološki problemi koji tek treba da se savladaju da bi se realizovao sistem operativnog brodskog EM topa. Pored toga, u studiji je bio predložen termin plana na osnovu kojeg bi mornarica mogla da donosi odluke o lansiranju i vođenju pojedinih aktivnosti na programu razvoja u narednih osam godina. Inače, planirane aktivnosti na projektu AGS<sup>27</sup> odnose se na razvoj i izradu funkcionalnih modela EM topova (u više sukcesivnih faza, sa različitom energijom projektila na ustima cevi) i oko 2400 metaka sa KE projektilima dometa više od 370 km.

Sektor za mornarički razvoj u saradnji sa Centrom kopnene vojske za istraživanje, razvoj i inženjering (ARDEC) definisao je, u okviru zajedničkog projekta AGS, sledeće teme istraživanja:

- borbeni sistemi namenjeni za direktno i posredno gađanje, srednjih i velikih kalibara (od jedan do 6 inča, odnosno 25 mm do 155 mm) na bazi primene tehnologija EM topa;

<sup>26</sup> MBT – Main Battle Tank (osnovni borbeni tenk).

<sup>27</sup> AGS (Advanced Gun System – napredni topovski sistem).



– istraživanja i tehnologije od posebnog interesa: pulsni agregati, odnosno mreže uređaja za formiranje i akumuliranje električne energije; integrisani sklop projektila i/ili razvoj komponenata projektila; projektovanje i osvajanje tehnologije izrade sklopa cevi EM topa;

– program istraživanja kojim su zadati nivoi kinetičke energije projektila na ustima cevi koje treba realizovati (od 2 MJ do 64 MJ).

Istraživanje u oblasti sklopa cevi (sa ciljem da se produži život cevi)<sup>28</sup> usmereno je na tri poznata uzroka oštećenja unutrašnjosti cevi pri ubrzanju projektila u njoj: prekomerno zagrevanje šina na mestu dodira sa armaturom; pojava udubljenja na šinama pri kretanju armature sa plazmom velikom brzinom; erozija šina na ustima kada projektil napušta cev.

U oblasti tehnologije pulsne snage planira se nastavak istraživanja primenom dva postupka za proizvodnju visokopulsirajuće struje velikog intenziteta potrebne da se za veoma kratko vreme ubrza projektil u cevi. Prvim postupkom unapređuje se tehnologija pulsno generatora kao glavnog uređaja za proizvodnju električne energije, a drugim smanjuje zapremina kondenzatora, odnosno povećava gustina akumuliranja. Budući da je kopnena vojska zainteresovana za EM top za neposredno gađanje, koji bi mogao da se ugradi na oklopna vozila, najveći tehnički izazov biće da se obezbedi velika energija na ustima cevi i pogonska grupa male zapremine. Za brodski EM top se zahtev za zapreminu pogonske grupe ne postavlja, a zbog potrebe da se obezbedi vremenski produženi režim gađanja zahteva se brzo dopunjavanje agregata za formiranje pulsne struje, korišćenjem mehaničke energije snažnih brodskih motora.

Što se tiče konstrukcije projektila, osnovni problem je njena otpornost pri visokim ubrzanjima projektila u lansirajućoj cevi i obezbeđenje udarne energije KE projektila na cilju. Pri tome je ponašanje elektromagnetne armature, nosača projektila i projektila, kao jedne celine, odlučujuće za pravilnu funkciju. Projektil namenjen za gađanje na velike daljine treba da bude vođen, pa elektronika projektila mora da preživi dejstvo velikih ubrzanja i postojećih visokih elektromagnetnih smetnji okoline. Svojstva projektila po napuštanju usta cevi (stabilnost u letu, zagrevanje zbog otpora vazduha, efektivno i održivo vođenje i upravljanje) odlučujući su za pouzdanost sistema EM oružja namenjenih za dejstvo na ciljeve neposrednim gađanjem na male i posrednim gađanjem na velike daljine.

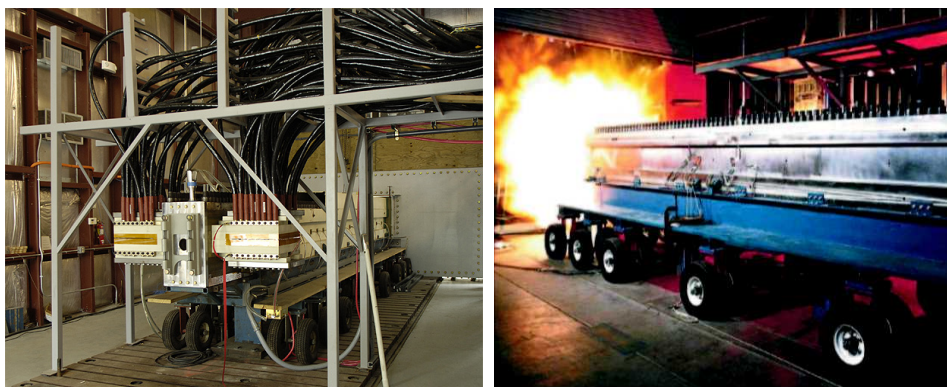
Tokom 2005. godine započeta je izgradnja novih poligonskih objekata u američkom Mornaričkom opitnom centru u Dahigenu, namenjenih za ispitivanje zemaljske platforme dorađenog šinskog EM topa, čiji je razvoj sredinom osamdesetih godina započela firma BAE Systems. Iz dorađene verzije laboratorijskog EM topa, mase oko 40 tona, 2. oktobra 2006. godine izvršen je uspešan opit gađanjem kome je bila posvećena velika medijska pažnja, pre svega zbog velikog projektovanog dometa od 370 do 400 km [11], [12], [13]. Opit gađanjem izvršen je iz laboratorijskog EM topa sa pogonskom električnom

<sup>28</sup> Zahtevani život cevi je ispaljivanje 10000 projektila.

opremom koja u roku od 5 minuta puni kondenzatore šinskog topa i može da obezbedi efektivnu energiju projektila od 8 MJ.<sup>29</sup> KE projektil mase 2,4 kg bio je lansiran iz cevi kalibra 90 mm (sa šinama od bakra), brzinom od 2520 m/s (ostvorena početna energija je bila 7,6 MJ) na vertikalnu metu (smeštenu u tunel napunjen džakovima peska) udaljenu od usta cevi samo 20 m.

Posle uspešnog opita 2006. godine bilo je planirano da se 2009. godine izvrši prvo ispitivanje EM topa efektivne energije od 32 MJ [11]. Program menadžer firme BAE Systems ipak je bio obazriv kada je izjavio: „Snaga je obezbeđena, jedina je prepreka kako je iskoristiti“ [13]. Naime, pri korišćenju EM topa efektivne energije 8MJ ograničavajući faktor bio je proizvodnja struje 3 miliona ampera za jedno opaljenje. Za opite iz EM topa od 32 KJ u Mornaričkom opitnom centru bi trebalo da se instaliraju dopunski kondenzatori. A šta tek reći za planirani najmoćniji EM top od 64 MJ efektivne energije, za koji bi trebalo da se instalira oprema koja može da akumulira 6 miliona ampera [13]! Možda je kandidat za opremanje budućeg broskog EM topa već realizovani kompulzator u kojem može da se akumulira 40 MJ energije, što je (prema načinu i vremenu punjenja te vrste mašine) dovoljno za ispaljivanje 15 projektila [10]?<sup>30</sup>

Navedeni problemi vrlo su brzo pokazali da planirana dinamika realizacije budućeg broskog EM topa mora da se produži. Za izradu dopunske opreme na poligonu u Mornaričkom centru za ispitivanje snažnijih EM topova (od 32 MJ i 64 MJ) firma BAE Systems je zaključila ugovor sa američkom mornaricom vredan 21 milion američkih dolara. Naredni opit iz topa od 32 MJ planira se tek za 2011. godinu [14], [15].



Slika 8 – Laboratorijska verzija budućeg broskog šinskog EM topa 90 mm, ispitivanog oktobra 2006. godine: levo – na gornjoj površini zadnjaka je projektil čiji oblik podseća na klasičan APDSFS projektil; desno – plamen (koji mnogi nisu očekivali) pri izlasku projektila iz cevi

<sup>29</sup> Imajući u vidu da kod KE projektila postoji razlika u masi projektila u trenutku napuštanja cevi i u trenutku udara u cilj, kao i razlika brzine na ustima cevi i u trenutku udara u cilj, predlaže se uvođenje sledećih termina: „efektivna energija“ – kinetička energija projektila na ustima cevi i „udarna energija“ – kinetička energija projektila pri udaru u cilj.

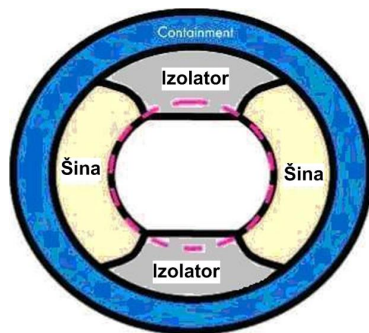
<sup>30</sup> Podatak treba uzeti sa rezervom, jer je vrlo optimističan.

Za ugradnju topa od 64 MJ, po izjavi program menadžera firme BAE Systems, najozbiljniji kandidat je razarač DDG 100 Destroyer, koji ima električni pogon od 72 MW. Proračuni pokazuju da je za lansiranje 6 metaka za jedan minut iz topa 64 MJ potrebna snaga od 16 MW. Takođe, pažnju privlači i procena predstavnika firme BAE Systems da će za konačan razvoj topa od 64 MJ biti potrebno bar 13 godina od dana kada se završi ispitivanje topa od 32 MJ [13]. Dakle, optimistička prognoza bi bila da će, ako se reše svi tehnički i tehnološki problemi, budući brodski EM top moći operativno da se koristi tek posle 2025. godine! Planira se da novi brodski EM top zameni brodske topove 127 mm, čiji je domet oko 21 km, pa bi se uvođenjem u upotrebu EM topa povećao domet brodske artiljerije za oko 20 puta [11], [12].

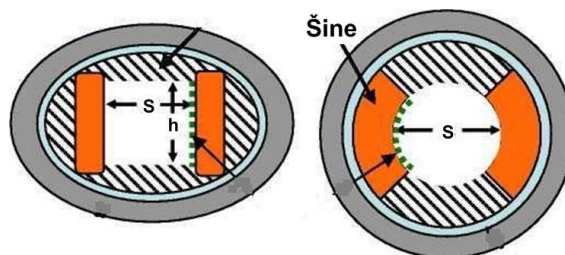
U protekloj dekadi je objavljen veći broj radova u kojima se posebna pažnja posvećuje projektovanju cevi i sklopa projektila. U radu [16] autori detaljno opisuju postupak projektovanja sklopa projektila energije 8 MJ. Sklop projektila je projektovan tako da izdržava ubrzanja od 57 000 g i treba da bude ispitan na probnom stolu u Obitnom centru za EM topove u Škotskoj. Izvršena je unutrašnja balistička analiza, dinamička analiza potkalibarnog projektila (aerodinamički koeficijent, otpornost na dejstvo bočnih sila u toku leta) i strukturalna analiza sklopa projektila i otvaranja nosača projektila pri napuštanju cevi. Izvršeno je uspešno ispitivanje navedenog projektila gađanjem iz britanskog EM topa kalibra 90 mm na opitnom poligonu u Škotskoj. U radu [17] se razmatraju materijali koji se mogu koristiti za izradu cevi i sklopa projektila, a u radu [18] optimizacija oblika cevi i projektila (sa stanovišta naponskog stanja i balistike rešenja) za konkretan slučaj broskog EM topa efektivne energije 47 MJ (masa projektila 15 kg, početna brzina projektila 2500 m/s).

Ostvareni teorijski i praktični rezultati u prvoj dekadi ovog veka dopuštaju da se implementacija sistema EM topa na brodsku platformu sa više optimizma proceni realnom perspektivom. Još uvek se ne mogu utvrditi konačni taktičko-tehnički zahtevi za budući brodski EM top, ali već ima radova u kojima su definisani polazni projektni zahtevi sistema EM topa, kao što je slučaj sa EM topom energije 8 MJ [16]. Upoređivanjem polaznih zahteva i realizovanih rešenja može se konstatovati zadovoljavajući nivo ispunjenja projektnih zahteva. Vredan pažnje je rad objavljen 2003. godine u kojem se razmatraju rešenja budućeg broskog EM topa u dve faze, sa više varijantnih rešenja, a zatim daju intencije potrebnih usavršavanja [19]. U prvoj fazi se razmatra rešenje EM topa koji lansira KE projektil sa masom na ustima cevi 21,9 kg, letnom masom 16,4 kg (posle otpadanja nosača projektila) i početnom brzinom 2000 m/s, odnosno top efektivne energije 43,8 MJ. U drugoj fazi se razmatra rešenje sa istom masom projektila, ali je početna brzina 2500 m/s, odnosno top ima efektivnu energiju 68,4 MJ. KE projektil treba da donese na cilj udaljen 430 km udarnu energiju od

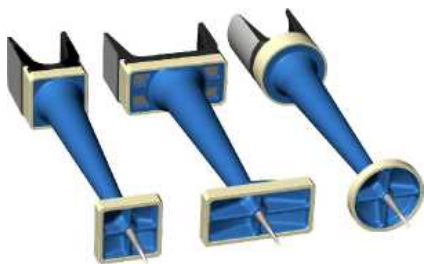
22 MJ.<sup>31</sup> Navedeni podaci odnose se na lansiranje KE projektila iz cevi kalibra 146 mm, a dužine 8760 mm (odnosno cev dužine 60 kalibara, što je uobičajen odnos za cevi brodskih topova –  $L/d = 60$ ).



Slika 9 – Izgled preseka cevi šinskog EM topa [17]



Slika 10 – Optimizacija oblika preseka cevi [18]



Slika 11 – Optimizacija oblika EM projektila [18]



Slika 12 – Delovi sklopa KE projektila za EM top

Gađanje ciljeva na tako velikim dometima moglo bi da bude opravdano samo ako iz EM topa može da se lansira i projektil napunjen eksplozivom (razorni projektil), te ohrabruje podatak da se ta mogućnost razmatra u više radova [19], [20]. Pod uslovima lansiranja KE projektila navedene efektivne energije u radu [19] razmišlja se o lansiranju razornog projektila mase 60 kg. Jedan od ozbiljnih problema koje treba rešiti je smanjenje nivoa maksimalnog ubrzanja koje trpi projektil lansiran brzinama oko 2500 m/s. Proračunski nivo maksimalnog ubrzanja razmatranog KE projektila je reda veličine oko 47 500 g, pa se kaže da treba smanjiti nivo ubrzanja na oko 33 000 g [19]. Inače, nivo maksimalnog ubrzanja

<sup>31</sup> Ako su proračuni autora dobri, udarna brzina na cilju bila bi 1417 m/s. Ipak, postavlja se pitanje da li i kakav ubojni efekat može da ostvari KE projektil na tako velikom dometu i na cilj kao što je brod?

pri lansiranju razornih projektila 155 mm iz savremenih klasičnih artiljerijskih oruđa je oko 18 000 g, što nameće potrebu da se pristupi razvoju novih vrsta upaljača i tehnologija laboracije eksploziva u razornim projektilima namenjenim za korišćenje u EM topovima.

U sistem budućeg broskog EM topa biće integrisani broski i zemaljski osmatrački radari za otkrivanje ciljeva. Razorni projektil će se navoditi na cilj pomoću satelita GPS tehnologijom sa projektovanom tačnošću od 5 metara. Vreme leta projektila do cilja udaljenog skoro 400 km je oko 6 minuta.

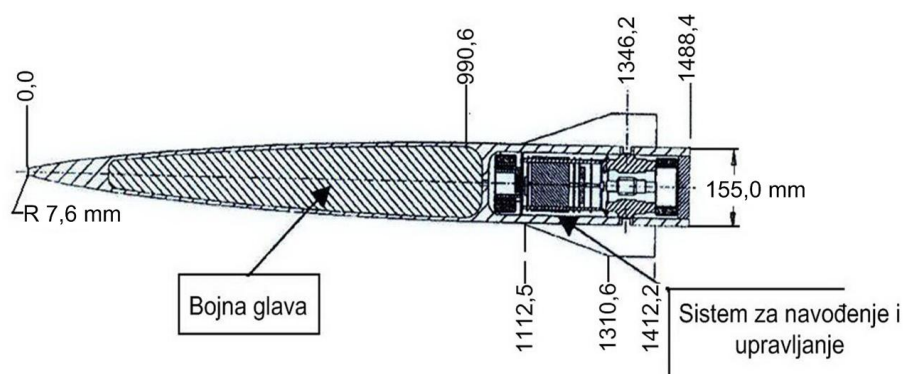
Kada je u pitanju lansiranje razornih projektila, vredan pažnje je rad [20]. Analiza je sprovedena za projekte letne mase 15, 30, 60 i 75 kg, koji se lansiraju početnim brzinama od 2000 m/s do 3000 m/s, iz solenoidnog EM topa dužine cevi 15 m i 20 m. Na primeru projektila letne mase 60 kg daju se vrlo korisni podaci o „parazitskim masama“, a to su masa armature provodnika (17,4 kg) i masa nosača armature (17,3 kg), te je ukupna masa projektila u cevi 94,7 kg. U cevi dužine 15 m predmetni projektil mase 94,7 kg sa ubrzanjem od 13 000 g se do usta cevi ubrzava za 17,6 ms do vrednosti početne brzine od 1900 m/s. Efekti balističkog proračuna navedeni su u tabeli 2.

Tabela 2

Izvod iz balističkog projektovanja za razorne projekte mase 15 kg do 75 kg

Masa projektila, kg	Cev dužine 15 m		Cev dužine 20 m	
	Vo, m/s	Domet, km	Vo, m/s	Domet, km
15	2550	338	3000	520
30	2230	276	2530	390
60	1800	188	2000	245
75	1700	172	1900	220

Koristeći podatke iz radova [19] i [20] moglo bi se posredno pretpostaviti da bi razorni projektil 155 mm, mase 60 kg iz cevi broskog topa dužine L60 bio ispaljen sa početnom brzinom 1510 m/s. Grubom interpolacijom domet bi bio oko 130 km.



Slika 13 – Referentni projektil 155 mm mase 60 kg. U delu iza bojne glave smešten je sistem za navođenje i upravljanje

Prema procenama koje se javljaju u radovima objavljenim pre nekoliko godina, na primer [19], cena jednog KE projektila mogla bi da bude 5000 USD do 10 000 USD, zavisno od veličine efektivne energije. Imajući to u vidu, procena autora ovoga rada je da bi cena razornog projektila 155 mm, sa odgovarajućim sistemom za vođenje i upravljanje, mogla da bude od 40 000 do 45 000 USD.

## Zaključak

Konvencionalni top je „toplotna mašina“ sa pouzdanom konverzijom primarne (toplotne) energije barutnog punjenja u mehaničku energiju klasičnog projektila, uz prihvatljiv koeficijent korisnosti (oko 30%). EM top zahteva da se tri puta vrši konverzija primarne energije u mehaničku energiju projektila, a posledica toga je da takva „mašina“ ima manji koeficijent korisnosti (oko 5% do 7%) i smanjenu pouzdanost osnovne funkcije.

Tokom poslednje dve dekade prošlog veka veoma intenzivno se radilo na razvoju tenkovskog EM topa. Jedno vreme se smatralo da će veću šansu za ugradnju u tenk imati ET ili ET-H topovi, jer je njihova prednost (u odnosu na šinski EM top) manja električna energija potrebna za lansiranje projektila, pa time i lakše akumuliranje energije u ograničenom prostoru tenka. Na osnovu analize izvršene u ovom radu zaključak je da će se odustati od ideje naoružavanja tenka EM topom bilo kojeg tipa, jer je više nego očigledno da se u tenku prihvatljive siluete, gabarita i mase ne može obezbediti zapremina za ugradnju pogonske grupe snage veće od 6 MW (što je znatno više od postojećih 1,1 MW na savremenim tenkovima).

Razvoj i ispitivanje funkcionalnih modela brodskih EM topova su tokom protekle dekade bili vrlo intenzivni i uglavnom uspešni (sa stanovišta provere principa dejstva). Za narednu fazu – projektovanje borbenog sistema EM topa, može se konstatovati:

- brod kao platforma rešava dva vitalna zahteva za mogućnost operativne upotrebe: poseduje pogonsku grupu velike moći, na razaračima čak i preko 70 MW; ne postoje ograničenja, sa stanovišta mase i prostora, za smeštaj snažnog EM topa nominalne energije 64 MJ;

- u postupku daljeg razvoja treba rešavati tehnička i konstrukciona pitanja bitna za projektovanje pojedinih sklopova i komponenata (sklop cevi, sklop projektila, sklop upaljača za razorne projekte, sklop punjača za postavljanje projektila u lansirnu cev koji bi obezbedio zahtevane brzine gađanja, sklopovi pokretanja cevi po elevaciji i pravcu, sklopovi akumuliranja potrebne električne energije, sklopovi električnog interfejsa za funkciju EM topa);

- konačno, za donošenje odluke za uvođenje broskog EM topa u operativnu upotrebu treba sačiniti ozbiljnu analizu cena – efikasnost, upoređivanjem izvršenja postavljenih zadataka na dometima preko 400 km sa drugim naoružanjem, na primer, vođenim raketnim sistemima.



Ne pretendujući da raspolažu sa dovoljno podataka, znanja i iskustva u oblasti EM lansiranja projektila, inspirisani radovima i iskustvima onih koji su u ovu temu direktno uključeni (radovi [19], [20], [21]), autori ovoga rada zaključuju (iako se oni u mnogim procenama razlikuju od navoda u korišćenoj literaturi):

- u doglednoj budućnosti (bar 30 do 40 narednih godina) konvencionalni top (pogon na barut) i dalje će biti „ultima ratio regum“,<sup>32</sup> odnosno nosilac vatrene podrške kopnene vojske;

- EM top neće biti primenjen kao naoružanje osnovnog borbenog tenka. Ukoliko se, ipak, ponovo pokrene razvoj lovca tenkova naoružanog samo KE projektilima srednjeg kalibra (75 mm do 90 mm) moguća je eventualna primena EM topa energije oko 8 MJ, sa performansama probijanja oklopa sličnim onima koje ima konvencionalni top sa KE projektilom tipa APDSFS sa jezgrom od teškog metala;

- realna je mogućnost da se EM top uvede u operativnu upotrebu ugradnjom na brodske platforme i to za slučaj da se pored KE projektila uvede u upotrebu i razorni projektil, uz pretpostavku da budu rešeni svi tehnički problemi (navedeni u ovom radu) bitni za pouzdanu i bezbednu funkciju te vrste projektila;

- moguća je pretpostavka da će u operativnu upotrebu najverovatnije biti uveden brodski EM top kalibra 155 mm, sa dužinom cevi 60 kalibara, za dejstvo na dometima od oko 120 km. Šansa više za takvo rešenje je povratak na staru ideju odbrane strateških objekata stacionarnom/obalskom artiljerijom, ali sada korišćenjem topova sa EM pogonom (ukoliko se analizom cena – efikasnost potvrdi pretpostavka da su to najefektivnija borbena sredstva);

- optimistička procena je da će se eventualno uvođenja budućeg broskog EM topa u operativnu upotrebu desiti tek posle 2030. godine.

### Literatura

[1] Ristić, Z., Ilić, S., Kari, A., Karakteristike trzanja elektromagnetskog topa, Vojnotehnički glasnik br. 4/2009, ISSN 0042-8469 Beograd.

[2] Paligorić, A., Ilić, R., Marjanović, B., Savremeni uređaji za ispaljivanje projektila velikim i vrlo velikim brzinama, Naučno-tehnički pregled, volumen XXXVIII, broj 10, Beograd, 1988.

[3] Schmidt, E. M. – Comparison of the recoil of conventional and electromagnetic cannon, Shock and Vibration 8, 2001, IOS Press.

[4] Jandrić, M., Elektromagnetni topovi, Kumulativna naučno-tehnička informacija, VTI, Beograd, 1993.

[5] Ogorkievicz, R. M, Future tanks guns – Part I: Solid and liquid propellant guns, International Defense Review, No 12, 1990.

[6] Fletcher, R., The case for the Raisable Tank Gun, Military Technology, No. 10, 1991.

<sup>32</sup> Parafraza čuvene izreke Luja XV, ispisana na francuskim srednjevekovnim topovima.

[7] Zukas, A. J. i drugi, Dinamika udara, pronikanie i probivanje tverdyh tel, Izdateljstvo MIR, Moskva, 1985.

[8] Drosen, H. Erich, Aspects of Modern Tank Design, Military Technology, No. 10, 1990.

[9] Ogorkievicz, R. M. Future tank guns – Part II: Electromagnetic and electrothermal guns, International Defense Review, No 1, 1991.

[10] Compulsators, internet pretraživanje, februar 2010.

[11] Navy electromagnetic rail gun, više izvora dobijenih Internet pretraživanjem, januar– februar 2010.

[12] Fanney, R., Navy fires EM cannon, internet pretraživanje, januar–februar 2010.

[13] Sofge, E., For true sci-fi fans, 14.11.2007., internet pretraživanje, februar 2010.

[14] Bishoni, R., Navy Rail Gun moves forward, 2.02.2007, internet pretraživanje, februar 2010.

[15] Page, L., US Navy orders new electric hyper kill Rail Gun, 11.02.2009, internet pretraživanje, februar 2010.

[16] Satapathy, S. & others - Design of an 8MJ Integrated Launch Package, IEEE No. 1, 2005.

[17] Tzeng, J. & Schmidt, E., Advanced materials bring EM gun technology one step closer to the battlefield, AMPTIAC Quatterly, No 4, 2004.

[18] Ellis, R. L. & others, Influence of bore and rail geometry on an EM naval railgun system, IEEE, 2004.

[19] McFarland, J. & McNab, I., A long range naval gun, IEEE, No1. 2003.

[20] Shope, S. & others, Results of a study for a long range coilgun naval bombardment system, 10th U. S. Army gun dynamics Symposium, 23–26 april, 2001, in Austin, Texas.

[21] Marshall, R., Railgunery: Where nave we been? Where are we going?, IEEE No. 1, 2001.

#### ELECTROMAGNETIC GUN

– Still just a research project or the reality of the operational use

##### *Abstract:*

*For more than a century researchers in many countries have been engaged in research and development of electromagnetic (EM) guns in order to launch projectiles with very high speed. In published sources many papers are related to theoretical considerations of certain phenomena of electrically driven projectiles and hardware solutions for electrical devices and components required for projectile launching. The works related to the philosophy of combat use, the concept of solutions and possibilities of application of such weapon systems are, however, less available to the public. The intention of the authors of this paper is to point out the basic problems of designing such wea-*



pon systems, and to give the readers the information on the basis of which they can assess whether it is possible, when and on what kind of platform for the EM gun to be approved for the operational use.

#### Introduction

*The intention of the authors is to present to the VTG readers an overview of the status of development and operational capabilities of electromagnetic guns (EM guns), as well as to present an opinion on the subject which for more than a century intrigues imagination and knowledge of the inventors: would the EM gun leave the laboratories to be used as an armament for land forces or navy combat systems, or as a component in the future space war inventory? This article deals only with the energetic aspect and conditions of creating required projectile kinetic energy. The fields of gun dynamics during projectile launching and target effectiveness are not analyzed.*

#### Tendencies in the development of propulsion and projectiles of conventional weapons

*This chapter contains the analysis of current classic fire support artillery weapons and tank guns to prove that the powder propellant is applicable for ballistic solutions allowing muzzle velocities with High-Explosive (HE) and Armor-Piercing Discarding Sabot Fin-Stabilized (APDSFS) projectiles based on kinetic energy (KE projectiles) up to 2000 m/s. Also, it briefly refers to the research of new types of propulsion to achieve higher initial velocity of the projectiles, states that there have been failed attempts (for now) to introduce liquid propellant and light gases, and that the research continues in the field of electromagnetic propulsion. A tabular overview of the most successful conventional solutions of tank guns is given to explain the level of realized muzzle energy of kinetic projectiles (up to 13 MJ).*

#### Basic principles of EM gun functioning

*The basic principles of the action of electromagnetic rail guns and coil guns are given, as well as the reasons why the research in the field of electro-thermal (ET) and electro-thermal-chemical guns (in order to obtain necessary propelling energy for projectiles in the process of chemical reactions), which began later, has been listed.*

#### Defining the requirements for the design of tank EM gun

*The paper analyzes the status and experiences of development in the world of the mid-80s of the last century suggesting the possibility of the EM gun to be mounted on armoured vehicles, especially tanks, in order to increase the impact energy on the target (KE projectile perforation ratio). The paper gives a proposal for project requirements: the energy required to launch a KE projectile; equipment required for the accumulation of electric power necessary for the execution of the wanted firing regimes; and power ratio of the vehicle power pack as a source of primary energy.*

#### Analysis of the possibilities of mounting EM gun on a battle tank

*Judging by the state of the development of EM gun laboratory models, realized in the last two decades of the past century, as well as by the fact that the expected technological progress in developing new generation of compulsators and high density capacitors has not been achieved, it can be concluded that there is no real possibility of mounting an EM gun onto the last generation battle tanks. The requirements defined in the previous chapter conclude that the required power of the power pack for an EM tank gun must be greater than 6000 kW. Unfortunately, available space in the tank hull is 5 to 6 times smaller than the volume needed to accommodate a new 6000 kW power pack.*

#### Ship as a platform for mounting an EM gun

*In the period after the year 2000, American engineers started a research in order to design a functional model of an electromagnetic naval rail gun (based on the experience gained during the development of the tank EM gun). The reasons are more than obvious - the ship is (compared to the tank) an adequate platform for mounting a large and complex functional model of the EM gun, and marine engine power is significantly greater than tank engines power (therefore, it is much easier to solve the demand for the necessary primary power).*

*The status of the development of a future naval EM gun, which is in development by the U.S. Navy and Army jointly, is given in details. Development programs include a number of laboratory EM guns having effective kinetic energy of 2 to 64 MJ and the ultimate goal is the development of guns of 64 MJ for the ranges over 200 miles (>360 km). So far, an EM gun of 8 MJ effective energy has been successfully tested, and the examination of the 32 MJ EM gun is planned during year 2011.*

*Significant progress has been made in the design of the barrel assembly and the assembly of the KE projectile, and the development of the HE projectile is indicated as being necessary (after solving the technical problems of the development of the fuze exposed to acceleration twice larger than the acceleration of the projectile in conventional guns). However, the development of electric generators and components of EM guns is still not at the level acceptable for operational use.*

#### Conclusion

*A conventional gun is a weapon with reliable function and simple conversion of primary energy (chemical energy of powder) into mechanical energy of movement of classical projectiles, with an acceptable coefficient of utility (30%). In contrast, an EM gun requires three conversions of primary energy into the mechanical energy of an EM projectile. Therefore, it has a lower utility ratio of primary energy (about 5% to 7%) and reduced reliability of basic functions. In due time in the future (for at least 30 to 40 next years) a conventional gun (with powder propellant) will thus still be a carrier of fire support for land forces.*

*Based on the analysis made in this paper, the conclusion is that the idea of the tank armed with an EM gun of any type is going to be abandoned, because it is more than obvious that a tank of acceptable silhouettes, dimensions and weight may not provide the volume for mounting the power pack requiring a power of 6000 kW.*

*The development of functional models of naval EM guns over the past decade was very intense and largely successful. Ships as platforms address two vital requirements for the possibility of operational use of EM guns: they already have the power pack of high power ratio, even over 70 MW; and there are no restrictions, from the standpoint of weight and space, to accommodate a strong EM gun of effective kinetic energy of 64 MJ.*

*If HE projectiles, besides KE projectiles, are introduced, the possibility to see the system of naval EM gun in operational use is real, assuming that all technical issues important for a reliable and safe function of this type of projectiles have been previously resolved.*

*Prior to the decision about the introduction of naval EM guns in operational use, a serious analysis should be carried out on the cost-effectiveness, comparing the performance of combat tasks and missions (for ranges > 360 km) with other weapons, such as existing long range missile systems.*

*The authors of this paper suggest that the future naval EM gun of 155 mm calibre has the highest probability of entering the operational use for the ranges of about 120 km.*

*Finally, the optimistic estimate is that the possible introduction of future naval EM guns in operational use will occur after the year 2030.*

*Keywords: artillery weapon, conventional gun, electromagnetic gun, EM gun, EM rail gun, EM coil gun, electro-thermal gun, tank EM gun, naval EM gun, generator, capacitor, compulsator, APDSFS projectile, KE projectile, HE projectile.*

Datum prijema članka: 17. 03. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 02. 04. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 04. 04. 2010.