



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Paulius Apinis

**ELEKTROMAGNETINIO SUVIRINIMO PROCESO IMITATORIAUS
KŪRIMAS IR TYRIMAS
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC WELDING
IMITATION DEVICE**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX049

Elektros energetikos technologijų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

doc. dr. Sonata Tolvaišienė

(Vardas, pavardė)

2019 m. 05 mėn. 23 d.

(Data)

PAULIUS APINIS

**ELEKTROMAGNETINIO SUVIRINIMO PROCESO IMITATORIAUS
KŪRIMAS IR TYRIMAS
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC WELDING
IMITATION DEVICE**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX049

Elektros energetikos technologijų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

Dr. Česlovas Šimkevičius

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2019.5.22

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. dr. Anželika Gaidienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2019-05-22

(Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Elektros inžinerijos studijų kryptis

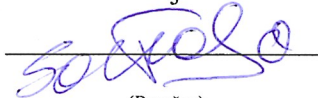
Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa,

valstybinis kodas 6211EX049

Elektros energetikos technologijų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

doc. dr. Sonata Tolvaišienė

(Vardas, pavardė)

2017 09 15

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

Vilnius

Studentui (ei) Pauliui Apiniui

Baigiamojo darbo tema: „Elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus kūrimas ir tyrimas.

Development and research of electromagnetic welding imitation device“

patvirtinta 2017 m. lapkričio 3 d. dekanų potvarkiu Nr. 217el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. gegužės 20 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Apžvelgti elektromagnetinio suvirinimo technologiją ir jos ypatumus.
2. Apžvelgti pagrindinius elektromagnetinio suvirinimo aparato komponentus.
3. Apskaičiuoti elektromagnetinio suvirinimo procesui įvykti reikalingus parametrus.
4. Apskaičiuoti pagrindinius ir pagalbinius ritės parametrus.
5. Sukurti elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatorių.
6. Atlikti eksperimentinius elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus sistemos bandymus.
7. Atlikti vamzdinių detalių suvirinimo eksperimentą.
8. Įvertinti tyrimo rezultatus ir pateikti išvadas.

Vadovas

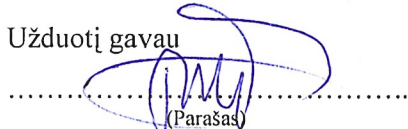


(Parašas)

Dr. Česlovas Šimkevičius

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau



(Parašas)

Paulius Apinis

(Vardas, pavardė)

2017 09 15

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektros inžinerijos katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk. 2...
Data 2019.05.23

Antrosios pakopos studijų **Elektros energetikos sistemų inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus kūrimas ir tyrimas**

Autorius **Paulius Apinis**

Vadovas **Česlovas Šimkevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamojo darbo tikslas yra sukurti ir ištirti elektromagnetinio suvirinimo imitatorių. Darbe apžvelgiama elektromagnetinio suvirinimo technologija ir jos ypatumai, pagrindiniai tokio suvirinimo aparato komponentai. Pagal Biterio ritės parametrų skaičiavimo metodiką atliekami ir analizuojami skaičiavimai ir simuliacijos. Parenkami pagrindiniai elektromagnetinio suvirinimo sistemos komponentai, sujungiama sistema. Testuojamas kibirkštinis, matuojama srovė, įtampa ir magnetinis laukas ritėje. Sistema išbandoma keliais etapais esant skirtingiems sistemos parametrams. Atliekamas metalinių vamzdinių detalių suvirinimo eksperimentas. Rezultatai lyginami su teoriškai atliktais skaičiavimais. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir rekomendacijos.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, skaičiavimai ir simuliacijos, tyrimo objektai ir metodika, tyrimo rezultatai, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 71 p. teksto be priedų, 51 iliustr., 4 lent., 48 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: elektromagnetinis suvirinimas, magnetinio lauko impulsas, Biterio ritė, kibirkštinis, aukštosios įtampos relė.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electrical Engineering

ISBN _____ ISSN _____
Copies No. 2
Date 2019-05-23

Master Degree Studies **Electrical Energetics Systems Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Development and Research of Electromagnetic Welding Imitation Device**

Author **Paulius Apinis**

Academic supervisor **Česlovas Šimkevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The aim of the master paper is to assemble and examine an imitation device of electromagnetic welding. The paper reviews the technology of electromagnetic welding and its characteristics as well as the key components of such a welding device. In line with the methodology of calculating Bitter coil parameters, calculations and simulations are carried out and analysed. Key components of an electromagnetic welding system are selected and the system is connected. A spark gap is tested and the current, voltage, and magnetic field in a coil are measured. The system is tested during several stages with different system parameters. An experiment of welding metal tube components is performed. The results are then compared with theoretical calculations. At the end of the paper, conclusions and recommendations are drawn.

The paper consists of seven parts: introduction, review of bibliography, calculations and simulations, research objects and methodology, results of the experiment, conclusions and suggestions, list of bibliography.

The volume of the paper is 71 pages (excluding appendixes), 51 figures, 4 tables, and 48 bibliographical sources.
Appendixes go separately with the paper.

Keywords: electromagnetic welding, magnetic field impulse, Bitter coil, spark gap, high voltage relay.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Apinis, 20132255

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektros energetikos sistemų inžinerija, EETfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

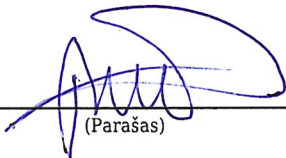
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus kūrimas ir tyrimas“ patvirtintas 2017 m. lapkričio 03 d. dekanų potvarkiu Nr. 217el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Česlovas Šimkevičius. Mano darbo vadovas daktaras Česlovas Šimkevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

Paulius Apinis
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

IVADAS.....	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	14
1.1. Elektromagnetinis impulsinis suvirinimas	14
1.2. Elektromagnetinio suvirinimo pagrindinių parametų ir energijos sąnaudų ryšys	17
1.3. Elektromagnetinio suvirinimo siūlės.....	18
1.4. Elektromagnetinių impulsų suvirinimo pritaikymas	21
1.5. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo technologijos privalumai.....	22
1.6. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo technologijos trūkumai.....	23
1.7. Elektromagnetinio suvirinimo aparato pagrindinės dalys.....	24
1.7.1. Elektromagnetiniai impulsiniai generatoriai magnetiniam suvirinimui	24
1.7.2. Ritė.....	25
1.7.2.1. Vienos vijos ritė	27
1.7.2.2. Sraigtinė ritė	29
1.7.2.3. Vielinė ritė.....	30
1.7.3. Lauko formuotuvas.....	31
1.8. Magnetinio suvirinimo proceso patikra	34
2. SKAIČIAVIMAI IR SIMULIACIJOS.....	35
2.1. Biterio ritė	35
2.2. Analitinių skaičiavimų metodologija	36
2.2.1. Medžiagos pasirinkimas	36
2.2.2. Didžiausias magnetinis laukas tarpelyje tarp ritės ir apdirbamos detalės.....	36
2.2.3. Ritės geometrijos vertės priskyrimas.....	37
2.2.4. Papildomi skaičiavimai.....	37
2.2.5. Konstrukcijos apribojimai	37
2.2.6. Ritės induktyvumas	37
2.2.7. Ritės varža	38
2.2.8. Ekvivalentinės grandinės simuliacija	38

2.2.9. Pagalbiniai skaičiavimai	38
2.3. Ritės induktyvumo ir aktyviosios varžos skaičiavimai	39
2.4. Realios Biterio ritės parametrų skaičiavimas ir simuliacija.....	41
2.5. Skaičiavimų ir simuliacijų rezultatai.....	42
3. TYRIMO OBJEKTAI IR METODIKA	49
3.1. Tyrimo objektai	49
3.1.1. Ritė.....	49
3.1.2. Lauko formuotuvai.....	50
3.1.3. Kibirkštinis	50
3.1.4. Aukštosios įtampos relės	52
3.1.5. Kondensatorių baterija.....	53
3.1.6. Programuojamas valdiklis	53
3.1.7. Aukštosios įtampos šaltinis.....	54
3.1.8. Iškvėdos varžos	54
3.1.9. Trigeris.....	55
3.2. Tyrimui naudojami prietaisai	55
3.3. Tyrimo eiga ir metodika.....	57
3.3.1. Sistemos testavimas	57
3.3.2. Sistemos su 125 nF kondensatorių baterija veikimo bandymas esant skirtingoms įtampos reikšmėms	58
3.3.3. Metalinių vamzdinių detalių formavimo ir suvirinimo bandymas	59
4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI.....	60
4.1. Sistemos testavimo rezultatai.....	60
4.2. Sistemos su 125 nF kondensatorių baterija veikimo bandymų esant skirtingoms įtampos reikšmėms rezultatai	61
4.3. Metalinių vamzdinių detalių formavimo ir suvirinimo rezultatai	62
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	65
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	67
PRIEDAI	71

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo mašinos elektriniai įrenginiai	14
2 pav. EMFP parametrų įtaka lakštiniam metalu	17
3 pav. Energijos perdavimas vykstant elektromagnetiniam formavimui.....	18
4 pav. Vamzdinių apdirbamųjų gaminių suvirinimas elektromagnetiniu impulsu. A – struktūra; B – proceso principas; C – suvirinimo siūlės vaizdas.....	19
5 pav. A – vienpusis suvirinimas; B – dvipusis suvirinimas	19
6 pav. Pavaros veleno jungtis, gauta elektromagnetiniu impulsiniu suvirinimo aparatu.....	21
7 pav. Magnetinio lauko linijos solenoide	25
8 pav. Vienos vijos (kairėje) ir daugiavijės ritės (dešinėje) pavyzdys	26
9 pav. Pagrindiniai toroidinių ričių tipai: a) daugiasluoksnė daugiavijė ritė; b) sraigtinė ritė;.....	27
c) spiralinė ritė; d) vienos vijos ritė	27
10 pav. Magnetinio lauko generatoriaus su vienos vijos induktoriumi schema	28
11 pav. Vienos vijos induktorius su transformatoriumi	29
12 pav. Sraigtinė ritė be sustiprinimo (kairėje) ir su sustiprinimu (dešinėje)	30
13 pav. Vielinės ritės veikimo principas	30
14 pav. a) Magnetinio lauko pasiskirstymas lauko formuotuve; b) srovės kryptys lauko formuotuve ir apdirbamojoje detalėje	32
15 pav. 40 mm ilgio ritės be lauko formuotuvo ir 15 mm ilgio lauko formuotuvo toje ritėje magnetinio lauko indukcijos priklausomybė nuo ritės ir formuotuvo ilgio	32
16 pav. Skirtingų lauko formuotuvų tipai ir pagrindinės savybės	33
17 pav. Elektromagnetinio lauko koncentracija lauko formuotuve	34
18 pav. Principinė Biterio ritės konstrukcija: 1 – Biterio plokštelė, 2 – jungiamasis laidininkas, 3 – kontaktas, 4 – elektros srovės kelias, 5 – kraštinė sutvirtinamoji plokštelė, 6 – izoliatorius	35
19 pav. Tarpinės ir galinės Biterio ritės plokštelės	38
20 pav. Saviindukcijos koeficientas $\Lambda(\alpha, \beta)$ (kaip formos koeficientų α ir β funkcija) idealiai Biterio ritei su elektros srovės tankiu, proporcingu $\frac{1}{r}$	40
21 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 4 \text{ mm}$	44
22 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 6 \text{ mm}$	44
23 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 8 \text{ mm}$	44
24 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 10 \text{ mm}$	44
25 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 12 \text{ mm}$	45
26 pav. Srovių impulsų grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 4\text{--}12 \text{ mm}$	45

27 pav. Srovių impulsų grafikas, kai $U = 3\text{--}10\text{ kV}$, $\Delta = 8\text{ mm}$	45
28 pav. Srovės priklausomybė nuo plokštelės storio esant skirtingoms įtampoms	46
29 pav. Voltamperinė charakteristika esant skirtingiems ritės plokštelių storiams	46
30 pav. Induktyvumo, varžos, impulso kilimo trukmės priklausomybė nuo plokštelės storio	46
31 pav. Magnetinio lauko energijos ir magnetinio lauko indukcijos ritės centre priklausomybė nuo srovės	47
32 pav. „LTspice“ programa sumodeliuota elektromagnetinio suvirinimo aparato schema	47
33 pav. „LTspice“ sudarytos schemos (žr. 32 pav.) srovės ir įtampos impulsai	48
34 pav. „Matlab“ ir „LTspice“ programomis atliktų simuliacijų srovės impulsų palyginimas	48
35 pav. Biterio ritė	49
36 pav. „HOFSTRA group“ kibirkštklis.....	51
37 pav. Kibirkštklio veikimo grafikas	52
38 pav. „Ross Engineering Corporation“ aukštosios įtampos NC relė.....	52
39 pav. „Schneider Electric“ programuojamas valdiklis	54
41 pav. Magnetorezistyvnis jutiklis	55
42 pav. CMR jutiklio skerspjūvis ir vaizdas iš viršaus	56
43 pav. Pagrindiniai B–skaliarinio matavimo prietaiso funkciniai blokai.....	57
44 pav. Kibirkštklio pramušimas	60
45 pav. Srovės impulsas, kai $C = 125\text{ nF}$, $U = 5,35\text{ kV}$	61
46 pav. Srovės priklausomybė nuo sukauptos energijos, kai $C = 125\text{ nF}$	62
47 pav. Magnetinio lauko indukcija, kai $C = 50\text{ }\mu\text{F}$, $U = 5,6\text{ kV}$	62
48 pav. Srovės impulsas, kai ritėje nėra bandinio, $C = 50\text{ }\mu\text{F}$	63
49 pav. Deformuotas aliumininis 8 mm skersmens 0,45 mm sienelės storio vamzdelis.....	63
50 pav. Srovės impulsas su bandiniu ritėje, kai $C = 50\text{ }\mu\text{F}$	64
51 pav. Aliuminio 0,45 mm sienelės storio vamzdelio suvirinimas su žalvariniu 6 mm skersmens pilnaviduriu strypu.....	64

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Skaičiavimams naudojami duomenys	42
2.2 lentelė. Skaičiavimų rezultatai	43
3.1 lentelė. Kibirkštinio techniniai duomenys	50
3.2 lentelė. „Ross Engineering Corporation“ aukštosios įtampos relių parametrai	53

IVADAS

Šiuolaikinė konstravimo pramonė sparčiai vystosi, o naudojamos technologijos nuolat tobulinamos. Automobilių, orlaivių ir traukinių projektuotojai ir gamintojai norėdami sumažinti aplinkos taršą siekia sumažinti transporto priemonių ir įvairių mašinų energijos ir kuro vartojimą gamybai ir eksploatavimui panaudodami lengvesnius metalus. Tokiems gaminiams kurti geriausiai pritaikyti lengvasvoriai aliuminio ir magnio ar pan. lydiniai. Kai įvairioms konstrukcijoms naudojamos tik lengvasvorės medžiagos, jos negali tenkinti reikalingų atsparumo ir stiprumo savybių, todėl lengvasvorės su kitomis turinčiomis stipresnių savybių medžiagomis dažniausiai būtina sujungti suvirinant.

Įvairių metalų sujungimai tampa vis svarbesni, nes pasižymi daugybe privalumų: konstrukcijos lengvos, atsparios korozijai ir pan. Aliuminį suvirinti su nerūdijančiu plienu yra sunku dėl terminio ir metalurginio nesuderinamumo (didelis lydymosi taškų skirtumas, todėl gali susidaryti trapūs metaliniai junginiai). Neseniai sukurtos neįprastos metalų apdirbimo technologijos yra pagrįstos lazeriniu suvirinimu, elektros išlydžio suvirinimu, ultragarsiniu suvirinimu, elektromagnetiniu suvirinimu ir kt. Tokios technologijos turi daug privalumų, pavyzdžiui, nereikalauja tiesioginio kontakto su įrankiu ir gaminiu, mašinos veikia labai tiksliai – iš karto sukuria galutinį gaminio paviršių, nereikalingi reguliarūs sistemų derinimai ir t. t.

Nuo 1950–ųjų pabaigos stiprūs impulsiniai magnetiniai laukai pradėti naudoti labai greitam gaminių formavimui naudojant didelio elektrinio laidumo medžiagas. 1959 m. Harvey ir Brower'is patentavo elektromagnetinio formavimo proceso (toliau – EMFP) principą. Elektromagnetinis suvirinimas (toliau – EMS) – tai šaltojo tipo įvairių laidžiųjų metalų, tokių kaip aliuminis, žalvaris, varis, suvirinimo su plienu, titanu, magniu, variu ir kt., sujungimo ir formavimo technologija. Nors toks suvirinimo principas anksčiau neišpopuliarėjo, tačiau EMFP įrangos tobulėjimas, naujos geresnio supratimo ir procesų prognozavimo galimybės dabar tik skatina EMFP pritaikymą pramonėje. Todėl šiomis dienomis dėmesys telkiamas ties kietosios būsenos tipo elektromagnetinio suvirinimo procesu, o norint dar labiau patobulinti technologiją, svarbu, kad būtų atlikta daug eksperimentų.

Vienas didžiausių elektromagnetinio suvirinimo technologijos trūkumų – nėra galimybės įvertinti suvirinimo kokybės realiu laiku ir stebėti ritės nusidėvėjimą. Tam, kad toks trūkumas būtų pašalintas, reikia sukurti magnetinio suvirinimo imitatorių su tam tikrų jutiklių sistema. Tokio suvirinimo aparato kūrimas yra sudėtingas procesas, o vienos didžiausių tokių aparatų kūrimo problemų – ritės projektavimas ir pagaminimas, didelių elektros srovių suvaldymas.

Darbo objektas – elektromagnetinio suvirinimo imitatorius.

Darbo tikslas – sukurti ir ištirti elektromagnetinio suvirinimo imitatorių.

Darbo uždaviniai:

- Apžvelgti elektromagnetinio suvirinimo technologiją ir jos ypatumus.
- Apžvelgti pagrindinius elektromagnetinio suvirinimo aparato komponentus.
- Apskaičiuoti elektromagnetinio suvirinimo procesui įvykti reikalingus parametrus.
- Apskaičiuoti pagrindinius ir pagalbinus ritės parametrus.
- Sukurti elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatorių.
- Atlikti elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus sistemos bandymus.
- Atlikti vamzdinių detalių suvirinimo eksperimentą.
- Įvertinti tyrimo rezultatus.

Darbo metodai: mokslinės literatūros analizė, Biterio ritės konstrukcijos analizė.

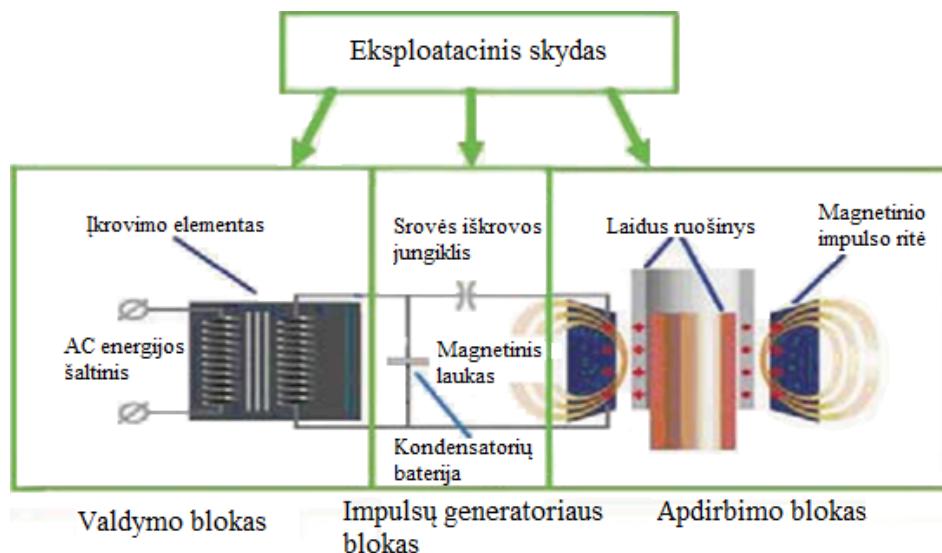
1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Elektromagnetinis impulsinis suvirinimas

Elektromagnetinio suvirinimas yra „šaltojo“ suvirinimo bekontaktis procesas, kurio metu 2 detalėms sujungti naudojama stipri ir labai greita smūginė jėga. Procesą galima palyginti su sprogimo suvirinimu, bet naudojant magnetinę jėgą vietoj sprogmenų norint detalę įgreitinti. Skirtingai nuo įprastų suvirinimo procesų, nevyksta lydymasis, todėl nėra reikšmingų medžiagų savybių pokyčių. Veikimo principas grindžiamas Lorencio jėgos teorija, kurioje teigiama, kad dalelei, turinčiai krūvį q ir judant magnetiniame lauke greičiu $\vec{v}$, kurio magnetinė indukcija $\vec{B}$, ji yra veikiamą jėga $\vec{F}$:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (1.1)$$

Pagrindiniai suvirinimo aparato komponentai gali būti schematiškai pavaizduoti, kaip parodyta 1 pav.



1 pav. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo mašinos elektriniai įrenginiai [1]

Pirminė EMS aparato grandinė palaiko proceso vyksmą, t. y. valdymo blokas ir impulsų generatoriaus blokas, o reikalingas energijos kiekis paprastai siekia nuo 5 kJ iki 200 kJ, kuris kaupiamas dideliame kondensatoriuje arba kondensatorių baterijoje, dažniausiai įkraunant aukštąją įtampą nuo 3 kV iki 30 kV, o didžiausia per dešimtis mikrosekundžių pasiekiamą srovę paprastai yra nuo 10 kA iki 1 MA [1], [2], [3].

Kondensatorių baterija įkraunama aukštosios įtampos įkrovos elementu iki iš anksto žinomo reikiamo energijos lygio. Kai baterija visiškai įkrauta, srovės iškroviklis sujungia impulsų generatoriaus bloką su apdirbamosios detalės bloku perduodamas sukauptą energiją į ritę, o srovė ritėje indukuoja labai stiprų trumpalaikį magnetinį lauką. Jeigu magnetinį lauką reikia koncentruoti

konkrečioje norimoje ritės vietoje, naudojamas lauko formuotuvas (angl. *field shaper*), kuris patalpinamas ritės viduje. Lauko formuotuvas naudojamas siekiant sustiprinti magnetinį lauką jį koncentruojant. Norimoje apdirbti detalėje indukuojasi srovė, kuri teka priešinga kryptimi negu ją sukėlusį pirminę srovę ritėje. Kintantis magnetinis laukas sukuria srovės laidžioje išorinėje (judančioje) apdirbamojoje detalėje. Priešingi laukai ritėje ir ruošinyje sukuria elektromagnetinę stūmą tarp ritės ir ruošinio. Taigi, pagal Lorencio jėgos teoriją, dėl sukurinių srovių magnetinis laukas judančios detalės (vamzdžio) išorėje kuria stūmos jėgą, kuri įgreitina išorinės detalės dalį ir radialine kryptimi stumia vamzdį į vidinę jo pusę vidinės apdirbamojo gaminio dalies link. Nedidelis tarpas tarp ritės ir detalės taip pat turi įtakos magnetinei impulsų jėgai ir padeda gauti didelį smūginį slėgį (angl. *impact pressure*). Jeigu detalės judėjimo greitis vidine kryptimi yra tinkamas ir tikslus, dėl sukauptos energijos įvyksta išorinės detalės smūgis į vidinę detalę – detalių sukibimas. Detalių susidūrimo metu gretimų paviršių atomai yra suvedami kartu įveikiant jų stūmos jėgą. Atstumas tarp atomų tampa pakankamai mažas, kad būtų galima dalytis elektronais ir sukurti intermetalinę būseną, todėl sukuriamas suvirinimo sukibimas.

Pagrindinis elektromagnetinių impulsų sistemos principas – rite paleidžiama labai didelė srovės iškrova, sukuriamą sukurinę srovę laidžioje detalėje [1], [4]. Svarbu, kad ruošinys būtų pakankamai elektriškai laidus magnetinių jėgų susidarymui, dėl kurių būtų pasiekiami tinkami suvirinimo parametrai.

Impulsiniai elektromagnetiniai laukai spartaus šlampavimo procesuose naudojami didelio savitojo laidumo metalų formavimui. Taigi, kondensatorių baterijoje sukaupia energija $E_C(t)$, kuri gali būti apskaičiuojama pagal 1.2 formulę atsižvelgiant į talpą C ir kraunamą įtampą $U(t)$, būna iškraunama įjungiant didelės galios jungiklį:

$$E_C(t) = \frac{1}{2}CU(t)^2. \quad (1.2)$$

Elektros srovė $I(t)$ – stipriai slopinamas sinusoidinis svyravimas – apibūdinamas rezonansinės grandinės elektrinėmis savybėmis. Skirtingi induktyvumai ir varžos skaičiavimui gali būti sumuojami ir pateikiami ekvivalentiniu induktyvumu L_{rc} ir ekvivalentine varža R_{rc} . Jeigu rezonansinės grandinės talpa C , induktyvumas L_{rc} ir varža R_{rc} yra žinomi, tada slopinamieji svyravimai gali būti apibūdinami diferencialine lygtimi [6]:

$$L_{rc} \frac{dI(t)}{dt} + R_{rc}I(t) + \frac{1}{C} \int I(t)dt = 0. \quad (1.3)$$

Tariant, kad pradinės sąlygos, kai kondensatoriaus įtampa yra U_0 ir proceso pradžioje nėra srovės (pavyzdžiui, $U(t=0) = U_0$ ir $I(t=0) = 0$), diferencialinė lygtis sprendžiama taip [6]:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\beta t} \sin \omega t, \quad (1.4)$$

kai slopinimo koeficientas β :

$$\beta = \frac{R_{rc}}{2L_{rc}}, \quad (1.5)$$

ir srovės kampinis dažnis ω :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}, \quad (1.6)$$

kai

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{RC}C_{RC}}}. \quad (1.7)$$

Srovė yra susijusi su atitinkamu magnetiniu lauku, kuris yra koncentruotas tarp ruošinio ir darbinės ritės. Šis magnetinis laukas kuria sūkurines sroves, kurios ruošinyje teka priešinga kryptimi. Jos išsidėsčiusios arti ruošinio paviršiaus dėl paviršinio efekto [6]. Srovės skvarbos gylis į ruošinį vadinamas paviršinio efekto charakteringuoju gyliu δ ir labiausiai priklauso nuo ruošinio savitojo elektrinio laidumo κ bei uždaros grandinės dažnio f :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \kappa \mu_0 \mu_r}}, \quad (1.8)$$

kur μ_0 yra magnetinė skvarba vakuume ir μ_r yra medžiagos santykinė skvarba esant sūkurinėms srovėms.

Didžiausia srovė induktoriuje gali būti aproksimuojama kaip [7]:

$$I_{\max} = \frac{B_{\max} \cdot l_{ritės}}{\eta \cdot \mu_0}. \quad (1.9)$$

Srovės tankio pasiskirstymas ritėje [7]:

$$\xi = \frac{\Delta \cdot \eta}{l_{ritės}}, \quad (1.10)$$

kur Δ – vijos storis,

η – idealios simetrinės ritės vijų skaičius.

Pats pirmasis ritės varžos skaičiavimas yra pagrįstas Omo galia (Džaulio šiluma) ir atliktas Kratz'o ir Wyder'io [7]:

$$P = I^2 R_{ritės}. \quad (1.11)$$

Varža pastoviai srovei nepaisant kontaktinių varžų tarp metalinių plokščių [7]:

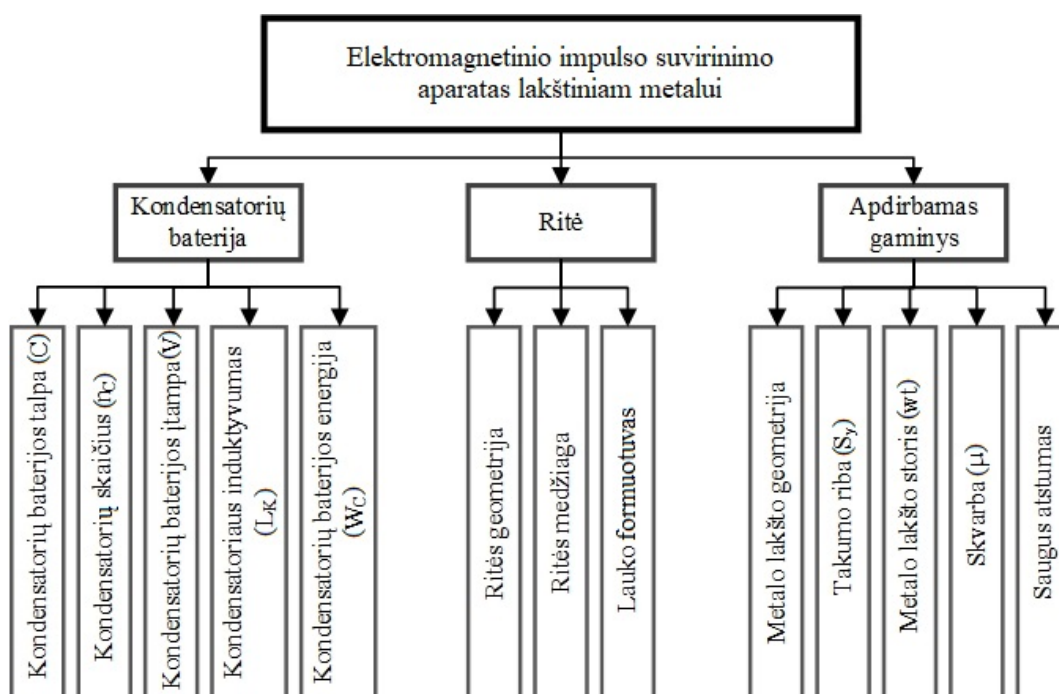
$$R_{ritės} = N^2 \cdot \frac{\rho \cdot \pi}{\xi \cdot r_1 \cdot \beta \cdot \ln(\alpha)}. \quad (1.12)$$

1.2. Elektromagnetinio suvirinimo pagrindinių parametų ir energijos sąnaudų ryšys

Elektromagnetinė impulso jėga yra labai svarbi norint atlikti metalų sujungimą. Gana daug parametų (srovė, laidumas, varža, induktyvumas, neutralus atstumas ir kt.) daro įtaką magnetinio impulso jėgai [1]. Neutralus atstumas apibūdinamas kaip tarpas tarp metalinių detalių – optimalus dydis, suteikiantis maksimalų suvirinimo siūlės atsparumą tempimui [1]. Norint gauti didelio poveikio slėgį, taip pat reikia atsižvelgti į taikomo slėgio trukmę [1].

Lauko formuotojas yra praktinis įrankis, kuris daugiausia naudojamas elektromagnetinių impulsų formavimui ir vamzdinių detalių apdirbimui. Jis padeda sukcentruoti magnetinį srautą ir generuoti magnetinį slėgį norimoje detalės vietoje [1].

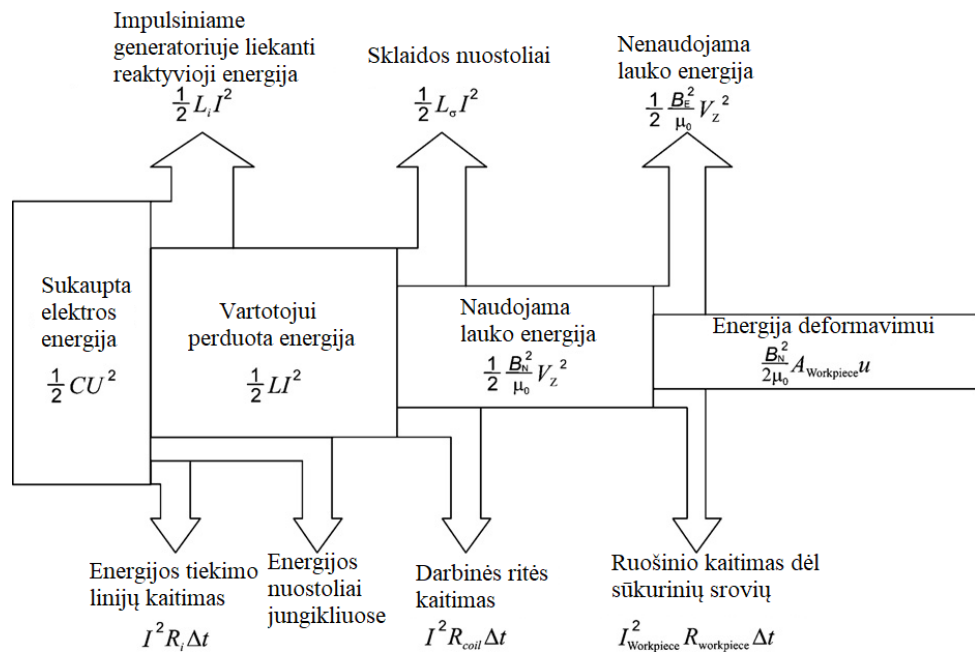
2 pav. pavaizduoti pagrindiniai parametrai, kurie daro įtaką EMFP, o 3 pav. – elektromagnetinio formavimo energijos sąnaudos.



2 pav. EMFP parametų įtaka lakštiniam metalui [1]

Viena pagrindinių EMS sistemos dalių yra kondensatorių baterija. Ji susideda iš tam tikro kiekio kondensatorių, kurie gali talpinti iki 200 kJ energijos [1].

Norint pasiekti tinkamus suvirinimo parametrus, svarbu, kad ruošinys būtų pakankamai elektriškai laidus. Elektromagnetinio impulsinio formavimo efektyvumas yra tiesiogiai susijęs su apdirbamosios detalės medžiagos varža. Storio apribojimas priklauso nuo elektromagnetinio impulsinio įtaiso energijos sąnaudų, induktoriaus stiprumo, savitojo medžiagų tankio [1], [5].



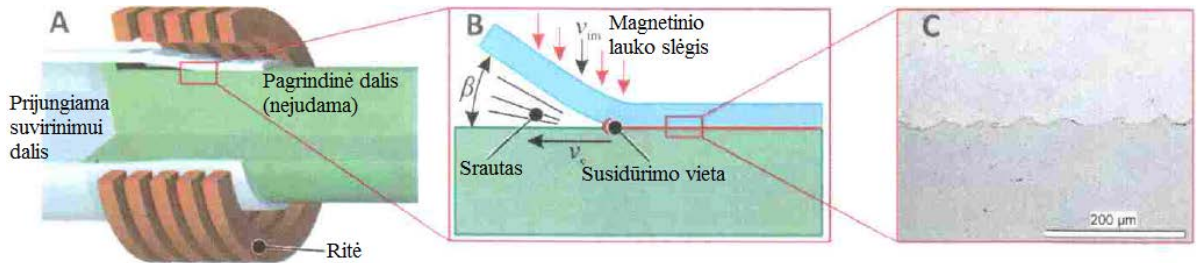
3 pav. Energijos perdavimas vykstant elektromagnetiniam formavimui [6]

1.3. Elektromagnetinio suvirinimo siūlės

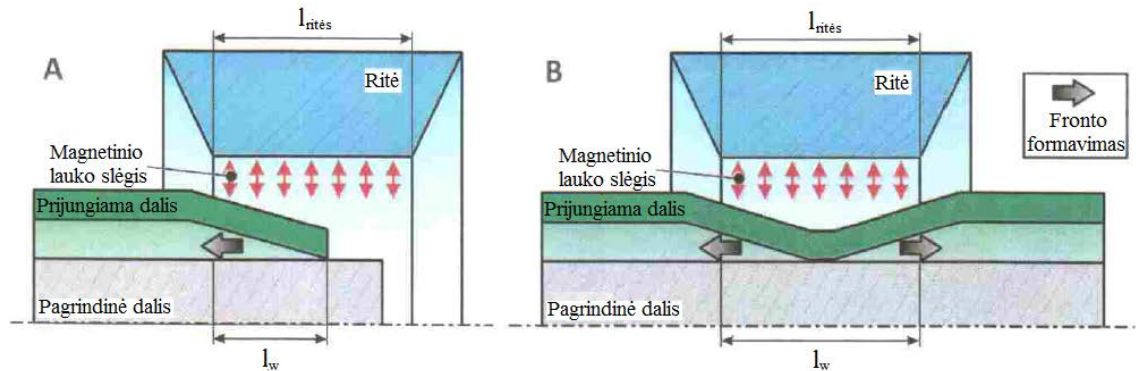
Reikiamas formavimo (štapavimo) slėgis priklauso nuo sienelių storio, elektrinio laidumo, takumo jėgos ir geometrinių detalės formos derinio [8]. Veiksmingiausias štapavimas – kai metalo paviršinio efekto charakteringas gylis lygus ruošinio sienelės storiui [1].

Sėkmingą suvirinimą lemia sujungimo vietos savybės, kurios susidūrimo metu būna stipriai paveikiamos išorinės dalies (dalies, kuri prijungiama prie nejudančios dalies) deformacijos [9]. Esant tinkamoms sąlygoms, susidaro masės debitas, susidedantis iš oksidų ir nuolaužų, kuris išvalo paviršius ir taip įvyksta metalurginis sukibimas [10]. Trys pagrindiniai dažniausiai vertinami veiksniai sujungimų formavime yra susidūrimo kampas β , susidūrimo greitis v_c , radialinis smūgio greitis v_{im} . Šie parametrai tarpusavyje yra geometriškai susiję ir pagrįsti EMS panašumu su suvirinimo sprogimu procesu, kuris yra tiriamas keletą paskutinių dešimtmečių [11]. Suvirinimo formavimui trukdančios sąlygos turi būti ištirtos kiekvienam skirtingam specifinių įrenginių, įrankių, ruošinių deriniui, tačiau lėtesni negu 250 m/s radialiniai smūgio greičiai ir mažesni negu 5° smūgio kampai laikomi nepalankūs EMS [11]. 4 pav. galima matyti suvirinimo schemą ir mikrografu padarytą suvirinimo aplinkos nuotrauką. Stern'as et al. pateikia daugiau išsamesnių srautinės medžiagos tyrimų, skirtų aliuminio – aliuminio ir aliuminio – magnio pavyzdžiams [12]. Suvirinimo vietos kontūras apibūdinamas daugeliu veiksnių – radialiniais, ritės ir išorinės dalies, išorinės dalies ir vidinės dalies tarpais, taip pat ritės ir išorinės dalies ašiniais montavimais (žr. 5 pav.). Zhang'as [13] ištyrė, kad vienpusis ar dvipusis suvirinimo procesas gali būti atliktas naudojant ašinį ruošinio padėties nustatymą ritėje, kurios didžiausias darbinis ilgis – $l_{ritės}$. Jeigu l_w (darbinis ilgis) $< l_{ritės}$, tada

procesas įvyksta išilgai vieno fronto, kur išorinės dalies fronto kraštas susiduria su vidine dalimi ir tęsiasi per vieną frontą ant vidinės dalies (5 pav. A). Jeigu $l_w \geq l_{coil}$, tai įvyksta dviejų frontų procesas, kur susiduria išorinė dalis su vidine dalimi lauko formuotojo ir ritės pločio centre, ir tęsiasi išoriškai išilgai abiejų frontų (5 pav. b) [9].



4 pav. Vamzdinių apdirbamųjų gaminių suvirinimas elektromagnetiniu impulsu. A – struktūra; B – proceso principas; C – suvirinimo siūlės vaizdas [12]; [9]



5 pav. A – vienpusis suvirinimas; B – dvipusis suvirinimas [9], [13]

Slėgio skirtumas tarp dviejų taškų ruošinio sienelėje apibūdinamas kaip per atstumą veikianti jėga ir kaip vamzdinį ruošinį veikiantis bendras slėgis. Slėgį galima apskaičiuoti naudojant vamzdžio vidinį spindulį r_i ir išorinį spindulį r_o kaip integravimo ribas [6]:

$$p(r, t) = \int_{r_0}^{r_i} F(r, t) dr = \frac{1}{2} \mu (H_{gap}^2(t) - H_{pen}^2(t)), \quad (1.13)$$

jeigu ruošinys yra metalo lakštas, tada naudojamas apatinis ir viršutinis lakšto paviršius integralo režiams. Tiek naudojant vamzdį, tiek lakštą – magnetinis slėgis priklauso tik nuo tarpe tarp darbinės ritės ir ruošinio H_{gap} veikiančios magnetinio lauko jėgos ir nuo besiskverbiančio magnetinio lauko H_{pen} .

Jeigu paviršiaus aukštis yra mažas lyginant su ruošinio storiu, tuomet besiskverbiantis magnetinis laukas yra dažnai nepaisomas ir magnetinis slėgis gali būti skaičiuojamas pagal [6]:

$$p(t) = \frac{1}{2} \mu H_{gap}^2(t). \quad (1.14)$$

Norint suskaičiuoti tiesioginio veikimo slėgio ritės naudojimui ašinį magnetinio lauko jėgos pasiskirstymą tarpe H_{gap} , gali būti naudojamas sąryšis, pagrįstas darbinės ritės apvijų skaičiumi n , ritės srove $I(t)$, ritės ilgiu l ir taip vadinamu pasiskirstymo koeficientu k_H [6]:

$$H_{gap}(t) = \frac{nI(t)}{l} k_H, \text{ kai} \quad (1.15)$$

$$k_H = \frac{1}{\pi} \left(\arctan \frac{2z+l}{a} - \arctan \frac{2z-l}{a} \right). \quad (1.16)$$

Šis pasiskirstymo koeficientas priklauso nuo efektyvaus tarpo a tarp darbinės ritės ir ruošinio, taip pat įtraukiant oro tarpelio plotį a_{oro} ir pusę ruošinio paviršiaus aukščio δ_{w_p} bei pusę ritės paviršiaus aukščio $\delta_{ritės}$ [6]:

$$a = a_{oro} + \frac{1}{2} (\delta_{ruošinio} + \delta_{ritės}). \quad (1.17)$$

Magnetinį slėgį taip pat galima skaičiuoti pagal pagrindines impulsinio generatoriaus reikšmes ir geometriją bei elektrines darbinės ritės savybes [6]:

$$p(t) = \frac{2L_A I(t)^2}{a \left((r_{0,ritės} + r_{0,ruošinio})^2 - (r_{i,ritės} + r_{i,ruošinio})^2 \right)}. \quad (1.18)$$

Lippmann'as ir Schreiner'is [14] sulygina vamzdžio magnetinį slėgį ir inercijos jėgą, kuri priklauso nuo tankio ρ , sienelės storio s ir pagreičio (d^2u / dt^2) taip išsprendžiant ruošinio pagreičio lygtį. Ruošinio greičio skaičiavimas ir poslinkio radimas:

$$v = \frac{du}{dt} = \frac{B_m^2}{2\mu_0 \rho s} t, \quad (1.19)$$

$$u = \frac{B_m^2}{4\mu_0 \rho s} t^2. \quad (1.20)$$

Kojima et al. [15] atliko dviejų frontų vyksmų eksperimentus. Šio darbo tikslas buvo įvertinti smailėjantį pagrindinės dalies kampą pagal gaunamos suvirinimo siūlės ilgį [9]. Aizawa et al. atliko dviejų frontų suvirinimo procesą tarp aliuminio lydinių bei SPCC (Japonijoje naudojamas pramoninis plieno lakštų žymuo) plieno sujungimų [16]. Buvo naudojama plokščia didžiausio galimo darbinio ilgio ritė ($l_{ritės} = 5 \text{ mm}$). Faes'as et al. [41] paskelbė, jog lauko formuotuvo krašto ir išorinio ruošinio užėjimas vienas ant kito daro didelę įtaką varinių / žalvarinių vamzdžių suvirinimo sąlygoms. Buvo įvertinti darbiniai atstumai lauko formuotuve iki 5,5 mm kartu su didžiausia darbine zona $l_{ritės} = 15$

mm, tačiau nebuvo atlikti eksperimentai su dvipusiais frontais bei nebuvo įvertinti jokie rezultatai po suvirinimo [9].

Yra išskiriamų paaiškinimų, kad vieno ar dviejų frontų suvirinimo procesas galėtų būti naudingesnis konkrečiam pritaikymui, tačiau tai liko nepaisoma su EMS besisiejančioje literatūroje. Zhang'as [13] pastebėjo, kad vienpusiam frontui reikėjo mažiau įkraunamos energijos, kai buvo padidinta ašinė vamzdžio deformacija [9].

Gali egzistuoti pereinamoji zona tarp vieno ir dviejų frontų vyksmų, pavyzdžiui, esant artimam darbiniam ilgiui, bet ne ilgesniam kaip ritės ilgis, tačiau trūksta literatūros, kurioje būtų kalbama apie vieno ir dviejų frontų suvirinimo eksperimentų palyginimus ir nėra straipsnių apie frontų režimus su nuodugniais tyrimais ir palyginimais [9].

1.4. Elektromagnetinių impulsų suvirinimo pritaikymas

Elektromagnetinis impulsinis suvirinimas yra šalto suvirinimo technologija, galinti sujungti skirtingas medžiagas. Įvairių medžiagų suvirinimas vis labiau norimas automobilių pramonėje ir kt. Pavyzdžiui, automobilių pramonėje aliuminio – plieno pavaros velenai gali būti suvirinti naudojant EMS (žr. 6 pav.). Tokias suvirinamas jungtis ne visada paprasta gauti pasitelkiant tradicines suvirinimo technologijas dėl medžiagų, kurias norima sujungti, didelių savybių skirtumų.

EMS metu vienintelė sukuriama šiluma atsiranda dėl ruošinio dalių susidūrimo įvykstančios deformacijos ir sūkurinių srovių išorinėje detalės dalyje. Dažniausiai išvengiama sujungimą susilpninančios trapios intermetalinės fazės susidarymas, nes negaunamas šilumos kiekis iš aplinkos. Galimybė sujungti panašius ir skirtingus metalus ar lydinius, taip pat didelis kartojamumas ir gamybiniai pajėgumai pastaraisiais metais skatina EMS pritaikymą įvairiuose komerciniuose sektoriuose: automobilių, kosmoso aviacijos, amunicijos, pakavimo, elektros ir pan. [9].



6 pav. Pavaros veleno jungtis, gauta elektromagnetini impulsiniu suvirinimo aparatu [19]

1.5. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo technologijos privalumai

Įdomiausia EMS sritis – tai galimybė suvirinti daugybę medžiagų, kurios anksčiau buvo laikomos sunkiai suvirinamomis arba iš viso negalėjo būti suvirintos. EMS pasižymi daug privalumų, įskaitant kainą, aplinką, kokybę ir našumą [1], [20], [21], [22], [9], [23].

EMS sumažina gamybos procesų ir komponentų sąnaudas, nes suvirinimo procesas atliekamas nenaudojant, pavyzdžiui, suvirinimo vielos ar apsauginių dujų. Procesui nereikia išmetamųjų dujų išleidimo angos, energijos suvartojimas yra mažesnis nei įprastų metodų, nereikalingas joks ruošinio „prieš“ ir „po“ valymas [1], [21], [3]. Nėra jokio mechaninio kontakto tarp ritės ir apdirbamojo gaminio, todėl ant gaminio neatsiranda jokių nešvarumų ar žymių. Procesui nereikia šilumos, dėl to išvengiama įprastinio suvirinimo problemų, kai šilumos išgaunama per daug ar per mažai, pavyzdžiui, deformuojant, ir dėl kitų su jungtimi susijusių problemų, todėl sumažėja remonto arba perdirbimo sąnaudos [3]. Įranga gali būti valdoma darbuotojo, neturinčio daug darbo patirties. EMS technikai nereikalingi nuolatiniai reguliavimai, kaip tai įprasta tradiciniams suvirinimo įrenginiams [1], [12].

EMS yra aplinkai nekenksmingas procesas: neišskiriama šiluma, nėra spinduliuotės, nėra dujų, dūmų ir kibirkščių, nenaudojama alyva ar tepalai [21]. Be to, EMS pasižymi mažu skleidžiamu triukšmu.

Naudojant EMS procesą galima pagaminti aukštos kokybės produktus, nes tai yra šaltas gamybos procesas be terminio apdorojimo ir nėra šilumos veikimo zonos, dėl ko nebelieka lokalizuoto atkaitinimo tikimybės [21]. Suvirinimo zonoje ir jungties sandūroje nesivysto korozija [1]. Suvirinimo jungtys yra stipresnės ir lengvesnės negu pagrindiniai naudojamo ruošinio metalai. Suvirintos dalys gali būti iš karto naudojamos. Suvirinimo metu medžiagoms nesusidaro vidinis įtempis, todėl vėliau nėra reikalinga atlikti tam tikrų tuos įtempius panaikinančių procesų, taip išvengiama smulkių įplyšimų sukūrimo suvirinimo srityje [1].

EMS leidžia projektuoti anksčiau suvirinimu neįmanomas skirtingas medžiagas, taip pat leidžia suvirinti lengvas ir stipresnes medžiagas [1]. Tokia technologija gali būti naudojama metalinėms ir nemetalinėms medžiagoms (pavyzdžiui, keramikai, polimerams, gumai, kompozitams, stiklui ir kt.) sujungti. Tai parodyta Al–Hassani et al. [24], kur metalinis dangtelis prijungiamas prie stiklinio butelio, ir Rafailoff'o ir Schmidt'o [25] pavyzdyje, kur sukurama jungtis tarp metalinio vamzdžio ir porcelianinės dalies. Dėl to, kad magnetinės jėgos prasiskverbia į anksčiau minėtas nemetalingas mažo laidumo medžiagas, suvirinimas yra įmanomas vakuume, inertinių dujų ar švarios patalpos sąlygomis. Taigi, galima realizuoti preciziškai jautrių medžiagų formavimą.

Kai detalės į sistemą dedamos rankiniu būdu – gamybos greitį riboja laikas, reikalingas apdirbamai detalei padėti ir paimti. Visa įranga gali būti lengvai pritaikyta skirtingoms reikmėms ir

lengvai automatizuojama [1], [21], [26], [8]. EMS yra tinkamas masinei gamybai – viena sistema gali lengvai suvirinti milijonus dalių per metus [27].

Procesą galima valdyti nuotoliniu būdu, impulsų generatorius neprivalo fiziškai būti toje pačioje patalpoje kaip ir suvirinimui naudojama ritė. Pasak Zittel'io [28], tai galima panaudoti, pavyzdžiui, siekiant uždaryti radioaktyviųjų atliekų kontenerius radioaktyvioje aplinkoje.

Belyy et al. [5] taip pat skelbia, kad toks procesas plečia technologinį lankstumą, nes ta pati ritė gali būti naudojama skirtingų formų ruošiniams apdirbti. Be to, EMFP galima atlikti sunkiai pasiekiamose vietose, todėl, kad ritė gali būti prijungta atskirai prie kondensatoriaus baterijos lanksčiomis šynų juostomis.

1.6. Elektromagnetinio impulsinio suvirinimo technologijos trūkumai

EMS, kaip ir kitų rūšių suvirinimams, yra apribojimų [20], [29]. Tiesiogiai gali būti formuojamos tik elektriškai laidžios medžiagos, o esant nelaidiems metalams reikalingos naudoti papildomos priemonės (pavyzdžiui, laidžios plokštelės). Šis procesas labiausiai tinka medžiagoms, kurių didelis elektrinis laidumas ir mažas plastinio tekėjimo įtempis. Bertholdi ir Daube'as [30] nurodė, kad maksimalus specifinis atsparumas neturi būti mažesnis kaip $15 \mu\Omega\text{cm}$ (atitinka specifinį elektrinį laidumą – $6,7 \text{ MS/m}$). Pasak Belyy et al. [5] mažiau laidžios medžiagos gali būti sėkmingai formuojamos, jei naudojamos EMS mašinos, kurių aukštas iškrovos dažnis (60–100 kHz).

Šiuo metu gaminių lakštams suvirinti storis apribotas iki 6 mm aliuminio ir 1–2 mm plieno, štampuojant – iki 11 mm aliuminio ir 3 mm plieno. Sunku rasti optimalų atstumą tarp suvirinamų dalių, kas yra svarbu, kad būtų sukurtas tinkamas smūgio greitis. Reikalinga didelė galia mažiau laidžioms medžiagoms [1], [29]. Tik nedidelė įkrovos energijos dalis naudojama plastinei deformacijai, kurios rezultatas yra gana mažas suvirinimo ar formavimo efektyvumas. Bertholdi ir Daube'as [30] nustatė, kad deformacijai ir kondensatorių įkrovai reikalinga energija yra ne didesnė negu 20 %, o Bauer'is [31] kalba tik apie 2 % efektyvumą.

Praktiniai EMS apribojimai yra susiję su labai dideliu elektros srovių valdymu. Didžiausias EMS įrangos apribojimas yra susijęs su elektros jungtimis tarp kondensatorių, jungiklio ir ritės. Vienas iš pagrindinių EMS apribojimų – sudedamųjų dalių (ritės, kondensatoriaus ir jungiklio) sujungimas, nes reikalingi ypatingos specifikacijos kabeliai [1], [5]. Labai didelių lakštinio metalo dalių negalima formuoti dėl didelių ričių projektavimo bei pagaminimo problemų, be to, visa naudojama įranga yra brangi [1].

Yra būtini tam tikri griežti saugumo reikalavimai dėl stiprius magnetinius laukus kuriančių didelių srovių ir aukštųjų įtampų naudojimo.

1.7. Elektromagnetinio suvirinimo aparato pagrindinės dalys

Atsižvelgiant į gaminių konstrukciją, EMS aparatų dydžiai ir formos yra skirtingi, tačiau aparatų sistemų elektros įrenginiai yra tokie patys visiems tokio tipo aparatams (žr. 1 pav.) [1]. Sistema susideda iš keturių blokų: impulsų generatoriaus, valdymo (eksploatacinio) skydo, apdirbimo bloko ir valdymo bloko [1], [20], [21], [26], [32], [33].

Impulsų generatorius susideda iš kondensatorių baterijos, kurioje yra sukaupiama elektros energija ir iškraunama štamavimo (formavimo) ar suvirinimo metu per ritę, ir srovės iškrovos jungiklio, kurį dažniausiai sudaro didelio skersmens varinės šynos [1]. Valdymo bloką sudaro įkrovos įrenginys ir kintamosios srovės maitinimas [1]. Apdirbimo blokas susideda iš elektromagnetinių impulsų ritės, elektriškai laidžios detalės, lauko formuotuvo (pasirinktinai) ir elektros kabelių. Valdymo skyde yra programuojamo loginio valdiklio (toliau – PLC) sistema, kuri veikia kaip skaitmeninis kompiuteris – naudojamas procesui automatizuoti kontroliuojant ir stebint elektromagnetinio impulso kokybę [1], [26]. Didžiausia srovė (ne trumpojo jungimo) pasiekia iki 2 MA priklausomai nuo įrenginių dydžio. Energijos iškrova pasiekia 180 kJ ar daugiau, o šių mašinų produktyvumas – nuo 10 iki 600 dalių per minutę pagal „Pulsar“, „ESAB“, „PST“ ir „Elmag“ gaminamų mašinų specifikacijas [1], [8], [34], [23].

1.7.1. Elektromagnetiniai impulsiniai generatoriai magnetiniam suvirinimui

Kadangi elektromagnetiniam formavimui trumpam laikui yra reikalingas didelis energijos kiekis, todėl būtinos energijos kaupimo sistemos. Energijos kaupimas kondensatoriuose yra pati ekonomiškiausia kaupykla norint atlikti elektromagnetinį formavimą [6].

Elektromagnetinis suvirinimo aparatas paprastai susideda iš:

- kondensatorių baterijos;
- didelės srovės jungiklių;
- aukštosios įtampos įkrovos modulio, įkrovos jungiklio ir trumpojo jungimo įrenginio;
- energijos perdavimo sistemos, kuria energija būtų perduodama iš kondensatorių baterijos į ritę (šynos);
- valdymo įtaisų.

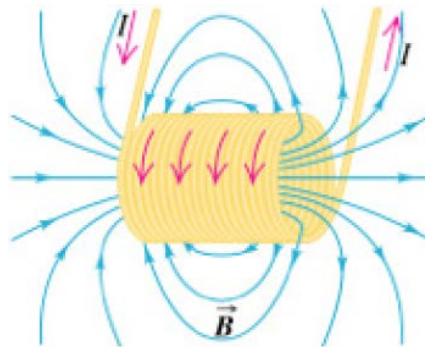
Pagal Belyy et al. [5] kondensatorių baterija turi būti mažo induktyvumo ir gebėti atlaikyti pakankamai impulsinių iškrovų. Pagrindiniai kondensatorių baterijos parametrai yra talpa C ir didžiausia galima įkrovos įtampa $U_{\max}$. Šie 2 parametrai lemia didžiausią galimą kondensatorių įkrovos energiją $E_{c,\max}$. Dėl izoliacijų ribotumo, didžiausia įtampa dažniausiai siekia 20–25 kV [6]. Mažų detalių formavimui, didžiausia įkrovos energija dažniausiai siekia 6–20 kJ [6].

Kondensatorių baterijos įkrova gali būti realizuojama aukštosios įtampos nuolatinės srovės arba pastovios įtampos maitinimo šaltiniais. Vis dėlto, pirmasis maitinimo šaltinis yra efektyvesnis, o antrasis paprastesnis ir pigesnis [5]. Iškrava per ritę įvykdoma iškrovos moduliu ir didelės srovės jungikliu. Tokie jungikliai turi sinchroniškai iškrauti labai dideles sroves (gali siekti 100 kA ir daugiau) per labai trumpą laiką (dažniausiai mažiau negu 10^{-7} s). Galimi didelės srovės jungikliai: kibirkštiniai, ignitronai, tiratronai, vakuuminiai ar skirtingo oro trijų elektrodų iškrovikliai ir įvairūs 2 elektrodų mechaniniai jungikliai. Teigiama, kad kibirkštiniai yra reikalinga intensyvi priežiūra, o ignitronų beveik nereikia prižiūrėti, bet turi saugumo spragą dėl gyvsidabrio katodo. Ypač paskutiniaisiais metais plėtojama galimybė pritaikyti puslaidininkius jungiklius didelės galios elektromagnetiniams suvirinimo ar formavimo aparatams [6].

Norint sukurti galingą elektromagnetinį suvirinimo aparatą, turi būti mažas sistemos induktyvumas. Taigi, norint pasiekti didžiausią galimą lankstumą tarp maksimalios srovės ir ritės konstrukcijos, sistemos varža ir induktyvumas turi būti kuo mažesni. Tai galima pasiekti ne tik naudojant iš atitinkamų medžiagų pagamintus įrenginius, bet ir jungiant kondensatorius, jungiklius, šynas, kabelius lygiagrečiai. Laidų, kabelių ir šynų ilgiai turėtų būti kiek įmanoma trumpesni ir kuo mažesnio induktyvumo ir varžos, pavyzdžiui, koaksialiniai.

1.7.2. Ritė

Įvykus srovės iškrovai, srovė teka rite ir indukuoja ašinį magnetinį lauką (žr. 7 pav.), kuris proporcingas jį sukūrusiai srovei.



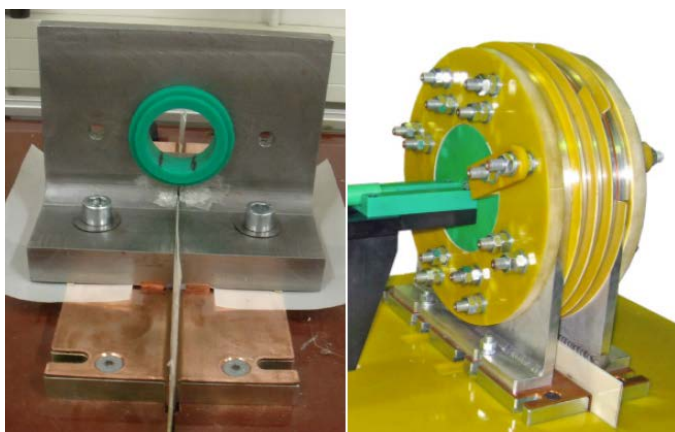
7 pav. Magnetinio lauko linijos solenoide [19]

Kadangi srovė yra priklausoma nuo laiko, magnetinis laukas irgi yra laiko funkcija. Solenoidas, kurio ilgis L , o vijų skaičius N , praleidžia srovę $i(t)$ ir indukuoja magnetinį lauką, kuris gali būti skaičiuojamas pagal Ampero dėsnį [19]:

$$B(t) = \frac{\mu NI(t)}{l}, \quad (1.21)$$

kur B – magnetinio lauko indukcija, I – srovė, l – solenoido ilgis, N – vijų skaičius, μ – magnetinė skvarba.

Elektromagnetinio suvirinimo procesui dažniausiai naudojamos vienos vijos arba nedaug vijų turinčios ritės kartu su lauko formuotuvu (ritės viduje). 8 pav. yra vienos vijos ir daugiavijės ritės pavyzdys. Pagrindinė tokių ričių problema – nėra geometrijos standartų. Srovės būna labai didelės, todėl laidus ritės metalas nebegaminamas kaip viela, tarpai tarp vijų turi būti santykinai platūs, o ritės ilgis atitinkamai mažesnis. Magnetinis laukas tarpelyje tarp ritės ir apdirbamąjo gaminio yra proporcingas iškrovos srovei, o transformacijos koeficientas yra pastovus ir paremtas geometriniais parametrais.



8 pav. Vienos vijos (kairėje) ir daugiavijės ritės (dešinėje) pavyzdys [19]

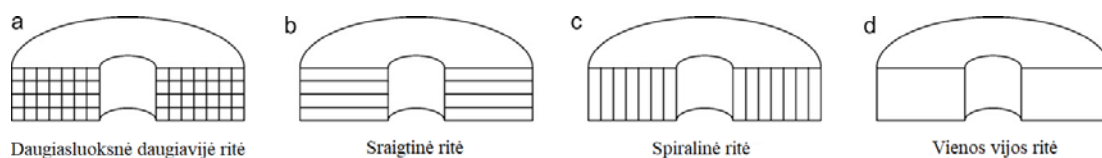
Ritė yra tikrasis elektromagnetinio proceso įrankis ir analogiškai kaip įprastiems formavimo procesams, jis turi būti pritaikytas kiekvienai konkrečiai formavimo užduočiai. Pagrindinis uždavinys ritei yra srovės praleidimas, lokalaus magnetinio lauko ir slėgio paskirstymas. Pasak Belyy et al. [5] ritė taip pat turi būti:

- Aukšto energijos perdavimo iš kondensatorių baterijos į apdirbamąjį gaminį transformacijos koeficiento.
- Didelio mechaninio atsparumo.
- Palaikanti optimalų srovės iškrovos dažnį.
- Atspari viršįtampiams.
- Su patikima jungtimi su suvirinimo aparatu.
- Paprasto eksploatavimo konstrukcijos.

Geometrinės konstrukcijos, mechaninių charakteristikų (stiprumo), elektrinių savybių (induktyvumo ir varžos) įvertinimas yra svarbūs norint nustatyti ritės matmenis.

Vamzdžių suspaudimo ir išplėtimo atveju dažniausiai naudojamos cilindrinės ritės, kad geometriją būtų galima nustatyti pagal vijos ilgį ir skersmenį, ritės žingsnį (t. y. vijų skaičių ilgio vienetui). Furth'as et al. [35] nurodo 4 skirtingus cilindrinų ričių tipus: viensluksnė vienos vijos ritė

(angl. *single-turn coil*), viensluoksnė daugiavijė ritė arba sraigtinė (angl. *helix coil*), daugiasluoksnė daugiavijė ritė (angl. *Bobbin coil*) ir daugiasluoksnė vienos vijos ritės arba spiralinė (angl. *spiral coil*) (žr. 9 pav.).



9 pav. Pagrindiniai toroidinių ričių tipai: a) daugiasluoksnė daugiavijė ritė; b) sraigtinė ritė; c) spiralinė ritė; d) vienos vijos ritė [6]

Sraigtinė ritė dažniausiai naudojama vamzdžių suspaudimo arba išplėtimo procesams, spiralinė ritė – formuoti sukamosios simetrijos metalo lakštų komponentus. Visgi yra daug platesnis skirtingų ritės geometrijų pasirinkimas: trišakė, elipsoidinė, labai elipsoidinė, vingiuota, kvadratinė ir stačiakampio formos geometrijos ir kt. Nors tai susiję su elektromagnetiniu metalo lakštų formavimu, tačiau dažnai vartojamas terminas „plokščia ritė“, neapriboja tik plokščių lakštų formavimo, jis taip pat gali būti naudojamas apdoroti iš anksto pagamintus trimačius komponentus. Kad būtų užtikrintas mažas tarpas tarp ritės ir ruošinio, reikia sureguliuoti ritės paviršiaus formą pagal ruošinio geometriją.

Atsižvelgiant į ritės stiprumą ir ilgaamžiškumą, reikia atkreipti dėmesį į trečiąją Niutono dėsnį – „veiksmas = atoveiksmis“ – jėgos, kurių reikia norint pasiekti norimą ruošinio deformaciją veikia taip pat kaip vadinamosios atoveiksmio jėgos, tik esančios priešingos krypties, apdirbamojoje detalėje. Ritė sugerdama šias, ir tarp vijų atsirandančias, jėgas neturi būti deformuojama.

Yra 2 pagrindiniai ritės konstravimo būdai, kai atsižvelgiama į veikiančias apkrovas. Literatūroje daugiausia minima ilgaamžių patvarių ričių kūrimas, tačiau ypač ričių prototipų gamybai kuriamos vienkartinės ritės (vienos iškrovos). Ilgaamžės ritės eksploatavimo trukmė turėtų siekti maždaug 10^6 impulsų, bet apie tai labai mažai randama informacijos literatūroje [1]. Kai norima prailginti ritės eksploatavimo trukmę, kartais siūloma naudoti aplink ritę papildomą sustiprinantį plieninį raištį arba šaldymo skysčiu ar dujomis kanalus.

1.7.2.1. Vienos vijos ritė

Nors šiuo metu jau yra sukurtų stiprių medžiagų, tačiau jos gali būti atsparios ir nesugadinamos esant iki 100 T magnetinio lauko indukcijai. Jeigu magnetinio lauko indukcija didesnė negu 100 T, magnetinis slėgis viršija bet kurios medžiagos, kurią galima naudoti ritės vijoms gaminti, stiprumą. Vienos vijos ritės konstrukcija labiausiai tinka stiprių magnetinių laukų veikimui

dėl keleto priežasčių: žymiai pigesnė ir paprastesnė konstrukcija, taip pat daugiavijės ritės yra didesnio induktyvumo, o tai gali apriboti srovę, impulso kilimo trukmę ir galimą didžiausią magnetinį lauką. Paprasčiausia tokio induktoriaus konstrukcija yra vienos vijos kilpa. Magnetinio lauko indukcija suskaičiuojama pagal formulę [36]:

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 I a^2}{2(z^2 + a^2)^{3/2}}, \quad (1.22)$$

$$\text{kur } B_z(0) = 0,5\mu_0 \frac{I}{a}.$$

Čia z yra matuojama nuo ritės centro išilgai ašies. Vienos vijos ritės induktyvumas [36]:

$$L \cong \frac{d}{dt} [\pi\mu_0 a^2 B_z(0)] = \frac{\pi\mu_0 a}{2}. \quad (1.23)$$

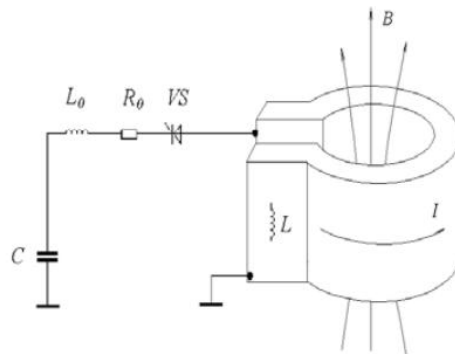
Vis dėlto 1.3 formulė yra aproksimacija, nes tariama, kad srovė yra be galo mažame siūlelyje. Dėl dideliems magnetiniams laukams kurti reikalingų didelių srovių, taip pat lemiančių didelius srovės tankius, šie induktoriai turi būti baigtinio storio. Storo asimetrinio vienos vijos solenoido, tariant, kad srovė yra pastovaus tankio, su 2d pločiu ir vidiniu a_1 bei išoriniu a_2 spinduliais, ašinis laukas yra skaičiuojamas [36]:

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 I}{4d} \left\{ \frac{d-z}{a_2-a_1} \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (d-z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (d-z)^2}} \right) + \frac{d+z}{a_2-a_1} \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (d+z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (d+z)^2}} \right) \right\}. \quad (1.24)$$

Šio induktoriaus induktyvumas gali būti apskaičiuojamas dauginant 1.22 formulėje $B_z(0)$ su

$$L = \frac{\pi a_1^2}{I}.$$

Magnetinio lauko generatoriaus su vienos vijos induktoriumi schema pavaizduota 10 pav.



10 pav. Magnetinio lauko generatoriaus su vienos vijos induktoriumi schema [37]

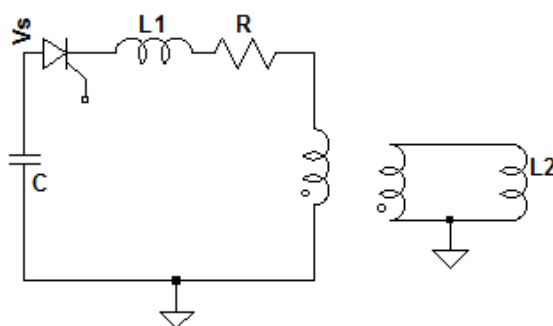
Energija yra kaupiama kondensatorių baterijoje C . Vienos vijos induktorius yra L induktyvumo. L_0 ir R_0 yra jungiamųjų laidų, kondensatorių baterijos ir jungiklio VS varža ir

induktyvumas. Magnetinio lauko impulsas yra sukuriamas iškraunant kondensatorių bateriją per induktorių. Energijos balanso formulė [37]:

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2} + \frac{L_0 I^2}{2} + I^2 R_0 t. \quad (1.25)$$

Tokio metodo efektyvumas yra, geriausiu atveju, lygus maždaug 50 %, o dažniausiai siekia apie 20 %. Viena pagrindinių efektyvumo praradimo priežasčių yra induktyvumas L_0 , o jį sumažinti yra gana sudėtinga. Dėl trumpos impulso kilimo trukmės ir didelės impulso elektros srovės amplitudės, reikia labai tikslaus jungiklio veikimo ir sinchronizacijos su įvairios informacijos (srovės, įtampos ir kt.) registravimo įtaisais. Tokiu atveju impulso kilimo trukmė dažniausiai būna nuo 1 μ s iki 5 μ s, kondensatorių baterijos valdoma įtampa 20–60 kV. Mažiausia reikiama srovė sukurti magnetiniam laukui iki 100 T kelių milimetrų zonoje yra apie 500 kA. Generuojant magnetinį impulsą, induktorių būna veikiamas iki 4 GPA slėgiu, todėl sugadinamas per kelias mikrosekundes [37].

Vienas iš įmanomų magnetinio lauko impulsų generatoriaus panaudojimų su vienos vijos induktoriu yra kartu prijungiant impulsų transformatorių (žr. 11 pav.).



11 pav. Vienos vijos induktorius su transformatoriumi [36]

Impulsinis transformatorius suderina magnetinio lauko impulsinio induktoriaus mažą induktyvumą su išsikraunančios grandinės impedansu. Grandinė tampa mažiau kritiškai priklausoma nuo R_0 ir L_0 . Dėl didelio pirmosios apvijos induktyvumo impulsas vyksta ilgiau. Darbinė įtampa gali būti sumažinama iki 3–5 kV, o jungikliu galima naudoti puslaidininkius jungiklius [36].

1.7.2.2. Sraigtinė ritė

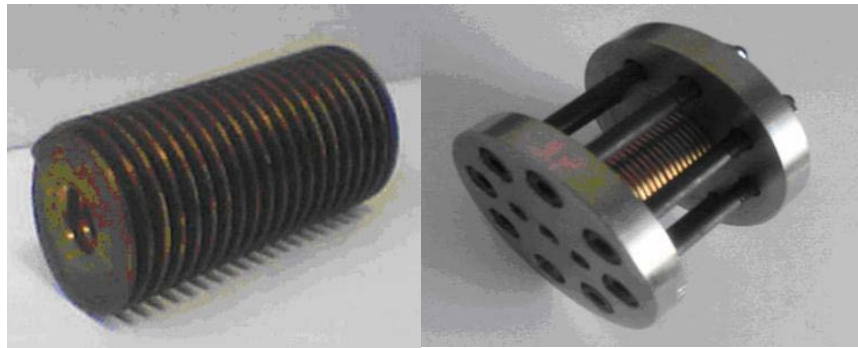
Sraigtinės ritės gali būti naudojamos magnetinių laukų iki 60–70 T generavimui. Tokia ritė gali būti pagaminama apdirbant kietas medžiagas (vario – berilio lydiniai, plieną ir kt.). Didelis tokios ritės privalumas yra didelio mechaninio įtempio atlaikymas. Lyginant sraigtinę su vienos vijos rite, ši ritė yra didesnio induktyvumo, geresnio lauko homogeniškumo. Magnetinio lauko impulso trukmė gali būti 100–200 μ s. Magnetinis laukas sraigtinės ritės centre yra skaičiuojamas pagal [36]:

$$B = B_0 \frac{1}{\ln(a_2 / a_1)} F \ln \left[\frac{a_2}{a_1} \left(\frac{1 + \sqrt{(2a_1 + h)^2 + 1}}{1 + \sqrt{(2a_2 + h)^2 + 1}} \right) \right], \quad (1.26)$$

kur $B_0 = \mu_0 \frac{IN}{h}$ yra pradinis magnetinis laukas, $F = \frac{NS}{h(a_2 - a_1)}$ yra vijų tankis, o S – vijos skerspjūvio plotas.

Optimali ritės geometrija gaunama, kai $\frac{a_2}{a_1} = 6$, $\frac{h}{2a_1} = 2$.

Kondensatorių baterija prijungiama lygiai taip pat, kaip ir su vienos vijos rite. Jeigu norimas ne vienkartinis magnetinio lauko generavimas, tada sraigtinė ritė turėtų būti sustiprinama, kad būtų išvengiamas jos sugadinimas.

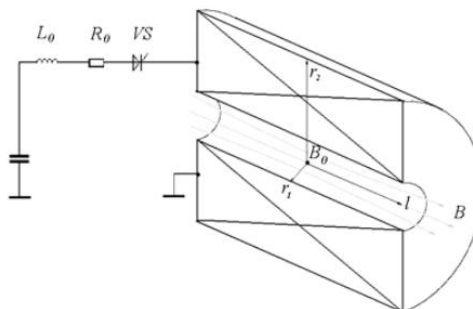


12 pav. Sraigtinė ritė be sustiprinimo (kairėje) ir su sustiprinimu (dešinėje) [36]

Tokio tipo ritės didžiausias generuojamas magnetinis laukas gali būti nustatomas pagal didžiausią vijų srovę. Didžiausia srovė priklauso nuo ritės induktyvumo, kondensatorių baterijos talpos, pradinės įtampos U_0 ir aktyviosios grandinės varžos R . Didžiausia srovė gali būti surandama pagal slopinamųjų virpesių 1.3 formulę.

1.7.2.3. Vielinė ritė

Susuktos vielos ričių pritaikymas yra dažniausiai pasitaikantis ir lengviausiai suprantamas. Dėl to tokios ritės plačiai naudojamos didelių magnetinių laukų generavimui.



13 pav. Vielinės ritės veikimo principas [36]

Vielinės ritės tenkina pastovaus srovės tankio sąlygas ir generuoja magnetinį lauką B ritės centre [38]:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{r_1} \left[\frac{F(\alpha, \beta)}{2\beta(\alpha - 1)} \right], \quad (1.27)$$

kur μ_0 yra magnetinė konstanta, N – vijų skaičius, I – srovė, r_1 , r_2 , $2l$ yra vidinis, išorinis spinduliai ir ritės ilgis, $\alpha = \frac{r_2}{r_1}$, $\beta = \frac{b}{2r_1}$ yra santykiniai dydžiai, o $F(\alpha, \beta) = \beta \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right)$

yra ritės formos koeficientas.

Didžiausia srovė gali būti skaičiuojama lygiai taip pat kaip vienos vijos ritės atveju.

Šio tipo impulsiniai generatoriai gali kurti 2–20 ms trukmės impulsus. Mechaninė perkrova dėl Lorencio jėgos yra pagrindinis magnetinio lauko amplitudės apribojimas. Kai vijos yra varinės, laukas gali siekti 20–25 T nenaudojant papildomų sutvirtinimų.

Didesniems magnetiniams laukams gauti yra naudojamos daugiasluoksnės ir daug sekcijų turinčios ritės su vidiniu sutvirtinimu.

Norint sukurti ilgaamžišką ritę, dažnai reikia įvertinti ir mechaninius įtempius. Aproximuotas santykis tarp didžiausio mechaninio įtempio ir magnetinio lauko ir skaičiuojamas pagal [39]:

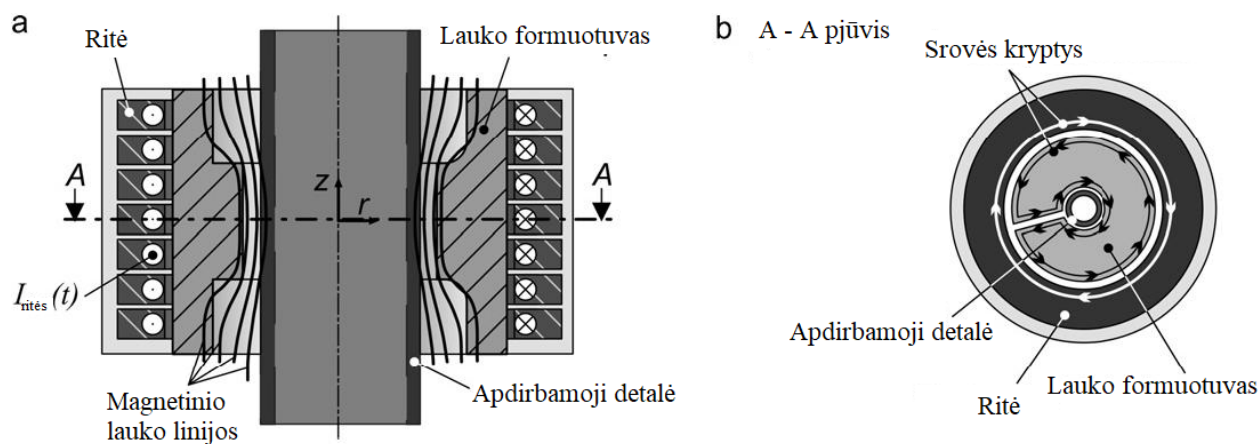
$$B = \sqrt{2} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \sqrt{2\mu_0 \sigma_t}, \quad (1.28)$$

kur σ_t yra vijos tempimo stiprumo riba, α yra vidinio ir išorinio spindulių santykis.

1.7.3. Lauko formuotuvai

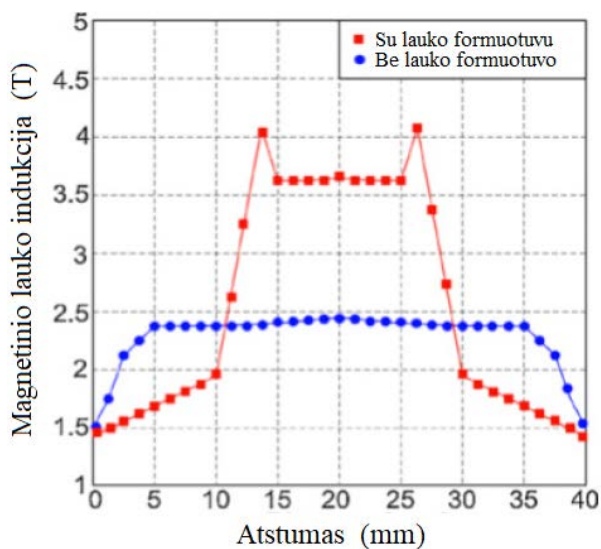
EMS metu ritėje yra naudojamas papildomas elementas – lauko formuotuvai. Jis yra įstatomas tarp ritės ir apdirbamojo gaminio. Tokie formuotuvai dažniausiai yra simetriški ir pagaminti iš elektrai labai laidžios medžiagos.

Slopinamųjų virpesių srovės iškrova indukuoja elektromagnetinį lauką ritėje pagal pirmąją Maksvelo lygtį, o pagal antrąją Maksvelo lygtį – srovė indukuojama apdirbamajame gaminyje. Dėl paviršiaus efekto ir Lenco taisyklės, detalėje indukuota srovė yra priešingos krypties negu ją indukavusi srovė lauko formuotuve (esančiame ritėje) (žr. 14 pav.). Srovė ašiniame tarpelyje yra nukreipta lauko formuotuvo vidinio paviršiaus link. Toje vietoje srovės kryptis yra tokia pati kaip ir lauko formuotuvo. Nuo pat pradžių, magnetinis laukas yra ekranuojamas indukuotos srovės ir apribotas tarpelio tūriu.



14 pav. a) Magnetinio lauko pasiskirstymas lauko formuotuve; b) srovės kryptys lauko formuotuve ir apdirbamojoje detalėje [6]

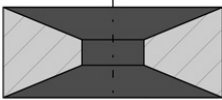
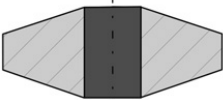
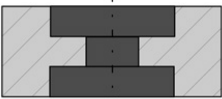
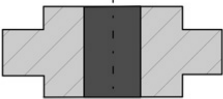
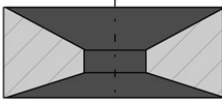
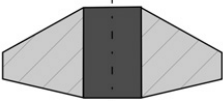
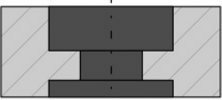
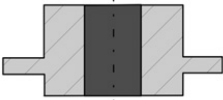
Lauko formuotuvai dažniausiai turi daug mažesnę koncentravimo zoną negu yra jo išorinis paviršius. Todėl, toje zonoje pasiekama didesnis tankis srovės ir stipresnis magnetinis laukas (žr. 15 pav.). Dėl ritės magnetinio lauko indukuojamos srovės apdirbamosios detalės vietoje, kuri yra formuotuvo koncentravimo zonoje, srovė ekranuoja ją indukavusį magnetinį lauką. Taigi, srovė ir magnetinio lauko Lorencio jėgos veikia ritėje, lauko formuotuve ir apdirbamojoje detalėje. Norint, kad įvyktų detalės deformacija, reikia, kad Lorencio jėga pranoktų detalės plastinio tekėjimo įtempį [38].



15 pav. 40 mm ilgio ritės be lauko formuotuvo ir 15 mm ilgio lauko formuotuvo toje ritėje magnetinio lauko indukcijos priklausomybė nuo ritės ir formuotuvo ilgio [19]

Pagrindiniai lauko formuotuvui keliama reikalavimai yra panašūs tiems, kurie lygiai taip pat turi būti aptariami konstruojant ritę. Svarbiausias uždavinys yra tinkamo magnetinio slėgio užtikrinimas. Taip pat yra norima, kad lauko formuotuvo eksploatacijos trukmė būtų ilga. Taigi, viena vertus, reikalingas efektyvus energijos perdavimas į apdirbamąjį gaminį ir, kita vertus, lauko

formuotuvai turi būti pritaikyti atlaikyti dideles mechanines apkrovas. 16 pav. parodyti skirtingi formuotuvų tipai ir jų pagrindinės savybės.

Konstrukcija	Suspaudimas	Išplėtimas	Savybės
Simetrinis kūgio formos formuotuvai			Didelis atsparumas, bet mažas efektyvumas
Simetrinis cilindro formos formuotuvai			Didelis efektyvumas, bet mažesnis atsparumas
Asimetrinis kūgio formos formuotuvai			Panašūs į simetrinius formuotuvus, bet jautresni deformacijoms dėl asimetrinių apkrovų
Asimetrinis cilindro formos formuotuvai			

16 pav. Skirtingų lauko formuotuvų tipai ir pagrindinės savybės [6]

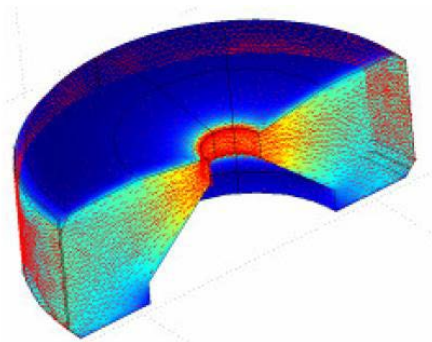
Daugelyje eskizų lauko formuotuvo paviršius, kuris yra priešais ritės paviršių, dažniausiai būna visiškai lygus, bet jame taip pat gali būti griovelių, kuriuose kartais tiesiogiai būna integruojamos ritės apvijos. Šis dizaino variantas taikomas lakštinio metalo formavimui ir vamzdinių detalių suspaudimo procesams. Tokių lauko formuotuvų skaičiavimo metodas yra priklausomas nuo maksimalios įtampos, išorinės detalės smūgio greičio vidinės detalės link, tarpelyje esančio magnetinio lauko intensyvumo [5]. Pagrindinis tokio lauko formuotuvo trūkumas yra ašinių jėgų veikimas vijų grioveliuose, kurios nėra subalansuotos.

Skirtingai nuo tiesioginio veikimo ričių, naudojant lauko formuotuvą atsiranda papildomos jėgos pakraščių link, nes ašiniame tarpelyje yra indukuojamas magnetinis laukas ir dėl to atsiranda magnetinis slėgis. Ypač naudojant asimetrinius lauko formuotuvus, kurių koncentracijos vieta nėra centrinėje plokštumoje, atsiranda didelės mechaninės apkrovos, todėl toks lauko formuotuvai turėtų būti pagaminti iš didelio atsparumo medžiagų, o projektuojamas dydis – ne per mažas [6]. Atsižvelgiant į energijos perdavimo efektyvumą, lauko formuotuvo gamybai reikia pasirinkti didelio elektrinio laidumo ir mechaninėms jėgoms atsparias medžiagas. Dažniausiai naudojamos medžiagos būna varis ir jo lydiniai, aliuminis ir jo lydiniai, žalvaris ir bronzos.

Pagal lauko formuotuvo geometriją turėtų būti įvertinta, kad visas formuotuvo ilgis būtų pritaikytas ritės ilgiui. Jeigu formuotuvai yra per trumpi, tada atsiranda ne homogeninės apkrovos ritėje, o tai sutrumpina ritės eksploatacijos laiką. Jeigu formuotuvai ilgesni negu ritė, energijos perdavimas tampa mažiau efektyvus.

Pagrindinis lauko formuotuvo naudojimo privalumas – ritė patiria daug mažesnę mechaninę apkrovą (tai lemia ilgesnį ritės eksploatavimą), o tuo pačiu gaunamas stipresnis magnetinis laukas koncentruotoje dalyje negu būtų be formuotuvo. Šiomis dienomis, elektromagnetinio formavimo aparatai su lauko formuotuvų eksploatavimo trukmė pramonėje siekia iki 2 mln. impulsų. Jeigu teisingai pasirenkamas dydžių santykis tarp formuotuvo paviršiaus ploto koncentravimo zonoje ir išorinio formuotuvo paviršiaus – jėgos tarp formuotuvo ir apdirbamosios detalės būna daug didesnės negu tarp ritės ir formuotuvo. Be to, norint visą EMS procesą padaryti dar lankstesnį – pagal formuotuvus galima pritaikyti atitinkamo skersmens ir ilgio rites skirtingų detalių formavimui.

Vis dėlto, lauko formuotuvai turi ir neigiamų savybių. Pirma, atsiranda magnetinio lauko nehomogeniškumas – tai lemia nevienodą jėgų pasiskirstymą apdirbamosios detalės pakraščiuose. Antra, sumažėja EMS proceso naudingumo koeficientas. Pagrindinės priežastys – papildomi energijos nuostoliai dėl aktyviosios formuotuvo varžos ir induktyviosios energijos nuostoliai dėl neidealių ritės, lauko formuotuvo, detalės sujungimų ir atsiradusio papildomų tarpelių tūrio [40]. Tačiau pastarosios priežasties galima išvengti naudojant didelio elektrinio laidumo medžiagas lauko formuotuvo gamybai.



17 pav. Elektromagnetinio lauko koncentracija lauko formuotuve [6]

1.8. Magnetinio suvirinimo proceso patikra

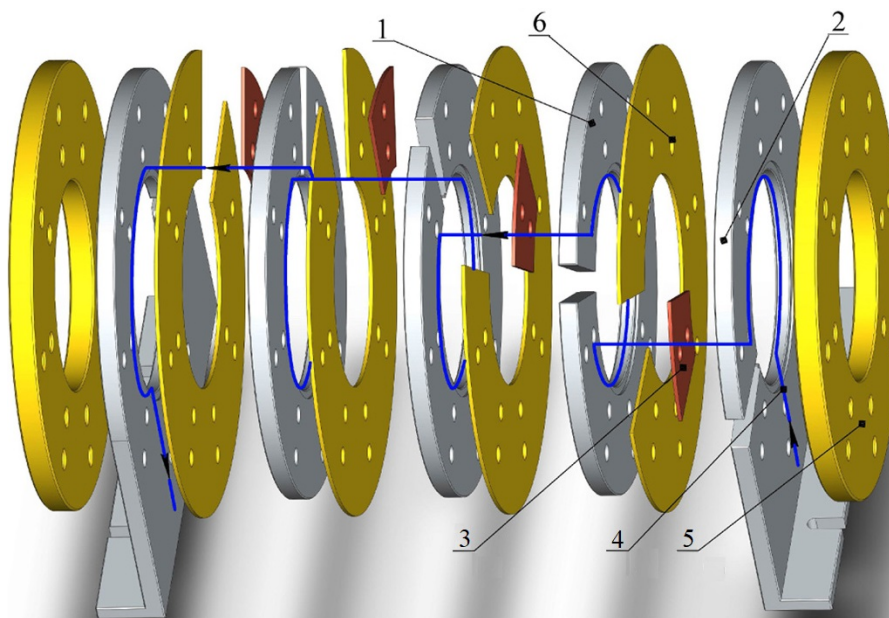
Nėra nustatytų tarptautinių standartinių specifikacijų, kurios galėtų būti naudojamos magnetinio impulsinio suvirinimo procesui tikrinti ir kokybės kontrolei [1]. Patikros metodai gali būti suskirstyti į dviejų tipų – neardomuosius ir destruktivius – patikrinimus. Neardomoji kontrolė apima radiacinį patikrinimą ir ultragarsinį patikrinimą, pagrįstą ANSI/ASTM A578 [1]. Atliekant destruktivų patikrinimą atliekamas ASTM/ASME A-263, A-264 ar A-265 arba sienelių atsparumo, slėgio arba vakuumo nuotėkio (helio nuotėkio), slėgio prasiveržimo, slėgio ciklo, metalografijos analizės, temperatūros ciklo, įtempimo bandymai ir gręžimo testas [1].

2. SKAIČIAVIMAI IR SIMULIACIJOS

2.1. Biterio ritė

Elektromagnetinio suvirinimo proceso technologijos yra konkurencingesnės nei panašaus tipo tradiciniai gamybos metodai esant tam tikro storio ir tam tikrų medžiagų deriniams. Tačiau platus pramoninių technologijų taikymas yra ribotas iš dalies dėl to, kad trūksta glaustų ir paprastų inžinerinių nurodymų ar instrukcijų, skirtų ritės konstrukcijai. Remiantis gamybos metodų analize, pagrindiniais Lagutin'o ir Ozhogin'o [42] apibūdintų ričių aprašymais ir eksploatacinėmis charakteristikomis, galima daryti išvadą, kad vamzdinėse sistemose Biterio ritės yra pakankamai patikimos, reikalaujančios mažesnių gamybos sąnaudų ir lengvai eksploatuojamos. Tai yra pagrindinės ypatybės tokią ritę taikyti pramonėje ir lemiančios magistro darbo tyrimui (elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus kūrimui) naudoti Biterio ritę. Tokia ritė yra vienas kitą keičiančių laidžių ir izoliacinių diskų rinkinys. Kiekvienas diskas (toliau – plokštelė) yra su plyšiu, o kontaktas tarp tų laidžių plokštelių yra gaunamas per tą plyšį ir dėl plokštelių persidengimo (žr. 18 pav.). Taip pat kartu su Biterio rite galima naudoti lauko formuotuvą.

Pagaminti ritės konstrukciją yra sudėtingas uždavinys ir daugiausia apima ritėms būdingų medžiagų, dydžių, elektromagnetinių parametrų, pavyzdžiui, induktyvumo, varžos ir magnetinio lauko, taip pat šilumos ir įtempių apkrovų nustatymą.



18 pav. Principinė Biterio ritės konstrukcija: 1 – Biterio plokštelė, 2 – jungiamasis laidininkas, 3 – kontaktas, 4 – elektros srovės kelias, 5 – kraštinė sutvirtinamoji plokštelė, 6 – izoliatorius [7]

2.2. Analitinių skaičiavimų metodologija

Pateikiamas analitinis metodas gali būti taikomas tik cilindrinės simetrijos ritei, tai reiškia, kad, sukant ritę aplink vieną ašį ir nepaisant magnetinio atsparumo reiškinių, sūkurinių srovių, plastinės deformacijos ir šiluminių įtempių – ritės geometrija nesikeičia. Be to, laukas kiekvienu laiko momentu apskaičiuojamas kaip statinis ritės laukas, turintis tam tikrą ribinį tankį.

Prieš atliekant reikiamus skaičiavimus iš anksto yra apytiksliai numatoma, kurie parametrai yra svarbiausi, ir kokios vertės jie turėtų būti.

Pradiniai skaičiavimų duomenys:

1. Reikalingi magnetinio lauko parametrai: magnetinio lauko amplitudė $B_{\max}$ ritės ir apdirbamos detalės centre bei lauko kilimo laikas t .

2. Apdirbamos detalės geometrija: išorinis spindulys – r_0 , sienelės storis Δr ir darbinės zonos ilgis Δl , taip pat detalės medžiagų savybės – laidumas σ , šiluminis laidumas λ , specifinis šiluminis laidumas c , takumo riba σ_y , masės tankis ρ_m .

3. Impulsų generatoriaus duomenys: sukaupiama energija W , didžiausia srovės amplitudė I_0 , trumpojo jungimo dažnis f_0 , induktyvumas L_i , varža I_r . Daug patogiau atlikti srovės impulso simuliacijas ir skaičiavimus žinant šiuos duomenis iš anksto, tačiau nėra privaloma juos žinoti iš anksto ir gali būti apibrėžiami vėliau ritės konstrukcijos kūrimo metu.

2.2.1. Medžiagos pasirinkimas

Izoliacinė medžiaga, kurią apibrėžia leistinos darbinės temperatūros, dielektrinis ir didžiausio slėgio jėgos stipriai, ritės medžiaga, apibūdinama laidumu σ , šiluminiu laidumu λ , specifiniu šiluminiu laidumu c , didžiausia tempimo jėga σ_{UTS} ir leistina darbine temperatūra – pradine T_i , galutine T_f .

2.2.2. Didžiausias magnetinis laukas tarpelyje tarp ritės ir apdirbamos detalės

Yra žinoma, kad daugeliui suvirinimo pritaikymų didžiausias pasiekiamas laukas tarpelyje tarp ritės ir apdirbamos detalės turi būti ne mažesnis kaip 40 T, o kilimo laikas neturi viršyti 25 μs . Naudojant efektyvumo koeficientą pagal Wilson'ą ir Srivastava'ą [43] magnetinius laukus galima sujungti tarp ritės ir lauko formuotuvo bei tarp lauko formuotuvo ir apdirbamos detalės.

2.2.3. Ritės geometrijos vertės priskyrimas

Vidinis ritės spindulys r_1 yra sudarytas iš apdirbamosios detalės išorinio spindulio r_0 ir izoliacijos (dažniausiai oro) tarpelio g , kuris dažniausiai siekia 0,75 – 1,5 mm storį. Nominalus ritės ilgis l_0 nustatomas pagal apdirbamosios detalės darbinės zonos ilgį Δl . Išorinis ritės spindulys r_2 , ritės plokštelės storis Δ ir izoliacija tarp plokštelių h , asimetriniai plokštelių parametrai φ , ψ , γ – nustatomi pasirinktinai arba pagal jau esamų prototipų parametrus. Tada galima apskaičiuoti nominalų ritės plokštelių skaičių N .

2.2.4. Papildomi skaičiavimai

Tai yra dviejų ritės koeficientų α ir β skaičiavimai, kurie parodo santykį tarp ritės geometrijos dydžių; „efektyvus“ ritės plokštelių skaičiaus η , reiškiančio asimetriškai realios ritės transformavimą į simetriškai idealią, skaičiavimai; sienelės paviršinio efekto charakteringas gylis, apibūdinantis elektromagnetinių bangų silpnėjimą laidininke; norima pasiekti elektros srovė ritėje; užpildymo faktorius ξ , apibūdinantis laidžių ir izoliuojančių zonų struktūrą bendrame skerspjuvyje ir medžiagos integravimą, kuris jungia ritės fizines medžiagos savybes su didžiausiu magnetiniu lauku bei ilgiausia impulso trukme.

2.2.5. Konstrukcijos apribojimai

Didžiausias pasiekiamas magnetinis laukas ritėje yra daugiausia apribotas dviem veiksniais. Pirmasis yra mechaninis ričių atsparumas, kuris priklauso nuo: ritės medžiagos didžiausios tempiamojo stiprumo ribos σ_{DTS} ; ritės geometrijos ir srovės tankio pasiskirstymo joje. Antrasis veiksnys yra terminis faktorius ir nustatomas pagal pagrindines ritės medžiagos fizines savybes, ritės geometriją, srovės tankio pasiskirstymą ritėje, leistiną temperatūros diapazoną ir reikiamą impulso trukmę. Abu veiksniai turi būti vertinami kartu ir norint gauti stipriausią lauką – pasirenkamas iš tų veiksmų svariausias. Galiausiai yra lyginamas laukas B_{max} , kurį norima gauti tarpelyje tarp ritės ir apdirbamojo gaminio su didžiausiu pasiekiamu lauku B_0 , o veiksnys pasirenkamas pagal grandinę.

2.2.6. Ritės induktyvumas

Ritės geometriniai duomenys, tokie kaip vidinis spindulys r_1 ir išorinis spindulys r_2 , ritės ilgis $l_{ritės}$, efektinis ritės plokštelių skaičius η ir, priklausomai nuo ritės geometrijos ir srovės tankio pasiskirstymo, saviindukcijos koeficientas $\Lambda(\alpha, \beta)$, apibrėžia ritės induktyvumą $L_{ritės}$.

2.2.7. Ritės varža

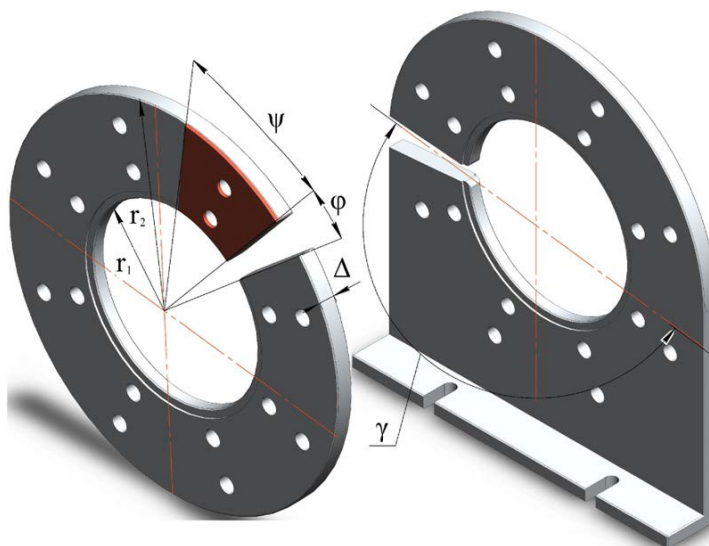
Yra du būdai kaip apskaičiuoti varžą. Pirmasis metodas atliekamas remiantis ominės galios ritėje lygtimi. Jį sudaro ritės medžiagos savitoji varža ρ , ritės geometrija ir užpildymo koeficientas ξ (angl. *filling factor*), apibūdinantis laidžių ir izoliuojančių zonų struktūrą skerspjūvyje. Naudojant šį metodą neįtraukiamas varžos ir dažnio padidėjimas dėl paviršinio ir artumo efektų (angl. *proximity effect*). Antrasis metodas leidžia apskaičiuoti nuo dažnio priklausančią varžą.

2.2.8. Ekvivalentinės grandinės simuliacija

Apibrėžus varžą, induktyvumą ir žinant impulsų generatoriaus parametrus, srovės impulsą galima lengvai imituoti naudojant diferencinę slopančių srovės virpesių lygtį esant nurodytomis pradinėmis sąlygomis (žr. 1.3 formulę). Kilimo trukmė $T/4$ ir gauto srovės impulso amplitudė I_m turi būti palyginama su reikiamu magnetinio lauko kilimo laiku t , apibrėžtu eksploatacinių savybių reikalavimuose ir anksčiau surasta didžiausia srovė ritėje I_{max} . Apskaičiuotos vertės turi maždaug atitikti reikalaujamąsias vertes. Priešingu atveju ankstesni skaičiavimo etapai kartojami naudojant naują geometriją ir medžiagą kol bus pasiektas aukščiau minėtas atitikimas.

2.2.9. Pagalbiniai skaičiavimai

Kai yra nusprendžiama, kokie turėtų būti ritės geometrijos dydžiai – vidinis ir išorinis spinduliai r_1 ir r_2 , ritės plokštelės storis Δ , izoliacijos storis h , nominalus ritės plokštelių skaičius N , tada apytikriai būna nustatomi asimetrijos parametrai ϕ , ψ , γ . Praktiškai asimetrijos parametrai yra išpjovos ir kontaktiniai tikros ritės paviršiai (žr. 19 pav.).



19 pav. Tarpinės ir galinės Biterio ritės plokštelės [7]

Taigi, norint pagaminti tikrą ritę su N nominaliu ritės plokštelių skaičiumi, asimetrijos parametrai yra sujungiami su idealiai simetriška rite, turinčia η plokštelių.

„Naudingosios“ tarpinės M ir galinės X plokštelės apskaičiuojamos pagal 2.1 ir 2.2 formules:

$$M = \frac{360^\circ - (\varphi + \psi)}{360^\circ}; \quad (2.1)$$

$$M = \frac{360^\circ - (\varphi / 2 + \psi + \gamma)}{360^\circ}. \quad (2.2)$$

Vėliau, visas efektyvių plokštelių skaičius, kuris susideda iš „naudingųjų“ tarpinių ir galinių plokštelių, apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę:

$$\eta = i \cdot M + b \cdot X. \quad (2.3)$$

Aktyvus ritės ilgis:

$$l_{ritės} = \eta \cdot \Delta + (\eta - 1) \cdot h. \quad (2.4)$$

Galima naudoti cilindrinės ritės simetrijos supaprastinimą: tikra Biterio ritė su N nominalių plokštelių, bet su simetrijos išardymu, yra supaprastinama iki idealios simetrinės ritės su η plokštelių. Gaunama reikšmė turi būti suapvalinama iki sveikojo skaičiaus.

Idealios ritės formos koeficientai skaičiuojami pagal 2.5 ir 2.6 formules:

$$\alpha = \frac{r_2}{r_1}; \quad (2.5)$$

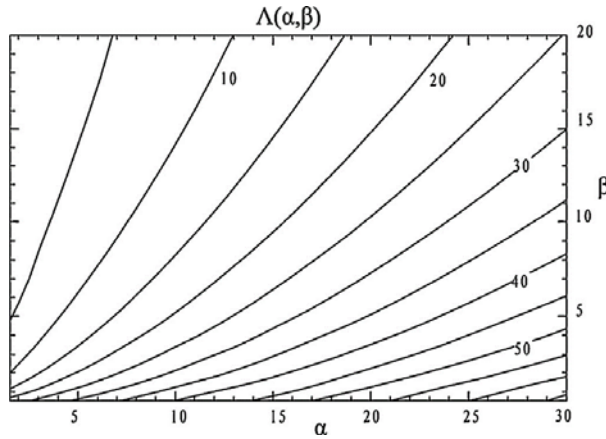
$$\beta = \frac{l_{ritės}}{2 \cdot r_1}. \quad (2.6)$$

Žinoma savybė – paviršinio efekto charakteringas gylis, kuris nusako elektromagnetinių bangų silpnėjimą laidininke (kokiame laidininko paviršiaus gylyje teka srovė) ir yra suskaičiuojamas pagal 2.7 formulę:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu \cdot \mu_0 \cdot \omega}}. \quad (2.7)$$

2.3. Ritės induktyvumo ir aktyviosios varžos skaičiavimai

Yra sukurti keli būdai induktyvumui skaičiuoti. Kiekvienas šių būdų naudoja panašių pastovių parametrų rinkinį, tačiau skiriasi vienas nuo kito tam tikru konkrečiu nariu. Pagal Kratz'ą ir Wyder'į [44] geriausias metodas induktyvumui skaičiuoti (dėl apskaičiuoto ir eksperimentinio induktyvumo palyginimo tikslumo) yra, kai įvertinamas saviindukcijos koeficientas $\Lambda(\alpha, \beta)$ (žr. 20 pav.).



20 pav. Saviindukcijos koeficientas $\Lambda(\alpha, \beta)$ (kaip formos koeficientų α ir β funkcija) idealiai Biterio ritei su elektros srovės tankiu, proporcingu $\frac{1}{r}$ [7]

Induktyvumas skaičiuojamas pagal 2.8 formulę:

$$L_{ritės} = \eta^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot r_1 \cdot \Lambda(\alpha, \beta)}{4 \cdot \pi}. \quad (2.8)$$

Kai reikia įvertinti varžos padidėjimą kylant elektros srovės dažniui (gana dažnai 10–25 kHz), nuo dažnio priklausanti varža apskaičiuojama pagal 2.9 formulę:

$$R_{kj} = \frac{N \cdot \rho_{ritės} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1}{\delta_{ritės} \cdot \Delta}. \quad (2.9)$$

Galima pastebėti, kad 2.9 formulė parodo laidininko, kurio ilgis $2 \cdot \pi \cdot r_1$ ir skerspjūvis $\Delta \cdot \delta$, varžą. Taip pat reiktų paminėti, kad nominalus ritės plokštelių skaičius N yra naudojamas kaip viso elektros srovės kelio ilgis ir nėra reikalo išlaikyti simetrijos lygiai taip pat kaip ir induktyvumo skaičiavimo atveju. Kai yra žinomos ritės induktyvumo ir varžos vertės – gali būti surastas bet kokios elektros srovės kelias ar kryptis.

Tinkamas Fabri koeficientas $G(\alpha, \beta)$ gaunamas naudojant ritės geometrinių parametų žymenis:

$$G(\alpha, \beta) = \sqrt{\frac{2\pi}{\Lambda(\alpha, \beta)} \cdot \frac{1}{l_{ritės} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln \left(\frac{\frac{l_{ritės}}{r_1} + \sqrt{\frac{l_{ritės}^2}{r_1^2} + 1}}{\frac{l_{ritės}}{r_2} + \sqrt{\frac{l_{ritės}^2}{r_2^2} + 1}} \right)}. \quad (2.10)$$

Kuo didesnės Fabri koeficiento $G(\alpha, \beta)$, magnetinio lauko energijos W_m reikšmės ir mažesnis ritės vidinis spindulys r_1 , tuo gaunamas stipresnis magnetinis laukas. Toks magnetinis laukas gali būti skaičiuojamas turint elektros srovės ir ritės induktyvumo reikšmes:

$$W_m(t) = l_{ritės} \cdot \frac{I(t)^2}{2}. \quad (2.11)$$

Santykis tarp centrinio magnetinio lauko indukcijos B_C , Fabri koeficiento $G(\alpha, \beta)$, magnetinio lauko energijos W_m ir ritės vidinio spindulio r_1 yra parodomas Fabri formule Biterio ritei:

$$B_C = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot W_m}{r_1} \cdot G(\alpha, \beta)}. \quad (2.12)$$

2.4. Realios Biterio ritės parametrų skaičiavimas ir simuliacija

Pagrindinis klausimas prieš pradedant visus realius skaičiavimus – kokia bus ritės varža ir induktyvumas, ir kokia bus didžiausia ritėje pasiekama elektros srovė, kurios užtektų sukurti atitinkamam magnetiniam laukui ir atlikti medžiagų suvirinimą, taip pat kiek laiko užtruktų pasiekti pirmajai srovės impulso amplitudei.

Pagal iš anksto apgalvotus ritės parametrus realiam įgyvendinimui (žr. 1 lentelę), apskaičiuota ritės varža R ir induktyvumas L (žr. 2 lentelę). Kadangi iš anksto nebuvo aišku, ar srovės impulsas bus tinkamas, todėl buvo pasirinkti 5 variantai su skirtingu ritės plokštelės storio Δ bei skirtinga įtampa U .

Turint suskaičiuotas ritės induktyvumo ir varžos reikšmes, galima skaičiuoti sistemos slopinamuosius svyravimus, kitaip tariant, gauti impulso grafiką, apskaičiuoti didžiausią srovės vertę ir laiką, per kurį pasiekama didžiausia srovė.

Slopinamuosius srovės svyravimus grandinėje su induktyvumu ir aktyviaja varža sukelia kondensatorių baterijos iškrova. Jeigu rezonansinės grandinės talpa C , induktyvumas L ir varža R yra žinomi, tada slopinamieji svyravimai gali būti apibrėžiami diferencialine lygtimi (žr. 1.3 formulę). Ši lygtis sprendžiama kaip parodyta 1.4 formulėje. Induktyvumas lemia impulso fronto kilimo greitį, o varža – viso impulso svyravimo trukmę.

Skaičiavimai yra atlikti tada, kai pagal schemą srovės amplitudė ritėje ir jos kilimo laikas $T/4$ yra tenkinantys norimą gauti didžiausią srovę $I_{\max}$ bei laiką t , per kurį ta srovė pasiekama.

2.1 lentelė. Skaičiavimams naudojami duomenys

Duomenys					
Paaiškinimai					
Asimetrijos parametras, φ	10°				
Asimetrijos parametras, Ψ	35°				
Asimetrijos parametras, γ	180°				
Tarpinės plokštelės, i	3				
Galinės plokštelės, b	2				
Vidinis ritės spindulys, r_1 (mm)	155				
Išorinis ritės spindulys, r_2 (mm)	75				
Ritės plokštelės storis, Δ (mm)	4	6	8	10	12
Izoliacijos storis, h (mm)	2				
Dažnis, f (kHz)	22,9	23,3	23,8	24,2	24,8
Magnetinė skvarba vakuume, μ_0 (H/m)	$12,57 \cdot 10^{-7}$				
Aluminio magnetinė santykinė skvarba, μ	1				
Elektrinis aluminio laidumas, κ (S/m)	$3,77 \cdot 10^7$				
Elektrinė aluminio varža, ρ (Ωm)	$2,65 \cdot 10^{-8}$				
Saviindukcijos koeficientas pagal gautas α ir β reikšmes, $\Lambda(\alpha, \beta)$ (žr. 20 pav.)	27	26	25	24	23
Talpa, C (F)	$100 \cdot 10^{-6}$				
Įtampa, U (kV)	3; 4; 6; 8; 10				

2.5. Skaičiavimų ir simuliacijų rezultatai

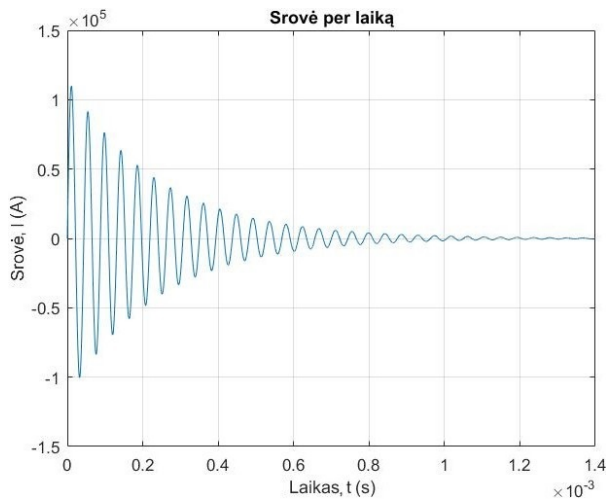
Kad būtų paprasčiau atlikti skaičiavimus ir gauti impulsų grafikus, naudojantis „Matlab“ programa, sukurtas skriptas, o gauti rezultatai pateikti 2 lentelėje ir žemiau esančiuose srovės impulsų grafikuose (žr. 21–27 pav.).

2.2 lentelė. Skaičiavimų rezultatai

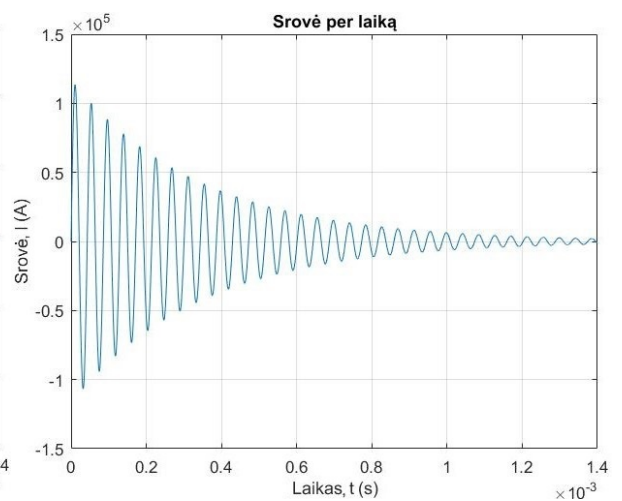
Įtampa, U (kV)	Plokštelės storis, Δ (mm)	Saviindukcijos koeficientas, $\Lambda(\alpha, \beta)$	Paviršinio efekto charakteringas gylis, δ (μm)	Induktyvumas, L (nH)	Varža, R (m Ω)	Srovė, I (kA)	Laikas, t (μs)	Magnetinė energija, W_m (kJ)	Centrinio magnetinio lauko indukcija, B (T)
3	4	27	542	485	4,1	41,2	10,7	0,411	0,287
	6	26	537	467	2,7	42,6	10,6	0,423	0,286
	8	25	532	449	2,1	43,7	10,4	0,429	0,283
	10	24	526	431	1,7	44,8	10,2	0,433	0,279
	12	23	521	413	1,4	45,9	10	0,430	0,276
4	4	27	542	485	4,1	54,9	10,7	0,731	0,383
	6	26	537	467	2,7	56,8	10,6	0,752	0,381
	8	25	532	449	2,1	58,3	10,4	0,763	0,377
	10	24	526	431	1,7	59,7	10,2	0,769	0,372
	12	23	521	413	1,4	61,2	10	0,773	0,368
6	4	27	542	485	4,1	82,4	10,7	1,646	0,575
	6	26	537	467	2,7	85,1	10,6	1,692	0,572
	8	25	532	449	2,1	87,4	10,4	1,716	0,565
	10	24	526	431	1,7	89,6	10,2	1,730	0,558
	12	23	521	413	1,4	91,8	10	1,740	0,552
8	4	27	542	485	4,1	109,9	10,7	2,925	0,767
	6	26	537	467	2,7	113,5	10,6	3,008	0,762
	8	25	532	449	2,1	116,6	10,4	3,050	0,753
	10	24	526	431	1,7	119,5	10,2	3,076	0,744
	12	23	521	413	1,4	122,4	10	3,093	0,735
10	4	27	542	485	4,1	137,3	10,7	4,571	0,958
	6	26	537	467	2,7	141,9	10,6	4,700	0,953
	8	25	532	449	2,1	145,7	10,4	4,766	0,942
	10	24	526	431	1,7	149,4	10,2	4,806	0,93
	12	23	521	413	1,4	153	10	4,832	0,919

Ritės medžiaga – aliuminis – pasirinkta dėl gerų elektrinių ir magnetinių savybių, dėl ko neviršijamos induktyvumo ir varžos ribos.

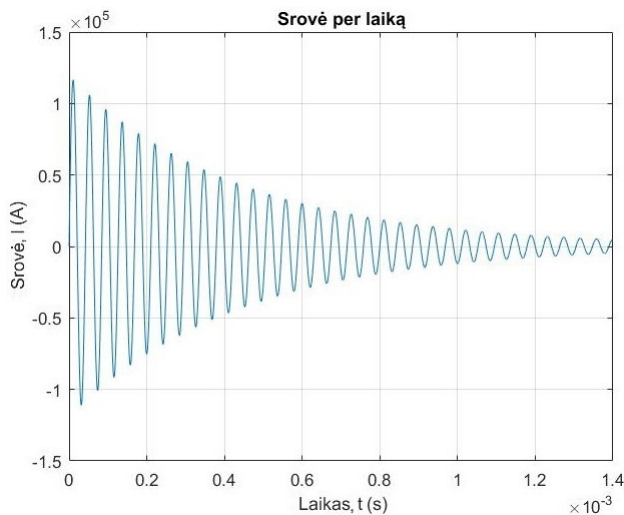
Keičiami 2 parametrai: įtampa (3–10 kV) ir plokštelės storis (4–12 mm). Saviindukcijos koeficientas kinta pagal α ir β reikšmes ir, iš esmės, priklauso nuo ritės parametrų (šiuo atveju nuo plokštelės storio). Iš rezultatų galima pastebėti, jog paviršinio efekto charakteringas gylis δ nuo keičiamų parametrų nepriklauso ir išlieka vienodas. Induktyvumas L, varža R, impulso kilimo trukmė t, saviindukcijos koeficientas $\Lambda(\alpha, \beta)$ mažėja didėjant plokštelės storiui Δ (žr. 30 pav.). Srovių impulsų grafikai esant 8 kV ir skirtingiems plokštelės storiams Δ pateikti 21–25 pav.



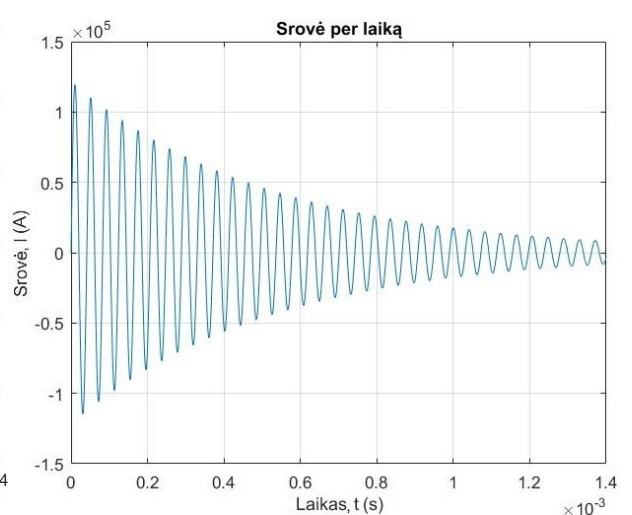
21 pav. Srovės impulso grafikas, kai
 $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 4 \text{ mm}$



22 pav. Srovės impulso grafikas, kai
 $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 6 \text{ mm}$

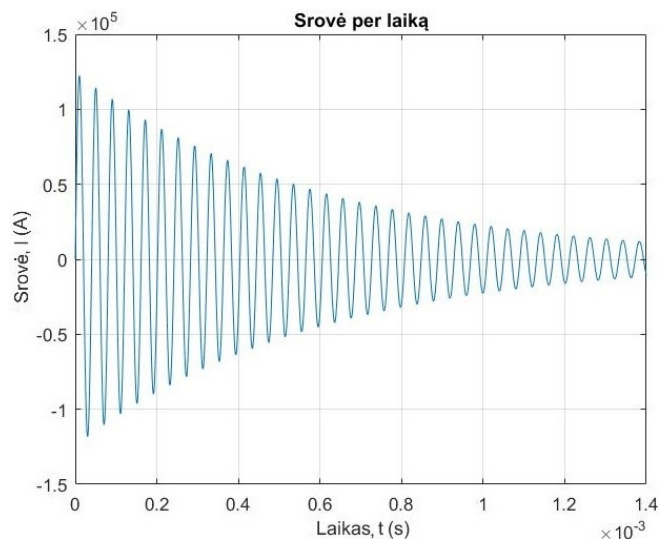


23 pav. Srovės impulso grafikas, kai
 $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 8 \text{ mm}$



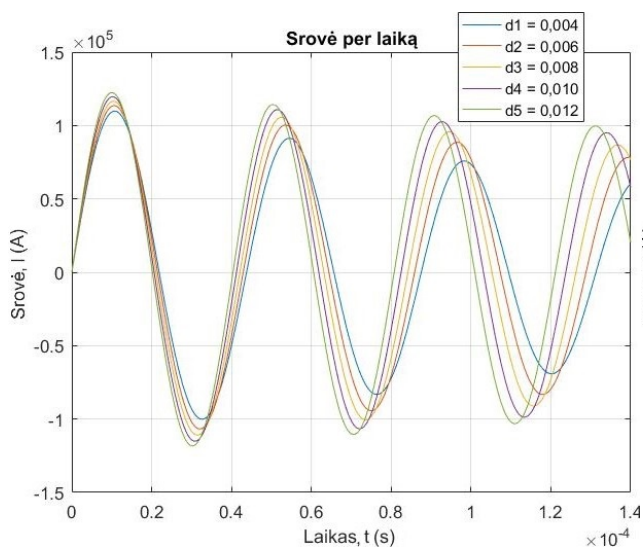
24 pav. Srovės impulso grafikas, kai
 $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 10 \text{ mm}$

Visų 21–25 pav. grafikų nustatytas srovės impulso trukmės laikas yra vienodas (1,4 ms), o parodyta tik svarbiausia impulso dalis tam, kad impulsus būtų galima palyginti. Taigi, kuo ritės plokštelė yra storesnė, tuo visas srovės impulsas trunka ilgiau. Impulso trukmę kaip ir srovės amplitudę (nuo 110 kA iki 122 kA, kai įtampa lygi 8 kV) nulemia ritės varža (nuo 4,1 mΩ iki 1,4 mΩ), kuri priklauso tik nuo ritės geometrijos ir medžiagos, iš pagaminta ritė. Šiuo atveju, vienintelis ritės geometrijos keičiamas parametras yra plokštelės storis, todėl varža priklauso tik nuo jo. Impulso fronto kilimo trukmė priklauso nuo induktyvumo ir trumpėja induktyvumui mažėjant. Impulso kilimo trukmė, kol pasiekiamą amplitudę, siekia nuo 10 μs iki 10,7 μs.



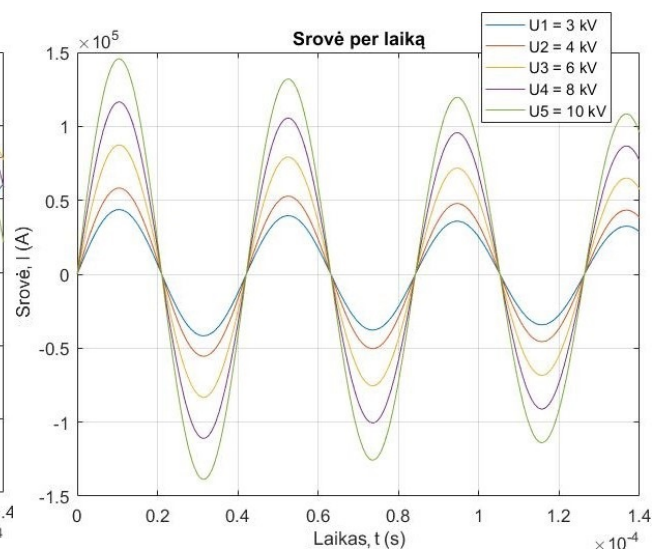
25 pav. Srovės impulso grafikas, kai $U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 12 \text{ mm}$

Įtampą didinant nuo 3 kV iki 10 kV (esant tam pačiam plokštelės storiui – žr. 27 pav.) – srovės impulso amplitudė didėja beveik tolygiai tiesiškai – apytiksliai išauga 3,3 karto (žr. 27, 28 pav.). Kai vienoda įtampa, o keičiamas plokštelės storis nuo 4 mm iki 12 mm, tada srovė didėja (vidutiniškai išauga 1,08 karto). Voltamperinėje charakteristikoje (žr. 29 pav.) pateikiama srovės priklausomybė nuo didinamos įtampos esant tam tikram plokštelės storiui. Ši priklausomybė tiesinė, o srovė yra tiesiogiai proporcinga įtampai pagal Omo dėsnį. Pirmame taške įtampai padidėjus nuo 3 kV iki 4 kV – srovė paauga 1,33 karto, antrame taške įtampai padidėjus dar 2 kV iki 6 kV – 1,5 karto ir likusiuose taškuose atitinkamai 1,33 ir 1,25 karto.



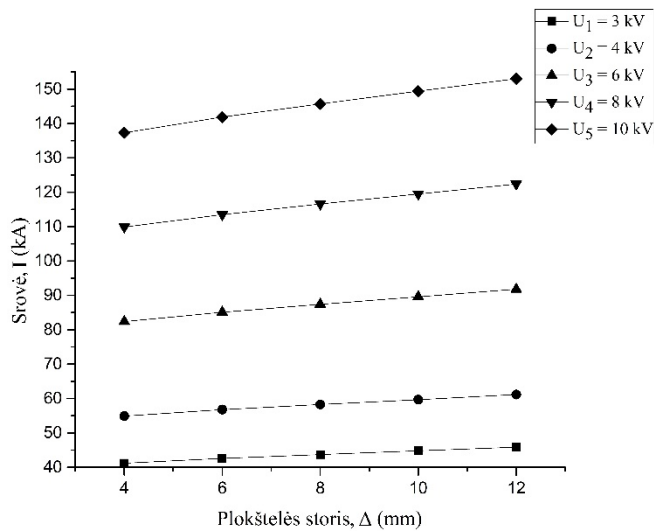
26 pav. Srovių impulsų grafikas, kai

$U = 8 \text{ kV}$, $\Delta = 4\text{--}12 \text{ mm}$

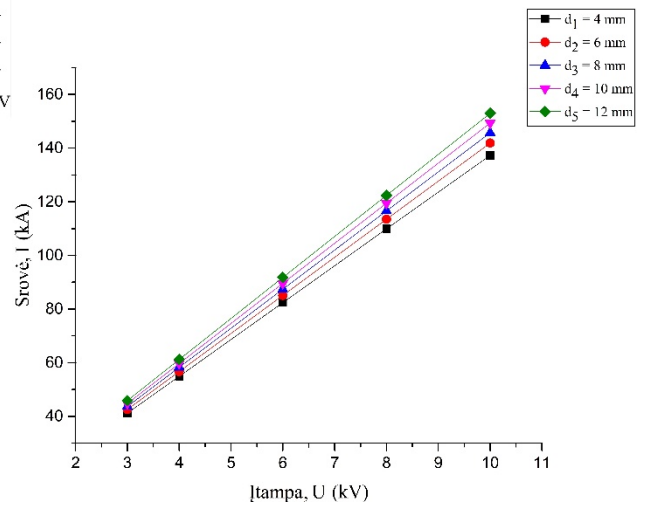


27 pav. Srovių impulsų grafikas, kai

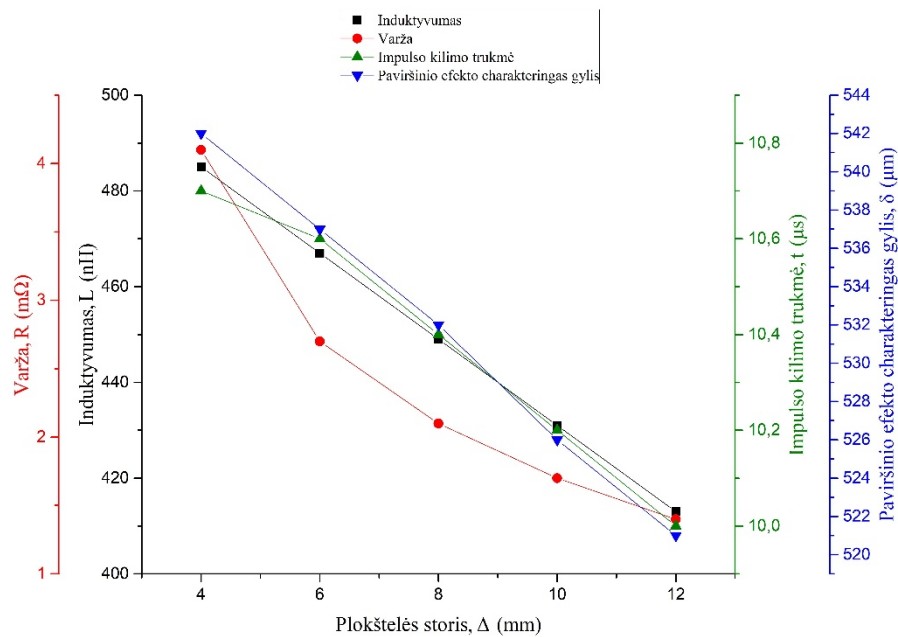
$U = 3\text{--}10 \text{ kV}$, $\Delta = 8 \text{ mm}$



28 pav. Srovės priklausomybė nuo plokštelės storio esant skirtingoms įtampoms

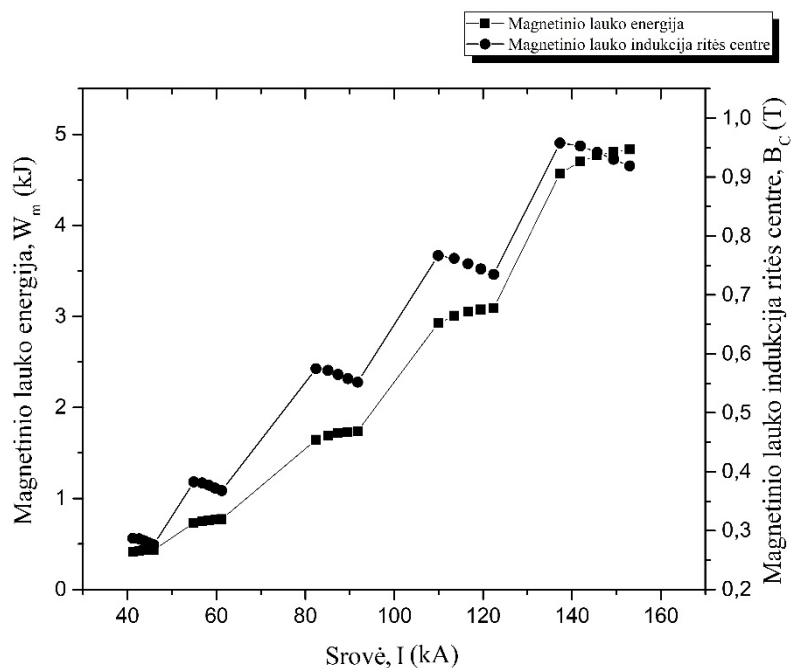


29 pav. Voltamperinė charakteristika esant skirtingiems ritės plokštelių storiams



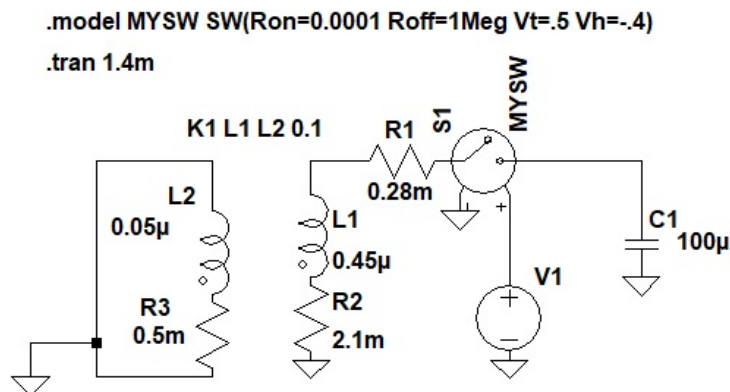
30 pav. Induktyvumo, varžos, impulso kilimo trukmės priklausomybė nuo plokštelės storio

Kylant įtampai magnetinio lauko energija W_m ir indukcija ritės centre B_C auga nepriklausomai nuo plokštelės storio, tačiau esant vienodai įtampai ir augant srovei – nežymiai kinta ritės plokštei storėjant (žr. 31 pav.). Centrinio magnetinio lauko indukcija B_C mažėja panašiu principu kaip ir induktyvumas L , varža R ar laikas t – pagal plokštelės storį (žr. 30 pav.). Taigi, didinant ritės plokštelės storį – stiprėja magnetinio lauko energija, o magnetinio lauko indukcija ritės centre šiek tiek mažėja.



31 pav. Magnetinio lauko energijos ir magnetinio lauko indukcijos ritės centre priklausomybė nuo srovės

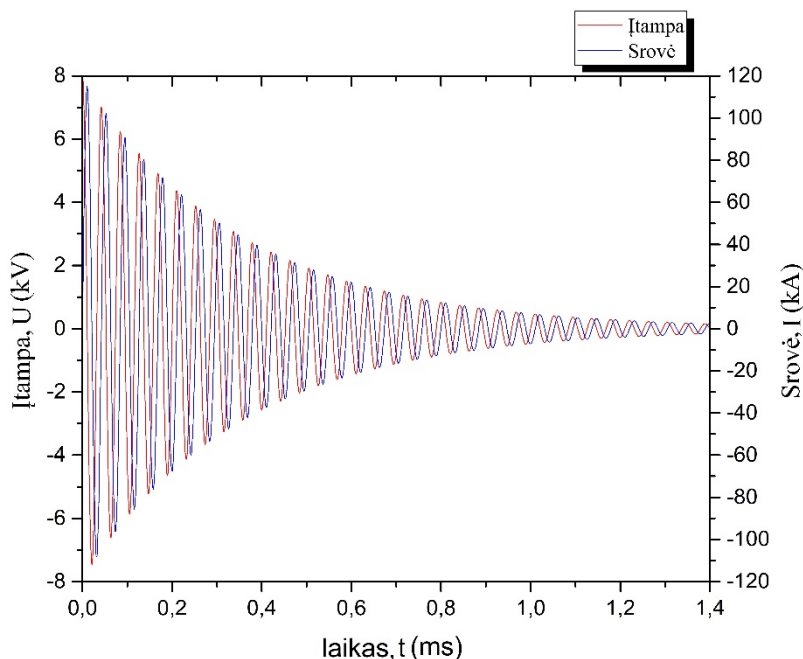
Norint patikrinti „Matlab“ programa atliktus skaičiavimus ir simuliacijas – „LTspice“ programa sukuriamas ekvivalentinė elektromagnetinio suvirinimo aparato schema (žr. 32 pav.).



32 pav. „LTspice“ programa sumodeliuota elektromagnetinio suvirinimo aparato schema

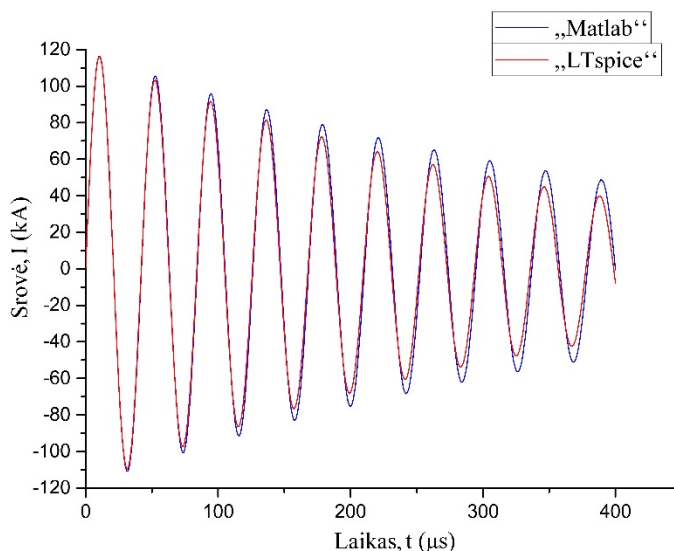
S1 yra jungiklis, kuris skirtas kondensatorių baterijoje sukauptą energiją perduoti į ritę. Turiama, kad kondensatorių baterija – C1 – yra iš karto įkrauta iki 8 kV. R1 – ritę ir jungiklį jungiančių šynų varža apskaičiuojama pagal $R = \frac{l \cdot \rho}{S}$, kai varinės šynos ilgis 1 m, storis ir plotis atitinkamai 2 mm ir 30 mm. L1 ritės induktyvumas, o R2 – varža. L2 ir R3 – lauko formuotuvo induktyvumas ir varža. Jungiklio įjungimo varža yra artimesnė idealiai – 0,1 mΩ. V1 – jungiklio

valdantis atskiras energijos šaltinis. Kondensatorių baterijoje sukaupta energija iš karto per jungiklį perduodama į ritę (dėl tokių nustatytų sąlygų) ir gaunamas srovės ir įtampos impulsas (žr. 33 pav.).



33 pav. „LTspice“ sudarytos schemos (žr. 32 pav.) srovės ir įtampos impulsai

Skaiciavimų ir simuliacijų korektiškumas patikrinamas sulyginant „Matlab“ ir „LTspice“ programomis gautus srovės impulsus esant tokioms pačioms sąlygoms (Įtampa – 8 kV, ritės plokštelės storis – 8 mm). 34 pav. sulyginami abejomis programomis gauti impulsai. „LTspice“ programa gautas impulsas šiek tiek greičiau slopsta. Tai gali nulemti papildoma šynų, lauko formuotuvo ar jungiklio varža, kuri nėra įvertinama „Matlab“ simuliacijose. Vis dėlto, svarbiausia impulsų dalis – pirmoji amplitudė – beveik identiška, o likusios nežymiai skiriasi, fronto kilimo laikai beveik sutampa, todėl galima daryti išvadą, kad skaičiavimai ir simuliacijos atliktos teisingai.



34 pav. „Matlab“ ir „LTspice“ programomis atliktų simuliacijų srovės impulsų palyginimas

3. TYRIMO OBJEKTAI IR METODIKA

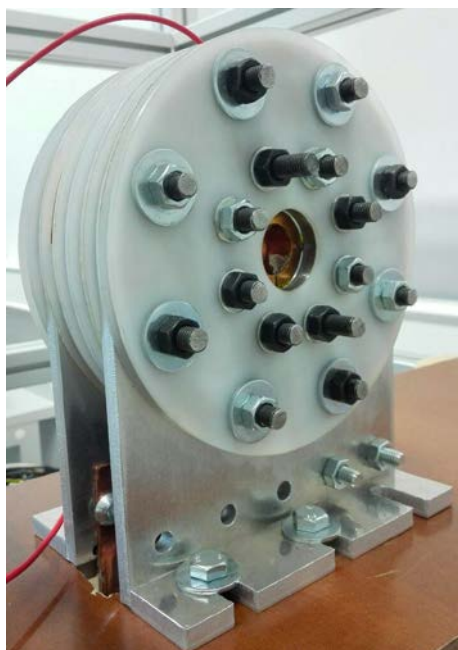
Darbo tikslas – sukurti ir ištirti elektromagnetinio suvirinimo imitatorių. Imitatoriaus kūrimas ir eksperimentai atliekami Fizinių ir technologijos mokslų centre (toliau – FTMC).

3.1. Tyrimo objektai

Elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus sistemos surinkimui naudojami: Biterio ritė, lauko formuotuvai, kibirkštinis, kondensatorių baterija, aukštosios įtampos relės, valdiklis, aukštosios įtampos maitinimo šaltinis, iškrovos varžos, trigeris.

3.1.1. Ritė

Viena pagrindinių elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus dalių yra Biterio ritė, kurioje įvyksta vamzdinių detalių suvirinimo procesas. Ji surenkama iš aliumininių plokštelių, varinių plokštes sujungiančių kontaktorių, izoliacinių diskų (atskiriančių aliuminines plokštes) ir sutvirtinančiuosius varžtus izoliuojančių vamzdelių. Iš viso yra 16 sutvirtinančiųjų varžtų, kurie suveržia galines plienines plokštes ir visą ritės konstrukciją, taip padarant geresnes kontaktų vietas, o ritę – tvirtesnę. Plačiau apie Biterio ritę ir jos konstrukciją aprašyta 2 skyriuje. Sukonstruotos ritės išmatuota varža – $1\text{ m}\Omega$, induktyvumas be lauko formuotuvo – $0,48\text{ }\mu\text{H}$, su lauko formuotuvu – $0,38\text{ }\mu\text{H}$.



35 pav. Biterio ritė

3.1.2. Lauko formuotuvai

Lauko formuotuvai yra simetrinės cilindro formos (žr. 16 pav.), pagaminti iš vario ir skirti koncentruoti magnetinį lauką. Formuotuvo matmenys atitinka tyrimui sukonstruotos Biterio ritės matmenis, kad būtų galima jį įdėti į ritės viduryje esančią angą.

3.1.3. Kibirkštinis

Kai kondensatorių baterijoje sukaupiamas pakankamas kiekis energijos, tada naudojant trigerį, per kibirkštinį t. y. savotišką jungiklį, elektros energijos impulsas perduodamas į ritę. Imitatoriui pasirinktas „HOFSTRA group“ gaminamas kibirkštinis ir dažniausiai naudojamas dideliems energijos kiekiams valdyti.

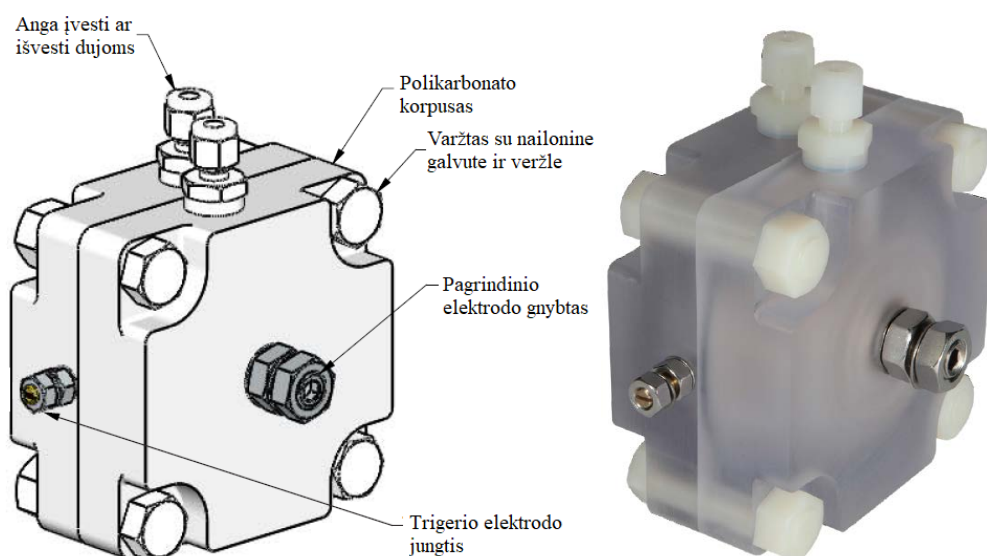
3.1 lentelė. Kibirkštinio techniniai duomenys

Didžiausia eksploatavimo įtampa	50 kV
Mažiausia eksploatavimo įtampa	5 kV
Induktyvumas	18 nH
Įjungimo varža po 10 mC krūvio perdavimo	8 mΩ
Didžiausia elektros srovė	100 kA
Didžiausias kartojimo dažnis	10 Hz
Didžiausias rekomenduojamas krūvio perdavimas vienos iškrovos metu	0,15 C
Priežiūros intervalas	1500 C
Mažiausia valdymo įtampa	50 % darbinės įtampos
RMS triukšmai	1 ns, kai 10 kV/ns, 70 A trigeris 2 ns, kai 5 kV/ns, 35 A trigeris 10 ns, kai 1 kV/ns, 7 A trigeris
Trigerio elektrodo elektrinė talpa	7 pF
Elektrinė talpa tarp elektrodų	1 pF
Didžiausias slėgis	3,4 bar
Užpildymo dujos	Suspaustas oras
Užpildymo dujų tūris	155 cm ³
Tūrio pakitimas panardinus į alyvą	770 cm ³
Rekomenduojami išoriniai dielektrikai	Oras, mineralinė alyva

Toks kibirkštiklis valdomas įtampa, turi 2 galimas aktyvuoti stabilias būsenas, kuriomis jį galima aktyvuoti, bet ne išjungti. Įtampa naudojama plazmos susidarymui tarp 2 kibirkštiklio elektrodų ir taip sudarant laidumą elektros srovei. Kai srovė grandinėje nukrenta, plazma pranyksta ir kibirkštiklis grįžta į savo pradinę didelio impedanso būseną.

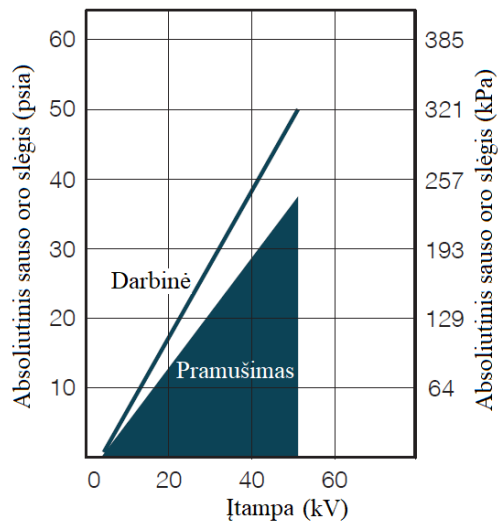
Galima naudoti 2 tipų trigerius:

- Elektrinis trigeris. Įtampa prijungiama per trigerio elektrodo gnybto naudojant aukštosios įtampos impulsų generatorių. Greitas įtampos pokytis kibirkštiklyje garantuoja tikslų sėkmingo sinchronizavimo su sistema laiką.
- Slėginis trigeris. Jeigu nesvarbi sinchronizacija ir tikslus paleidimo laikas, kibirkštiklyje galima mažinti slėgį naudojant vožtuvą. Toks būdas tinkamas, kai nereikia greitai kartoti proceso ir laikas nėra svarbus.



36 pav. „HOFSTRA group“ kibirkštiklis [45]

Naudojant slėginį trigerį, reikalingas kibirkštiklio testavimas parenkant darbinei įtampai tinkamiausią slėgį (žr. 37 pav.). Pasirenkama įtampa, kuria norima valdyti kibirkštiklį x ašyje, o tada surandamas y ašyje atitinkama slėgio vertė. Kibirkštiklyje pakeliamas slėgis iki surastos vertės ir įjungiama reikiama įtampa. Tada slėgis lėtai mažinamas, kol kibirkštiklis šauna – tai pramušimo slėgis esant tam tikrai įtampai. Darbinis slėgis – 1,25 karto didesnis slėgis už slėgį, kuriam esant įvyko pramušimas.



37 pav. Kibirkštiklio veikimo grafikas [45]

3.1.4. Aukštosios įtampos relės

Elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus sistemoje naudojamos 2 „Ross Engineering Corporation“ aukštosios įtampos relės – norint reikiamu metu iškrauti kondensatorių bateriją per varžas ir kai reikia įkrauti kondensatorių bateriją. Tokioms relės dažniausiai reikalinga 15 A, 250 V kintama srovė arba 0,5 A, 115 V nuolatinė srovė. Imitatoriaus sistemoje naudojamas papildomas maitinimo blokas, kuriuo relės maitinamos 115 V įtampa. Naudojamų relių parametrai pateikti 3.2 lentelėje.



38 pav. „Ross Engineering Corporation“ aukštosios įtampos NC relė [46]

3.2 lentelė. „Ross Engineering Corporation“ aukštosios įtampos relių parametrai

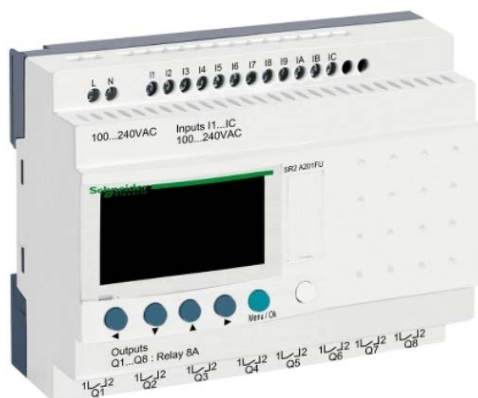
Relės modelis		E25–NC	E25–NO
Kontaktai		SPNC	SPNO
1 minutės aukščiausios įtampos bandymas esant AC arba DC srovei	Aukštosios įtampos kontaktai	25 kV	25 kV
	Ižeminimo izoliacija	25 kV	25 kV
Srovės nominalai (naujų ir švarių relių)	Nuolatinės srovės RMS	125 A	125 A
	Trumpalaikės 10 ciklų srovės RMS	1000 A	1000 A
	Trumpalaikė kondensatorių iškrova (20 μ s)	2500 A	2500 A
Didžiausia kontaktų varža (naujų ir švarių relių)		0,8 m Ω	0,8 m Ω
Suveikimo ilgiausias laikas (ms)		20	20/40
Ilgiausias atjungimo laikas (ms)		50/90	30
Standartinė 115 V, 60 Hz ritė	Didžiausia RMS griūtinė srovė	3 A	3 A
	Didžiausia pastovaus veikimo srovė	0,4 A	0,4 A

3.1.5. Kondensatorių baterija

Imitatoriaus sistemoje pradiniams bandymams FTMC naudojami 0,25 μ F talpos, 6,3 kV 2 nuosekliai sujungti kondensatoriai (baterijos didžiausia galima įtampa padvigubėja, o talpa – per pusę sumažėja). Įkrovos įtampai išlyginti naudojami papildomi, prie gnybtų tvirtinami, rezistoriai. Vėlesniems bandymams naudojami 5 kV, 100 μ F talpos kondensatoriai (baterijos įtampa 10 kV, talpa 50 μ F).

3.1.6. Programuojamas valdiklis

Elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus sistemos aukštosios įtampos relėms, elektriniam trigeriui ir kondensatorių baterijos įkrovos valdymui naudojamas „Schneider Electric“ programuojamas valdiklis. Tam pasirinktas 100–240 V kintamos įtampos SR2A201FU modulis, kuris turi 20 jungčių – 12 įvesties ir 8 išvesties, programuojamas LD (angl. *ladder diagram*) kalba.



39 pav. „Schneider Electric“ programuojamas valdiklis [47]

3.1.7. Aukštosios įtampos šaltinis

Elektromagnetinio suvirinimo imitatoriui aukštąją įtampą tiekia FTMC sukurtas aukštosios įtampos generatorius, kuriuo iš tinklo gaunamą įtampą (230 V) galima paaukštinti iki 9,2 kV. Imitatoriui reikalinga įtampa nuo 5 kV, nes kibirkštinio techniniame aprašyme nurodyta, kad jis gali veikti tik nuo 5 kV valdymo įtampos.

3.1.8. Iškvos varžos

Norint iškrauti elektros energiją iš kondensatorių baterijos ar visos sistemos – naudojamos 3 specialios nuosekliai sujungtos 33 k Ω varžos (žr. 40 pav.). Kai kondensatoriai nekraunami, o su suvirinimo sistema nedirbama, varžos yra sujungtos aukštosios įtampos rele (normaliai sujungta būseną) su sistema. Kai sistema paruošiama darbui, ar norima įkrauti kondensatorių bateriją, varžos yra atjungiamos paspaudžiant mygtuką ir valdikliui atjungiant relę. Po kibirkštinio iškvos, dėl saugumo varžos vėl prijungiamos.



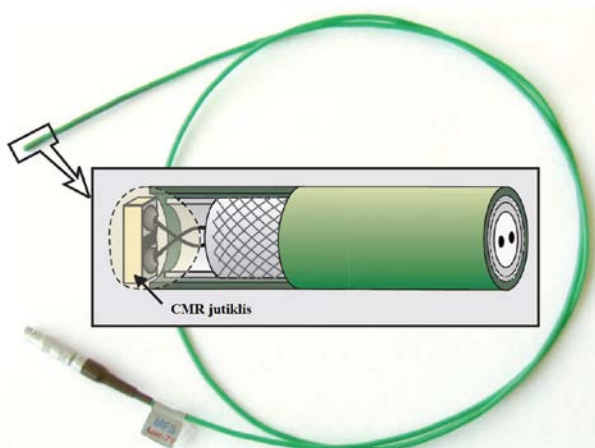
40 pav. Iškvos varžos

3.1.9. Trigeris

Kibirkštiklio valdymui galima naudoti 2 tipų trigerį: elektrinį ir slėgio pokyčio. Slėgio pokyčio trigeris yra iš FTMC esančios sistemos ateinančios dujos, pavyzdžiui, argonas. Jomis pripildomas kibirkštiklis iki tam tikro slėgio ir kai reikia atlikti iškrovą, slėgis kibirkštiklyje mažinamas (žr. 37 pav.). Antras būdas yra naudoti elektrinį trigerį, kuris kibirkštikliui reikiamu tikslu laiko momentu perduoda aukštosios įtampos impulsą (nuo 5 kV). Tokiam trigeriui reikalinga 230 V kintama įtampa, jis valdomas programuojamu valdikliu, ir signalas kibirkštikliui perduodamas tik nuspaudus reikiamą imitatoriaus sistemos mygtuką. Tokiame trigeryje naudojama aukštosios įtampos ritė, kuri 230 V įtampą gali paaugštinti (veikia kaip aukštinamasis transformatorius) iki reikiamos kibirkštikliui suveikti.

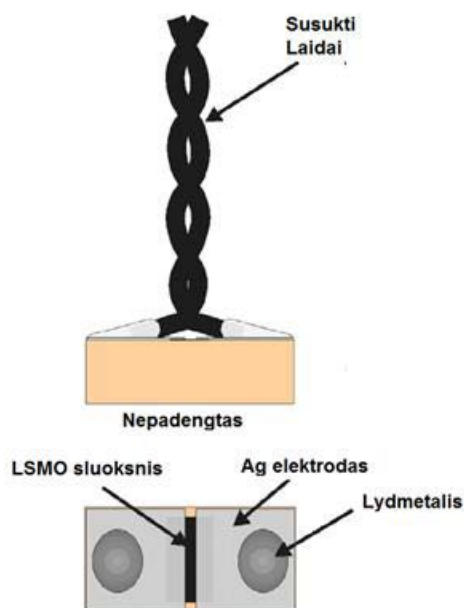
3.2. Tyrimui naudojami prietaisai

Tyrimui naudojamas CMR (angl. *colossal magnetoresistance*, liet. *kolosalios magnetovaržos*) manganitų jutiklis pavaizduotas 41 pav. Manganitų jutikliai sukonstruoti ir pagaminti FTMC. CMR jutiklio manganito jautrusis elementas yra pačiame laido gale. Plonas polikristalinio manganito $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ sluoksnis yra užaugintas ant 99,9 % Al_2O_3 + 0,1 % MgO izoliacinio polikristalinio padėklo. Sluoksnio varža mažėjo didinant magnetinį lauką maždaug 1 % šimtui militeslų prie kambario temperatūros. Užauginto manganito sluoksnio storis yra 400 nm.



41 pav. Magnetorezistyvnis jutiklis [48]

Elektrinis kontaktas terminio sidabro garinimo su chromo pasluoksniu būdu buvo suformuotas sluoksnio paviršiuje taip, kad aktyvioji elemento dalis būtų $400 \times 50 \times 0,40 \mu\text{m}^3$ dydžio. Be to, bifiliariškai susukti laidai buvo lituojami statmenai plėvelės paviršiui (žr. 42 pav.). Aktyvi sritis padengta termo klėjais tam, kad plėvelė būtų apsaugota nuo atmosferos poveikio ir sustiprinti lydmetalio kontaktus.

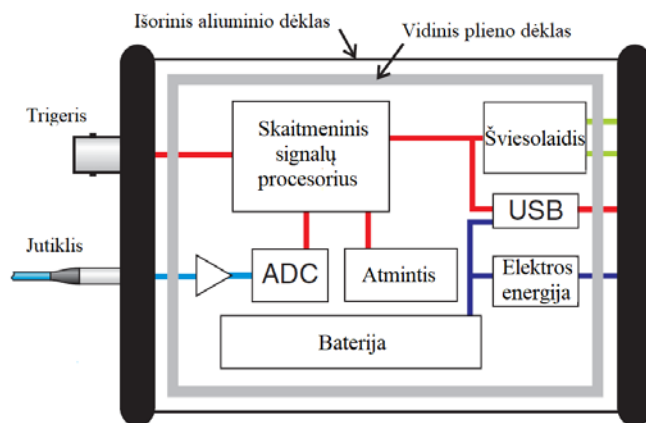


42 pav. CMR jutiklio skerspjūvis ir vaizdas iš viršaus [48]

Vytos vielos kabelis papildomai ekranuotas nuo aukštojo dažnio triukšmo naudojant tinklelio šarvą, kuris padengtas lankstaus plastiko vamzdeliu ir prijungiama LEMO tipo jungtis.

Pagrindiniai funkciniai B-skaliarinio matavimo prietaiso komponentai parodyti 43 pav. Elektros grandinė nuo elektromagnetinės interferencijos apsaugota naudojant vidinę 4 mm sienelės storio plieninę dėžę ir ant ją įdedant į 1,5 mm sienelės storio aliumininę dėžę. Storas plienas naudojamas apsaugoti elektros grandinę iki 1 kHz magnetinio lauko dažnio. Ličio jonų įkraunama baterija (3,6 V) naudojama kaip energijos šaltinis, kurią galima pakeisti nuimant vieną iš apsaugančių metalinių sienelių. Prietaiso šerdis yra skaitmeninis signalų procesorius Blackfin® 532 (analoginis įtaisas), kuris veikia 400 MHz taktų dažniu [48].

Matavimo grandinė sukurta naudojant minimalų analoginių komponentų kiekį norint kuo labiau sumažinti magnetinės interferencijos poveikį. Jutikliui ir didelės terminės sklaidos rezistoriui naudojama nuolatinė stabili 2,5 V nuolatinės srovės įtampa. Iš jutiklio išeinantis įtampos signalas apsaugomas ir sustiprinamas stiprintuvu ir filtruojamas glodinant RC filtru. Signalas skaitmenizuojamas naudojant 16 bitų nuoseklią analoginę – skaitmeninę keitiklio (ADC) aproksimaciją ir perduodant signalą į skaitmeninį signalų procesorių per sąsają naudojama nuosekliai, sinchroniniam duomenų perdavimui tarp valdomojo ir valdančiojo įrenginio didžiausiu 25 MHz taktų dažniu. Visos B-skaliarinio matavimo prietaiso funkcijos kontroliuojamos išorine programine įranga (išorinis signalas inicijuoja matavimo pradžią). Tačiau toks matavimo prietaisas gali veikti ir neprijungtas prie išorinio kompiuterio.



43 pav. Pagrindiniai B–skaliarinio matavimo prietaiso funkciniai blokai [48]

CMR jutiklių varža labai priklauso nuo temperatūros, todėl naudojant tokius jutiklius privaloma vertinti temperatūros įtaką. Darbe naudojami jutikliai sukalibruoti naudojant standartinę kalibravimo metodiką, naudojamą gaminant jutiklius FTMC ir aprašytą Stankevič et al. [48]. Jutiklių kalibravimas atliekamas naudojant aukštojo impulsinio magnetinio lauko generatorių. Kalibruojamasis ir kilpelinis B–dot jutiklis dedami į ritės centrą. Generatorius kuria iki 10 T apie 3 ms trukmės impulsinį magnetinį lauką. Abiejų jutiklių duomenys įrašomi, ir taip procedūra kartojama nuo 0 iki 40 °C kas 3°C. Magnetinio lauko vertė kiekvienu laiko momentu apskaičiuojama suintegravus kilpelinio B–dot jutiklio generuojamą signalą. Kalibravimo lentelė sukurta priskiriant magnetinės indukcijos B reikšmes lyginamų jutiklių įtampos pokyčių ΔU reikšmėms ir taip apskaičiuojamos kalibravimo kreivės [48].

Įtampai sistemoje matuoti naudojamas „Peaktech 2015“ skaitmeninis multimetras. Juo galima matuoti tik iki 600 V nuolatinę ar kintamą įtampą, tačiau matavimai atliekami prijungus įtampos daliklį, dėl kurio galimi aukštųjų įtampų matavimai.

Srovės impulsams gauti naudojamas „Tektonix DPO3052“ oscilografas.

3.3. Tyrimo eiga ir metodika

3.3.1. Sistemos testavimas

Elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus sistema sujungiama pagal principinę schemą (žr. 1 pav.). Sistemoje naudojami visi 3.1 skyriuje minimi komponentai. Visų pirma, iš aliumininių plokštelių, izoliatorių ir varinių kontaktorių surenkama Biterio ritė, kuri sustiprinama plieniniais varžtais ir galiniais plieniniais diskais. Visai sistemai paruošiamas vežimėlis ir aliumininis karkasas kur tvirtinami visi sistemos komponentai. NC aukštosios įtampos relė jungiama prie nuosekliai sujungtų iškrovos varžų, o NO aukštosios įtampos relė prie kondensatorių baterijos. Taip pat prie

relių prijungiamas atskiras 115 V maitinimo šaltinis. Aukštosios įtampos generatorius prijungiamas prie kondensatoriams krauti skirtos relės.

Programuojamo valdiklio įvestys sujungiamos su naudojamų mygtukų reikiama kontaktais, relių pozicijos nustatymo kontaktais. Išvesties kontaktai jungiami su aukštosios įtampos relėmis, signalizacinėmis lemputėmis ir trigeriu. Mygtukai naudojami sistemos įjungimui ir išjungimui, iškrovos varžų atjungimo aktyvavimui, kondensatorių įkrovai, bet kuriuo metu galimam sistemos iškrovos aktyvavimui, iškrovos paleidimui. Žalia indikacinė lemputė šviečia, kai įjungiamas sistema, antra žalia lemputė – kai kraunama kondensatorių baterija, o geltona lemputė mirksi, kai paspaudžiamas iškrovos mygtukas (iškrova įvyksta su laiko delsa, kad galima būtų pasitraukti dėl saugumo nuo aparato).

Kondensatorių baterijos vienas iš gnybtų varine šyna sujungtas su vienu iš 2 kibirkštinio pagrindinių elektrodo gnybtų. Antras kondensatorių baterijos gnybtas kita varine šyna sujungtas su Biterio ritės viena puse. Likęs laisvas kibirkštinio elektrodo gnybtas jungiamas su antrąja Biterio ritės puse. Į Biterio ritės angą ir kartu lauko formuotuvą įvedamas B–skalio jutiklis.

Srovės matavimui buvo naudojama Rogovskio ritė, kurios išėjimas per integratorių prijungiamas prie oscilografo. Rogovskio ritė buvo montuojama ant šynos, jungiančios kondensatorių su kibirkštikliu.

3.3.2. Sistemos su 125 nF kondensatorių baterija veikimo bandymas esant skirtingoms įtampos reikšmėms

Pirmieji sistemos bandymai dėl saugumo vykdomi su 2 mažesnės – 0,28 μF – talpos nuosekliai sujungtais kondensatoriais. Pirmiausia tikrinama kokiai įtampai ir slėgiui esant pramušamas kibirkštinis. Žinant pramušimui reikalingus parametrus, galima kontroliuoti elektromagnetinį suvirinimą. Iškvėpą įmanoma atlikti esant saugiu atstumu nuo sistemos, nes atsukus vožtuvą, slėgį galima mažinti po truputį.

Kai kondensatorių baterija pakankamai įkrauta (įtampa matuojama multimetru, prijungtu prie sistemos per įtampos dalytuvą), tada pirmojo bandymo metu naudojamas slėginis trigeris. Kibirkštinis užpildomas dujomis, kol pasiekiamas tam tikras slėgis (žr. 37 pav.), o tada jis mažinamas. Svarbu žinoti kokiai įtampai ir slėgiui esant kibirkštinis suveiks. Todėl atliekamas bandymas, kai laikomas pastovus slėgis ir keičiama įtampa, ir atvirkščiai. Pirmasis bandymas atliekamas naudojant mažiausią galimą įtampą – apie 5 kV (kibirkštinio darbinė įtampa nuo 5 kV). Kai slėgis pakankamai sumažėja – įvyksta pramušimas (iškvėpavimas) ir tarp pagrindinių kibirkštinio elektrodų pradeda tekėti plazma – taip energija iš kondensatorių baterijos perduodama į ritę, kurioje magnetinio lauko jutiklis užfiksuoja duomenis.

Tolimesniam sistemos testavimui aukštinama įtampa ir stebima, ar kibirkštiklis veikia pagal gamintojo nurodytus parametrus. Nuolat fiksuojama srovė, įtampa ir magnetinio lauko indukcija.

3.3.3. Metalinių vamzdinių detalių formavimo ir suvirinimo bandymas

Atlikus pradinius sistemos bandymus ir įsitikinus, kad įrenginiai tinkamai funkcionuoja, 0,28 μF talpos kondensatoriai pakeičiami į 2 nuosekliai sujungiamus 100 μF kondensatorius. Ruošiamos vamzdinės detalės: aliumininiai vamzdeliai, žalvarinis ir plieninis strypai. Kiekvieno bandymo metu detalės izoliuojamos ir įdedamos į ritėje esantį lauko formuotuvą. Abi ritės centrinės skylės uždengiamos specialiais dangteliais – siekiama išvengti galimo lauko formuotuvo (dėl stipraus magnetinio lauko) išstūmimo į išorę. Pirmuoju bandymu į ritėje esantį lauko formuotuvą įdedamas izoliuotas aliumininis 8 mm skersmens, 1 mm sienelės storio tuščiaviduris vamzdelis, įtampa – 5,6 kV. Antruoju bandymu įdedamas aliumininis 8 mm skersmens 0,45 mm sienelės storio tuščiaviduris vamzdelis, įtampa – 6 kV. Trečiuoju bandymu įtampa aukštinama iki 8,6 kV, bet naudojamas toks pat aliumininis 0,45 mm sienelės storio vamzdelis. Ketvirtuoju bandymu į aliumininį vamzdelį (sienelės storis – 0,45 mm) įkišamas plieninis 5 mm skersmens strypas (svarbu, kad strypas būtų kuo labiau vamzdelio centre), įtampa – 8,6 kV. Penktuoju bandymu plieninis strypas įdedamas į 1 mm sienelės storio vamzdelį, įtampa – 8,6 kV. Šeštuoju bandymu į plonesnės sienelės aliumininį vamzdelį įkišamas žalvarinis 6 mm skersmens strypas. Visų bandymų metu fiksuojamos įtampos, srovės ir magnetinio lauko indukcijos reikšmės.

4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

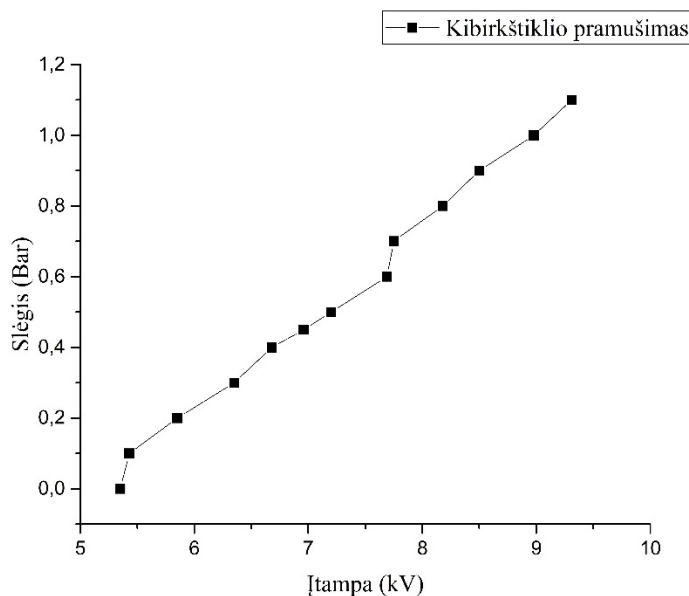
Šiame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai pagal 3.3 skyriuje aprašytą metodiką. Eksperimentų metu gauti duomenys apdoroti „OriginPro 2016“ programa.

4.1. Sistemos testavimo rezultatai

Elektromagnetinio suvirinimo proceso imitatoriaus sistema veikia tinkamai: dėl užprogramuotos valdymo logikos, kondensatorių bateriją įkrauti ar sistemą iškrauti galima kelių mygtukų paspaudimu t. y. valdyti aukštosios įtampos reles. Signalinės lemputės įjungiamos automatiškai pagal sistemos tam tikrą režimą.

Dėl saugumo naudojama mažesnės talpos – 125 nF kondensatorių baterija.

Viena svarbiausių sistemos testavimo dalių – kibirkštiklio pramušimas. Nusprendžiama, kad kol visa sistema nebus patobulinta, geriau naudoti slėginį trigerį vietoje elektrinio. Slėgio pokyčiui kibirkštiklyje sukurti yra svarbu palaikyti tam tikrą slėgį ir pasiekus tam tikrą įtampą, vožtuvu slėgį mažinti kol įvyksta pramušimas. Kai tas pats slėgis: jeigu įtampa per aukšta – įvyksta priešlaikinis pramušimas, jeigu per žema – pramušimas įvyksta per vėlai arba iš viso neįvyksta. Todėl kibirkštiklio bandymų metu palaikomas tam tikras slėgis ir tikrinama kokiai įtampai esant kibirkštiklis suveiks (žr. 44 pav.).

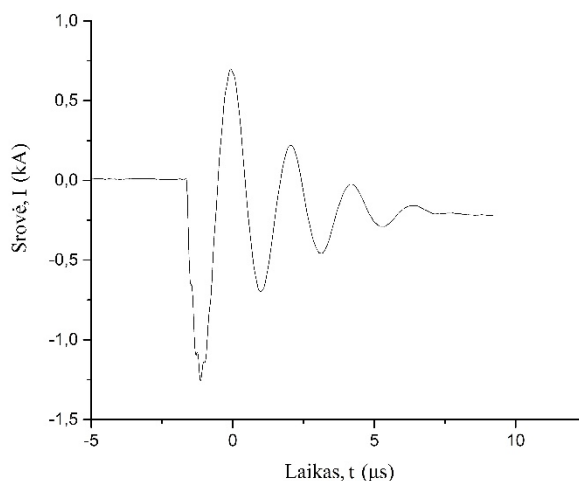


44 pav. Kibirkštiklio pramušimas

Veikiant tik atmosferos slėgiui, kibirkštinis suveikia, kai įtampa lygi 5,35 kV. Kai slėgis 1,1 Bar, kibirkštinis pramušti reikalinga aukščiausia galima įtampa (dėl generatoriaus ribotumo) – 9,2 kV, Sistemoje naudojamo kibirkštinio pramušimo priklausomybė nuo slėgio ir įtampos yra beveik tiesinė ir atitinka gamintojo (žr. 37 pav.) pateiktą pramušimo grafiką.

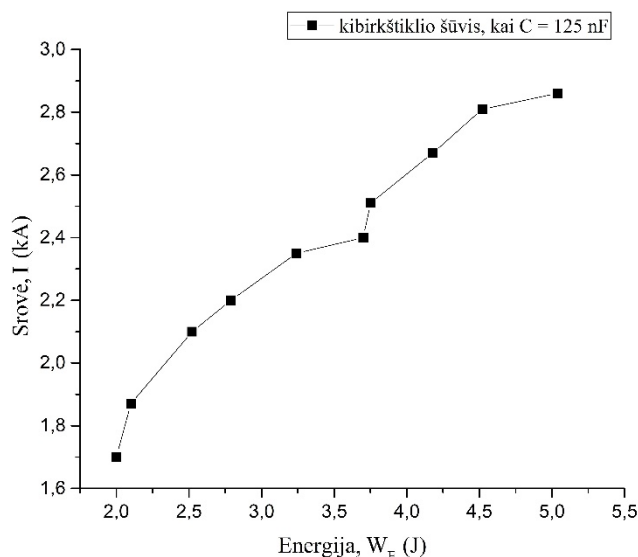
4.2. Sistemos su 125 nF kondensatorių baterija veikimo bandymų esant skirtingoms įtampos reikšmėms rezultatai

Pirmasis bandymas atliekamas kibirkštį veikiant tik atmosferos slėgiu ir mažiausia galima įtampa. Išmatuojamas srovės impulsas, kai $U = 5,35$ kV (žr. 45 pav.). Srovės amplitudė pasiekia maždaug 1,25 kA, visa impulso trukmė, dėl labai mažos kondensatorių talpos, siekia apie 8 μ s. Impulsas yra slopinamasis svyravimas.



45 pav. Srovės impulsas, kai $C = 125$ nF, $U = 5,35$ kV

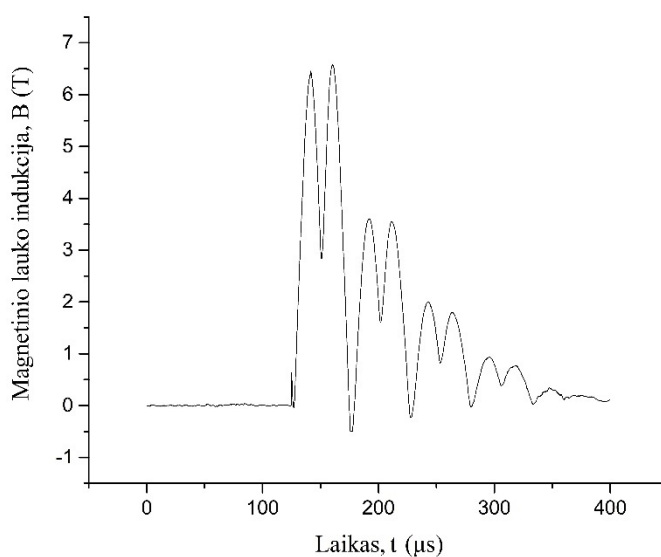
Atliekami bandymai, kai keičiamas slėgis 0–1,1 Bar, o įtampa nuo 5 kV iki 9,2 kV (dėl generatoriaus ribotumo). Kiekvienu atveju išmatuojama srovės amplitudės vertė. Srovės priklausomybė nuo sukauptos energijos kinta beveik tiesiškai. Galimos apie 5 % slėgio paklaidos dėl netiksliai valdomo rankinio dujų vožtuvo. Srovės priklausomybė nuo sukauptos energijos parodyta 46 pav. Dėl mažos kondensatorių talpos impulsai yra per trumpi, kad matavimo aparatas galėtų juos tinkamai, todėl magnetinio lauko indukcijos matavimai nepateikiami.



46 pav. Srovės priklausomybė nuo sukaupotos energijos, kai $C = 125 \text{ nF}$

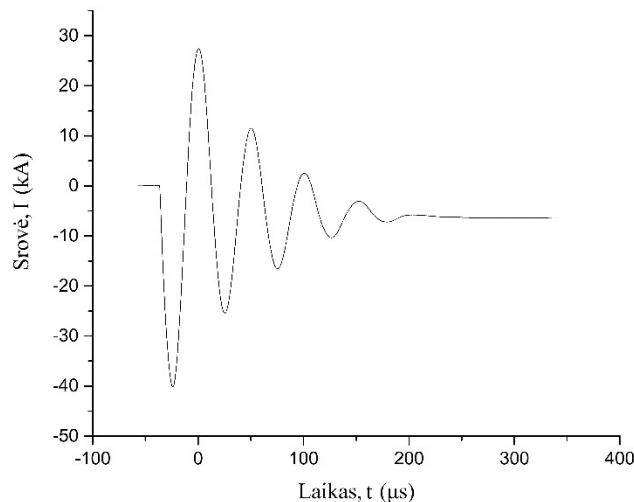
4.3. Metalinių vamzdinių detalių formavimo ir suvirinimo rezultatai

125 nF kondensatorių baterija pakeičiama į 2 nuosekliai sujungtus 100 μF , 5 kV kondensatorius – taip sukurama 50 μF , 10 kV kondensatorių baterija. Stipresnės baterijos skirtumas lyginant su ankstesne – kondensatorių bateriją reikia krauti kelis kartus ilgiau. Tam daro įtaką ir aukštosios įtampos generatorius, kurio aukščiausia galima įtampa imitatoriaus sistemai – 9,2 kV. Kibirkštiklio pramušimas beveik analogiškas ankstesniems bandymams – nepastebima reikšmingų pokyčių. Visų bandymų metu pradinis slėgis pakeliamas iki 1,2 Bar, kad neįvyktų priešlaikinis pramušimas ir būtų laiko atsitraukti nuo elektromagnetinio suvirinimo imitatoriaus sistemos saugiu atstumu.



47 pav. Magnetinio lauko indukcija, kai $C = 50 \mu\text{F}$, $U = 5,6 \text{ kV}$

Pirmojo bandymo metu kondensatorius įkrovus iki 5,6 kV – pasiekama 784 J energija ir 6,3 T magnetinio lauko indukcija. Impulsas trunka apie 280 μ s. Srovės amplitudė siekia apie 40 kA (žr. 48 pav.). Magnetinio lauko indukcija parodyta 47 pav. Kadangi magnetinio lauko matavimo jutiklis fiksuoja tik teigiamas reikšmes, todėl matomos dvigubos amplitudės. Jeigu būtų brėžiama linija tarp pirmųjų iš kiekvienos poros viršūnių – būtų gaunamas eksponentinis impulsas. Taip pat reikėtų atsižvelgti, kad šiame impulse dėl laidų talpos, srovės indukuojamos elektrovaros ir pan. atsiranda paklaidos, nes į matuojamą impulsą įtraukiamos tos vertės.



48 pav. Srovės impulsas, kai ritėje nėra bandinio, $C = 50 \mu\text{F}$

Antrojo ir trečiojo bandymų metu, kai kondensatorių įtampa 5,6–6 kV – srovė yra lygi 36 kA ir 40 kA, magnetinis laukas – 1,3 T ir 1,6 T. Antrojo ir trečiojo bandymų metu aliumininis 1 mm ir 0,45 mm sienelės storio vamzdeliai lieka nepakitę.

Ketvirtuoju bandymu įtampa pakeliama iki 8,6 kV. Išmatuojama srovė lygi 55 kA, o magnetinio lauko indukcija 2 T. Bandymo metu aliumininis 0,45 mm sienelės storio vamzdelis netolygiai deformuojamas (žr. 49 pav.).

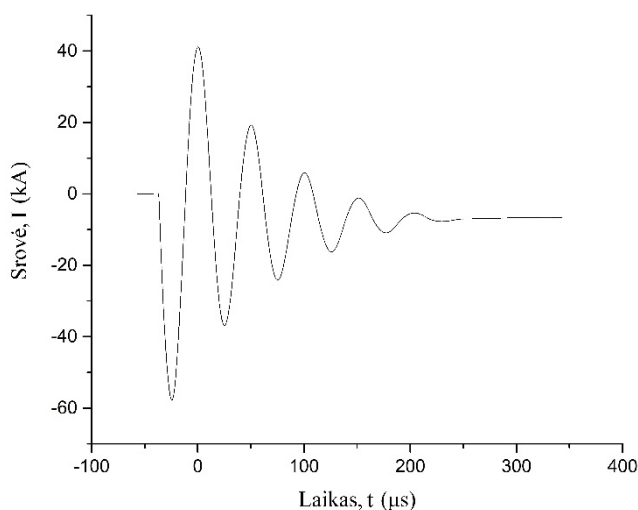


49 pav. Deformuotas aliumininis 8 mm skersmens 0,45 mm sienelės storio vamzdelis

Penktam bandymui pasirenkami tokie patys parametrai kaip ir 4 bandymui. Bandant suvirinti 5 mm skersmens pilnavidurį plieninį strypą su aliumininio 0,45 mm sienelės storio vamzdeliu išmatuojama 56 kA srovė ir 8,5 T magnetinio lauko indukcija. Suvirinimas nepavyksta, nors vamzdelis šiek tiek deformuojamas.

Šeštuoju bandymu parametrai nekeičiami. Bandant suvirinti storesnįjį vamzdelį su plieniniu strypu, išmatuojama magnetinio lauko indukcija – 6,5 T. Suvirinimas nepavyksta – vamzdelis nedeformuojamas.

Septintuoju bandymu išmatuojama magnetinio lauko indukcija lygi 12,2 T. Srovė su esant bandiniui ritėje siekia apie 58 kA (žr. 50 pav.). Aliumininis 0,45 mm sienelės storio vamzdelis dalinai suvirinamas su žalvariniu pilnaviduriu 6 mm skersmens strypu (žr. 51 pav.).



50 pav. Srovės impulsas su bandiniu ritėje, kai $C = 50 \mu\text{F}$

Suvirinimas įvyksta, tačiau nėra labai tvirtas – metalinės detalės nepakankamai suspaudžiamos (turi šiek tiek laisvumo). Galima pastebėti, kad žalvariniam (1 mm didesnio skersmens negu plieninio) strypui esant vamzdelio viduje, aliumininio vamzdelio deformacija yra tolygesnė.



51 pav. Aliumininio 0,45 mm sienelės storio vamzdelio suvirinimas su žalvariniu 6 mm skersmens pilnaviduriu strypu

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Elektromagnetinio suvirinimo technologija yra sparčiai besivystantis metodas, naudojamas suvirinant skirtingus metalus. Tokia technologija galima atlikti įvairius metalų apdirbimo, formavimo, suvirinimo ir pan. darbus. Pastebėta, kad pagrindiniai veiksniai, lemiantys sėkmingą suvirinimo procesą, įvykti yra kuo mažesnis sistemos induktyvumas ir varža, pakankamas kondensatorių baterijoje sukaupiamas energijos kiekis, pirmojo srovės impulso kilimo laikas ir pasiekiamo magnetinio lauko vertė ritės viduje. Taip pat, naudojant lauko formuotuvą, magnetinį lauką ritės centre galima koncentruoti į tam tikrą mažą plotą ir taip suvirinimo vietoje pasiekti stipresnį magnetinį lauką.

Biterio ritė yra perspektyvus impulsinis magnetinio lauko įrenginys, todėl šiame darbe buvo pasirinkta ši ritė. Skaiciuojant Biterio ritės parametrus, keičiamas tik ritės plokštelės storis – nuo 4 mm iki 12 mm, atitinkamai gautos varžos nuo 4,1 m Ω iki 1,4 m Ω ir induktyvumas nuo 485 nH iki 413 nH. Įtampa keičiama nuo 3 kV iki 10 kV. Pastebėta, kad įtampa daro įtaką tik srovės impulso amplitudei (kuo aukštesnė įtampa, tuo srovės impulsas stipresnis), o ritės varža – tik viso impulso laikui. Impulso kilimo trukmė priklauso tik nuo induktyvumo ir yra lygi nuo 10 μ s iki 10,7 μ s.

Išmatavus sukonstruotos Biterio ritės parametrus, gauta varža – 1 m Ω , induktyvumas – 0,48 μ H be lauko formuotuvo ir 0,38 μ H su lauko formuotuvu. Šias vertes palyginus su gautomis skaičiuojant teoriškai (2,1 m Ω , 0,45 μ H) induktyvumo paklaida yra nežymi ir galėjo atsirasti dėl apvalinimo ar tam tikrų parametrų netikslumų. Ritės varža skiriasi 2 kartus – dėl matavimui pasirinkto prietaiso riboto dažnio.

Naudotas kibirkštiklio iškrovos iniciatorius – slėgio pokytis. Pagal technines charakteristikas, vienos iškrovos rekomenduojamas darbinis krūvis turėtų siekti 0,15 C, tačiau eksperimentų metu su 50 μ F kondensatorių baterija krūvis buvo apie 0,43 C, kai įtampa – 8,6 kV. Krūvis 3 kartus didesnis negu rekomenduojamas, todėl tai gali sutrumpinti kibirkštiklio eksploatacijos laiką.

Aliumininių vamzdelių formavimas įvyko, kai įtampa siekia 8,6 kV, o vamzdelio sienelės storis – 0,45 mm. Suvirinimas iš dalies pavyko tik su žalvariniu 6 mm skersmens pilnaviduriu strypu. Su 1 mm sienelės storio vamzdeliu nei formavimas, nei suvirinimas nepavyko. Jeigu vamzdelio viduje yra strypas, t. y. bandoma suvirinti, tada vamzdelio deformacija būna pastebimai tolygesnė.

Pirmo formavimo bandymo metu buvo naudojama 784 J energija, 40 kA srovė, kai naudojama 5,6 kV įtampa, o suvirinimo metu pasiekta 1,85 kJ energija, 56 kA srovė, kai naudojama 8,6 kV įtampa. Energijai padidėjus 2,4 karto – įvyko suvirinimas.

Magnetinio lauko indukcijai matuoti buvo naudotas FTMC sukurtas magnetinio lauko matuoklis. Magnetinio lauko indukcija bandymų metu be detalės siekia beveik 6,5 T, o suvirinimo

metu beveik 12,5 T, tačiau matavimo tikslumas nėra didelis. Magnetinio lauko matavimo tikslumui padidinti reikėtų eliminuoti magnetinio lauko zondo laidų elektrines talpas, srovės indukuojamas elektrovaras ir triukšmų įtaką.

Naudojant 50 μF kondensatorių bateriją, jos įkrova užtrunka gerokai ilgiau negu su sistemos testavimo metu naudota 400 kartų mažesnės talpos baterija. Norint įkrovos procesą pagreitinti, reikėtų galingesnio aukštosios įtampos šaltinio, kuriuo būtų galima užtikrinti aukštesnę negu 9,2 kV įtampą.

Norint tiksliai kontroliuoti kibirkštinio iškvėpą ar suvirinimo parametrus, reikėtų naudoti elektrinį triggerį. Tokiu atveju, tik norimu metu paspaudus mygtuką, būtų generuojamas impulsas. Taip valdant kibirkštinį ir užprogramavus valdiklį suveikti su delsa, būtų galima bandymus vykdyti atsitraukus saugiu atstumu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

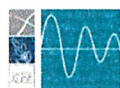
1. Jassim, A. K. (2011). Magnetic Pulse Welding Technology. *Electrical and Electronic Engineering*, 7(2), 169–179.
2. Daehn, G. S. (2006). High velocity metal forming. In ASM Handbook (14B), *Metalworking: sheet forming* (pp. 405–418). Columbus, OH: ASM International.
3. Uhlmann, E., Jurgasch, D. (2004). New impulses in the forming of magnesium sheet metals. In *The 1st International Conference on High Speed Forming*. Dortmund, Germany.
4. Aizawa, T. (2003). Magnetic pressure seam welding method for aluminium sheets. *Journal of light metal welding and construction*, 41(3), 20–5.
5. Belyy, I. V., Fertik, S. M., Khimenko, L. T. (1977). *Spravochnik Po Magnitnoimpul'Snoy Obrabotke Metallov* [Electromagnetic Metal Forming Handbook]. English translation by Altynova, M. M.
6. Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B. L., Tekkaya, A. E., Kleiner, M. (2011). Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(5), 787–829.
7. Zaitov, O., Kolchuzhin, V. A. (2014). Bitter coil design methodology for electromagnetic pulse metal processing techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(4), 551–562. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.07.008>
8. ELMAG INC. (2003). *Operation and maintenance manual for the ELMAG 60 KJ*. San Diego: Elmag, Inc.
9. Lorenz, A., Lueg-Althoff, J., Bellmann, J., Gobel, G., Gies, S., Weddeling, C., Beyer, E., Tekkaya, A. E. (2016). Workpiece Positioning during Magnetic Pulse Welding of Aluminum–Steel Joints. *Welding Journal*, 95, 101–109.
10. Deribas, A. A., Zakharenko, I. D. (1974). Surface effects with oblique collisions between metallic plates. *Combustion, Explosion, and shock Waves*, 10(3), 358–367. <http://doi.org/10.1007/BF01463767>
11. Kapil, A., Sharma, A. (2015). Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique. *Journal of Cleaner Production*. 100, 35–38. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.042>
12. Stern, A., Becher, O., Nahmany, M., Ashkenazi, N., Shribman, V. (2015). Jet composition in magnetic pulse welding: Al–Al and Al–Mg couples. *Welding Journal*, 94(8), 257–264.
13. Zhang, P. (2003). *Joining enabled by high velocity deformation*. PhD dissertation. The Ohio State University, Columbus, Ohio.

14. Lippman, H., Schreiner, H. (1964). Zur Physik der Metallumformung mit hohen Magnetfeld impulsen. *Zeitschrift für Metallkunde*, 55(100), 737–740.
15. Kojima, M., Tamaki, K., Furuta, T. (1989). Effect of collision angle on the result of electromagnetic welding of aluminum. *Transactions of the Japan Welding Society*, 20(2), 36–42.
16. Aizava, T., Kashani, M., Okagawa, K. (2007). Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC steel sheet joints. *Welding Journal*, 86(5), 119–124.
17. Mori, K. I., Bay, N., Fratini, L., Micari, F., Tekkaya, A. E. (2013). Joining by plastic deformation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 62(2), 673–694.
18. Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Pabst, C., Resch, F. (2014). Joining by forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10), 1972–1994. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.022>
19. Broeckhove, J., Willemsens, L. (2010). *Experimental research on magnetic pulse welding of dissimilar metals*. Master thesis. Ghent university, Ghent, Netherlands.
20. Andersson, J. (2001). *Magnetic Pulse Welding*. A Literature Study – Research Report. Stockholm: US–AB.
21. Blakely, M. Filler wire is for WIMPS (Welding). (2008). *Fabricating and Metalworking, the business of metal manufacturing*, 31–32.
22. Pope, B. (2007). Hirotec bringing magnetic pulse welding to masses. *WardsAuto*, 11(1), 1–7.
23. *Elektromagtinių impulsų technologija. PST produktai*. Prieiga per internetą: <http://www.english.pstproducts.com/emptmaschinen.htm>
24. Al-Hassani, S. T. S., Duncan, J. L., Johnson, W. (1967). Analysis of electromagnetic forming process. *Proceedings of the International American Society of Tool and Manufacturing engineers*, 853–882.
25. Rafailoff, L., Schmidt, V. (1975). Fugen von rohrformigen Werkstücken aus Metall und Porzellan durch Magnetumformung. *Industrie-Anzeiger*, 97(5), 79–82.
26. Shribman, V. (2007). *Magnetic pulse welding of automotive HVAC parts*. Proprietary information. Yavne, Israel: PULSAR Ltd.
27. Kaye, R. J. (2004). Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers. *IEEE*, 41(1), 194–199. <http://doi.org/10.1109/ELT.2004.1398047>
28. Zittel, G. (1976). Getting the most out electromagnetic forming. *Assembly Engineering*, 26–29.
29. Kore, S. D., Date, P. P., Kulkarni, S. V. (2009). Electromagnetic impact welding of AL to AL–Li sheets. *Journal of manufacturing science and engineering*, 131(3), 1–4. <http://doi.org/10.1115/1.3123338>

30. Bartholdi, W., Daube, J. (1966). *Die elektrohydraulische und die elektromagnetische Umformung von Metallen*. Urania – Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse.
31. Bauer, D. (1969). Zur Physik der Metallumformung mit schnellveränderlichen Magnetfeldern. *ETZ-A*, 90(11), 268–271.
32. Shribman, V., Blakely, M. (2008). Benefit of the magnetic pulse process for welding dissimilar metals. *Welding Journal*, 87(1), 56–59.
33. Weman, K. (2003). *Welding Processes: Handbook*. Cambridge: Woodhead publishing Ltd and North America: CRC Press LLC.
34. Shribman, V. (2001). Take advantage of the new magnetic pulse welding process. In ESAB AB, *A welding review published by ESAB* 56(2,3), (pp 14–16). Göteborg, Sweden: ESAB AB.
35. Furth, H. P., Levine, M. A., Waniek, R. W. (1957). Production and use of high transient magnetic fields II. *The Review of Scientific Instruments*, 28(11), 949–958.
36. Struve, K. W., Porter, J. L., Rovang, D. C. (2008). *Megagauss Field Generation for High–Energy–Density Plasma Science Experiments*. SAND2008–7015. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
37. Novickij, J., Kačianauskas, R., Filipavičius, V., Balevičius, S., Žurauskienė, N., Tolutis, R. (2004). Inductors for High Magnetic Field Generation. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 7(56), 19–24.
38. Montgomery, D. B. (1969). *Solenoid Magnet Design*. New York: John Wiley and Sons Ltd.
39. Herlach, F., Miura, N. (2001). *High Magnetic Fields: Science and Technology (Vol.1) – Magnet Technology and Experimental Techniques*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
40. Aydin, U. (2014). *Investigation of pulsed magnetic field inductors*. Master thesis. Vilnius Gediminas technical university, Vilnius, Lithuania.
41. Faes, K., Baaten, T., De Waele, W. and Debroux, N. (2010). Joining of copper to brass using magnetic pulse welding. In *4th International Conference on High Speed Forming* (84–95). Dortmund, Germany.
42. Lagutin AS, Ozhogin VI. (1988). Pulsed magnetic fields in physical experiments. Monographie. Moscow: Energoatomizdat.
43. Wilson, M. N., Srivastava, K. D. (1965). Design of efficient flux concentrators for pulsed high magnetic fields. *Rev Sci Instrum*, 36(8), 1096.
44. Kratz, R. and Wider P. (2002). Principles of pulsed magnet design. Berlin/Heidelberg: Springer–Verlag.

45. *HOFSTRA group. High energy density physics. Triggered spark-gaps.* Prieiga per internetą: <https://hofstragroup.com/assets/hofstragroup-triggered-spark-gap-data-sheet.pdf>
46. *Ross Engineering Corporation. High voltage relays. E series 12 kV – 60 kV.* Prieiga per internetą: <https://www.rossengineeringcorp.com/products/control/hv-relays/e-series-12kv-60kv.html>
47. *Schneider Electric. Compact smart relay zelio logic.* Prieiga per internetą: <https://www.schneider-electric.com/en/product/SR2A201FU/compact-smart-relay-zelio-logic---20-i-o---100..240-v-ac---no-clock---display/>
48. Stankevič, T. *et al.* (2014). Pulsed Magnetic Field Measurement System Based on Colossal Magnetoresistance–B–scalar Sensors for Railgun Investigation. *Review of Scientific Instruments*, 85(044704)

PRIEDAI



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XXII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Paulius Apinis

*Elektros inžinerijos (T190) ir Automatizavimo, robotikos,
valdymo inžinerijos (T125) jungtinėje sekcijoje
perskaitė pranešimą*

MAGNETINIO SUVIRINIMO PROCESO IMITATORIAUS KŪRIMAS IR TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

doc. dr. Andrius Petrovas

2019 m. kovo 15 d.
Vilnius