



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS fakultetas

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Tomas Tamulionis ESIfmu-09

Didelės galios impulsinio šaltinio tyrimas

Investigation of High Power Pulsed Generator

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 62601T101

Elektros energetikos sistemų inžinerijos specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2011

TURINYS

1. Įvadas.....	9
2. Literatūros apžvalga.....	10
2.1. Stiprių impulsinių magnetinių laukų generatoriaus bendra konstrukcija...	10
2.2. Didelės galios impulsiniai kondensatoriai.....	10
2.2.1. Milisekundinės trukmės išsikrovimo kondensatoriai.....	13
2.2.2. Mikrosekundinio išsikrovimo kondensatoriai.....	14
2.2.3. Sub-mikrosekundiniai kondensatoriai.....	15
2.2.4. „Save gydančios“ technologijos kondensatoriai.....	16
2.3. Raktai.....	17
2.3.1. Dujinis kibirkštinis.....	17
2.3.2. Tranzistorinis raktas.....	20
2.3.3. Tiristoriai.....	20
2.3.4. Galios puslaidininkiniai įtaisai greitam didelės galios perjungimui...	21
2.4. Ritės.....	22
2.4.1. Vienos vijos induktoriai.....	23
2.4.2. Magnetinio srauto koncentratorius.....	25
2.4.3. Helix tipo induktorius.....	27
3. Magnetinio lauko matavimo metodai.....	29
3.1. Holo jutikliai.....	29
3.2. Faradėjaus optinis metodas.....	31
3.3. Kilpiniai jutikliai.....	34
3.4. Magnetovaržiniai jutikliai.....	35
4. Eksperimentas.....	36
4.1. Įranga.....	36
4.1.1. Induktorius.....	36
4.1.2. Tiristorinis jungiklis.....	38
4.1.3. Dabar kuriamas magnetinio lauko generatorius.....	39
4.2. Indukcinio jutiklio pasyvinio integratoriaus parametrų įtakos magnetinio lauko signalo formai tyrimas.....	40
4.3. Ritės magnetinio lauko pasiskirstymo pagal ašį tyrimas.....	48
4.4. Magnetinio lauko priklausomybė nuo užkraunamos kondensatorių	

įtampos.....	51
4.5 Magnetinės ritės šarvo įtaka magnetinio lauko impulso formai.....	51
4.6 Plonųjų manganitų sluoksnių varžos tyrimas stipriame impulsiniame magnetiniame lauke.....	55
Darbo rezultatų apibendrinimas ir išvados.....	56
Literatūros sąrašas.....	58

Ivadas

Didelės galios magnetinio lauko generavimas yra labai aktualus elektronikos srityje, taip pat šis laukas taikomas fizikiniuose bandymuose. Daug svarbių atradimų buvo padaryta, taikant didelės galios magnetinį lauką. Šiuo metu vis daugiau mokslininkų įsitraukia į šią sritį ir vis dažniau laboratorijos kooperuojasi siekdamos aukštų rezultatų šioje srityje. Norint generuoti magnetinį lauką didesnę negu 2 T, reikalingi tuščiaviduriai superlaidūs solenoidai arba kitos įvairios hibridinės sistemos. Tačiau, šitie metodai yra labai brangūs ir tokia įranga gali būti instaliuota tik didelėse, moderniose laboratorijose ir centruose. Didžiausias pastovus magnetinis laukas, kurį pavyko pasiekti hibridinio magneto pagalba, yra 45 T.

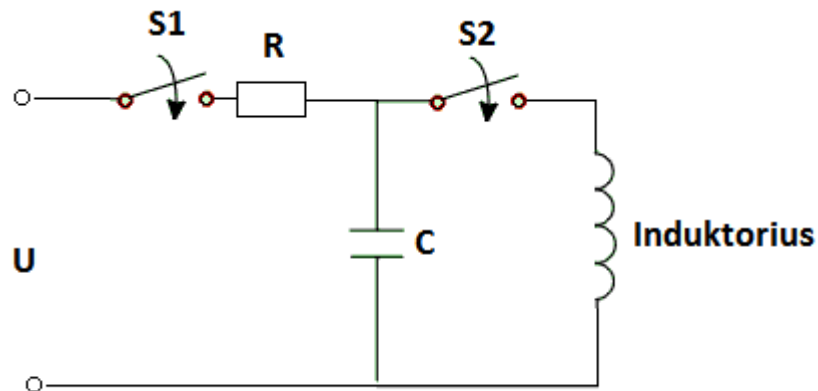
Stipresniam magnetinio lauko generavimui taikoma impulsinės energijos technika. Ši technika tampa alternatyva pastoviam magnetiniam laukui daugelyje taikomų atvejų. Todėl įrangos skirtos impulsinio magnetinio lauko generavimui tyrimas yra svarbus užduotis [1].

Stipraus pastovaus magnetinio lauko generavimas daugeliu atvejų yra didelė prabanga dėl reikalingos infrastruktūros, medžiagų, žmogiškųjų, energetinių ir kitų resursų, todėl pastaruoju metu mokslininkų žvilgsniai krypta į mažai energijos suvartojančias, tačiau milžiniškus galingumus pasiekiančias ir minimalios infrastruktūros reikalaujančias impulsines technologijas ir impulsinius magnetinius laukus, kurių dažniausiai visiškai pakanka atlikti daugelį eksperimentinių tyrimų ten, kur reikia tokių stiprių magnetinių laukų. Dėl paplitusių stipraus, iki 40–60 T impulsinio magnetinio lauko generavimo būdų, daugelis mažesnius biudžetus turinčių universitetų laboratorijų bei mokslinių įstaigų pasiekė išpūdingų pasaulinio lygio rezultatų įvairiose mokslo srityse, tokiose kaip dalelių fizikiniai tyrimai, molekulinė biologija, medicina, medžiagotyra ir t.t. [1].

2. Literatūros apžvalga

2.1. Stiprių impulsinių magnetinių laukų generatoriaus bendra konstrukcija

Vienas iš tinkamiausių stiprių impulsinių magnetinių laukų sukūrimo būdų yra kondensatorių baterijų iškrova per induktyvinę ritę. Toks magnetinio lauko šaltinis nereikalauja specialių didelės srovės maitinimo tinklų, yra gana saugus ir leidžia lengvai keisti maksimalią magnetinio lauko vertę[1]. Principinė tokio įrenginio schema pavaizduota 1 paveikslėlyje [2].



1 pav. Principinė impulsinio magnetinio lauko generatoriaus schema

Ijungiant jungiklį S_1 , maitinimo šaltinis, kurio įtampa lygi U , pakraunama kondensatorių baterija C . Varža R reikalinga užkrovimo srovės ribojimui. Įjungus jungiklį S_2 sukaupta energija perduodama induktoriui kuriame sukuriamas impulsinis magnetinis laukas.

Savarbiausi šio įrenginio komponentai yra kondensatorių baterija C , jungiklis S_2 ir induktorius. Nuo šių elementų priklauso kokio kiekio energiją galėsime sukaupti, kaip greitai ją perduoti ir kokio dydžio magnetinį lauką galėsime sukurti.

2.2 Didelės galios impulsiniai kondensatoriai

Didelės galios kondensatorių rinka yra žymiai mažesnė, nei įprastų kondensatorių. Didelės galios kondensatoriai taikomi medicinos įrangai, pavyzdžiui defibriliatoriai, taip pat nematomų spindulių technikoje. Šiuo metu yra labai didelis postūmis karinėje pramonėje, vadinamosiose ateities ginklų sistemose. Šiose sistemose, didžiausią svarbą turi kondensatoriai. Todėl jų vystymas yra labai svarbus. Kadangi karinėms reikmėms reikia kondensatorių, kurie galėtų puikiai dirbti atšiauriomis ir kenksmingomis sąlygomis ir kas svarbiausia, kad kondensatorių

veikimas nesutriktų esant judėjimui ar virpėjimui. Kitaip tariant, kondensatoriai turi būti mobilūs. Tai yra pagrindiniai skirtumai tarp karinių ir pramoninių kondensatorių [3].

Didelės galios kondensatorių vystymas buvo daugiau evoliucinis, nei revoliucinis. Iki 1980 metų, kondensatoriai buvo reikalingi daugiausiai elektromagnetiniams impulsams ir atominių ginklų radiaciniais poveikiams simuliuoti. Mažo energijos tankio kondensatoriai buvo naudojami didelės impulsinės galios sistemose.

9-ojo dešimtmečio pradžioje buvo naudojami 50 kJ, didelės energijos tankio (0,6 J/cc) kondensatoriai, kurių darbinė įtampa buvo 11, 22, 33, 44 ir iki 66 kV. Šių kondensatorių pagrindas buvo didelio tankio Kraft popierius, aliuminio folijos elektrodai ir alyva dielektrikui. 20-ojo amžiaus pradžioje atsirado 100 kJ kondensatoriai, kurių energijos tankis buvo 1 J/cc. Jie turėjo metalinius elektrodus, tačiau jų srovės amplitudė buvo mažesnė, nei kondensatorių su folijos elektrodais, taip pat turėjo didesnę induktyvumą. Bet tokie kondensatoriai buvo gerai pritaikyti naudojimui ten, kur reikėdavo greito išsikrovimo (milisekundinio), bėginiams ginklams ir stroboskopams. Taip pat tokiu pat metu buvo kuriami didelio energijos tankio kondensatoriai, naudojant PVdF dielektrikus. Tokių kondensatorių energijos tankis siekė 2,4 J/cc. Tačiau tokie kondensatoriai buvo brangūs, dėl patiriamų didelių dielektrinių nuostolių, taip pat buvo problemų naudojant greitiems ciklams, tokiais atvejais perduodamas energijos tankis budavo mažesnis.

Didžiausias didelės talpos kondensatorių vystymosi šuolis įvyko 20-ojo amžiaus viduryje, 20-ojo amžiaus pabaigoje. Kalifornijoje Lorencio Livermoro nacionalinėje laboratorijoje buvo kuriama speciali įranga pavadinta „National Ignition Facility“. Įrangai reikėjo 4800 vienetų greito išsikrovimo ciklo, pigių kondensatorių, kurių energija siektų 83 kJ prie 24 kV įtampos. Šie kondensatoriai buvo reikalingi stroboskopams maitinti, kurie buvo naudojami lazeriuose.

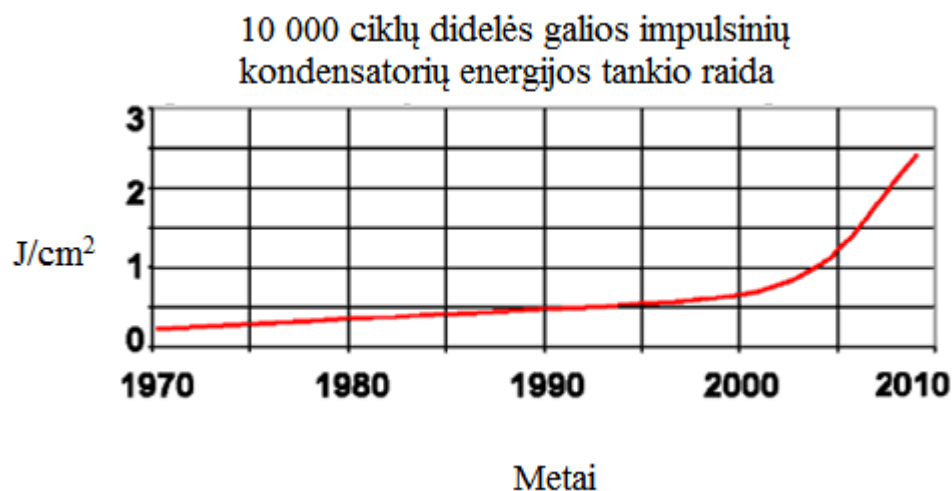
Pastaraisiais metais labai padidėjo susidomėjimas kondensatoriais karinėje pramonėje. 2004 metais buvo pristatyti 100 kJ, 2,2 J/cc kondensatoriai skirti armijos gynybinei programai. Taip pat buvo pagaminti 130 kJ kondensatoriai bėginių ginklų programai, kurių pasikartojimo ciklas 10 000 kartų. Šiais metais pristatytas 250 kJ ir 2,6 J/cc energijos tankio kondensatoriai. Šie kondensatoriai turi mažą sklaidos faktorių ir didelį energetinį naudingumą. Kondensatoriaus savybė „save gydyti“ leido tokį didelį energijos kiekį patalpinti palyginti mažame komponente. 2 paveikslėlyje[3] pateikiami kondensatorių tipai ir jų savybės, bei kada jie buvo sukurti.

Didelės galios milisekundinio išsikrovimo kondensatorių raida

Metai	Aprašymas/Taikymas	Energija, kJ	Energija, kV	En. Tankis J/cc
1990	Pirmasis kondensatorius turintis metalinius elektrodus	86,1	24	0,68
1993	ETC ginklams skirtas kondensatorius	125	16	2,4
2000	Bėginiams ginklams skirtas kondensatorius	130	11,3	1,12
2004	ETI ginklams skirtas kondensatorius	113	6,5	2,38
2005	MJ/4 EM ginklams	293	6,64	2,68

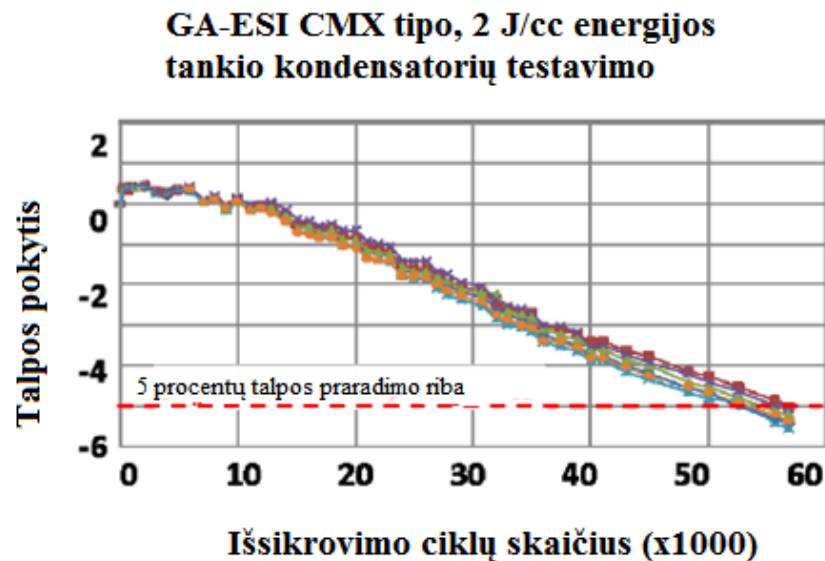
2 pav. Kondensatorių raidos istorija [4]

3 paveikslėlyje [4] pateikiama diagrama, kaip kito kondensatorių energijos tankis per pastaruosius 40 metų. Iš diagramos matyti, kad per pastaruosius 10 metų įvyko didelis progresas, energijos tankis padidėjo 5 kartus. Tai lėmė karinių technologijų vystymas ir kondensatorių poreikis naujoms karinėms technologijoms [3].



3 pav. Didelės galios kondensatorių energijos tankio progresas [4]

Kondensatoriui išsikraunant ir pasikraunant, po tam tikro skaičiaus ciklų, pradeda mažėti kondensatoriaus talpa. 4 paveikslėlyje [4] parodyta, kaip GA-ESI CMX klasės „save gydantys“ kondensatoriai praranda talpą po pasikartojančių ciklų. 5 % talpos praradimas yra ta riba, kai tikėtina, jog kondensatorius neatlaikys ir suges. Iki to momento kondensatorius gali atlaikyti tūkstančius pramušimų.



4 pav. 6 kondensatorių talpos priklausomybė nuo pasikartojimo ciklų skaičiaus [4]

2.2.1 Milisekundinės trukmės išsikrovimo kondensatoriai

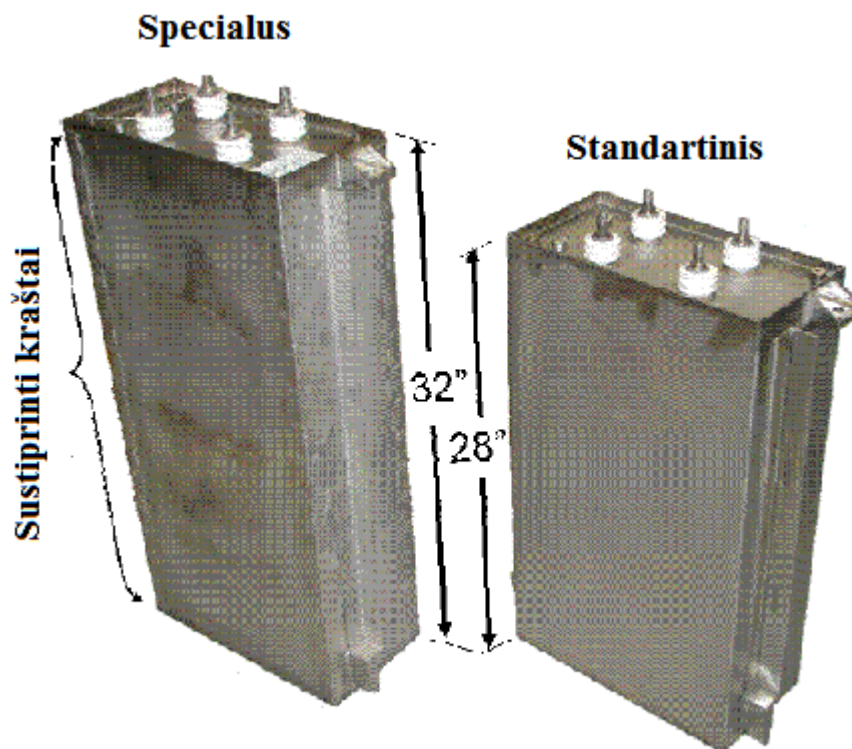
Tokių kondensatorių, naudojamų bėgių tipo svaityklėje, energijos tankis prieš keletą metų buvo 1 J/cm^3 . Dabar gaminama 2 J/cm^3 . Naujausio kondensatoriaus energijos tankis $2,4 \text{ J/cm}^3$. Šios klasės kondensatoriai projektuoti su aukšto naudingumo dielektrikais. Pradedant nuo kambario temperatūros, kondensatorius gali atlikti 200 įkrovimo-iškrovimo ciklus be jokio aušinimo ir nepasiekdamas maksimalios darbinės temperatūros. Šiuos ciklus jis gali atlikti mažiau nei per pusvalandį.

Kondensatorių svoris apskaičiuojamas pagal tai, koks tvirtinimas yra naudojamas. Kariniams taikymams reikalaujama, kad kondensatorius dirbtų prie 80 g smūginės apkrovos. Alyva užpildyti kondensatoriai gerai atlaiko smūgius. Vidinės dalys yra minkštos, tačiau užpildytos dielektriniu skysčiu, kuris praleidžia jėgą per kondensatorių nepažeisdamas dielektrinės medžiagos. Didžiausias rūpestis yra nuolatinės kondensatoriaus dėžės deformacijos ir skysčių ištekėjimas per įvoves. Įvovės įtempimus galima sumažinti su lengva lanksčia jungtimi. Su kondensatoriaus dėže yra kitas reikalas.

Abu kondensatoriai parodyti 5 paveikslėlyje [5] yra atsparūs 80 g smūginei apkrovai. Kondensatorius dešinėje yra standartinės konstrukcijos kondensatorius. Tam, kad atlaikytų didesnes apkrovas, kondensatorius kairėje yra sustiprintas ir todėl yra ilgesnis. Keturiomis ilgais plieniniais kampais buvo sustiprinta konstrukcija, todėl svoris padidėjo 4 %.

5 paveikslėlyje matyti, kokio dydžio kondensatorius gali būti prieš sustiprinant jį, norint atitikti 80 g smūginių apkrovų reikalavimą. Vienas kondensatorius gali sukaupti iki 0,25 MJ

energijos . $2,4 \text{ J/cm}^3$ kondensatorius galintis sukaupti 0,25 MJ energijos yra 50% didesnis, negu kondensatorius pavaizduotas 5 paveikslėlyje [5] kairėje. Taip pat jam reikia specialaus sustiprinimo.



5 pav. Standartinis ir sustiprintas kondensatoriai

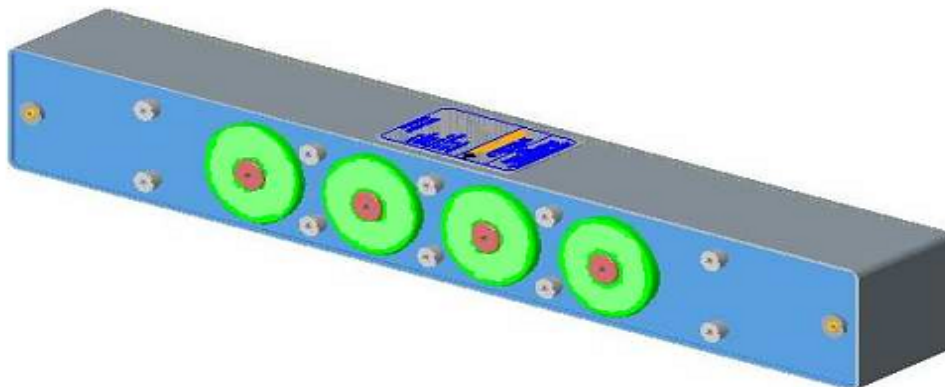
2.2.2 Mikrosekundinio išsikrovimo kondensatoriai

Šios klasės kondensatoriai naudojami, kai reikia greito atidarymo arba uždarymo. Didesnio dažnio milisekundinės klasės kondensatoriai naudojami, norint suformuoti kvadratinės plačios bangos viršutinius kampus. Paprastai energijos tankis, pasiekiamas su greitesniais kondensatoriais yra 80 % lėtesnio milisekundinio išsikrovimo kondensatoriaus.

Kitiems pritaikymams, reikalaujama, kad kondensatoriaus konstrukcija leistų išlaikyti energiją iki kelių savaičių. Šio tipo kondensatorių gyvavimo trukmė buvo ženkliai padidinta per pastaruosius ketverius metus. Kondensatorių formos stipriai skiriasi, tačiau visi jie turi susikertančias stačiakampes sekcijas.

Kad veiktų tinkamai, mikrosekundinio išsikrovimo kondensatoriai turi turėti mažą induktyvumą. Didesnių kondensatorių reikalavimuose dažnai reikalaujama, kad būtų naudojami keli kondensatoriai tam, kad induktyvumas atitiktų sistemos induktyvumą. Kitas būdas atlikti tai, naudoti kelis srovės kanalus, kuriems reikia įvorių kondensatoriuose. Tai buvo atlikta mikrosekundinio išsikrovimo kondensatoriuje, parodytame 6 paveikslėlyje [5]. Ta pati technika yra

panaudota, norint sumažinti induktyvumą, kondensatoriuose parodytuose 5 paveikslėlyje.



6 pav. Tipinis mikrosekundinio išsikrovimo kondensatorius

2.2.3 Sub mikrosekundiniai kondensatoriai

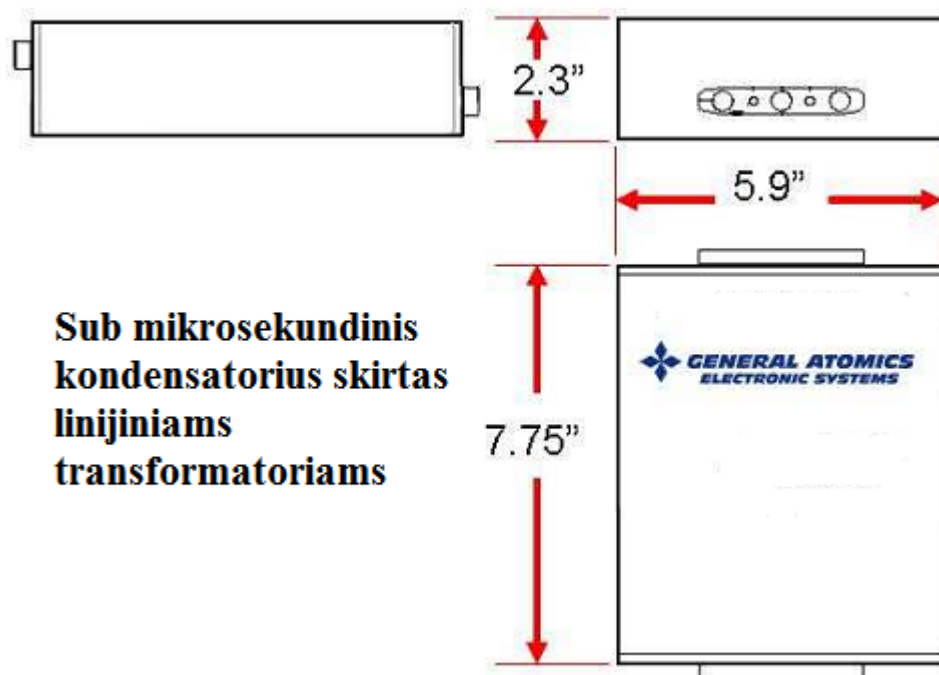
Milisekundinio ir mikrosekundinio išsikrovimo kondensatorių vystymo sėkmė leido pasistūmėti dar toliau. Dabar sutelkiamas dėmesys į sub mikrosekundinius kondensatorius.

Įprastai, kondensatorių, pagamintų tokiam laiko režimui, gyvavimo trukmė yra milijonai arba milijardai įkrovimo išsikrovimo ciklų. Kondensatoriai naudojami greitintuvuose, kur jie dirba nuolat išsikraudami kilohercų dažniu. Jie sukaupia labai mažą energijos tankį, nes turi atlaikyti labai daug ciklų ir veikti ilgą laiką. Tokio kondensatoriaus pavyzdys parodytas 7 paveikslėlyje [5]. Šis kondensatorius sukurtas intensyviai naudojimui, jo parametrai:

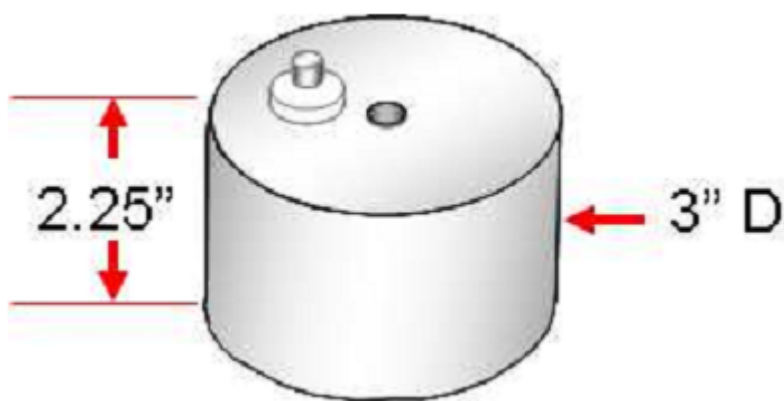
- 100 kV kintama darbinė įtampa
- 0,04 μF +/- 10 %
- 0,1 J/cc energijos tankis
- 50000 įkrovimo išsikrovimo ciklų
- 90 % patikimumas

Kariniai reikalavimai iki-mikrosekundiniams kondensatoriams yra įvairūs. Nuo vieno ciklo ar kelių ciklų iki kelių šimtų ciklų. Jie kuriami, kad tilptų į specifinę įrangą, bei atitiktų labai griežtus išmatavimo reikalavimus. Dažniausia reikalaujama forma yra apvalūs arba keturkampiai cilindrai.

Technika, kuri buvo panaudota milisekundinių ir mikrosekundinių kondensatorių savybėms tobulinti, dabar taikoma iki-mikrosekundiniams polimeriniams kondensatoriams. Kondensatoriaus 8 paveikslėlyje [5] energijos tankis padidintas iki 2 J/cc, taikant vieno išsikrovimo ciklą [5].



7 pav. Konvencinis ikimikrosekundinis kondensatorius



8 pav. Ikimikrosekundinis išsikrovimo kondensatorius

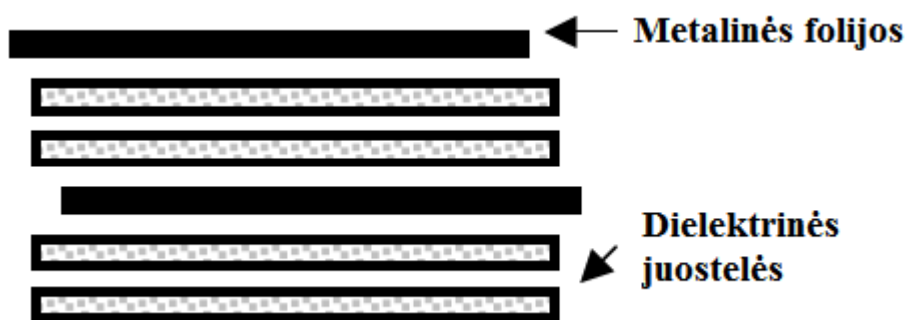
2.2.4 „Save gydančios“ technologijos kondensatoriai

Per pastaruosius 15 metų „save gydantys“ aukštos įtampos kondensatoriai tapo standartine technologija vieno išsikrovimo arba mažo išsikrovimų pasikartojimo skaičiaus įtaisuose (<1 kartas/min.) kaip elektromagnetiniuose paleidėjuose, elektrocheminiuose ginkluose, didelio magnetinio lauko įrangoje. Tokie kondensatoriai gali kaupti didesnę energiją tanki, ilgiau tarnauja ir yra patikimesni.

Standartinis save gydantis kondensatorius turi garais apdorotus metalizuotus elektrodus, turi ribotas galimybes perduoti maksimalius impulsus ir nuolatinės vidutinės kvadratinės srovės. Taip pat jie išskiria daugiau šilumos, negu atskiri kondensatoriai, kuriuose naudojama folija ir turi mažesnę šiluminę laidumą. Dėl šių priežasčių, nebuvo galima taikyti tokių kondensatorių impulsinės technologijos srityje.

Pavyzdžiui, pritaikyti kondensatorių išsikrovimų dažniui didesniau kaip 10 Hz negalima, dėl didelių energijos nuostolių ir prasto terminio laidumo. To pasekoje atsiranda didelis terminis nuolydis ir perkaitimas. Vis dėlto, tokie kondensatoriai yra vis dar gaminami, naudojant atskirus folijinius elektrodus, kurie puikiai praleidžia elektros srovę ir šilumą [6].

Tipinio folijinio kondensatoriaus struktūra pavaizduota 9 paveikslėlyje [6].



9 pav. Tipinio folijinio save gydančio kondensatoriaus struktūrinis pjūvis

Bet kokių atvejų, kondensatorius yra tinkamiausias energijos kaupimo įtaisas impulsinio generatoriaus kūrimui.

2.3 Raktai

Labai didelę svarbą turi srovės komutavimas. Kaip ir energijos kaupimas, taip ir jos prijungimas prie energijos vartotojo yra labai svarbus. Šiuo atveju reikalingas labai greitas ir didelės energijos perjungimas. Įprasti perjungėjai negali to padaryti. Šioje dalyje aptariami įvairūs perjungėjai kaip dujinis kibirkštelis, tranzistorinis raktas ir tiristoriai.

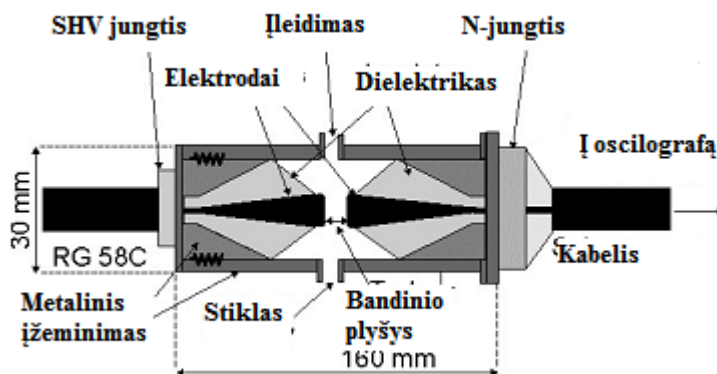
2.3.1 Dujinis kibirkštelis

Dujinis kibirkštelis pavaizduotas 10 paveikslėlyje [7]. Specialioje kameroje yra du arti vienas kito esantys elektrodai. Didinant įtampą tarp elektrodų, oro tarpas tarp jų jonizuojasi ir, pasiekus tam tikrą įtampą, įvyksta išlydis ir tokiu būdu prateka srovė. Norint keisti pramušimo įtampos dydį, galima reguliuoti atstumą tarp elektrodų. Tačiau efektyvesnis būdas yra prileisti į

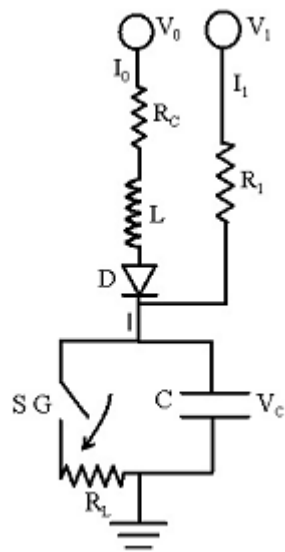
kamerą dujų ir pakelti joje slėgį. Kuo didesnis slėgis kameroje, tuo sunkiau jonizuojamas oras tarp elektrodų ir tuo didesnė išlydžio įtampa.

Didelio slėgio dujiniai kibirkštiniai plačiausiai naudojami įtaisai impulsinės galios srityje. Jie turi daug teigiamų savybių, tokių kaip patikimumas, platų įtampos ir srovės diapazonas, labai mažas perduodamos įtampos kritimas, trumpas impulso kilimo laikas. Vis dėlto, po išlydžio, kurį laiką lieka jonizuotų oro dalelių, galinčių nešti krūvininkus. Todėl yra apribotas dujinių kibirkštinių impulsų pasikartojimo dažnis iki kelių šimtų hercų. Vienas iš krūvininkų šalinimo būdų yra nuolatinė įleidžiamų dujų kaita. Ligšiol skelbtuose darbuose buvo pristatomi kibirkštiniai su kelių kilohercų impulsų pasikartojimo dažniu net naudojant priverstinius dujų srautus, korona stabilizavimą ir aukšto slėgio vandenilio dujas. Niurnbergo universiteto mokslininkais kartu su partneriais iš kitų šalių atliko tyrimus, atliktami iškrovimus labai mažu 100μm atstumu. Plazmos, kaip perjungimo priemonė, trumpame elektrodų pliūsyje arba mikroplazmos nereikalauja daug energijos iš energijos šaltinio [7].

10 paveikslėlyje [7] parodytas instituto sukonstruotas 50 omų koksialinė kibirkštinio kamera.



10 pav. 50 omų koksialinė kibirkštinio kamera



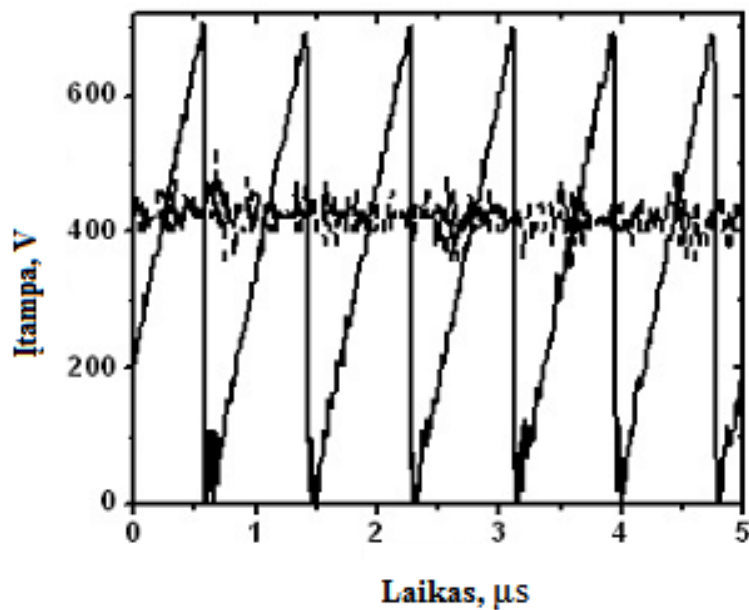
11 pav. Elektrinė kibirkštiklio energijos tiekimo schema

11 paveikslėlyje [7] yra pavaizduota dviguba maitinimo schema.

V_0 yra didysis energijos šaltinis, skirtas pasikartojančių plazmos impulsų formavimui.

V_1 yra mažasis energijos šaltinis, skirtas įjungti arba išjungti kibirkštėlį.

12 paveikslėlyje [7] parodyta įtampos nuo laiko charakteristika. Pjūklinės formos kreivės, tai įtampos šuoliai, įkraunant ir iškraunant šaltinį labai dideliu dažniu. Taškine linija atvaizduota įtampa tarp R_C ir L .

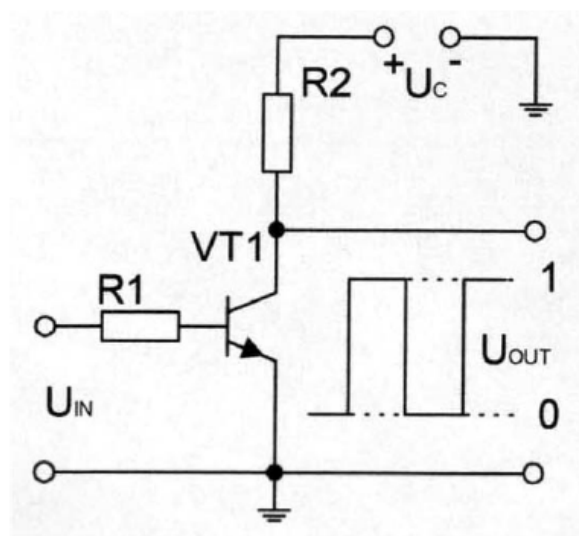


12 pav. Įtampos nuo laiko charakteristika

Matome, kad energiją galima perduoti per labai mažą laiko tarpą-nanosekundiniame intervale. Tai labai puikus rodiklis impulsinio generatoriaus konstravime.

2.3.2. Tranzistorinis raktas

Skaitmeninėje technikoje naudojami elektroniniai tranzistoriniai jungikliai, jų veikimo sparta ir kiti parametrai yra aukštesni nei mechaninių.



13 pav. Tranzistorinis jungiklis

Paprasčiausias elektroninis jungiklis yra tranzistorinis jungiklis. Supaprastinta tokio jungiklio elektros schema parodyta 13 paveikslėlyje [8]. Jo elektros schema analogiška bendro emiterio stiprinimo pakopos schemai. Tranzistoriniam jungikliui būdingi du darbo režimai: atkirtos ir soties. Stiprinimo režime tranzistorius dirba tik perjungimo metu. Loginis 1 formuojamas, kai elektroninis jungiklis atjungtas, t.y. tranzistoriui dirbant atkirtos režime. Tuomet jo abi pn sandūros uždarytos, tranzistoriaus varža yra didžiausia ir siekia megaomus [8].

Su tranzistoriniu raktu galima tiksliai valdyti statumą, tačiau negalima komutuoti didelių srovių. Didelės srovės yra viena iš esminių didelės galios impulsinio generatoriaus savybių.

2.3.3. Tiristoriai

Impulsinės galios technologija apima fiziką ir inžineriją, kur reikalingi greiti didelės galios impulsai, tokiuose įtaisuose kaip dalelių greitintuvai, plazmos šaltiniai, impulsiniai dujų lazeriai, trumpabangiai šviesos šaltiniai ir taip toliau. Perjungimo įtaisai, kurie gali kontroliuoti

didelės įtampas ir didelės srovės, labai svarbūs ir duoda didelį efektą impulsiniuose generatoriuose. Aukštos įtampos ir didelės srovės perjungimuose, dujiniai kibirkštiniai ar vandeniliniai tiratronai buvo dažnai naudojami. Dujinis kibirkštinis jungiklis gali uždaryti grandinę nanosekundiniame intervale. Suspaustas dujinis kibirkštinis naudojamas didesnėms įtampoms perjungti. Tačiau tokio jungiklio gyvavimo laikas yra limituotas, nes didelės išsikrovimo srovės sukelia elektrodų eroziją. Didelės galios jungikliai yra klasifikuojami į uždarančiuosius ir atidarančiuosius. Greito uždarymo jungikliams yra svarbu generuoti gretus arba labai trumpo pločio impulsus. Atidarantieji jungikliai naudojami induktyvinę energiją talpinančiuose impulsiniuose generatoriuose, kur iškraunamos srovės turi būti perkeltos į kitas grandines. Tokio jungiklio pagalba lengvai gaunami kvadratiniai impulsai. Taip pat iškrovimo tipo jungikliai gali greitai uždaryti grandinę, tačiau jiems gana sunku atidaryti ją. Galios puslaidininkiniai įtaisai daugiau naudojami pramoninėje impulsinės galios srityje. Taip pat galios įtaisai buvo sukurti galios elektronikai todėl, kad turi puikią išjungimo charakteristiką. Greitos išjungimo charakteristikos taip pat yra reikalingos [9].

2.3.4 Galios puslaidininkiniai įtaisai greitam didelės galios perjungimui

Galios puslaidininkiniai įtaisai yra kompaktiški, ilgaamžiai, nereikalaujantys priežiūros. Didelės galios perjungimo galimybė priklauso nuo įtaiso charakteristikų, tokių kaip, maksimali srovė, įtampos atlaikymas, jungimo greitis ir perjungimo galios nuostoliai. Galios įtaisai įgalina impulsinį generatorių dirbti didelį pasikartojimų skaičių. Generatoriaus sistemų patikimumas ir efektyvumas milžiniškai pagerėja. Pirmas prietaiso, skirto impulsinei galiai, vystymo tikslas yra pasiekti aukštą srovės augimą, tokį kaip dujinių kibirkštinių jungiklių, apie 10^{12} A/s.

Yra keletas puslaidininkinių prietaisų galinčių atlikti didelės galios perjungimą. Nešėjų išsikrovimo sluoksnių SI-tranzistoriai ir SI-tiristoriai. IGBT, IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor), MOSFET ir MAGT (Mos Assisted Gate-triggered Thyristor) turi MOS vartų struktūrą. Lavinos efektas yra taikomas RSD (Reversely Switched Dynistor) ir FID (Fast Ionization Dynistor). Nešėjų sukūrimui naudojama fotonų energija daudojama fototrigeriniuose tiristoriuose ir fotolaidžiuose puslaidininkiniuose jungikliuose. Sandūros tipo prietaisuose atlaikoma įtampa yra nuo 4000 iki 6500 kV ir maksimali srovė yra mažiau kaip 50 kA. Todėl jie yra jungiami nuosekliai tam, kad pasiekti didesnę darbinę įtampą ir jungiami lygiagrečiai, kad gauti didesnę srovės impulsą. Įtampa didesnė nei 10 kV labai tikėtina naudojant dujinius lazerius ir plazminius šaltinius. Tam, kad gauti didesnę pramušimo įtampą, pagrindinis sluoksnis turi būti plonesnis. Todėl įjungimo laikas tampa ilgesnis. Egzistuoja kompromisas tarp prietaiso specifikacijų ir perjungimo galimybių.

Kai prietaisas naudojamas didelės galios impulsiniuose generatoriuose, jis dirba ekstremaliomis sąlygomis. Prietaisas turi būti sukonstruotas kruopščiai pagal to aparato, kuriame bus naudojamas, techninius duomenis. Charakteristiniai duomenys, gaunami naudojant prietaisą galios elektroonikoje, nėra patikimi, kadangi naudojimo sąlygos nėra tokios kritinės kaip impulsinės galios sistemose. Sumažinimas perjungimo galios nuostolių visada reikalauja generatoriaus naudingumo koeficiento ir aušinimo sistemos galios apskaičiavimo. Degradacija ir jos mechanizmas elektros prietaisuose, kurie nėra gerai žinomi, privalo būti patikrinti su didelio elektromagnetinio lauko įranga. Elektrinis pramušimas taip pat yra rimta problema konstruojant ir gaminant elektros įtaisus, turinčius didelę pramušimo įtampą. Stiprus aukštos įtampos impulsas kartais gali sunaikinti puslaidininkinį įtaisą. Taip pat reikia atkreipti dėmesį į mechaninius įtempimus, ypač esant ilgai impulso trukmei arba ypač didelei srovei [9].

Modernizuojant tiristorinį jungiklį reikia spręsti tiristorių lygiagreto jungimo problemą bei nagrinėti tiristorių charakteristikų įtaką bendrai komutuojamai srovei ir sinchronizavimo tikslumui. Šuntuojančios RC grandinės žymiai padidina energijos nuostolius tiristoriuose ir mažina jų dinaminį termostabilumą. RC grandinės apsaugo nuo impulsinių perkrovų perjungimo metu, bet kartu sulėtina iškrovimo procesą.

2.4. Ritės

Neseniai Europos mokslininkai ir inžinieriai įdėjo dideles pastangas, norėdami pasiekti progresą impulsinio magnetinio lauko srityje. Viena iš jų užduočių – sukonstruoti nesunaikinamą 100 T magnetą turintį ilgą impulso trukmę. Šie darbai buvo finansuojami Europos Sąjungos. Šių darbų rezultatas yra 80 T impulsinio magneto tinkamo moksliniams eksperimentams sukūrimas. Laboratorijos Grenoble, Tulūzoje, Amsterdame, Oksforde, Berlyne vysto impulsinio magnetinio lauko generavimo įrangos tobulinimą.

Vieni iš ateities planų impulsinio magnetinio lauko srityje, tai įrangos skirtos šiam laukui generuoti, bei jos komponentų mažinimas. Didesni laukai sukuria mažos trukmės impulsus mažame skersmenyje. Tyrejai deda pastangas, kad sumažintų experimentinės įrangos dydį ir pritaikyti ją mažesnės trukmės impulsam ir mažesnei energijai. Dėka šių pastangų, impulsinės energijos įranga tapo prieinama platesnei mokslinei visuomenei.

Yra 2 būdai, kaip generuoti magnetinius laukus. Vienu atveju magnetinis laukas nesunaikina induktoriaus, kitu atveju magnetinis laukas visiškai arba dalinai suardo konstrukciją.

Bet kokių atveju, generavimas didelio magnetinio lauko iššaukia sunkias technines problemas. Tai yra, Jaulio kaitinimas sunaikina induktorių, taip pat turima atsižvelgti į mechanines ir elektrines perkrovas

Iškrovimas kondensatorių baterijos per induktorių ir per trumpą laiko periodą sukelia adiabatinių vijų kaitimą ir labai stiprius mechaninius įtempimus. 100 T magnetinis laukas sukuria apie 4 GPa ašinius įtempimus daugelio induktorių optimalius įtempimus kelis kartus. Iš varinių vijų pagamintos ritės be specialaus sustiprinimo gali generuoti impulsinį lauką tik iki 20 T. Induktoriai yra kolkas labiausiai komplikuoti didelių magnetinių laukų generavimo įrangos dalis. Bet kokia nereikšminga klaida induktoriaus konstrukcijoje sukelia drastines nesėkmes, atliekant impulsinio magnetinio lauko eksperimentą. Todėl reikalinga išsami induktoriaus analizė [1].

2.4.1. Vienos vijos induktoriai

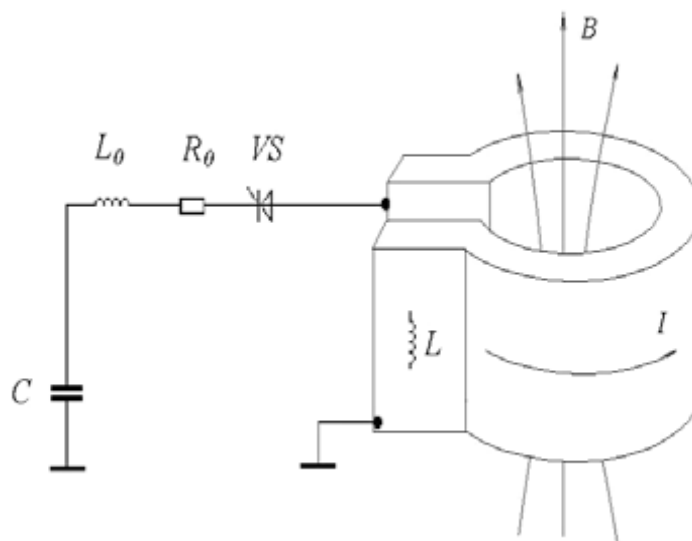
Magnetinis laukas sugeneruotas idealios vienos vijos ritės paskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$B = \mu_0 \times \mu \times H = \mu_0 \times \mu \times \frac{I}{D}, \quad (1)$$

čia μ_0 yra magnetinė konstanta, μ magnetinės skvarbos sritis (dideliems magnetiniams laukams taikoma $\mu=1$), I yra srovė, D yra vienos vijos diametras. Realios vienos vijos ritės turi vidinį ir išorinį diametrą d ir D , atitinkamai ir ašinį aukštį h . Todėl būtina įvesti koeficientą K , kad įvertintume įtaką magnetiniam laukui atsirandančią dėl ritės geometrijos. Daugumoje taikoma formulė:

$$\frac{D}{h} \approx 1, \frac{D}{d} \approx [1,5 - 2], K \approx 0,6. \quad (2)$$

Impulsinio magnetinio lauko generatoriaus schema parodyta 14 paveikslėlyje [1].



14 pav. Impulsinio magnetinio lauko generatoriaus su vienos vijos induktoriumi scheminė diagrama

Energija kaupiama kondensatorių baterijoje C . Vienos vijos induktorius turi induktyvumą L . R_0 ir L_0 yra laidų, talpų ir jungiklio VS varžos ir induktyvumai. Magnetinio lauko impulsas generuojamas iškraunant kondensatorių bateriją per vienos vijos ritę. Energijos balansas randamas pagal formulę:

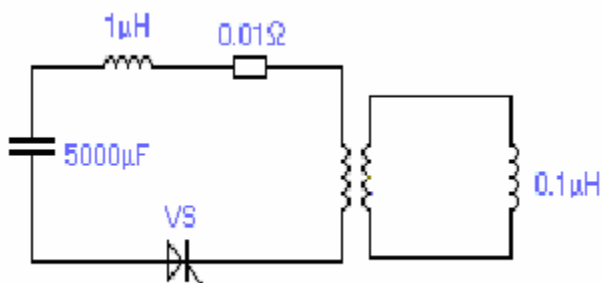
$$\frac{C \times U^2}{2} = \frac{L \times I^2}{2} + \frac{L_0 \times I^2}{2} + I^2 \times R_0 \times t. \quad (3)$$

Optimalus vienos vijos ritės induktyvumas L yra 1 – 10 nH. Efektyvus energijos transformavimas stipriai priklauso nuo elektrinės grandinės aktyviųjų ir reaktyviųjų nuostolių. Nuostoliai susiję su induktyvumu L_0 yra pagrindinė techninė problema, kadangi sunku pasiekti induktyvumą L_0 mažesnę negu 1 nH. Tai reiškia, kad efektyvumas abiejų aprašytų metodų yra geriausiu atveju apie 50 % ir apie 20 % įprastinėmis sąlygomis. Kita techninė problema yra labai didelė laiko kilimo vertė ir srovės impulso amplitudė. Trumpas kilimo laikas reikalauja tikslaus jungiklio įjungimo ir duomenų įrašymo įrangos sinchronizacijos. Daugeliu atvejų, impulso kilimo laikas yra 1 – 5 mikrosekundės, darbinė kondensatorių baterijos įtampa yra 20 – 60 kV. Norint sugeneruoti 100 T lauką kelių milimetrų zonoje, reikalinga mažiausiai 500 kA srovė. Magnetinio impulso generavimo metu, ritė veikiama daugiau kaip 4 GPa jėga ir ji yra sunaikinama per kelias mikrosekundes. Esant silpnesniam magnetiniam laukui, radialinė šoko banga stipriai deformuoja viją. Vienos vijos induktoriai impulsinio magnetinio lauko generavimo metu visada yra

sunaikinami. Bet tai yra priimtina tiriant greitus fizikinius procesus. Matavimo įranga registruoja duomenis greičiau nei ritė ir mėginys yra sunaikinami [1].

Generuojant impulsinį magnetinį lauką 100 T ir daugiau, susiduriama su tokiomis problemomis kaip nelinijinis srautų maišymasis, temperatūra ir mechaninės deformacijos. Todėl reikalinga atsargi ir kruopšti analizė įskaitant skaitines simuliacijas ir fizikinius eksperimentus. Kondensatorių talpos optimizavimas, grandinės, jungiklių tobulinimas leidžia gauti magnetinį lauką iki 300 T.

Vienas galimas impulsinio magnetinio lauko generavimo įgyvendinimas per vienos vijos induktorių yra impulsinio transformatoriaus naudojimas (15 pav.) [1].

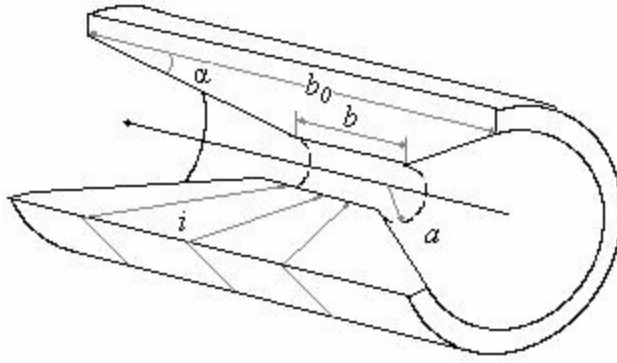


15 pav. Vienos vijos induktorius su transformatoriumi

Impulsinis transformatorius sureguliuoja impulsinio magnetinio lauko induktoriaus induktyvumą. Grandinė tampa mažiau kritinė R_0 ir L_0 . Žymiai didesnis pirminės ritės induktyvumas leidžia gauti didesnę impulso trukmę. Darbinę įtampą galima sumažinti iki 3 – 5 kV ir taip pat galima naudoti puslaidininkinius jungiklius. Tačiau bet kokių atveju transformatorius turi būti naudojamas atsargiai. Didelės galios impulsinio transformatoriaus konstrukcija nėra tradicinė. Tai reiškia, kad transformatoriaus elektriniai ir magnetiniai nuostoliai turi būti įvertinti [1].

2.4.2. Magnetinio srauto konsentratorius

Magnetinio srauto konsentratorius yra vienas iš impulsinių transformatorių modifikacijų (16 pav.) [1].



16 pav. Magnetinio srauto konsentratoriaus veikimo principas

Pirminės apvijos srovė I generuoja magnetinį srautą H . Impulsinio transformatoriaus antrinė apvija pagaminta iš vienalyčio cilindro su centrine skylė ir ašiniu plyšiu. Sukelta srovė teka cilindro paviršiumi ir neprasiskverbia į konduktoriaus tūrį [1]. Jei paviršiaus sluoksnis yra nežymus lyginant su vidinės skylės ir plyšio matmenimis, magnetinis srautas gali būti sukoncentruotas vidinėje skylėje. Reaktyvioji srauto konsentratoriaus varža turi būti didesnė negu aktyvioji ir yra nustatoma iš lygties:

$$\begin{cases} R' = R_1 + (R_2 + R_3) \times n^2 [(k \times l - m) / (l + 1 - 2 \times m)]^2, \\ L' = n^2 \times L_3 [l - (k \times l - m)^2 / (l + 1 - 2 \times m)], \end{cases} \quad (4)$$

čia R_1, R_2, R_3 ir L_1, L_2, L_3 yra pirminės, antrinės apvijų ir vidinės skylės varžos ir induktyvumai. Atitinkamai M_{12}, M_{13} yra bendras induktyvumas,

$$k = \left(\frac{M_{12}^2}{L_1 \times L_2} \right)^2, l = \frac{L_2}{L_3} = \frac{L_1}{n^2 \times L_3}, m = \frac{M_{23}}{L_3} = \frac{M_{13}}{nL_3}, k \approx 1. \quad (5)$$

Magnetinė energija E_L , nuostoliai E_R ir naudingumas ε gali būti apskaičiuojami pagal formulę:

$$\begin{cases} E_R = (\pi \times R' / 4 \times \omega) \times i_1^2, \\ E_L = \frac{1}{2} L' \times i_1^2, \\ \varepsilon = \frac{1}{2} \times L_3 \times i_2^2 / \frac{1}{2} \times L' \times i_1^2 = (k \times l - m)^2 / (l + 1 - 2 \times m), \\ [l \times (l + 1 - 2 \times m) - (k \times l - m)^2]. \end{cases} \quad (6)$$

Jeigu konsentratorius turi kūginę vidinę skylę, tai efektyvumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\varepsilon' = \varepsilon \{b_0 / [b + a \times \sin \alpha / (1 - \cos \alpha)]\}, \quad (7)$$

čia a yra skylės skersmuo, b yra stipraus lauko zonos plotis, b_0 yra bendras konsentratoriaus plotis.

Maksimalus naudingumas yra apie 0,3, kai kūgio kampas yra 45° . Tai reiškia, kad geriausiu atveju 30 % elektros energijos bus paversta į magnetinę. Atsižvelgus į visus faktorius, magnetinio srauto konsentratoriaus efektyvumas gali būti apie 25 %. 17 paveikslėlyje [1] yra parodytas konsentratorius ir impulsinis transformatorius.



17 pav. Impulsinis transformatorius ir magnetinio srauto konsentratorius

Magnetinio srauto konsentratorius maitinamas 10 kJ energijos talpa. Maksimalus sukuriamas impulsinis magnetinis laukas 20 T. Vienas iš magnetinio srauto konsentratoriaus privalumų yra greitas induktoriaus pakeitimas eksperimento metu. Konsentratorius yra mechaniškai daug stabilesnis negu ritė.

2.4.3. *Helix* tipo induktorius

Tokio tipo induktoriaus vijų plotis yra kelis kartus didesnis, nei jų storis. Induktorius gaminamas iš vario-berilio, plieno ir kitų lydinių.

Helix induktorius gali būti taikomas impulsiniams magnetiniams laukams iki 60 – 70 T (18 pav.). *Helix* gali būti pagamintas iš tokių mechaniškai tvirtų medžiagų kaip vario – berilio lydinio, plieno ir kitų. Pagrindinis tokių induktorių privalumas yra didelių mechaninių jėgų atlaikymas ir galimybė gerai aušinti su skystu azotu. Lyginant su vienos vijos ritės konstrukcija,

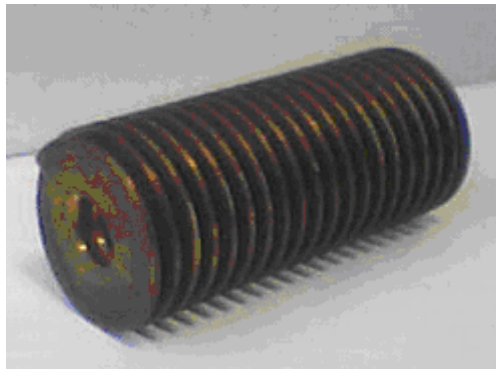
helix turi didesnę induktyvumą ir didesnę lauko vientisumą. Magnetinio lauko impulso trukmė gali būti padidinta iki 100 – 200 μ s. Srovės pasiskirstymas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$j = j_0 \times \frac{a}{r}, \quad (8)$$

čia

$$j_0 = \frac{I \times N}{a \times h \times \ln(b/a)} \quad (9)$$

yra pradinis srovės tankis, I yra srovė, N yra vijų skaičius, a , b , h yra vidinis, išorinis skersmuo ir ašinis ilgis.



18 pav. Helix induktorius

Magnetinis laukas *helix* centre yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$B = B_0 \times \frac{1}{\ln(b/a)} \times f \times \ln \left[\frac{b}{a} \times \frac{1 + \sqrt{(2 \times a/h)^2 + 1}}{1 + \sqrt{(2 \times b/h)^2 + 1}} \right], \quad (10)$$

čia

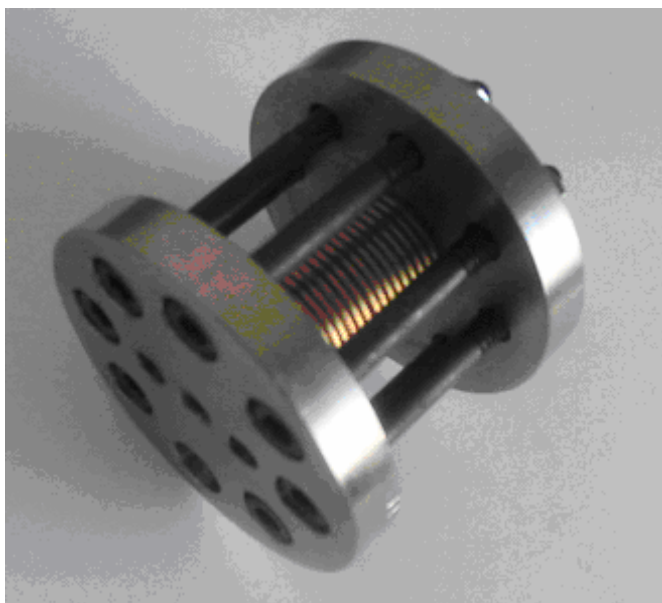
$$B_0 = \mu_0 \times \frac{I \times N}{h} \quad (11)$$

pradinis magnetis laukas,

$$f = \mu_0 \times \frac{N_s}{h \times (b - a)} \quad (12)$$

yra vijų tankis.

Helix induktoriai jungiami su kondensatoriaus talpa taip pat kaip ir vienos vijos ritė. *Helix* turi būti sustiprintas kad būtų išvengta sunaikinimo. Pilnai surinkta *helix* induktoriaus konstrukcija pavaizduota 19 paveikslėlyje [1].



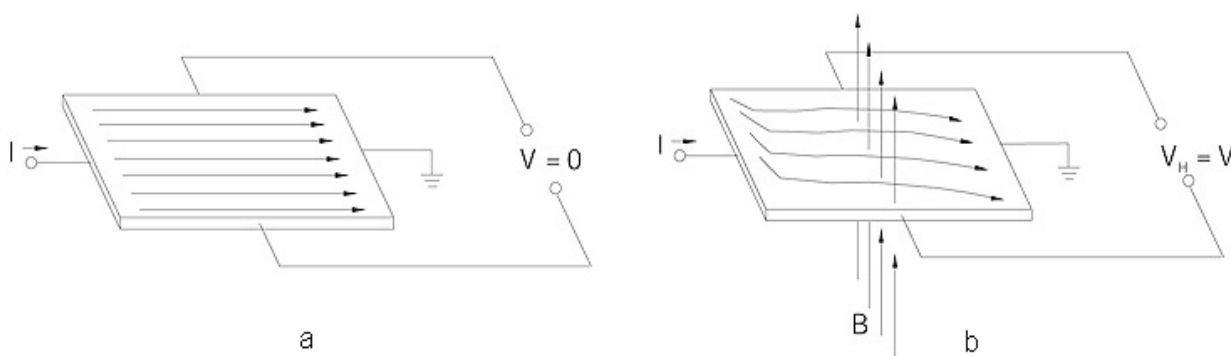
19 pav. *Helix* induktoriaus konstrukcija

3. Magnetinio lauko matavimo metodai

Magnetinį lauką galima matuoti įvairiais būdais. Svarbu pasirinkti tinkamą būdą, kad jutikliu gauti duomenys, būtų kuo tikslesni.

3.1. *Holo* jutikliai

Holo efektas – magnetiniame lauke esančiame laidininke, kuriuo teka elektros srovė, susidaręs potencialų skirtumas. Šis potencialų skirtumas susidaro tarp sienelių, lygiagrečių srovės tekėjimo kryptiai [10].



20 pav. *Holo* efekto principas: a) kai nėra magnetinio lauko ; b) kai yra magnetinis laukas

Elektros srovei tekant laidininku, esančiu magnetiniame lauke, ją sudarantys krūvininkai veikiami *Lorenco* jėga. Jeigu magnetinio lauko nebūtų, krūvininkai laidininku keliautų tiesia linija, tačiau *Lorenco* jėga nukreipia juos kurio nors laidininko krašto link. Dėl to krūvininkai pasislenka vieno krašto link ir šitaip laidininke susidaro netolygus krūvių pasiskirstymas. Viename iš kraštų elektronų yra daugiau negu kitame krašte, tad tarp priešingų laidininko kraštų susidaro potencialų skirtumas.

Didžiausias potencialų skirtumas būna tada, kai laidininkas į magnetinio lauko jėgų linijas atsisukęs statmenai. Jei laidininkas orientuotas lygiagrečiai magnetinio lauko jėgų linijoms, tai potencialų skirtumas nesusidaro (kaip būtų ir tuo atveju, jei magnetinio lauko nebūtų apskritai).

$$U_h = R_h \times \frac{I \times B}{d} ; \quad (13)$$

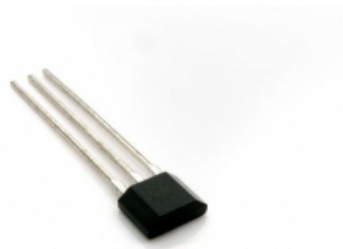
R_h – proporcingumo koeficientas;

I – laidininku tekančios srovės stipris;

B – magnetinio lauko indukcija;

d – laidininko skersmuo.

Holo jutiklis, tai prietaisas, kuris reaguoja į magnetinį lauką, jo išėjimo signalas yra įtampa proporcinga magnetinio lauko dydžiui. *Holo* jutiklio pavyzdys 21 paveikslėlyje [10].



21 pav. *Holo* jutiklis

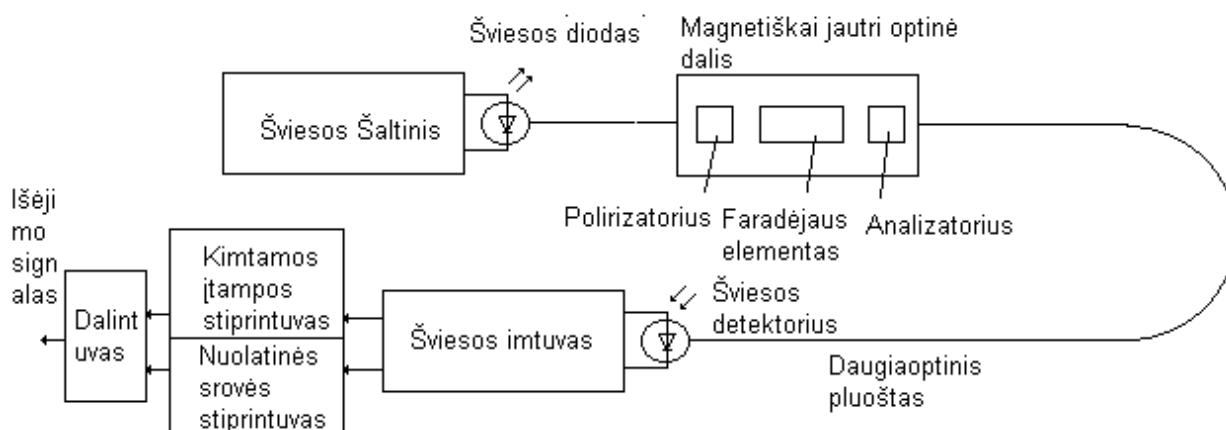
3.2. Faradėjaus optinis metodas

Faradėjaus efektas. Šio efekto esmė yra ta, kad veikiant magnetiniam laukui, jėgos vektoriaus kryptis supampa su šviesos kryptimi, stebimas poliarizuotos plokštumos pasisukimas pereinant per medžiagą [11]. Faradėjaus pasisukimo kampas ϕ_F prie magnetinio lauko stiprumo H , šviesos kelio ilgyje L išreiškiamas taip:

$$\Phi_F = V_0 \times H \times L, \quad (14)$$

čia dydis V_r pastovus, charakterizuoja *Faradėjaus* efekto aktyvumo duotai medžiagai.

22 paveiksle pavaizduota magnetinio lauko jutiklio struktūrinė schema. Šviesos spinduliai



22 pav. Magnetinio lauko jutiklis *Faradėjaus* efekto pagrindu

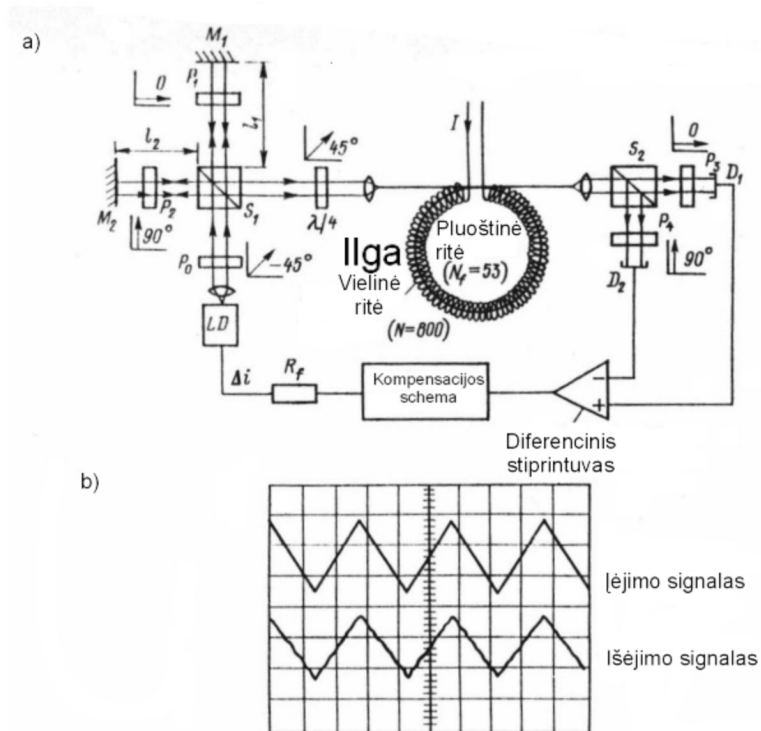
perduodami iš šviesos šaltinio (paprastai šviesos diodo) į sensoriaus šviesai jautrią dalį, daugiaoptinio pluošto pagalba. Šviesai jautrioje dalyje, tiesiškai poliarizuota šviesos banga patenka per poliarizatorių į Faradėjaus elementą, kur veikiant magnetiniam laukui įvyksta poliarizacijos plokštumos pasisukimas. Pasisukimo kampo reikšmė ϕ_F pertvarkoma analizatoriaus į šviesos intensyvumą ir toliau perduodama optiniu pluoštu į šviesos imtuvą. Dar, jei nustatyti 45° kampą tarp poliarizatoriaus ir analizatoriaus, tai šviesos galia detektoriaus paviršiuje (paprastai *pin* – fotodiodo)

$$P = P_0 \times (1 + \sin \phi_F) \quad (15)$$

kur P_0 – Šviesos jėga nesant magnetiniam laukui.

Kaip matyti iš formulės, magnetinį lauką galima išmatuoti detektoriaus elektrinio signalo pagalba. Kompensuoti matuojamo signalo dreifą esant nepastoviam magnetiniam laukui naudojama pertvarkymas “kintama įtampa – nuolatinė įtampa”, o esant pastoviam laukui – dviejų šviesos išėjimo metodą (žr. pav. 22) [11].

Optinis pluoštas gali būti kaip *Faradėjaus* elementas, pavyzdžiui pluoštas iš kvarco, kurio pastovioji Verde $V \approx 0,015^\circ/\text{A}$. Jeigu pagaminti žiedą iš dagybės optinio pluošto suktuku ir užvynioti ant to žiedo vielą (cm., pavyzdžiui, pav. 23 [11]), tai paleidus elektros srovę, galima gauti srovės arba magnetinio lauko daviklį, turinčiam didelį jautrumą.



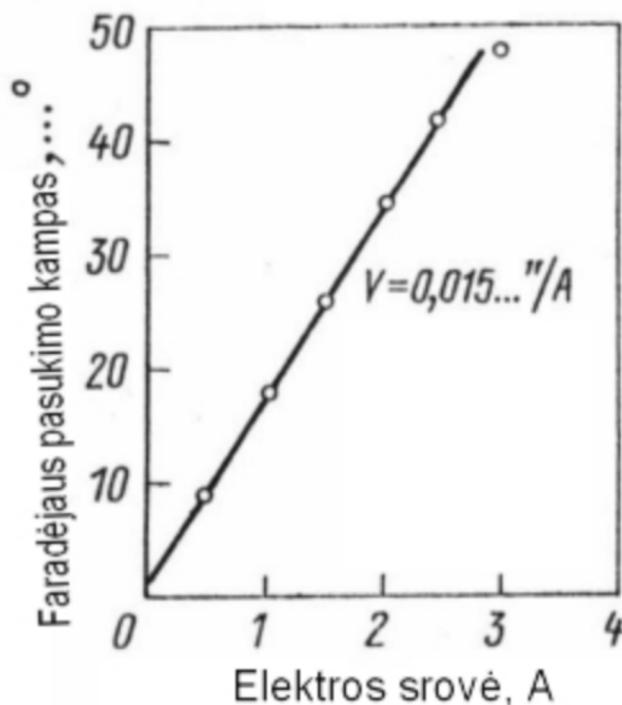
23 pav. Optinis – pluoštinis ampermetras, *Faradėjaus* efekto pagrindu: M – veidrodis; P – poliarizatorius; S – spindulio dalintumas; LD – lazerinis diodas; D – šviesos imtuvas

Taigi poliarizacijos plokštumos sukimo kampas

$$\varphi = V \times N_f \times N_i \times I \quad (16)$$

kur I – elektros srovė; N_f – žiedo suktukų skaičius iš optinio pluošto; N_i – persikirtimų skaičius elektros srovės su pluoštiniais suktukais.

Paprastam vienamodiniam pluoštui būdinga dvigubas spindulio lūžimas, apribojamas kai kurio eliptinio paviršiaus kirtimo. Tai pastebimai sumažina tiesiškumo priklausomumą poliarizacijos pasisukimo plokštumos esant Faradėjaus efektui, ryšiu su kuo yra siūloma optinio pluošto susukimas. Dėka susukimo susilpnėja dvigubas spindulių lūžimas. Esmėje, tai sumažina ryšį tarp bangų su kaire ir dešine žiedine poliarizacija prie turimų fazinių pastoviųjų skirtumų dėl jų. Rezultate galima pasiekti geras tiesiškumo charakteristikas Faradėjaus efektui, tai taip parodyta 24 paveiksle [11].



24 pav. Faradėjaus efekto charakteristika optiniame vienamodiniame pluošte, pagerinta susukimu

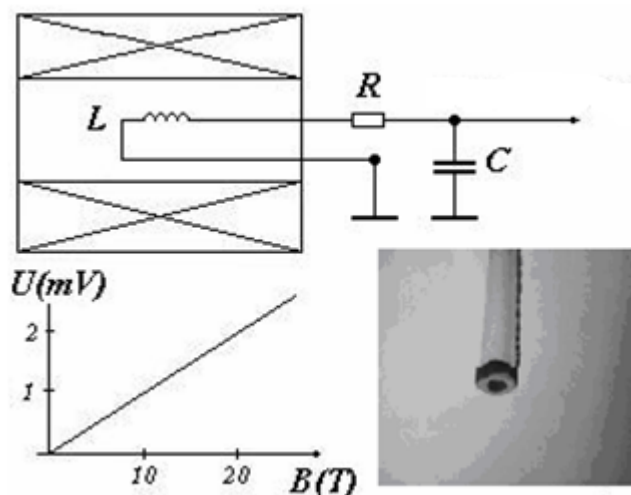
Čia optinis pluoštas buvo susuktas 1224 pad/m; žiedo diametras 8 cm; $N_f = 55$, $N_i = 1250$. Poliarizacijos plokštumos sukimosi kampas nustatoma pagal šviesos intensyvumą, praleidžiamo poliarizatoriaus. Pavaizduota sistema skirta elektros srovės matavimui. Čia įvestas atgalinis ryšys, kuris leidžia neutralizuoti išeinančios šviesos bangos Faradėjaus efektą ir pagal tai koks yra atgalinio ryšio signalas nustatoma srovė reikšmė. Tuo pačiu kompensuojasi sukimosi plokštumos poliarizacijos įėjimo bangą dėka optinės sistemos dalies, sukuriančia šviesos bangą pluošte, o tai pat pusiau pralaidaus lazerio dažninę moduliacijos išspinduliavimą. 4b paveikslo

viršuje yra parodyta pasikeitimas įeinančios elektros srovės, o apačioje daviklio išeinantis signalas [11].

Taip pat yra ištirta struktūra, kuriai neturinti įtakos dvigubas spindulių lūžimas optiniame pluošte. Jos pagrindu yra suprojektuotas ampermetras su padidintu tiesiškumu ir sėkmingu panaudojimu dvigubo spindulių lūžimo optiniame pluošte, su charakteringa poliarizacija [11].

3.3. Kilpiniai jutikliai

Šių jutiklių veikimo principas pagristas tuo, kad magnetinis srautas uždarame kontūre sukuria EVJ kuria yra proporcinga magnetinio srauto išvestinei. Esant pastoviam kontūro plotui šis EVJ yra proporcingas magnetinio lauko išvestinei. Kilpinis jutiklis susideda iš N apvijų kuriu plotas yra S. Paduodant impulsinį magnetinį lauką jutiklio išėjime gauname įtampą proporcingą šiuo impulso išvestinei. Norint gauti tikrą magnetinio lauko formą (magnetinio lauko pokytis nuo laiko) šį signalą reikia suintegruoti. Yra du integravimo būdai: pirmas yra integravimas naudojant kompiuterį; antras – integravimas naudojant pasyvinį integratorių. 25 paveikslyje [10] pavaizduota tokia matavimo schema naudojant pasyvų integratorių. Šis integratorius susideda iš RC grandinės.



25 pav. Kilpinio jutiklio su pasyviųjų integratorių matavimo schema

Integratoriaus išėjimo signalas skaičiuojamas pagal formulę:

$$U_{out} = \frac{1}{R \times C} \int_0^{t_1} U_{in}(t) \exp\left(-\frac{\tau - t}{R \times C}\right) dt \quad (16)$$

Integratoriaus konstanta $RC \gg t$, čia t yra impulso trukmė, integratoriaus išėjimo signalas yra proporcingas magnetinio lauko indukcijai :

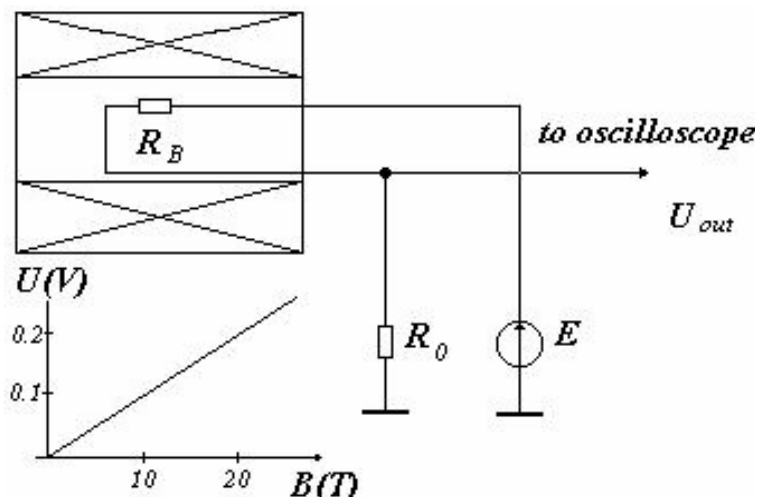
$$B = \frac{U \times R \times C}{N \times S} \quad (17)$$

čia U yra integratoriaus išėjimo signalas, RC integratoriaus konstanta, N yra vijų skaičius su skerspjūvio plotu S . Ašinio magnetinio lauko pasiskirstymas matuojamas įkišant indukcinį jutiklį išilgai ritės ašies.

Skirtumas tarp eksperimentinių duomenų ir skaičiavimų siekia tik 2 – 3 procentus. Tai reiškia, kad matematinis modelis atitinka eksperimentinius rezultatus. Todėl matavimo metodas naudojant indukcinį jutiklį yra pakankamo tikslumo įvairiems eksperimentams atlikti. Tačiau induktyvinį jutiklį labai teisingai įstatyti. Magnetinio srauto linijos neturi laidininko kirsti 90 laipsnių kampu, nes tada išėjime gausime 0. Tokiu atveju gali atsirasti drastiškų klaidų matavimo rezultatuose [10].

3.4. Magnetovaržiniai jutikliai

Didelės magnetovaržos fenomenas La-Ca-Mn-O medžiagoje gali būti panaudojamas magnetinių laukų jutiklių vystyme. 26 pavyzdyje [10] parodyta schema tokio jutiklio, kuriame panaudotas toks medžiagos tipas.



26 pav. Varžinio jutiklio schema

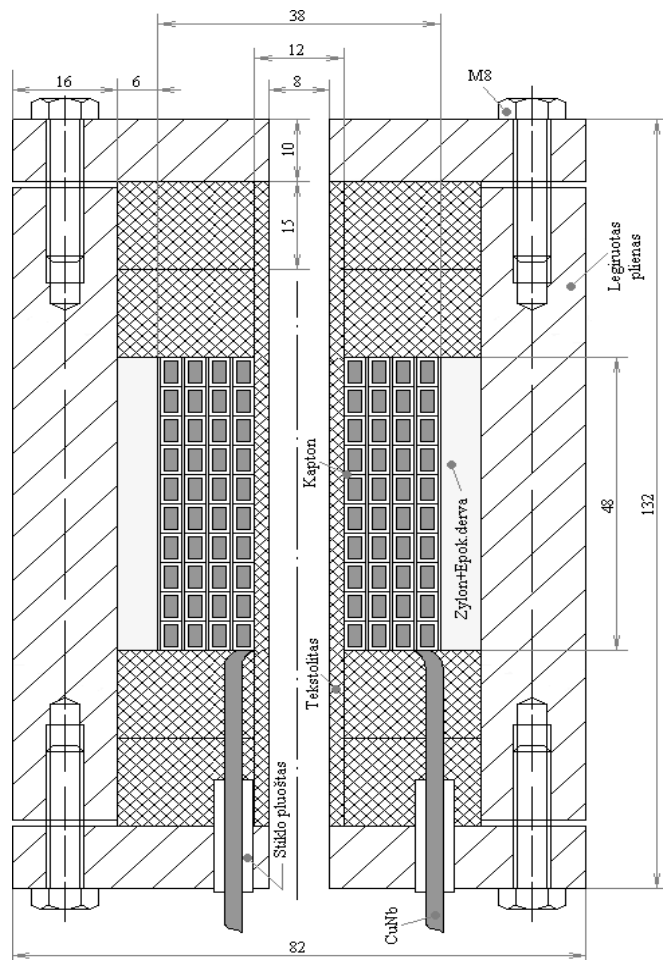
4. Eksperimentas

Norint gauti norimo dydžio ir trukmės impulsinį magnetinį lauką, reikia turėti tokią įrangą, kuri galėtų šį lauką sukurti ne vieną, o daug kartų. Taip pat svarbu turėti patikimą matavimo įrangą. Tik patikimos ir tikslios matavimo įrangos dėka, bus galima teisingai apdoroti duomenis ir padaryti tiksliai ir teisingas išvadas.

4.1. Įranga

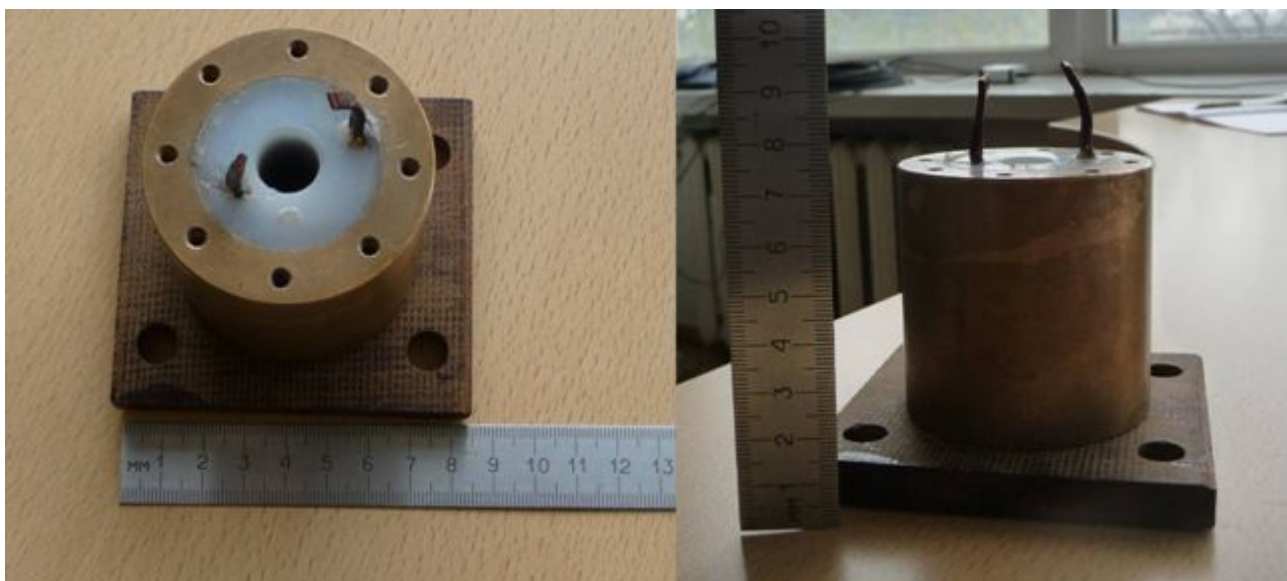
4.1.1 Induktorius

Buvo parinktas induktoriaus prototipas (n_1, n_2), kurio kiaurymės skerspjūvis 12 mm, sudarytas iš „C“ tipo vijų skerspjūvių. Tokio induktoriaus skerspjūvio brėžinys pateiktas 27 pav [8]. Induktoriaus apvijos, izoliuotos *Kapton*[□] (su 50 % persidengimu), vyniojamos ant 2 mm sienelės storio tekstolito vamzdelio, kiekvieną sluoksnį sutvirtinant 0,3 mm, o paskutinį – 6 mm *Zylon*[□] su epoksidine derva. Storas išorinio sluoksnio sutvirtinimas konstrukcijai suteikia tvirtumo ir nuo induktoriaus apvijų atitolina 16 mm sienelės storio legiruoto plieno cilindą, kuriame, jei jis arti, dėl indukcinio srovių ir jų kuriamo lauko iškraipomas pirminis magnetinis laukas. Induktoriaus šonai uždengiami keliais tekstolito diskais ir 10 mm storio legiruoto plieno diskais, kurie prie plieno konteinerio priveržiami šešiais M8 varžtais iš kiekvienos pusės. Induktoriaus maitinimo gnybtai išvedami per tekstolito diskuose išgręžtas skylės, kurios užpilamos epoksidine derva. Išvedimo per plieno diską vietoje jie papildomai sutvirtinami ir izoliuojami stiklo pluoštu, impregnuotu epoksidine derva. Aprašytojo magneto darbinė kiaurymė yra 8 mm skersmens, bandiniai (ir, jei reikia, spindulys) įvedami per induktoriaus, kuriame nėra induktoriaus gnybtų [12].



27 pav. Impulsinio induktoriaus prototipas

Realus induktorius parodytas 28 paveikslėlyje.



28 pav. Induktorius

4.1.2 Tiristorinis jungiklis

Naujai projektuojamame tiristoriniame jungiklyje bus panaudoti didelės galios PT85QW45 tiristoriai . Vienas toks tiristorius komutuoja iki 90 kA impulsinę srovę bei užtikrina iki 22 kA/ μ s srovės augimo greitį.

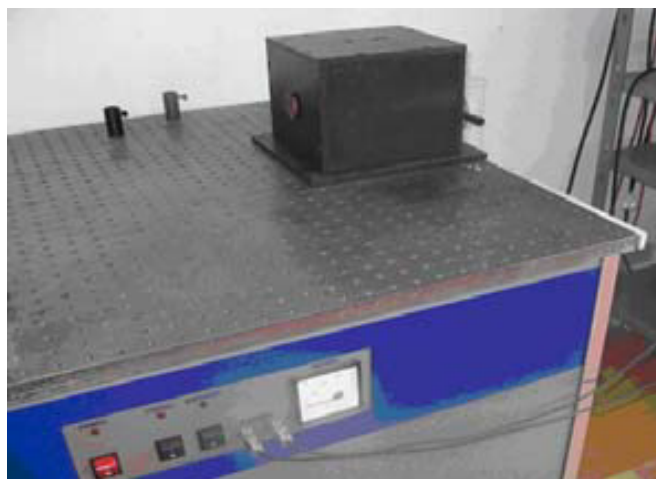
Naujai projektuojamame tiristoriniame jungiklyje buvo atsisakyta lygiagretaus tiristorių jungimo bei apsauginių RC grandinių, nes impulsinio jungiklio eksploataciniai parametrai yra dukart mažesni, nei maksimaliai leidžiami tiristoriaus parametrai. Tokiu būdu, net dirbant „kietu“ režimu be apsauginių grandinių, tiristorinis jungiklis užtikrina patikimą iki 50 kA srovių komutavimą [13].

Tiristorinio jungiklio valdymui buvo panaudotas specialus valdymo impulso formuotuvas su optiniu kanalu

Impulsinio šaltinio valdymo blokas optiškai jungiamas su energijos kaupikliu ir tiristoriniu jungikliu 5 metrų atstumu, panaudojant polimerinius 660 nm šviesolaidžius. Tarp operatoriaus valdymo pulto ir impulsinio šaltinio nėra galvaninio ryšio, tai yra labai svarbu dėl saugumo, turint omenyje, kad impulsinio magnetinio lauko generavimo metu įtampos šuoliai yra apie 4 kV, srovės – iki 50 kA.

Impulsinis šaltinis turi funkcionuoti su aktyviojo-induktyviojo pobūdžio apkrova – impulsine rite. Jos apvijos buvo izoliuotos ir armuotos stiklo pluoštu, impregnuotu epoksidiniu mišiniu. Daugiasluoksnė kelių sekcijų induktoriaus konstrukcija pasižymi gerais energetiniais parametrais, mechaniniu stabilumu bei impulsinio magnetinio lauko homogeniškumu. Todėl tokia konstrukcija buvo pasirinkta kaip prototipas, kuriant daugkartinio naudojimo stiprių impulsinių magnetinių laukų induktorius [13].

Magnetinių laukų tyrimo laboratorijoje iki šiol buvo naudojamas pirmos kartos impulsinio magnetinio lauko generavimo įranga (29 pav.) [13].



29 pav. Pirmos kartos impulsinio magnetinio lauko generavimo įranga

Impulsinio magnetinio lauko generatorius susideda iš 5000 μF kondensatorių baterijos, didelės galios tiristorinio perjungėjo, specialaus plieninio konteinerio ir įrašymo įrangos. Plieninis konteineris naudojamas saugumo sumetimais. Darbinė įtampa gali būti reguliuojama nuo 100 iki 4500 V. Sugeneruojamas 48 T impulsinis magnetinis laukas, kurio trukmė 2 ms.

4.1.3 Dabar kuriamas magnetinio lauko generatorius

Naujasis impulsinio magnetinio lauko generatorius turi 4 kV aukštos įtampos energijos tiekimo šaltinį, 10,8 mF talpos kondensatorių bateriją, 50 kA tiristorinį jungiklį ir impulsinę ritę. Kondensatorių bateriją galima pakrauti iki 86,4 kJ. Iškraunant kondensatorių per impulsinę ritę, kurios vidinis skersmuo yra 8 – 12 mm, gaunamas pusę sinuso formos impulsas, kurio amplitudė siekia iki 50 T, impulso trukmė gali siekti 0,5 – 5 ms. 5 paveikslėlyje parodyta įranga. Patikimas impulsinio magnetinio lauko generatoriaus veikimas priklauso nuo impulsinės ritės konstrukcijos.

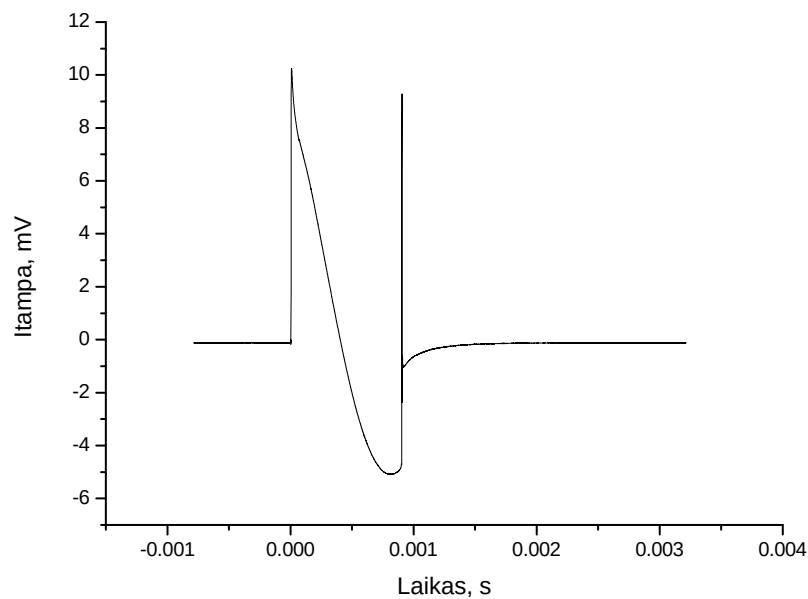


30 pav. Impulsinio magnetinio lauko įranga: impulsinio magnetinio lauko šaltinis su elektrinio impulso generatoriumi bei matavimo įranga.

4.2 Indukcinio jutiklio pasyvinio integratoriaus parametrų įtakos magnetinio lauko signalo formai tyrimas

Pirmiausia, norint ištirti jutiklį, reikia turėti atraminius duomenis, kuriais galima būtų pasikliauti ir su kuriais galima būtų lyginti. Kitaip sakant, reikia turėti patikrintą ir sukalibruotą jutiklį. Pasinaudojau indukcinį jutiklį su pasyviu integratoriumi kuris buvo jau sukalibruotas naudojant Holo jutiklį ir optinį Faradėjaus metodais. Norėdamas įsitikinti, jog šio integratoriaus komponentai parinkti teisingai, išmatuojamas signalas be integratoriaus ir su integratoriumi. Neintegruotą signalą integruoju *Origin* programinio paketo pagalba ir palyginu šį signalą su integratoriaus signalu.

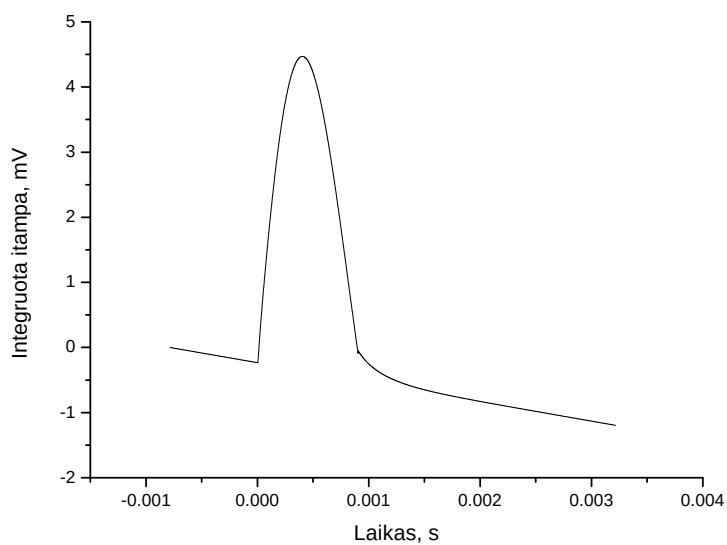
Išėjimo signalas pavaizduotas 31 paveikslėlyje.



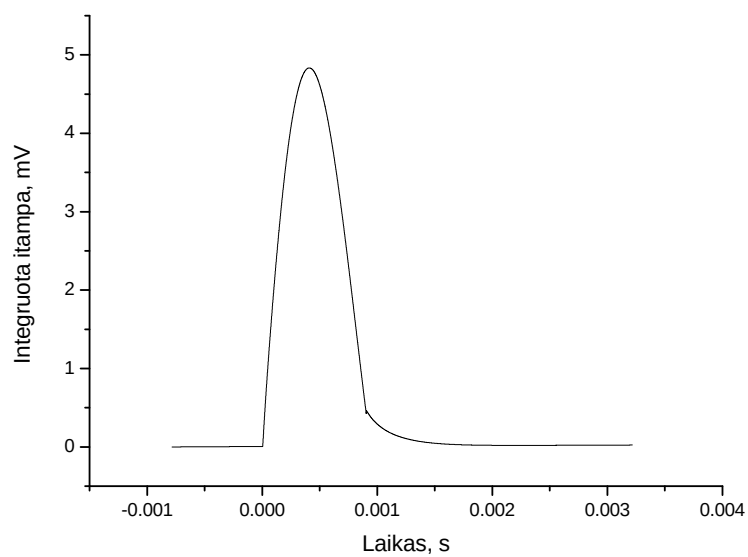
31 pav. Išėjimo signalas

Suintegravus šį signalą Origin programiniu paketu gauname tokį signalą (32 pav). Tačiau dėl to, kad pradiniu laiko momentu osilografas rodo ne visiškai nulinę įtampą, turime iškreiptą grafiką, todėl reikia įvesti korekcinę konstantą. Šiuo atveju prie duomenų pridedamas skaičius 0,122 (33 pav.). Iš signalo kurį gavome ir signalo kurį suskaičiavome galime rasti integravimo pastoviąją C. Ši pastovioji yra šių signalų maksimumų santykis:

$$C = \frac{U_{\max 1}}{U_{\max 2}} = \frac{4833}{4,78} = 1011,08. \quad (18)$$

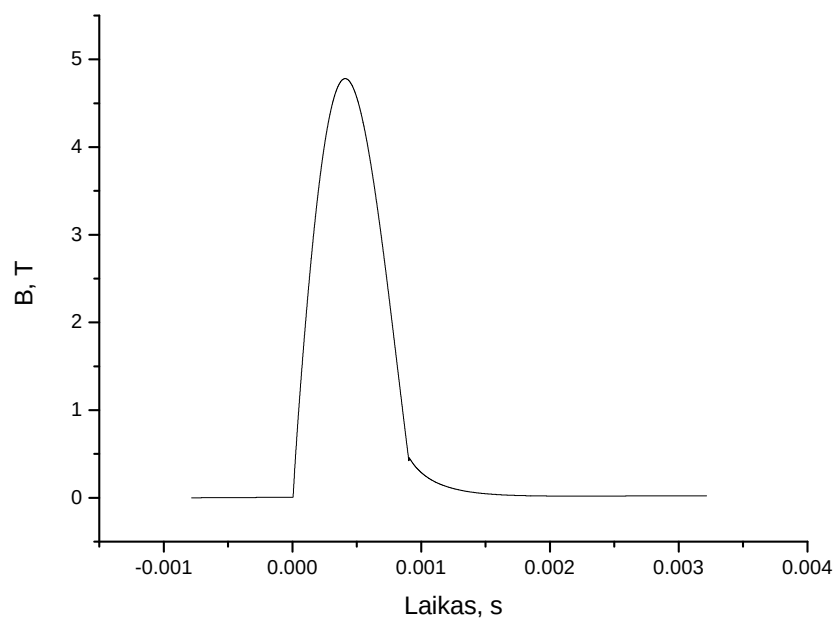


32pav. Suintegruotas signalas



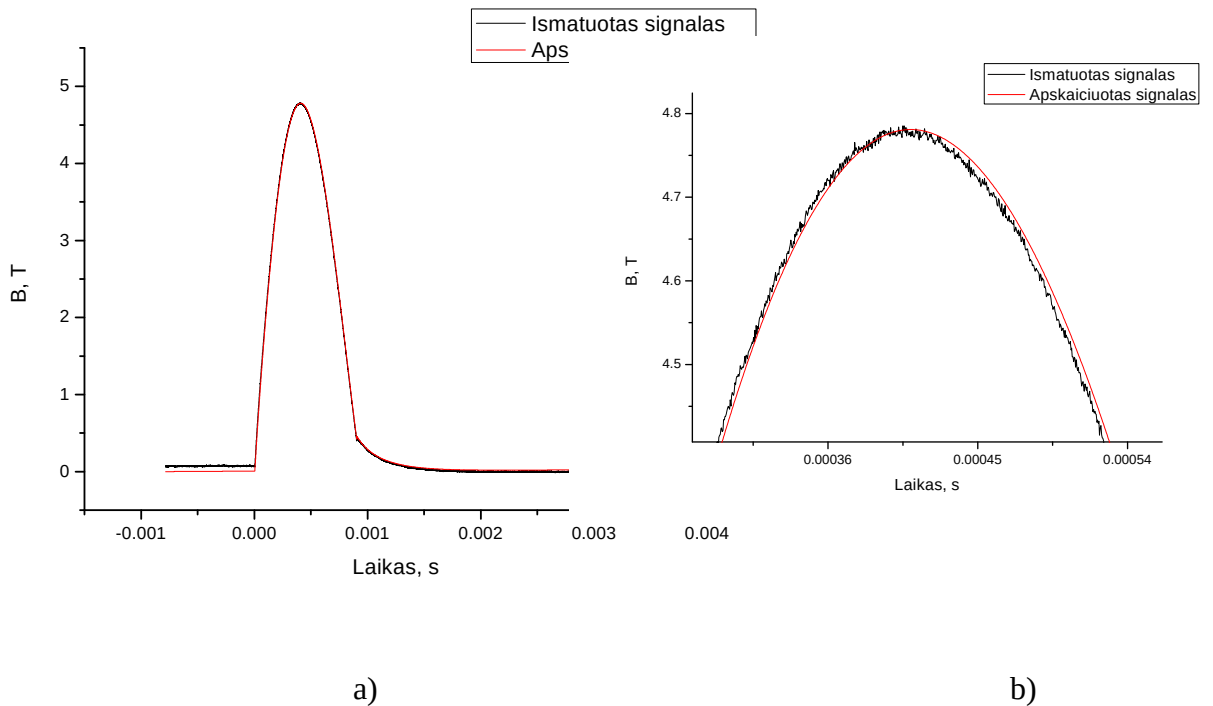
33 pav. Suintegruotas pakoreguotas signalas

Padalinę lygtį iš koeficiento gauname tokį integruotą sutvarkytą signalą $B(t)$ (34 pav.).



34 pav. $B(t)$ apskaičiuotas signalas

Tada palyginame išmatuotą ir apskaičiuotą signalus (35 pav.)



35 pav. a) išmatuotas ir apskaičiuotas signalai, b) šių signalų maksimumai

Kaip matome paklaida nėra labai didelė, todėl galima teigti, kad etaloninis integratorius ir jo komponentai parinkti teisingai.

Mano eksperimentinių bandymų tikslas yra parinkti integratoriaus R ir C komponentus taip, kad mano indukcinio jutiklio signalas atitiktų etaloninio jutiklio signalą. Iš vielos ant osilografo kabelio suuvyniojau ritę (indukcinį jutiklį), jį patalpinęs į ritės centrą atlikau matavimus su skirtingais integratoriaus elementais. Matavau 0,92 ms trukmės impulsą. Ritės skersmuo $d = 4,3 \text{ mm}$, apvijų skaičius $n = 19$ vijų.

Kondensatoriaus talpą pasirinkau $C = 220 \text{ nF}$, o varžas tokias:

R: 4,2 M Ω

500 k Ω

220 k Ω

100 k Ω

50 k Ω

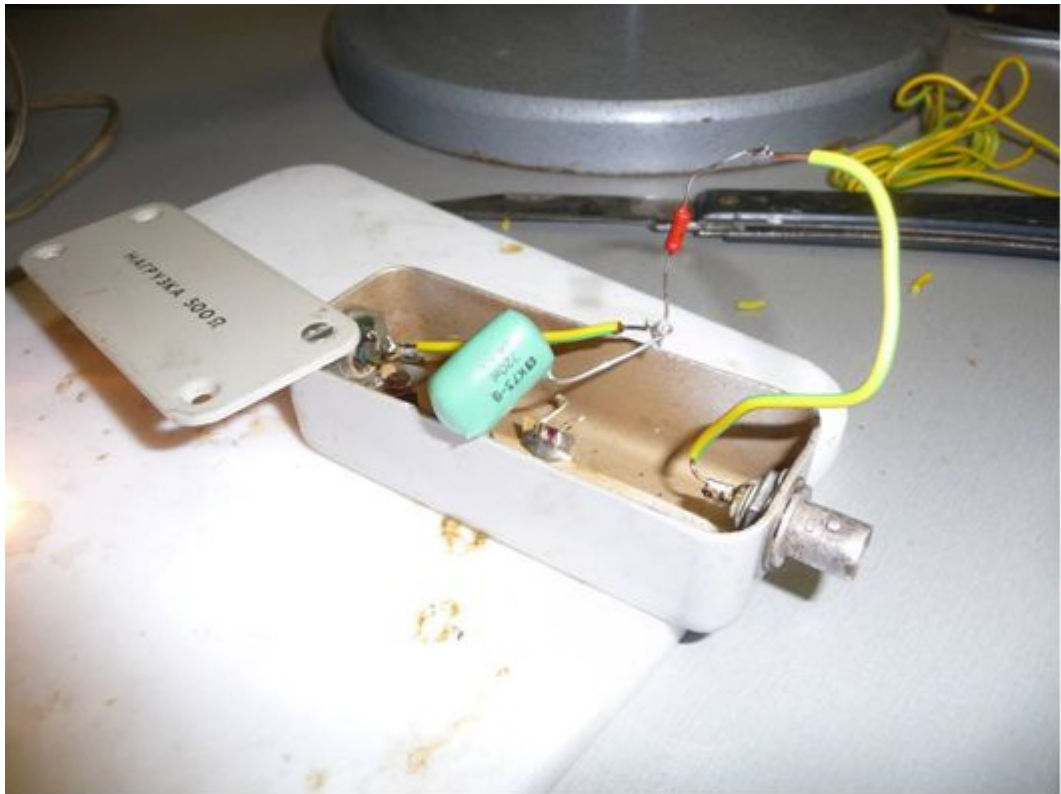
20 k Ω

10 k Ω

5 k Ω

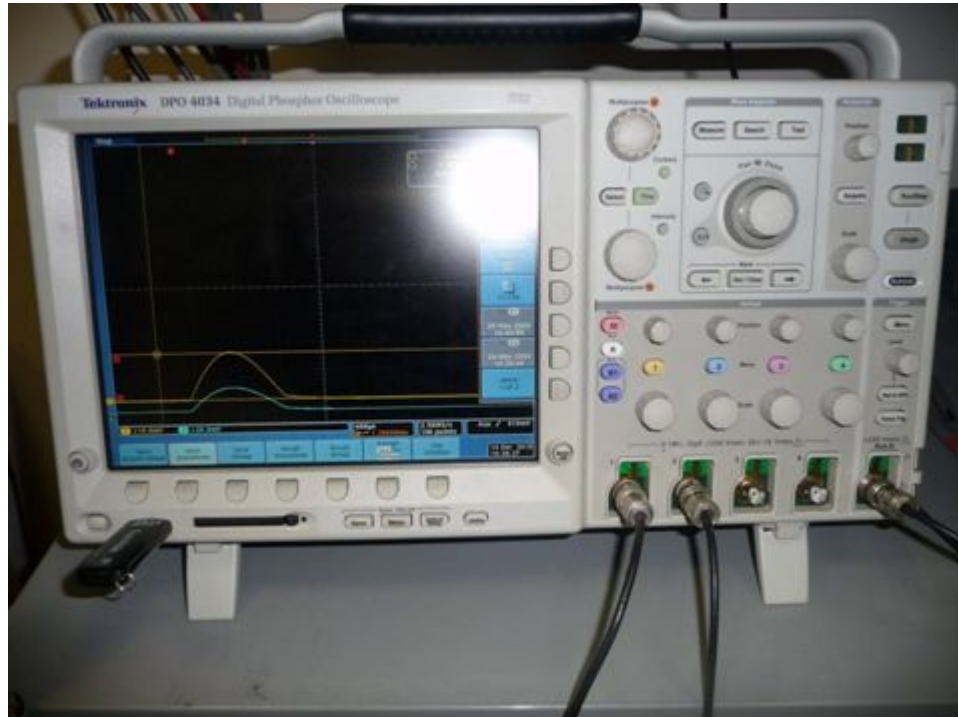
1 k Ω

Realus integratorius pavaizduotas 36 paveikslėlyje.



36 pav. Integratorius

Duomenys osilografo ekrane (37 paveikslėlis)



37 pav. Duomenų atvaizdavimas osilografe

Pirmajame bandyme $R = 4,2\text{M}\Omega$,

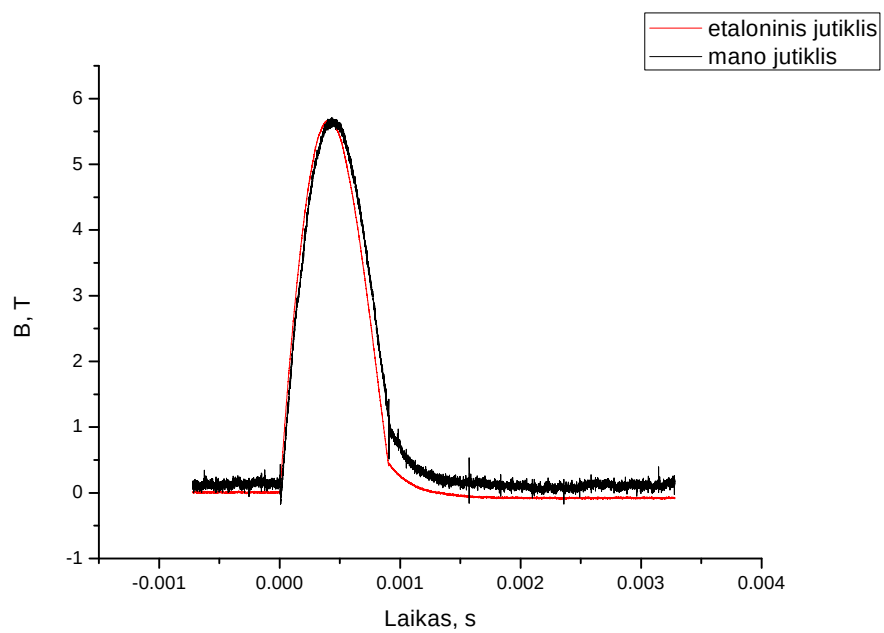
$$\tau = R \times C \quad (19)$$

$\tau = 4200000 \times 0,00000022 = 0,924 \text{ ms}$. Gautieji signalai yra voltais, signalas paverčiamas teslomis tokia formule :

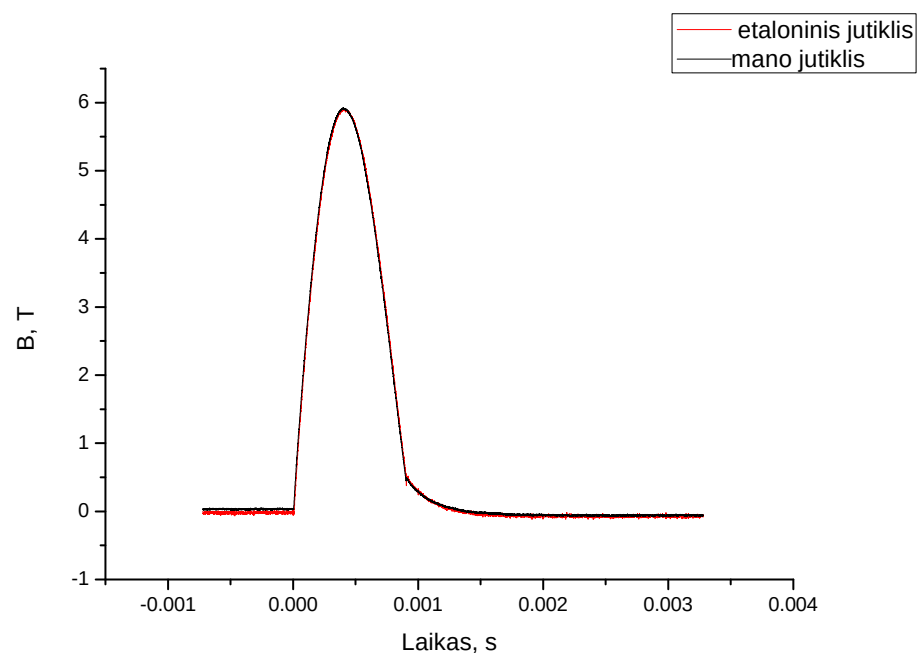
$$y = \frac{x \times 1000}{3}, \quad (20)$$

čia x yra įtampos signalas, y – magnetinis signalas.

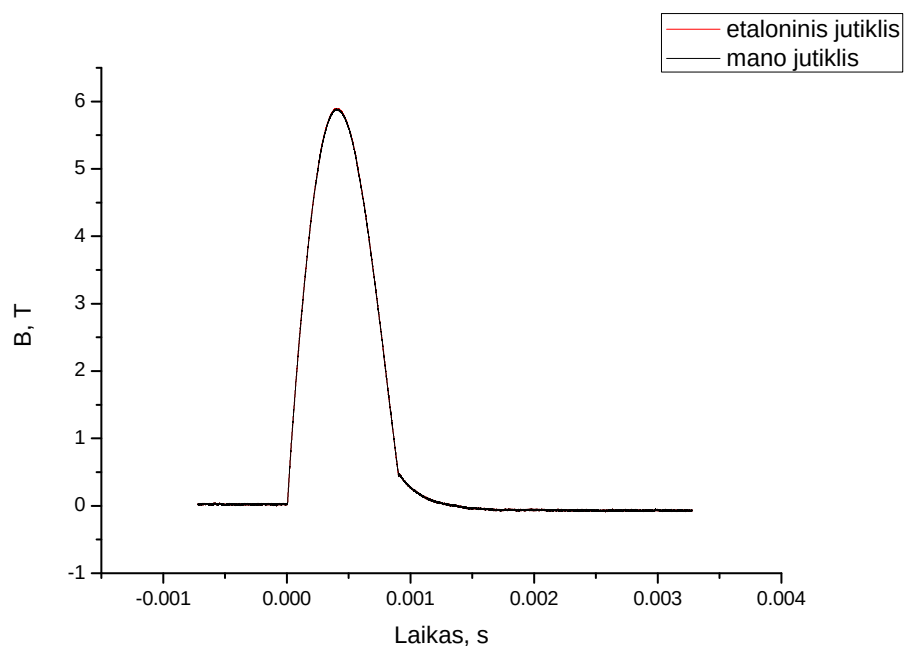
38 paveikslėlyje pavaizduotas pirmasis bandymas.



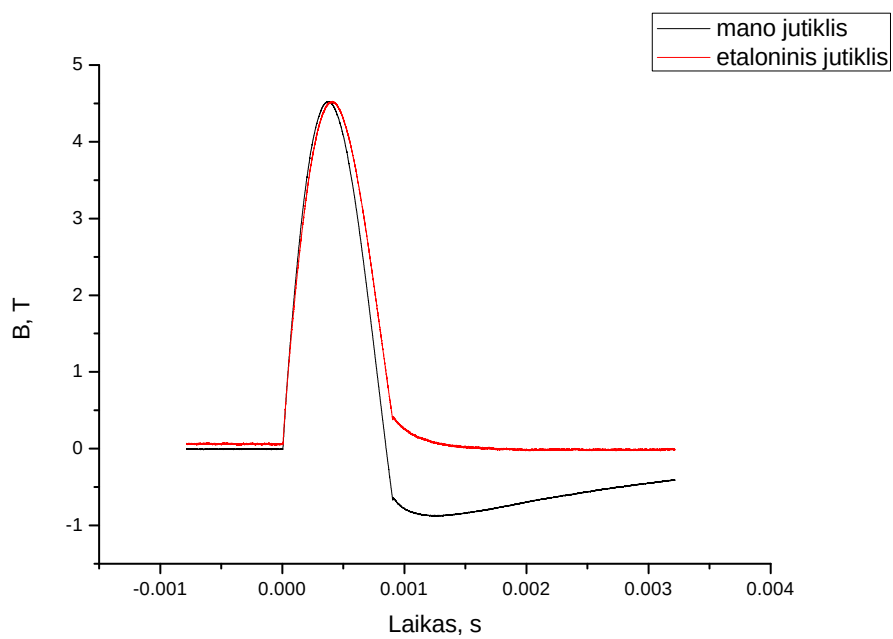
38 pav. Integratoriaus $R = 4,2 \text{ M}\Omega$, $C = 220 \text{ nF}$, $\tau = 0,924 \text{ ms}$



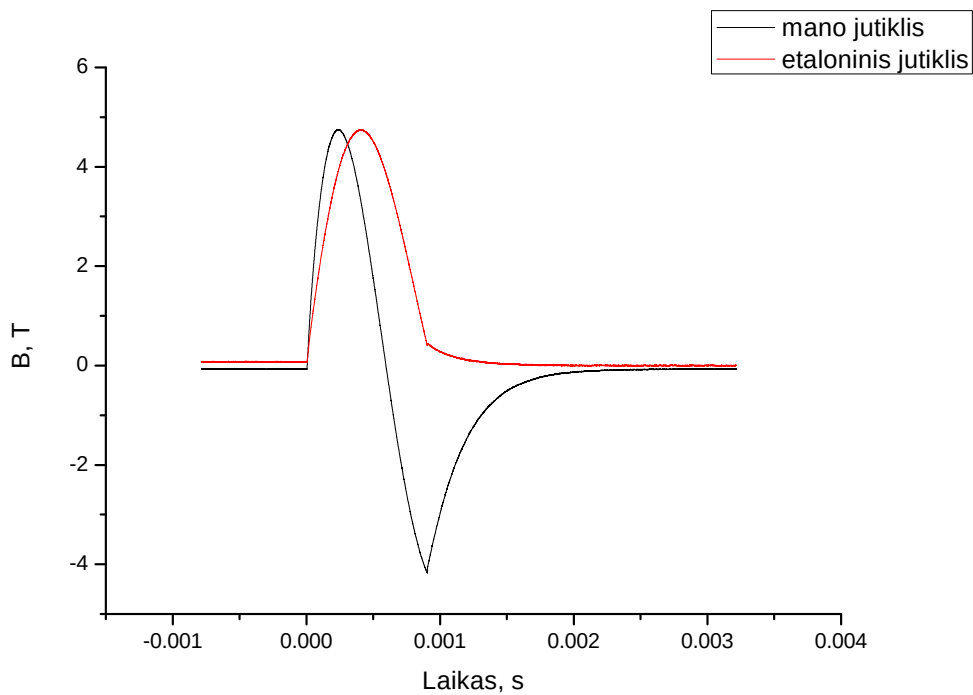
39 pav. Integratoriaus $R = 500 \text{ k}\Omega$, $C = 220 \text{ nF}$, $\tau = 0,11 \text{ ms}$



40 pav. Integratoriaus $R = 220 \text{ k}\Omega$, $C = 220 \text{ nF}$, $\tau = 0,048 \text{ ms}$



41 pav. Integratoriaus $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 220 \text{ nF}$, $\tau = 0,0022$

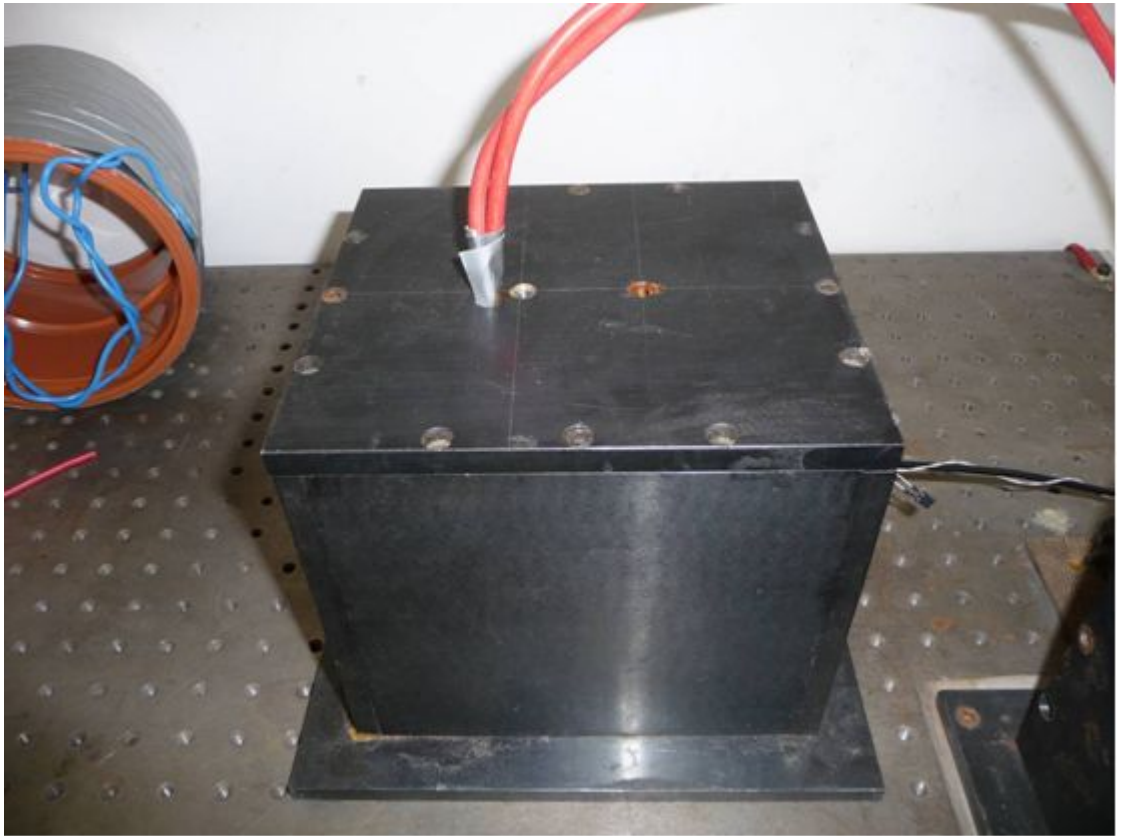


42 pav. Integratoriaus $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 220 \text{ nF}$, $\tau = 0,00022 \text{ ms}$

Matome, kad tiksliausiai etaloninį signalą atkartoja integratorius su $220 \text{ k}\Omega$ varža, toliau mažinant varžą išėjimo signalo forma artėja prie be integratoriaus gauto signal formos. Todėl integratoriaus talpa C turi būti 220 nF , o R turi būti $220 \text{ k}\Omega$.

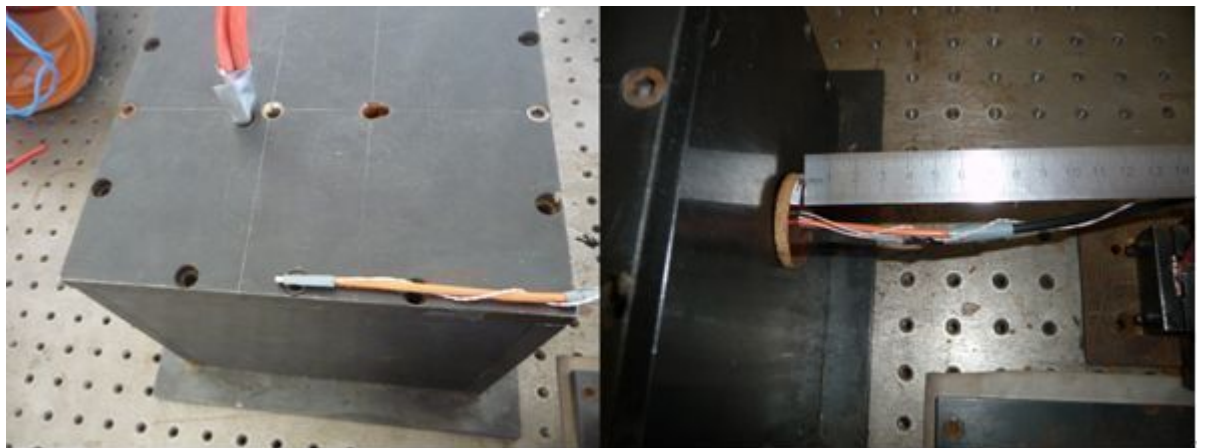
4.3 Ritės magnetinio lauko pasiskirstymo pagal ašį tyrimas

Norint tinkamai matuoti magnetinį lauką, reikia ne tik patikimo ir tikslaus jutiklio, tačiau reikia taip pat žinoti, kurioje vietoje jį įdėti. Norėdamas sužinoti, kaip magnetinis laukas pasiskirsto ritėje, atlikau bandymą. Bandymo esmė: jutiklį patalpinti ritės centre, atlikti magnetinio lauko matavimus, tada, ištraukiant jutiklį kas 5 mm , pakartotinai atlikti matavimus. Ritė – induktorius saugumo sumetimais patalpinta į specialią dėžę (43 pav.)



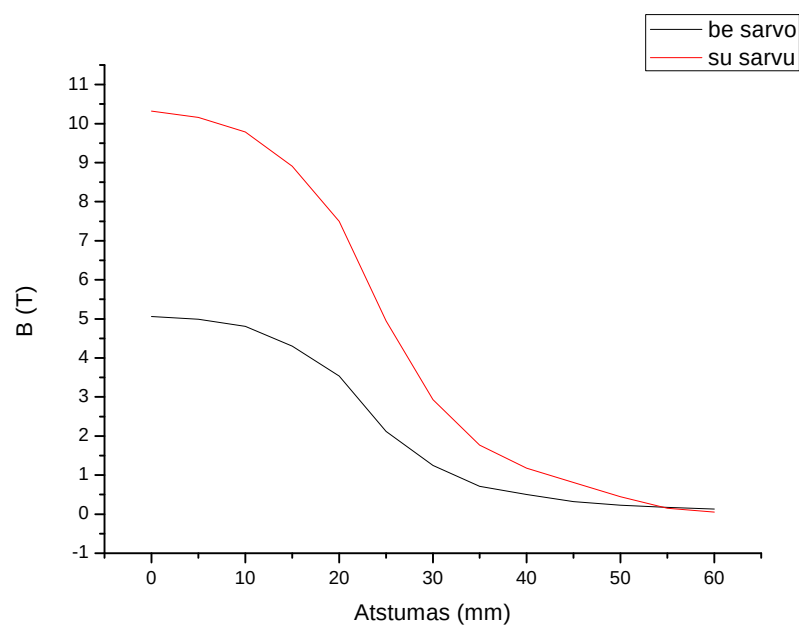
43 pav. Dėžė, kurioje patalpinta ritė

Jutiklis yra patalpinamas į ritės centrą. Atliekami magnetinio lauko matavimai. Tada jutiklis ištraukiamas kas 5mm ir pakartotinai atliekami matavimai (44 pav.)



44 pav. Jutiklio patalpinimas ritėje

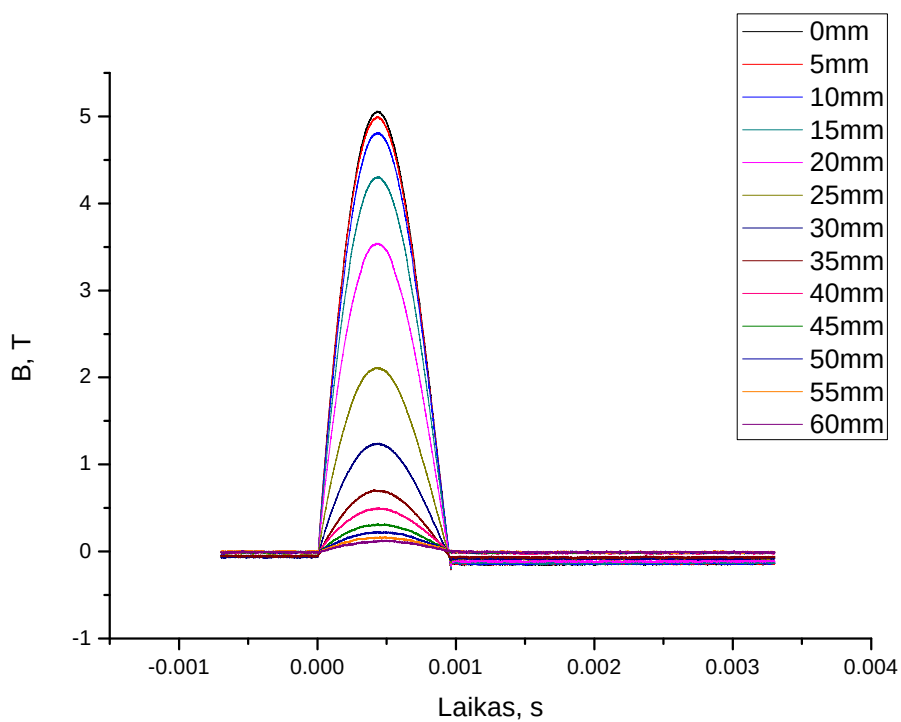
Bandymai buvo atliekami su dviem ritėmis. Šių ričių vidinė konstrukcija yra identiška. Tik viena ritė yra su išoriniu šarvu, o kita be. Magnetinio lauko amplitudės priklausomybė pagal ašį pavaizduota 45 paveikslėlyje.



45 pav. Magnetinio lauko amplitudės priklausomybė pagal ašį

Kondensatorių įtampa kiekvienai ritei buvo užkraunama skirtingai, todėl amplitudės skiriasi, tačiau kreivių formos panašios ir nulis pasiekiamas maždaug viename taške.

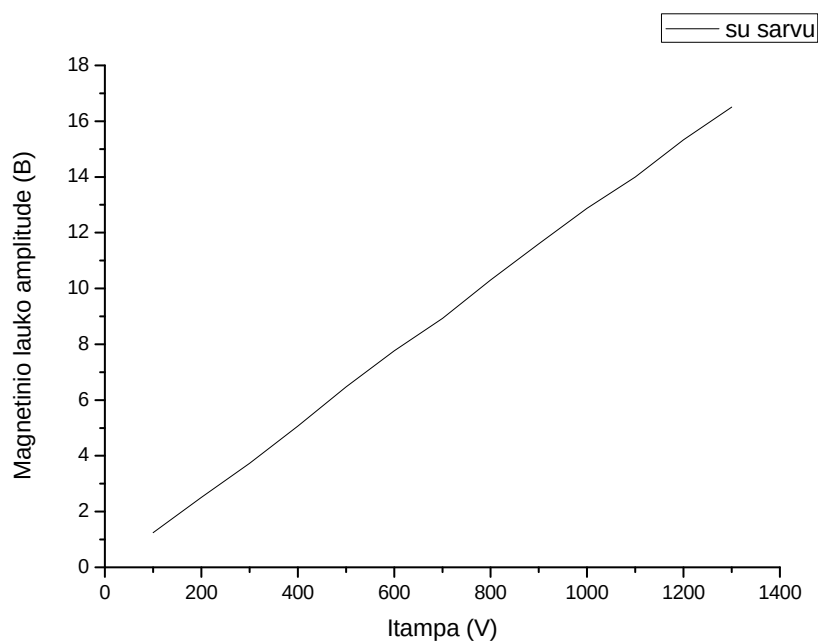
Magnetinio lauko forma, keičiant jutiklio padėtį, parodyta 46 paveikslėlyje.



46 pav. Magnetinio lauko forma, keičiant jutiklio padėtį (ritė be šarvo)

4.4 Magnetinio lauko priklausomybė nuo užkraunamos kondensatorių įtampos

Norint atlikti tikslius matavimus, reikia žinoti, kaip priklauso magnetinio lauko amplitudė nuo užkraunamos įtampos. Eksperimento pradžioje kondensatorių baterijos užkraunamos iki 100V, atliekamas šūvis ir matavimai. Taip keliama įtampa iki 1300 V, kas 100 V. Magnetinio lauko amplitudės priklausomybė nuo įtampos parodyta 47 paveikslėlyje.



47 pav. Magnetinio lauko amplitudės priklausomybė nuo įtampos

Iš grafiko matyti, kad ši priklausomybė yra beveik tiesinė. Nukrypimai atsiranda dėl matavimo paklaidų. Įtampa yra tiesiogiai proporcinga magnetinio lauko amplitudei.

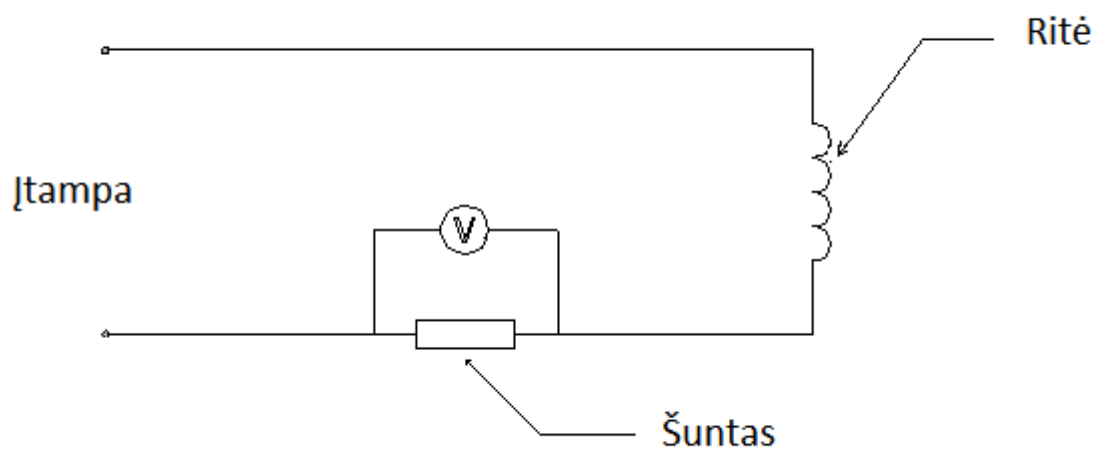
4.5 Magnetinės ritės šarvo įtaka magnetinio lauko impulso formai

Elektrai laidus konstrukciniai elementai, kurie yra šalia ritės, daro įtaką magnetiniam laukui. Kad pamatytume, kokia ta įtaka ir ar ji didelė, reikia atlikti lyginamuosius matavimus. Magnetinis laukas bešarvinės ritės yra proporcingas srovės stipriui. Todėl tokios ritės srovės ir magnetinio lauko impulso forma turi sutapti. Srovę galima išmatuoti naudojant šuntą įjungta nuosekliai ritei. Toks šuntas turi turėti labai mažą varžą, nes per ritę teka didelė srovė. Toks šuntas parodytas 48 paveikslėlyje, o jo įjungimo schema parodyta 49 paveikslėlyje. Įtampos kritimas ant

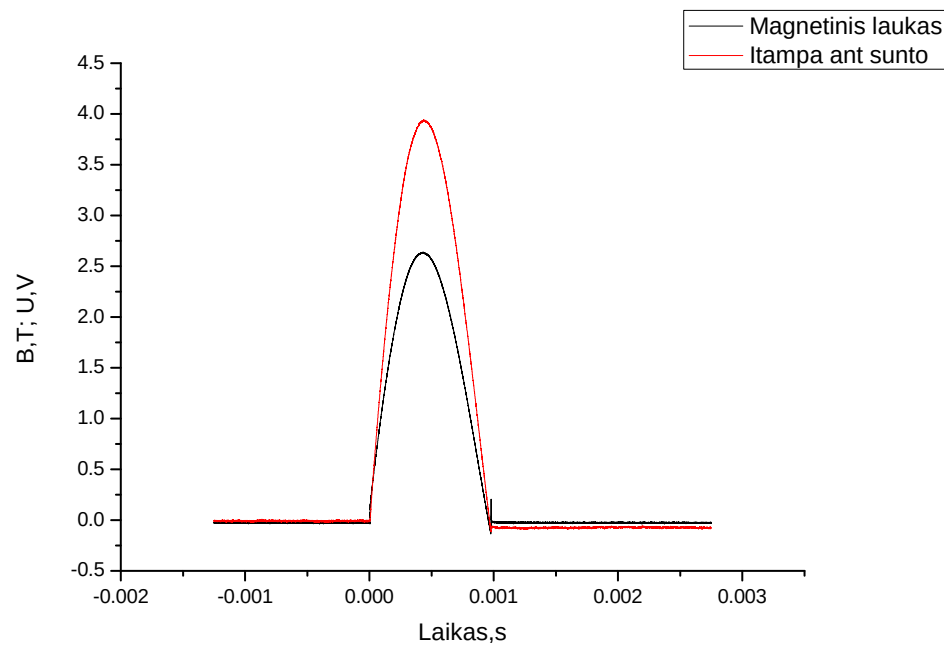
šunto bei indukcinio magnetinio lauko jutiklio įtampa buvo matuota su oscilografu. Pirmiausiai buvo atlikti bandymas su rite be šarvo. Gautos kreivės pavaizduotos 50 paveikslėlyje.



48 pav. Šuntas

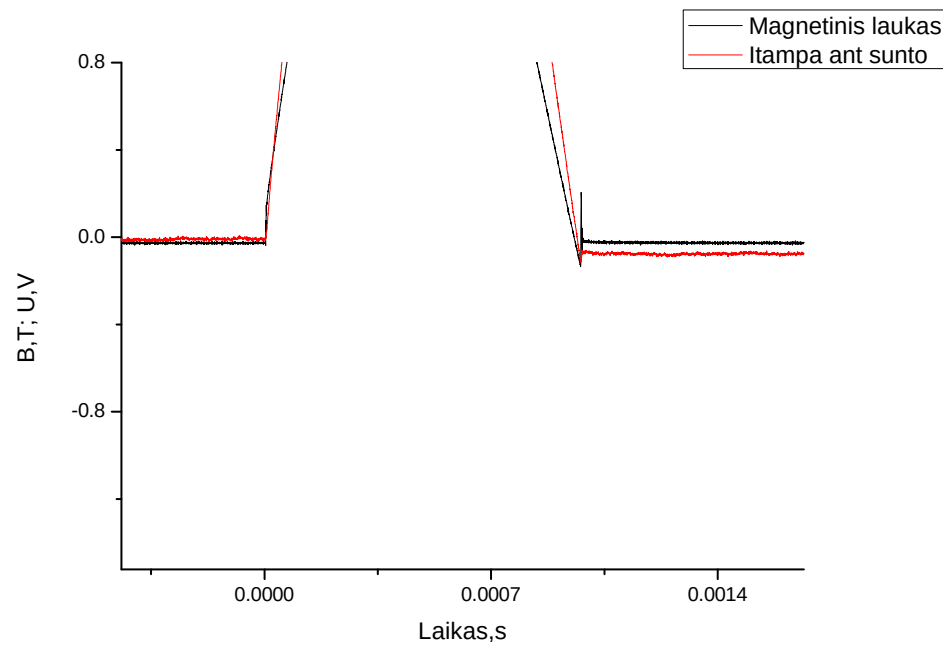


49 pav. Šunto įjungimo schema



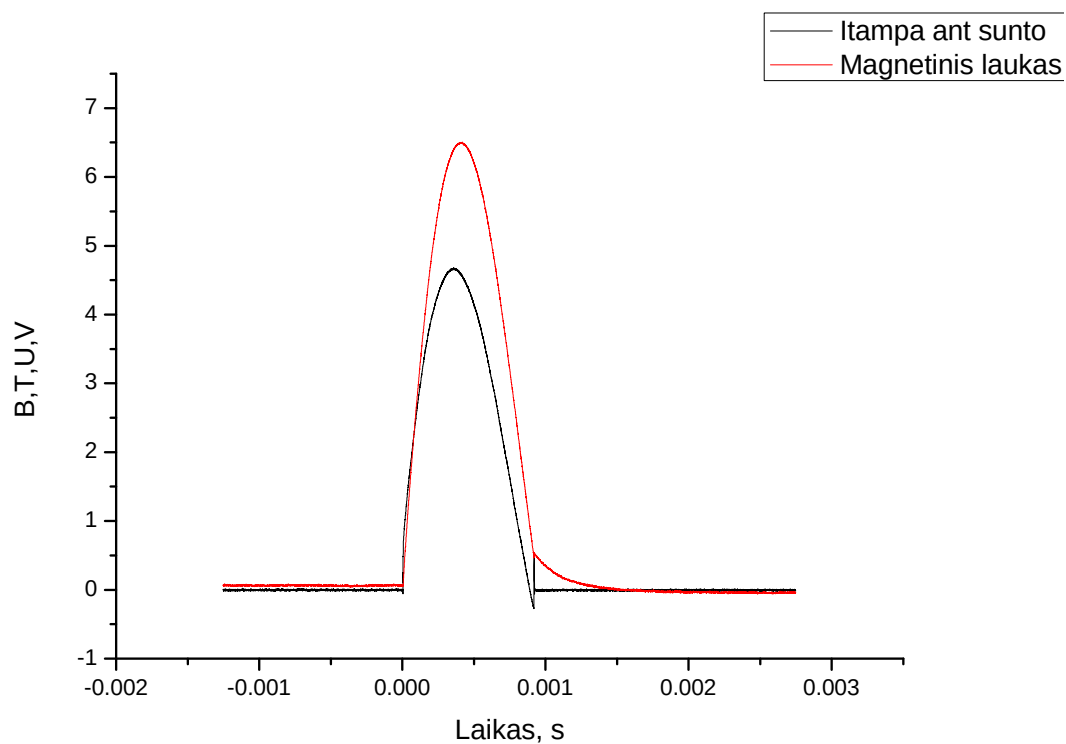
50 pav. Įtamos ir magnetinio lauko grafikai, kai ritė be šarvo

51 paveikslėlyje pavaizduoti padidintas impulso pradžios ir pabaigos grafikas. Matome, kad magnetinio lauko impulsas kartoja srovės impulsą, o srovei nukritus iki nulio magnetinis laukas irgi lygus nuliui.

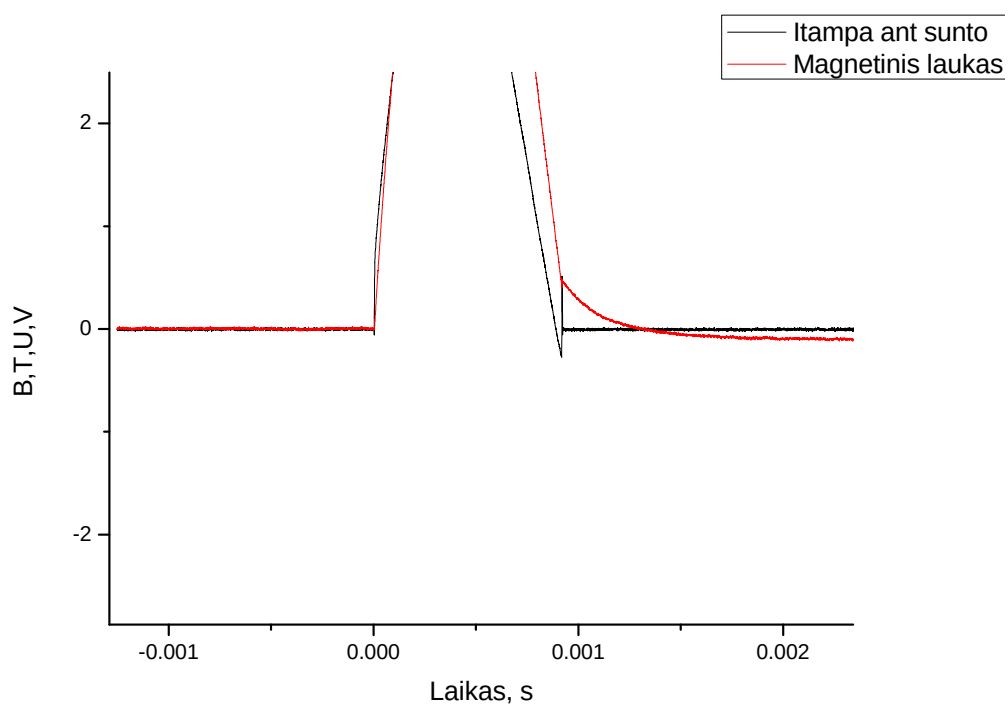


51 pav. Įtamos ir magnetinio lauko grafikai, kai ritė be šarvo (padidintas mastelis)

Po to buvo atliekami bandymai su rite, kuri yra patalpinta į metalinį šarvą. Įtampos ir magnetinio lauko kreivės pavaizduotos 52 ir 53 paveikslėlyje.



52 pav. Įtampos ir magnetinio lauko grafikai, kai ritė su šarvu

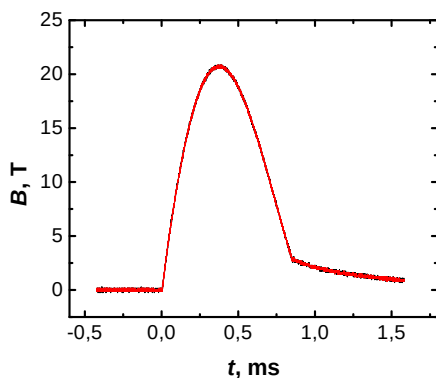


53 pav. Įtampos ir magnetinio lauko grafikai, kai ritė su šarvu (padidintas mastelis)

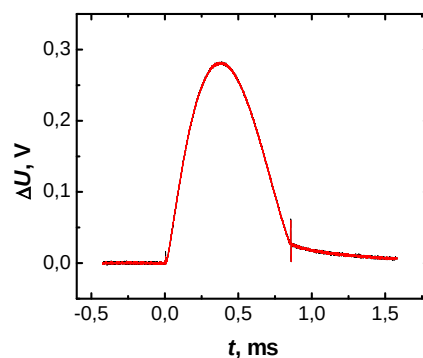
Kaip matome, visu pirma srovės ir magnetinio lauko impulsu maksimumai nesutampa laike. Srovė pasiekia maksimalią vertę anksčiau nei magnetinis laukas. Antras skirtumas stebiamas impulso gale. Kai srovė per ritę jau lygi nuliui, magnetinio lauko jutiklis rodo, kad ritės centre dar yra magnetinis laukas. Šį reiškinį galima paaiškinti nagrinėjant procesus vykstančius ritėje patalpintoje į metalinį šarvą. Ritės impulsinis magnetinis laukas sukuria metaliniame šarve srovę. Šia srovė atitinkamai sukuria magnetinį lauką kuris yra priešingos krypties nei ritės magnetinis laukas. Abejų laukų suma mažina bendrą magnetinį lauką. Kai srovė pasiekia maksimalia vertę ir mažėja, magnetinis laukas sukauptas šarve prisideda prie magnetinio lauko sukurto ritės apvijoje. Dėl to magnetinio lauko jutiklis rodo didesnę vertę. Toks efektas ryškiai stebimas impulso pabaigoje, kai srovė tekančia per ritę lygi nuliui ir atitinkamai magnetinis laukas sukuriamas ritėje irgi lygi nuliui. Šiuo atveju šarve dar teka indukcinė srovė ir sukuria magnetinį lauką. Toki efektą mes matome 53 paveikslėlyje.

4.6 Plonųjų manganitų sluoksnių varžos tyrimas stipriame impulsiniame magnetiniame lauke

Pagamintas ir ištirtas indukcinis magnetinio lauko jutiklis su pasyviuoju integratoriumi buvo panaudotas plonųjų manganitų sluoksnių magnetovaržos tyrimui. Tam, į ritės centrą buvo įdėti vienas arti kito indukcinis jutiklis ir bandinys. Bandinys per nuosekliai prijungtą rezistorių (balansinis rezistorius) buvo prijungtas prie nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio. Veikiant magnetiniam laukui, bandinio varža mažėjo. Šis varžos pokytis buvo matuojamas matuojant įtampos kritimą ant bandinio.



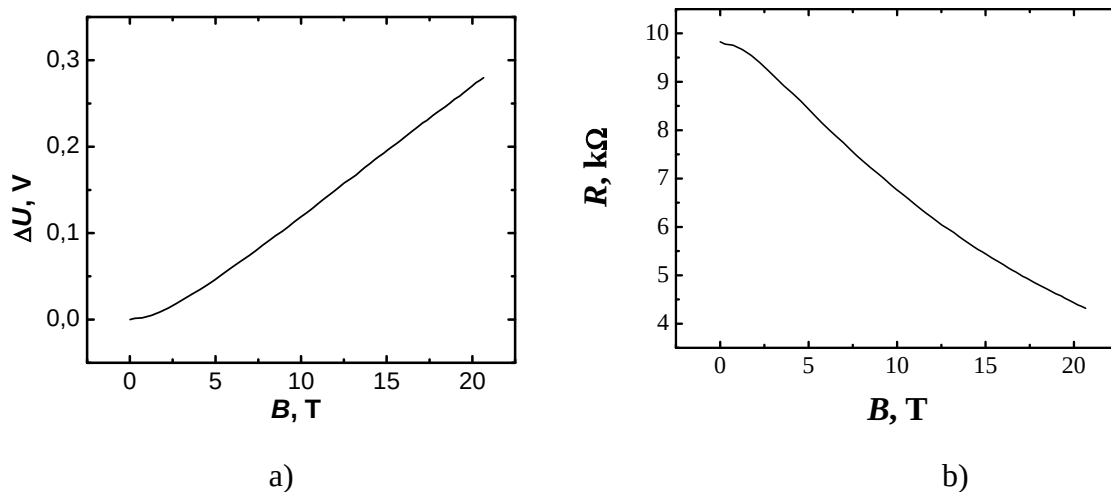
a)



b)

54 pav. a) magnetinio lauko jutiklio signalas, b) įtampos pokytis ant bandinio

Magnetinio lauko jutiklio signalas ir įtampos pokytis ant bandinio buvo registruojamas oscilografu. 54 pav., a ir b pav. parodytos šios dvi kreivės. Išanalizavę aukščiau atliktų tyrimų rezultatus galime teigti, kad pagamintas indukcinis magnetinio lauko jutiklis tiksliai matuoja magnetinio lauko kitimą laike. Todėl kiekvienu laiko momentu duotam magnetiniam laukui galime priskirti tam tikrą įtampą ant bandinio. 55a pav. parodyta įtampos ant bandinio priklausomybė nuo magnetinio lauko stiprio, o 55b pav. parodyta bandinio varžos priklausomybė nuo magnetinio lauko. Varža buvo skaičiuojama taikant matavimo grandinei Omo ir Kirchhofo dėsnius.



55 pav. a) priskirta įtampa ant bandinio, b) bandinio varžos priklausomybė nuo magnetinio lauko

Darbo rezultatų apibendrinimas ir išvados

Didelės galios impulsinio magnetinio lauko šaltinį sudaro kondensatorių baterija, tiristorinis raktas ir magnetinio lauko ritė. Darbe atlikta visų išvardintų komponentų analizė ir apžvelgta kiekvieno iš jų įtaka stipriam magnetinio lauko impulsui gauti. Taip pat apžvelgti impulsinio magnetinio lauko matavimo metodai.

Eksperimentinėje dalyje pagrindinis dėmesys skirtas impulsinio magnetinio lauko matavimui naudojant indukcinį jutiklį su pasyviuoju integratoriumi.

1. Ištirta pasyvinio integratoriaus parametrų įtaka impulsinio magnetinio lauko signalo formai. Parodyta, kad, kai pasyvinio integratoriaus varžos ir kondensatoriaus talpos sandauga (RC) yra mažesnė nei impulso trukmė, matuojamo signalo forma stipriai skiriasi nuo magnetinio lauko impulso formos. Todėl toks matuoklis negali būti naudojamas magnetinio lauko matavimams. Tuo atveju, kai RC yra žymiai didesnė nei impulso trukmė, matuoklio ir

magnetinio lauko impulsų forma sutampa. Tačiau, didinant RC, mažėja signalo amplitudė. Dėl to reikia didinti indukcinio jutiklio vijų skaičių.

2. Ištirtas magnetinio lauko stiprio pasiskirstymas išilgai ritės ašies. Nustatyta, kad stipriausias magnetinis laukas yra ritės centre, o didžiausias lauko gradientas yra 25 mm atstume nuo centro.
3. Ištirta ritės magnetinio lauko maksimalios vertės priklausomybė nuo kondensatoriaus užkrovimo įtampos. Paaiškėjo, kad ši priklausomybė yra tiesinė.
4. Ištirta ritės metalinio šarvo įtaka magnetinio lauko impulso formai. Nustatyta, kad didėjant magnetiniam laukui, metaliniame šarve indukuojasi magnetinis laukas priešingos nei ritės krypties. Dėl to suminis magnetinis laukas yra mažesnis nei tuo atveju, kai šarvo nėra. Kai srovės, tekančios per ritę, stipris mažėja, gauname atvirkštinį efektą – šarvo magnetinis laukas padidina suminį magnetinį lauką. Be to, pasibaigus srovės impulsui, ritėje stebimas magnetinis laukas, indukuotas metaliniame šarve.
5. Pagamintas indukcinis jutiklis su pasyviniais integratoriumi panaudotas plonųjų manganitų sluoksnių varžos priklausomybei nuo magnetinio lauko tirti.

Literatūros sąrašas

1. *Inductors for High Magnetic Field Generation* , J. Novickij, R. Kačianauskas, V. Filipavičius
ISSN 132-1215 ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA. 2004. Nr. 7(56)
2. *Stiprių magnetinių ir elektrinių laukų generavimas ir taikymas* Doc. dr. Jurij Novickij. Paskaita 2009
3. *LARGE HIGH ENERGY DENSITY PULSE DISCHARGE CAPACITOR CHARACTERIZATION* , Fred MacDougall, Joel Ennis, Xiao Hui Yang, Ken Seal, Sanjay Phatak, Brian Spinks, Nathan Keller, Chip Naruo, San Diego, CA 92123-1675 USA.
4. *HIGH ENERGY DENSITY CAPACITORS FOR PULSED POWER APPLICATIONS* , Fred MacDougall, Joel Ennis, Xiao Hui (Chip) Yang , Robert A. Cooper, John E. Gilbert, John F. Bates, Chip Naruo, Mark Schneider, Nathan Keller, Shama San Diego, CA 92123-1675 USA.
5. *PULSE POWER CAPACITORS* Fred MacDougall, Richard Jow, Joel Ennis, S.P.S. Yen, X. H. Chip Yang, Janet Ho General Atomics Electronic Systems, Inc., San Diego, CA, United States US Army Research Laboratory, Las Vegas, Nevada, USA
6. *SELF-HEALING PULSE CAPACITORS FOR THE NATIONAL IGNITION FACILITY (NIF)*
J.B. Ennis, F.W. MacDougall, R.A. Cooper, J. Bates, Presented at: IEEE Pulsed Power Conference June 1999
7. *A spark gap switch with very high repetition rate*, Hasibur Rahaman, Byung-Joon Lee, Jürgen Urban Robert Stark, Klaus Frank, Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, South Korea
8. *Kompiuterių elementai*, Paskaitų konspektas 2007 metai, T120B611
9. *Static Induction Thyristors as a Fast High-Power Switch for Pulsed Power Applications*, SHOZO ISHII, JUN-ICHI NISHIZAWA, INTRODUCTION, NAOHIRO S HIMIZU, YUICHIRO IMANISHI. Department of Electrical & Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552 (Japan)
10. Prieiga per internetą: http://lt.wikipedia.org/wiki/Holo_efektas (žiūrėta : 2011 05 25)
11. *Optiškąjė Datčiki* - Okosi T. Volokonno, 1990 m
12. „Jurijaus ataskaita stud“
13. Jurijaus ataskaita fondui 2007
14. *Axial Magnetic Field Measurements of Pulsed Solenoids*, J. Novickij, R. Kačianauskas, A. Kačeniauskas, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania.
15. *Vilnius High Magnetic Field Centre Facilities* , J. Novickij, S. Balevičius, N. Žurauskienė

R. Kačianauskas, V. Stankevič, Č . Šimkevičius, S. Keršulis, S. Bartkevičius.