

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

ELEKTROMAGNEETTINEN RAIDETYKKI

Kandidaattitutkielma

Kadetti
Christian Anttoni Andersson

Kadettikurssi 99
Kenttätykistö

Maaliskuu 2015

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Kadettikurssi 99	Linja Kenttätykistö
Tekijä Kadetti Christian Anttoni Andersson	
Tutkielman nimi Elektromagneettinen raidetykki	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika Maaliskuu 2015	Tekstisivuja 30 Liitesivuja 3
TIIVISTELMÄ Elektromagneettinen raidetykki on tulevaisuuden ase, joka on tällä hetkellä kehitysvaiheessa. Magneettisen propulsiovoiman ansiosta tykki kykenee saavuttamaan merkittävän pitkiä ampumaetäisyyksiä hyödyntämällä pelkästään sähköä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää elektromagneettisen tykin yleisrakenteet ja toiminta. Tutkimuksen pääkysymys ja sen alakysymykset ovat: <ul style="list-style-type: none">- Mikä elektromagneettinen tykki on, ja miten se toimii?- Millainen on elektromagneettisen raidetykin rakenne?- Mitkä ovat elektromagneettisen raidetykin mahdolliset käyttösovellukset? Tutkimus on tekniikan työlle tyypillinen kvalitatiivinen, kartoittava kirjallinen selvitys. Työssä kerättiin aiheesta aiemmin tuotettua tietoa. Koska kyseisestä asejärjestelmästä ei ole vielä tehty tutkimusta, joka kokoaisi ja käsitteisi aseiden rakenteita ja toimintatapaa yleisellä tasolla ja suomeksi, on tämä tutkimus ensimmäinen laatuaan. Tutkimuksen johtopäätöksistä voidaan huomata, että asejärjestelmä poikkeaa hyvin paljon perinteisistä ruudilla toimivista tykeistä. Elektromagneettinen raidetykki on tulevaisuuden ase, joka saattaa mullistaa taistelulentä tarkkuudellaan, kantamallaan ja tuhovoimallaan.	
AVAINSANAT Elektromagneettinen, raidetykki, Lorentzin voima, raiteet, tykki, kompulsattori, Blitzer, EMRG	

ELEKTROMAGNEETTINEN RAIDETYKKI

1. JOHDANTO	1
1.1. TUTKIMUSONGELMA, TUTKIMUSMENETELMÄT JA VIITEKEHYKSEN RAJAUKSET SEKÄ NÄKÖKULMA.....	2
1.2. ASEJÄRJESTELMÄN HISTORIA	3
2. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN TOIMINTAPERIAATTEET	4
2.1. RAJAUS	4
2.2. LORENTZIN VOIMA	4
2.3. BIOT’N JA SAVARTIN SEKÄ AMPÈREN LAIT	5
3. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN RAKENNE	7
3.1. MIKÄ ON ELEKTROMAGNEETTINEN RAIDETYKKI?	7
3.2. TYKIN PUTKI	8
3.3. RAITEET	15
3.4. AMMUS	18
3.5. ENERGIALÄHDE	22
4. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN KEHITTÄMINEN JA HAASTEET SEKÄ MUUT KÄYTTÖSOVELLUKSET	25
4.1. TÄMÄN HETKISET KEHITYSTARPEET JA HAASTEET	25
4.2. JÄRJESTELMÄN MUUT KÄYTTÖSOVELLUKSET	26
5. PÄÄTELMÄT	28

LÄHTEET

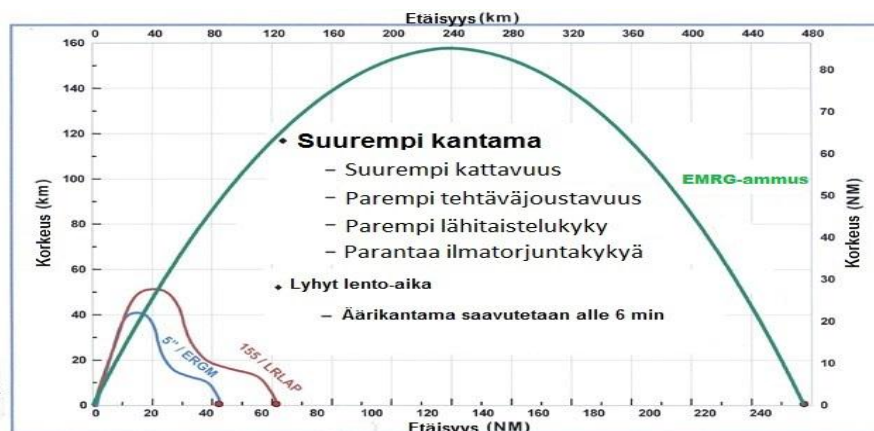
LIITEET

ELEKTROMAGNEETTINEN RAIDETYKKI

1. JOHDANTO

Elektromagneettisen raidetykin rakenne on yksinkertainen, mutta samalla ase on tekniikan huippua. Rakenteidensa ja toimintaperiaatteensa ansiosta raidetykki eroaa huomattavasti perinteisistä tykeistä. Magneettisen propulsiovoiman ansiosta ammuksen lähtönopeudet nousevat 5-8 Machiin asti, minkä ansiosta tykki kykenee haastamaan parhaat ohjustorjuntajärjestelmät ja jopa ohjukset ammuksensa nopeudella sekä tarkkuudella, johon perinteiset tykit eivät kykene [1]. Toinen tykin erikoisuus on sen ammus, joka ei sisällä minkäänlaisia räjähdettäviä aineita, vaan aseensa tuhovoima perustuu kineettiseen energiaan, jonka se saa ammuksen suuresta nopeudesta [1;2].

Elektromagneettinen raidetykki (Electromagnetic Railgun, EMRG) on tulevaisuuden ase, joka on tällä hetkellä kehitysvaiheessa. Yhdysvallat on suunnitellut asentavansa ensimmäiset elektromagneettiset raidetykit operatiiviseen käyttöön uusimpaan Zumwalt-luokan (DDG-1000) hävittäjäänsä vuoteen 2030 mennessä [1;3]. Raidetykillä on mahdollista saavuttaa merkittävän pitkiä ampumaetäisyyksiä, jopa yli 400 km, hyödyntäen pelkästään sähköä [1]. Kuvassa 1 on esitetty EMRG:n kantaman ero perinteisiin tykkeihin verrattuna.



Kuva 1. Kantamien erot [1]

Elektromagneettinen raidetykki on ase, joka käyttää sähköllä tuotettuja magneettikenttiä, ja tekee tarpeettomaksi räjähdeaineiden (esim. ruudin) käytön ammuksen propulsiojärjestelmänä. Myös ampumatarvikkeiden säilytysaika pitenee [1;2].

On tärkeää selvittää elektromagneettisen raidetykin rakenne ja tekninen toiminta sen perustana, jotta voitaisiin ymmärtää ja havaita aseiden kehitysnäkymät. Koska ase saattaa mullistaa niin laivaston kuin tykistönkin toiminnan, on tärkeää selvittää, miksi ja miten raidetykki tulee sen mahdollisesti tekemään.

1.1. TUTKIMUSONGELMA, TUTKIMUSMENETELMÄT JA VIITEKEHYKSEN RAJAUKSET SEKÄ NÄKÖKULMA

Tässä tutkimuksessa tutkimusmenetelmänä käytetään kvalitatiivista aineistoanalyysiä eli kirjallista selvitystä, jossa etsitään, analysoidaan, luokitellaan ja käytetään tutkimuksen pohjana aikaisemmin tuotettua tietoa [4]. Kirjallisen selvityksen tukena käytetään teoreettista selvitystä. Koska kyseisestä asejärjestelmästä ei ole vielä tehty tutkimusta, joka kokoaisi ja käsitelisi aseiden rakenteita ja toimintatapaa yleisellä tasolla ja suomeksi, on tämä tutkimus ensimmäinen laatuaan.

Tutkimuksen pääkysymys on:

- Mikä elektromagneettinen raidetykki on, ja miten se toimii?

Tutkimuksen alakysymykset ovat:

- Millainen on elektromagneettisen raidetykin rakenne?
- Mitkä ovat elektromagneettisen raidetykin mahdolliset käyttösovellukset?

Näkökulmana on tarkastella perusrakenteita ja fysikaalisia malleja, joiden perusteella ase toimii. Elektromagneettisen raidetykin toiminta on erilainen verrattuna aseisiin, joiden propulsiovoima aiheutuu kaasujen laajenemisesta, kun taas kyseisessä asejärjestelmässä vaadittava propulsiovoima tuotetaan sähköä ja magneettikenttien avulla.

Raideaseiden teknologisten ominaisuuksien ja ratkaisujen päälähteinä ovat IEEE -artikkelit (Institute of Electrical and Electronics Engineers), jotka sinänsä jo ovat altistuneet tieteelliselle kritiikille. Tämän vuoksi ne ovat keskimääräistä luotettavampia. Näitten artikkeleiden perusteella pyrin selittämään aseiden eri komponentit ja toimintatavat. Artikkeleiden tukena käytän myös erillisiä patenttien kuvauksia, tutkimuksia ja analyyssejä, joita aseesta on laadittu sen jatkokehitystä varten. Raideaseiden taktisten ja sotateknisten ominaisuuksien osalta päälähteinä ovat IHS Jane's -artikkelit, joiden sotateknisten tietojen luotettavuus on hyvä, sillä nämäkin artikkelit ovat jo altistuneet kriittiselle tarkastelulle ennen julkaisemistaan. IHS Jane's -artikkelit tukevat ja täydentävät tutkimusta, sillä niistä löytyvät aseiden yleiset tiedot, ja tavoitteet, jotka aseelle on määritelty. Valmistajien teknistä materiaalia ei ollut julkisista lähteistä saatavilla. Fysiikan teoriaosuudessa käytän hyväksi sähköön ja magnetismiin liittyviä oppikirjoja ja internetluentoja, jotta teoriat olisivat mahdollisimman selkeästi ja yksinkertaisesti selitettävissä, ja ne voitaisiin liittää helposti aseiden toimintaan.

1.2. ASEJÄRJESTELMÄN HISTORIA

Vaikka ase vaikuttaa varsin tuoreelta keksinnöltä, sitä se ei ole. Ensimmäinen tunnettu tieteellinen maininta EMRG:stä on tehty vuonna 1845, jolloin asiasta mainitsi professori Page Washington DC:n Columbian yliopistossa vain 10 vuotta Faradayn sähkö tutkimusten jälkeen [5, s.1760]. Ensimmäinen patentti raidetykistä on norjalaisella keksijällä Birkelandilla. Hän perusti yhtiön hyödyntääkseen raidetykin teknologiaa, ja onnistui testaamaan 4-metrinen tykinensä vuonna 1902. Julkinen esitys vuonna 1903 ei kuitenkaan täyttänyt yleisön odotuksia.[5]

Aseiden kehitystä jatkettiin seuraavan kerran vasta toisen maailmansodan aikana natsi-Saksassa, ja silloin aseiden tarkoituksena oli torjua korkealla lentäviä pommikoneita. Saksalaisversio aseesta suunniteltiin, mutta sitä ei koskaan ehditty rakentaa. Kehitysryhmää johti Joachim Hänsler, ja hänen suunnittelemansa tykinpiipun rakenteeseen perustuvat nykypäivän EMRG:t.[5]

Toisen maailmansodan jälkeen kiinnostus asetta kohtaan hävisi. Vasta 1960-luvun puolivälissä Australian kansallisessa yliopistossa alettiin tutkia raidetykkiä uudestaan meteoriittitörmäystutkimuksia varten. Tykin uudelleenkehitys alkoi kiinnostaa muun muassa Yhdysvallat, Venäjää ja Kiinaa, jotka sittemmin ovat tutkineet tykin käyttöominaisuuksia sotilaskäytössä.[5]

2. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN TOIMINTAPERI- AATTEET

2.1. RAJAUS

Johtuen asean rakenteesta ja sen toimintamekanismin erillisyydestä verrattuna tavallisiin ruutikaasulla toimiviin tykkeihin on hyvä ymmärtää perusilmiöt, jotka vallitsevat asean toiminnassa. Koska aseessa käytetään suuria sähkövirtoja ja magneettikenttiä, on hyvä ymmärtää niitten välinen suhde sekä se, miten ne vaikuttavat asean toimintaan. Täten en esitä teorioita laajasti, vaan lähinnä esittelen vallitsevat sähkömagneettiset ilmiöt. En käsittele termodynamiikkaa erillisenä kappaleena, vaan osana raiteiden rakenneongelmia, sillä on muutenkin selvää, että suurten nopeuksien ja sähkövirtojen yhteydessä syntyy paljon lämpöä ja kulumaa.

2.2. LORENTZIN VOIMA

Lorentzin voimalla on tärkeä rooli asean toiminnassa, koska magneettikenttä muodostetaan aseessa sähköisesti, ja tämä elektromagneettinen kenttä työntää ammusta eteenpäin. Seuraavan yhtälön avulla voidaan laskea voima, joka muodostuu sähkövirrasta, ja samalla pystytään laskemaan voima, joka vaikuttaa tykin piipun rakenteisiin ja raiteisiin. Lorentzin voima on sähkömagneettisen kentän varattuun hiukkaseen aiheuttama voima [6]. Tästä saadaan Lorentzin voiman yhtälö:

$$F = q(E + v \times B) \quad (2.1)$$

Yhtälössä F on voima newtoneina, q on hiukkasen sähkövaraus, E on sähkökentän voimakkuus, v hiukkasen hetkellinen nopeus ja B magneettivuon tiheys. Jos halutaan laskea voima, joka aiheutuu sähkövirrasta raiteessa, muodostuu yhtälö seuraavanlaiseksi:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_d dt = dl \quad (2.3)$$

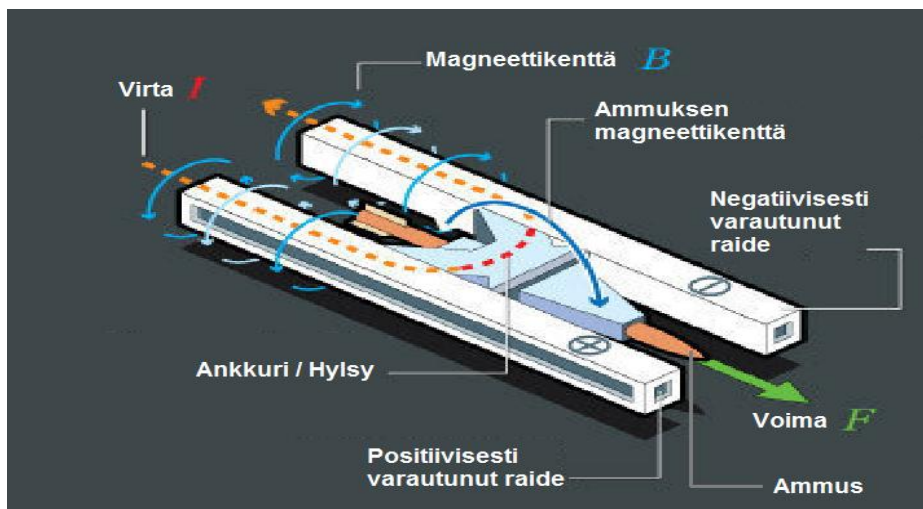
Kun asetetaan yhtälö (2.2) yhtälöön (2.1) saadaan:

$$dF = Idt(v_d \times B) \quad (2.4)$$

On otettava huomioon myös raiteen pituus, ja näin on asetettava yhtälö (2.3) yhtälöön (2.4). Edellävät yhtälöt integroidaan raiteen pituudella, jolloin saadaan vastaukseksi voiman määrä ja seuraava yhtälö:

$$F = I \int (dl \times B) \quad (2.5)$$

Huomioon on otettava niiden magneettikenttien suunnat, jotka muodostuvat sähkövirran virtaussuunnasta. Kun sähkövirrat virtaavat eri suuntiin, muodostuvat magneettikentät, jotka hylkivät toisiaan. Täten myös raiteet hylkivät toisiaan, mutta koska ne ovat vahvasti kiinnitetty paikoilleen, kohdistuu voima F ankkuriin. Näin ankkuri saa suuren nopeutensa. Tämä kaikki voidaan havainnollistaa seuraavalla kuvalla 2:



Kuva 2. Lorentzin voiman toiminta tykissä [7]

2.3. BIOT’N JA SAVARTIN SEKÄ AMPÈREN LAIT

Lorentzin yhtälön lisäksi tarvitaan vielä Biot’n ja Savartin lakia selittämään toimintaa tykin putken sisällä. Biot’n ja Savartin lain avulla voidaan laskea sen voiman määrä, joka aseeseen vaikuttaa, sekä tarvittava virran määrä toivotun lähtönopeuden saavuttamiseksi. Aseen putken sisällä syntyvä voima F voidaan laskea matemaattisesti. Seuraavien kaavojen avulla johdetaan aseiden voimien toimintaa yksinkertaistetusti esittävä kaava.

Laskukaavaa magneettikentälle B , joka muodostuu kohdassa r virran I avulla, kutsutaan Biot’n ja Savartin laiksi:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \times \left[\frac{r-r'}{|r-r'|} \right]}{|r-r'|^2} \quad (2.6)$$

Tässä mallissa on huomioitava, että dl on aina kohtisuorassa B suhteen, mikä sallii ristitulon muuntamisen tavalliseksi yhtälöksi. On otettava huomioon myös oikean käden sääntö [8]. Näin voidaan laskea voiman differentiaali dF :

$$dF = I \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi(R+s)} + \frac{\mu_0 I}{4\pi(R+w-s)} \right) dl \hat{z} \quad (2.7)$$

Tästä voidaan johtaa seuraava yhtälö, jonka perusteella voidaan laskea ammuksen vaikuttava kokonaisvoima:

$$\begin{aligned} F &= \int_0^w \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left(\frac{1}{(R+s)} + \frac{1}{(R+w-s)} \right) ds \hat{z} \\ &= \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \left(\frac{R+w}{R} \right) \hat{z} \\ &= \frac{1}{2} L I^2 \hat{z} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Liitteessä 1 on esitetty tässä alaluvussa esitettyjen kaavojen keskinäinen suhde sekä se, miten kaavat on johdettu.

Yhtälö (2.8) antaa arvion virtamäärästä, joka vaaditaan halutun voiman muodostamiseen ammukselle. Kun yhtälöön (2.8) yhdistetään virran I suhde aikaan t , voidaan laskea ammuksen loppunopeus ja energia [8]. Yhtälön (2.8) perusteella voidaan myös havaita, miten raiteet työntävät toisiaan erilleen Lorentzin voiman mukaisesti.

Tässä esityksessä on tehty paljon oletuksia, jotta kaavat ja laskut on saatu mahdollisimman yksinkertaiseen ja kattavaan muotoon. Oikea raidetykki käyttää näitä kaavoja, mutta niiden lisäksi myös mutkikkaampia integraaleja ja numeraalisia ratkaisuja.

3. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN RAKENNE

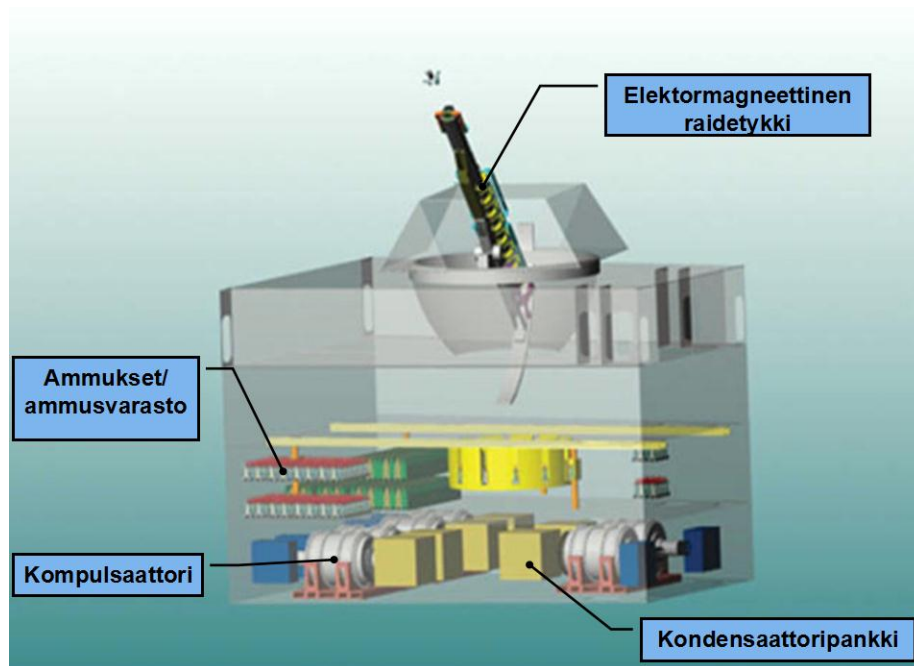
3.1. MIKÄ ON ELEKTROMAGNEETTINEN RAIDETYKKI?

Elektromagneettinen raidetykki on laite, joka hyödyntää elektromagneettista voimaa nimeltä Lorentzin voima kiihdyttääkseen ammuksen suuriin nopeuksiin[9]. Ase koostuu kahdesta rinnakkaisesta johtimesta eli raiteista, jotka yhdistetään ei-ferromagneettisesta aineesta tehdyllä johtimella, jota kutsutaan ankkuriksi. Ase toimii siten, että sähköinen energia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi, jonka avulla ammus kiihdytetään hypernopeuksiin. Ase käyttää hyväkseen magneettikenttää, joka syntyy sähkövirtauksesta raiteissa, ja virtausten avulla se kiihdyttää ammuksen raiteiden välissä. Sähkövirta luo virtapiirin, joka virtaa virtalähteestä yhtä raidetta pitkin, siitä ankkurin läpi ja takaisin toista raidetta pitkin laukaisten tykin. Mainittu sähkövirtaus luo erittäin suuria magneettikenttiä raiteiden väliin. Raiteet hylkivät toisiaan, mutta koska ne on kiinnitetty erittäin lujasti paikoilleen, tämä hylkivä voima välittyy ankkuriin, joka taas työntää ammusta. Työntövoima riippuu virran määrästä, raiteiden keskinäisestä etäisyydestä ja magneettikentän voimakkuudesta.[10]



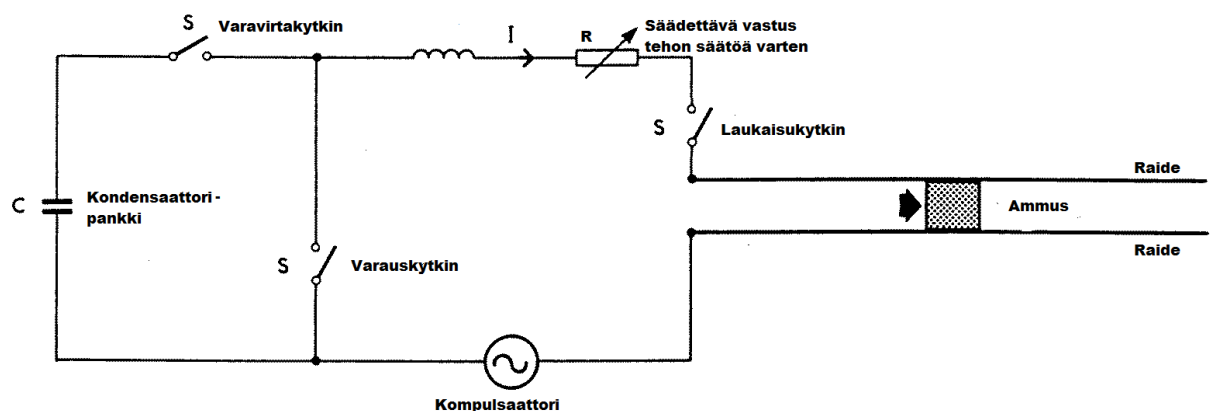
Kuva 3. General Atomics:in Blitzer 32 MJ ja 3 MJ raidetykit [11]

Aseen neljä olennaisinta komponenttia ovat putki, raiteet, ammus ja kompulsattori (energian lähde). Kuvassa 4 on esitetty komponenttien eri sijainnit laivan rakenteessa. Näiden osien keskinäiset toiminnat ja rakenteet vaikuttava tykin lopulliseen toimintaan. Osat tulee suunnitella hyvin tarkasti, jotta ne kestävät valtavat voimat (magneettikentät/kiihdytysvoimat) ja virtojen purkaukset, joita aseensa laukauksen yhteydessä ilmenee.



Kuva 4. Raidetykin eri komponentit laivassa [2]

Aseen kokonaisuus ja toiminta voidaan havainnollistaa yksinkertaisella piirikaaviokuvalla. Kuvassa 5 on esitetty hyvin yksinkertaisesti olennaisimmat komponentit ja niiden mahdolliset sijainnit piirissä.

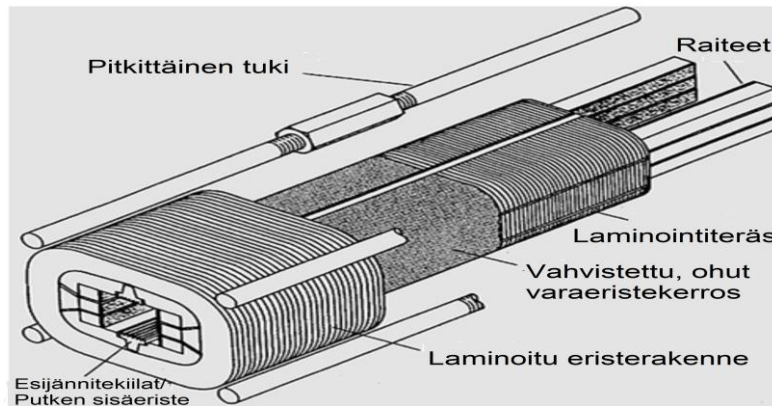


Kuva 5. EMRG:n yksinkertainen piirikaavio

3.2. TYKIN PUTKI

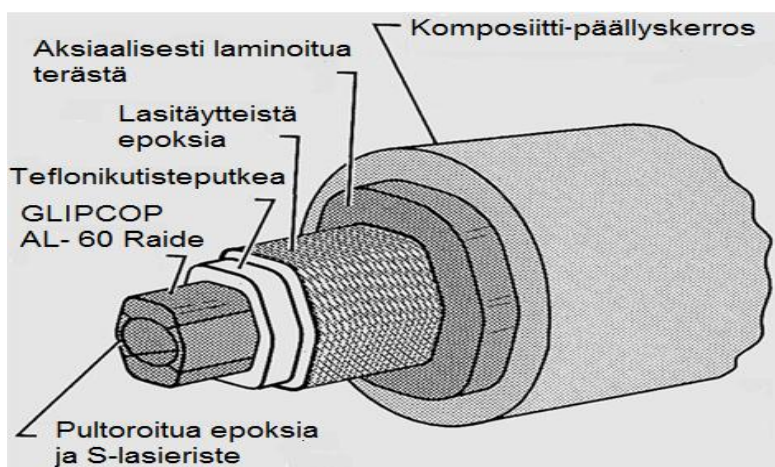
Viimeisimpien kahdenkymmenen vuoden aikana on monta erilaista elektromagneettista tykkiä rakennettu yliopistoissa, teollisuudessa ja valtioitten laboratorioissa. Laboratoriokäytössä olleiden tykkien pääasiallinen suunnittelunäkökanta on tähdännyt sähkön suorituskykyjen mittauksiin. Kyseisissä tykkimalleissa on hyvät ja huonot puolensa.[12] Viimeisten vuosien aikana rakennettujen EMRG -tykkien suunnittelun pohjana on käytetty jotakin seuraavista kolmesta mallista.

Mallissa 1 (kuva 6), joka on International Applied Physics:in (IAP) kehittämä versio tykistä, tykin putki on tehty laminoidusta teräksestä [12]. Monia teräslaminoituja tykinputkia käytetään laboratorioissa johtuen niiden hyvästä sähköhyötysuhteesta ja helposta kokoonpanosta (esim. raiteiden ja eristeiden vaihtomahdollisuus). Teräslaminoidun putken rakenne tarjoaa erittäin hyvän kehäjäykkyyden ja hyvän suljetun tilan raiteita sekä eristettä varten. Kyseiseltä mallilta kuitenkin puuttuu pitkittäissuuntainen jäykkyys, ja se on liian painava kenttäkäyttöön.[12]



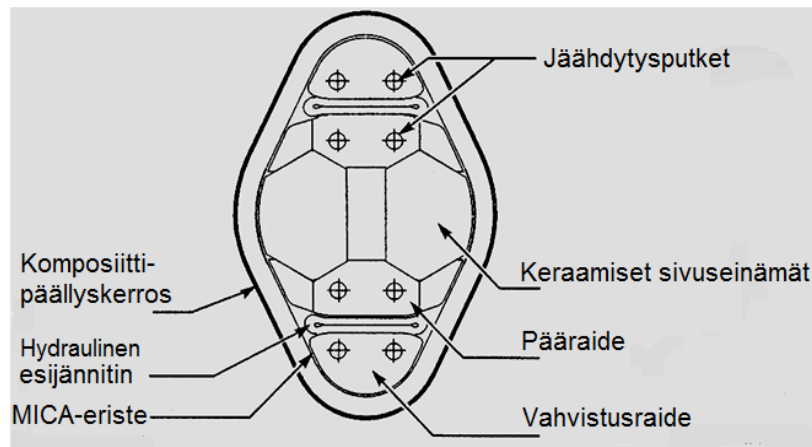
Kuva 6. IAP:n kehittämä raidetykki [12]

Malli 2 (kuva 7) on Center of Electromagnetic of the University of Texasin (CEM) kehittämä 90-millimetrinen ja 9MJ-tehoinen raidetykki. Tässä mallissa teräslaminoitu putki on kääritty polymeeri-komposiitti-kuoreen. Tämän tykin puutteet ovat vastaavat kuin teräslaminoidussa versiossa, eli pitkittäissuuntainen jäykkyys on huono. Mahdollinen vika aseessa voi ilmetä laminaatin ja teräsosien välissä esiintyvänä halkeiluna. Hyvänä voidaan pitää alhaisempaa painoa.[12]



Kuva 7. 9MJ Alue-tykin rakenne [12]

Kaliiperiltaan yli 130 mm EMRG -tykeissä (Cannon-Caliber ElectroMagnetic Gun CCEMG) käytetään esijännitejärjestelmiä. Ne tuottavat tarvittavan esijännitteen, jotta tykin rakenne pysyy ehjänä laukauksen aikana.[12] Tämän malliset tykit ovat osoittautuneet tähän mennessä kestävämmiksi ja kenttäkelpoisemmiksi kuin muut mallit. Kuvassa 8 on esitetty tämän tyyppin tykki.



Kuva 8. Tykki-kaliiperisen EMRG -tykin rakenne [12]

Pitkien tutkimusten jälkeen on saatu selville tekijät, jotka vaikuttavat aseiden toimivuuteen ja tehokkuuteen. Nämä ovat ankkurin eheys, putken suoruus ja putken jäykkyys. Vuodesta 1987 Texasin Austinin yliopistossa jäykillä ammuksilla suoritettujen ampumakokeiden tulokset osoittaneet, että yhden tai useamman yllämainitun tekijän puute johtaa epätoivottuun lopputulokseen.[13]

Yleinen suunnittelukriteeri EMRG -tykin putkelle on se, että putki kykenee vastustamaan mekaanisesti elektromagneettisia hylkimisvoimia mahdollistaen samalla johdingeometrian, jonka avulla saavutetaan korkea induktion nousu optimaalista laukaisutehoa varten. Jotta ase olisi kenttäkelpoinen, täytyy sen osien ja ankkurin rakenteiden olla sellaiset, että ne kestävät sähkömagneettisten voimien aiheuttamat rasitukset. Ankkurin siirtymisestä tai ankkurin liikkeestä johtuvasta kipinöinnistä aiheutuva sähkökontaktin häviäminen johtaa tehohäviöihin ja raiteiden ennenaikaiseen kulumiseen.[13]

Laboratorio-EMRG -tykit on rakennettu siten silmälläpitäen, että putken sisäiset komponentit olisi helppo vaihtaa. Tästä johtuen nämä tykit ovat olleet erittäin massiivisia tai uhranneet putkijäykkyyden huoltotoimenpiteiden helpottamiseksi. Huoltoa helpottava rakenteellinen suunnittelu voi olla syy siihen, että ase tarvitseekin enemmän huoltoa.[13]

Usea EMRG -tykki on rakennettu siten, että se sisältää komposiitti-päällyskerroksen, joka toimii ensisijaisena esikuormitusrakennelmana tehden aseesta entistäkin kenttäkelpoisemman. Suuri osa tykkimalleista on sisältänyt komposiittiputkia, mutta niissä malleissa, joissa on käytetty yhtä jatkuvaa komposiittiputkea runkona, on pyritty saavuttamaan määrätty runkoesijännite käyttämällä jonkinlaista sisäistä paine- tai latausmekanismeja (autofretointia). Komposiittirunkoisissa putkissa on käytetty usein useampaa esijännitysmekanismia [13]. Esimerkiksi General Atomics rakensi ja patentoi hydraulisen, suunnatun esijännittimen, jossa käytettiin sisäkumeja kuten kuvassa 8 [14].

Esijännitetty eli autofretoitu putki kuormitetaan paineella sisäpuolelta, jolloin putken seinämään syntyy pysyviä muutoksia. Kun putken sisäinen paine poistetaan, putkiseinämän ulommat kerrokset puristavat sisempiä kerroksia ja putken sisäpinta jää puristusjännitystilään. [15, s.199] Tällöin laukaisutapahtumassa syntyvän paineen on kumottava autofretointipaineen putken sisäpintaan aikaansaama puristusjännitys. Putken sisäpinnasta alkaa yhtälön (3.1) mukaisesti vetojännityksen alue eli putkea rasittava kokonaispaine p . [15]

$$p = p_s - p_a \quad (3.1)$$

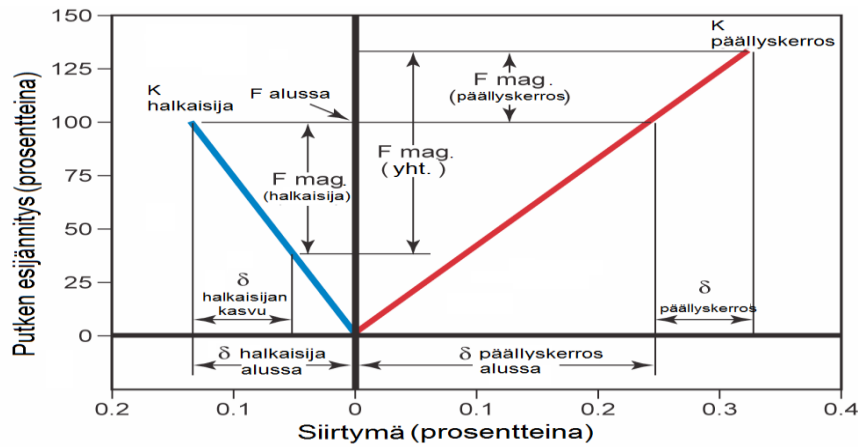
Jossa p_s on putken sisällä oleva paine ja p_a on autofretoinnin aikaansaama paine putken sisäpinnassa. Verratessa esijännitettyä putkea voidaan todeta, että ääriarituksessa esijännitetty putki kestää autofretointipaineen verran enemmän rasitusta taipumatta. Autofretointi sallii putkiseinämän ohentamisen ja sitä kautta tykin painon keventämisen. [15]

Kun putkea esijännitetään tarpeeksi, sen sivuseinämän rakenne osoittaa putkessa olevien sensoreiden avulla, kuinka paljon raiteet tulevat liikkumaan erilleen toisistaan, kun ase laukaitaan. Kun ase on tarpeeksi esijännitetty, se tarkoittaa myös, että rajapinta seinämien ja raiteiden välillä pysyy puristuksissa. [13] Näin raiteiden väliin ei pääse syntymään toimintaa haittaavaa aukkoa. Putken kaliiperin taipuma δ on osa magneettista voimaa, joka syntyy tykin sisällä, ja joka vaikuttaa tykin putken rakenteelliseen jäykkyyteen. Kaava, jolla voidaan laskea, miten magneettivoimat vaikuttavat tykin putken rakenteisiin, on seuraavanlainen:

$$\delta = \frac{F_{putki}}{k_{putki}} \quad (3.2)$$

$$F_{putki} = F_{mag} \frac{k_{putki}}{k_{putki} + k_{päällyskerros}} \quad (3.3)$$

Kuva 9 esittelee hyödyt, jotka saadaan, kun putki esijännitetään, ja kun käytetään jäykkiä komponentteja. Jos halutaan minimoida putken taipumista suuremmalla päällyskerroksella tai kiinnittämällä rakenteet toisiinsa entistä tiukemmin, niin voidaan tehdä, mutta se kasvattaa tykin rakennetta huomattavasti. Avain kevyeen ja erittäin jäykkään rakennelmaan on jäykkissä putken komponenteissa.[13]



Kuva 9. Voiman ja siirtymän suhdetaulukko kun käytetään esijännitystä [13]

Komposiitti-rakenteisen raidetykin, esimerkiksi Blitzer-raidetykin, putken pinta koostuu useista komposiittikartioista, -putkista tai -siteistä, jotka ovat toisiinsa nähden limittäin. Lyhyet limittaiset komposiittikartiot tuottavat korkean esijännitteen samalla kun puoliksi limittäin liimatut kartiot ylläpitävät aksiaalista rakennetta.

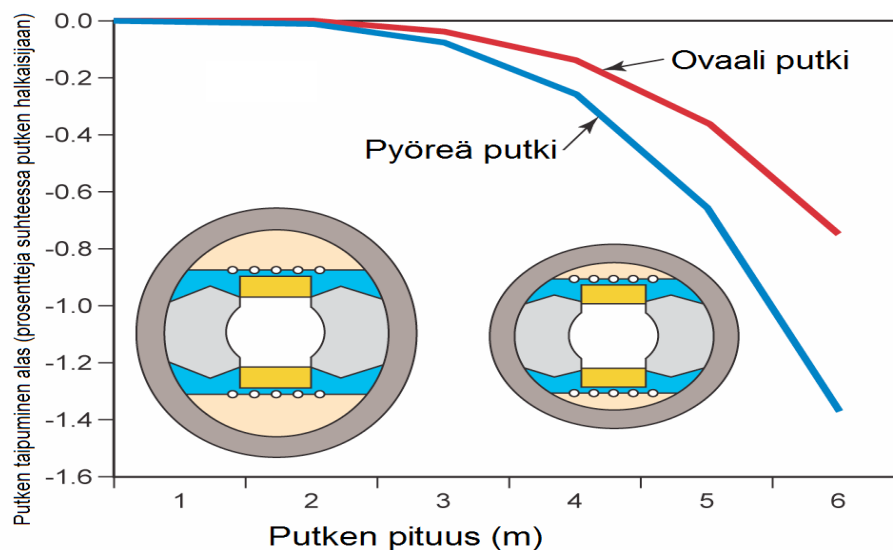
Komposiittisiteet, jotka ovat vaakasuorassa putken suuntaisiin siteisiin nähden, tarjoavat lisääjäykkyyttä putkensuuntaisesti, ja samalla estävät putkea taipumasta alaspäin.

Putken sisäosa koostuu erittäin vahvoista ja johtavista kupariseoksisista raiteista, joitten väliin on rakennettu korkeakimmomoduuliset, laminoidut, keraamiset sivuseinämärakennelmat (kuva 11). Urat, jotka on hiottu raiteisiin, ovat poikittain putkeen nähden. Urat on hiottu niin, että virran kulku vahvistuu niissä osissa raiteita, jotka maksimoivat asean induktanssi-gradientin. Ohut keraaminen päällyste tai eristekerros, joka on liimattu seinämiin, toimii ankkurin rajapintana ja peittää mahdollisen aukon laminoidussa keraamisessa rakennelmasa.[13]

Putken sisäosat (raiteet, keraamiset osat, jäähdytysputket) on liimattu toisiinsa, ja sen jälkeen kiedottu mica B-tason eristysteipillä. Tämän jälkeen komposiittikartiot on asennettu vuoronperään putken sisäosien ylle (kuva 11), jolloin jo tässä vaiheessa syntyy esijännitystä. Kartiot liimataan yhteen käyttämällä epoksia. Pitkät (yli 10m) ja isokaliiperiset (yli 120mm) tykit hyötyvät eniten ylläkuvatusta rakenteesta, sillä tehdasrajoitteet eivät vaikuta kriittisten osien saatavuuteen.[13]

Putken päällyspinnan päätarkoitus on tarjota putken sisäosille esijännitettä ja pitkittäistä jäykkyyttä. Päällyspinta ei kuitenkaan saa rajoittaa tykin sähkömagneettista suorituskykyä. Kenttäolosuhteissa päällyskerroksen on myös kyettävä tarjoamaan aseelle suojaa säältä ja mahdollisilta sirpaleilta. Näin ollen komposiitit sopivat mainiosti tehtävään. Komposiiteille on ominaista suuri jäykkyys, joka edistää tykin käyttöä, ja samalla keventää tykin kokonaispainoa. Jäykkyys ja keveys ovat erityisen tärkeitä seikkoja myös, jos ase halutaan asentaa ajoneuvoalustalle.[13]

Tykin putken muodolla on merkitystä asestä kestävyys suhteen. Ovaali muoto antaa putkelle suuremman hitausmomentin, joka estää putken taipumista alaspäin [13]. Kuvassa 10 oleva kaavio osoittaa hyvin, minkälainen vaikutus putken muodolla on asestä taipumiseen. Kaavion perusteella ulokekannatteisen, 12m, isokaliiperisen tykin mallissa ovaali putken muoto alentaa putken alas taipumista lähes 50% ja nostaa asestä massaa vain 12% [13].

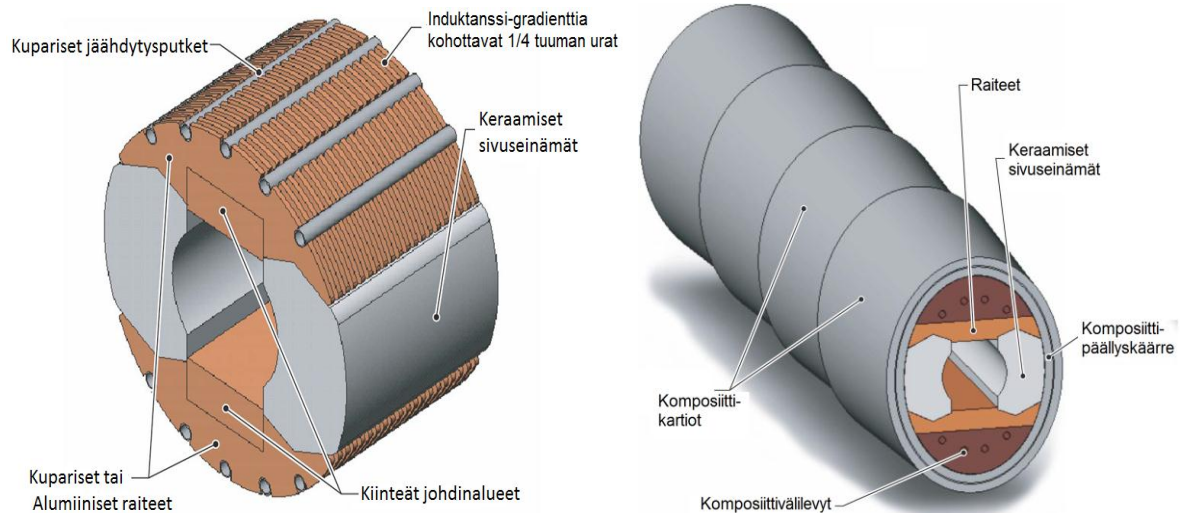


Kuva 10. Kaavio putken taipumiseroista ovaalin ja pyöreän mallin välillä [13]

Keraamiset materiaalit eivät ole uutta raidetykkien käytön yhteydessä. Keramiikkaa on käytetty useassa eri tykkimallissa tuomaan lisäjäykkyyttä tykinputkeen. Keramiikan erityisominaisuudet ovat korkea kimmomoduulus ja hyvä paineensietokyky. Nämä tekevät siitä mainion asestä rakenteellisen materiaalin.

Laminoimalla sivuseinämien ne kohdat, joissa keraamiset osat ovat kosketuksissa putken sisäseinämiin, mahdollistetaan huippukorkeiden kimmomoduulisten keramiikkaosien käyttö. Näitä osia on saatavana vain lyhyinä kappaleina. Laminoitu seinämä mahdollistaa sen, että sensorit voidaan tarvittaessa upottaa lähelle putken sisäseinämiä aiheuttamatta erillisiä piste-rasituksia putken rakenteeseen.[13]

Raiteiden tehtävä ei ole ainoastaan kuljettaa ankkuria ja ammusta, vaan myös lukita ja pitää sivuseinämät paikoillaan. Raiteet siis siirtävät esijännitteen liitoskohdistaan suoraan sivuseinämiin. Kytkös sivuseinämien ja raiteiden kesken on säilyttävä paineen alla kaiken aikaa, jotta sivuseinämien määrittämä putken jäykkyys säilyisi [13]. Kuvassa 11 on sivuleikkaus tykin putkesta, ja siinä näkyvät myös induktanssi-gradientin kohottavat urat. Urat on täytetty vahvistetulla, valettavalla epoksilla, jotta muodostuisi yksi jatkuva pinta, jonka avulla raiteet voidaan liimata sivuseinämiin.[13]



Kuva 11. Putken sivuleikkaus ja induktanssi-gradienttia kohottavat urat [13]

Raiteita pitkin kulkee erittäin korkea hetkellinen sähkövirta, ja samalla raiteiden pitää siirtää syntyneet lämpö- ja rakenteelliset rasitukset viereisiin rakenteisiin. Raiteet voivat myös olla ensisijainen kosketuspinta ankkuriin, jollei raiteissa käytetä kulumiskestävää pinnoitetta. Raiteiden virranjohtavuus vaikuttaa virran diffuusion (leviämiseen), raiteiden lämpenemiseen sekä virtalähteen malliin.

Aseen termostaattiset, sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet pakottavat raidetykkisuunnittelijat käyttämään erittäin vahvoja kupariseoksia. Laukauksien määrä asettaa rajat jäähdysputkien määrälle. Laukausten määrän perusteella määräytyy jäähdysputkien koko, määrä, virtausnopeus ja sijainti.[13]

Raiteissa pitää käyttää erittäin vahvoja ja korkeat virtausominaisuudet omaavia kupariseoksia, kuten kromikuparia, zirkoniumkuparia ja berylliumkuparia. Kuparin käyttö raiteissa aiheuttaa entistä enemmän lämmön siirtymistä raiteista putkeen, jolloin pitkittävät saumat raiteissa voivat edesauttaa asentamaan jäähdysreittejä lähelle putken sisäosia, joissa lämmön siirto on parhaimmillaan. Raiteiden ja muiden osien suunnittelussa on erittäin tärkeää huomioida mahdollisuus juottaa eri komponentit yhteen, jos jäähdysputket halutaan asentaa raiteisiin, kuten kuvassa 11 on esitetty.[13]

Toinen potentiaalinen raidemateriaali on alumiini ja sen eri seokset. Alumiiniseokset raidemateriaalina edesauttavat tykin massan vähentämisessä, ja erittäin vahvoja seoksia on saatavana puristetussa muodossa. Alumiiniseosten alhaisempi virranjohtavuus kuitenkin näkyy tehohäviönä, ja samalla se vaikeuttaa huomattavasti jäähdyttämisen prosessia, kun pyritään laukausten korkeaan toistojen määrään.[13]

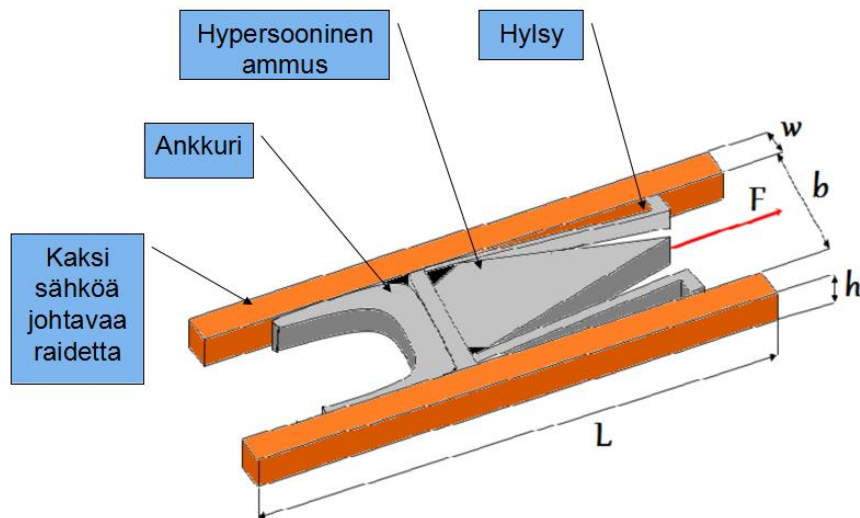
Putken dynaaminen vaste on huolenaihe myös perinteisissä tykeissä. Erittäin suuria rasitteita on havaittu perinteisissä panssarivaunujen tykeissä. Rasitteet johtuvat resonanssista putken sisällä [12]. Tästä johtuen putken dynaaminen vaste on erittäin tärkeä, jotta ammuksen nopeutta saadaan kasvatettua ja putken painoa kevennettyä [16;17;18]. Kenttäkelpoisen raidetykin on oltava kevyt ja sillä kyettävä ampumaan useita laukauksia hypernopeudella [12].

3.3. RAITEET

Raiteet ovat tämän asejärjestelmän toiminnan kannalta tärkeimmät osat. Koko aseenn toiminta riippuu niistä: raiteiden avulla muodostetaan tarvittava magneettikenttä, ja raiteita pitkin ammus kulkeutuu ulos aseesta. Edeltävästä johtuen aseenn kehityksessä on käytetty paljon resursseja raiteiden rakenne- ja kulumistutkimuksiin [18].

Raiteet ovat kaksi rinnakkaista johdinta, joitten kautta ankkuri luo sähköisen liitännän. Ankkuri on olennainen ammuksen sisältyvä osa. [12;18] Kuten kuvassa 12 on esitetty, kaksi kuparista tehtyä raidetta on asetettu rinnakkaisesti. Raiteet ovat kupariset levyt $h \times w$ ja pituudeltaan L .

Kahden kuparilevyn väli on b . Ankkuri ja ammus kulkevat raiteiden välissä. Sähkövirta, joka kulkee raiteiden sisällä, muodostaa magneettivuon B raiteiden väliin, ja tämä magneettikenttä on vuorovaikutuksessa ankkurin sähkövirtauksen kanssa. Tuloksena on Lorentzin voima F , joka kiihdyttää ankkurin ja sen kanssa myös ammuksen raiteita pitkin. Tämän lisäksi raiteet vaikuttavat toisiinsa luomalla keskinäisen hylkivän voiman. Koetilanteissa on saavutettu ankkurille peräti 6000 m/s nopeus.[18]



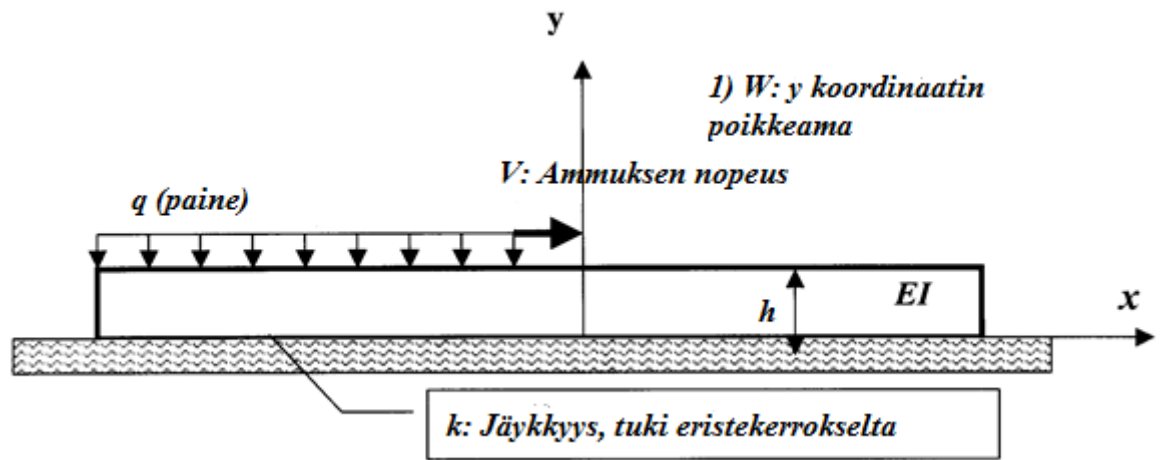
Kuva 12. Raiteiden yleisrakenne

Yksi suurimmista ongelmista aseiden kehityksessä on raiteiden muotoilu ja niihin liittyvien elementtien kehitys [18]. Sähkövirta ja magneettikenttä yltävät aina aseeseen perältä ankkuriin asti. Lämpövaihtelua tapahtuu piipun kehdestä alkaen, kun virtaa syötetään pulssienergiälähteestä, jolloin raiteet altistuvat hyvin suurelle rasitukselle. Raiteiden on siis kyettävä sietämään erilaisia rasitteita, sillä ankkuri on erittäin herkkä vaihteluille, joita tapahtuu sen ja raiteiden yhdyspinnassa. On siis erittäin tärkeää tietää ja laskea niiden rasitusten määrä, joita raiteisiin kohdistuu.[18;19;20]

Raiteissa muodostuvan sähkömagneettisen voiman nopeus ei ole vakio, vaan se kiihtyy ankkurin kanssa. Tästä johtuen rasitukset ovat erilaiset raiteiden eri kohdissa verrattuna tasaisella nopeudella liikkuvaan ankkuriin ja ammukseseen [18]. Kiinan Yanshanin yliopiston koetulokset osoittavat, että raiteiden sijainnin ja paikaltasiirtymän arvot riippuvat aseiden sisäisistä rajaehdoista ja ankkurin kiihtymisnopeudesta [18].

Mitä isompi on kiihtyvyys, sitä helpommin kasvaa todennäköisyys paikaltasiirtymälle, olettaen että ankkurin nopeus ylittää kriittisen nopeuden [18]. Kriittisellä nopeudella tarkoitetaan nopeutta, jossa ammuksen nopeus on sama kuin raiteissa tapahtuvan värinän taajuus, jolloin raiteet eivät pakene värähtelyn takia, ja yhteys ankkurin ja raiteiden välissä säilyy.

Raiteet voidaan havainnollistaa puomina, joka lepää joustavalla pohjalla, kuten kuvassa 13 on esitetty. Oletetaan, että rakenteellinen vuorovaikutus raiteiden ja eristeiden välillä on muotoiltu käyttäen kimmovakiota.[12;21]



Kuva 13. Kriittisen nopeuden malli koordinaatistoon kuvattuna [12;21]

Magneettinen paine, joka etenee ammuksen nopeudella raiteita pitkin, voidaan ilmaista käyttämällä Heavsidin porraskunktiota. Vallitseva paineen funktio EM-tykkiä varten voidaan derivoida seuraavalla tavalla:

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + kw = q[1 - H(x - Vt)] \quad (3.4)$$

Jossa w on sivuttaispoikkeama, joka riippuu ajasta t ja sijaintikoordinaatista x ; m on massa pituusyksikköä kohden, joka on sama kuin ρBh ; ρ on raiteissa käytetyn materiaalin tiheys; E on raidemateriaalin moduulisuus ja I on raiteen poikkileikkauksen hitausmomentti.

Joustavan pohjan kimmovakio k derivoidaan joko suljetussa muodossa tai numeerisena ratkaisuna käyttäen hyväksi esimerkiksi äärellisten elementtien ratkaisua.[12;21]

Raiteen kriittinen nopeus voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$V_{cr}^2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{h}{B}} \sqrt{EI} \sqrt{k} \quad (3.5)$$

Yhtälö (3.5) osoittaa, että EMRG -tykin kriittinen nopeus, joka on alistettu liikkuvalla paineelle, on raidegeometrian, tiheyden ja kimmomoduulin funktio. Tämän lisäksi ympäröivien rakenteiden tuella on suuri vaikutus aseiden raiteiden dynaamiseen toimintaan.[22]

Kriittinen nopeus kasvaa raiteiden kimmomoduulisuuden ja ympäröivien materiaalien jäykkyyksien mukana. Suunnittelun kannalta raidetykki, joka on rakennettu erittäin jäykäksi, kevyistä materiaaleista, ja jolla on iso hitausmomentti, on suotuisa vaihteleville kuormitusolosuhteille.[12;21]

Kriittinen nopeus on hyvä indikaatio siitä, onko tykkimalli sovelias jatkokehitystä varten [12;21] tai kenttäkelpoinen. Se kertoo myös aseiden rakenteellisesta jäykkyydestä ja putken eheydestä vaihtelevissa olosuhteissa [12;21].

Jotta ase olisi erittäin tehokas, on sen kriittisen nopeuden arvon oltava huomattavasti yli $V_{cr} \geq 1500 \text{ m/s}$. Yleisesti, kriittinen nopeus on riippuvainen poikkileikkauksen geometriasta ja raiteiden sekä komponenttien mekaanisista ominaisuuksista.

Simulaation avulla voidaan mallintaa, miten eri raiteiden paksuus vaikuttaa aseiden kriittiseen nopeuteen. Kriittinen nopeus kasvaa, kun raiteiden paksuus kasvaa. Kriittinen nopeus ei kuitenkaan kasva lineaarisesti. Eristekerroksen jäykkyydellä on suuri vaikutus aseiden kriittiseen nopeuteen. Paksumpi eristekerros tuottaa paremman jäykkyyden ja rakenteellisen tuen raiteita varten. Samalla eristekerroksen poikkeama pienentyy, kun siihen kohdistuu magneettikenttien painetta raiteista. Eristekerroksen jäykkyyden vaikutukset eivät myöskään ole lineaarisia. Materiaalitiheyden ja kimmomoduulisuuden yhteisvaikutuksen perusteella voidaan todeta potentiaaliset materiaalivalinnat raiteita varten. [21] Yhdistämällä korkea kimmomoduulisuus ja matala materiaalitiheys saadaan korkein kriittinen nopeus.

3.4. AMMUS

Ammuksen tuhovoima perustuu puhtaasti kineettiseen energiaan, jonka ammus tuottaa törmätessään kohteeseen [1]. Energia saadaan ammuksen suuresta nopeudesta, joka voi olla yli kahdeksankertainen äänennopeuteen verrattuna [1;2]. Tämän havainnollistaa hyvin pienen meteoriitin törmäys maahan. Meteoriitin tuhovoima perustuu sen suureen nopeuteen, ja sama toimintatapa on myös EMRG -ammuksella. 1 MJ energiaa vastaa tonnin painoisen esineen liikkumista nopeudella 44,7 m/s.

Yhdysvaltalainen EMRG -tykin tehoksi ilmoitetaan 32 MJ, joka siis on ammuksen lähtövoima. Ammuksen osuessa kohteeseen sen kineettinen energia (KE) voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.6)$$

Esimerkiksi voidaan laskea, paljonko 15 kg painoinen EMRG:n ammus [2] tuottaa törmätessään energiaa, kun arvioitu törmäysnopeus kohteeseen on noin 5 Machia.

$$E = \frac{1}{2} \cdot 15 \text{ kg} \cdot (5 \text{ Mach} \cdot 340,3 \text{ m/s})^2 \approx 22 \text{ MJ} \quad (3.7)$$

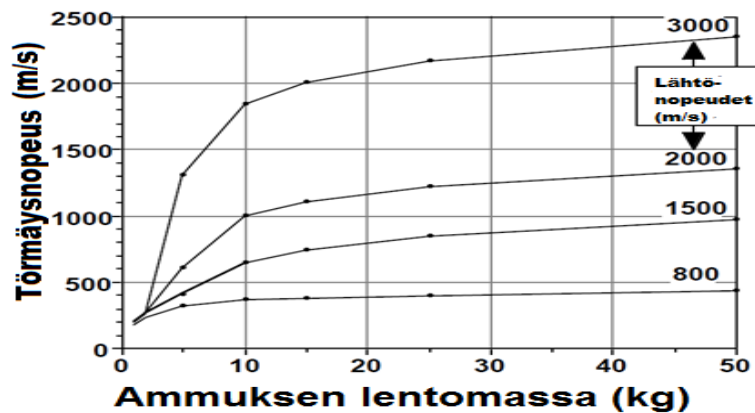
Tässä tarkastelussa ammus on tarkoitus ampua 7,5 Machin nopeudella, minkä jälkeen se lentää parabolisella lentokäyrällä ja käy jopa 152 400 m (500 000 ft) korkeudella välttämällä GPS -häirinnät. Tämän jälkeen ammus osuu kohteeseen, joka voi olla jopa 463 km päässä (250 nmi). Ammuksen matka tykistä kohteeseen kestää tässä tapauksessa noin 6 minuuttia, ja se osuu kohteeseen noin 5 Machin nopeudella.[22]

Jotta ammuksen osumatarkkuus saataisiin 5 m tasolle, käytetään ammuksen sisällä GPS-INS (Global Positioning System - Inertial Navigation System) -järjestelmäpakettia sekä aerodynaamisia ohjauspintoja, joiden avulla ammus ohjautuu kohteeseen [23;24]. GPS-INS -paketteja suunniteltaessa on otettava huomioon, että niiden on kestävä todella suurilla kiihdytysvoimilla laukaisun yhteydessä, sekä oltava tarpeeksi pieniä ja edullisia.

Johtuen ammuksen korkeasta lähtönopeudesta ja törmäysnopeudesta on mahdollista käyttää ammuksen kineettistä energiaa suoraan kohteeseen räjähteiden sijaan. Räjähteissä on aluksi siirrettävä kineettinen energia räjähteestä sirpaleisiin, joiden kautta vasta vaikutetaan kohteeseen. EMRG -ammuksen toiminta perustuu suureen nopeuteen sen törmätessä kohteeseen, ja näin räjähteitä ei tarvita. Tästä johtuen räjähteiden käyttö on turhaa sekä epäkäytännöllistä, sillä sama vaikutus saavutetaan kohteessa ilman räjähteitä. Samalla vähennetään huomattavasti räjähdysriskiä putkessa, ja varastoinnissa räjähdysriski taas poistuu kokonaan. Tämä helpottaa huomattavasti huoltoa ja varastointia. Olennainen ammuksen kineettiseen energiaan vaikuttava tekijä on massa, mutta samalla ammuksen koko pitäisi säilyttää pienenä. Tästä johtuen ammuksen rungossa käytetään erittäin tiheitä aineita kuten esimerkiksi volframia.[23]

Tiheidä aineiden käyttö pienentää ammuksen kokoa, ja tämän ansiosta ilmanvastus pienenee. Näin ammuksen kantama kasvaa huomattavasti tavallisiin kaasuseidien ammuksiin verrattuna. 155mm tykin kranaatin tuhovoima vastaisi EMRG -tykin 2 km/s ammuksen lähtönopeutta ja sen vaikutusta kohteessa [23]. Nykypäivän kaasuperusteiset tykit voivat saavuttaa noin 1000 m/s lähtönopeuden ammukselle, mutta ne eivät kuitenkaan voi saavuttaa samaa kantamaa kuin EMRG -tykki, eivätkä samaa vaikuttavuutta. Kuvassa 14 on havainnollistettu miten törmäysvoima vaihtelee lähtönopeuden suhteen.

Pienille kineettisille ammuksille suuri lähtönopeus mahdollistaa helpomman poistumisen tiheästä ilmakehästä. Ilmakehästä poistuttuaan ammus ohjautuu kohti kohdetta hyödyntäen pientä ilmastusta ja ilmaohjauslaitteita [23]. Suuri lentonopeus mahdollistaa suuremman törmäysnopeuden kohteessa. Jos lentonopeus ennen törmäystä onnistutaan pitämään Mach 3 yläpuolella, onnistutaan silloin siirtämään suuri osa laukauksen yhteydessä saadusta kineettisestä energiasta kohteeseen, kuten kuvasta 14 voidaan havaita.[20]



Kuva 14. Suurempi lähtönopeus mahdollistaa suuremman kineettisen vaikutuksen kohteessa [23]

Raidetykki voi käytännössä ampua minkä tyyppistä ammusta tahansa, niin kauan kuin jokin ammuksen osa johtaa sähköä ja koskettaa raiteisiin. On kolme tapaa jolla ammus voidaan ampua raidetykistä.

Ensimmäinen tapa koostuu ammuksista, jotka on johdin (kuva 15) [12;22]. Koska ammus johtaa sähköä lävitseen ja koskettaa raiteisiin, voidaan se laukaista sellaisenaan ilman lisäkomponentteja. Huonona puolena voidaan pitää tässä mallissa sitä, että ammuksen aerodynaamisuus joudutaan uhraamaan, jotta se saataisiin sen muotoiseksi, että sen tukiosat koskettavat riittävästi raiteita.

Toisessa tavassa käytetään sähköä johtamatonta ammusta ja plasma-ankkuria [25]. Tässä metodissa ankkuri haihtuu plasmakaareksi joka työntää ammusta. Menetelmä on ongelmallinen, sillä plasma saattaa aiheuttaa ammuksen hitsautumista raiteisiin.



Kuva 15. Kiinteä ammus[26]

Kolmannessa menetelmässä käytetään johtavaa kuorta, jota kutsutaan hylsyksi (sabot) [1;18]. Hylsy on sähköä johtava kuori, jonka sisällä ammus on. Hylsy on kosketuksissa raiteisiin ja irtoaa ammuksesta kuljetettuaan ammuksen ulos putkesta. Kolmas menetelmä on mahdollisesti käyttökelpoinen, koska siinä ammus voidaan suunnitella yhtä aerodynaamiseksi kuin mikä tahansa ammus. Lisäksi ammus voidaan tehdä sähköä eristävästä materiaaleista, jolloin sen sisällä olevat sähkökomponentit eivät joudu kosketuksiin korkean jännitteen kanssa. Ammuksen kanssa käytetty hylsy voidaan valmistaa pehmeämmästä ja paremmin sähköä johtavasta materiaalista, ja näin parantaa aseiden tehokkuutta. Kuvassa 16 on esimerkki hylsillä varustetulla ammuksella.



Kuva 16. General Atomics:in Blitzer-raidetykin ammuksella varustettuina hylsillä [11]

3.5. ENERGIALÄHDE

Toimiakseen tarkoitetulla tavalla ase vaatii suuren sähkövirtapulssin, jolloin energialähteeksi tarvitaan määrätynlaiset järjestelmät. Eräs järjestelmä, joka pystyy tuottamaan vaaditun sähkövirtapulssin, on kondensaattori tai kompulsattori. Aseen vaatiessa 35-63MJ energiaa on kondensaattorien koon ja rakenteen oltava erittäin hyvin suunniteltuja ja kestäviä.[23;24]

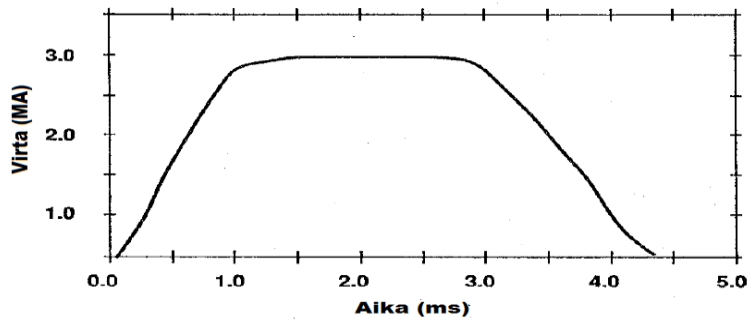
Energian lähteinä voivat myös toimia yksittäinen, iso kondensaattoripankki (kuva 17) tai useampi pienempi kondensaattoripankki, jotka kytketään erikseen yksittellen järjestelmään. Mahdollisia energian lähteitä voivat olla myös räjähdegeneraattorit tai isot mekaaniset generaattorit.[24,27]



Kuva 17. Kondensaattoripankki [11]

Energian tuottamisessa on tärkeää luoda suuri jännite asetta varten. Ammuksen kiihtyvyys on verrannollinen jännitteen neliöön, jolloin jännite on tärkeä komponentti [27]. Jännitettä ei voida korvata sähkövirralla. Energianlähteen sähköjännitteen on ylitettävä rasitejännite jokaisella hetkellä, jotta laukaisu onnistuisi. Rasitejännite kasvaa aina vähintään pariin kV laukauksen yhteydessä.[27] Suurin sallittu jännite määräytyy putken paineen sietokyvyn perusteella, mutta raiteiden ja ammuksen läpikulkevalle virralla voi olla rajoitteita.

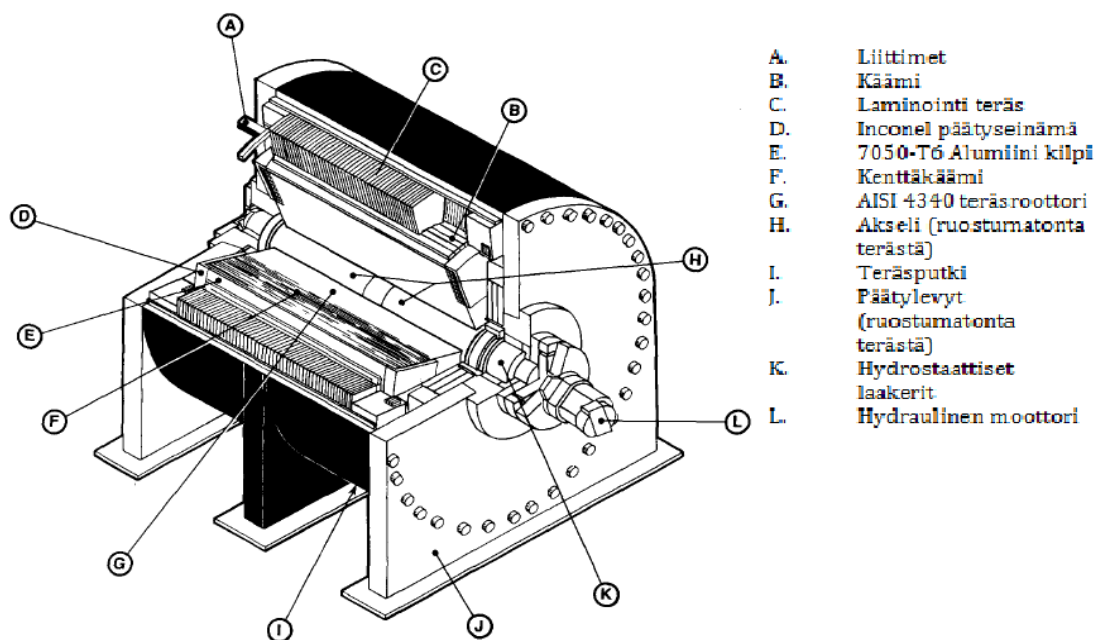
Jotta laukaisu olisi mahdollisimman tehokas, on järjestelmään syötettävä jatkuva tasainen energiapulssi. Pulssin nousuaika ei saa olla liian nopea. Virran määrän vaihtelu johtaa suoraan kiihtyvyyden vaihteluun, ja tätä vaihtelua kutsutaan “nykimiseksi”. [27] Nykimistä voidaan rajoittaa ammuksen, ankkurin ja hylsyn muotojen ominaisuuksilla. Tarkat energiapuls- sin arvot tulevat vaihtelevaan eri tykeissä, eri ammusmassoilla ja lähtöenergioilla jne. Ku- vassa 18 on malliesimerkki latauskäyrästä.



Kuva 18. Optimaalinen jännitteen latauskäyrä [27]

Parhaan pulssin ja voimanlähteen tarjoaa kompulsattori [24]. Kompulsattori on kompensoitu pulssivaihtovirtageneraattori [28]. Se muistuttaa hyvin paljon autoissa olevaa vaihtovirtageneraattoria, mutta on paljon suurempi ja varustettu impedanssia korvaavilla käämeillä, jotka hidastavat ulos tulevan pulssin kasvua. Kuvassa 19 on esitetty 1MJ/pulssi kompulsattori ja sen rakenne.

Kompulsattori koostuu pääasiassa mekaanisesti pyörivästä syötöstä, kenttäkäämeistä käynnistimen kanssa, roottorista ankkurikäämillä, kilvestä jossa on lisäkäämejä sekä säätömekanismista [28]. Kompulsattori muuttaa mekaanisen pyörivän liikkeen sähkövoimaksi, joka syntyy kun käämit pyörivät käynnistimen muodostamissa magneetikentissä. Säätömekanismi mahdollistaa sen, että muodostuva vaihtovirta voidaan kerätä talteen kondensaattoripankkeihin ja käyttää tuotettu sähköenergia myöhemmin, tai suunnata muodostettu virta suoraan aseeseen ja ammukseseen.



Kuva 19. Kompulsattori [28]

EMRG -asejärjestelmässä todennäköisin kokoonpano on kaksi vastakkain pyörivää kompulsaattoria, jotka on kytketty rinnakkain aseens virtapiiriin. Kompulsaattorien on oltava täydellisesti synkronoituja, jotta ne voivat tarjota lisää gyroskooppista tasapainoa laivalle tai kantalustalle, ja jotta saadaan vähennettyä laukauksen yhteydessä syntyvä värinää[24]. Kompulsaattori voidaan rakentaa pienikokoiseksi samalla säilyttäen suhteellisen suuri virrantuotto [28].

Kuten mainittua, järjestelmän toiminnan kannalta on olennaista, että kompulsaattorit ovat synkronoituja. Kun tätä järjestelmää käytetään laukauksen yhteydessä, ajoituksen on oltava täydellinen. Onnistunut laukaisu saadaan aikaan, kun virta syötetään järjestelmään lähellä jännitteen huippua. Kompulsaattorin pyörimisnopeutta voidaan säädellä, ja näin on helppoa säätää aseens laukaisutehoja tuottaen toivottu laukaisukäyrä ampumavoimaa varten. Tämän nopeuden säädön avulla voidaan aseelle taata lukuisia nopeita purskeita lyhytkantamunnassa, kun käytetään kompulsaattoriin nopeasti varastoitunutta energiaa.

Energian tuottoon kompulsaattorilla liittyy kuitenkin useita haasteita. Ensimmäinen niistä on lataamisnopeus [24]. Toinen haaste on kompulsaattoriin varastoitavan sähköenergian määrä, ja kolmas kompulsaattoriin sekä aseeseen vaikuttava lämpölaajeneminen, josta johtuen arvioitu suurin mahdollinen peräkkäisten laukausten määrä tulee olemaan alle kuusi [24]. Kolmas haaste kyetään ratkaisemaan kehittämällä tykinputkelle ja kompulsaattoreille tehokkaammat ja paremmat jäähdytysjärjestelmät.

Kytkimillä on kriittinen rooli aseens toiminnan kannalta. Kytkimien on siedettävä todella suuria hetkellisiä jännitteitä ilman, että kytkin hitsautuisi kiinni tai sulaisi poikki. Näin ollen kytkimienkin on oltava erityisen hyvin suunniteltuja ja kehitettyjä, jotta aseens varma toiminta voidaan taata.

4. ELEKTROMAGNEETTISEN RAIDETYKIN KEHITTÄMINEN JA HAASTEET SEKÄ MUUT KÄYTTÖSOVELLUKSET

4.1. TÄMÄN HETKISET KEHITYSTARPEET JA HAASTEET

Tähän mennessä kehitetyillä raidetykeillä on suhteellisen lyhyt käyttöikä verrattuna perinteisiin tykkeihin, mikä johtuu raide- ja eristerikoista.[13] Nämä rakenneviat voivat johtua materiaalin rakennevahvuuspuutteesta tai rakenteellisen suunnittelueheyden puutteesta. Monessa tykkimallissa luodaan korkea esijännite, jotta raiteet ja eristeet pysyisivät paikoillaan laukauksen aikana. Kuitenkin on olemassa tiettyjä huolia ja haasteita liittyen autofretointiin. Esijännite voi laskea ajan myötä, jos eristemateriaali, kuten G10 (lasi- komposiitti), halkeilee aiheuttaen muutoksia esijännitteeseen. Esijännitteen muutos siis voi vaikuttaa aseiden toimintaan negatiivisesti. Rakenteellisen suunnittelun kannalta autofretointi voi heikentää raiteita ja eristemateriaaleja “kuluttamalla materiaalien voimat”. [13]

Toisin kuin perinteisten tykkien, EMRG -tykin kuormitus ei ole aksisymmetrinen kuten kemiallisella reaktiolla toimivissa tykeissä, vaan kuormitus kohdistuu niin raiteisiin kuin eriste- ja tukirakenteisiin. Kuormitus on moniulotteinen kuten magneettivoimatkin, ja myös plasman paine voi vaihdella ajassa ja tilassa raidetykin sisällä, laukauksen yhteydessä. Kuten moni erilainen tykkimalli on osoittanut, raidetykkiä ei voida rakentaa yhdestä materiaalista käyttäen yksinkertaista geometrista rakennetta johtuen aseiden sähköisistä ja mekaanisista vaatimuksista. On haastavaa suunnitella jokainen tykin komponentti ja niiden väliset liitännäkohdat, erityisesti kun halutaan saavuttaa optimaalinen materiaalivalikoima, tasapainoinen sähköinen balanssi ja hyvä mekaaninen suorituskyky.[13]

Tämänhetkiset raidetykit suunnitellaan hyvin pitkälti “perinteisellä tykkifilosofialla”: kun putken sisäiset komponentit kuluvat, vaihda putki.[14]

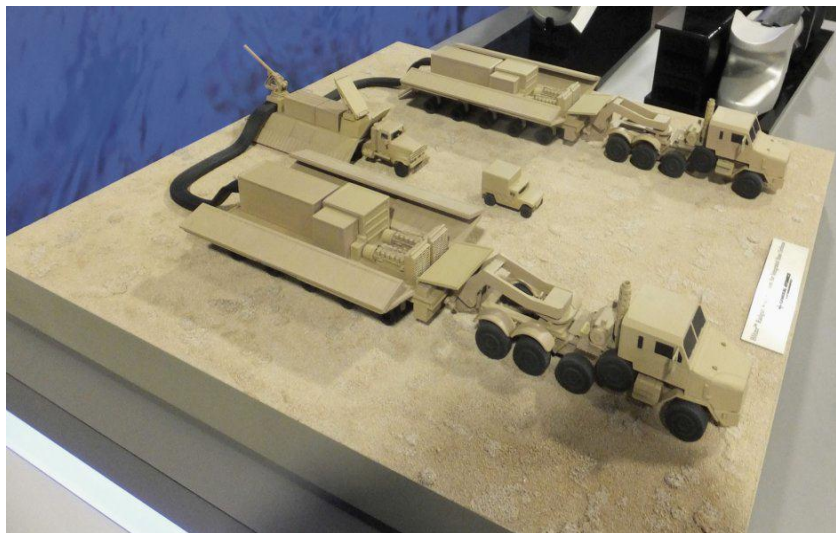
Ammuksen suunnitteluun liittyy myös monia haasteita. Ensimmäinen haaste on ammuksen muoto. Aiemmin ammus saattoi palaa lennon aikana johtuen korkeasta ilmanvastuksesta, joka johtuu ammuksen suuresta nopeudesta. Toisena haasteena on, miten sähköiset komponentit saadaan kestävämmään suuret kiihdytysvoimat laukauksen yhteydessä. Kolmas haaste on ollut sähköisten komponenttien eristäminen ammuksen sisällä, jotta laukauksen yhteydessä syntyvät sähkövirrat eivät tuhoaisi virtapiirejä.[29]

4.2. JÄRJESTELMÄN MUUT KÄYTTÖSOVELLUKSET

Tämänhetkiset EMRG -tykit on suunniteltu laivan kansitykeiksi ja omapuolustusjärjestelmiksi. Iso-Britannian laivastolla on käytössä 9 MJ raidetykki.[30] Yhdysvallat suunnittelee asentavansa ensimmäiset 32 MJ raidetykkinsä koekäyttöön JHSV -luokan (Joint High Speed Vessel) laivaan vuoteen 2016 mennessä [31].

Tykki asennetaan ensimmäiseksi koekäyttöön laivaan siksi, että raidetykki tarvitsee paljon sähköä toimiakseen. Jos esimerkiksi halutaan ampua 62 MJ tykillä, tarvitaan 81 MW energiaa [32]. Tällä hetkellä ainoastaan Zumwalt-luokan hävittäjälaiva kykenee tuottamaan vaaditun määrän sähköenergiaa [3]. Suuri energiantarve ei kuitenkaan ole estänyt kehittämästä aseelle muita käyttösovelluksia.

Maavoimille on myös kehitetty raidetykkiversio. General Atomicsin Blitzer-raidetykkiä on kehitetty käytettäväksi myös maavoimien toiminnassa, kuten kuvassa 20 on esitetty.[33] Tässä mallissa raidetykin toimintaan käytetään neljää ajoneuvoa, joista kaksi kuljettaa energianlähteitä, yksi raidetykkiä, ja viimeinen toimii raidetykin hallinta- ja ohjauspäätteenä. Suoritusominaisuuksiltaan tykki on samanlainen kuin laivaston versio, mutta kooltaan pienempi.



Kuva 20. Blitzer, maavoimien raidetykki [33]

Raidetykki on siinä mielessä poikkeuksellinen järjestelmä, että sitä voidaan käyttää muutenkin kuin ammutajärjestelmänä. Raidetykkiä on muun muassa kehitetty korvaamaan höyrykatapulttia lentotukialuksissa. Tätä järjestelmää kutsutaan EMALS:ksi (Electromagnetic Aircraft Launch System). Tykin avulla voitaisiin lähettää ilmaan raskaitakin hävittäjiä ja miehittämättömiä lennokkeja. Samalla laukauksia voitaisiin suorittaa useampia ja nopeammin verrattuna nykyisiin käytettyyn höyryllä toimivaan katapulttiin, jonka latautuminen kestää huomattavasti kauemmin.[34]

Toinen käyttötapa raidetykille katapulttina olisi kuorman laukaiseminen avaruuteen. Suurimmilla raidetykeillä pystyttäisiin lähettämään avaruuteen satelliitteja sekä tarvikkeita avaruusasemille. Näin saataisiin avaruusohjelmien kustannuksia vähennettyä huomattavasti. Ihmisiä tällä keinolla ei voitaisi avaruuteen lähettää, koska kiihdytysvoimat olisivat liian suuret.[6]

Tutkimusalalla raidetykkiä voitaisiin käyttää fuusioreaktion käynnistäjänä. Kaksi ammusta, jotka sisältäisivät fuusioituvaa materiaalia, voitaisiin ampua toisiaan päin, jolloin korkea törmäysnopeus ja lämpö käynnistäisivät fuusioreaktion.[6]

5. PÄÄTELMÄT

Elektromagneettinen raidetykki on merkittävä tulevaisuuden ase. Teknologian ja materiaali-tekniikan nopea kehitys ovat mahdollistaneet toimivan raidetykin rakentamisen.

Raidetykin tutkimukseen ja kehitykseen on käytetty paljon resursseja, koska aseella saavutettava suorituskyky ja potentiaali voivat osoittautua hyvin merkittäviksi. Kaasulaajenemiseen perustuvat perinteiset tykit ovat saavuttamassa oman teoreettisen kantamansa rajat. Ja vaikka kantamia saataisiin kasvatettua vielä 10–20 prosenttia, eivät perinteiset tykit pystyisi saavuttamaan samanlaisia kantamia kuin raidetykki. Jos tämänhetkisen 155mm tykin kantama perävirtausyksiköllä ja muilla kantamaa pidentävillä tarvikkeilla on noin 120 km, on vastaavan 32 MJ raidetykin kantama 480 km. Raidetykillä saavutettava operatiivinen ja strateginen suorituskyky on siis huomattava. Tämä on merkittävä lisäetu aseessa, jonka päätarkoituksena on toimia omasuojajärjestelmänä ohjuksia vastaan ja 155mm kansitykin korvaajana.

Ruudittomuus on aseiden merkittävä etu: ammuksien varastointiajat pitenevät huomattavasti, huolto helpottuu, ja myös yleinen turvallisuus paranee huomattavasti. Varsinkin laivoissa ruudittomuus lisää palvelusturvallisuutta poistamalla mahdollisen palon aikana ammuksien ja ruudin syttymisriskin. Kun ruutipanoksia ei käytetä, vapautuu lisää tilaa ammuksille, eli aluksessa olevien ammusten määrää voidaan lisätä merkittävästi, ja samalla niitten täydennystarve vähenee.

Ammuksen toiminta perustuu nuoli- ja panssariammusten tapaan kineettiseen energiaan, mutta EMRG -ammuksen tuhovoima on huomattavasti suurempi. Raidetykin ammuksella saavutetaan myös suurempi läpäisykyky ja tuho vaikutus kuin tämänhetkisillä kineettisillä ammuksilla. Ammuksen läpäisykyvyn ja tarkkuuden ansiosta voidaan minimoida mahdolliset sivullisille aiheutuvat haitat. Koska raidetykin ammus on joko hakeutuva tai ohjautuva, saadaan osumatarkkuus alle 5 metriin.

Erilaisilla ammustyypeillä voidaan saada aikaan parempi vaikutus kuin EMRG:n perusammuksella; esimerkiksi ohjustorjuntaan käytettäisiin ammusta, joka sisältäisi volframikuulia, jotka ammus vapauttaisi ohjuksen eteen muodostaen verhon, johon ohjus törmää ja tuhoutuu. Samanlaista ammusta voitaisiin käyttää elävää voimaa vastaan, jolloin ammuksen kuulat vastaisivat sirpalevaikutusta. EMRG:n perusammusta eli kiinteää nuoliammusta käytettäisiin bunkkereitten ja taisteluvaunujen läpäisyyn ja tuhoamiseen.

Aseen käytön tuomat rahalliset säästöt olisivat myös huomattavat, mikä on eräs merkittävä syy siihen, että asejärjestelmää on tutkittu näin laajasti. Yhden ammuksen arvioitu kappalehinta olisi 10 000 dollaria. Kun verrataan tätä yhden Tomahawk-ohjuksen hintaan, joka on noin 1 100 000 dollaria, rahalliset säästöt on helppo todeta. Raidetykin ammus pystyy lisäksi tuottamaan kohteessa samanlaisen vaikutuksen kuin ohjus, ellei paremmankin. Raidetykin ei ole kuitenkaan tarkoitus korvata ohjusjärjestelmiä, vaan vapauttaa enemmän ohjuksia isku-käyttöön.

Nykyisenä suurena trendinä asejärjestelmien kehityksessä on sähköistäminen. Alalla luodaan ja kehitetään entistä enemmän sähköautoja ja -lentokoneita sekä sähkölaivojakin. Varsinkin sähkölaivoissa raidetykki palvelee alusta hyvin. Kompulsaattorinsa ja kondensaattoripankkiensa ansiosta raidetykki voi kehittää ja luovuttaa lisää sähköä laivan omaan käyttöön. Laiva voi käyttää tätä lisävirtaa nostaakseen omaa nopeuttaan hetkellisesti, tai käyttää mainittuja energianlähteitä hätätapauksissa varageneraattorina tai varavirtalähteenä. Jos laivoissa käytettäisiin kahta kompulsaattoria rinnakkain, ne loisivat yhdessä omilla pyörimisliikkeillään gyroskooppisen ilmiön, joka vakauttaisi alusta entisestään. Raidetykki ei siis olisi vain painottaakka tai mahdollisen paloriskin lisääjä kuten perinteiset kaasutykit.

Johtuen 32 MJ EMRG -tykin suuresta energiatarpeesta saattaa aseiden käyttö rajoittua vain isoihin laivoihin, jotka kykenevät tuottamaan tarvittun energian. Jos asejärjestelmä rajoittuisikin vain isoihin ohjuslaivoihin tai hävittäjiin, tulee vastaan mahdollinen tilan puute. Jotta tarvittu energia saataisiin tuotettua, tarvitaan enemmän tai suurempia kompulsaattoreita sekä enemmän ja isompia kondensaattoripankkeja, jotta kaikki tuotettu energia voitaisiin varastoida. Nämä yhdessä vaativat paljon tilaa. Kondensaattoripankkien kohdalla olisi tutkittava, kauanko ne kykenevät säilyttämään tuotetun energian ennen kuin ne itse purkautuvat. Myös kompulsaattorien kohdalla täytyisi tutkia, kuinka nopeasti ne kykenisivät tuottamaan tarvittavan energiamäärän, ja miten tämä onnistuisi eri sääolosuhteissa ja merenkäynnissä.

Maavoiminen EMRG -tykkiversiossa vaadittu ajoneuvomäärä tykin toimintaa varten on suuri, mikä vaatisi paljon henkilöstöä sekä enemmän huoltotoimenpiteitä ja polttoainetta. Sellaisena kuin se on esitetty kuvassa 20, asejärjestelmä on jokseenkin kömpelö ja hankalasti siirrettävissä paikasta toiseen. Siksi saattaa olla, ettei asejärjestelmää voida toteuttaa sellaiseenaan.

Tykin ja sen eri komponenttien osalta ei tiedetä vielä, miten ne tulevat kestäämään merenkäyntiä ja meri-ilmastoa. Merenkäynnin osalta saattaa tykkiin kohdistua sellaista räsitystä, jota tähän mennessä laboratorio- ja kenttäkokeissa ei ole voitu todeta. Näitä räsityksiä saattaisivat olla esimerkiksi jatkuva värinä ja edestakainen liike, jotka saattaisivat aiheuttaa halkeamia tykin putken rungossa. Halkeamat taas saattaisivat johtaa toimintahäiriöihin ja korjaustoimenpiteisiin. Lisäksi meri-ilman suolaisuus saattaisi aiheuttaa korroosiota tykin eri komponenteissa. Vielä ei kuitenkaan tiedetä, miten korrosio vaikuttaa tykin toimintaan. Sääolosuhteidenkaan vaikutukset EMRG -tykin toimintaan eivät ole tiedossa. Olisi tutkittava, voidaanko tykki laukaista sateella, vai johtaako pienikin määrä vettä putkessa toimintahäiriöön (mahdollinen oikosulku), ja voidaanko tykki lainkaan laukaista kovassa merenkäynnissä?

Vaikka EMRG -tykki onkin suunniteltu alun perin ohjustorjuntajärjestelmäksi, voivat aseiden kehityskustannukset nousta niin korkeiksi, että jollakin toisella järjestelmällä voidaan saavuttaa sama tulos pienemmillä kustannuksilla. Tällöin herää kysymys, kannattaako asetta kehittää, mikäli koekäytössä ilmenee suuria vikoja ja/tai kehitystarpeita. Uusi katsaus kannattaa mahdollisesti tehdä viiden vuoden päästä, jolloin nähdään, mihin silloiset aseiden prototyypit ovat edenneet.

Jos kaikista teknisistä ja rahallisista haasteista selviydytään, ja tykki päätetään tuoda operatiiviseen käyttöön, saattaa se silloin luoda merkittävän taisteluteknisen ja strategisen tason uhka-arvon. Vertailukohtana voidaan tarkastella taistelupanssarivaunuja. Yksittäinen taistelupanssarivaunu tuo taisteluteknisen tuloksen, mutta aselajina ylivoimatilanteessa useampi vaunu muodostaa strategisen uhka-arvon. Vastaavalla tavalla yksittäinen laukaus elektromagneettisella raidetykillä johtaa taistelutekniseen tulokseen, mutta pitkän kantaman ja suuren tarkkuutensa vuoksi sillä voi olla strategisen tason uhka-arvo.

LÄHTEET

- [1] *Power trip: re-energising naval electric weapons*. Jane's Navy International, [viitattu 6.6.2014]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1202912&Pubabbrev=JNI>
- [2] *Electro-magnetic railguns: fire-support revolution*. Jane's Defence Weekly.[viitattu 6.6.2014] Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1167190&Pubabbrev=JDW>
- [3] Jyri Kosola. *Raidetykki tulossa operatiiviseen käyttöön 2025-2030*. Sotilasaikakauslehti, 2015. Vol. 2, no. 940, p. 60-62. ISSN 0038-1675
- [4] Lappalainen, E. Jormakka, J. *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakouluissa*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2004. 203 s. ISBN 951-25-1540-7
- [5] Glenn D.Considine, Mcnab Ian, P. *Van Nostrand's scientific encyclopedia*. Wiley-Interscience, 2008. 1760-1769 s.
- [6] А.Н. Матвеев. *Электричество и магнетизм*, 2-е издание. Москва: ОНИКС 21 век, 2005. 463s. ISBN 5-329-01419-0.
- [7] How stuff works. *How Rail Guns Work*. [viitattu 14.5.2014]. Saatavissa: <http://science.howstuffworks.com/rail-gun1.htm>
- [8] Edward Chien. *Railguns: A Revolution in Naval Warfare from the World of Science Fiction*. Dartmouth undergraduate journal of science, 2009, s.7-10.
- [9] Feng Jin, Xiaofei Lu, Jun Liu, Yanqiao Chen. *Modeling and Simulation of Electro-magnetic Railgun's Exterior ballistic Trajectory*. Advanced Materials Research, 2013. Vol 753-755, s. 955-959.
- [10] Mehdi Peyvandi, Mehrdad Jafarboland, Mohsen Zafarani. *Electromagnetic Analysis of Railguns by Numerical Simulations*. International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S), 2011. Vol. 4, no. 1, s. 270-278.
- [11] General Atomics. [viitattu 15.12.2014]. Saatavissa: <http://www.ga.com/railgun-launchers>
- [12] Jerome T. Tzeng. *Structural Mechanics for Electromagnetic Railguns*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, s.246-250.

- [13] M.D. Werst, J.R. Kitzmiller, C.S. Hearn, G.A. Wedeking. *Ultra-Stiff, Low Mass, Electromagnetic Gun Design*. IEEE Transactions on Magnetics, 1.12005 Vol. 41, s.262-265.
- [14] T.W. Hurn. *Rail gun barrel with circumferentially variable prestressing*. U.S. Patent 5076135.
- [15] Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus. *Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas*. Vammala: Vammalan Kirjapaino oy, 2001. 391s. ISBN 951-25-1277-7
- [16] T.E. Simkins. *Response of Flexural Waves in Gun Tubes*. U.S. Army ARDEC, Benet Weapons Laboratory, Watervliet, NY, Tech. s. 1088-1105. ARCCB-TR-87008
- [17] Jerome.T. Zeng. *Dynamic Response and Fracture of composite gun tubes*. J.Shock, 2001. s.229-238. Vol. 8.
- [18] Lizhong Xu & Yanbo Geng. *Dynamics of rails for electromagnetic railguns*. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2012. Vol. 38, s. 47-64. DOI 10.3233/JAE-2011-1408.
- [19] B.Tom, S.Francis, S. Sikhanda and H.Kuo-Ta. *Numerical modelling of melt-wave erosion in conductors*. IEEE Transactions on Magnetics, 2003. Vol. 39, s. 129-133.
- [20] P.Chadee. *Railgun tribology- Chemical reactions between contacts*. IEEE Transactions on Magnetics, 2007. Vol. 43, s. 391-396.
- [21] Jerome T. Tzeng. *Dynamic Response of Electromagnetic Railgun Due to Projectile Movement*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, s.472-475.
- [22] *Electromagnetic naval railgun system*. HIS Jane's. 23.10.2013. s. 1-5.
- [23] David Adams. *Application of Electromagnetic Gun to Future Naval Platforms*. Center for Electromechanics publications, 1998. The University of Texas at Austin.
- [24] David Allan Adams. *Naval rail Guns Are Revolutionary*. U.S. Naval Institute [viitattu 13.11.2014]. Saatavissa: <http://vif2ne.ru/nvk/forum/arhprint/830853>
- [25] US 8,109,190 B2 US Patent. 7.2.2012 Railgun System 12s.
- [26] Sam Lagrone. *Electromagnetic railgun sets new world record*. Mulrickillion, Jane's Defence News. 14.11.2010. [Viitattu 7.3.2015]. Saatavissa: <https://mulrickillion.wordpress.com/2010/12/18/electromagnetic-railgun-sets-new-world-record/>
- [27] H.G.Hammon, D.Bhasavanich, F.T.Warren. *Design approaches to pulsed power for electromagnetic and electrothermal gun systems*. [viitattu 14.11.2014] Saatavissa:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=733250&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D733250

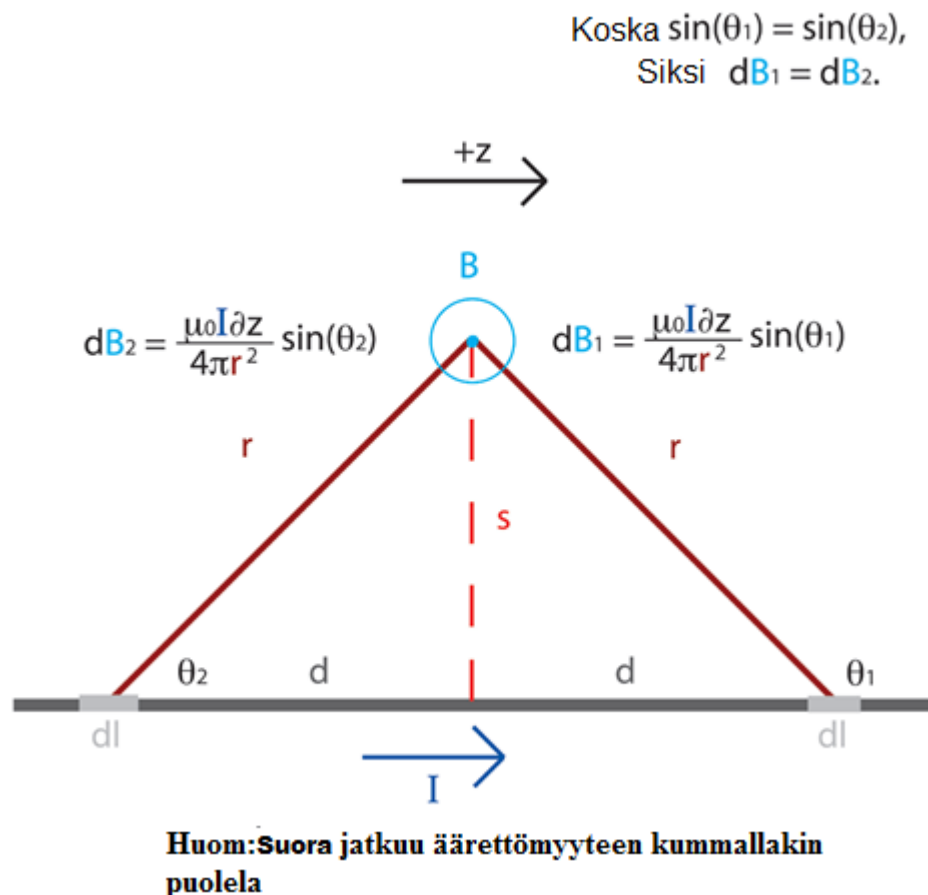
- [28] M.D.Werst, D.E.Perkins, S.B.Pratap, M.L. Spann, R.F. Thelen. *Testing of a rapid-fire compensated pulsed alternator system*. IEEE Transactions on Magnetics ,1989. Vol. 25, s 599-604
- [29] *BAE Systems to develop high-velocity projectile for USN's railgun*. IHS Jane's International Defence Review. 25.12.2013 [viitattu 6.6.2014]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1594024&Pubabbrev=IDR>
- [30] Mike Hinton, Steve Gilbert. *UK Electric Gun Nationa Overview*. IEEE Transactions on Magnetics ,2004, s 9-14.
- [31] *USN to demonstrate EM Railgun prototype at sea in 2016 on board JHSV*. IHS Jane's Defence Weekly. 13.11.2013 [viitattu 7.6.2014]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1595906&Pubabbrev=JDW>
- [32] *Power trip: re-energising naval electric weapons*. IHS Jane's Navy International. 13.2.2007. [viitattu 8.6.2014]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1202912&Pubabbrev=JNI>
- [33] Richard. D. Fisher Jr. *AUSA 2013: General Atomics unveils Blitzer landbased railgun*. IHS Jane's Defence Weekly 22.11.2013. [viitattu 8.6.2014]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/CustomPages/Janes/DisplayPage.aspx?DocType=News&ItemId=+++1593951&Pubabbrev=JDW>
- [34] CompMechLab [viitattu 8.1.2015]. Saatavissa: http://www.eng.fea.ru/FEA_news_704.html

Lorentzin yhtälön lisäksi tarvitaan vielä Biot'n ja Savartin lakia selittämään tykin putken sisällä tapahtuvaa toimintaa. Biot'n ja Savartin lain avulla voidaan laskea sen voiman määrä, joka asean sisällä vaikuttaa sekä tarvittava virran määrä jotta toivottu lähtönopeus saavutettaisiin. Tykin putken sisällä syntyvä voima F voidaan laskea matemaattisesti. Seuraava kaava esittää yksinkertaistetun kaavan asean voimien toiminnalle.

Laskukaava magneettikentälle B joka muodostuu kohdassa r virran I avulla kutsutaan Biot'n ja Savartin laiksi:

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \times \left[\frac{r - r'}{|r - r'|} \right]}{|r - r'|^2} \quad (1)$$

Jossa viivaintegraali suoritetaan yli dl segmentin, joka on pituusvektorin ero ja r' on pituussegmentin sijainti. Yksinkertaistettu malli tästä näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Virran segmentin ero äärettömässä virranjohtimessa [8]

Aseessa ei ole olemassa merkittävää sähkökenttää missään kohtaan raiteita, koska raiteissa ei ole merkittävää positiivista virrankertymää [8]. Ammuksen ympärille kehittyvä magneettikenttä luodaan kahden raiteen avulla ammuksen kohdalle. Tämä magneettikenttä löytyy Biot'n ja Sawartin laista [8]. Koska $L \gg w$ voidaan olettaa että raiteet ulottuvat äärettömyyteen toisella puolella ammusta, ja se saa äärettömän määrän virtaa yhteen suuntaan. Äärettömän virran I avulla saadaan magneettikentälle B etäisyys raiteesta s :

$$B(s) = \frac{\mu_0 I}{4\pi s} \hat{\phi} \quad (2)$$

Jos tarkkaillaan äärettömä virtaa, voidaan nähdä, että virran differentiaaliosa tuottaa saman verran magneettikenttää kuin differentiaaliosa, joka on yhtä kaukana toisella puolella pisteestä johon magneettikenttä halutaan luoda. [8]

Tässä esitettyssä mallissa raiteita kuvataan yhdellä suoralla, joka jatkuu äärettömyyteen vain yhdellä puolella. Äärettömän pitkällä suoralla magneettikentän B ja sen etäisyys s on vain puolet äärettömästä viivavirrasta:

$$B(s) = \frac{\mu_0 I}{4\pi s} \hat{\phi} \quad (3)$$

Yhtälön (3) avulla voidaan havainnollistaa miten magneettikentän suunta ja magneettinen tiheys käyttäytyvät ammusta pitkin laskemalla yhteen kummankin raiteen osuus:

$$B(s) = \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi s} + \frac{\mu_0 I}{4\pi(w-s)} \right) \hat{\phi} \quad (4)$$

On huomioitava, että raiteilla on tietyn kokoinen säde. Säde on lisättävä yhtälöön, jotta mahdolliset tulokset voidaan laskea. Joten, jos oletetaan, että raiteilla on säde R , saadaan yhtälö muotoon:

$$B(s) = \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi(R+s)} + \frac{\mu_0 I}{4\pi(R+w-s)} \right) \hat{\phi} \quad (5)$$

Kun magneettikentän voimakkuus ja suunta ovat ammuksen suunnassa, voidaan ammuksessa vaikuttava voima ottaa Lorentzin voiman yhtälöstä, josta voidaan johtaa myös yhtälö (2.5). Tässä mallissa on huomioitavaa, että $d\mathbf{l}$ on aina kohtisuorassa B suhteen, mikä sallii ristitulon muuntamisen tavalliseksi yhtälöksi. On otettava huomioon myös oikeankäden sääntö [8]. Näin voidaan laskea voiman differentiaali dF :

$$dF = I \left(\frac{\mu_0 I}{4\pi(R+s)} + \frac{\mu_0 I}{4\pi(R+w-s)} \right) dl \hat{z} \quad (6)$$

Jos integroidaan koko välin ylitse, saadaan yhtälö, jonka perusteella saadaan ammuksen vaikuttava kokonaisvoima:

$$\begin{aligned} F &= \int_0^w \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left(\frac{1}{(R+s)} + \frac{1}{(R+w-s)} \right) ds \hat{z} \\ &= \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln \left(\frac{R+w}{R} \right) \hat{z} \\ &= \frac{1}{2} L' I^2 \hat{z} \end{aligned} \quad (7)$$

Tämä yhtälö antaa arvion virtamäärästä, joka vaaditaan halutun voiman muodostamiseksi ammuksen. Kun yhdistetään edelliseen yhtälöön virran suhde aikaan, voidaan myös saada ammuksen loppunopeus ja energia [8]. Yhtälön (7) perusteella voidaan myös havaita, miten raiteet työntävät toisiaan erilleen Lorentzin voiman mukaisesti.

Tässä esityksessä on tehty paljon oletuksia, jotta kaavat ja laskut on saatu mahdollisimman yksinkertaiseen ja kattavaan muotoon. Oikea raidetykki käyttää näitä kaavoja ja niitten lisäksi mutkikkaampia integraaleja ja numeraalisia ratkaisuja.