

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Saulius BARTKEVIČIUS

STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ DAUGKARTINIO NAUDOJIMO INDUKTORIŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Jurij NOVICKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T)

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1618-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-427-7

© Bartkevičius, S., 2009

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2009

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Saulius BARTKEVIČIUS

THE INVESTIGATION OF HIGH MAGNETIC FIELD LONG-LIFE OPERATION INDUCTORS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2009.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Jurij NOVICKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T)

Santrauka

Disertacijoje nagrinėjami stipraus impulsinio magnetinio lauko induktoriai, kurių ilgaamžiškumas priklauso nuo daugelio jų fizikinių parametų. Sukūrus induktorių geometrijos sintezės metodiką, sudaryti induktorių matematiniai ir kompiuteriniai modeliai, ištirti impulso metu skirtingų parametų induktorių apvijose vykstantys procesai, atlikta daugkartinio naudojimo induktorių geometrijų paieška. Sukurtas programinis aprūpinimas induktorių skaičiavimams įgalina nustatyti induktorių, tinkamų daugkartiniam impulsiniam magnetiniam laukui generuoti, parametrus. Darbo rezultatai pritaikyti kuriant induktorių prototipus.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniamе skyriuje aprašomas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje aptariama stipraus magnetinio lauko reikšmė šiuolaikiam mokslui, pristatomi stipraus magnetinio lauko generavimo būdai, analizuojami impulsiniai induktoriai, jų kompiuterinių modelių sudarymo problematika, geometrijos optimizavimas.

Antrajame skyriuje aprašoma induktorių geometrijos ir medžiagų sudėties sintezės metodika, sukuriamas induktoriaus matematinis-kompiuterinis modelis, apibrėžiama daugkartinio naudojimo induktorių pagrindinių parametų visuma – „gyvavimo zona“, pateikiamas daugkartinio naudojimo induktorių geometrijų paieškos algoritmas.

Trečiajame skyriuje analizuojami skirtingų laidininkų induktoriuose vykstantys šiluminiai, elektromagnetiniai ir magnetomechaniniai procesai, jų įtaka induktoriaus ilgaamžiškumui, sprendžiamas induktorių geometrijos paieškos uždavinys, suskaičiuojamos ir analizuojamos skirtingų laidininkų induktorių „gyvavimo zonos“, pateikiamos induktorių vyniojimo rekomendacijos.

Ketvirtajame skyriuje aprašoma gautų rezultatų eksperimentinė patikra ir patikra modeliuojant induktorių *ANSYS*[®] aplinkoje, pateikiamas 50 T impulsinio induktoriaus ir sistemos, skirtos fizikiniams medžiagų tyrimams ir montuojamos ant PFI esančio kriostato, projektavimas.

Disertacijos tema paskelbti devyni straipsniai: trys straipsniai žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science sąrašą, keturi – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į INSPEC ir COPERNICUS duomenų bazes, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI Proceedings duomenų bazėje, vienas – kitų konferencijų medžiagoje, perskaityti septyni pranešimai Lietuvos bei užsienio konferencijose.

Abstract

The aim of the dissertation is the analysis of high pulsed magnetic field inductors in order to determine their electrophysical parameters for non-destructive magnetic field generation. To obtain that effective method to synthesize inductor geometrical and material models was developed, inductor mathematical and computer models created, electrophysical processes during the pulse in windings of various inductors were examined. Finally, retrievals of non-destructive inductor geometrical configurations were performed. Software developed and results gained were successfully used to design new pulsed inductor prototypes.

Dissertation content: introduction, four chapters, general conclusions, list of references and list of author's publications on the subject of dissertation.

The introduction contains the topicality of the problem, aim of the work, main tasks, scientific novelty, practical value, result approval, defended statements and structure description.

Overview of different high magnetic field generation techniques, pulsed inductor design, geometry optimization problems and software used for these tasks are the objectives of the first chapter.

The second chapter is dedicated to development of technique for inductor geometrical-material model synthesis, creation of mathematical-computer inductor model, definition of long-life operation inductor parameters – their “vitality zone” and design of non-destructive inductor geometries retrieval algorithm.

In the third chapter thermodynamic, electromagnetic and magnetomechanical analysis of inductors that are coiled up using various cross-section and material conductors is performed. Survey on the influence of electrophysical parameters on inductor multi-pulse use is carried out. After that “vitality zones” for different conductor cross-sections, materials and experimental environments are retrieved. Inductor winding recommendations are presented.

Results and model accuracies are verified using *ANSYS*[®] and experimentally in the fourth chapter. 50 T class pulsed inductor and magnetic system for cryostat at Vilnius Semiconductor Physics Institute for material physical properties research are designed using the developed calculation packages.

The results of the work were presented in nine scientific articles: three articles published in journals of Thomson ISI Web of Science list, four in journals quoted in INSPEC, COPENICUS databases, one in conference proceedings quoted in Thomson ISI Proceedings database and one in other conference materials. Seven reports were presented at international conferences, five of them in Lithuania.

Žymėjimai

Pagrindiniai simboliai

R_C, L_C, C_C, W_C	kondensatorių baterijos vidinė varža, induktyvumas, talpa ir energija;
U_0	pradinė kondensatorių baterijos gnybtų įtampa;
R_L, L_L	maitinimo laidų varža ir induktyvumas;
R_I, L_I	induktoriaus apvijos varža ir induktyvumas;
R_i	i-tojo apvijos sluoksnio varža;
λ	induktoriaus apvijos užpildymo koeficientas;
$Z(s)$	sistemos kondensatorių baterija-induktorius perdavimo funkcija;
T, T_0	induktoriaus vijų temperatūra, pradinė induktoriaus vijų temperatūra;
a_1, a_2, b	vidinis ir išorinis induktoriaus spindulys, induktoriaus ilgio pusė;
α, β	santykinis induktoriaus apvijos storis ir ilgis;
n_1, n_2	induktoriaus vijų sluoksnyje ir sluoksnių skaičius;
$n_{11}, n_{12}, n_{21}, n_{22}$	minimalus ir maksimalus vijų ir sluoksnių skaičius induktorių geometrijos paieškai;
N	induktoriaus vijų skaičius;
ρ	savitoji laidininko varža;
c, k	medžiagų savitoji šiluma ir savitasis šiluminis laidis;
ρ_m, m	tankis, masė;
S	laidininko skerspjūvio plotas;
A, w	suvyniotos medžiagos sluoksnio paviršiaus plotas, sluoksnio storis;
r	radialinė koordinatė;
z	ašinė koordinatė;
t	laikas;
Q	šilumos kiekis;
$i(77\text{ K}, t), i(T, t)$	srovės pereinamasis procesas neįvertinant išilimo ir su juo;
B	magnetinio lauko srauto tankis;
B_0	magnetinio lauko srauto tankis induktoriaus kiaurymės centre;
B_z, B_r	ašinė ir radialinė magnetinio srauto tankio dedamoji;
$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_h, \sigma_{VM}$	ašinė, radialinė, liestinės ir suminių mechaninių įtempių dedamosios;
$h(z_h)$	lauko nehomogeniškumas zonoje z_h ;
z_e, z_c	atstumas tarp induktorių (kurių kiaurymių centrinės ašys yra vienoje ašyje) šoninių sienelių ir jų centrų.

Turinys

IVADAS.....	1
Tiriamoji problema.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. STIPRAUS MAGNETINIO LAUKO IMPULSINIŲ INDUKTORIŲ	
ANALIZĖS IR KŪRIMO ANALITINĖ APŽVALGA.....	7
1.1. Stipraus magnetinio lauko generavimo būdai	7
1.2. Stipraus impulsinio magnetinio lauko induktoriai.....	11
1.3. Programinė įranga induktorių projektavimui ir modeliavimui	21
1.4. Pirmojo skyriaus išvados. Darbo uždavinių formulavimas	32

2. IMPULSINIO INDUKTORIAUS MATEMATINIS MODELIS IR GEOMETRIJOS PAIEŠKOS PROGRAMA	35
2.1. Induktorių geometrijos sintezės metodika	35
2.2. Induktoriaus termodinaminis modelis	37
2.3. Induktoriaus elektromagnetinis modelis	42
2.4. Induktoriaus magnetomechaninis modelis	43
2.5. Induktorių geometrijos paieškos algoritmas	44
2.6. Daugkartinio naudojimo induktorių geometrijos paieškos programa	48
2.7. Antrojo skyriaus išvados	49
3. STIPRAUS IMPULSINIO MAGNETINIO LAUKO INDUKTORIŲ PARAMETRŲ NUSTATYMAS	51
3.1. Laidininkų parinkimas ir vienos vijos skerspjuvių sudarymas	51
3.2. Cu ir CuNb laidininkų induktorių išilimo tyrimas	53
3.3. Magnetinio lauko skaičiavimas Cu ir CuNb laidininkų induktoriams	57
3.4. Įtempių analizė Cu ir CuNb laidininkų induktoriuose	58
3.5. Cu ir CuNb laidininkų induktorių „gyvavimo zonos“ nustatymas	60
3.6. Induktorių „gyvavimo zonos“ priklausomybė nuo maitinimo šaltinio energijos ir induktoriaus vidinės kiaurymės skersmens	64
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	66
4. TYRIMO REZULTATŲ PATIKRA IR TAIKYMAS	69
4.1. Tyrimo rezultatų patikra <i>ANSYS® Multiphysics®</i> aplinkoje	69
4.2. Eksperimentinė tyrimo rezultatų patikra	74
4.3. 50 T klasės induktorius	76
4.4. Magnetinė sistema kriostatui	77
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados	85
BENDROSIOS IŠVADOS	87
LITERATŪROS SĄRAŠAS	89
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	95

Contents

INTRODUCTION	1
Problem of the work	1
Topicality of the work	2
Object of research.....	3
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methodology of research.....	4
Scientific novelty of the work and its value	4
Practical value of the work results.....	4
Defended propositions.....	5
Approbation of the work results	5
The scope of the dissertation	6
 1. ANALYTICAL REVIEW OF HIGH MAGNETIC FIELD PULSED	
INDUCTOR DESIGN AND ANALYSIS	7
1.1. Techniques to generate high magnetic field.....	7
1.2. High magnetic field inductors	11
1.3. Software for inductor design and modelling	21
1.4. Conclusions of the first chapter. Formulation of the dissertation tasks...	32

2. HIGH MAGNETIC FIELD INDUCTOR MATHEMATICAL MODEL AND GEOMETRY RETRIEVAL PROCEDURE.....	35
2.1. Inductor geometry synthesis technique	35
2.2. Inductor thermodynamic model	37
2.3. Inductor electromagnetic model	42
2.4. Inductor magnetomechanical model.....	43
2.5. Inductor geometry retrieval algorithm.....	44
2.6. Long-life operation inductor retrieval program.....	48
2.7. Conclusions of the second chapter	49
3. RETRIEVAL OF HIGH MAGNETIC FIELD LONG-LIFE OPERATION INDUCTOR PARAMETERS.....	51
3.1. Conductor selection and one winding cross-section formation	51
3.2. The investigation of Cu and CuNb wire inductor heating.....	53
3.3. Magnetic field calculation for Cu and CuNb wire inductors.....	57
3.4. Stress analysis in Cu and CuNb wire inductors.....	58
3.5. Determination of “vitality zones” for Cu and CuNb wire inductors	60
3.6. Inductor “vitality zone” dependence on power supply energy and inductor inner diameter	64
3.7. Conclusions of the third chapter.....	66
4. VERIFICATION AND APPLICATION OF RESEARCH RESULTS....	69
4.1. Verification of research results in <i>ANSYS® Multiphysics®</i>	69
4.2. Verification of research results experimentally	74
4.3. 50 T class inductor	76
4.4. Magnetic system for cryostat.....	77
4.5. Conclusions of the fourth chapter.....	85
GENERAL CONCLUSIONS	87
REFERENCES	89
LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	95

Ivadas

Tiriamoji problema

Nedidelių matmenų impulsinių induktorių, gebančių generuoti daugiau nei 50 T magnetinio lauko srauto tankio (toliau – magnetinio lauko) impulsus, kūrimas yra sudėtingas daugiamatis uždavinys, kurį sprendžiant tenka susidurti su termodinaminiais, elektromagnetiniais, magnetomechaniniais impulso metu induktoriuose vykstančiais procesais ir didelėmis perkrovomis (kA srovės, GPa įtempiai, 1000 K/ms temperatūros pokyčiai apvijose), kurių detali analizė yra būtina norint pagerinti/parinkti teisingą induktoriaus geometriją ir medžiagas jam gaminti (Groessinger 1982; Herlach *et al.* 2001). Iš tikrųjų užduotis yra dar sudėtingesnė, nes impulso metu induktoriuje vykstantys procesai stipriai įtakoja vienas kitą ir analizuojant kylančias problemas atskirais pjūviais, sprendimas yra mažai tikėtinas. Brangios medžiagos, žmonių darbo valandos, svarbūs įrenginiai ir numatyti sudėtingi didelę mokslinę vertę turintys eksperimentai gali nueiti perniek ar būti sugadinti induktoriui žuvus dėl netinkamai įvertintų ar paprasčiausiai empiriškai parinktų jo parametrų, todėl visų impulsiniuose daugiasluoksniuose induktoriuose vykstančių procesų kompleksinė analizė yra būtina.

Darbe analizuojamos ir sprendžiamos stipraus impulsinio magnetinio lauko daugkartinio (daugiau 100 impulsų) naudojimo induktorių, gebančių generuoti

iki 50 T, 1–3 ms magnetinio lauko impulsus, kūrimo ir ilgaamžiškumo problemos.

Tyrimams pasirenkama klasikinė tokių induktorių konstrukcija: ant tam tikro skersmens (dažniausiai 12–20 mm) tekstolito vamzdelio suvynioti keli vijų sluoksniai, kai tame pačiame sluoksnyje vijos tarpusavyje atskirtos elektrine izoliacija, kiekvieno sluoksnio išorė atskirai sutvirtinta specialaus pluošto siūlais ir užlieta epoksidine derva, o induktorius patalpintas į 4–7 mm sienelės storio tvirtos medžiagos cilindrą. Nuo vijų ir sluoksnių skaičiaus priklauso induktoriaus elektriniai parametrai – apvijų varža ir induktyvumas, kurie tiesiogiai lemia induktoriaus išilimą, srovės impulso amplitudę, trukmę ir jo formą, generuojamo magnetinio lauko amplitudę ir mechaninius įtempius, todėl induktoriaus vijų ir sluoksnių skaičiaus parinkimas, norint generuoti tam tikrų parametrų magnetinį lauką, yra problema, sprendžiama šiame darbe.

Darbo aktualumas

Moderniausiais ir mokslą bei techniką į priekį vedančiais visada tampa tie, kurie pasiekia šiomis dienomis žinomų galimybių ribas, todėl kuriami „galingiausi“, „greitaveikiškiausi“, „ekonomiškiausi“, „mažiausi“. Puikiai žinoma, kad stiprūs magnetiniai laukai – galingas įrankis moksliniuose tyrimuose, ne tik padedantis atverti naujus puslapius mokslo istorijoje, bet ir suteikiantis galimybes didinti jau atliktų tyrimų tikslumą, išryškinti silpnuose magnetiniuose laukuose sunkiai stebimus procesus ar medžiagų savybes (Rosseel *et al.* 2001a). Šiuo metu įvairiomis techninėmis priemonėmis pasiekiami 40–45 T nuolatiniai ar kvazi-nuolatiniai ir > 800 T impulsiniai magnetiniai laukai.

Stipraus pastovaus magnetinio lauko generavimas daugeliu atvejų yra didelė prabanga dėl reikalingos infrastruktūros, medžiagų, energetinių ir kitų resursų, todėl paskutiniu metu mokslininkų žvilgsniai krypta į nedaug energijos suvartojančias, didelius galingumus pasiekiančias, minimalios infrastruktūros reikalaujančias, saugias impulsines technologijas ir impulsinius magnetinius laukus, kurių dažniausiai visiškai pakanka daugeliui naujų eksperimentinių tyrimų atlikti. Paplitę stipraus iki 40–60 T impulsinio magnetinio lauko generavimo būdai įgailino daugelį mažesnius biudžetus turinčių universitetų laboratorijų ar mokslinių įstaigų pasiekti pasaulinio lygio rezultatų įvairiose mokslinių tyrimų srityse, tokiose kaip dalelių fizikiniai tyrimai, molekulinė biologija, medicina, medžiagotyra ir t.t. (Groessinger 1982; Herlach 1985; Herlach *et al.* 2001; Herlach 2002).

Visai neseniai daugelis problemų, susijusių su stipraus magnetinio lauko generavimu, buvo sprendžiamos analitiškai, tačiau šiuo metu daug dėmesio skiriama kompiuterinei impulsinių induktorių analizei. Paplitę komerciniai programiniai paketai (pvz., *ANSYS® Multiphysics®*), operuojantys baigtinių elementų

metodų pagrindu, gali spręsti daugelį inžinerinių uždavinių, todėl sėkmingai taikomi jau sukurtų induktorių tobulinimui ir analizei, tačiau jie nėra pakankamai lankstūs ir pritaikyti paieškos ar optimizavimo uždaviniams spręsti (Peng *et al.* 2005; Zhrlitsyn *et al.* 2006). Dėl šios priežasties daugelis didžiųjų pasaulio laboratorijų ir tyrimų institutų kuria tokią programinę įrangą atskirai savo reikmėms (Vanacken *et al.* 2001), tačiau jų neplatina. Šiame darbe kuriamas programinis aprūpinimas stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorių skaičiavimams, padėsiantis VGTU mokslininkams vienoje iš pasaulyje prioritetinių mokslo sričių – tyrimams stipriuose magnetiniuose laukuose (Committee on Opp. In HMF Science 2005).

Tyrimų objektas

Darbo tyrimo objektai – stipraus impulsinio magnetinio lauko induktoriai.

Darbo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas – sukurti impulsinių induktorių geometrijos sintezės metodiką ir parametrų, užtikrinančių konstrukcijos ilgaamžiškumą, paieškos algoritmus ir programinę įrangą.

Darbo uždaviniai

Tikslui pasiekti darbe numatyta spręsti tokius uždavinius:

1. Sukurti impulsinių induktorių geometrijos sintezės metodiką.
2. Sukurti induktoriaus matematinį modelį ir atlikti termodinaminių, elektromagnetinių ir magnetomechaninių procesų analizę.
3. Nustatyti daugkartinio naudojimo impulsinių induktorių parametrų tinkamumo kriterijus ir sukurti geometrijos paieškos algoritmą.
4. Nustatyti daugkartinio naudojimo impulsinių induktorių tinkamų parametrų ribas.
5. Sukurti impulsinių induktorių prototipus įvairiems medžiagų fizikiniams tyrimams.

Tyrimų metodika

Darbe naudojami analitiniai, skaitmeniniai ir eksperimentinio tyrimo metodai. Induktorių įšilimo, šilumos sklaidos į aplinkinius sluoksnius, magnetinio lauko pasiskirstymo, įtempimų skaičiavimui bei geometrijos paieškai sukurti analitiniai modeliai perkelti į skaitmeninius *Matlab® Simulink®* ir *Matlab®* aplinkoje. Gautų rezultatų patikra atlikta skirtingų geometrijų induktorius modeliuojant *ANSYS® Multiphysics®* aplinkoje ir bandant VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Sukurtas impulsinio induktoriaus matematinis modelis įgalina atlikti termodinaminių, elektromagnetinių ir magnetomechaninių procesų analizę, įvertinti daugelį svarbių induktorių išėjimo parametrų: generuojamo magnetinio lauko amplitudę, impulso formą, pereinamojo proceso trukmę, apvijų bei aplinkinių sluoksnių įšilimą, mechaninių įtempių pasiskirstymą, nurodžius jų įėjimo – geometrinčius ir naudojamų medžiagų fizikinius parametrus.

Pasiūlyta induktoriaus geometrijos sintezės metodika įgalina sukurti tokių induktorių geometrijos paieškos, pasirinkus norimų išėjimų parametrų ribas, algoritmus ir programinę įrangą. Paieška atliekama nurodžius vienos vijos skerspjuvio geometriją ir medžiagų fizikinius parametrus. Paieškos rezultatas – induktorių „gyvavimo zona“ – pagrindinių parametrų (galimas vijų ir sluoksnių skaičius, vidinės kiaurymės skersmuo, pereinamojo proceso trukmė, maksimalus generuojamas magnetinis laukas, maksimalūs mechaniniai įtempiai, energijos šaltinio, medžiagų ir aplinkos elektrofizikiniai parametrai), užtikrinančių konstrukcijos ilgaamžiškumą, visuma, su kuriais induktoriai generuoja maksimalų magnetinį lauką, neperkaista ir suminiai mechaniniai įtempiai juose neviršija medžiagų leistinųjų.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlyti sprendimai garantuoja paprastesnę, greitesnę, pigesnę, patikimesnę, analize paremtą impulsinių induktorių gamybą ir eksploatavimą, medžiagų, skirtų induktoriams vynioti, aplinkų, kuriose vyksta eksperimentai, tinkamą parinkimą, įgalina spręsti sudėtingus (skirtingų parametrų laidininkai induktoriaus sluoksniuose, skirtingi sluoksnių storiai) induktorių vyniojimo uždavinius. Programinė įranga nesudėtinga, todėl ją nesunkiai galima tobulinti, derinti, keisti,

pritaikyti skirtingiems ar daliniams uždaviniams, su kuriais susiduriama vyniojant impulsinius induktorius, spręsti.

Remiantis darbo rezultatais, pasiūlytas 50 T klasės impulsinio induktoriaus prototipas ir magnetinė sistema kriostatui fizikinėms medžiagų savybėms tirti. Sukurtoji programinė įranga taikoma VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje ir Puslaidininkių fizikos institute.

Ginamieji teiginiai

1. Geometrijos sintezės metodika leidžia mažiausiai viena eile sparčiau nei baigtinių elementų metodais operuojančiuose programiniuose paketuose sudaryti modelius induktorių pereinamųjų procesų analizei, nurodžius vienos vijos skerspjūvio geometriją ir medžiagų sudėtį bei induktoriaus vijų ir sluoksnių skaičių.
2. Induktorių „gyvavimo zonos“ – jų pagrindinių parametų, užtikrinančių konstrukcijos ilgaamžiškumą, visumos egzistavimą iš esmės apibrėžia generuojamo magnetinio lauko, medžiagų leistinų šiluminių ir mechaninių perkrovų reikšmės.
3. Sukurtasis matematinis modelis, įgalinantis atlikti termodinaminių, elektromagnetinių ir magnetomechaninių procesų induktoriuose analizę, yra adekvatus, nes parametų skaičiavimo rezultatų neapibrėžtis neviršija 5 % ribos lyginant su eksperimentine ir modeliuojant tuos pačius procesus kita programine įranga.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tematika atspausdinti devyni moksliniai straipsniai: trys – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į Thomson ISI Web of Science sąrašą (Bartkevičius *et al.* 2009; Bartkevičius *et al.* 2008a; Bartkevičius *et al.* 2007), keturi – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į INSPEC ir COPENICUS duomenų bazes (Bartkevičius *et al.* 2008b; Bartkevičius *et al.* 2006; Stankevič *et al.* 2005; Višniakov *et al.* 2006c), vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI Proceedings duomenų bazėje (Višniakov *et al.* 2006d), vienas – kitų konferencijų medžiagoje (Bartkevičius *et al.* 2008c).

Darbo rezultatai pristatyti ir aptarti 7-iose mokslinėse konferencijose:

1. Tarptautinėje konferencijoje „2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference (EAPPC'08)“, Lietuvoje, Vilniuje.

2. XVI-ajame Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos asociacijos seminare, 2008, Vilniuje.
3. Tarptautinėje konferencijoje „Measurement“ 2007, Slovakijoje, Smolenicėje.
4. Tarptautinėje konferencijoje „5-th International DAAAM Baltic Conference „Industrial Engineering – Adding Innovation Capacity of Labour Force and Entrepreneurs“, Estijoje, Taline.
5. 10-ojoje, 11-ojoje ir 12-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Elektronika‘2006, 2007, 2008, Lietuvoje.

Taip pat autoriaus darbais remtasi šiuose remiamuose moksliniuose ir kvalifikaciniuose darbuose:

1. Nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių tyrimai ir jų taikymas energetikoje ir aukšto dažnio elektronikoje. Aukštųjų technologijų plėtros programos nanotechnologijų ir elektronikos krypties mokslinių tyrimų darbas, sutartis Nr. F-2007/9, F-2008/7, užsakovas: Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas – Puslaidininkių fizikos institutas, 36 ir 17 lapų.
2. Funkcionuojančių ekstremaliomis sąlygomis nano- ir mikroelektroninių įtaisų defektų tyrimas. Lietuvos ir Ukrainos dvišalio bendradarbiavimo MTEP programa, sutartis Nr. V-2008/35, užsakovas: Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas, 23 lapai.
3. Kvalifikacinio mokslo darbo ataskaita „Stiprių magnetinių laukų generatorių optimizavimas ir taikymas“ 2005–2009.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros ir publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Disertacijoje yra 110 kompiuteriu sumaketuotų (teksto redaktoriumi *Microsoft Word® 2003*) teksto puslapių, 36 paveikslai, 7 lentelės ir 27 numeruotos formulės. Rašant disertaciją panaudoti 78 literatūros šaltiniai.

Stipraus magnetinio lauko impulsinių induktorių analizės ir kūrimo analitinė apžvalga

1.1. Stipraus magnetinio lauko generavimo būdai

Šiomis dienomis stiprus magnetinis laukas taikomas daugelyje mokslo ir technikos sričių (pvz., kietojo kūno, organinių ir neorganinių medžiagų, superlaidumo, elementariųjų dalelių fizikos, kvantinės mechanikos reiškinių tyrimuose, biologijoje, molekulinėje biologijoje, chemijoje, biochemijoje, botanikoje, optikoje, medicinoje, metalo, karinėje pramonėje ir t.t.) (Berthier *et al.* 2002; Committee on Opp. In HMF Science 2005; Herlach 1985). Egzistuoja daugelis stipraus magnetinio lauko generavimo būdų, o įvairių technologijų taikymą lemia eksperimentų ir tyrimų specifika (pvz., medicininiai, kietojo kūno fizikiniai tyrimai, metalų formavimas ir t.t.). Magnetinį lauką galima charakterizuoti homogeniškumu, forma erdvėje, įvairiais energetiniais rodikliais, tačiau vienas iš svarbiausių kriterijų – jo amplitudė ir trukmė. Stiprūs magnetiniai laukai, atsižvelgiant į jų egzistavimo trukmę, skirstomi į statinius (nuolatinius), kvazistatinius ir impulsinius.

Statiniai (nuolatiniai) magnetiniai laukai

Paprasčiausiais elektromagnetais, naudojant 0,5–40 kW energijos šaltinius, generuojami iki 4 T nuolatiniai magnetiniai laukai. Tokie elektromagnetai dar taikomi, kai reikalingos ypatingos lauko charakteristikos (pvz., didelis lauko homogeniškumas, lauko pastovumas) (Basic Research Needs for Materials 2007). Paplitę ir magnetai (solenoidai, Bitter'io magnetai), gebantys generuoti iki 40 T magnetinį lauką, kai jų apvijos aušinamos vandeniu ar oru (Parenboom *et al.* 2004). Tokių magnetų svarba sumažėjo, kai buvo pradėti kurti superlaidūs magnetai – jais nesunkiai galima pasiekti > 7 T magnetinius laukus.

Superlaidžių magnetų apvijų gamybai naudojami II-ojo tipo superlaidininkai (Groessinger 1982; Herlach *et al.* 2001), kurių kritinė temperatūra $T_C > 4,2$ K, o krizinis magnetinis laukas viršija 10 T. Daug vilčių superlaidžių magnetų gamybai teikia atrasti aukštatemperatūriai superlaidininkai, tokie kaip *BSCCO-2212* ($T_C(0\text{ T}) \sim 85$ K) arba *BSCCO-2223* ($T_C(0\text{ T}) \sim 110$ K), bei atrastos naujos MgB_2 superlaidumo savybės: jo kritinis stovės tankis $\sim 10^5$ A/mm² iki 40 T (Devred *et al.* 2005; Lee *et al.* 2008). Superlaidūs magnetai sprendžia magnetinių laukų kūrimo didesnėse erdvėse problemą. Nesudėtingomis priemonėmis pasiekiami iki 20–25 T magnetiniai laukai ir tokius magnetus turi dauguma didžiųjų pasaulio laboratorijų (Aubert *et al.* 2006; Boebinger *et al.* 2003; Gao 2001; Hagiwara *et al.* 2006; Hansel *et al.* 2006; Jaime *et al.* 2006; Kiyoshi *et al.* 2003; Kiyoshi *et al.* 2006; Mossang *et al.* 2003; Mossang *et al.* 2004; Suski *et al.* 2006; Wosnitza *et al.* 2006), tačiau viena iš problemų – reikalingi nemaži energetiniai resursai (nepertraukiamas kW–MW galios elektros maitinimas) kriogeninėms temperatūroms palaikyti.

Dar didesnės magnetinių laukų vertės (>40 T) pasiekiamos kuriant hibridines sistemas. Dažnai hibridinį magnetą sudaro išorinis superlaidus magnetas ir į jo vidų patalpintas superlaidus solenoidas ar oru/vandeniu aušinamas Bitter'io magnetas, tačiau gaminami įvairių kombinacijų (konstrukcijų, aušinimo principų, medžiagų) hibridai/polimagnetai (Watanabe *et al.* 2001). Išorinio ir vidinio magnetų sukurti magnetiniai laukai sudedami (superpozicija), ir šiuo metu jau yra pasiektas 45 T nuolatinis magnetinis laukas (Boebinger *et al.* 2003; Jaime *et al.* 2006; Miller 2003). Daugiau nei 40 T nuolatinį magnetinį lauką generuojančius hibridinius magnetus siekia pasigaminti arba jau yra pasigaminusi ne viena pasaulio laboratorija (Aubert *et al.* 2006; Bird *et al.* 2001; Inoue *et al.* 1996; Kiyoshi *et al.* 2003; Leupold *et al.* 1992). Hibridiniai magnetai įgalina atlikti unikalius fizikinius eksperimentus, tačiau jie itin brangūs, todėl jų kūrimu ir diegimu užsiima tik didžiausios pasaulio laboratorijos. Tokių magnetų suvartojama galia yra 20–40 MW. Labai svarbi yra tokių laboratorijų iniciatyva duris atverti ir kitų šalių bei įstaigų mokslininkams, kurių tyrimų sritys yra itin perspektyvios, o reikalingos eksperimentinės bazės nėra (Mossang *et al.* 2004).

Generuojamų kvazistatinių magnetinių laukų trukmė daug kartų viršija impulsinių magnetinių laukų gyvavimo trukmę (ms ar mažiau), tačiau jie gyvuoja trumpiau nei nuolatiniai magnetiniai laukai. Tokiems tikslams reikalingas pakankamas energijos šaltinis ir pakankamą šiluminį atsparumą turintis magnetas. Tokiais energijos šaltiniais gali būti: kondensatorių baterija (reikalingas srovės reguliavimas, generuojami 0,1–5 s trukmės 20–70 T impulsai) (Gao 2001; Groessinger *et al.* 2006; Herlach 2004; Herrmannsdoerfer *et al.* 2003; LNCMP-team 2006; Singleton *et al.* 2004; Suski *et al.* 2006); kintamos srovės tinklas su lygintuvu (Groessinger 1982; Herlach *et al.* 2001); nedidelės vidinės varžos nuolatinės srovės generatorius su galios reduktoriumi, gaminantis MJ ir daugiau energijos (Herlach *et al.* 2001; Praddaude *et al.* 1974). Kvazistatinių magnetinių laukų generavimas turi privalumų prieš impulsinius: indukcinės srovės mažesnės dėl mažų $d\Phi/dt$, nesuardoma terminė pusiausvyra (maži dT/dt), geresnis signalų/triukšmų santykis, juose galima atlikti daugelį eksperimentų, kurie atliekami statiniuose magnetiniuose laukuose, nes jie trunka pakankamai ilgai. Pagrindinis tokių magnetų trūkumas – jie ir jų eksploatacija ir maitinimo šaltiniai yra pakankamai brangūs ir sudėtingi.

Impulsiniai magnetiniai laukai

Kuriant impulsinius magnetinius laukus remiamasi idėja, kad per labai trumpą laiką mechaninė medžiagų inercija yra didesnė nei medžiagų takumo riba (Groessinger 1982). Tokie magnetai maitinami prieinamais ir silpnais energijos šaltiniais, juos gamina ir tiria be išimties visos pasaulio laboratorijos, kuriose dirbama stiprių magnetinių laukų srityje (taip pat ir Lietuvos PFI esanti VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorija) (Herlach *et al.* 2001). Generuojant labai trumpą impulsą išgaunamos išpūdingos galios ir magnetinio lauko impulsai, kurių trukmė dažniausiai neviršija 10–50 ms. Kaip žinia, sukurti statiniai ir kvazistatiniai magnetiniai laukai neviršija 40–60 T, tačiau tam tikrose srityse (plazmos suspaudimo, dalelių kvantinių-elektrodinaminių efektų, tokių kaip spin'ų ir sukimo momento, kietojo kūno fizikos stipriuose magnetiniuose laukuose tyrimai) tai nėra daug ir todėl dedama daug pastangų norint sukurti 100 T ir didesnius magnetinius laukus (Fowler 1998). Žvelgiant į praeitį, akivaizdu, jog daug svarbių atradimų/išradimų buvo padaryti tada, kai generuojamo magnetinio lauko amplitudė laboratorijose buvo padidinta (pvz., Zeeman'o efektas, kvantinis Hall'o efektas) (Herlach *et al.* 2001; Herlach 2002).

Tenka išskirti daugkartinius ir vienkartinus eksperimentus. Pirmuosiuose kuriami laukai iki 100 T. Jų trukmė dažniausiai neviršija 1–50 ms. Antraisiais pasiekiami magnetiniai laukai, viršijantys 100 T. Jų trukmė dažniausiai – tik keletas μ s.

XX amžiaus pradžioje atlikti eksperimentai padėjo atrasti technologiškai paprastus būdus generuoti trumpus iki 50 T amplitudės magnetinio lauko impul-

sus. Tai buvo daroma sukaupią energiją (kondensatorių, induktyvumų baterijose, kinetinę variklio energiją rotorijuje) iškraunant per daugiavijį daugiasluoksnį solenoidą, Bitter'io technologija pagamintą induktorių arba spiralinį diskinių induktorių. Tai – paprasta idėja, atnešusi didelius iššūkius šiuolaikiniam mokslui, nes norint induktorių naudoti keletui ar daugeliui impulsų generuoti, jį kuriant tenka atsižvelgti į apvijomis tekančios elektros srovės sukeltą išilimą (Joule'io šilumą) bei tos srovės ir generuojamo magnetinio lauko sąveikos sukurtus mechaninius įtempius (Lorentz'o jėgos). Kaip jau minėta, generuojamo magnetinio lauko impulso trukmė daugeliu atvejų neviršija 1–50 ms, todėl šilumos sklaida impulso metu į aplinkinius sluoksnius nevyksta (procesas artimas adiabatiniam). Induktoriaus vijų ir tarpsluoksninė izoliacija (arba izoliacija tarp diskų Bitter'io induktoriuose) nesudegs, jei apvijų išilimas neviršys izoliacijos leistinojo, o induktorius nebus pažeistas mechaniškai, jei mechaniniai įtempimai neviršys jo konstrukcinių medžiagų tamprumo ribų. Visų šių procesų įvertinimas yra sudėtingas uždavinys, kurį dar labiau apsunkina tai, jog kylant temperatūrai impulso metu keičiasi apvijų varža, o dėl deformacijų – ir induktoriaus induktyvumas. Tai stipriai įtakoja apvijomis tekančią srovę, generuojamą magnetinį lauką ir tuos pačius mechaninius įtempius. Daug kilusių problemų jau yra išspręstos induktorių vyniojimui naudojant naujai sukurtas medžiagas ir modeliavimų kompiuteriais rezultatus, tačiau bet kokios medžiagos mechaninis atsparumas ir šiluminė talpa yra riboti, todėl, norint generuoti vis stipresnį magnetinį lauką, tenka imtis konstrukcijos-vyniojimo-aušinimo optimizacijos, toliau kurti naujas medžiagas ir technologijas (Basic Research Needs for Materials 2007; Groessinger *et al.* 2004; Huang *et al.* 2002; Lecouturier *et al.* 2004; Novickij *et al.* 2006b; Popova *et al.* 2000; Rosseel *et al.* 2001; Schneider-Muntau *et al.* 2004; Shikov *et al.* 2002; Sims *et al.* 1994; Višniakov *et al.* 2006a; Višniakov *et al.* 2006b).

Tokių induktorių projektavimui ir kūrimui skiriamas didelis dėmesys, nes jais gaunami magnetiniai laukai gerokai viršija nuolatinčius magnetinius laukus, o jų gamybos ir eksploatavimo kaštai yra daugelį kartų mažesni. Jau dabar kelios pasaulio laboratorijos yra paskelbę, jog sukūrė ir eksperimentams naudoja ~100 T daugkartinio naudojimo induktorius (Hagiwara *et al.* 2006; Kindo 2006; Swenson *et al.* 2004). Viena iš svarbių užduočių vykdant eksperimentus – sudaryti tas pačias eksperimentines sąlygas keletui eksperimentų, t. y. tik tokiu atveju galima tiksliai vertinti gautus rezultatus, todėl labai svarbus yra induktorių ilgamžiškumo didinimas (pvz., Amsterdamo universitete nuo 1969 m. veikusiu 40 T impulsiniu magnetu jau sugeneruota >100000 impulsų, iš kurių 10 % amplitudė viršijo 30 T (Herlach *et al.* 2001)). Visos įvardintos problemos plačiai nagrinėjamos šiame darbe.

Egzistuoja dvi galimybės generuoti itin didelės amplitudės (tačiau ns–μs trukmės) magnetinio lauko impulsus: sukaupią energiją iškrauti per vienavijus induktorius ir „suspausti“ generuojamą magnetinį lauką, t. y. didinti magnetinio

srauto tankį mažinant jo tūrį. Abiem būdais generuojant magnetinį lauką yra iš anksto žinoma, kad induktorius žus.

Generuojant magnetinį lauką pirmuoju būdu, jo amplitudę lemia daug faktorių, su kuriais nesusiduriama nagrinėjant daugkartinio magnetinio lauko generavimo induktorius: magnetinio srauto išsiskverbimas į laidininką, srauto sklaida, ribinis išilimas, mechaniniai vijų įtempiai, verčiantys jas judėti >1 km/s greičiu, maitinimo šaltinio ir viso grandyno greitaveika, kiti efektai, susiję su aukštomis įtampomis, didelėmis srovėmis, temperatūromis, eksperimentų sauga, atliekamų matavimų specifiška (Groessinger 1982; Hansel *et al.* 2006; Kojima *et al.* 2001; Kačianauskas *et al.* 2008a). Nepaisant viso to, daug pasaulio laboratorijų vykdo tokius eksperimentus, nes jie nėra brangūs, o generuojamo magnetinio lauko srauto tankis siekia 300 T ir tai atveria visiškai naujas galimybes (Herlach *et al.* 2001).

Magnetinis laukas „suspaudžiamas“ sprogdinimais (Groessinger 1982; Herlach *et al.* 2001) ir „suspaudžiant“ magnetiniu lauku (Kojima *et al.* 2001; Takeyama *et al.* 2004). Sprogdinant, sprogdmenų išlaisvinta energija pirminį magnetinį lauką „suspaudžia“ gniuždant elektrai laidų vamzdį. Panašus efektas gaunamas vamzdį gniuždant, pvz., vienavijio induktoriaus generuojamu magnetiniu lauku (elektromagnetinė indukcija vamzdžio sienelėse ir Lorentz'o jėgos). „Suspaudžiant“ magnetinį lauką daugiapakopiuose sprogdinimo generatoriuose, pasiekti iki šiol patys didžiausi – > 2000 T magnetiniai laukai (Boyoko *et al.* 1998). Tokius magnetinius laukus itin sunku išmatuoti, o procesus – prognozuoti ir valdyti. Skelbiama, jog jau sukurti daugkartinio naudojimo sprogdinimo generatoriai, egzistuoja keletas skirtingų technologijų (Altgilber 2008). Tokie generatoriai, dėl suprantamų priežasčių, šiuo metu yra tinkami tik nedaugeliui itin specifinių bandymų.

1.2. Stipraus impulsinio magnetinio lauko induktoriai

Kaip jau minėta 1.1 skyriuje, nedidelių matmenų daugiavijai stipraus magnetinio lauko induktoriai eksploatuojami beveik visose pasaulio laboratorijose, užsiimančiose tyrimais impulsiniuose magnetiniuose laukuose, dėl akivaizdžių priežasčių: juos, palyginus, lengva gaminti, dėl mažo svorio (iki kelių kilogramų) nesunku perkelti, transportuoti, jie skirti veikti naudojant mažus energijos šaltinius – dažniausiai kondensatorių baterijas, įkrautas iki 0.1–1 MJ, 5–15 kV. Visi išvardintieji faktoriai lemia tai, jog impulsiniais induktoriais generuojami magnetiniai laukai siekia pačių induktorių patvarumo ribas ir todėl maksimalus jų gyvavimo laikas – 300–1000 impulsų. Energijos kiekis, išlaisvinamas induktoriui žuvus, būna pakankamai nedidelis ir šitaip nesugadinama matavimo įranga. Suprantama, to visada stengiamasi išvengti po kiekvieno impulso kruopščiai

įvertinant induktoriaus būvį (jo geometriją, elektrinius parametrus ir t.t.), o kuriant induktorius – teisingai parenkant jų vidinės kiaurymės skersmenį, medžiagas bei nedidelę impulso trukmę (<10 ms). Vienas iš šių induktorių trūkumų yra tas, jog jų kiaurymės skersmuo, taigi ir bandinių bei matavimo jutiklių talpinimo erdvė, yra pakankamai maža – 8–25 mm (tačiau didelis magnetinio lauko srauto tankis), bet šias problemas sėkmingai padeda spręsti modernios technologijos: mikrojutiklių masyvai ir skaitmeniniai matavimo prietaisai, naujos medžiagos bandinių laikymo konstrukcijoms, kriogeninę aplinką kuriantys prietaisai ir t.t.

Pirmieji impulsinio magnetinio lauko induktoriai sukurti dar trečiajame XX a. dešimtmetyje. Šiuo metu tokiais induktoriais generuojamas daugkartinis 80–100 T (Kindo 2006; Swenson *et al.* 2004) magnetinis laukas. Amplitudės didėjimą nulėmė atsiradę analitiniai-skaitmeniniai tokių induktorių fizikos analizės metodai, išradimai medžiagotyros bei nanotechnologijų moksluose, todėl prieš konstruojant induktorius ar kuriant naujoves šioje srityje, labai svarbu žinoti, kas jau yra nuveikta, kokios medžiagos, konstrukcijos ir technologijos naudojamos gaminant tokius induktorius pirmaujančiose pasaulio laboratorijose. Reikia pažymėti, jog nors ši sritis sparčiai žengia į priekį, norint atsakyti į daugelį probleminių klausimų (induktorių tarnavimo laikas, šiame darbe ieškoma „induktoriaus gyvavimo zona“, identiškų eksperimentų pakartojamumas ir pan.), reikia vis detalesnės induktorių analizės, o tai, neabejotinai, ateityje paprastesnėmis priemonėmis padės pasiekti ir kasdienybėje, o ne tik moksle, taikyti dar didesnės amplitudės magnetinius laukus.

Pagrindinės pasaulio stiprių impulsinių magnetinių laukų laboratorijos

Didžiausios pasaulio laboratorijos, atliekančios mokslinius tyrimus impulsiniuose stipriuose magnetiniuose laukuose, įkurtos visose labiausiai ekonomiškai išsivysčiusiose valstybėse, šios programos tvirtinamos ir remiamos valstybiniu lygiu. Pagrindinės stiprių magnetinių laukų laboratorijos įkurtos:

Europoje: Nijmegen'e (2003 m., High Field Magnet Laboratory at K.U. Nijmegen, <http://www.hfml.science.ru.nl/>) (Parenboom *et al.* 2004), Berlyne (Humboldt High Magnetic Field Center) (Hansel *et al.* 2006), Dresden'e (Hochfeld Magnetlabor Dresden, Forschungszentrum Rossendorf, <http://www.fzd.de/db/Cms?pNid=580&pLang=de>) (Wosnitza *et al.* 2006), Oksfordo universitete (Clarendon Laboratory, <http://www.physics.ox.ac.uk/>) (Jones *et al.* 1998), Tulūzoje (Laboratoire National des Champs Magnetiques Pulses, Toulouse, France, <http://www.lncmp.org/une/GB/index.html>) (LNCMP-team 2006), Grenoble'yje (Grenoble High Magnetic Field Laboratory, C.N.R.S.-M.P.I., <http://ghmfl.grenoble.cnrs.fr/>) (Aubert *et al.* 2006), Leuven'e (Katholieke Universiteit Leuven, Pulsed Field Group, <http://fys.kuleuven.be/vsm/pf/>) (Herlach *et al.* 2006a; Rosseel *et al.* 2004), Maskvoje Kurchatov'o institute (Институт сверхпроводимости и физики твердого тела,

<http://www.kiae.ru/isfft.html>), Vroclave (International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures, Wrocław, <http://www.int.pan.wroc.pl/?lang=en&>) (Suski *et al.* 2006).

Japonijoje: Tokijuje (International Megagauss Science Laboratory, Institute for Solid State Physics, ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/english/contents/about/index.html>) (Kindo 2006), Osakoje (Kyokugen High Magnetic Field Laboratory, Osaka University, http://www.mag.cqst.osaka-u.ac.jp/index_e.html) (Hagiwara *et al.* 2006), Tsukuba'oje (Tsukuba Magnet Laboratory, National Institute for Materials Science, <http://www.nims.go.jp/TML/english/index.html>) (Kiyoshi *et al.* 2006), Kobe (Physics Department, Kobe University, http://www.phys.sci.kobe-u.ac.jp/v01/index_e.html), Sendai (Tohoku University, <http://www.tohoku.ac.jp/english/>) ir Okayama'oje (Department of Physics, Okayama University, http://www.physics.okayama-u.ac.jp/index_english.html) (Herlach *et al.* 2001).

JAV: Nacionalinė Los Alamos stiprių magnetinių laukų laboratorija (NHMFL, Los Alamos National Laboratory, Florida State University, USA, <http://www.magnet.fsu.edu/>) (Swenson *et al.* 2004).

Kitur: impulsiniai magnetai diegiami daugelyje didžiųjų Azijos (Gao 2001), Australijos, Europos (Herlach *et al.* 2001) ir kitų valstybių universitetų ir institutų laboratorijose (Sato *et al.* 2006). Tokia laboratorija įkurta Vilniuje Puslaidininkų fizikos institute (VGTU stiprių magnetinių laukų laboratorija, <http://www.pfi.lt/>, <http://www.sml.el.vgtu.lt/>). Visos laboratorijos yra aprūpinotos 40-60 T impulsinį magnetinį lauką generuojančiais induktoriais, sudėtinga kriogenine, matavimų ir valdymo technine įranga. Šiame skyriuje nagrinėjamos įvairios tokių induktorių konstrukcijos, pasiekimai kuriant specialias medžiagas bei problemos, su kuriomis susiduriama induktorius konstruojant, eksploatuojant ir tobulinant.

Stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorių gamybos uždaviniai

Pirmiausia, norint vynioti induktorius, kurie tarnautų keletą ar daugiau kartų (generuotų keletą impulsų), reikia suprasti jų veikimo principus ir procesus, juose vykstančius impulso metu. Dažnai, turint pakankamai medžiagų ir laiko resursų, tinkamą induktorių geometriją/konfigūraciją galima parinkti tiesiog empiriškai, t. y. suvyniojant induktorių ir laipsniškai didinant maitinimo šaltinio įtampą (energijos talpą) bei po kiekvieno eksperimento kontroliuojant induktoriaus elektrinius parametrus (induktyvumą, apvijų bei izoliacijos varžą), galima sugeneruoti maksimalų tai induktoriaus konstrukcijai leistiną magnetinį lauką. Būtent taip ir būdavo atliekami pirmieji bandymai, tačiau, suprantama, tai negali tenkinti visų šiuolaikinio mokslo poreikių, nes nenumatytas induktoriaus žuvinimas eksperimento metu dėl klaidingos gamybos gali sugadinti sunkiai pagami-

namus ir brangius bandinius, jų įvedimo prietaisus bei jutiklius (žūvant išlaisvinama MJ energija).

Yra paplitę keli visiškai skirtingi daugkartinio naudojimo impulsinių induktorių gamybos principai (Bitter'io diskų, spiraliniai diskiniai induktoriai), tačiau tiek šiame skyriuje, tiek visame darbe nagrinėjami tik induktoriai, kuriuose elektros srovė impulso metu teka suvyniotu laidininku, t. y. daugiavijai daugiasluoksniai impulsinio magnetinio lauko induktoriai.

Pasaulyje šiuo metu veikia šimtai stiprų ar silpnėsnių impulsinį magnetinį lauką generuojančių induktorių ir juos taip pat gaminti galima remiantis jau surinktais duomenimis, pvz.: iki X T amplitudės impulsinis magnetinis laukas pasiekiamas suvyniojant Y vijų ir Z sluoksnių W medžiagos laidininką su Q izoliacija ant R mm vidinio skerspjūvio S medžiagos vamzdžio, su A mm storio B medžiagos tarpsluoksniu sutvirtinimu ir C medžiagos D mm storio išoriniu sutvirtinimu, induktorių ir prijungiant jį prie E talpos F įtampos kondensatorių baterijos maitinimo šaltinio. Tokiu atveju induktoriaus konstrukcija yra žinoma ir jo tarnavimo laikas priklausys tik nuo praktinių vyniojimo ir gamybos įgūdžių, tačiau dažniausiai tenka spręsti visai kitą uždavinį, pvz.: reikia suvynioti induktorių, kuris generuotų X s trukmės Y T amplitudės magnetinio lauko impulsą, kurio kiauřymės skersmuo būtų ne mažesnis nei Z mm, o induktoriaus skerspjūvio matmenys neviršytų $W \times Q$ mm, nes to reikia, kad induktorius būtų pritaikytas individualiai laboratorijos įrangai. Į klausimą „Ar tai įmanoma?“ galima atsakyti tik žinant tokių induktorių konstravimo principus, ribojančius veiksnius ir išmanant jų analizę.

Naudojami laidininkai, induktorių vyniojimas

Induktoriams vynioti gaminami ir naudojami daugiausiai stačiakampio formos (gaunamas didesnis užpildymo faktorius nei su apskritimo formos skerspjūvio laidininkais) tam tikro skerspjūvio laidininkai ir į tai būtina atsižvelgti projektuojant induktorius, nes individualūs užsakymai laidininkams yra labai brangūs arba neįmanomi dėl jų gamybos technologijos. Laidininkų suvyniojimui gali būti naudojamos specialios automatizuotos staklės (Suzuki *et al.* 2001), tačiau tai nėra būtina: jei laidininko skersmuo nėra didelis, gali pakakti paprastų pedalu valdomų motorizuotų (geriausia – reversinių) ar net mechaninių, ranka sukamų, staklių su vielos įtempimą palaikančiu mechanizmu.

Gaminant laidininkus induktoriams, susiduriama su dilema: geras elektrinis laidumas ir didelė šiluminė talpa (pvz., Cu) dažnai lemia tokių medžiagų silpną mechaninį atsparumą ir atvirkščiai (induktoriaus apvijomis tekančios srovės ir sukurto magnetinio lauko sąveikos rezultatas – milžiniškos Lorentz'o jėgos) (Groessinger 1982). Šiuo metu induktorių laidininkams gaminti yra pasiteisinusios trys technologijos: 1. Skirtingo mechaninio atsparumo mikro/nanolaidininkų suvijimas į vieną laidininką – specialią lydinių gamybą („mic-

ro/nanocomposite“) (Lecouturier *et al.* 2004; Popova *et al.* 2000; Schneider-Muntau *et al.* 2004; Shikov *et al.* 2002). 2. Gero laidumo, bet mažo atsparumo mikrolaidininkų suvijimas į vieną laidininką su mechanškai labai atsparios medžiagos mikrosiūlais („multicomposit“) (Rosseel *et al.* 2001b; Rosseel *et al.* 2004). 3. Gero elektrinio laidumo medžiagos laidininko „įvilkinimas“ į didelio mechaninio atsparumo medžiagos (pvz., nerūdijančio plieno) vamzdelį (Jones *et al.* 1998).

Pirmuoju būdu dažniausiai gaminami CuNb, CuAg, CuSn, CuBe, CuTa laidininkai. Naudojami μm skerspjūvio „suvyti“ laidininkai, kabelis pasižymi itin dideliu atsparumu – tamprumo riba siekia 1 GPa (tuo tarpu paprasto Cu – 250 MPa), o laidumas – 60–70 % IACS (International Annealed Copper Standard – gryno vario laidumo etalonas). Jų mechaninį atsparumą ir laidumą dar labiau bus galima padidinti (manoma, jog iki 2 GPa) pereinant prie nm technologijų ir pirmieji žingsniai jau žengti. Vienas iš tokių laidininkų trūkumų – jį sunku vynioti, o sulenkus kelis kartus toje pačioje vietoje, gali lūžti, tačiau, pvz., CuNb labai žemose temperatūrose pasižymi superlaidžiomis savybėmis. Antru būdu gaminami laidininkai sudaryti iš CuNb, CuAg, Cu ir Cu nerūdijančio plieno apvalkale plonų laidininkų. Viso laidininko skerspjūvyje yra kelios dešimtys plonų laidininkų gyslų ir mechanškai tvirto pluošto (anglies, S2 stiklo pluošto, Zylon[®], M5 ir pan.) gyslos. Tokie laidininkai, skirtingai nei pirmojo tipo, lengvai lankstomi, sunkiau lūžta, jų tamprumo riba siekia 1,4 GPa (iki 2 GPa 77 K temperatūroje), tačiau jų laidumas dažnai neviršija 45 % IACS. Trečiojo tipo laidininkai užtikrina gerą mechaninį atsparumą ir puikų laidumą, jų gamyba nėra brangi, tačiau vyniojimas yra itin sudėtingas – sulenkiami jie lūžta.

Laidininkai izoliuojami didelę elektrinę varžą ir gerą mechaninį atsparumą turinčių 30–100 μm storio medžiagų juosta (dažniausiai tam naudojamas S2 stiklo pluoštas, Zylon[®] arba specialiai tam sukurta medžiaga Kapton[®]). Izoliacinė juosta prie laidininko prilipinama terminiu būdu (jei tai Kapton[®]) arba priklijuojama (visad su ~50 % persidengimu – taip gaunama dviguba izoliacija) (Jones *et al.* 1998). Vyniojimas gali būti atliktas rankomis arba specialiomis staklėmis, po vyniojimo ir terminio apdorojimo, laidininkas impregnuojamas.

Vidinis vamzdelis, ant kurio pradedamos vynioti apvijos, gali būti pagamintas iš stiklo/anglies pluošto ar kitos medžiagos, turinčios didelį mechaninį atsparumą ir santykinę magnetinę skvarbą apytiksliai lygią vienetui ($\mu_r = 1$). Mechaninis atsparumas vamzdeliui nėra pats svarbiausias faktorius, nes induktoriaus apvijas Lorentz'o jėgos veikia spausdamos jas į vidų vamzdelio ašies (ašinės) kryptimi, į išorę (radialinės) ir apvijos liestinės kryptimis. Prieš vyniojant apvijas, vamzdelio paviršiuje turi būti paruošta vieta apvijoms „suguldyti“ (tai padeda tiksliau suvynioti apvijas), taip pat išpjovos (jei jų reikia), kad laidininką galima būtų sulenkti pereinant į kitą sluoksnį. Vidinės kiauřmės skersmuo impulsiniuose induktoriuose, kuriuose generuojamas 30–60 T magnetinis laukas,

kaip jau minėta, yra 8–25 mm skersmens. Jo dydį riboja trys pagrindiniai faktoriai: 1. Generuojamo magnetinio srauto tankis yra atvirkščiai proporcingas kiauřymės tūriui. 2. Ant mažų skerspjūvių vamzdelio vyniojimą riboja laidininko vyniojimo/lenkimo techninės galimybės. 3. Per maži kiauřymių skerspjūviai netinkami bandinių ir jutiklių įvedimui.

Stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorių konstrukcijų ypatybės

Analizuojant įvairias paplitusias impulsinių induktorių konstrukcijas (Askenazy 1998; Frings *et al.* 2002; Groessinger 1982; Herlach 1985; Herlach *et al.* 2001; Kakol *et al.* 2001; Kindo 2001; Kindo 2006; Lagutin *et al.* 2004; Marshall *et al.* 2004; Rosseel *et al.* 2001a; Rosseel *et al.* 2004; Suzuki *et al.* 2001; Swenson *et al.* 2004; Swenson *et al.* 2006) išaiškėja, jog galimi keli apvijų vyniojimo būdai:

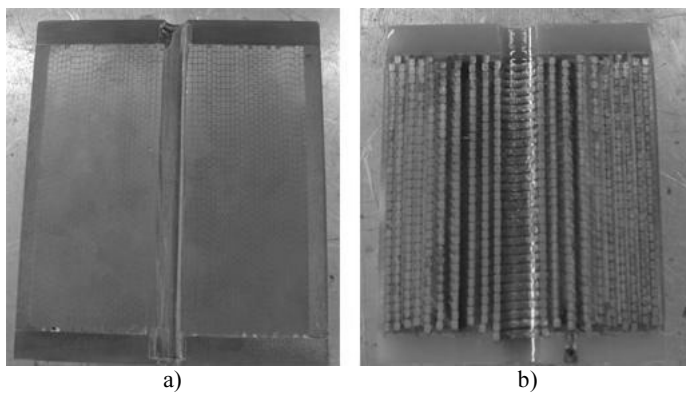
1. Induktoriai be/su tarp sluoksniniu vijų sutvirtinimu.
2. Pastovus vijų tankis be/su tarp sluoksniniu sutvirtinimu.
3. Nepastovus vijų tankis be/su tarp sluoksniniu sutvirtinimu.
4. Pastovus/nepastovus vijų tankis be/su tarp sluoksniniu sutvirtinimu, kai induktorius sudarytas iš kelių induktorių.
5. Pastovus/nepastovus vijų tankis be/su tarp sluoksniniu sutvirtinimu su skirtingų medžiagų laidininkais sluoksnuose.

Paprastiausią induktorių galima suvynioti jau aprašyta technologija izoliuotą laidininką taisyklingai vyniojant vija po vijos, sluoksnis po sluoksnio ir, jei apskaičiuotieji mechaniniai įtempiai neviršija tokio laidininko medžiagų ar pačios konstrukcijos leistinųjų, tokios vyniojimo technologijos dažnai pakaktų, tačiau ji turi keletą trūkumų. Kaip žinia, induktoriaus kiauřymėje generuojama magnetinio lauko amplitudė priklauso nuo kiauřymės skersmens (atvirkštinė priklausomybė), apvijomis tekančios srovės ir vijų skaičiaus, o Lorentz'o jėgos vijose, kuriose teka srovė – nuo magnetinio lauko ir srovės apvijose (Herlach *et al.* 2001; Montgomery 1980). Akivaizdu, jog pasiekti tą pačią magnetinio lauko amplitudę induktoriaus kiauřymės centre galima suvyniojus įvairius induktorius, pvz.: 1. Ndidelio skersmens kiauřymė, daugiau vijų, mažesnė srovė. 2. Didesnio skersmens kiauřymė, mažiau vijų, didesnė srovė. Daugeliu požiūrių antroji konstrukcija yra patrauklesnė: sunaudojama mažiau brangaus laidininko ir padidinama eksperimentinė erdvė (o tai itin svarbu). Jei antrojo tipo induktorius būtų pagamintas remiantis pastraipos pradžioje aprašyta vyniojimo technologija, impulsu metu jis gali būti sugadintas dėl per didelių mechaninių įtempių (pakitusi geometrija, sugadinta apvijų izoliacija dėl skirtinguose sluoksnuose esančių ap-

vijų kontakto). Kadangi radialine kryptimi (statmenai induktoriaus ašiai) veikiančios įtempiai dominuoja, ši problema sprendžiama induktoriaus sluoksnius papildomai sutvirtinant. Yra keletas paplitusių sutvirtinimo būdų:

1. Tarpsluoksninis sutvirtinimas vyniojant itin tvirto pluošto siūlus (pvz., *Zylon*[®], S2 stiklo pluoštą ir pan.);
2. Sutvirtinimas tarp sluoksnių įdedant plieninius cilindrus;
3. Sutvirtinimas kiekvieną sluoksnį vyniojant ant skirtingo skersmens tvirto pluošto vamzdelio ir juos sumaunant į vieną induktorių.

LNCMP (Tulūzoje, <http://www.lncmp.org/facilities/GB/coils.htm>) pagamintų induktorių be tarpsluoksninio sutvirtinimo ir su juo skerspjūviai parodyti 1.1 paveiksle. Šiuo metu pasaulyje labiausiai paplitę induktorių konstrukcijos su tarpsluoksniniu sutvirtinimu dėl labai paprastos priežasties: norint generuoti vis stipresnius magnetinius laukus, vijų laidininkų mechaninis atsparumas yra viršijamas (pvz., Cu tamprumo riba yra tik ~250–300 MPa ir tai atitinka tik ~30 T, 77 K temperatūroje), todėl reikalingas papildomas sutvirtinimas. Suprantama, tam tikriems eksperimentams pakanka nedidelio magnetinio lauko ar mažo skerspjūvio kiauřymės, ir tokiu atveju induktorius gali būti suvyniotas be tarpsluoksninio sutvirtinimo – tai ir daug paprastesnė technologija.



1.1 pav. Induktoriaus be tarpsluoksninio sutvirtinimo (a, 60 T, 11 mm) ir su juo (b, 60 T, 26 mm) skerspjūviai

Magnetinis laukas didžiausias pirmose – vidinėse apvijose, ir žymiai mažesnis induktoriaus išorėje ir tai reiškia, kad apvijomis tekant tai pačiai srovei, didžiausios Lorentz'o jėgos veiks vidines apvijas. Tuo remiantis, induktoriai vyniojami labiau sutvirtinant vidines apvijas, t. y. po pirmųjų sluoksnių dedant daugiau medžiagos tarpsluoksniniam sutvirtinimui (1.1 pav., b). Sutvirtinimo

sluoksnio storis gali būti parenkamas atskirai kiekvienam vijų sluoksniui, atlikus įtempimų analizę induktoriaus skerspjūvyje srovei pasiekus maksimumą, tačiau dažniau induktoriaus skerspjūvis suskirstomas sektoriais ir kiekviename sektoriuje vyniojamas tokio pat storio tarpsluoksninis sutvirtinimas. Induktorių su nepastoviu vijų tankiu vyniojimas yra pranašus tuo, jog efektyviai išnaudojamos medžiagos atsižvelgiant į impulso metu vykstančius procesus, apsaugomi induktorių vidiniai sluoksniai, induktorius po impulso greičiau atvėsta, tačiau tokių induktorių analizė yra sudėtinga.

Tokie induktoriai, su optimaliu tarpsluoksniniu sutvirtinimu, gaminami, pvz., Leuven'o stiprių magnetinių laukų laboratorijoje (Lagutin *et al.* 2004; Rosseel *et al.* 2001a). Induktoriumi RH11 (RH12) buvo pasiektas 63 T (74,8 T) magnetinis laukas.

NHMFL impulsinio magnetinio lauko induktorių vijoms vynioti naudojama kita technologija: induktorius sudaromas iš kelių induktorių, kurių apvijos sujungiamos nuosekliai. Toks vidinis induktorius buvo sukonstruotas 75 ir 100 T magnetams (Kindo 2006; Swenson *et al.* 2004; Swenson *et al.* 2006), o technologija turi keletą svarbių privalumų:

- kiekvieną sluoksnį vyniojant atskirai, suvynioti ir paruošti galima itin kruopščiai;
- sluoksniai yra keičiami, t. y. galima pakeisti sugadintuosius. Monolitinis induktorius tokiu atveju būtų nebenaudojamas;
- monolitiniuose induktoriuose laidininko perėjimas iš vieno sluoksnio į kitą – silpniausia induktoriaus vieta, nes sutvirtinimai perėjimuose yra sudėtingi ir dažnai minimalūs. Sudarant induktorių iš atskirų vienasluoksnių induktorių, laidininką iš sluoksnio išvesti galima išilgai induktoriaus ašies. Taip išvengiama ašinio gniuždymo, kuris pasireiškia monolitiniuose induktoriuose, kai laidininkas išvedamas statmenai induktoriaus ašiai. Šiuo atveju atskirų sluoksnių laidininkai sujungiami induktoriaus išorėje.

NHMFL, Osakoje, Tokijo ir Leuven'o stiprių magnetinių laukų laboratorijoje (Askenazy 1998; Kindo 2001; Kindo 2006; Swenson *et al.* 2004) yra pagaminti daugkartiniai induktoriai, generuojantys iki 100 T magnetinio lauko impulsus, tačiau šiuo atveju tai induktoriai, sudaryti iš kelių jau suvytų daugiasluoksnių induktorių (A ir B, arba A, B ir C), kurių kiekvieno apvijos maitinamos iš sinchronizuotai veikiančių atskirų maitinimo šaltinių arba prie to pačio šaltinio prijungtos lygiagrečiai. Išorinis induktorius – tai didelės vidinės kiaurymės (pvz., 40–60 mm) induktorius, į kurio vidų patalpinamas kitas – mažesnis induktorius (vidinės kiaurymės skersmuo 10–20 mm, išorinis skersmuo – 40–60 mm). Induktoriams vynioti šiuo atveju gali būti naudojami tiek skirtingų medžiagų, tiek skirtingų skerspjūvių laidininkai. Magnetiniam laukui kiaurymės

centre tokiu atveju taikoma superpozicija ir todėl, kaip jau minėta, taip pasiekiamos itin didelės magnetinio lauko amplitudės, tačiau kuriant tokius induktorius susiduriama su daugeliu problemų (pvz., vidinio induktoriaus apvijose mechaniniai įtempiai yra labai dideli ir pan.), kurios šiame darbe nėra nagrinėjamos.

5-ojo tipo induktoriai vyniojami stengiantis dar labiau išnaudoti mechaninių įtempių pasiskirstymą sluoksniuose: kadangi jie mažėja išorinių sluoksnių kryptimi, vidiniai sluoksniai vyniojami iš mechanškai atsparaus mažesnio elektrinio laidumo laidininko (CuNb, CuAg, CuBe), o išoriniai – iš mechanškai mažiau atsparios bet didesniu elektriniu laidumu pasižyminčios medžiagos (Cu) laidininko. Šitaip pavyksta:

- sumažinti bendrą apvijų varžą ir todėl apvijomis tekant didesnei srovei, generuojamas stipresnis magnetinis laukas;
- padidinti apvijų šiluminę talpą (Cu šiluminė talpa didesnė nei Cu lydinių) ir išvengti izoliacijos sugadinimo.

Kiekvienas induktoriaus tarpsluoksninio sutvirtinimo sluoksnis, jei sutvirtinamoji medžiaga *Zylon*[®] arba stiklo pluoštas, vyniojant įmirkomas specialiais klijais, pvz., epoksidine derva. Suvyniotas induktorius talpinamas išoriniame tvirtos medžiagos 5–10 mm sienelės storio konteineryje, jo išorinio sutvirtinimo sienelė turi tvirtai priglusti prie konteinerio sienelės, t. y. konteinerio vidinės kiaušymės. Jos ir induktoriaus išoriniai skersmenys turi preciziškai sutapti. Induktoriaus galai (jei tai konteineris-vamzdis) užspaudžiami specialiu tvirtu pramoninio plastiko ir anglies pluoštu sutvirtinto plastiko diskais, kol pasiekiamas konteinerio viršus. Galiausiai dedami išoriniai plieniniai/anglies pluošto diskai, kurie prie konteinerio vienokiu ar kitokiu būdu prisukami varžtais. Didžiausiose pasaulio laboratorijose pagaminti induktoriai turi išorinius reguliavimo varžtus išorinio disko perimetre, kurie padeda tolygiai išorinį ir vidinius diskus prispausti prie pačio induktoriaus. Labai svarbu, kad išoriniai kontaktai būtų išvesti viename induktoriaus gale (dėl šios priežasties monolitiniuose induktoriuose būna suvyniotas lyginis sluoksnių skaičius), nes tik taip induktorių patogų eksploatuoti (per kitą galą įvedami bandiniai ir matavimo prietaisai), paprasčiau prijungti prie maitinimo šaltinio, aptarnauti. Kontaktų išvedimo zona taip pat užliejama, pvz., epoksidine derva. Suprantama, jog aprašytas tik vienas induktoriaus išorinio sutvirtinimo būdas – kiekviena laboratorija turi savo technologiją, kurios pasižymi tam tikrais privalumais ir trūkumais, kiekvienas induktorius yra atskiras ir kiekvienai jo konstrukcijai parūpinamas kitoks išorinis sutvirtinimas, o šių konstrukcijų skaičiavimas yra sudėtingas uždavinys (pvz., 75 T dvigubas NHMFL induktorius (Swenson *et al.* 2006)).

VGTU stiprių magnetinių laukų laboratorijoje vyniojami daugiasluoksniai induktoriai su optimizuotu *Zylon*[®] tarpsluoksniniu sutvirtinimu. Induktorių vidi-

nė kiauymė yra 10–14 mm. Iki 30–40 T, 1–3 ms magnetiniam laukui generuoti (77 K temperatūroje), induktoriuose naudojamas varinis 1,5 mm skersmens laidininkas, izoliuotas impregnuotu stiklo pluoštu arba kaprono audiniu. Didesniam nei 40 T magnetiniam laukui generuoti, induktoriuose naudojamas 1,7×0,8 mm ir 4,2×2,37 mm Bočvaro institute, Rusijoje, pagamintas CuNb (82 % Cu, 12 % Nb, 63 % IACS) laidininkas. 12 mm kiauymėje, induktoriuje su 1,7×0,8 mm laidininku, buvo pasiektas 48 T magnetinis laukas (77 K temperatūroje). Laidininkams izoliuoti taip pat naudojamas *Kapton*[®]. Suvynioti induktoriai talpinami į 4–8 mm plieninį konteinerį, kurio abu galai uždengiami tokio pat storio plieniniais diskais ir užveržiami varžtais. Induktoriams maitinti skirti 50 kJ, 5 mF, 4,5 kV ir 86 kJ, 10,8 mF, 4 kV kondensatorių baterijų maitinimo šaltiniai. Sukaupta techninė bazė, patirtis, atlikti tyrimai bei impulsinio magnetinio lauko taikymo sėkmė kalibruojant manganitų jutiklius, skatina kurti iki 50 T generuojantį daugkartinį induktorių, o tai ir yra vienas iš šio disertacinio darbo tikslų.

Impulso metu induktoriuose vykstančių procesų analizės tikslai

Atlikus induktorių konstrukcijų analizę matyti, jog siekiant tikslo – norint didinti generuojamo magnetinio lauko amplitudę, susiduriama su dviem pagrindinėmis problemomis: apvijų išilimu ir mechaniniais įtempiais.

Didelį apvijų išilimą sąlygoja jomis tekančios dešimčių kA srovės. Nepaisant to, jog impulso trukmė dažnai neviršija 10 ms, apvijų temperatūra pakinta keliais šimtais kelvinų – trumpo impulso metu šiluma neperduodama aplinkai (procesas adiabatinis). Tokių temperatūrų neišlaiko nė viena izoliacija ir vyksta tarpvijinis ar net tarpsluoksninis trumpasis jungimas (net suvyniojus šimtą ar daugiau vijų, naudojant kV eilės maitinimo šaltinį, tarp gretimų vijų susidaro keliasdešimties voltų įtampų skirtumas). Dėl šių problemų praktiškai visi bandymai atliekami induktorių apvijas atšaldžius iki skysto N₂ ar žemesnių temperatūrų, šitaip stipriai mažinant apvijų varžą (ar net pervedant jas į superlaidumo būseną) ir didinant apvijų šiluminę talpą.

Dideli mechaniniai įtempiai (dažnai >1 GPa) gali pažeisti induktoriaus konstrukciją: įspausti apvijas viena į kitą (o tai vėl gali reikšti elektrinį trumpąjį jungimą), iškreipti cilindrinę jo formą (pakitusi geometrija – pakitęs induktyvumas – pakitęs srovės pereinamasis procesas kito impulso metu), sugadinti tvirtinimo elementus induktoriaus viduje ir išorėje. Jei generuojant magnetinio lauko impulsą, priartėjama prie maksimalaus apvijų išilimo ar įtempių jose, pasiekiamas maksimalus induktoriaus generuojamas magnetinis laukas tomis aplinkos sąlygomis; jei išilimas ar medžiagų atsparumas viršijamas, induktorius sugadinamas.

Induktoriuose vykstančių procesų analizės ir sintezės tikslas – nustatyti, kada induktorius bus sugadintas ir ką reikia daryti, kad maksimalus išilimas ar medžiagų mechaninis atsparumas nebūtų viršytas. Ši analizė yra sudėtinga, nes

kiekvieną procesą įtakoja daugelis induktoriaus (ir jo maitinimo grandinės) elektrinių ir geometrinių parametrų, kurie kinta impulso metu ir taip pat yra priklausomi vieni nuo kitų.

1.3. Programinė įranga induktorių projektavimui ir modeliavimui

Stipraus impulsinio magnetinio lauko generavimas, induktorių projektavimas ir gamyba – specifinė sritis, pasižyminti tuo, jog joje dirba tik mokslinės įstaigos ir institutai, o pramonėje kol kas yra gaminami tik išradimų stipriuose magnetiniuose laukuose produktai, todėl nenuostabu, jog plataus vartojimo specializuotų programinės įrangos paketų induktorių projektavimui, modeliavimui ir tobulinimui sukurta praktiškai nėra. Tokios programinės įrangos nebuvimą lemia ir tai, jog kiekvieno mokslinių tyrimų instituto tikslas – vykdyti novatoriškiausius tyrimus, užtikrinančius pirmavimą rinkoje ir mažinančius konkurenciją, o tokiems tyrimams reikia itin specifinės techninės įrangos ir programinio aprūpinimo, todėl kiekviena impulsinių laukų laboratorija dažniausiai kuria programinę įrangą sau. Kai kurios kompanijos, pvz., K.U. Leuven'o įkurta „spin-off“ kompanija „Metis Instruments & Equipment n.v.“ (<http://www.metis.be/en/>), kuria visą spektrą produktų stipriam impulsiniam magnetiniam laukui (induktoriai, jų konstrukciniai, tvirtinimo elementai, matavimų, analizės standai, šaldymo įranga ir kt.) ir siūlo juos platesnei rinkai, jų skaičiavimams naudodama bei kurdama specialią programinę įrangą, tačiau ji, suprantama, taip pat nėra platinama.

Programinė įranga, taikoma impulsinių induktorių projektavimui, modeliavimui ir tobulinimui, gali būti suskirstyta į universalią ir specializuotą. Pirmajai grupei priklauso universalūs programiniai inžineriniai paketai (CAD/E – „Computer-Aided Design/Engineering“), skirti įvairių konstrukcijų, elektrinių, magnetinių, terminų, mechaninių procesų statikos ir dinamikos modeliavimams (Peng *et al.* 2005; Zhrlitsyn *et al.* 2006, Kačianauskas *et al.* 2004). Antrajai grupei priklauso programinė įranga, skirta tik impulsinių magnetų skaičiavimams (Herlach *et al.* 2006b; Kakol *et al.* 2001; Pollock *et al.* 2006; Schneider-Muntau 2006; Vanacken *et al.* 2001). Toliau aptariami ir analizuojami uždaviniai, sprendžiami naudojant universalią ir specializuotą programinę įrangą, tokių programinių paketų privalumai ir trūkumai, naujų paketų ir funkcijų poreikis sprendžiant vis sudėtingesnius impulsinių induktorių projektavimo ir konstrukcijos tobulinimo uždavinius.

Universaliai programinei įrangai, naudojamai impulsiniams induktoriams projektuoti, priklauso, pvz., ANSYS[®] Mechanical[®], ANSYS[®] Multiphysics[®], IMTEK Mathematica Supplement[®], NEi Nastran[®], COMSOL[®], FEMLAB[®] ir kiti

panašūs paketai, kuriuose skaičiavimai atliekami remiantis baigtiniu elementu metodu (FEM – „Finite Element Method“).

(Peng *et al.* 2005) gana smulkiai aprašytas 70 T impulsinio induktoriaus projektavimas naudojantis programiniu paketu *ANSYS*[®], kuris čia analizuojamas plačiau.

Kaip jau minėta 1.2 skyriuje, projektuojant induktorių, svarbiausia žinoti jo apvijomis tekančios srovės impulso amplitudę ir formą bei mechaninių įtempių pasiskirstymą jo skerspjūvyje, o pačio projektavimo proceso tikslas – induktoriaus ilgaamžiškumo didinimas, užtikrinant pagrindines jo charakteristikas: magnetinio lauko amplitudę, vidinės kiaurymės skersmenį ir impulso ilgį. *ANSYS*[®] yra paplitęs universalus galingas programinis paketas, įgalinantis atlikti itin detalią elektromagnetinio lauko, įšilimo ir mechaninių procesų analizę. Impulsiniam induktoriui elektromagnetinio lauko ir įšilimo analizės siejantis kintamasis yra apvijų varža, o elektromagnetinio lauko ir mechaninių įtempių analizę – elektromagnetinės jėgos.

Elektromagnetinė-termodinaminė analizė

Srovės impulso metu, apvijų varža kinta dėl Joule'io įšilimo, kurį didina magnetovarža ir skin-efektas, tad elektromagnetinio lauko analizė stipriai įtakoja įšilimo analizę ir atvirkščiai, todėl abi šios analizės visad turi būti atliekamos kartu.

3-matis induktoriaus modelis yra įmanomas, bet jį sudėtingiau sudaryti ir tokio modelio skaičiavimams reikalingi dideli kompiuterio resursai, todėl kuriant įvairių kūnų geometrinius modelius, stengiamasi pasinaudoti jų simetriškumu – tai įgalina kurti, pvz., tik kūno skerspjūvio 2-matį modelį. Induktoriaus apvijų skerspjūvis yra simetriškas jo vidinės kiaurymės ašies ir plokštumos, kertančios jo ilgį per pusę, atžvilgiu, taip pat, visi pjūviai, kertantys induktorių per jo vidinės kiaurymės ašį yra vienodi (žiūr. 1.2 skyrių), todėl *ANSYS*[®] šiuo atveju įgalina 3-matį uždavinį spręsti sukuriant tik dvimatį induktoriaus pusės arba ketvirčio skerspjūvio modelį (Peng *et al.* 2005). Magnetinis laukas aplink induktorių laisvai pasklinda į erdvę, todėl modelyje reikia „sukurti“ šią erdvę. Rekomenduojama, kad ji savo plotu būtų ~5–6 kartus didesnė už modeliuojamo induktoriaus skerspjūvio plotą – to pakanka, kad ties jos riba magnetinis laukas būtų pakankamai silpnas ir neiškraipytų magnetinio lauko induktoriaus viduje skaičiavimų, nes atsižvelgiant į *ANSYS*[®] sąlygas, laukas visada lygiagretus ribos liestinei. Detalus magnetinio lauko ir įtempių skaičiavimai svarbūs induktoriaus viduje, todėl apvijų ir sutvirtinimo sluoksniai suskaidomi analizei mažesniais elementais nei išorinė erdvė. Taip taupomi kompiuterio resursai.

Prieš atliekant skaičiavimus, svarbu įvertinti išorinės grandinės parametrus (varžą ir induktyvumą), ypatingai jei maitinimo laidai iki induktoriaus yra ilgi, bei aplinkos sąlygas (ar tai kambario temperatūra, ar skystas N₂ ir pan.). Impulso

trukmė dažnai neviršija 10–50 ms, todėl induktoriaus įšilimas – adiabatinis procesas (įprastas impulsinių induktorių vėsimo laikas – 30–60 min.), kurio metu šiluma visiškai nenuvedama į aplinką – kaista tik pačios apvijos ir jų izoliacijos vidinis paviršius, todėl tariama, jog induktoriaus išorės temperatūra yra pastovi. Su šiais parametrais, įvedamos ir induktoriaus apvijų laidininko savitosios varžos ρ , visų medžiagų savitosios šilumos c_j ir savitojo šiluminio laidžio k_j priklausomybės nuo temperatūros $\rho(T)$, $c_j(T)$, $k_j(T)$.

Elektromagnetinio lauko ir įšilimo skaičiavimo rezultatai, tiksliai įvertinus pagrindinius induktoriaus geometrinius, šiluminius ir elektrinius parametrus, sutampa su bandymų ar specializuota programine įranga gautais rezultatais, tačiau *ANSYS*[®] negalima įvertinti magnetovaržos ir skin-efekto, kurie įšilimą apvijoje perskirsto taip, kad labiau įkaista vidinė apvijos dalis ir jos izoliacija. Dėl šios priežasties negalima įvertinti ir mechaninių įtempių, atsiradusių dėl medžiagų šiluminio-plėtimosi, tačiau įšilimo įtaka įtempiams sudaro tik 3–5 % ir jos vertinti nebūtina, nes dažniausiai įšilimo ir elektromagnetinio lauko skaičiavimai nėra tikslesni nei ± 5 %.

(Peng *et al.* 2005) nagrinėtoju atveju, t. y. sugeneravus 70 T magnetinio lauko impulsą, induktorius išilo iki 395 K išorinėje ir 282 K vidinėje dalyje. Šios temperatūros yra žemesnės už *Kapton*[®] izoliacijos maksimalią leistiną temperatūrą (~673 K), todėl induktorius impulso metu neperkaista ir, esant teigiamiems elektromechaninės analizės rezultatams, jį galima eksploatuoti toliau.

Magnetomechaninė analizė

Kitaip nei skaičiuojant srovės pereinamąjį procesą ir įšilimą, mechaninių procesų induktoriaus apvijoje analizė atliekama tiesiogiai, t. y. įtempiai ir deformacijos (poslinkiai) suskaičiuojami veikiant didžiausiai elektromagnetinei jėgai, ir taip gaunamas jų maksimumas. Tokios analizės pagrindiniai įėjimo parametrai yra:

- induktoriaus skerspjūvio (pusės, ketvirčio) tiksli geometrija;
- apvijomis tekančios srovės maksimumas;
- magnetinio lauko (esant maksimaliai srovės vertei) pasiskirstymas apvijoje;
- visų skerspjūvio medžiagų elastingumo moduliai, tamprumo ribos bei įtempių-deformacijų kreivės kambario temperatūroje (nors aplinkiniai sluoksniai, kaip jau minėta, neišsyla ir jų temperatūros lygios aplinkos, pvz., skysto N₂ temperatūrai, naudojamos kambario temperatūros vertės, nes žemose temperatūrose ne visų medžiagų vertės yra tiksliai žinomos).

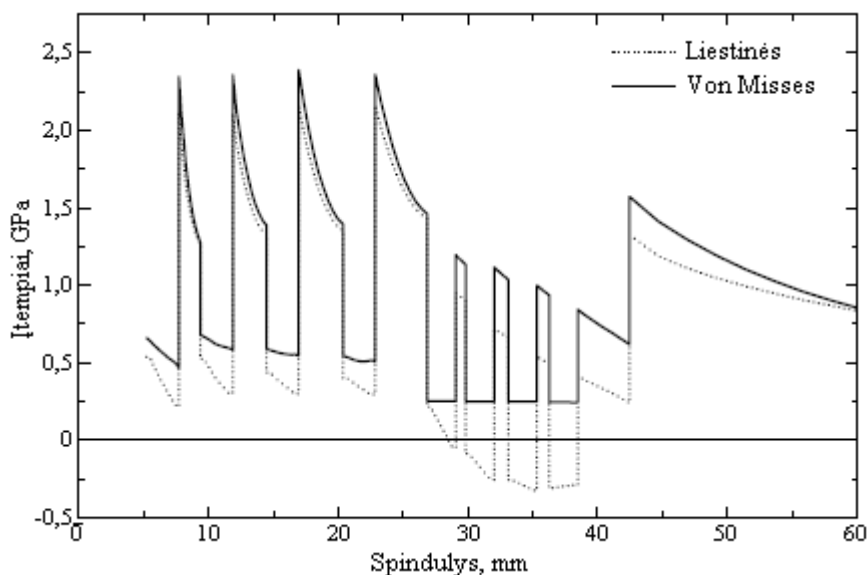
Elektromagnetinės jėgos šaltinis yra induktoriaus apvijos, kuriomis teka elektros srovė – jas veikia didžiausios jėgos, perduodančios įtempimus į aplinkinius – „neaktyvius“ sluoksnius. Ašinės (induktoriaus kiaurymės ašies kryptimi)

ir radialinės (statmenos ašinėms) induktoriaus magnetinio lauko dedamosios lemia atitinkamai radialinius („radial stress“) ir ašinius įtempius („axial stress“), o šių sąveika – žiedinius įtempius („hoop stress“). Ašiniai įtempiai veikia išilgai induktoriaus kiaurymės ašies induktoriaus vidaus kryptimi, t. y. spaudžia apvijas į jo vidų, o radialiniai – statmena jo kiaurymės ašiai išorės kryptimi.

Jei kiaurymė maža, vidinius induktoriaus sluoksnius veikia itin didelės radialinės jėgos, tuos sluoksnius atskiriančios, taip pat stipriai didinančios žiedinės jėgos. Tose vietose, kuriose sluoksniai atskiriami, radialiniai įtempiai nesumuojami ir tai padeda juos mažinti. Praktikoje tai daroma atlikus skaičiavimus ir jau žinomose vietose įterpiant plonus teflono sluoksnius. Sutvirtinant induktoriaus apvijų sluoksnį, *Zylon*[®] ar stiklo pluošto siūlai vyniojami žiedinių įtempių veikimo kryptimi ir taip gaunamas didžiausias mechaninis atsparumas, tačiau ašinė ir radialine kryptimi šių medžiagų atsparumas nėra didelis ir jų elastingumo modulis priklauso nuo klįjavimui naudojamos medžiagos elastingumo modulio – pasireiškia sutvirtinimo medžiagų elastingumo modulio anizotropija. Šiuos du efektus – sluoksnių atskyrimą veikiant radialinėms jėgoms bei elastingumo modulio anizotropiją ašinė ir radialine kryptimi, *ANSYS*[®] įgalina įvertinti, jei turima pakankamai duomenų. (Peng *et al.* 2005) nurodyta, jog trimis skirtingais būdais pabandžius įvertinti *Zylon*[®] ir stiklo pluošto anizotropiją (3, 10, 30 GPa), nustatyta, kad ji neturi didelės įtakos radialinių įtempių pasiskirstymui.

Jei induktoriaus modelyje atskiri sluoksniai ir apvijos yra betarpiškai susiję vieni su kitais, įtempiai sumuojasi, todėl didžiausi jie yra vidurio plokštumoje ir pirminėse apvijose. Jei sluoksniai stipriai sutvirtinti, įtempiai sumuojami tik ašinė kryptimi. Medžiagos atsparumui įvertinti naudojamas suminis Von Mises kriterijus, įvertinantis visų trijų dominuojančių įtempių įtaką. (Peng *et al.* 2005) atliktų skaičiavimų rezultatai pateikti 1.2 paveiksle: liestinės ir Von Mises įtempių pasiskirstymai išilgai induktoriaus skerspjūvio spindulio. Iš šio paveikslo matyti, jog kiekviename sluoksnyje liestinės ir Von Mises įtempiai stipriai išauga sluoksnio vidinėje dalyje.

1.2 paveiksle matyti, jog pasiekus 70 T magnetinį lauką, Von Mises įtempiai neviršija *Zylon*[®] tamprumo ribos (~3,2 GPa kambario temperatūroje) ir induktorius po tokio impulso, esant teigiamiems termodinaminės analizės rezultatams, gali tarnauti toliau. Viršytos elastingos deformacijos virsta plastinėmis (kinta induktoriaus geometrija) ir taip keičiamas apvijų induktyvumas, pasireiškia jų „nuovargis“, o tai trumpina induktoriaus tarnavimo laiką arba jį sugadina.



1.2 pav. Liestinės ir Von Mises įtempių pasiskirstymas, kai sutvirtinimo medžiagos elastingumo modulis 10 GPa ir magnetinio lauko maksimumas 70 T

Atlikus (Peng *et al.* 2005) aprašyto impulsinio induktoriaus modeliavimo analizę, matyti, jog tokios programinės įrangos galimybės projektuojant impulsinius induktorių, nepaisant to, jog su ja nebuvo galima įvertinti magnetovaržos ir skin-efekto (tai galima atlikti naudojant kitus programinius paketus), yra beveik neribotos. Minėtieji du neįvertinti efektai įtakoja tik temperatūros pasiskirstymą pačiose apvijose, o vidutinės temperatūros, impulso formos ir įtempių pasiskirstymo nekeičia. Kiti svarbūs dalykai, kuriuos galima įvertinti pakankamai tiksliai: elastingumo modulio anizotropijos įvairiomis kryptimis bei mechaninės smūginės bangos įtaka mechaniniams pasiskirstymams induktoriaus apvijose. CAD/E programiniai paketai operuojantys FEM pagrindu, įgalina atlikti bet kokių formų ir geometrinių matmenų induktorių analizę, išilimo, magnetinio lauko ir mechaninių įtempių pasiskirstymo analizę kiekviename taške (2D ir 3D modeliuose) ir visus dydžius įvertinti itin tiksliai, taip pat analizuoti ir grafiškai pateikti rezultatus daugybe būdų. Vieni iš tokios programinės įrangos trūkumų: ilgai užtrunka, kol *ANSYS*[®] terpėje sukuriamas induktoriaus skerspjūvio vaizdas, jis suskaidomas baigtiniais elementais ir atliekami skaičiavimai (sudėtingiems modeliams jie gali trukti kelias valandas-dienas naudojant moderniausius kompiuterius), apdorojami ir pateikiami rezultatai, taip pat sudėtinga arba neįmanoma vykdyti induktorių sintezės ir optimizavimo uždavinių (Dresden'o stipriųjų magnetinių laukų laboratorijoje (Zhrlitsyn *et al.* 2006) sukurti algoritmai, lei-

džiantys generuoti induktorių geometrijas *ANSYS*[®] terpėje ir taip atlikti kompiuterizuotus optimizavimo ir paieškos uždavinius, tačiau tai gali atlikti tik programuotojai, kūrę algoritmus). Sugaištas laikas vienai konstrukcijai modeliuoti priklauso ir nuo to, kiek programuotojas išmano bendrąsias disciplinas, tokias kaip elektrotechniką, magnetizmą, mechaniką, baigtinių elementų metodus, kiek įgūdžių jis turi dirbdamas su programinių paketų. Nepaisant to, atlikus analizę ir radus induktoriaus tobulinimo variantų, visada teks iš naujo kurti jo skerspjūvio vaizdą ir atlikti jau minėtuosius veiksmus, todėl CAD/E programiniai paketai efektyviausiai gali būti pritaikyti specializuota programine įranga sumodeliuotų ir jau sukurtų induktorių konstrukcijų detaliai ir tiksliai patikrai bei naujoms koncepcijoms kurti.

Specializuotai programinei įrangai priklauso specialiai impulsinių magnetų konstravimui ir juose vykstančių procesų analizei sukurti programiniai paketai, tokie, kaip *PMDS* („Pulsed Magnet Design Software“, KU Leuven), *PULSE* ar *CYCLN* (NHMFL, Tallahassee, Florida), operuojantys supaprastintomis lygtimis, kurių sprendimai įgyvendinti paplitusiomis programinėmis kalbomis (C++, Pascal, Fortran, Basic ir t.t.). Jie pasižymi greitaveika (dažnai sprendimai pateikiami per keletą minučių), paprasta ir patrauklia vartotojo sąsaja, kurioje vartojami visiems induktorių konstruktoriams žinomi terminai, juose labai paprastai įvedami pagrindiniai modelio parametrai ir grafiškai pateikiami įprasti ir reikalingi rezultatai, leidžiantys įvertinti galimybes pasigaminti norimą induktorių. Tokia programine įranga galima spręsti ir tam tikrus, iš anksto numatytus, optimizavimo uždavinius. (Vanacken *et al.* 2001) ir (Herlach *et al.* 2006b) pateiktas vienos iš dažniausiai Europos stiprių magnetinių laukų laboratorijų naudojamų, K.U. Leuven'o universitete kurtos specializuotos programinės įrangos *PMDS* impulsinių induktorių projektavimui, pagrindinių funkcijų ir veikimo principų aprašymas. Toliau jis analizuojamas plačiau.

Pirminis impulsinių induktorių parametrų įvertinimas

Atliekant supaprastintus impulsinių induktorių skaičiavimus, laikomasi tų pačių apribojimų: norint pasiekti tam tikros amplitudės „nedestruktyvų“ magnetinį lauką, induktoriui turi būti teisingai parinktas maitinimo šaltinis (kalbama apie kondensatorių bateriją), atsižvelgta į impulso trukmę norint išvengti izoliaciją sugadinančio perkaitimo, induktoriaus konstrukcija turi būti pakankamai tvirta ir jos elementai nedeformuojami plastiškai, o elastinės deformacijos turi būti nedidelės, kad medžiagos nepatirtų „nuovargio“ (Vanacken *et al.* 2001).

Pirminį magnetinio lauko ir mechaninio atsparumo įvertį, pagal (Vanacken *et al.* 2001), galima pateikti nesudėtinga pusiau-empirine formule:

$$B = \sqrt{2\mu_0\sigma} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right); \quad (1.1)$$

čia: σ – silpniausios medžiagos elastingumo riba; α – induktoriaus išorinio ir vidinio skersmens santykis.

Didelis mechaninis atsparumas pasiekiamas naudojant tvirtas gerą elektrinį laidumą turinčias medžiagas laidininkams bei sluoksnius sutvirtinant didelio atsparumo medžiagomis (1.2 skyrius). Svarbus dydis (1.1) yra α : eksploatuotojo požiūriu vidinis induktoriaus skersmuo turi būti kuo didesnis, tačiau tai mažina pasiekiamą magnetinio lauko maksimumą, kurį norint išlaikyti, reikia didinti medžiagų mechaninį atsparumą arba išorinį spindulį (vijų sluoksnių skaičių).

Elektromagnetinį induktoriaus efektyvumą galima nusakyti lygtimi:

$$B = \mu_0 \sqrt{\frac{C}{L}} U \left(\sum_{\text{sluoksniai}} \frac{N_i}{\sqrt{l^2 + 4R_i^2}} \right); \quad (1.2)$$

čia: C – kondensatorių baterijos talpa; L – induktoriaus induktyvumas; U – kondensatorių baterijos įtampa; N_i – sluoksnio i vijų skaičius; l – induktoriaus ilgis; R_i – sluoksnio nuotolis nuo induktoriaus kiaurymės ašies.

Iš (1.2) matyti, jog turint kondensatorių bateriją, kurioje sukaupta energija $E = (CU^2)/2$, generuoti didesnės amplitudės magnetinį lauką galima mažinant R_i , l ir L , arba didinant N_i . Kadangi energijos sklaida turi būti ribota, t. y. impulso trukmė $\tau \sim 2\pi(LC)^{1/2}$ dėl leistino įšilimo nedidelė, C ir L turi būti kuo mažesni, o tai reiškia, jog U turi būti 10 kV eilės. Pateiktasis pirminio įvertinimo metodas įgalina labai greitai apytiksliai nustatyti induktoriaus, galinančio generuoti B amplitudės magnetinio lauko impulsą, pagrindinius parametrus. Ši metodika yra empiriškai patikrinta ir tuo sėkmingai pasinaudota kuriant *PMDS*.

Specializuotieji programiniai paketai

PMDS – keturių programinių paketų, rašytų programavimo kalba *FORT-RAN*[®] ir atliekančių induktoriaus elektrinių parametrų, pereinamojo proceso ir įšilimo impulso metu, mechaninių įtempių esant maksimaliam magnetiniam laukui bei liekamųjų plastinių deformacijų skaičiavimus, apvalkalas. Pageidaujama induktoriaus struktūra įvedama sluoksnis po sluoksnio, visi skaičiavimų rezultatai pateikiami grafiškai, juos galima analizuoti ir išsaugoti. Taikant iteracijų algoritmus ir keičiant elektrinius ir konstrukcinius induktoriaus parametrus, *PMDS* įgalina atlikti induktoriaus konstrukcijos optimizavimą ir pateikti galutinį patobulintą jo modelį. *PMDS* induktoriaus struktūros įvedimo langas pateiktas 1.3 paveiksle.

Coil Parameters

File

Coil Data

Bore diameter = 17.4 (mm) Info\$ = user coil flow jva

Z-axis coil length = 77 (mm) R-axis coil radius = 64.85 (?) (mm)

Desired Performance

Pulsed field = 60 (T) DC field = 0 (T) -background-

Conductor Data

conductor 1 CuAg (4.5x2.8)

☐ conductor 2 Soft-Cu (4.2x2.2)

Reinforcement Data

reinforcement 1 Glass fibre

☒ reinforcement 2 Carbon fibre

Layer structure

layer	thickness (mm)	separate	material
1	2.8	☐	Cond1
2	.3	☐	Rein1
3	.75	☐	Rein2
4	.3	☐	Rein1
5	2.8	☒	Cond1
6	.3	☐	Rein1
7	1.2	☐	Rein2

After the last layer, thickness = -1 should be entered

Details ... Cancel OK

1.3 pav. PMDS. Induktoriaus struktūros įvedimo langas

1.3 paveiksle matyti, jog indukoriaus skaičiavimui įvedami trys pradiniai parametrų rinkiniai: 1. Induktoriaus vidinis ir išorinis spindulys ir ilgis. 2. Pageidaujamas magnetinis laukas. 3. Medžiagos laidininkams ir sutvirtinimui bei sluoksninė indukoriaus struktūra. Visi parametrai, išskyrus pageidaujamą magnetinį lauką ir indukoriaus vidinės kiaurymės skersmenį, gali būti keičiami atliekant optimizavimo uždavinį. Medžiagos, naudojamos induktorių gamybai Leuven'ο universitete, pasirenkamos iš suformuotos medžiagų duomenų bazės.

Įvedus pradinius indukoriaus parametrus, *PMDS* pirmiausia paskaičiuojamas indukoriaus induktyvumas L ir apvijų varža R (77 ir 300 K temperatūroje), kondensatorių baterijos, įgalinančios pasiekti pageidaujamą magnetinį lauką, parametrai ((1.2)), impulso srovės pereinamasis procesas ir apvijų išilimas bei magnetinio lauko pasiskirstymas indukoriaus skerspjūvyje. Kondensatorių baterijos parametrai gali būti įvedami ir pačio projektuotojo. Skaičiavimų rezultatai pateikiami grafiškai. Atlikus srovės pereinamojo proceso ir magnetinio lauko pasiskirstymo esant srovės maksimumui skaičiavimus, suskaičiuojami mechaniniai įtempiai. Induktoriaus mechaninis atsparumas vertinamas remiantis ne atskirų įtempių dedamųjų dydžiu, o suminiu kriterijumi – Von Mises įtempiais. Jei jie neviršija sutvirtinimo medžiagų (pačių tvirčiausių konstrukcijoje) tamprumo ribų, induktorius po impulso nebus sugadintas. Optimizavimo uždaviniai tiek išilimui, tiek mechaniniams įtempiams, atliekami tam tikru žingsniu keičiant (didinant, iteruojant) indukoriaus konstrukcijos ar maitinimo šaltinio parametrus. Galiausiai suskaičiuojamos liekamosios deformacijos: jei jos mažos, induktorius gyvuos ilgiau.

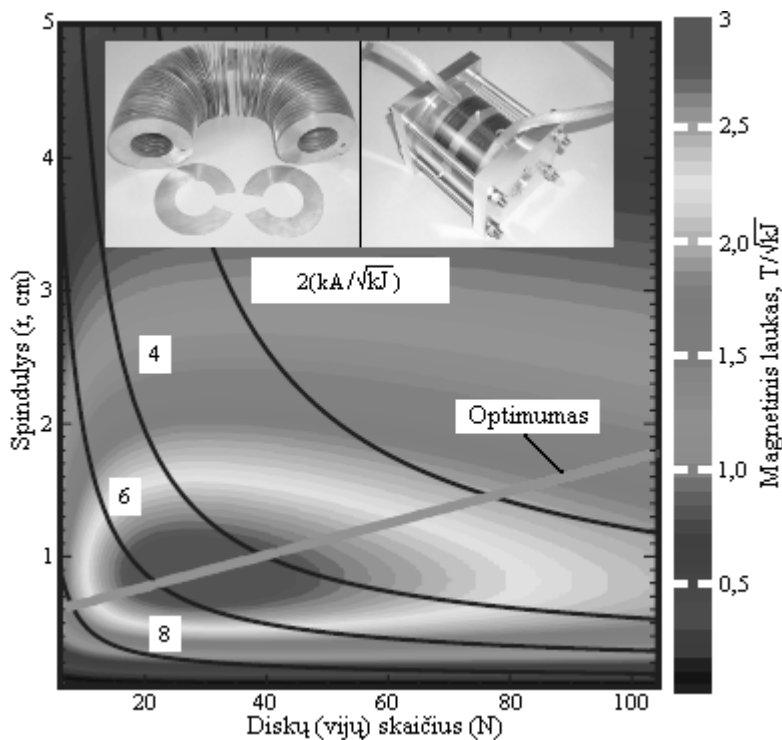
Naudojant *PMDS* Leuven'e sukurti induktoriai, generuojantys 60–77 T, 5–10 ms trukmės magnetinį lauką, tarnaujantys ~1000 impulsų. Ši programinė

įranga rezultatus pateikia per kelias minutes, skaičiavimai gaunami su nedidesne nei 5–10 % paklaida, rezultatus lyginant su modeliavimo *ANSYS*[®] (Peng *et al.* 2005) ar eksperimentiniais rezultatais (Vanacken *et al.* 2001). Remiantis sėkminga praktika, kuriama nauja *PMDS* versija, kurioje daug dėmesio skiriama skin-efekto, sutvirtinimo sluoksnių anizotropijos įvairiomis kryptimis, procesų, vykstančių maitinimo šaltiniuose iškrovos metu, analizei. Nepaisant to, jog *PMDS* ir panašaus tipo programos yra galingas įrankis, visų žinomų procesų nepavyksta tiksliai įvertinti dėl mažai ištirtų medžiagų savybių < 77 K temperatūrose ir temperatūrai greitai kintant impulso metu, taip pat dėl pasireiškiančių milžiniškų visakrypčių dinaminių apkrovų, kurių skaičiavimui šiuo metu taikomas metalinio cilindro modelis yra ne visai tikslus, nes dėl radialinių įtempių induktoriaus sluoksniai atsiskiriami ir ne visada tiesiogiai įtakoja vienas kitą (Herlach *et al.* 2006b).

Nacionalinėje stiprių magnetinių laukų laboratorijoje JAV (NHMFL) yra sukurti du jau minėti programiniai paketai impulsinių induktorių skaičiavimui: *PULSE* ir *CYCLN*. Šioje laboratorijoje, kitaip nei Leuven'e, didelės impulsinių induktorių optimizavimo galimybės išvelgiamos ne tik keičiant sutvirtinimo sluoksnių storius, tačiau pirmiausia kiekviename sluoksnyje apvijoms vynioti naudojant skirtingų storių, skerspjūvio formų ir medžiagų laidininkus, t. y. induktorių sudarant iš kelių/keliasdešimties vienasluoksnių induktorių su skirtingu vijų skaičiumi sluoksniuose taip, kaip aprašyta 1.2 skyriuje (Schneider-Muntau 2006). Tai įgalina gauti tolygų, artimą, bet neviršijantį kritinių reikšmių mechaninių įtempių ir išilimo pasiskirstymą visose induktoriaus sluoksniuose. Speciali technologija leidžia skirtingus laidininkus išvesti į induktoriaus išorę ir ten juos sujungti išvengiant daugelio neigiamų efektų sluoksnių perėjimuose, kai induktorius vyniojamas iš monolitinio laidininko. Induktoriaus efektyvumas taip pat didinamas optimizuojant (didinant) sutvirtinimo sluoksnio užpildymo tankį („Packing density“): didesnis užpildymo tankis mažina atstumą tarp sluoksnių ir taip pasiekiamas didesnis magnetinis laukas. Šioje laboratorijoje, pvz., *Zylon*[®], pasiekiamas 95 % užpildymas sutvirtinimo sluoksnyje, tačiau 65–80 % užpildymas efektyviau „sugeria“ radialinių ir ašinių jėgų poveikį. NHMF tokiu būdu suskaičiuota ir optimizuota ~100 T poli-magneto konstrukcija.

(Kakol *et al.* 2001) aprašytas impulsinių induktorių be tarpsluoksninio sutvirtinimo optimizavimas (Rzeszow Pedagogical University, Institute of Physics, http://www.univ.rzeszow.pl/eng/inst_phys.php) naudojant paprastus analitinius skaičiavimus ir pasitelkus tam skirtus matematinius programinius paketus, tačiau čia remiamasi kitokia metodika nei anksčiau aprašyta. Leuven'e ar NHMFL prieš optimizuojant ar kuriant impulsinį magnetą, pasirenkamas magnetinio lauko tankis, kurį induktorius turi generuoti nesugadintas, ir tada atliekamas optimizavimas, o čia – analizuojamas vijų ir sluoksnių skaičius, kurį suvyniojus generuojamas didžiausias magnetinis laukas bei neviršijami leistini mechaniniai

įtempiai ir išilimas. Didinant vijų skaičių sluoksniuose, remiantis žinomomis paprastomis lygtimis, skaičiuojamas induktoriaus induktyvumas L ir maksimali impulso metu tekanti srovė I . Turint šią priklausomybę ($I(L)$), galima spręsti, kokiam vijų skaičiui esant, bus generuojamas didžiausias galimas magnetinis laukas. Panaši analizė ir optimizavimas, tik daugiavijams spiraliniams-diskiniams induktoriams, buvo atliekamas ir aprašytas (Pollock *et al.* 2006). Šiuo atveju srovė teka visoje disko plokštumoje, todėl čia analizuojama priklausomybė $B(N,r)$, t. y. generuojamo magnetinio lauko priklausomybė nuo vijų skaičiaus ir disko išorinio spindulio (tai atitiktų didinamą sluoksnių skaičių (Kakol *et al.* 2001)). Gauti rezultatai pateikti 1.4 paveiksle, o taškai, esantys ant tiesės „Optimumas“, nurodo, kiek diskų ir kokio išorinio spindulio diskus reikia parinkti, kad mechaniniai įtempiai ir išilimas induktoriuje neviršytų leistinųjų.



1.4 pav. Spiralinis induktorius ir jo konstrukcijos optimumo paieškos rezultatai

Išanalizavus specializuotos programinės įrangos induktorių projektavimui galimybes, matyti, jog kitaip nei universali programinė įranga, ši programinė

įranga įgalina efektyviai spręsti induktorių konstrukcijų ir juose vykstančių procesų optimizavimo uždavinius, nes:

- koncentruojamasi tik impulsinių magnetų skaičiavimui ir tą daro didžiausių specializuotų pasaulio laboratorijų ekspertai;
- uždaviniams spręsti naudojami empiriškai patikrinti, paprasti ir didelių kompiuterių resursų nereikalaujantys metodai, tikslumu nedaug nusileidžiantys FEM operuojantiems universaliems programiniams paketams;
- kuriant specializuotą programinę įrangą, ji pritaikoma konkrečiam uždaviniui ir įgalina įvertinti įvairius procesus, kurių analizė nenumatyta universaliuose paketuose (pvz., skin-efektas, magnetovarža ir pan.);
- specializuota programinė įranga daug paprasčiau tobulinama bei keičiama, pritaikoma atskiriems atvejams ir yra šiuo požiūriu universalesnė.

Dėl išvardintų priežasčių, specializuoti programiniai paketai, tokie kaip *PMDS*, *CYCLN*, *PULSE* ir kiti beveik visada naudojami induktorių projektavimo stadijoje, bandant patikrinti naujas idėjas ir konstrukcijas (Peng *et al.* 2005; Zhrlitsyn *et al.* 2006), o universali programinė įranga pasitelkiama detalesnei jau optimizuotų ir praktiškai pasiteisinusių konkrečių konstrukcijų analizei.

Nepaisant to, jog *PMDS*, *PULSE*, *CYCLN* atlieka induktorių konstrukcijų optimizavimą pasirinktam magnetinio lauko maksimumui pasiekti, o pasaulyje atlikti darbai induktorių konstrukcijų, kurias pagaminus generuojamas didžiausias magnetinis laukas, optimizavimui, šiame darbe siūlomas ir įgyvendinamas naujas universalus metodas stačiakampio skerspjūvio induktoriaus konstrukcijos, generuojančios didžiausią magnetinį lauką, paieškai, keičiant apvijų ir sluoksnių skaičių. Programinis paketas įgalina kiekviename sluoksnyje keisti laidininkų bei tarpsluoksninio sutvirtinimo storius ir medžiagas. Paieškos pagrindas – vieno sluoksnio vijos su tarpsluoksniniu sutvirtinimu skerspjūvio sudarymas bei vidinės kiaurymės skersmens parinkimas. Išilimo skaičiavimuose neįvertinamas skin-efektas ir taikomos vidutinės išilimo ir srovės tankio vertės viename laidininko skerspjūvyje (kaip ir aprašytoje *ANSYS*[®] analizėje), tačiau dėl šios priežasties, kitaip nei minėtuose programiniuose paketuose, skaičiuojant mechaninius įtempius atsižvelgiama į silpniausių (laidininkų), o ne stipriausių medžiagų konstrukcijoje tamprumo ribas ir taip užtikrinama, jog induktoriaus veiks patikimai. Tikslinis magnetinis laukas – 50 T, naudojami laidininkai – 1,7×0,8 Cu, 1,7×0,8 CuNb, 4,2×2,37 CuNb, izoliacija – *Kapton*[®], tarpsluoksninis sutvirtinimas – *Zylon*[®], išorinis sutvirtinimas – itin tvirtos medžiagos konteineris. Programa šiuo atveju atlieka ne taškinį induktoriaus konstrukcijos optimizavimą, o suranda induktorių konstrukcijas, suformavus vienos vijos su tarpsluoksniniu sutvirtinimu skerspjūvio geometriją ir sudėtį, jei ta konstrukcija tenkina pageidaujamus reikalavimus generuojamai magnetinio lauko amplitudei,

impulso trukmei, didžiausiam naudojamų medžiagų laidininkų įšilimui ir mechaniniams įtempiams.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados. Darbo uždavinių formulavimas

Atlikus daugkartinio naudojimo impulsinio magnetinio lauko generavimo ir induktorių konstrukcijų analizę, nustatyta, kad:

1. Stiprus impulsinis magnetinis laukas atveria naujas galimybes šiuolaikiniam mokslui; toks daugkartinis magnetinis laukas pasiekiamas tik naudojant impulsinius induktorius.
2. Efektyviausiai impulsiniai magnetiniai laukai šiuo metu generuojami daugiavijais-daugiasluoksniais induktoriais su optimizuotu laidininkų skerspjūviu sluoksniuose ir tarp sluoksniu sutvirtinimu.
3. Induktorių konstrukcijoms naudojamos medžiagos: CuAg, CuNb multi/nanokompozitai apvijoms; *Kapton*[®], stiklo pluoštai izoliacijai; *Zylon*[®], stiklo pluoštai, sutepti epoksidinė derva, tarp sluoksniu sutvirtinimui; plieno arba anglies pluošto konteineris išoriniam sutvirtinimui. Ekonomišiausias ir paprasčiausias maitinimo šaltinis – kJ–MJ talpos greita-veikė kondensatorių baterija.
4. Pagrindiniai veiksniai, ribojantys generuojamo magnetinio lauko amplitudę ir impulso trukmę – Joule'io įšilimas ir Lorentz'o jėgų sukelti mechaniniai įtempiai apvijose.
5. Sudėtingą induktorių konstrukciją lemia juose vykstantys sunkiai prognozuojami procesai, kai visos konstrukcijų medžiagos patiria ribines elektrines, šilumines ir mechanines perkrovas.
6. Didesni magnetiniai laukai pasiekiami remiantis ne tik laimėjimais medžiagotyroje ir empiriniais bandymais, bet pasitelkus modernią kompiuterinę įrangą induktorių konstrukcijų analizei ir optimizavimui.

Išanalizavus impulsiniams induktoriams projektuoti naudojamą programinę įrangą, nustatyta, kad:

1. Universali programinė įranga, operuojanti FEM, dėl skaičiavimų sudėtingumo, patrauklesnė detalai jau sukurto prototipo analizei ir tobulinimui.

2. Specializuota programinė įranga, operuojanti supaprastintais skaičiavimais, dėl paprastumo ir greitaveikos, yra tinkamiausia impulsinių induktorių projektavimo ir konstrukcijų optimizavimo uždaviniams spręsti; rezultatų neapibrėžtis $\pm 5\text{--}10\%$.
3. Induktorių konstrukcijos turi daug simetrijos ašių, todėl magnetinio lauko ir mechaninių įtempių skaičiavimai atliekami dvimačiam induktoriaus skerspjūvio pusės ar ketvirčio modeliui; dvimačių skaičiavimų tikslumo pakanka, nes nepramoniniu būdu suvyniotų induktorių geometrinių parametrų neapibrėžtys dažnai viršija skaičiavimų neapibrėžtis.
4. Sukurta tik keletas specializuotos programinės įrangos paketų impulsinių induktorių projektavimui; jie nėra laisvai platinami.
5. Specializuotuose programiniuose paketuose taikoma metodika: a) Apytiksliai suskaičiuojama viena induktoriaus konfigūracija pageidaujamos magnetinio lauko charakteristikoms; b) atliekamas jo konstrukcinių elementų optimizavimas iteracijų būdu keičiant sutvirtinimo sluoksnių ir apvijų storius/skerspjūvius ar medžiagų savybes bei minimizuojant apvijų išilimą ir mechaninius įtempius.
6. Žinoma specializuota programinė įranga nesprendžia kito galimo uždavinio: parinkus vienos vijos su izoliacija ir sutvirtinimo sluoksniu skerspjūvio geometriją ir medžiagas, galima paskaičiuoti daugelį induktorių su skirtingu vijų ir sluoksnių skaičiumi ir iš jų išrinkti tinkamus variantus; jei tokių variantų nėra, keičiamas apvijos skerspjūvio vaizdas ir medžiagos, ir atliekamas kitas skaičiavimas. Tokio uždavinio formulavimas ir sprendimas ir įgyvendinami šioje disertacijoje.

Atsižvelgiant į pateiktąsias išvadas buvo suformuluoti šie pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Sukurti impulsinių induktorių geometrijos sintezės metodiką.
2. Sukurti induktoriaus matematinį modelį ir atlikti termodinaminių, elektromagnetinių ir magnetomechaninių procesų analizę.
3. Nustatyti daugkartinio naudojimo induktorių parametrų tinkamumo kriterijus ir sukurti geometrijos paieškos algoritmą.
4. Nustatyti daugkartinio naudojimo impulsinių induktorių tinkamų parametrų ribas.
5. Sukurti impulsinių induktorių prototipus įvairiems medžiagų fizikiniams tyrimams

Impulsinio induktoriaus matematinis modelis ir geometrijos paieškos programa

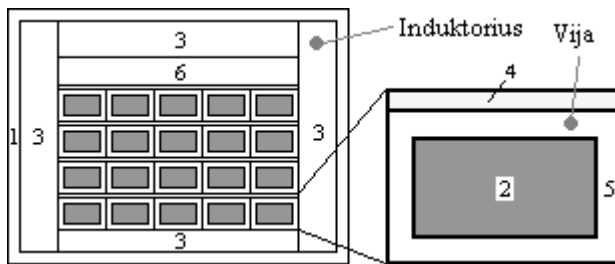
Šiame skyriuje aprašomas induktorių dvimačių geometrijos ir medžiagų sudėties modelių sintezės būdas, termodinaminio, elektromagnetinio ir magneto-mechaninio induktoriaus modelių sukūrimas, apibrėžiama „induktoriaus gyvavimo“ zona – jo pagrindinių parametrų visuma, ir sudaromas algoritmas, kurio pagalba kuriamas universalus induktorių, patenkančių į „gyvavimo“ zoną, parametrų skaičiavimų programinis paketas. Taip pat aptariamos šio paketo galimybės. Rezultatai paskelbti darbuose (Bartkevičius *et al.* 2008a; Bartkevičius *et al.* 2008b; Bartkevičius *et al.* 2008c; Bartkevičius *et al.* 2007; Višniakov *et al.* 2006c).

2.1. Induktorių geometrijos sintezės metodika

Išanalizavus (Herlach *et al.* 2006b; Kakol *et al.* 2001; Peng *et al.* 2005; Pollock *et al.* 2006; Schneider-Muntau 2006; Vanacken *et al.* 2001; Zhrlitsyn *et al.* 2006) matyti, jog dauguma tiek universalia, tiek specializuota programine įranga

sprendžiamų uždavinių – vienos impulsinio magnetinio lauko induktoriaus konstrukcijos kuo detalesnė analizė ir tos konstrukcijos tobulinimas atsižvelgiant į gautuosius rezultatus. Pirminė konstrukcija analizei, šiuo atveju, parenkama remiantis daugiamete praktine patirtimi. Nagrinėjant skirtingas induktorių konstrukcijas (1.2 skyrius), galima pastebėti, kad kiekviename induktoriaus sluoksnyje vijų skerspjūvių struktūra yra vienoda, t. y. ją sudaro: laidininkas, elektrinė izoliacija bei suvirtinimo sluoksniai. Aprašoma metodika induktorių konstrukcijų sintezei remiasi tuo, jog bet kokią induktoriaus dvimatį modelį galima sudaryti iš daugelio tokių vijų skerspjūvių, parenkant vienos vijos skerspjūvio geometrinis parametrus ir medžiagas. Norint užtikrinti impulsinių induktorių efektyvumą ir elektromagnetinį suderinamumą su kitais elektronikos įtaisais papildomai atsiranda vienas svarbus reikalavimas: sluoksnių skaičius turi būti porinis, nes kitu atveju dalis energijos bus išspinduliuota į aplinką dėl kilpos efekto.

Tokia dvimačio induktoriaus skerspjūvio pusės ir vienos vijos skerspjūvio struktūra pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. 4 sluoksnių, 5 vijų induktoriaus ir vienos skerspjūvis: 1 – aplinka, 2 – laidininkas, 3 – konteineris ir vidinis vamzdelis, 4 – tarp sluoksnių sutvirtinimas, 5 – izoliacija, 6 – išorinis sutvirtinimas

Kaip jau minėta 1.3 ir 1.4 skyriuje, dėl induktorių konstrukcijų simetrijos ir, kiekvieną induktorių vyniojant individualiai, atsiradusių geometrinių parametru netikslumų, dvimačiai modeliai yra pakankamo tikslumo ir plačiai naudojami impulsinių induktorių analizei.

Papildomai, kiekvienam induktoriui parenkamas išorinio sutvirtinimo (2.2 pav., 6), konteinerio (3) geometriniai parametrai ir medžiagos, aplinkos sąlygos bei vidinės kiauřmės skersmuo. Tokia induktorių geometrija ir medžiaginė sudėtis nesudėtingai aprašoma programiškai. Taip pat, remiantis šia metodika programiškai „sukūrus“ daugelį induktorių, keičiant apvijų skaičių sluoksnyje ir sluoksnių skaičių, supaprastintais metodais galima suskaičiuoti srovės pereinamąjį procesą, apvijų išilimą, magnetinio lauko pasiskirstymą, šilumos sklaidą į aplinkinius sluoksnius ir mechaninius įtempius kiekvienam induktoriui, o iš re-

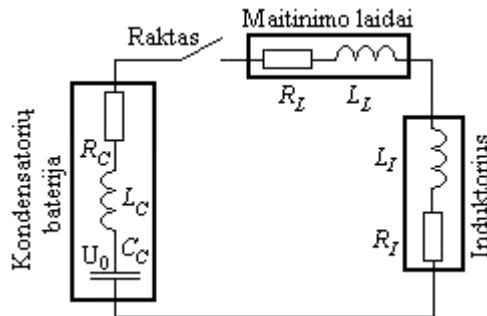
zultatų spręsti, ar induktorius nebus sugadintas po bandymo, t. y. ar induktorius patenka į „gyvavimo zoną“.

Aprašytoji metodika turi daug privalumų: tam tikrų skerspjūvių ir medžiagų laidininkams, izoliacijoms ir tarp sluoksniams sutvirtinimams programiškai paprastai ir efektyviai sudaromos daugelio induktorių konstrukcijos. Atlikus jų analizę galima išrinkti tas, kurios tenkina pageidaujamas, pvz., magnetinio lauko, charakteristikas, jei tokie induktoriai egzistuoja.

2.2. Induktoriaus termodinaminis modelis

Srovės pereinamojo proceso ir apvijų išilimo skaičiavimai atliekami sukūrus induktoriaus termodinaminį modelį (Bartkevičius *et al.* 2008b; Bartkevičius *et al.* 2007). Gauti rezultatai reikalingi tolimesnei – elektromagnetinių ir magneto-mechaninių procesų – analizei (Bartkevičius *et al.* 2008a; Višniakov *et al.* 2006c; Višniakov *et al.* 2006d).

Termodinaminis modelis sukurtas remiantis 2.2 paveiksle pateikta induktoriaus maitinimo elektrine schema, kurią sudaro: kondensatorių baterija (talpa – C_C , induktyvumas L_C , vidinė varža – R_C), idealizuotas tiristorinis raktas grandinės komutavimui, maitinimo laidai (R_L , L_L) ir impulsinis induktorius (R_I , L_I). Visi šie elementai grandinėje sujungti nuosekliai.



2.2 pav. Impulsinio induktoriaus maitinimo grandinė

Parametrai L_C ir R_C nevertinami, nes impulsiniams induktoriams maitinti naudojamos didelės greitaveikos kondensatorių baterijos, o maitinimo laidai yra trumpi, nes induktorius visada montuojamas kuo arčiau kondensatorių baterijos išėjimo gnybtų, todėl L_L , $R_L \rightarrow 0$. Taip pat L_I , R_I yra didesni nei L_C , R_C ir L_L , R_L .

Kondensatorių baterija, prieš eksperimentą, įkraunama iki įtampos U_0 . Tada kondensatorių baterijos iškrova per induktorių įjungus tiristorinį raktą, gali būti aprašyta II Kirchhoff'o dėsniu:

$$U_0(t) = R_I i(t) + L_I \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_C} \int i(t) dt. \quad (2.1)$$

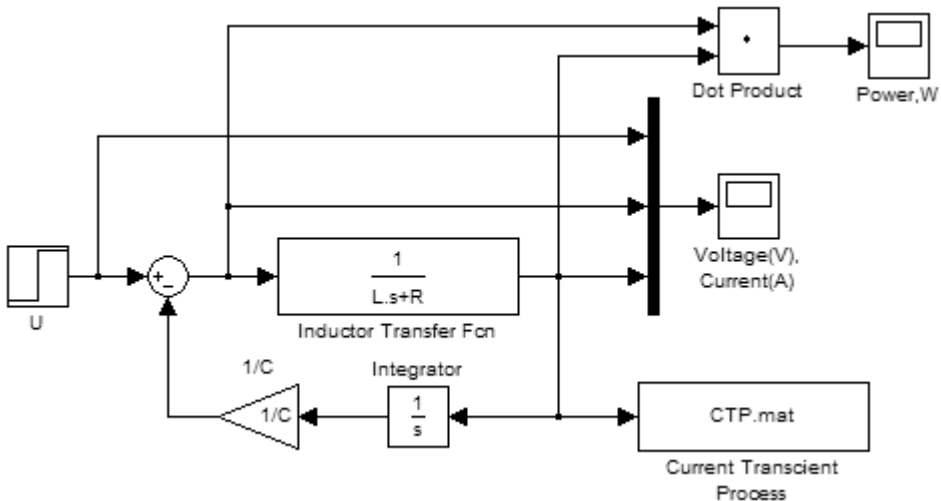
Laplace'o transformacija (2.1) lygčiai:

$$U_0(s) = R_I I(s) + L_I s I(s) + \frac{I(s)}{C_C s}. \quad (2.2)$$

Jei $U_0(s)$ – pagrindinis įėjimo parametras, o grandine tekanti srovė $I(s)$ – išėjimo parametras, tai sistemos perdavimo funkcija:

$$Z(s) = \frac{1}{L_I s + R_I} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{(L_I s + R_I) C_C s}}. \quad (2.3)$$

(2.3) gauta perdavimo funkcija įgyvendinta *Matlab*® *Simulink*® aplinkoje ir jos modelis pateiktas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Induktoriaus elektros grandinės *Matlab*® *Simulink*® modelis

2.3 paveiksle parodytasis induktoriaus modelis valdomas sukurta programa, kuri, suformavus vienos vijos skerspjūvį taip, kaip aprašyta 2.1 skyriuje, bei nurodžius induktoriaus geometrinius (vijų ir sluoksnių skaičių), naudojamų medžiagų šiluminius (savitąją šilumą, savitąjį šiluminį laidį) ir elektrinius (laidininko savitosios varžos priklausomybė nuo temperatūros) parametrus, suskaičiuoja

srovės, išilimo pereinamuosius procesus ir šilumos sklaidą į aplinkinius sluoksnius. Ši analizė yra sudėtinga, nes grandine tekančios srovės augimas lemia išskirto šilumos kiekio ir grandinės varžos didėjimą ir atvirkščiai, todėl kiekvienam žingsniui (mažam laiko intervalui), žinant srovės vertę, perskaičiuojamas išilimas ir apvijų varža, kurie kitame žingsnyje tą srovę įtakoja. Visi skaičiavimų duomenys įrašomi ir gali būti analizuojami įvairiais pjūviais. Toks procesų imitavimo būdas yra lankstus ir universalus, nes jis laisvai programuojamas ir nėra ribotas tik tam tikriems skaičiavimams.

Prieš pradėdant išilimo ir srovės pereinamojo proceso analizę, pateikiami:

- kondensatorių baterijos parametrai: U_0 ir C_C ;
- aplinkos temperatūra T_0 ;
- induktoriaus geometriniai parametrai: vienos vijos skerspjūvis, vidinis induktoriaus spindulys a_1 , vijų skaičius sluoksnyje n_1 ir sluoksnių skaičius n_2 ; elektriniai parametrai: induktoriaus laidininko varžos priklausomybė nuo temperatūros $\rho(T)$; šiluminiai parametrai: visų medžiagų savitosios šilumos $c(T)$ ir savitieji šiluminiai laidžiai $k(T)$. Kadangi žinoma, jog šilumos sklaida į aplinkinius sluoksnius nėra didelė, c ir k priklausomybės nuo temperatūros, išskyrus laidininką, nėra būtinos (pakanka pateikti $c(T_0)$ ir $k(T_0)$);
- visų medžiagų tankius $\rho_m(293 \text{ K})$ (skaičiavimuose reikalinga sluoksnių masė m_j , kuri nekinta dėl temperatūros keičiantis tūriui ir tankiui).

Turėdama šiuos duomenis programa suskaičiuoja induktoriaus išorinį spindulį a_2 , jo ilgį $2b$, vijų skaičių N , geometrinius koeficientus $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$, apvijos užpildymo faktorių λ , laidininko skerspjūvį kiekviename sluoksnyje S_i , visų sluoksnių masę m_j , vidutinį paviršiaus plotą A_j , storį w_j bei atstumą nuo centrinės induktoriaus ašies r_j . Induktoriaus sluoksnių skaičius $j_{n2} = 4n_2 + 2$, jei įskaičiuojamas išorinis cilindras ir vidinis cilindras, ant kurio vyniojama pirmoji apvija. Galiausiai suskaičiuojamas laidininko ilgis kiekviename sluoksnyje l_i bei varža:

$$R_i = \rho(T_0) \frac{1,06 l_i}{S_i}. \quad (2.4)$$

Koeficientas 1,06 (2.4) priklausomybėje įvedamas laidininko ilgiams perėjimuose iš vieno sluoksnio į kitą įvertinti. Induktoriaus induktyvumas, nepaisant saviinduktyvumo, kuris $>10^{-2}$ kartų mažesnis, skaičiuojamas taip (Groessinger 1982):

$$L = a_1 N^2 \frac{\mu_0 \pi}{8} \frac{(1 + \alpha)^2}{\beta} \left(1 + 0,9 \left(\frac{1 + \alpha}{4\beta} \right) + 0,64 \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \right) + 0,84 \left(\frac{\alpha - 1}{2\beta} \right) \right)^{-1}. \quad (2.5)$$

Programa paleidžiama su pradiniais parametrais ir suskaičiuojamas bei įrašomas pirmasis srovės pereinamasis procesas. Naudojant srovės pereinamojo proceso vertę $i[n]$, diskrečiam laiko momentui $t[n]$ suskaičiuojamas kiekviename laidininkų sluoksnyje išsiskyręs Joule'io šilumos kiekis ir temperatūros pokytis:

$$\Delta Q_i = i^2[n] R_i \Delta t; \quad \Delta T_i = \frac{\Delta Q_i}{m_i c_i(T)}. \quad (2.6)$$

Kondukcinė šilumos sklaida (dominuojantis šilumos perdavimo mechanizmas tokioje sistemoje) į aplinkinius sluoksnius kiekvienam sluoksniui j skaičiuojama rekursiškai:

$$\Delta Q_j = k_j(T) A_j \frac{T_{-j,+j}}{w_j} \Delta t; \quad \Delta T_j = \frac{\Delta Q_j}{m_j c_j}. \quad (2.7)$$

Atlikus šilumos sklaidos skaičiavimus, perskaičiuojama kiekvieno laidininkų sluoksniu savitosios varžos priklausomybė nuo temperatūros $\rho_i = \rho(T)$ bei varža $R_i \sim \rho$. Supaprastintu būdu paskaičiavus srovės $i[n]$ sukurtą magnetinio srauto tankį induktoriaus centre B_0 , įvertinama laidininkų magnetovarža (Herlach *et al.* 2001):

$$B_0 = \mu_0 \frac{Ni[n]}{2\beta\alpha_1} \Gamma(\alpha, \beta); \quad \Gamma(\alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha-1} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}; \quad (2.8)$$

$$\rho_i(B, T) = \rho_i(T) \left(1 + 10^{-3} ((B_0 \rho(273)) / (2\rho(T)))^{1.1} \right).$$

(2.8) priklausomybėje, skaičiuojant savitąją varžą, pasirinktas koeficientas $B_0/2$, o ne B_0 , kaip nurodyta (Herlach *et al.* 2001). B vidurkis čia naudojamas todėl, kad magnetinio lauko pasiskirstymo skaičiavimas, perskaičiuojant jį kiekvienam laiko momentui $t[n]$, naudoja daug kompiuterio resursų ir yra praktiškai neįmanomas.

Kondensatorių baterijos gnybtų įtampos sumažėjimas skaičiuojamas taip:

$$U[n+1] = U[n] - (i[n-1] + (i[n] - i[n-1])/2) \Delta t[n] / C_C. \quad (2.9)$$

Skaičiavimų ciklas kartojamas tol, kol srovės impulso vertė sumažėja iki 1 % maksimalios pasiektos vertės. Varžos pokytis laiko momentu $t[n]$ įtakoja srovės amplitudę laiko momentu $n+1$. Taip pat induktoriui išylant, keičiasi pereinamojo proceso trukmė, impulso forma ir induktoriaus apvijomis tekančios srovės maksimali vertė, kuri lemia generuojamo magnetinio lauko maksimalią vertę ir maksimalius mechaninius įtempius. Skaičiavimuose neįvertintas skin-efektas, t. y. varža laidininko skerspjūvyje yra pastovi ir tai leidžia įvertinti tik vidutinę

sluoksnių temperatūrą, tačiau to pakanka vertinant įšilimo įtaką induktoriaus izoliacijos ilgaamžiškumui (1.3 skyrius).

Iš induktoriaus termodinaminio modelio aprašymo matyti, jog norint suskaičiuoti apvijų su CuNb laidininkais įšilimą, reikia įvertinti tų laidininkų savitosios varžos ρ_{CuNb} , savitosios šilumos c_{CuNb} ir savitojo šiluminio laidžio k_{CuNb} priklausomybes nuo temperatūros (Bartkevičius *et al.* 2008b; Bartkevičius *et al.* 2007).

CuNb savitosios varžos įvertinimas

Cu savitosios varžos priklausomybė nuo temperatūros (100 % IACS) (Herlach *et al.* 2001):

$$\rho_{Cu}(T) = -3,41 \cdot 10^{-9} + 7,2 \cdot 10^{-11} T. \quad (2.10)$$

VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje induktorių vyniojimui naudojamų laidininkų 1,7×0,8 mm CuNb ir 4,2×2,37 mm CuNb laidumai yra atitinkamai 65 % ir 63 % IACS, kai aplinkos temperatūra $T = 293$ K, todėl:

$$\rho_{CuNbA}(293 \text{ K}) = 2,723 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \quad \rho_{CuNbP}(293 \text{ K}) = 2,809 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}. \quad (2.11)$$

Taip pat buvo išmatuota, kad $\rho_{CuNbA}(293 \text{ K})/\rho_{CuNbA}(77 \text{ K}) = 4,5$ ir $\rho_{CuNbP}(293 \text{ K})/\rho_{CuNbP}(77 \text{ K}) = 4,93$. Tada, pasinaudojant priklausomybe (2.10), randamos $\rho_{CuNb}(T)$ tiesinės aproksimacijos:

$$\begin{aligned} \rho_{CuNbA}(T) &= -3,41 \cdot 10^{-9} + 7,2 \cdot 10^{-11} T(1,7973 - 0,001177T); \\ \rho_{CuNbP}(T) &= -3,41 \cdot 10^{-9} + 7,2 \cdot 10^{-11} T(1,6963 - 0,0006926T). \end{aligned} \quad (2.12)$$

(2.12) priklausomybės tinkamos, kai $77 \text{ K} < T < 1357 \text{ K}$, nes 1357 K yra Cu lydymosi temperatūra ir (2.10) nebetinkama.

CuNb savitosios šilumos įvertinimas

Gryno Cu savitosios šilumos priklausomybė nuo temperatūros (Herlach *et al.* 2001):

$$c_{Cu}(T) = 834 - 4007y + 4006y^2 - 1463y^3 + 179,7y^4, \quad y = \log_{10} T. \quad (2.13)$$

Minėtųjų laboratorijoje naudojamų laidininkų sudėtis: 82 % Cu ir 18 % Nb. Kadangi gamintojas duomenų apie savitosios šilumos priklausomybę nuo temperatūros nepateikia ir yra žinoma, jog $c_{Nb}(300 \text{ K}) = 256 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ (<http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>), remiantis procentine lydinio sudėtimi CuNb savitoji šiluma apytiksliai įvertinama taip:

$$c_{CuNb}(T) = c_{Cu}(T) \cdot 0,94. \quad (2.14)$$

CuNb savitojo šiluminio laidžio įvertinimas

Vadovaujantis tais pačiais principais, kaip ir įvertinant savitąją šilumą, ir žinant, jog $k_{Cu}(T) = 0,43(T-273)+400$ (Peng *et al.* 2005), o $k_{Nb}(300\text{ K}) = 53,7\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (<http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>), remiantis procentine lydinio sudėtimi savitasis CuNb šiluminis laidis apytiksliai gali būti įvertintas taip:

$$k_{CuNb}(T) = k_{Cu}(T) \cdot 0,84. \quad (2.15)$$

CuNb tankio įvertinimas

Žinoma, jog Cu tankis kambario temperatūroje 8910 kg/m^3 , o Nb – 8570 kg/m^3 (<http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>). Iš procentinės lydinio sudėties suskaičiuojama:

$$\rho_{m,CuNb} = 8849\text{ kg/m}^3. \quad (2.16)$$

2.3. Induktoriaus elektromagnetinis modelis

Kuriant induktoriaus elektromagnetinį modelį, remiantis srovės pereinamojo proceso skaičiavimų rezultatais, suskaičiuojamas dvimatis magnetinio lauko pasiskirstymas induktoriaus viduje. Šios dvi analizės yra būtinos, norint įvertinti mechaninių įtempių įtaką induktoriaus ilgaamžiškumui, t. y. kuriant magneto-mechaninį induktoriaus modelį (Bartkevičius *et al.* 2008a).

Magnetinio lauko pasiskirstymas induktoriaus apvijose skaičiuojamas kai srovė, tekanti induktoriaus apvijomis, pasiekia maksimumą. Magnetinio srauto tankis B yra proporcingas srovei, todėl šiame taške sukurtas magnetinis laukas taip pat bus maksimalus, kaip ir magnetinio lauko ir tekančios srovės sąveikos rezultatas – mechaniniai įtempiai. Skaičiuojant magnetinio lauko pasiskirstymą induktoriaus kiaurymėje ir apvijose, nagrinėjamas dvimatis induktoriaus geometrinis modelis, t. y. jo skerspjūvis išilgai kiaurymės ašies.

Pirmiausia induktorius suskaidomas į daugelį virtualių vijų. Bet kokios apskritimo formos vijos, kuria teka elektros srovė, kuriamas ašinis ir radialinis magnetinis laukas (kai vijos apskritimo plotas statmenas induktoriaus kiaurymės ašiai) (Herlach *et al.* 2001; Montgomery 1980):

$$\begin{aligned} B_z(r, z) &= (\mu_0 / 2\pi) I_{\max} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left(\frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(m) + K(m) \right), \\ B_r(r, z) &= (\mu_0 / 2\pi) I_{\max} \frac{z}{r\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left(\frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(m) - K(m) \right); \end{aligned} \quad (2.17)$$

čia: r, z – taško, kuriame skaičiuojamas B , spindulys ir atstumas nuo taško induktoriaus centre $(0,0)$; a – virtualios vijos spindulys; $E(m), K(m)$ – 1-osios ir 2-osios eilės elipsiniai integralai, kai $m = 4ar/((a+r)^2+z^2)$.

Radialinės ir ašinės magnetinio lauko dedamosios skaičiavimo induktoriaus skerspjūvio plokštumoje pakanka, nes, kaip jau minėta, induktorius sudarytas iš aibės tokių plokštumų, kuriose šios dedamosios yra vienodos.

Kai induktorius sudarytas iš n_1 vijų sluoksnyje ir n_2 sluoksnių, ašinio ir radialinio magnetinio lauko pasiskirstymas skaičiuojamas sudedant virtualių vijų (matrica $n_1 \cdot c_r \times n_2 \cdot c_z$) sukurtus magnetinius laukus:

$$B_z(r, z) = \sum_{i=1}^{n_2 \cdot c_z} \sum_{j=1}^{n_1 \cdot c_r} B_{z,ji}(r, z), \quad B_r(r, z) = \sum_{i=1}^{n_2 \cdot c_z} \sum_{j=1}^{n_1 \cdot c_r} B_{r,ji}(r, z); \quad (2.18)$$

čia: c_r, c_z – daugybos faktoriai, leidžiantys didinti/mažinti skaičiavimų tikslumą ir skaičiavimų laiką.

2.4 Induktoriaus magnetomechaninis modelis

Remiantis srovės pereinamojo proceso ir magnetinio lauko pasiskirstymo skaičiavimų rezultatais, suskaičiuojamas dvimatis mechaninių įtempių pasiskirstymas induktoriaus skerspjūvyje (Bartkevičius *et al.* 2008a). Šie skaičiavimų rezultatai leidžia nustatyti, ar induktoriaus geometrija po bandymo nebus pakitusi.

Mechaniniai įtempiai (Lorentz'o jėgos), kaip jau minėta, induktoriaus apvijosse veikia dėl jomis tekančios srovės ir sukurto magnetinio lauko sąveikos. Magnetinio lauko dedamosios įgalina paskaičiuoti įtempių dedamąsias, tačiau mechaninį atsparumą bet kuriame taške nusako suminė to taško jėgų sąveika. Šiai suminei sąveikai įvertinti pasirenkamas Von Mises kriterijus (Herlach *et al.* 2001; Montgomery 1980). Norint suskaičiuoti Von Mises įtempių pasiskirstymą induktoriuje, reikia žinoti radialinių, ašinių ir liestinės įtempių pasiskirstymą.

Radialinius įtempius lemia ašinė magnetinio lauko dedamoji, jie veikia statmenai induktoriaus kiaurymės ašiai į induktoriaus išorę ir jų pasiskirstymas skaičiuojamas:

$$\sigma_r(r, z) = j \int_{a_2}^{a_1} B_z(r, z) dr. \quad (2.19)$$

Ašinius įtempius nulemia radialinė magnetinio lauko dedamoji, jie veikia kaip jėga, spaudžianti apvijas į induktoriaus vidų išilgai kiaurymės ašies:

$$\sigma_z(r, z) = j \int_0^b B_r(r, z) dz. \quad (2.20)$$

Liestinės įtempiai kiekvienam z suskaičiuojami pagal (Herlach *et al.* 2001):

$$\sigma_h(r, z) = \frac{(B_z^2 + B_r^2)}{2\mu_0} 2 \frac{r}{a} \frac{\alpha - r/a}{(\alpha - 1)^2}; \quad (2.21)$$

čia: a – vidinės vijos spindulys; r – skaičiuojamo taško spindulys.

Tada Von Mises įtempiai:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_h - \sigma_r)^2 + (\sigma_h - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}{2}}. \quad (2.22)$$

Atliekant įtempių analizę dėl jau įvardintų priežasčių (1.3 skyrius) nevertinami šiluminio medžiagų plėtimosi apvijoje sukelti mechaniniai įtempiai, o mechaniniai įtempiai, atsirandantys vyniojant induktorių, yra keliomis eilėmis mažesni, nei įtempiai, siekiantys medžiagų tamprumo ir takumo ribas, kai generuojami ~50 T magnetiniai laukai.

2.5 Induktorių geometrijos paieškos algoritmas

Skyriuje 1.3 įvardintos dvi pagrindinės priežastys, dėl kurių stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorius gali būti sugadintas: dėl apvijų išilimo viršyta leistinoji izoliacijos temperatūra ir viršyti konstrukcijai leistini mechaniniai įtempiai.

Vyniojant pakankamai storą tarp sluoksninio sutvirtinimo sluoksnį, kurio tamprumo ribos radialine kryptimi yra didesnės už laidininkų, veikiami didelių radialinių jėgų, veikiančių į induktoriaus išorę, laidininkai (ypatingai vidinė jų dalis) atsiskiria nuo apačioje esančio sluoksnio ir todėl, nesant kontakto tarp sluoksnių, įtempiai radialine kryptimi nesisumuoja (Herlach *et al.* 2006b), o tai – didelis tokių konstrukcijų privalumas kuriant itin stiprius (>60 T) magnetinius laukus. Šiuo atveju, mechaniniai įtempiai induktoriaus apvijoje pasiskirsto gan tolygiai, o induktorius nebus sugadintas, jei nė viename sluoksnyje jie neviršys sutvirtinimo medžiagos tamprumo ribų. Pvz., Zylon[®] su epoksidine derva tamprumo riba radialine kryptimi 293 K temperatūroje, priklausomai nuo to, kaip jis yra suvyniotas, gali siekti 3,2 GPa, kai, tuo tarpu, apvijoms naudojamų CuNb lydinių ji neviršija 0,85 GPa. Kuriant silpnesnius (< 60 T) magnetinius laukus, vyniojamas plonesnis tarp sluoksninis sutvirtinimas, nes: 1. Mechaniniai įtempiai yra mažesni. 2. Sluoksniams esant arčiau vienas kito, keičiamas apvijų indukty-

vumas ir didinama generuojamo magnetinio lauko amplitudė tomis pačiomis sąlygomis. Ir tokiu atveju sutvirtinimo sluoksnių mechaninis atsparumas radialine kryptimi išlieka didesnis nei apvijų laidininkų, tačiau nagrinėjamas modelis yra panašesnis į modelį, kuriame apvijos suvyniotos be tarp sluoksninio sutvirtinimo ir sluoksniai tarpusavyje sąveikauja tampriai. Šiuo atveju sluoksniuose veikiančios jėgos sumuojasi radialine kryptimi ir kriterijus, užtikrinantis, kad induktorius nebus pažeistas mechaniškai – jo apvijų tamprumo ribos. Tai reiškia, jog apvijos, kitaip nei pirmuoju atveju, nebus deformuojamos plastiškai ir minimaliai pasireikš jų nuovargis, induktorius nebus sugadintas ir jo geometriniai bei elektriniai parametrai nebus pakitę prieš atliekant kitą bandymą. Atliekant induktorių norimam magnetiniam laukui generuoti paiešką, skaičiuojant mechaninius įtempius, remiamasi antruoju modeliu.

Atsižvelgus į tai, kas aptarta anksčiau, nusakoma induktorių „gyvavimo zona“ – pagrindinių parametrų (galimas vijų ir sluoksnių skaičius, vidinės kiaurymės skersmuo, pereinamojo proceso trukmė, maksimalus generuojamas magnetinis laukas, maksimalūs mechaniniai įtempiai, energijos šaltinio, medžiagų ir aplinkos elektrofiziniai parametrai), užtikrinančių konstrukcijos ilgaamžiškumą, visuma, su kuriais induktoriai generuoja maksimalų magnetinį lauką, neperkaista ir suminiai mechaniniai įtempiai juose neviršija medžiagų leistinųjų. Induktorius, patenkantis į „gyvavimo zoną“, po impulso nebus sugadintas ir gali būti naudojamas daugkartiniams pakartojamiems eksperimentams.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra sukurti programinį paketą, skirtą induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“, paieškai ir pagrindinių parametrų skaičiavimui, jų konstrukcijas sudarant remiantis aprašytąja geometrijos ir medžiagų sudėties sintezės metodika.

Atliekant induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“, paiešką, atsižvelgiama ir į keletą kitų kriterijų: minimalų ir maksimalų pageidaujamą magnetinį lauką ir minimalią generuojamo impulso trukmę. Pirmieji kriterijai svarbūs norint parinkti tik tam tikros amplitudės magnetinį lauką generuojančių daugkartinio naudojimo induktorių konstrukcijų variantus. Minimali impulso trukmė itin svarbi atliekant eksperimentus: daugelio eksperimentų negalima kokybiškai atlikti, jei impulso trukmė per maža.

Programinis paketas induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“, geometrijai surasti sudarius vienos apvijos skerspjuvio modelį, kuriamas *Matlab*[®] aplinkoje, susieta srovės pereinamojo proceso ir įšilimo analizė atliekama pasinaudojus lanksčia *Matlab*[®] – *Matlab*[®] *Simulink*[®] sąsaja. 2.4 paveiksle pateiktas skaičiavimų funkcionavimo algoritmas.

Kaip matyti iš 2.4 paveikslo, pirmiausia suvedami įėjimo parametrai, kuriuos turi nustatyti projektuotojas:

- paieškos kriterijai: minimalus pageidautinas magnetinis laukas B_{min} , didžiausias leistinas magnetinis laukas B_{max} , didžiausia leistina įšilimo tempe-

ratūra T_{max} , kuri turi nebūti didesnė už apvijos laidininkų didžiausią leistiną temperatūrą, minimali pageidaujama pereinamojo proceso trukmė t_{min} ir didžiausi leistini Von Mises mechaniniai įtempiai σ_{VMmax} , kurie turi nebūti didesni už vijų laidininkų tamprumo ribas;

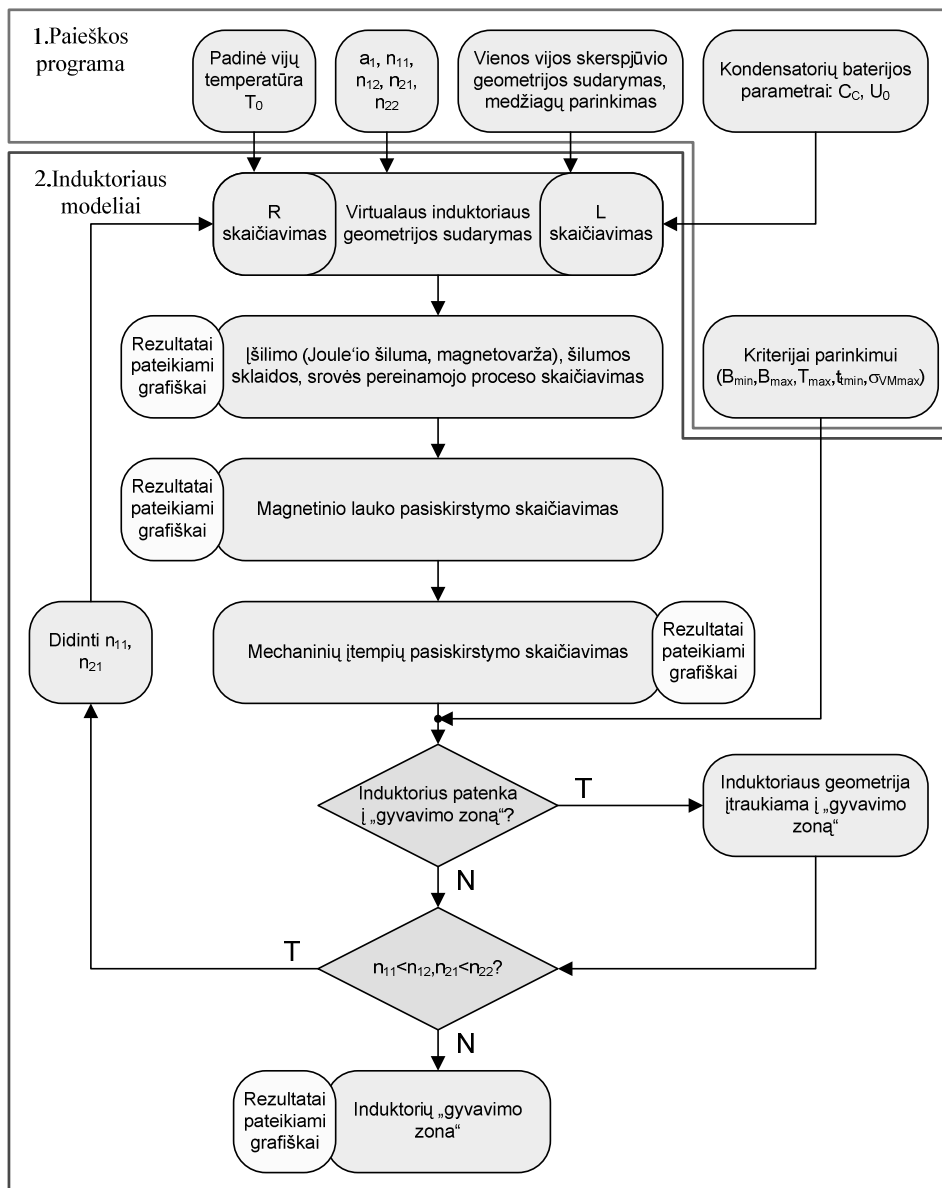
- paieškos kintamųjų erdvė: minimalus apvijų skaičius sluoksnyje n_{11} , maksimalus apvijų skaičius sluoksnyje n_{12} , minimalus sluoksnių skaičius n_{21} , maksimalus sluoksnių skaičius n_{22} , taip pat vidinės induktoriaus kiaurymės skersmuo a_1 , kuris išlieka pastovus visos paieškos metu;
- pradinė aplinkos (vijų) temperatūra T_0 ;
- kondensatorių baterijos talpa C_C ir pradinė gnybtų įtampa U_0 ;
- vienos vijos skerspjūvio geometrija bei sudėtis (šiluminiai, elektriniai ir kt. medžiagų parametrai).

Suvedus įėjimo parametrus, programa sudaro virtualų induktoriaus geometrijos ir medžiagų modelį iš n_{11} apvijų ir n_{21} sluoksnių, paskaičiuoja induktoriaus apvijų kiekviename sluoksnyje ilgį ir varžą R pradinėje temperatūroje T_0 bei induktoriaus induktyvumą L .

Induktoriaus išilimui, srovės pereinamajam procesui bei šilumos sklaidos įvertinimui sukuriamas termodinaminis modelis, magnetinio lauko ir mechaninių įtempių pasiskirstymui įvertinti – elektromagnetinis ir magnetomechaninis modelis atitinkamai. Induktoriaus modeliai, šiuo atveju – termodinaminis, elektromagnetinis ir magnetomechaninis procesus nusakančių matematinių lygčių, induktoriaus elektrinės grandinės ir eksperimentinės aplinkos parametrų bei tų parametrų ribinių verčių visuma, perkelta į *Matlab*[®] terpę.

Atlikus visus skaičiavimus induktoriui su n_{11} vijų ir n_{21} sluoksnių, tikrinama, ar induktoriaus išilimas ir mechaniniai įtempiai neviršija leistinųjų. Paieškos algoritme taip pat, dėl jau aptartų priežasčių, numatyta galimybė įvertinti minimalų ir maksimalų pageidaujamą magnetinį lauką bei minimalią impulso trukmę. Šie kriterijai yra svarbūs: B_{min} ir B_{max} nusako induktorius, kurie generuos į šias ribas patenkantį magnetinį lauką, o t_{min} užtikrina, kad magnetinio lauko impulso pereinamasis procesas truks tiek, kad galima bus atlikti pageidaujamus bandymus, tačiau induktoriaus apvijos neperkais. Jei visi kriterijai tenkinami, induktorius įtraukiamas į „gyvavimo zoną“. Taip, keičiant vijų ir sluoksnių skaičių atliekami induktorių, patenkančių į aibę $((n_{11}:n_{12}), (n_{21}:n_{22}))$, skaičiavimai ir suformuojama induktorių, tenkinančių paieškos kriterijus, „gyvavimo zona“.

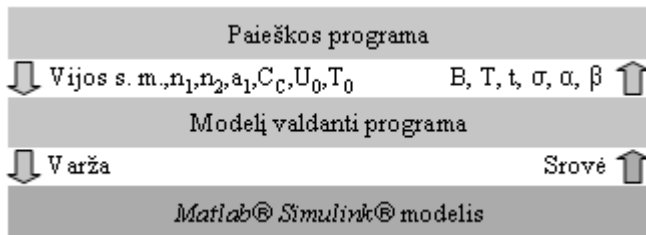
Ir tarpiniai (po kiekvieno analizės etapo projektuotojui pageidaujant), ir galutiniai rezultatai pateikiami grafiškai.



2.4 pav. Induktorių „gyvavimo zonos“, sudarius vienos vijos skerspjūvio modelį, paieškos algoritmas

2.6. Daugkartinio naudojimo induktorių geometrijos paieškos programa

Induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“, paieška atliekama suformuotiems vijų skerspjūvių modeliams. Atliekant empirine patirtimi remiantis sudaromų induktorių skaičiavimus gali būti taip, jog pageidaujamos amplitudės B magnetinis laukas jais nebus generuojamas dėl viršytų medžiagų ribinių parametrų. Darant prielaidą, jog gali egzistuoti induktoriai, turintys kitokių vijų n_1 ir sluoksnių n_2 skaičių, bet tuos pačius vijų skerspjūvių modelius, kuriais galima generuoti iki B amplitudės magnetinį lauką, sukuriamą tokių induktorių paieškos programa, dar vadinama induktorių „gyvavimo zonos“ paieškos programa. Ši programa parašyta remiantis 2.4 paveiksle pateiktu detaliu algoritmu, o jos hierarchinė struktūra ir duomenų srautai, padedantys suprasti funkcionavimą, pateikti 2.5 paveiksle (Bartkevičius *et al.* 2008c).



2.5 pav. Induktorių geometrijos paieškos programos struktūra ir duomenų srautai

Kaip matyti iš 2.4 ir 2.5 paveikslų, prieš pradedant vykdyti paiešką, nurodomi paieškos kriterijai, o paieškos programa termodinaminei, elektromagnetinei ir magnetomechaninei analizei perduoda vijos skerspjūvio modelį, vidinį induktoriaus skerspjūvį ($a_1 = \text{const}$ visai „gyvavimo zonai“), vijų ir sluoksnių skaičių ($n_1; n_2$), pradinę temperatūrą T_0 bei kondensatorių baterijos parametrus ($C_C, U_0 = \text{const}$ visai „gyvavimo zonai“). Atlikus visų procesų, aprašytų 2.2, 2.3, 2.4 skyriuose, analizę, paieškos programai perduodami skaičiavimų rezultatai: magnetinio lauko amplitudė B_{zmax} , maksimali apvijų išilimo temperatūra T_{max} , laikas t_{min} , per kurį pasiekiamą magnetinio lauko amplitudė, maksimali Von Mises įtempių vertė σ_{VMmax} bei suskaičiuoti santykiniai induktoriaus matmenys α ir β .

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurtoji induktorių geometrijos sintezės metodika įgalina nesudėtingai programiškai sudaryti induktorių skerspjuvių dvimačius geometrinius ir medžiagų modelius. Sukurtasis induktoriaus matematinis modelis, algoritmai ir programinė įranga, įgalina greitai ir efektyviai gauti pagrindinių tiriamame induktoriuje vykstančių procesų analizės rezultatus, įvedus tik vienos induktoriaus vijos skerspjuvio (arba vienos vijos skerspjuvio kiekviename sluoksnyje, jei tų skerspjuvių konfigūracija skirtinga) konfigūraciją, taip pat atlikti induktorių, tenkinančių pasirinktuosius kriterijus – išėjimo parametrus, geometrijos (vijų ir sluoksnių skaičiaus) paiešką.
2. Sukurtasis impulsinių induktorių parametų paieškos algoritmas įgalina apskaičiuoti induktorių „gyvavimo zoną“ – induktorių, kurių, esant tam tikroms eksperimentinėms sąlygoms (maitinimo šaltinio įtampa, aplinkos temperatūra ir t.t.), apvijų temperatūra po impulso neviršija izoliacijos leistinos temperatūros, o mechaniniai įtempiai – mechaniškai silpniausių medžiagų (laidininkų) tamprumo ribų, parametų visumą.
3. Sukurta programinė įranga, kitaip nei jau žinoma specializuota programinė įranga, paieškos uždavinį sprendžia ne keisdama vieno induktoriaus su konkrečiu vijų ir sluoksnių skaičiumi geometrinius parametrus, o parinkdama tinkamus induktorius iš daugelio, su ta pačia vienos vijos skerspjuvio konfigūracija viename sluoksnyje, tačiau skirtingu vijų ir sluoksnių skaičiumi. Šiame darbe įgyvendinamas konkretaus, aiškiai ir pilnai apibrėžto paieškos uždavinio sprendimas: induktorių konstrukcijų, tenkinančių pasirinktus išėjimo kriterijus, paieška, keičiant vijų ir sluoksnių skaičių, parinkus vienos vijos skerspjuvio konfigūraciją.
4. Sukurtasis programinis paketas įgalina atlikti įvairius induktoriaus geometrijos skaičiavimus, daugeliu pjūvių analizuoti gautus rezultatus, pateiktus grafiškai. Programinis paketas yra universalus: parašytas *Matlab*[®] terpės programavimo kalba, todėl lengvai keičiamas, pritaikomas, yra visos galimybės jį tobulinti ir modifikuoti nenumatytiems ar sudėtingesniems uždaviniams spręsti.

Stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorių parametrų nustatymas

Šiame skyriuje aprašomas laidininkų parinkimas, vienos vijos skerspjūvio geometrijos ir sudėties sudarymas (remiantis 2-ame skyriuje pateikta metodika). Taip pat atliekami išilimo, magnetinio lauko amplitudės ir mechaninių įtempių priklausomybės nuo laidininko skerspjūvio ir medžiagos (savitosios varžos) tyrimai, vykdoma induktorių, kurių apvijos suvytos iš skirtingų laidininkų, „gyvavimo zonos“ paieška. Atlikti tyrimai paskelbti darbuose (Bartkevičius *et al.* 2008a; Bartkevičius *et al.* 2008b; Bartkevičius *et al.* 2008c; Bartkevičius *et al.* 2007)

3.1. Laidininkų parinkimas ir vienos vijos skerspjūvių sudarymas

Kaip jau minėta 1.2 skyriuje, laidininkų, gaminamų impulsiniams induktoriams vynioti, pasirinkimas nėra itin didelis. VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje induktoriams vynioti naudojami Cu ir Bočvaro institute, Rusijoje, gaminti CuNb laidininkai. Visų šių laidininkų skerspjūvis – stačiakampis suap-

valintais kampais – turi privalumų lyginant su apvalaus skerspjūvio laidininkais: didesnį skerspjūvio užpildymo faktorių λ , didesnį mechaninį atsparumą (nes laidininkai „sugula“ šalia vienas kito apvijoje, ją pilnai užpildydami), izoliacija vyniojama taip pat lengvai. 3.1 lentelėje pateikti pagrindiniai visų laidininkų parametrai.

3.1 lentelė. Laidininkų, induktoriams vynioti, parametrai ($T = 293\text{ K}$)

Laidininkas	Medžiaga, sudėtis	Matmenys, mm	Laidumas, % IACS	Tampr. riba, MPa	Takumo riba, MPa	ρ_{293K}/ρ_{77K}
A	CuNb (82:18 %)	1,7×0,8	65	830-850	1120	4,50
B	Cu (99 %)	1,7×0,8	~99	250	320	8,43
P	CuNb (82:18 %)	4,2×2,37	63	830-850	1120	4,93

Remiantis 2-ame skyriuje pateikta metodika, sudaromi vijų skerspjūvių modeliai. Izoliacijai pasirenkama 0,3 mm storio *Kapton*[®] juosta (žiūr. 2.1 pav.), o sutvirtinimui – 0,2–0,3 mm storio *Zylon*[®] sluoksnis, suvyniotas iš *Zylon*[®] siūlų, suteptų epoksidine derva. Vijų skerspjūvių sudėtis pateikta 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Vijų skerspjūvių modeliai

Laidininkas	Izoliacija	Sutvirtinimas	Vija	λ
A, Cu, 1,7×0,8 mm	<i>Kapton</i> [®] , 0,3 mm	<i>Zylon</i> [®] +Epoksidinė derva, 0,26 mm	2,3×1,6 mm	0,35
B, CuNb, 1,7×0,8 mm	<i>Kapton</i> [®] , 0,3 mm	<i>Zylon</i> [®] +Epoksidinė derva, 0,26 mm	2,3×1,6 mm	0,35
P, CuNb, 4,2×2,37 mm	<i>Kapton</i> [®] , 0,3 mm	<i>Zylon</i> [®] +Epoksidinė derva, 0,23 mm	4,8×3,2 mm	0,65

3.2 lentelėje nurodyti vijų skerspjūviai yra kiek galima artimi išmatuotiesiems laboratorijoje. Šie vijų skerspjūviai toliau naudojami sudarant virtualų induktoriaus geometrijos, termodinaminį, elektromagnetinį ir magnetomechaninį modelį, taip pat atliekant visus tyrimus, aprašytus šiame darbe. Vadovaujantis šia metodika, gali būti sudaryti bet kokios sudėties ir geometrinių formų vijų skerspjūvių modeliai.

3.2. Cu ir CuNb laidininkų induktorių įšilimo tyrimas

Skirtingų laidininkų įšilimo tyrimui pasirenkami trys vijų, kurių sudėty pas- teiktos 3.2 lentelėje, skerspjūviai. Iš šių skerspjūvių, nurodžius pradinius para- metrus, programa sudaro trijų induktorių – „A“, „B“ ir „P“ skerspjūvių geomet- rijas. Visi pradiniai induktorių duomenys pateikti 3.3 lentelėje, programos suskaičiuotieji duomenys – 3.4 lentelėje. Medžiagų tankiai ir šiluminiai paramet- rai, atsižvelgiant į 2.2 skyriuje atliktus skaičiavimus ir duomenis iš (Peng *et al.* 2005), pateikti 3.5 lentelėje. Induktoriai „A“ ir „B“ buvo suvynioti VGTU Stip- rių magnetinių laukų laboratorijoje. Induktorius „P“ – induktoriaus, kurį ketina- ma suvynioti naudojant įsigytą naują CuNb laidininką, prototipas.

3.3 lentelė. Pradiniai impulsinių induktorių parametrai

Parametras	Induktorius ir vertė		
	Ind. „A“	Ind. „B“	Ind. „P“
a_1 , mm	6	6	6
n_1	13	13	10
n_2	6	6	6
Laidininkas	A	B	P
T_0 , K	77	77	77

3.4 lentelė. Suskaičiuotieji impulsinių induktorių parametrai

Parametras	Induktorius ir vertė		
	Ind. „A“	Ind. „B“	Ind. „P“
a_2 , mm	16	16	25,2
$2b$, mm	30	30	48
N	78	78	60
α, β	2,67, 2,50	2,67, 2,50	4,2, 4
λ	0,3536	0,3536	0,6480
l , m	5,7145	5,7145	6,2339
$R(T_0)$, Ω	0,0255	0,0090	0,0036
L , μH	51	51	35,6

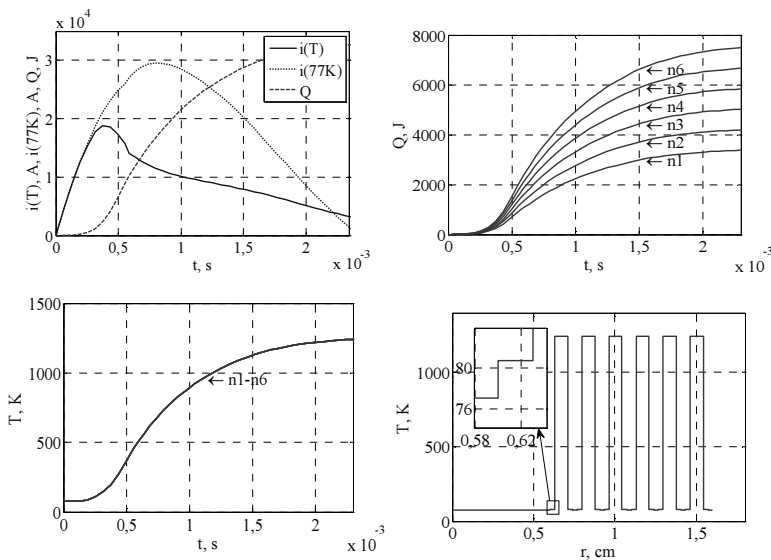
3.5 lentelė. Medžiagų tankiai ir šiluminiai parametrai

Medžiaga	ρ_m , kg/m ³	c , J/(kg·K)	k , W/(m·K)
Cu	8910	$c_{Cu}(T)$	$k_{Cu}(T)$
Cu-Nb	8849	0,94 $c_{Cu}(T)$	0,84 $k_{Cu}(T)$
Zylon [®]	1540	31,25T	-0,0644+0,00767T
Kapton [®]	1420	1090	0,12T

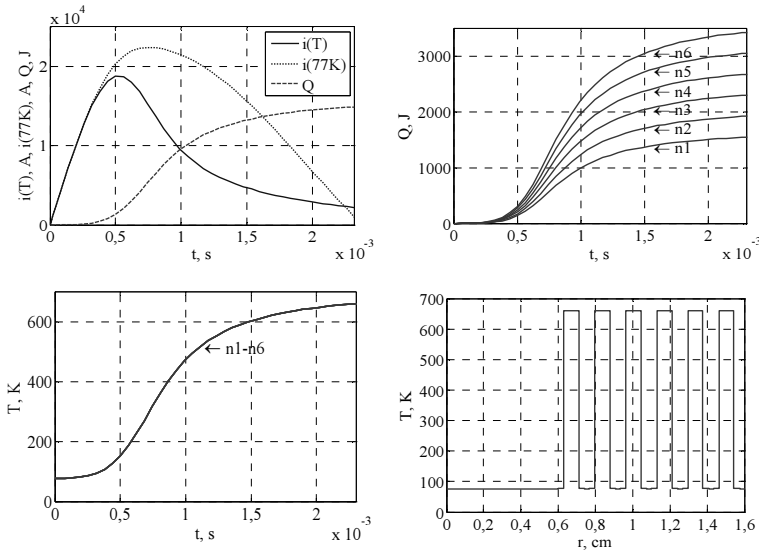
Induktorių „A“ ir „B“ induktyvumas buvo išmatuotas laboratorijoje, kambario temperatūroje: 44,2 ir 43,2 μH , o tai gerai atitinka jų induktyvumo skaičiavimus (3.4 lentelė) ir leidžia manyti, jog induktoriaus „P“ induktyvumas suskaičiuotas taip pat pakankamai tiksliai.

VG TU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje įrengta kondensatorių baterija, kurios talpa 4 pakopomis gali būti keičiama ją didinant po 2700 μF , maksimali įkrautos baterijos gnybtų įtampa yra $U_{0\max} = 4000 \text{ V}$. Apvijų išilimo tyrimas atliekamas pasirinkus baterijos talpą $C_C = 10800 \mu\text{F}$ ir tokią įtampą, kad generuojamas magnetinis laukas induktoriaus centre pasiektų 50 T, t. y. $B_{0\max} = 50 \text{ T}$. Induktoriumi „A“ toks magnetinis laukas pasiekiamas, kai $U_0 = 3700 \text{ V}$, induktoriumi „B“ – $U_0 = 2850 \text{ V}$, induktoriumi „P“ pasiekiamas 49 T laukas, kai $U_0 = U_{0\max} = 4000 \text{ V}$.

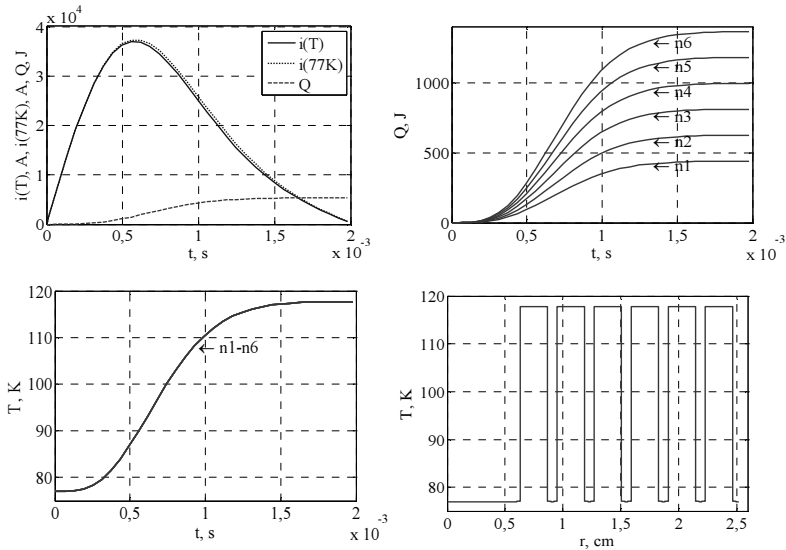
Gauti skaičiavimų rezultatai – srovės (palyginimui: kreivės $i(77 \text{ K})$ – nevertinant išilimo, kreivės $i(T)$ – įi įvertinus), išilimo (visos apvijos ir pasluoksniui), apvijos temperatūros (pasluoksniui) pereinamieji procesai ir temperatūros pasiskirstymas induktoriaus sluoksniuose, įvertinant kondukcinę šilumos sklaidą iš apvijos į aplinkinius sluoksnius – induktoriui „A“, „B“ ir „P“ pateikti atitinkamai 3.1, 3.2 ir 3.3 paveiksluose.



3.1 pav. Induktorius „A“. Apvijų srovės $i(77 \text{ K}, t)$, $i(T, t)$, išilimo ($Q(t)$ – visos apvijos ir pasluoksniui), temperatūros $T(t)$ pereinamieji procesai ir temperatūros pasiskirstymas sluoksniuose $T(r)$, kai $U_0 = 3700 \text{ V}$, $B_{0\max} = 50 \text{ T}$



3.2 pav. Induktorius „B“. Apvijų srovės $i(77\text{ K}, t)$, $i(T, t)$, išilimo ($Q(t)$)– visos apvijos ir pasluoksniui), temperatūros $T(t)$ pereinamieji procesai ir temperatūros pasiskirstymas sluoksniuose $T(r)$, kai $U_0 = 2850\text{ V}$, $B_{0\max} = 50\text{ T}$



3.3 pav. Induktorius „P“. Apvijų srovės $i(77\text{ K}, t)$, $i(T, t)$, išilimo ($Q(t)$)– visos apvijos ir pasluoksniui), temperatūros $T(t)$ pereinamieji procesai ir temperatūros pasiskirstymas sluoksniuose $T(r)$, kai $U_0 = 4000\text{ V}$, $B_{0\max} = 49\text{ T}$

Iš 3.1 paveikslo matyti, jog induktoriaus „A“ (CuNb apvijos) srovės pereinamojo proceso kreivė $i(T, t)$, suskaičiuota įvertinant išilimą, stipriai skiriasi nuo pereinamojo proceso kreivės $i(77\text{ K}, t)$, kai išilimas nevertinamas: srovės amplitudė ir laiko intervalas, per kurį ji pasiekiamą, yra $\sim 1,5$ karto mažesni. Didelis apvijoje išsiskyręs šilumos kiekis (32,6 kJ) rodo, jog induktoriaus naudingumas, t. y. kondensatoriaus baterijoje sukauptos energijos vertimas magnetinio lauko energija, yra žemas – daug energijos išsklaidoma šilumos pavidalu apvijoje. Iš $T(t)$ priklausomybės grafiko matyti, jog induktoriaus apvijų temperatūra pasiekia 1240 K temperatūrą. Žinant, jog vijų izoliacijai naudojamo *Kapton*[®] maksimali leistinoji temperatūra yra 673 K, galima užtikrintai teigti, jog induktorius po bandymo bus sugadintas. Atlikus papildomus skaičiavimus nustatyta, jog induktorius „A“ gali generuoti maksimalų 38 T magnetinio lauko impulsą, kai jo apvijų temperatūra pasiekia 660 K, vertinant tik išilimą (neatlikus mechaninių įtempių analizės), tačiau $> 500\text{ K}$ temperatūrose pasireiškia didelis izoliacijos nuovargis ir tokiu induktoriumi galima bus generuoti tik vieną-kelį tokių impulsus. Iš priklausomybės $T(r)$ grafiko matyti, jog apvijoms net itin stipriai išsilynt, šilumos sklaida yra minimali – izoliacijos temperatūra impulso metu pakinta tik 4 K ir tai tik patvirtina jau žinomą faktą, kad išilimo procesas yra adiabatinis. Nedidelė pereinamojo proceso trukmė lemia tai, kad apvijų izoliacija įkaista iki apvijų temperatūros pereinamajam procesui pasibaigus ir tik tada ji sugadinama. Didelė temperatūra, dėl izoliacijos vyniojimo metu patekusio deguonies, gali sukelti degimą ir tada izoliacija gali būti sugadinta dar pereinamojo proceso metu, o tai gali lemti tarpvijnį elektrinį trumpąjį jungimą. Bet kokių atveju, induktorius po tokio eksperimento nebebus tinkamas bandymams.

Induktoriuje „B“, nors jo geometrija nesiskiria nuo induktoriaus „A“ geometrijos, po impulso apvijų temperatūra pasiekia 660 K, o srovės amplitudė pasiekiamą per 0,5 ms (3.2 pav.). Taigi mažinant apvijų varžą, mažinamas apvijų išilimas, didinama laiko trukmė, per kurią pasiekiamą srovės (ir magnetinio lauko) amplitudė, didinamas induktoriaus naudingumas. Atsižvelgiant tik į termodinaminės induktoriaus „B“ analizės rezultatus, galima teigti, jog induktorius yra tinkamas vienkartiniam 50 T magnetiniam laukui generuoti (dėl didesnės nei 500 K vijų temperatūros po impulso).

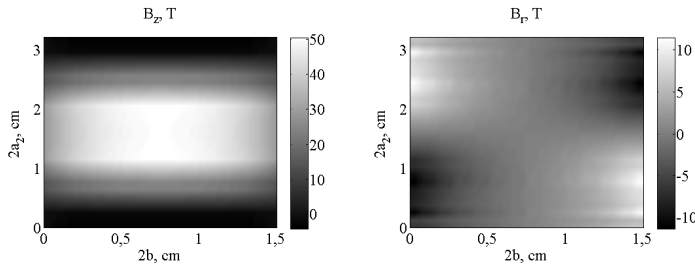
Induktoriaus „P“ srovės pereinamojo proceso kreivės, vertinant išilimą ir be jo, beveik sutampa (3.3 pav.), laikas, per kurį pasiekiamą srovės amplitudė yra $> 0,5\text{ ms}$, apvijų temperatūra pakinta tik 41 K, induktoriaus naudingumas yra didesnis nei „A“ ir „B“ atveju. Induktoriaus „P“ laidininko skerspjūvio plotas yra 7,32 karto didesnis už induktoriaus „A“ laidininko skerspjūvio plotą, jo varža R_l prieš eksperimentą yra tiek pat mažesnė ir tai lemia, jog induktorius išyla mažiau. Atsižvelgiant į termodinaminės analizės rezultatus, induktorius „P“ yra tinkamas daugkartiniam 50 T magnetiniam laukui generuoti.

Atlikus induktorių „A“, „B“ ir „P“, suvyniotų iš skirtingos medžiagos ir storio laidininkų, išilimo analizę matyti, jog apvijų išilimas didėja didėjant medžiagų savitajai varžai ir mažėja didinant laidininko skerspjūvį. Srovės magnetinio lauko amplitudė ir laiko trukmei, kada ši amplitudė pasiekama, tokia priklausomybė yra atvirkštinė.

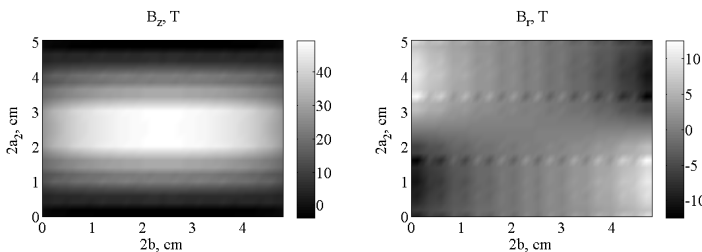
3.3. Magnetinio lauko skaičiavimas Cu ir CuNb laidininkų induktoriams

Magnetinio lauko pasiskirstymo apvijose skaičiavimui pasirenkami induktoriai „B“ ir „P“. Atlikus išilimo analizę, nustatyta, jog induktoriaus „A“ nėra tinkamas 50 T magnetiniam laukui generuoti.

Maksimali induktoriaus „B“ apvijomis tekanti srovė $I_{Bmax} = 18,8$ kA, o induktoriaus „P“ – $I_{Pmax} = 36,9$ kA. Ašinio ir radialinio magnetinio lauko pasiskirstymas induktorių „B“ ir „P“ skerspjūviuose pateikti atitinkamai 3.4 ir 3.5 paveiksluose.



3.4 pav. Ašinio B_z ir radialinio B_r magnetinio lauko pasiskirstymas induktoriaus „B“ skerspjūvyje, kai $C_C = 10800$ μ F, $U_0 = 2850$ V, $I_{Bmax} = 18,8$ kA

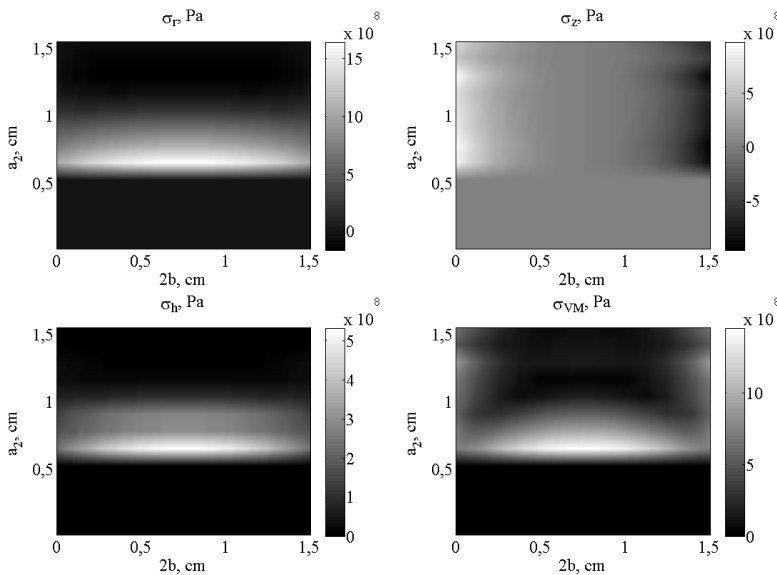


3.5 pav. Ašinio B_z ir radialinio B_r magnetinio lauko pasiskirstymas induktoriaus „P“ skerspjūvyje, kai $C_C = 10800$ μ F, $U_0 = 4000$ V, $I_{Pmax} = 36,9$ kA

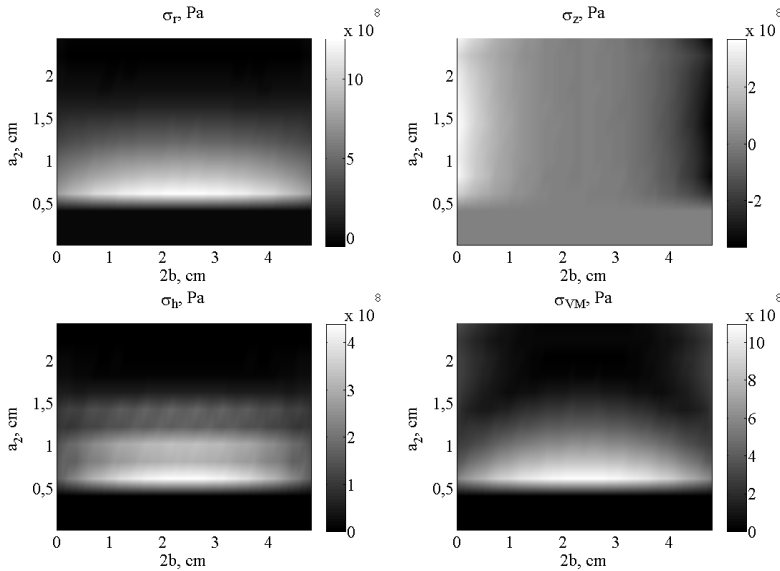
Kaip matyti iš 3.4 ir 3.5 paveikslų, ašinė magnetinio lauko dedamoji didžiausia induktoriaus centre, o radialinė dedamoji čia lygi 0 T. Induktoriaus centre patalpintą bandinį ar jutiklį veikia tik ašinė magnetinio lauko dedamoji, todėl induktoriaus centre skaičiuojamas magnetinis laukas B_0 (priklausomybė (2.8)) atitinka magnetinį lauką B_z , suskaičiuotą taške (0,0) (priklausomybė (2.17)). Gautos maksimalios srovės vertės ir magnetinio lauko pasiskirstymai perduodami mechaninių įtempių analizei induktorių „B“ ir „P“ apvijose.

3.4. Įtempių analizė Cu ir CuNb laidininkų induktoriuose

Įtempių pasiskirstymo apvijose (kaip ir magnetinio lauko) skaičiavimui pasirenkami induktoriai „B“ ir „P“. Skaičiavimai atliekami tame pačiame taške, kai $I_{Bmax} = 18,8$ kA, $I_{Pmax} = 36,9$ kA. Skaičiavimų rezultatai pateikti atitinkamai 3.6 ir 3.7 paveiksluose.



3.6 pav. Radialinių (σ_r), ašinių (σ_z), liestinės (σ_h) ir Von Mises (σ_{VM}) įtempių pasiskirstymas induktoriaus „B“ apvijose, kai $C_C = 10800$ μ F, $U_0 = 2850$ V, $I_{Bmax} = 18,8$ kA



3.7 pav. Radialinių (σ_r), ašinių (σ_z), liestinės (σ_θ) ir Von Mises (σ_{VM}) įtempių pasiskirstymas induktoriaus „P“ apvijoje, kai $C_C = 10800 \mu\text{F}$, $U_0 = 4000 \text{ V}$, $I_{Bmax} = 36,9 \text{ kA}$

3.6 ir 3.7 paveiksluose matyti, jog didžiausi mechaniniai įtempiai pasireiškia vidinėse (σ_r , σ_θ , σ_{VM}) ir šoninėse (σ_z) induktoriaus apvijoje (magnetinis laukas $B \approx 50 \text{ T}$). Dėl šios priežasties, storių sutvirtinimo sluoksniai vyniojami pirmiesiems vijų sluoksniams. Šių sluoksnių įtempių analizei ir priemonėms, įtempių mažinimui, skiriamas didžiausias dėmesys. Didelę radialinių įtempių dedamąją lemia didelė ašinio magnetinio lauko dedamoji, be to, išorinėse induktoriaus apvijoje šie įtempiai keičia ženklą, t. y. jose veikia nebe induktorių „plečiančios“, bet „spaudžiančios“ jėgos, todėl vidiniai sluoksniai dar labiau gniuždomi. Šoninių induktorių „spaudžiančių“, įtempių įtaką vijų geometrijai minimizuoti itin sunku, nes vijos paprasčiausiai remiasi viena į kitą ir nėra būdų, kaip jas galima būtų sutvirtinti, todėl daugelis mechaninių (o dėl jų – ir elektrinių) gedimų įvyksta būtent šoninėse vidinėse induktorių vijose. Ši problema sprendžiama vyniojant mažesnių vijų skaičių pirmuosiuose sluoksniuose, tačiau tai turi įtakos magnetinio lauko homogeniškumui išilgai induktoriaus kiaurymės ašies.

3.6 paveiksle Von Mises (σ_{VM}) įtempiai siekia $1,4 \text{ GPa}$ ir žinant, jog induktoriaus „B“ vijos suvytos iš Cu laidininko, kurio tamprumo riba siekia tik 250 MPa , galima teigti, jog toks induktorius po bandymo bus sugadintas. Atlikus skaičiavimus nustatyta, jog induktoriumi „B“, kurio apvijų pradinė temperatūra

77 K, galima generuoti maksimalų 20 T (Von Mises įtempiai neviršija 250 MPa) magnetinį lauką, kai kondensatorių baterijos energija $W_C = 5,4$ kJ (skaičiavimai atlikti, kai $U_0 = 1000$ V), o apvijų temperatūra po impulso 121 K. 20 T magnetinio lauko impulsą šiuo induktoriumi galima generuoti ir kambario temperatūroje ($T_0 = 293$ K), kai $W_C = 10,6$ kJ ($U_0 = 1400$ V), tačiau vijų temperatūra po impulso pasiektų 468 K ir atlikus daugiau bandymų tai gali pasireikšti izoliacijos nuovargiu.

3.7 paveiksle σ_{VM} siekia 1,1 GPa ir viršija induktoriui „P“ vynioti panaudoto CuNb laidininko tamprumo ribą (830 MPa), tačiau neviršija jo takumo ribos (1,12 GPa), todėl galima teigti, kad induktorių po impulso nebus tiek mechanškai pažeistas, kad bus nebetinkamas kito bandymo metu, tačiau toks induktorių nepatenka į 2.5 skyriuje apibrėžtą induktoriaus „gyvavimo zoną“, t. y. jo vijos patirtų plastines deformacijas ir tai įtakotų induktoriaus elektrinius parametrus (induktyvumą), vijų/sutvirtinimo būklę (medžiagų nuovargis), srovės pereinamąjį procesą, generuojamo magnetinio lauko amplitudę ir kitus parametrus kito impulso metu, todėl toks induktorių greičiausiai netarnautų ilgiau nei kelis impulsus. Atlikus skaičiavimus nustatyta, jog induktoriumi „P“, kai pradinė aplinkos temperatūra yra 77 K, $W_C = 66,2$ kJ ($U_0 = 3500$ V), galima generuoti daugkartinį maksimalų 43 T magnetinį lauką. Vijų temperatūra po impulso pasiektų 108 K. Kambario temperatūroje ($T_0 = 293$ K), kai $W_C = 78$ kJ ($U_0 = 3800$ V), taip pat galima generuoti daugkartinius 43 T impulsus, tačiau šiuo atveju vijų temperatūra po impulso pasiektų 367 K.

Atlikus skaičiavimus nustatyta, jog induktoriumi „A“, kai $T_0 = 77$ K, galima generuoti maksimalų 32 T magnetinį lauką, kai $W_C = 23,8$ kJ ($U_0 = 2100$ V).

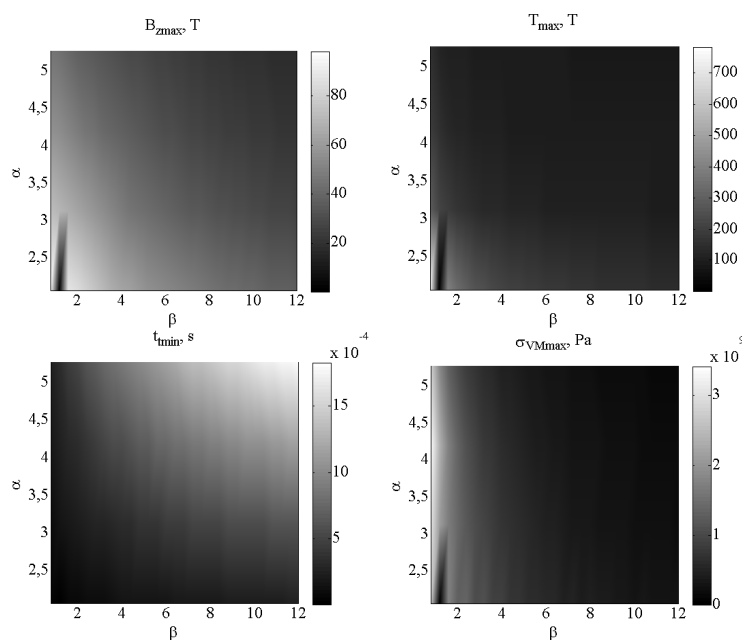
3.5. Cu ir CuNb laidininkų induktorių „gyvavimo zonos“ nustatymas

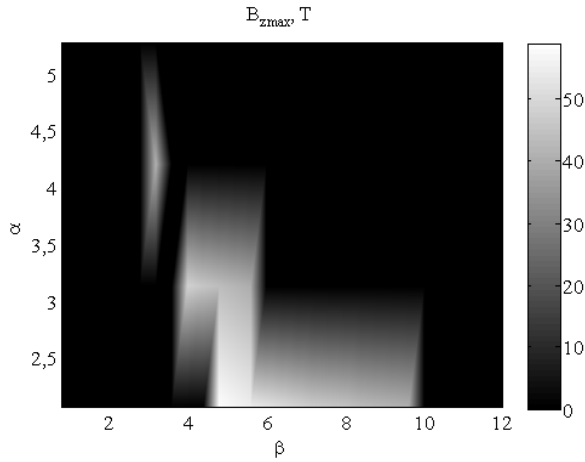
Induktorių „gyvavimo zonos“ paieška atliekama trimis vijų skerspjuvių modeliams: „A“, „B“ ir „P“, kai $a_1 = 6$ mm. Paieškos kriterijai kiekvienam vijų skerspjuvio modeliui pateikti 3.6 lentelėje. B_{min} , B_{max} ir t_{min} parinkti atsižvelgiant į jau atliktos analizės induktoriams „A“, „B“, „P“ rezultatus, $T_{max} = 500$ K pasirenkama norint išvengti izoliacijos nuovargio (nors T_{max} Kapton® yra 673 K). 800 MPa – σ_{VMmax} CuNb, 250 MPa – Cu laidininkui. Paieškos erdvė (vijų ir sluoksnių skaičius) nustatyta žinant, kokių konfigūracijų induktoriai vyniojami laboratorijoje. Skaičiai n_{21} , n_{22} turi būti lyginiai – norint į induktorių nesudėtingai įvesti bandinius, svarbu, kad induktoriaus maitinimo gnybtai būtų išvesti į vieną pusę, o tam reikalingas lyginis sluoksnių skaičius. Pradinė (aplinkos) temperatūra visiems bandymams – $T_0 = 77$ K.

3.6 lentelė. „Gyvavimo zonos“ paieškos kriterijai skirtingiems vijų skerspjūvių modeliams

Kriterijus	Vertė		
	„A“	„B“	„P“
B_{min} , T	30	20	40
B_{max} , T	50	40	60
T_{max} , K	500	500	500
t_{min} , ms	0,1	0,1	0,1
σ_{VMmax} , MPa	800	250	800
Paieškos erdvė			
n_{11} : žingsnis : n_{12}	2:1:30	2:1:30	2:1:30
n_{21} : žingsnis : n_{22}	2:2:8	2:2:8	2:2:8

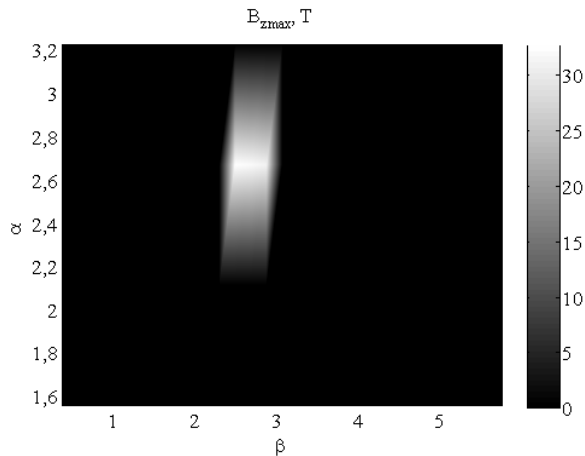
Visi vykstantys procesai impulso metu induktoriuje priklauso nuo pradinės kondensatorių baterijos energijos W_C (C_C ir U_0). Remiantis jau atliktų analizių rezultatais, parenkami kondensatorių baterijos parametrai „P“ vijų skerspjūvių induktoriams: $W_{CP} = 48,6$ kJ ($U_0 = 3000$ V). 3.8 paveiksle pateiktos priklausomybės $B_{zmax}(\alpha, \beta)$, $T_{max}(\alpha, \beta)$, $t_{min}(\alpha, \beta)$, $\sigma_{VMmax}(\alpha, \beta)$, o 3.9 paveiksle – gautoji „gyvavimo zona“ induktoriams, sudarytiems iš „P“ vijų skerspjūvių.

**3.8 pav.** „P“ skerspjūvio vijų induktorių $B_{zmax}(\alpha, \beta)$, $T_{max}(\alpha, \beta)$, $t_{min}(\alpha, \beta)$, $\sigma_{VMmax}(\alpha, \beta)$, kai $W_{CP} = 48,6$ kJ ($U_{0P} = 3000$ V), $a_{1P} = 6$ mm

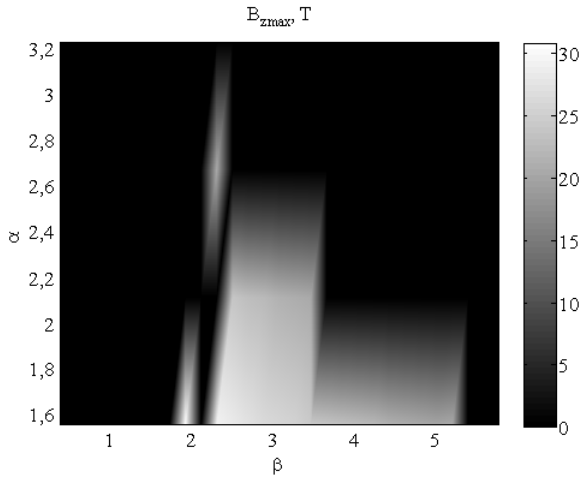


3.9 pav. „P“ skerspjūvio vijų induktorių „gyvavimo zona“, kai $W_{CP} = 48,6$ kJ ($U_{0P} = 3000$ V), $a_{1P} = 6$ mm

Induktorius, sudarytas iš „A“ tipo vijų skerspjūvių, perkaito, todėl kondensatorių baterijos energija tokių induktorių „gyvavimo zonos“ paieškai sumažinama iki $W_{CA} = 23,8$ kJ ($U_{0A} = 2100$ V), t. y. iki tokios, kuriai esant induktorius „A“ generavo 32 T magnetinį lauką. Atitinkamai kondensatorių baterijos parametrai parenkami vijų skerspjūviui „B“: $W_{CB} = 5,4$ kJ ($U_0 = 1000$ V). 3.10 ir 3.11 paveiksluose pateiktos „A“ ir „B“ vijų skerspjūvių induktorių gyvavimo zonos.



3.10 pav. „A“ skerspjūvio vijų induktorių „gyvavimo zona“, kai $W_{CA} = 23,8$ kJ ($U_{0A} = 2100$ V), $a_{1A} = 6$ mm



3.11 pav. „B“ skerspjūvio vijų induktorių „gyvavimo zona“, kai $W_{CB} = 5,4$ kJ
($U_{0B} = 1000$ V), $a_{1B} = 6$ mm

3.8 ir 3.9 paveiksluose matyti, jog induktorių, sudarytų iš „P“ vijos skerspjūvio, gyvavimo zonos dydį riboja: mechaniniai įtempiai σ_{VMmax} , kai $\beta \downarrow$ ir $\alpha \downarrow$, ir generuojamo magnetinio lauko amplitudė B_{zmax} (pasirinktos ribos 40–60 T). Dėl nedidelės apvijų varžos, stipriai išyla tik induktorių, turinčių nedidelius β ir α , apvijos, tačiau tokių konfigūracijų induktoriai labiau panašūs į vienkartinius stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorius, nes įtempiai juose daug kartų viršija vijos skerspjūvyje esančių medžiagų tamprumo ribas, generuojamas magnetinis laukas $B_{zmax} > 90$ T, o pereinamieji procesai labai trumpi. Priklausomybių $B_{zmax}(\alpha, \beta)$, $T_{max}(\alpha, \beta)$, $t_{min}(\alpha, \beta)$, $\sigma_{VMmax}(\alpha, \beta)$, kai α ir β labai maži, reikšmės lygios 0 – toks dydis nurodomas tada, kai skaičiuojant išilimą nebetenkamos priklausomybės (2.12) sąlygos. 3.9 paveiksle „gyvavimo zona“ rodo, jog pvz., iš „P“ vijų skerspjūvių sudarius $(n_1; n_2) = (10; 4)$ induktorių ($(\alpha, \beta) = (3, 13; 4)$), juo bus galima generuoti daugkartinius $B_{zmax} = 49$ T impulsus.

Iš 3.10 ir 3.11 paveikslų matyti, jog esant nurodytoms maitinimo šaltinių energijoms, iš „A“ vijų skerspjūvių sudarius pvz., $(n_1; n_2) = (14; 6)$ induktorių ($(\alpha, \beta) = (2, 69; 2, 5)$), juo bus galima generuoti daugkartinius $B_{zmax} = 31$ T impulsus, o iš „B“ vijų skerspjūvių sudarius pvz., $(n_1; n_2) = (18; 4)$ ($(\alpha, \beta) = (2, 11; 3, 46)$) induktorių – $B_{zmax} = 20$ T daugkartinius impulsus. Induktorių, sudarytų iš „A“ tipo vijų skerspjūvių „gyvavimo zona“ labai maža, nes kai $\beta \downarrow$ ir $\alpha \downarrow$, ją riboja dideli mechaniniai įtempiai ir išilimas, o kai $\beta \uparrow$ ir $\alpha \uparrow$ – per mažas (ribos – 30–50 T) B_{zmax} .

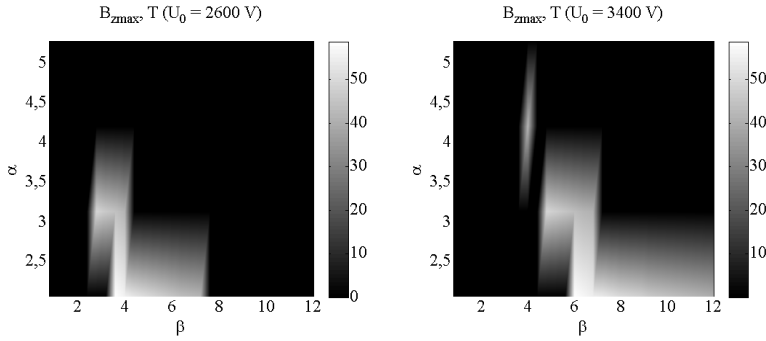
Induktorių, sudarytų iš „A“ ir „B“ vijų skerspjūvių, „gyvavimo zonos“ rodo, jog tokie induktoriai nėra tinkami daugkartiniam impulsiniam 50 T magnetiniam laukui generuoti. Mechaninį atsparumą induktoriams, sudarytiems iš „B“ vijų skerspjūvių galima būtų didinti optimizuojant tarp sluoksnių sutvirtinimą, o induktoriams, sudarytiems iš „A“ vijų skerspjūvių, mažinti išilimą galima būtų prieš bandymą juos atšaldant iki žemesnės nei $T_0 = 77$ K temperatūros, tačiau tai sprendimai, negarantuojantys rezultato, tuo tarpu induktoriais, sudarytais iš „P“ vijų skerspjūvių, be didesnių pastangų, laboratorijoje įprastomis priemonėmis galima generuoti 50 T daugkartinį impulsinį magnetinį lauką.

3.6. Induktorių „gyvavimo zonos“ priklausomybė nuo maitinimo šaltinio energijos ir induktoriaus vidinės kiaurymės skersmens

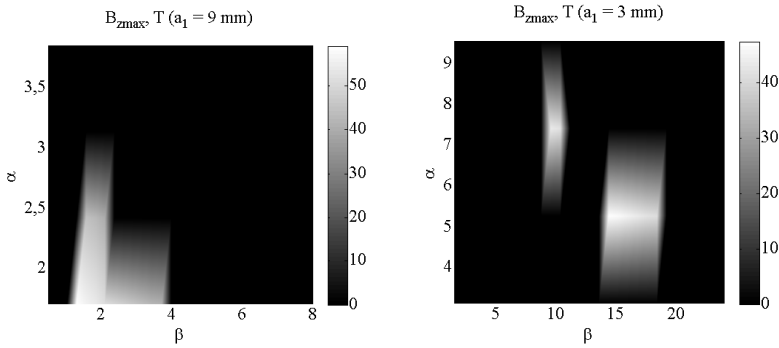
Induktorių apvijomis tekanti srovė, išilimas, generuojamo magnetinio lauko amplitudė ir mechaniniai įtempiai priklauso nuo daugelio jau analizuotų faktorių (medžiagos, geometrija, struktūra ir t.t.), tačiau vieni iš svarbiausių, taip pat ir atliekant pirminį induktorių charakteristikų įvertinimą (priklausomybės (1.1), (1.2)), yra induktoriaus vidinis (kiaurymės) skersmuo ir kondensatorių baterijos energija. Keičiant pirmąjį, grandinės elektriniai parametrai keičiami fiziškai, o antrąjį – elektriškai, tačiau jų pokytis bet kuriuo atveju reiškia induktoriaus išėjimo parametrų keitimą. Kaip šie išėjimo parametrai kinta, galima atsakyti pvz., modeliuojant atskirus induktorius, tačiau „gyvavimo zonos“ paieškos programa įgalina tai padaryti analizuojant induktorių, su tam tikru vijų skerspjūviu, visumą. Induktorių „gyvavimo zonos“ priklausomybei nuo maitinimo šaltinio energijos ir induktoriaus vidinio skersmens tyrimui pasirenkamas „P“ tipo vijos skerspjūvis ir atliekami skaičiavimai dviem atvejams: 1. $a_1 = \text{const}$, $W_C = \text{var}$. 2. $a_1 = \text{var}$; $W_C = \text{const}$. C_C visada pastovus ir yra 10800 μF . Pirmuoju atveju keičiama tik kondensatorių baterijos gnybtų įtampa. 3.5 skyriuje jau atlikta iš „P“ tipo vijos skerspjūvio sudarytų induktorių „gyvavimo zonos“ paieška, kai $a_1 = 6$ mm, $W_C = 48,6$ kJ ($U_0 = 3000$ V), todėl kiekvienu atveju „gyvavimo zonos“ paieškai nustatomi tokie kriterijai:

- 1-uoju atveju: $a_1 = 6$ mm ir $W_{C1} = 36,5$ kJ ($U_0 = 2600$ V), $W_{C2} = 62,4$ kJ ($U_0 = 3400$ V).
- 2-uoju atveju: $W_C = 48,6$ kJ ($U_0 = 3000$ V) ir $a_{11} = 3$ mm, $a_{12} = 9$ mm.

Gautosios „gyvavimo zonos“ pateiktos 3.12 ir 3.13 paveiksluose.



3.12 pav. „P“ tipo vijos skerspjūvio induktorių „gyvavimo zonos“, kai $a_1 = 6$ mm,
 $W_{C1} = 36,5$ kJ ir $W_{C2} = 62,4$ kJ



3.13 pav. „P“ tipo vijos skerspjūvio induktorių „gyvavimo zonos“, kai $W_C = 48,6$ kJ,
 $a_{11} = 3$ mm ir $a_{12} = 9$ mm

Iš 3.12 ir 3.9 paveikslų matyti, jog didinant kondensatorių baterijos energiją, induktorių „gyvavimo zona“ slenka β didėjimo kryptimi – tai lemia didesni mechaniniai įtempiai, kai vijų skaičius pastovus, o įtampa didinama, ir plėtėja, nes daugiau induktorių su skirtingu vijų skaičiumi generuoja magnetinius laukus, kurie patenka į intervalą $40 \text{ T} < B_{zmax} < 60 \text{ T}$. Generuojamo magnetinio lauko amplitudė, atvirkščiai, didėja β mažėjimo kryptimi. Tai lemia mažesnė pradinė apvijų varža ir induktyvumas, taip pat žymiai mažesni varžų pokyčiai induktoriams išylant. Taigi mažinant įtampą ir vijų skaičių sluoksnyje generuojamas didesnės amplitudės magnetinis laukas, tačiau dėl mažesnės RLC grandinės laiko pastoviosios, pereinamasis procesas yra trumpesnis. Ilgesnis pereinamasis procesas reiškia mažesnes indukcinės srovės ir geresnes galimybes atlikti bandymus, todėl didžiausius daugkartinius impulsinius magnetinius laukus pasaulyje

generuojantys induktoriai vyniojami iš daugelio vijų ir jungiami prie kondensatorių baterijų, įkrautų > 10 kV.

3.12 ir 3.9 paveiksluose labai svarbu pastebėti tai, kad keičiant kondensatorių baterijos įtampą (nekeičiant talpos), maksimalus generuojamas magnetinis laukas nesikeičia – keičiasi tik induktorių konfigūracija, t. y. vijų ir sluoksnių skaičius, su kuriais tą magnetinį lauką galima pasiekti. Taip yra todėl, kad didelę įtaką „gyvavimo zonai“ turintys mechaniniai įtempiai tiesiogiai priklauso nuo apvijomis tekančios srovės, tad, pvz., padidinus įtampą, ta pati maksimali srovė tekės esant didesnei induktoriaus kompleksinei varžai, t. y. didesniai vijų/sluoksnių skaičiui (žinoma, netiesiškumas atsiranda dėl išilimo). Tokiu būdu, maksimalūs mechaniniai įtempiai, artimi leistiniams ir nusakantys „gyvavimo zonos“ vieną iš ribų, esant kitai įtampai, pasireišk kitos konfigūracijos induktoriuje.

3.13 ir 3.9 paveiksluose matyti, kad didinant induktoriaus kiaurymės skersmenį, „gyvavimo zona“ slenka β (skirtingi β čia atitinka tuos pačius n_1) mažėjimo kryptimi, o generuojamo magnetinio lauko amplitudė kiekvienoje „gyvavimo zonoje“ didėja ir pereinamojo proceso laikas trumpėja dėl jau aptartų priežasčių. Intervalas $40 \text{ T} < B_{zmax} < 60 \text{ T}$ pasislenka β ir α mažėjimo kryptimi. Taip yra todėl, kad generuojamo magnetinio lauko (magnetinio lauko srauto tankio) amplitudė yra atvirkščiai proporcinga kiaurymės tūriui ir didesnę kiaurymę, bet tą patį vijų ir sluoksnių skaičių turintys induktoriai generuoja silpnesnį magnetinį lauką. Mažesnės kiaurymės induktorių „Gyvavimo zona“ yra pasislinkusi β didėjimo kryptimi ir todėl, kad esant tam pačiam vijų ir sluoksnių skaičiui, jų varža ir induktyvumas yra mažesni, apvijomis teka didesnės srovės ir veikia didesni mechaniniai įtempiai.

Atlikus įvairialypę induktorių „gyvavimo zonų“ analizę matyti, jog tai – universalus būdas induktoriams tirti, aprėpiant ne tik atskirus atvejus, o visą induktorių, kuriais galima generuoti daugkartinius magnetinio lauko impulsus, gamą. Tokia pati analizė gali būti atlikta keičiant ir kitus parametrus.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

Atlikus induktorių, kurių konstrukcija sudaryta remiantis sukurtąja induktorių geometrijos ir medžiagų sudėties sintezės metodika, o vijoms panaudoti trijų tipų „A“, „B“ ir „P“ laidininkai, visumos analizę nustatyta ir patvirtinta, kad:

1. Tos pačios geometrinės konfigūracijos induktorių generuojamas maksimalus magnetinis laukas priklauso nuo laidininkų (suprantama, ir konstrukcijos) mechaninio atsparumo ir jų varžos kombinacijos.

2. Iš induktorių „gyvavimo zonos“ paieškų matyti, jog: mažėjant vijų ir sluoksnių skaičiui didėja maksimalus generuojamas magnetinis laukas ir apvijų išilimas bei mažėja pereinamojo proceso laikas, o mažėjant vijų ir didėjant sluoksnių skaičiui, didėja maksimalūs mechaniniai įtempiai.
3. Induktorių „gyvavimo zona“ priklauso nuo laidininko medžiagos ir skerspjuvio, vidinės kiaurymės skersmens ir maitinimo šaltinio energijos: tą patį magnetinį lauką generuoti galima mažinant maitinimo šaltinio energiją ir vijų skaičių sluoksnyje arba mažinant kiaurymės skerspjūvį ir didinant vijų ir sluoksnių skaičių.

Suradus induktorių „gyvavimo zonas“, pateikiamos vyniojimo rekomendacijos 50 T klasės induktoriui:

1. Induktoriams vynioti naudojant „A“ tipo laidininką, jais galima generuoti iki 35 T, „B“ – 30 T, „P“ – 55 T daugkartinius magnetinius laukus; induktoriaus geometrinė konfigūracija (vijų ir sluoksnių skaičius) tam tikram magnetiniam laukui generuoti, gali būti parinkta iš induktorių „gyvavimo zonos“.
2. > 40 T daugkartinį magnetinį lauką įmanoma generuoti tik induktoriams vynioti naudojant „P“ tipo laidininką. Kai $W_{CP} = 48,6$ kJ ($U_0 = 3000$ V), $a_1 = 6$ mm, tokį magnetinį lauką galima generuoti $(n_1; n_2) = (12-25; 2)$; $(10-15; 4)$; $(8; 6)$, kai $a_1 = 3$ mm – $(n_1; n_2) = (18-23; 4)$; $(13-14; 6)$, kai $a_1 = 9$ mm – $(n_1; n_2) = (5-14; 2)$; $(6-8; 6)$ konfigūracijų induktoriais.
3. 50 T magnetinis laukas, kai pvz., $W_{CP} = 48,6$ kJ ($U_0 = 3000$ V), pasiekiamas induktoriumi $(n_1; n_2) = (10; 4)$, kai $a_1 = 6$ mm, ir induktoriumi $(n_1; n_2) = (9; 2)$, kai $a_1 = 9$ mm. Antruoju atveju laikas, per kurį magnetinis laukas pasieks maksimumą, bus trumpesnis, todėl 50 T klasės induktoriaus gamybai rekomenduojamas induktorius $(n_1; n_2) = (10; 4)$, kai $a_1 = 6$ mm, sudarytas iš „P“ tipo vijų skerspjuvių.

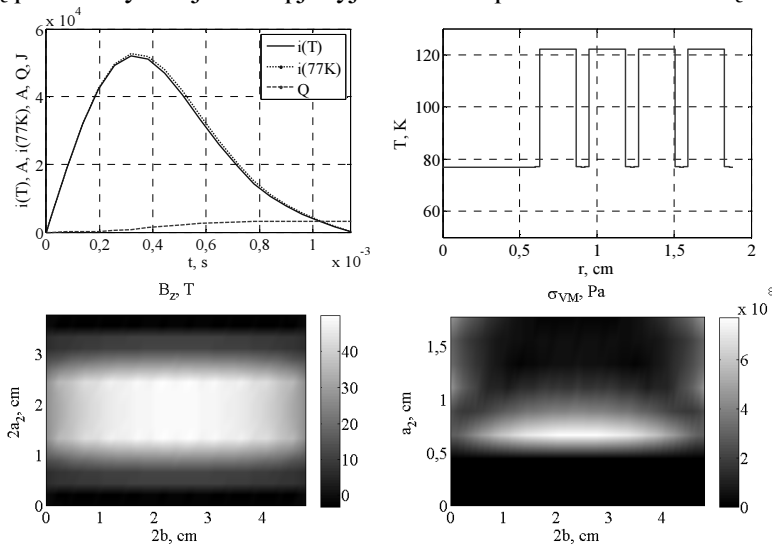
Tyrimo rezultatų patikra ir taikymas

Pasirinktų induktorių iš 3 skyriuje gautų „gyvavimo zonų“ patikra atliekama modeliuojant juos *ANSYS*[®] aplinkoje ir matuojant eksperimentiškai. Taip pat aprašoma 50 T klasės induktoriaus ir magnetinės sistemos, sudarytos iš dviejų induktorių ir montuojamos ant kriostato SRDK-408, eksploatuojamo PFI, Vilniuje, projektavimas. Sukurtieji prototipai, kartu su žemų (skysto He⁴) temperatūrų, stipraus elektrinio lauko ir lazerio spindulio įvedimo į bandinius sistemomis, sudarys sąlygas įvairiems unikaliems eksperimentams atlikti. Skyriaus pabaigoje pateikiamos induktorių vyniojimo rekomendacijos. Atlikti tyrimai paskelbti darbe (Bartkevičius *et al.* 2009; Bartkevičius *et al.* 2008c; Bartkevičius *et al.* 2006; Stankevič *et al.* 2005).

4.1. Tyrimo rezultatų patikra *ANSYS*[®] *Multiphysics*[®] aplinkoje

Vienas iš netiesioginių būdų patikrinti „gyvavimo zonos“ skaičiavimų rezultatus – universalioji programinė įranga modeliuoti induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“. Tam pasirenkamas induktorius, sudarytas iš „P“ tipo vijų skerspjuvių, kurio vijų ir sluoksnių skaičius yra $(n_1; n_2) = (10; 4)$. 4.1 paveiksle pateiktos tokio induktoriaus srovės ir išilimo pereinamojo proceso kreivės, kiek-

vieno sluoksnio temperatūra po impulso, ašinio magnetinio lauko ir Von Mises įtempių pasiskirstymas jo skerspjūvyje kai srovė pasiekia maksimumą.

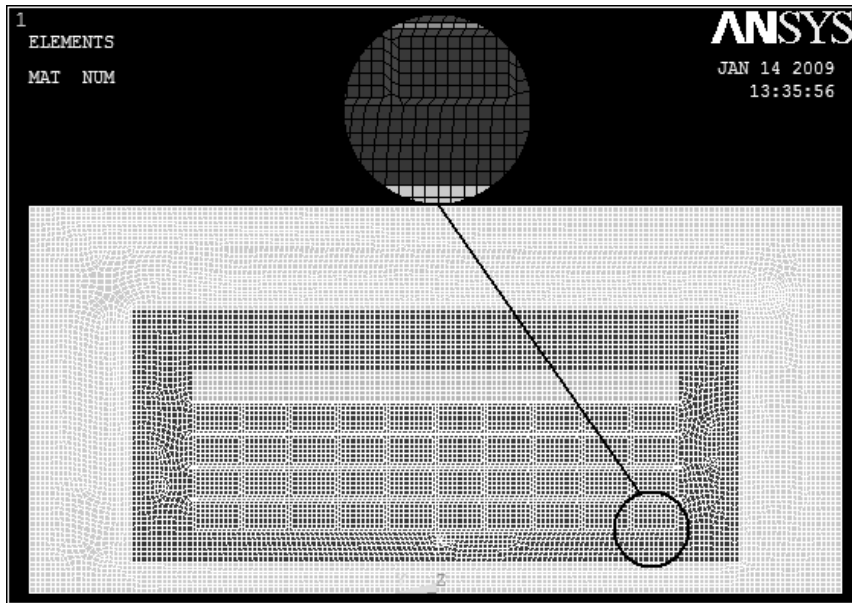


4.1 pav. Induktorius $(n_1;n_2) = (10;4)$, „P“ tipo vijos skerspjūvis. $i(77\text{ K},t)$, $i(T,t)$, $Q(t)$ pereinamieji procesai, $T(r)$, B_z ir σ_{VM} pasiskirstymas skerspjūviuose, kai $W_C = 48,6\text{ kJ}$ ($U_0 = 3000\text{ V}$), $B_{z\max} = 49\text{ T}$

Modeliavimas atliekamas *ANSYS® Multiphysics®* aplinkoje (Višniakov *et al.* 2006c; Višniakov *et al.* 2006d). Kadangi induktoriaus apvijos išyla nestipriai, atliekamas tik magnetinio lauko ir mechaninių įtempių pasiskirstymo skaičiavimas. Analizė vykdoma nuosekliai („Sequentially Coupled Physics Analysis“): gauti rezultatai iš vienos analizei sukurtos aplinkos („Physics/Environment“ – modelis su tam tikrai analizei priskirtais parametrais) perkeliama į kitai analizei sukurtą aplinką. Prieš atliekant tokią analizę:

- sukuriamas induktoriaus (iš „P“ vijų skerspjūvių ant tekstolito vamzdelio, papildomai išorėje sutvirtintas 3 mm *Zylon®* sluoksniu, patalpintas 6 mm storio sienelės anglies pluošto konteineryje) skerspjūvio pusės grafinis modelis 1:1 masteliu (*ANSYS®* sudaryta galimybė spręsti 3-mačius uždavinius sudarant 2-mačius modelius, jei uždaviniai simetriniai) ir suskaidomas baigtiniais elementais (4.2 pav.);
- sukuriami ir grafiniams elementams priskiriami medžiagų modeliai (4.1 lentelė), analizės ribos bei apkrovos (srovės tankis: $j_{\max} = 5,2376 \cdot 10^9\text{ A/m}$, nes $I_{\max} = 52135\text{ A}$ (4.1 pav.)) – aplinka paruošiama elektromagnetinei analizei;

- išsaugoma elektromagnetinės analizės aplinka;
- sukuriami ir priskiriami medžiagų modeliai (4.1 lentelė) įtempių analizei;
- išsaugoma magnetomechaninės analizės aplinka.

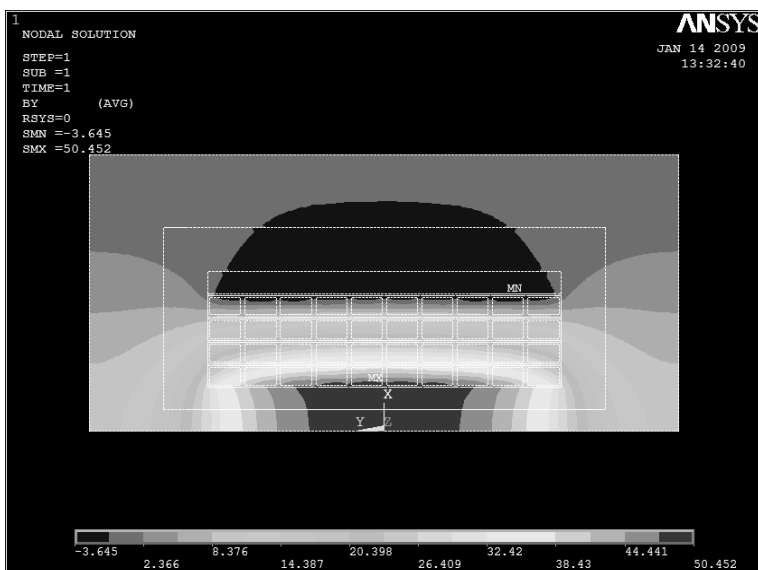


4.2 pav. Induktoriaus skerspjūvio pusės grafinis modelis *ANSYS*[®], suskaidytas baigtiniais elementais

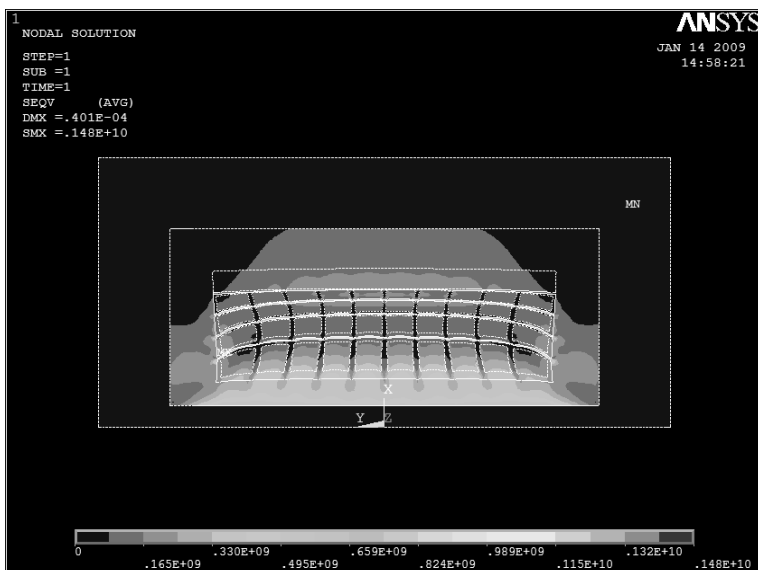
4.1 lentelė. Medžiagų modeliai elektromagnetinei ir magnetomechaninei analizei

Medžiaga	Elektromagnetinė analizė	Magnetomechaninė analizė			
	Santykinė magn. skvarba	Young'o modulis, GPa	Poisson'o koeficientas	Tamprumo riba, MPa	Takumo riba, MPa
Cu-Nb	1	42	0,3	850	1120
<i>Kapton</i> [®]	1	2,5	0,3	69	231
<i>Zylon</i> [®]	1	270	0,3	3200	4500
Ang. pluoštas	1	196	0,3	200	520

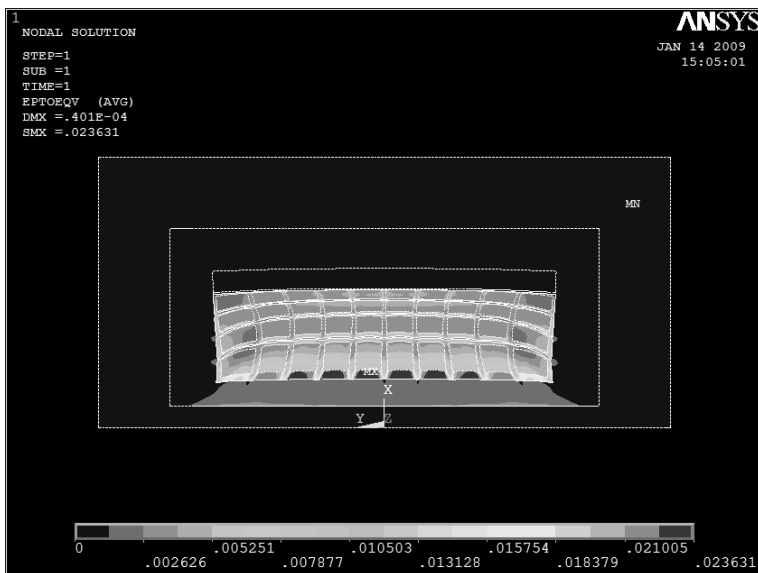
Pasirinkus aplinką elektromagnetinei analizei, suskaičiuojamas magnetinio lauko pasiskirstymas, kuris, kartu su srovės tankiu, perduodamas užkrautai magnetomechaninės analizės aplinkai. Skaičiavimų rezultatai – ašinio magnetinio lauko, Von Mises įtempių ir pailgėjimų/deformacijų pasiskirstymas pateikti atitinkamai 4.3, 4.4, 4.5 paveiksluose.



4.3 pav. Ašinio magnetinio lauko pasiskirstymas $(n_1; n_2) = (10; 4)$, „P“ tipo vijos skerspjūvio induktoriuje



4.4 pav. Von Mises įtempių pasiskirstymas $(n_1; n_2) = (10; 4)$, „P“ tipo vijos skerspjūvio induktoriuje



4.5 pav. Von Mises pailgėjimų/deformacijų pasiskirstymas $(n_1; n_2) = (10; 4)$, „P“ tipo vijos skerspjūvio induktoriuje

Iš 4.3 paveikslo matyti, kad ašinio magnetinio lauko pasiskirstymas praktiškai sutampa su parodytuoju 4.1 paveiksle, o magnetinio lauko didžiausios reikšmės yra 50,5 T ir 49 T atitinkamai. 4.4, kaip ir 4.1 paveiksle, Von Mises įtempiai yra didžiausi vidinėse ir šoninėse induktoriaus apvijose ir praktiškai neviršija 800 MPa. 4.5 paveiksle maksimalūs pailgėjimai pasireiškia CuNb laidininke ir sudaro 2,36 %, o deformacijos – $4,01 \cdot 10^{-5}$ m, kai leistini pailgėjimai šiam laidininkui yra ~ 3,5 %. Visi šie skaičiavimai įrodo, jog induktorius po impulso nebus sugadintas ir yra tinkamas 50 T magnetiniam laukui generuoti, t. y., kad modeliavimo induktorių sudarant remiantis „vienos vijos“ skerspjūvio metodu rezultatai ir „gyvavimo zonos“ paieškos rezultatai yra teisingi. 4.4 ir 4.5 paveiksluose pavaizduoti sluoksnių pailgėjimai ir deformacijos yra dirbtinai padidinti 100 kartų. Analizės, atliktos ANSYS® aplinkoje ir sukurta programine įranga, rezultatai skiriasi 2–5 %. Didesnis tikslumas nėra tikėtinas dėl induktorių vyniojimo technologijos ypatybių, medžiagų parametrų sklaidos ir neįvertintų procesų (pvz., papildomų mechaninių įtempių apvijoms plečiantis dėl jų išilimo).

Modeliuoti induktoriaus geometriją ANSYS®, geometrijos modelio sudarymui autorius pirmuoju bandymu sugaišo ~10 valandų, antruoju – ~ 8 valandas. Patyręs šios terpės vartotojas tokį modelį gali sudaryti per 4–6 valandas. Įvertinus VGTU Medžiagų atsparumo katedros, VGTU Suvirinimo ir medžiagotyros

problemų instituto, Stiprių magnetinių laukų laboratorijos mokslininkų ilgametę patirtį, skaičiavimų statistiką ir rekomendacijas FEM taikymui (Kačianauskas *et al.* 2008b, Novickij *et al.* 2004a, Novickij *et al.* 2004b, Višniakov *et al.* 2006a, Višniakov *et al.* 2006b), nustatyta, jog induktorių skerspjūvio geometriją sudarant sukurtąja programine įranga, tai galima padaryti per 20–30 minučių, taigi mažiausiai viena eile sparčiau.

4.2. Eksperimentinė tyrimo rezultatų patikra

Magnetinio lauko matavimams pasirenkamas induktorius $(n_1; n_2) = (13; 6)$, sudarytas iš „A“ tipo vijų skerspjūvių (tai atitiktų induktorių „A“ – lentelės 3.3 ir 3.4). Magnetinis laukas matuojamas induktoriaus kiauromės centre patalpinus kalibruotą manganitinį jutiklį (Balevičius *et al.* 2005; Novickij *et al.* 2004a, Novickij *et al.* 2005) (Bartkevičius *et al.* 2006; Stankevič *et al.* 2005). Matavimai atliekami, kai $W_C = 5$ kJ ($U_0 = 2000$ V, $C_C = 2500$ μ F), $T_0 = 77$ ir 293 K. Matavimai atlikti skaitmeniniu oscilografu.

Magnetinio lauko maksimumas B_0 skaičiuojamas matuojamai įtampai pasiekus maksimumą taip:

$$B_0 = k_B U_B; \quad (4.1)$$

čia: k_B – jutiklio koeficientas, $k_B = 0,26$ T/mV.

Manganitų jutiklis buvo kalibruojamas trimis būdais:

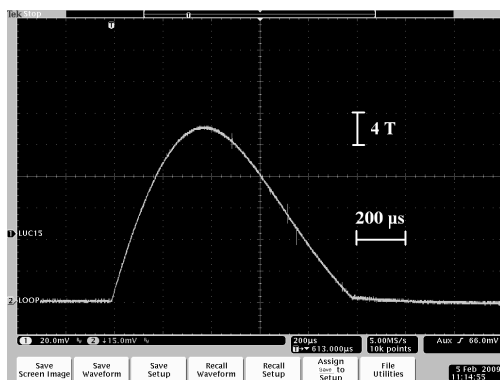
1. lyginant su Holo jutikliu laukuose iki 3 T (Gaussmeter 455 DSP, www.lakeshore.com, impulsinio magnetinio lauko amplitudės matavimo paklaida – $\pm 2\%$)
2. lyginant su netiesioginiais magnetinio lauko iki 50 T matavimais, naudojant srovės šuntą 75WCMM3-100-0,5 ir multimetrą Agilent 34410A, www.agilent.com, įtampos kritimui nustatyti (įtampos matavimo paklaida – $\pm 0,005\%$), srovės šaltinį Agilent N5769A (10 A srovės nustatymo paklaida – $\pm 0,1\%$), lauko matuoklį Gaussmeter 455 DSP (pastovaus lauko matavimo paklaida – $\pm 0,15\%$)
3. lyginant su induciniu jutikliu 3–35 T laukuose, naudojant lauko matuoklį Gaussmeter 455 DSP ir oscilografą Tektronix DPO 4034 (www.tek.com, matavimo paklaida – $\pm 1,5\%$).

Visais atvejais kalibruoto manganitų jutiklio paklaida buvo ne didesnė nei ± 2 –3 %, todėl, naudojant kalibruotą manganitų jutiklį (paklaida – ± 2 –3 %), skaitmeninį oscilografą Tektronix DPO 4034 (paklaida – $\pm 1,5\%$) ir įvertinus

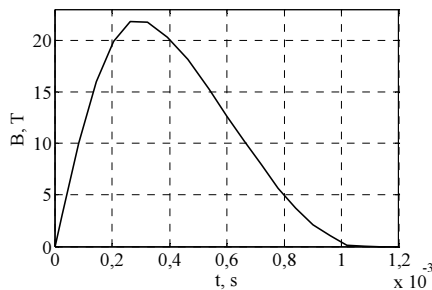
kitus faktorius (maitinimo šaltinio įtampos, temperatūros svyravimus – dar $\sim \pm 0,5\%$), impulsinio magnetinio lauko matavimo neapibrėžtis net ir blogiausiu atveju neviršija 5% .

Palyginus impulsinių induktorių parametrų skaičiavimo rezultatus su eksperimentinės patikros ir kita programine įranga modeliavimo rezultatais, galima teigti, kad impulsinių induktorių parametrų skaičiavimo rezultatų neapibrėžtis neviršija 5% ribos.

Matavimų ir modeliavimų rezultatai pateikti atitinkamai 4.6 ir 4.7 paveiksluose.

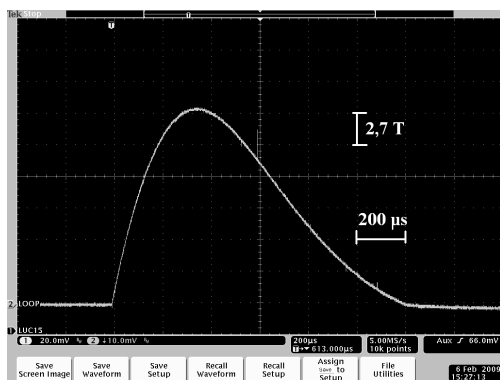


a)

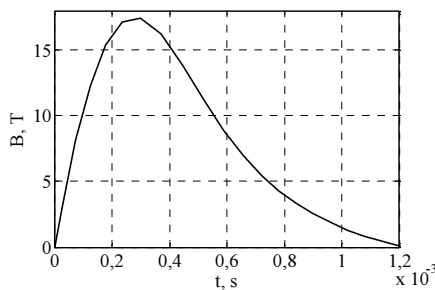


b)

4.6 pav. Matavimo(a) ir modeliavimo (b) rezultatai. Magnetinio lauko impulsas, kai $T_0 = 77\text{ K}$



a)



b)

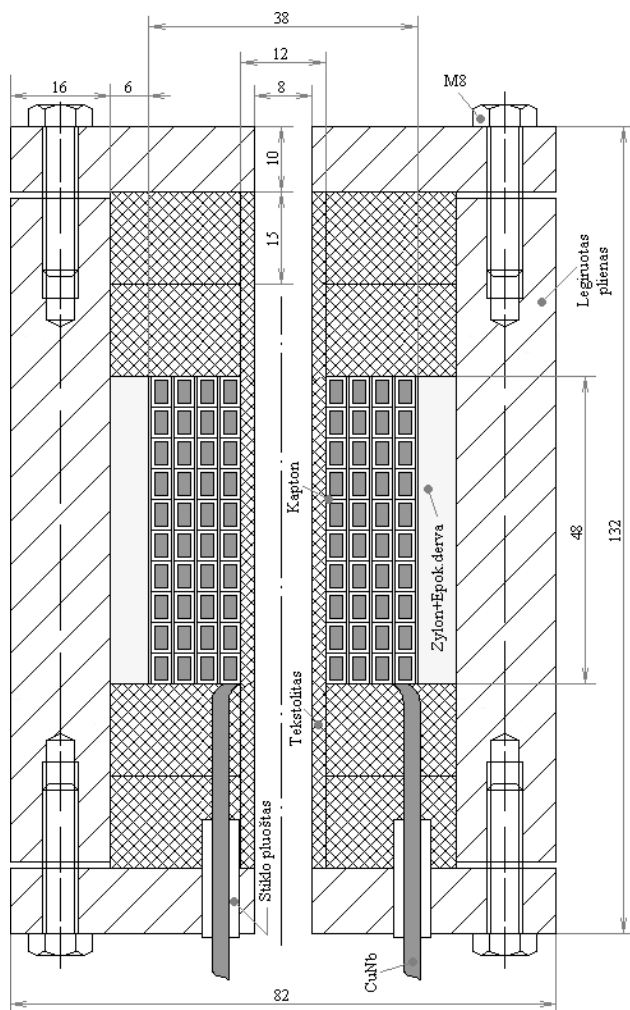
4.7 pav. Matavimo(a) ir modeliavimo (b) rezultatai. Magnetinio lauko impulsas, kai $T_0 = 293\text{ K}$

4.6 paveiksle a) pateiktojo magnetinio lauko impulso amplitudė, suskaičiuota iš priklausomybės (4.1), yra 22,4 T, o 4.7 paveiksle a) – 16,8 T. Tai atitinka magnetinio lauko amplitudes – 21,8 T ir 17,4 T, pateiktas 4.6 paveiksle b) ir 4.7 paveiksle b) atitinkamai. Impulsų trukmės taip pat analogiškos – 1 ms (77 K) ir 1,2 ms (293 K). Atsižvelgus į gautuosius matavimų ir modeliavimų rezultatus, kurie nesiskiria daugiau nei 5 %, galima teigti, jog sukurtoji programinė įranga yra tinkamas įrankis detaliai induktoriuose vykstančių procesų analizei ir „gyvavimo zonos“ paieškai.

Norint patikrinti induktoriaus konstrukcijos patikimumą, buvo generuojami 20–30 T impulsai ir po kiekvieno impulso matuojamas induktoriaus induktyvumas. Tyrimai parodė, kad induktyvumo pokytis po 100 impulsų neviršijo 1 % ribos, o tai byloja apie induktoriaus konstrukcijos stabilumą.

4.3. 50 T klasės induktorius

Remiantis 3.7 skyriuje pateiktomis induktorių vyniojimo rekomendacijomis, 50 T klasės induktoriumi manganitų tyrimams pasirenkamas $(n_1; n_2) = (10; 4)$ induktoriaus prototipas, kurio kiaurymės skerspjūvis 12 mm, sudarytas iš „P“ tipo vijų skerspjūvių. Tokio induktoriaus skerspjūvio brėžinys pateiktas 4.8 paveiksle 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 indukcinų srovių ir jų kuriamo lauko iškraipomas pirminis magnetinis laukas. Norint išvengti visų pašalinių efektų, konteineris ir tvirtinimo diskai gali būti pagaminti iš anglies pluošto ar *Zylon*[®] su epoksidine derva. Induktoriaus šonai uždengiami keliais tekstolito diskais ir 10 mm storio legiruoto plieno/anglies pluošto diskais, kurie prie konteinerio priveržiami šešiais M8 varžtais iš kiekvienos pusės. Induktoriaus maitinimo gnybtai išvedami per tekstolito diskuose išgręžtas skylės, kurios užpildomos epoksidine derva. Išvedimo per tvirtinimo 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 pusę, kurioje nėra induktoriaus gnybtų.

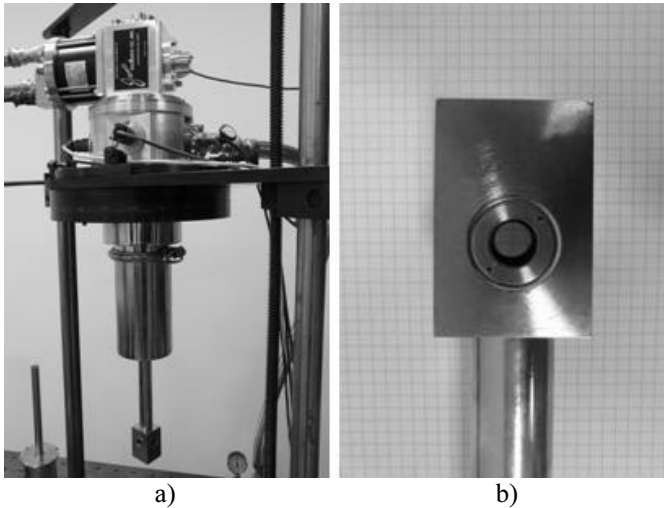


4.8 pav. 50 T klasės induktoriaus manganitų tyrimams prototipas

4.4. Magnetinė sistema kriostatui

PFI, Didelės galios impulsų laboratorijoje, sumontuotas uždaro ciklo He^4 kriostatas SRDK-408 (4.9 pav., a). Jame atliekami įvairių epitaksinių sluoksnių magnetovaržos (pvz., manganitų) iki 1 T statiniuose magnetiniuose laukuose, elektrovaržos iki 40 kV/cm ns trukmės impulsiniuose elektriniuose laukuose, aukštatempatūrių superlaidininkų magnetiniuose laukuose ir kiti tyrimai. Vienas iš laboratorijos tikslų – ateityje aukštatempatūrių superlaidininkų ir man-

ganitų tyrimus atlikti didesniuose nei 1 T magnetiniuose laukuose, taip pat bandinius atšaldžius, veikiant stipriu impulsiniu magnetiniu lauku ir lazerio spinduliu kartu. Tam yra pagaminta 4 mm sienelės storio žalvarinė šaldymo kamera su specialiu 8 mm skersmens langeliu (4.9 pav., b) lazerio spinduliui įvesti. Projektuojama magnetinė sistema turi būti montuojama ant kameros antgalio arba kameros antgalis turi būti įvedamas į magnetinę sistemą, pritvirtintą prie bendro kriostato pagrindo. Magnetinė sistema turi turėti plyšį (optinį kanalą) lazerio spinduliui į šaldymo kamerą įvesti.



4.9 pav. Kriostatas SRDK-408 (a) ir šaldymo kamera su kiauryme lazerio spinduliui įvesti (b)

Techninė užduotis magnetinės sistemos kūrimui suformuluojama atsižvelgiant į:

- laboratorijoje atliekamų bandymų ypatumus ir sąlygas;
- šaldymo kameros su stiklu dengta ertme spinduliui įvesti geometrinius matmenis;
- saugų eksploatavimą.

Techninė užduotis: suprojektuoti magnetinę sistemą, montuojamą ant kriostato SRDK-408 šaldymo kameros, su plyšiu lazerio ar šviesos spinduliui įvesti, tenkinančią šiuos sistemai keliamus techninius reikalavimus:

1. Vidinis ritės skersmuo – ≥ 52 mm.

2. Generuojamas magnetinis laukas – ≥ 3 T.
3. Impulso trukmė – ≥ 1 ms.
4. Magnetinės sistemos darbinė aplinkos temperatūra – 293 K.
5. Maitinimo šaltinis – $4 \times 2700 \mu\text{F}$, 4000 V.
6. Bandymo pakartojamumas – 30 min., 4 bandymai iš eilės.
7. Kiaurymė spindulio įvedimui – ≥ 5 mm.
8. Magnetinio lauko nehomogeniškumas – 0,1 %, 10 mm erdvėje išilgai induktoriaus kiaurymės ašies.

Sąlygą „kiaurymė spindulio įvedimui“ galėtų tenkinti induktoriaus su kiauryme, palikta vijose ir statmena vidinei kiauryme, konstrukcija, tačiau tai – nestandartinis sprendimas, susijęs su naujais iššūkiais (susilpnėjęs mechaninis atsparumas, pakitęs magnetinis laukas kiaurymės aplinkoje) (Kindo 2006), todėl pasirenkama kita, šią sąlygą tenkinanti, sistemos konstrukcija – gerai žinoma Helmholtz'o ričių sistema. Ši sistema pasižymi tuo, jog dviejų ar daugiau ričių, kurių vidinių kiaurymių ašys yra ant vienos ašies, magnetiniai laukai sumuojasi, t. y. jiems galioja superpozicija. Tokios sistemos įgalina generuoti didesnės amplitudės ir homogeniškumo magnetinius laukus, nei vienu induktoriumi. Konstrukcija, kai atstumas tarp ričių galų ≥ 5 mm, įgalins į kriostato kamerą įvesti optinį spindulį.

Norint, kad impulsinis magnetinis laukas Helmholtz'o sistemoje, sudarytoje iš dviejų induktorių, būtų simetrinis, turi būti tenkinamos dvi sąlygos: 1. Abiejų induktorių apvijomis turi tekėti ta pati impulsinė srovė. 2. Abiejų induktorių apvijomis impulsinė srovė turi tekėti tuo pačiu metu. Šios dvi sąlygos tenkinamos tik vienu atveju – kai abu induktoriai sujungti nuosekliai, todėl 2.2 paveiksle parodytoje schemoje $L_1 = L_1 + L_2 + 2M$ ir $R_1 = R_1 + R_2 = 2R_1$, kai L_1 , R_1 ir L_2 , R_2 – pirmojo ir antrojo induktorių induktyvumas ir apvijų varža, o $M = k(L_1 L_2)^{1/2}$ – abipusis induktorių induktyvumas. Koefficientas k nusako vieno induktoriaus sukurto magnetinio srauto dalį, kertančią kito induktoriaus apvijas, ir net suglaudus induktorius, esančius ant vienos ašies, neviršija 0,25. Atskirtiems induktoriams $k = 0,1 \div 0,2$, todėl pasirenkamas $k = 0,15$. Tokiu atveju $L_1 = 2,3L_2$ (Bartkevičius *et al.* 2009).

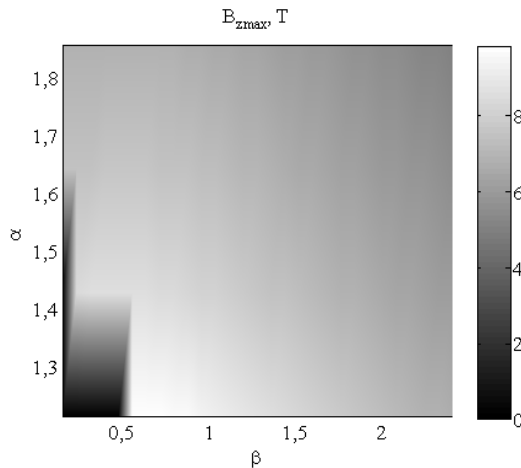
Pradedant projektavimą atliekama induktorių, kurie tenkina sistemai keliamus reikalavimus 1–6, „gyvavimo zonos“ paieška. Paieškos kriterijai ir kiti duomenys paieškai:

- $B_{\min} = 0$ T, $B_{\max} = 100$ T, $T_{\max} = 500$ K, $\sigma_{VM\max} = 800$ MPa. $t_{\min} = 0,5$ s, nes įprastas pereinamasis procesas trunka $> 2 t_{\min}$ (žiūr. sistemai keliami te-

chniniai reikalavimai). Paieškos erdvė: $n_{11}:\text{žingsnis}:n_{12} = 2:1:30$, $n_{21}:\text{žingsnis}:n_{22} = 2:2:8$;

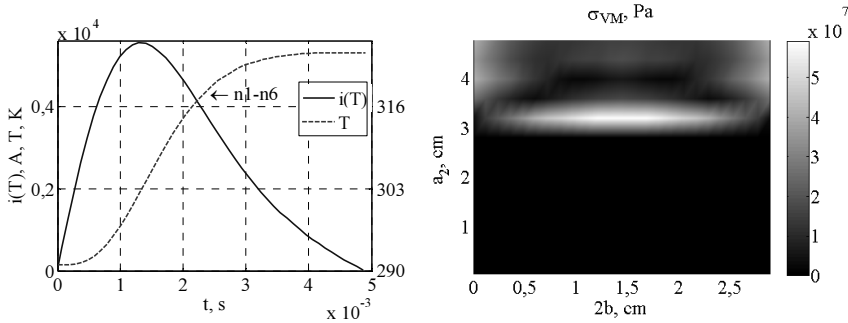
- induktoriaus vidinės kiaurymės skersmuo – $a_1 = 30$ mm (52 mm skersmens kiaurymė + 4 mm sienelės storio vamzdelis, ant kurio vyniojamas pirmasis vijų sluoksnis);
- „P“ tipo vijos skerspjūvis, su mažos varžos „P“ tipo CuNb laidininku;
- $U_0 = 4000$ V, $C_C = 10800$ μ F;
- aplinkos temperatūra $T_0 = 293$ K.

Surastoji induktorių „gyvavimo zona“ pateikta 4.10 paveiksle.



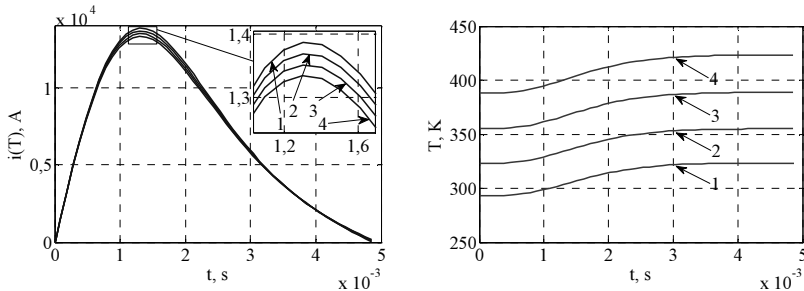
4.10 pav. Induktorių, tenkinančių magnetinei sistemai keliamus reikalavimus, „gyvavimo zona“

Iš 4.10 paveiksle pateiktos „gyvavimo zonos“ magnetinei sistemai parenkamas $(\alpha;\beta) = (1,64;0,48)$ arba $(n_1;n_2) = (6;6)$ induktorius, kuriuo kambario temperatūroje induktoriaus centre generuojamas $B_0 = 7,5$ T magnetinis laukas. Šis induktorius pasirenkamas, nes: jis kompaktiškas (mažas β), pereinamasis procesas ilgesnis nei gyvavimo zonoje esančių ketursluoksnių induktorių, nors šiais generuojamas šiek tiek didesnis magnetinis laukas. Tokio induktoriaus srovės, temperatūros sluoksniuose pereinamieji procesai bei Von Mises mechaniniai įtempiai suskaičiuojami atskirai ir pateikti 4.11 paveiksle.



4.11 pav. Induktorius magnetinei sistemai. Apvijų srovės $i(77\text{ K}, t)$, $i(T, t)$, temperatūros apvijose $T(t)$ pereinamieji procesai ir Von Mises mechaniniai įtempiai σ_{VM} , kai $C_C = 10800\ \mu\text{F}$, $U_0 = 4000\text{ V}$, $B_0 = 7,5\text{ T}$

4.11 paveiksle parodyta, jog induktoriaus apvijos po bandymo išyla iki 323 K , o suminiai mechaniniai įtempiai neviršija 60 MPa , t. y. > 10 kartų mažesni už leistinusius, todėl toks induktorius yra tinkamas daugkartiniams pakartojamiems eksperimentams atlikti. Iš 4.10 ir 4.11 paveikslų taip pat matyti, jog induktorius tenkina 1–5 keliamus techninius reikalavimus magnetinei sistemai ($a_1 = 30\text{ mm}$, $B_0 = 7,5\text{ T}$, $t_{\min} = 1,4\text{ ms}$, $T_0 = 293\text{ K}$). Norint išsiaiškinti, ar tenkinamas 6 reikalavimas, skaičiuojamas induktoriaus įšilimas atliekant 4 bandymus iš eilės. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4.12 paveiksle.



4.12 pav. Induktorius magnetinei sistemai. Temperatūros apvijose $T(t)$ ir srovės $i(T, t)$ ir pereinamieji procesai atlikus 4 bandymus iš eilės, kai $C_C = 10800\ \mu\text{F}$, $U_0 = 4000\text{ V}$

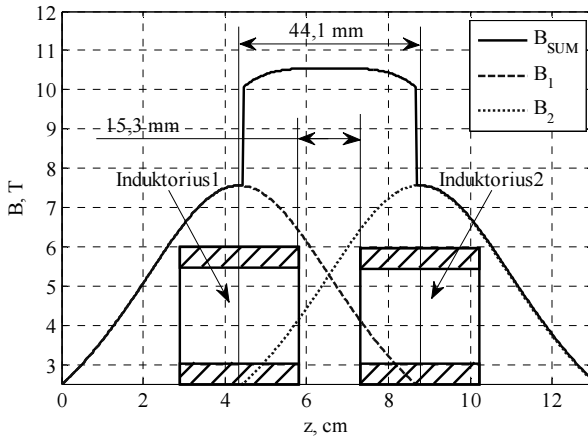
Iš praktikos žinoma, kad impulsinių induktorių be papildomo aušinimo, aušinimo laikas yra $30\text{--}60\text{ min.}$, o iš 4.12 paveikslo matyti, jog induktoriaus magnetinei sistemai apvijų temperatūra po 4 bandymų iš eilės pasiekė 420 K ir neviršijo izoliacijai leistinosios – 500 K . Toks induktorius yra tinkamas kuriamai magnetinei sistemai ir juo galima generuoti 4 magnetinio lauko impulsus kas 15

min., tačiau induktoriaus apvijų temperatūrai po bandymo nepasiekus pradinės ($T_0 = 293 \text{ K}$), negalima vykdyti pakartojamų eksperimentų, nes dėl liekamojo išilimo apvijų temperatūra po antrojo impulso yra didesnė ir tekanti srovė mažesnė nei po pirmojo. Kraštutiniu atveju, kai 4 impulsai generuojami iš eilės, po 4 bandymo srovės maksimumas (13,3 kA) yra 3,7 % mažesnis nei po 1 bandymo (13,9 kA). Tokia pat dalimi sumažėtų ir generuojamas magnetinis laukas, t. y. nuo 7,5 iki 7,3 T. Induktoriui po kiekvieno bandymo natūraliai auštant 30 min., šis rezultatas pagerėtų.

Atliekant bandymus, bandiniai talpinami kriostato SRDK-408 šaldymo kameros įsivaizduojamoje centrinėje ašyje, todėl ant šios ašies generuojamo magnetinio lauko amplitudė ir homogeniškumas turi atitikti 7–8 magnetinei sistemai keliamus reikalavimus: induktoriai turi būti sumontuoti taip, kad atstumas tarp jų šonų būtų $\geq 10 \text{ mm}$, o šios zonos centre, ant jų vidinių kiaurymių bendros ašies (kuri sutampa su įsivaizduojama kriostato kameros centrine ašimi) magnetinis laukas 10 mm atkarpoje nekistų daugiau nei 0,1 %. Suskaičiuoti, kokia tokius reikalavimus tenkinanti dviejų induktorių Helmholtz'o magnetinės sistemos generuojamo magnetinio lauko amplitudė ir atstumas tarp induktorių, galima remiantis (Montgomery 1980) pateikta metodika, tačiau tai taip pat nesudėtingai įgyvendinama kompiuteriu. Žinant kiekvieno induktoriaus generuojamo ašinio magnetinio lauko B_z pasiskirstymą išilgai induktoriaus ašies, galima nutolusius induktorius virtualiai pažingsniui artinti ir kiekvienam žingsniui skaičiuoti suminį magnetinį lauką B_{SUM} bei jo nehomogeniškumą $h(z_h)$ nurodytoje erdvėje z_h . Tam:

- suskaičiuojamas magnetinio lauko pasiskirstymas išilgai induktoriaus kiaurymės ašies atkarpoje $3 \times 2b$, kai $2b$ – induktoriaus ilgis;
- induktoriai virtualiai nutolinami vienas nuo kito atstumu $4b$ (atstumas tarp jų šoninių sienelių);
- žingsniu $2b/16n_1$ induktoriai artinami vienas prie kito kaskart suskaičiuojant suminį ašinį magnetinį lauką $B_{SUM}(z) = B_1(z) + B_2(z)$ bei skaičiuojant magnetinio lauko nehomogeniškumą z_h atkarpoje $h(z_h) = (B_{SUMmax}(z_h) - B_{SUMav}(z_h)) / B_{SUMav}(z_h)$, kai $B_1(z)$, $B_2(z)$ – pirmojo ir antrojo induktorių ašinio magnetinio lauko pasiskirstymas išilgai induktorių kiaurymės ašies, $B_{SUMmax}(z_h)$ – suminio magnetinio lauko maksimumas atkarpoje z_h tarp induktorių, $B_{SUMav}(z_h)$ – suminio magnetinio lauko vidurkis atkarpoje z_h ;
- kai $h(z_h)$ yra mažesnis už pageidaujamą nehomogeniškumą h (šiuo atveju $h = 0,1 \%$), skaičiavimas baigiamas ir pateikiami rezultatai: z_c – atstumas tarp induktorių centrinių ašių, statmenų kiaurymės ašiai, ir z_e – atstumas tarp induktorių šoninių sienelių.

Pasirinkto induktoriaus $b = 14,4$ mm, o reikalavimuose magnetinei sistemai $z_h = 10$ mm. Atlikus skaičiavimus gaunama, kad $h(z_h) < 0,1$ %, kai $z_c = 44,1$ mm, $z_e = 15,3$ mm, $B_{SUMav}(z_h) = 10,54 \approx 10,5$ T. Tokiu būdu tenkinami 7 ir 8 keliama techniniai reikalavimai magnetinei sistemai. Skaičiavimų rezultatai pateikti 4.13 paveiksle (Bartkevičius *et al.* 2009).



4.13 pav. Dviejų impulsinių induktorių Helmholtz'o magnetinė sistema: generuojamas magnetinis laukas B_{SUM} ir induktorių išdėstymas, kai $z_h = 10$ mm, $h(z_h) < 0,1$ %, $B_{SUMav}(z_h) = 10,5$ T

Galiausiai suskaičiuojamas šaldymo kameros sienelės magnetinio lauko prasiskverbimo gylis, t. y. gylis, kuriame kintantis magnetinis laukas susilpnėja e kartų:

$$\delta_b = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_0 \mu_{rb} f \sigma_b}}; \quad (4.2)$$

čia: μ_0 – magnetinė skvarba vakuume; μ_{rb} – santykinė medžiagos magnetinė skvarba; f – dažnis; σ_b – savitasis medžiagos laidis.

Kadangi 4.11 paveiksle parodyto srovės (magnetinis laukas tiesiogiai proporcingas šiai srovei) impulso pusperiodžio trukmė yra > 4 ms, $f = 1/(0,008s) = 125$ Hz. Žalvariui $\mu_{rb} = 1,05$, o savitasis laidis σ_b įvairios sudėties žalvariams (Cu ir Zn lydiniais) kinta $2,857 \div 0,696 \cdot 10^7$ $1/(\Omega \cdot m)$, todėl pasirenkamas $\sigma_b = 2,857 \cdot 10^7$, nes su šia verte δ_b bus mažiausias. Tuomet:

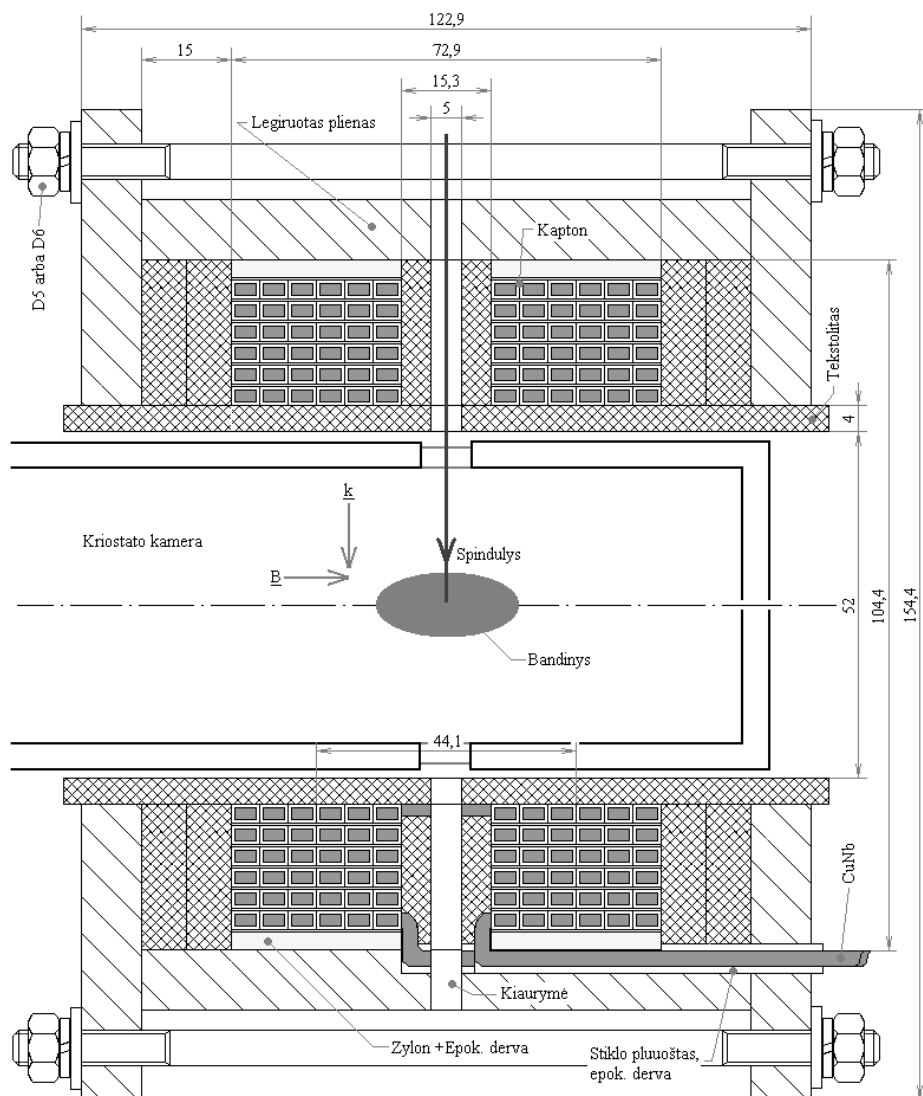
$$\delta_b = 0,0082 \text{ m}. \quad (4.3)$$

Jei 8,2 mm žalvario sienelės gylyje magnetinis laukas susilpnėja e kartų, tai 4 mm storio šaldymo kameros gylyje magnetinis laukas susilpnėtų $e(4/8,2) = 1,63$ karto, t. y. jei šaldymo kameros gamybai naudotas itin laidus žalvaris, ant jos įsivaizduojamos centrinės ašies, $z_h = 10$ mm atkarpoje, $B_{SUMav}(z_h) \approx 6,5$ T.

Tokios magnetinės sistemos prototipo skerspjūvio brėžinys pateiktas 4.14 paveiksle. Induktoriaus gamybos technologija panaši į aprašytąją 4.3 skyriuje, tačiau šiuo atveju tai – dvi atskiros ritės, suvyniotos iš vientiso „P“ tipo laido (skyriaus pradžioje pateiktos simetriško magnetinio lauko kūrimo Helmholtz'o sistemoje sąlygos), kuris vyniojamas ant 4 mm tekstolito vamzdelio į abi puses nuo jo vidurio, prieš vyniojant ant vamzdelio užmovus 15,3 mm tekstolito diską su grioveliu laidui praverti ir 5 mm skylę spinduliui įvesti. Abi ritės išorėje su tvirtinamos 3 mm Zylon® ir epoksidinės dervos sluoksniu. Tokio sluoksnio storio pakanka, nes mechaniniai įtempiai, kaip jau minėta, yra pakankamai maži. Induktorius talpinamas į metalinį 10 mm sienelės storio cilindrą su vidiniu grioveliu laidininkams išvesti (jei sluoksnių skaičius nelyginis, griovelio nereikia) ir 5 mm skylę spinduliui įvesti. Laidininkai išvedami vienoje pusėje, likusios ertmės užpilamos epoksidine derva. Induktoriaus šonai užspaudžiami $2 \times 7,5$ mm storio tekstolito diskais ir uždengiami 10 mm storio, 154 mm skersmens legiruoto plieno ar anglies pluošto diskais, kurie suspaudžiami 8 strypiniais varžtais, suveržtais veržlėmis. Į induktoriaus 52 mm kiaurymę įvedama kriostato šaldymo kamera su langeliu lazerio spinduliui.

Montuojant magnetinę sistemą, induktoriai „užmaunami“ ant kriostato kameros taip, kad jų kiaurymės centrinė ašis sutaptų su kameros įsivaizduojama centrine ašimi (4.14 pav.).

Suskaiciavus papildomai, nustatyta, kad norint pilnai išnaudoti magnetinės sistemos galimybes, atliekant po 1 bandymą kas 60 min., kondensatorių baterijos talpą reikėtų padidinti 2,5 karto, t. y. iki 27000 μ F. Tuomet sistema galima būtų generuoti 15 T (10 T šaldymo kameros viduje), 6,5 ms trukmės daugkartinius magnetinio lauko impulsus. Induktorių apvijų temperatūra po impulso būtų 500 K, apvijomis tekėtų maksimali 19,5 kA srovė, jose pasireikštų maksimalūs 110 MPa suminiai įtempiai.



4.14 pav. Magnetinės sistemos kriostatui SRDK-408 prototipas

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

Atlikus induktoriaus, patenkančio į „gyvavimo zoną“, modeliavimą *ANSYS® Multiphysics®* aplinkoje bei eksperimentus su vienu iš tokių induktorių, nustatyta, jog darbe sukurtų matematinių modelių tikslumas yra pakankamas daugkarti-

nio naudojimo induktorių procesų analizei, nes skaičiavimų rezultatai nukrypsta ne daugiau $\pm 5\%$ nuo eksperimentinių.

Atlikus keletą induktorių geometrijų modeliavimų *ANSYS*[®] nustatyta, jog induktorių skerspjūvių geometrijos naudojant sukurtą programinę įrangą gali būti sudarytos mažiausiai viena eile sparčiau nei programiniais paketais, kurie operuoja baigtinių elementų metodais.

Taip pat, remiantis atliktais tyrimų rezultatais ir naudojantis sukurta programine įranga:

1. Sukurtas 50 T klasės induktoriaus, gebančio generuoti iki 50 T, 1 ms daugkartinius magnetinio lauko impulsus, prototipas.
2. Sukurtas dviejų induktorių Helmholtz'o konstrukcijos magnetinės sistemos, montuojamas ant uždaro ciklo He⁴ kriostato SRDK-408 šaldymo kameros su langeliu lazerio spinduliui įvesti, prototipas. Naudojant turimą maitinimo šaltinį, šaldymo kameros ašyje magnetine sistema galima kurti 6,5 T, 5 ms trukmės daugkartinius magnetinio lauko impulsus, kurių nehomogeniškumas 10 mm atkarpoje neviršija 0,1 %. Norint pilnai išnaudoti magnetinės sistemos galimybes, turimą kondensatorių baterijos talpą reikėtų padidinti 2,5 karto, t. y. iki 27000 μF , kad sistema galima būtų generuoti 15 T (10 T šaldymo kameros viduje), 6,5 ms trukmės daugkartinius magnetinio lauko impulsus.

Bendrosios išvados

1. Apžvelgus įvairias daugiavijų daugiasluoksnių impulsinio magnetinio lauko induktorių konstrukcijas, jų gamybos ypatybes ir šiuolaikinius analizės bei tobulinimo įrankius, pasiūlyta induktorių skerspjūvių geometrijos ir medžiagų modelių sintezės metodika, kuri įgalina sparčiau nei baigtinių elementų metodais operuojančiuose programiniuose pakečiuose sudaryti induktorių geometrijos ir medžiagų modelius, nurodžius vienos vijos skerspjūvio geometriją ir medžiagų sudėtį bei induktoriaus vijų ir sluoksnių skaičių.
2. Sukurtas induktoriaus matematinis modelis ir programinė įranga *Matlab*[®] aplinkoje kompleksinei induktoriuose vykstančių procesų analizei bei induktorių parametrų – „gyvavimo zonų“, užtikrinančių ilgalaikį jų funkcionavimą, paieškai.
3. Atlikta skirtingų vijų skerspjūvių („A“, „B“ ir „P“) induktorių „gyvavimo zonų“ analizė patvirtino, kad induktorių „gyvavimo zonos“ – jų pagrindinių parametrų, užtikrinančių konstrukcijos ilgaamžiškumą, visumos egzistavimą iš esmės apibrėžia generuojamo magnetinio lauko, medžiagų leistinių šiluminių ir mechaninių perkrovų reikšmės.

4. Surastos induktorių su skirtingais vijų skerspjūvių modeliais „gyvavimo zonos“ parodė, kad su „A“ tipo laidininku ($1,7 \times 0,8$ mm CuNb) galima generuoti iki 35 T (magnetinį lauką riboja apvijų išilimas ir mechaniniai įtempiai), „B“ ($1,7 \times 0,8$ mm Cu) – 30 T (magnetinį lauką riboja mechaniniai įtempiai), „P“ ($4,2 \times 2,37$ mm CuNb) – 55 T (magnetinį lauką riboja mechaniniai įtempiai) daugkartinius magnetinio lauko impulsus, kai pradinė aplinkos temperatūra $T_0 = 77$ K.
5. Modeliuojant induktorių, patenkančių į „gyvavimo zoną“, *ANSYS*[®] aplinkoje bei atlikus ašinio magnetinio lauko matavimus vienam iš tokių induktorių, patvirtinta, kad sukurta programine įranga atliktų skaičiavimų – generuojamo magnetinio lauko ir mechaninių įtempių – rezultatų neapibrėžtis neviršija 5 %.
6. Taikant atliktų tyrimų metodiką ir sukurta programinę įrangą, pasiūlytas 50 T klasės induktoriaus (skirto medžiagų magnetovaržos, magnetooptiniams tyrimams, manganitų jutiklių kalibravimui) prototipas: 10 vijų ir 4 sluoksnių induktoriumi, sudarytu iš „P“ tipo vijų skerspjūvių ($4,2 \times 2,37$ mm CuNb, *Kapton*[®] izoliacija, *Zylon*[®] tarp sluoksnių sutvirtinimas), kai $a_1 = 6$ mm, $W_{CP} = 48,6$ kJ ($C_C = 10800$ μF, $U_0 = 3000$ V), galima generuoti iki 50 T, 1 ms trukmės daugkartinius magnetinio lauko impulsus.
7. Pasiūlytas dviejų induktorių ($a_1 = 30$ mm, $(n_1; n_2) = (6; 6)$, „P“ tipo vijos skerspjūvis) Helmholtz'o konstrukcijos magnetinės sistemos prototipas kriostatui. Magnetinę sistemą jungiant prie turimo maitinimo šaltinio ($C_{Cmax} = 10800$ μF, $U_{0max} = 4000$ V), šaldymo kameros viduje galima generuoti maksimalų $B_{zmax} = 6,5$ T, 5 ms trukmės magnetinio lauko impulsą, kurio nehomogeniškumas $h(z_h)$, $z_h = 10$ mm centrinėje zonoje tarp dviejų induktorių, yra $< 0,1$ %. Siekiant išnaudoti visas magnetinės sistemos galimybes, pasiūlyta maitinimo šaltinio talpą padidinti iki 27000 μF (216 kJ), t. y. 2,5 karto. Tuomet magnetine sistema šaldymo kameros viduje galima būtų generuoti 10 T, 6,5 ms trukmės daugkartinius magnetinio lauko impulsus.

Literatūros sąrašas

- Askenazy, S. 1998. A Leuven Type Coil in a Coilex for 100 T Non-Destructive Magnets, *Physica B* 246–247: 67–72.
- Altgilber, L.L. 2008. Explosive Pulsed Power: An Enabling Technology, in *Proceedings of 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference*, Vilnius, Sept. 22–26, Lithuania, Abstracts, 26 (+Conference CD).
- Aubert, G.; Debray, F.; Dumas, J.; Joss, W.; Kraemer, S.; Martinez, G.; Mossang, E.; Petmezakis, P.; Sala, P.; Tholence, J. L.; Trophime, C.; Vidal, N. 2006. High Magnetic Field Facility in Grenoble, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 659–662.
- Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Keršulis, S.; Novickij, J.; Altgilbers, L. L.; Clarke, F. 2005. High Pulsed Magnetic Field Sensor Based on La-Ca-Mn-O Thin Polycrystalline Films, in *Acta Physica Polonica A, Part II, Proceedings of the 12th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors (12-UFPS)*, Vilnius, Lithuania, Aug. 22–25, 2004, 107(1): 207–210.
- Basic Research Needs for Materials under Extreme Environments. Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Materials under Extreme Environments. June 11–13, 2007 [žiūrėta 2008 09 26]. Prieiga per internetą: <http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/MUEE_rpt.pdf>.
- Berthier, C.; Levy, L. P.; Martinez, G. 2002. High Magnetic Fields: Applications in Condensed Matter Physics and Spectroscopy, Series: *Lecture Notes in Physics* 595. Springer, 1st Edition, 493. ISBN-13 978-3-540-43979-0.

- Bird, M.D.; Bole, S.; Dixon, I.; Eyssa, Y.M.; Gao, B.J.; Schneider-Muntau, H.J. 2001. The 45T hybrid insert: recent achievements, *Physica B* 294–295: 639–642.
- Boeinger, G. S.; Lacerda, A. H. 2003. The NHMFL at Los Alamos National Laboratory, *Journal of Low Temperature Physics* 133(1/2): 121–138.
- Boyoko, B. A.; Bykov, A. I.; Dolotenko, M. I.; Polokol'chikov, N. P.; Markevtsev, I. M.; Tatsenko, O. M.; Shuvalov, A. M. 1998. Megagauss Magnetic Field Generation, its Application to Science and Ultra-high Pulsed Power Technology: More than 20 MG Magnetic Field Generation in the Cascade Magnetocumulative MC-1 Generator, in *Proceedings of the VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*: 61–67.
- Committee on Opportunities in High Magnetic Field Science, Solid State Sciences Committee, National Research Council. 2005. Opportunities in High Magnetic Field Science. Washington D.C.: National Academies Press, p. 188. ISBN-13 978-0-309-09582-2.
- Devred, A.; Gourlay, S.A.; Yamamoto, A. 2005. Future accelerator magnet needs, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 15(2): 1192–1199.
- Fowler, C. M. 1998. Four Decades in Megagauss world, *Physica B* 246–247: 158–163.
- Frings, P.; Huang, Y.; Hennes, E. 2002. Pulsed-High-Field Technology, Close to the Edge?, *Physica B* 319: 330–338.
- Gao, B.J. 2001. High magnetic Field facilities at CASIPP, *Physica B* 294 295: 551–554.
- Groessinger, R. 1982. Pulsed fields: generation, magnetometry and application. Review Article, *Phys. D. Appl. Phys.* 15: 1546–1564.
- Groessinger, R.; Keplinger, F.; Hauser H. 2004. The design and construction of a thin foil high field magnet, *Physica B* 346–347: 604–608.
- Groessinger, R.; Schoenhardt, M.; Della Mea, M.; Sassik, H. 2006. AUSTROMAG – High Field Set Up and Experiments, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 623–626.
- Hagiwara, M.; Kimura, S.; Yashiro, H.; Yoshii, S.; Kindo, K. 2006. Present Status and Future Plan of Research in HMF at KYOKUGEN in Osaka University, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 647–650.
- Hansel, S.; Mueller, H. U.; Anh, T. T.; Richter, B.; Rossmann, H.; Von Ortenberg, M. 2006. The Humboldt HMFC at Berlin, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 639–642.
- Herlach, F. 1985. Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and Their Applications. New Jersey: Springer, Secaucus, 362. ISBN-13 978-0-387-13504-5.
- Herlach, F.; Miura N. 2001. High Magnetic Fields: Science and Technology. Vol.1: Magnet Technology and Experimental Techniques, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 326. ISBN-10 981-238-976-8 (ISBN 981-238-389-1(Set)).
- Herlach, F. 2002. Laboratory Electromagnets – from Oersted to Megagauss, *Physica B* 319: 321–329.

- Herlach, F. 2004. The K.U. Leuven Pulsed Field Laboratory: Magnet Technology and Measuring Techniques, *Physica B* 346–347: 654–658.
- Herlach, F.; Vanacken, J.; Moshchalkov, V.V. 2006a. The Pulsed Field Facility of KU-Leuven's Institute for nanoscale Physics and Chemistry, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 659–662.
- Herlach, F.; Peng, T.; Vanacken, J. 2006b. Elements of Pulsed Magnet Design, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 599–602.
- Herrmannsdörfer, T.; Krug, H.; Pobell, F.; Zherlitsyn, S.; Eschrig, H.; Freudenberger, J.; Müller, K. H.; Schultz, L. 2003. The High Field Project at Dresden/Rossendorf: A Pulsed 100 T/10 ms Laboratory at an Infrared Free-Electron-Laser Facility, *Journal of Low Temperature Physics* 133(1/2): 41–59.
- Huang, Y. K.; Frings, P. H.; Hennes, E. 2002. Exploding Pressure Vessel Test on Zylon/Epoxy Composite, *Composites* 33(B): 117–123.
- Inoue, K.; Kiyoshi, T.; Kosuge, M.; Takeuchi, T.; Matsumoto, F.; Maeda, H.; Hami, S.; Tezuka, M.; Matsutani, K. 1996. First Test Operation of 40 Tesla Class Hybrid Magnet System, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 32(4): 2450–2453.
- Jaime, M.; Lacerda, A.; Takano, Y.; Boebinger, G. S. 2006. The NHMFL, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 643–646.
- Jones, H.; Cleemput, M. V.; Hickman, A. L.; Ryan, D.T.; Saleh, P. M. 1998. Progress in High Field Pulsed Magnets and Conductor Development in Oxford, *Physica B* 246–247: 337–340.
- Kačianauskas, R.; Kačenauskas, A.; Novickij, J.; Stupak, E.; Žurauskienė, N.; Balevičius, S. 2004. Numerical Analysis of Destructive Coils in High Magnetic Fields, in *Proceedings of 2nd European Pulsed Power Symposium EPPS, 20–23 Sept. 2004, DESY, Hamburg, Germany*, Shaker, 2004: 198–201.
- Kačianauskas, R.; Kačenauskas, A.; Stupak, E.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Novickij, J. 2008a. Failure Analysis of Destructive Coils, *Journal of Vibroengineering* 10(2): 165–169.
- Kačianauskas, R.; Kačenauskas, A.; Stupak, E.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Novickij, J. 2008b. Numerical magneto-mechanical analysis of destructive coils with reinforcement cylinders having various thicknesses, *2nd Euro-Asian pulsed power conference (EAPPC2008), 4th European pulsed power symposium and 7th International symposium on pulsed power and plasma applications, 5th Symposium on pulsed power applications, in IET pulsed power symposium 2008 proceedings, 22–26 September 2008 Vilnius, Lithuania [CD]*: 1–4.
- Kakol, T.; Sheregii, E. M. 2001. The Optimal Build-Up Aimed to Generate High Pulsed Magnetic Fields, *Physica B* 298: 594–598.
- Kindo, K. 2001. 100 T Magnet Developed in Osaka, *Physica B* 294–295: 585–590.
- Kindo, K. 2006. New pulsed-magnets for 100 T, long-pulse and diffraction Measurements, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 522–528.

- Kiyoshi, T.; Wada, H. 2003. Development of Advanced High-Field Magnets at the Tsukuba Magnet Laboratory, *Journal of Low Temperature Physics* 133(1/2): 31–40.
- Kiyoshi, T.; Sato, A.; Nagai, H.; Matsumoto, F.; Kosuge, M.; Yuyama, M.; Nimori, S.; Asano, T.; Itoh, K.; Matsumoto, S.; Kido, G.; Watanabe, K. 2006. Tsukuba Magnet Laboratory: Present Status and Future Vision, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 651–654.
- Kojima, E.; Takeyama, S. 2001. Semiconductor Magneto-spectroscopy in Semidestructive and Destructive Magnetic Fields up to 700T, *Physica B* 298: 477–481.
- Lagutin, A. S.; Rosseel, K.; Herlach, F.; Bruynseraede, Y. 2004. Durable 70 T Pulsed Magnets, *Physica B* 346–347: 599–603.
- Lecouturier, F.; Spencer, K.; Thilly, L.; Embury, J. D. 2004. Perspectives for Cu/SS Macrocomposite and Cu/X Nanofilamentary Conductors Used in Non-Destructive High-Field Pulsed Magnets Under Cryogenic Conditions, *Physica B* 346–347(Condensed Matters): 582–588.
- Lee, P. J.; Larbalestier, D. C. 2008. Microstructural Factors Important for the Development of High Critical Current Density Nb₃Sn Strand, *Cryogenics* 48(7–8): 283–292.
- Leupold, M.J.; Weggel, R.J. 1992. Hybrid Magnet Program at the Francis Bitter National Magnet Laboratory MIT, *IEEE Transactions on Magnetics* 28(1): 775–781.
- LNCMP-team. 2006. The Toulouse pulsed magnet facility, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 635–638.
- Marshall, W. S.; Swenson, C. A.; Gavrilin, A.; Schneider-Muntau, H. J. 2004. Development of “Fast Cool” Pulse Magnet Coil Technology at NHMFL, *Physica B* 346–347: 594–598.
- Miller, J.R. 2003. The NHMFL 45-T Hybrid Magnet System: Past, Present, and Future, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13(2/2): 1385–1390.
- Montgomery, D. B. 1980. Solenoid Magnet Design: The Magnetic and Mechanical Aspects of Resistive and Superconducting Systems. Rep. Ed. N.Y., Huntington: R. E. Krieger. Pub. Co., 312. ISBN-10 0-882-75993-0.
- Mossang, E.; Joss, W.; Martinez, G.; Sulpice, A.; Bourgault, D.; Hu, L.; Li, C.S.; Zhou, L. 2003. Performing Experiments at the Grenoble High Magnetic Field Laboratory: Application to the Study of the J_c(B) Dependence of Bi-2223/Ag Multi-Filamentary Superconducting Tapes, *Physica C* 386: 462–466.
- Mossang, E.; Debray, F.; Jongbloets, H.; Joss, W.; Martinez, G.; Petmezakis, P.; Picoche, J.C.; Rub, P.; Sala, P.; Trophime, C.; Wyder, P. 2004. The Grenoble High Magnetic Field Laboratory as a User Facility, *Physica B* 346–347: 638–642.
- Novickij, J.; Kačianauskas, R.; Kačeniauskas, A.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič V. 2004a. Axial Magnetic Field Measurements of Pulsed Solenoids, *Electronics and Electrical Engineering* 2(51): 15–19.
- Novickij, J.; Kačianauskas, R.; Filipavičius, V.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Tolutis, R. 2004b. Inductors for High Magnetic Field Generation, *Electronics and Electrical Engineering* 7(56): 19–24.

- Novickij, J.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Šimkevičius, Č.; Tolvaišienė, S. 2005. High pulsed magnetic field measurements using phase transition in manganities, *Measurement 2005*, in *Proceedings The 5th International Conference on Measurement. Smolenice, Slovakia, May 15–19, 2005*, Bratislava : Institute of Measurement Science, 2005: 380–383.
- Novickij, J.; Višniakov, N. 2006. The Application of Composite Materials in Pulsed Inductor Design, *Solid State Phenomena* 113: 545–548.
- Peng, T.; Gu, C. L.; Roseel, K.; Vanacken, J.; Herlach, F. 2005. Advanced Numerical Simulation of Pulsed Magnets with Finite Element Method, *Measurement Science and Technology* 16: 562–568.
- Perenboom, J. A. A. J.; Wiegers, S. A. J.; Christianen, P. C. M.; Zeitler, U.; Maan, J. C. 2004. The New Installation at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory, *Physica B* 346–347: 659–662.
- Pollock, B. B.; Froula, D. H.; Davis, P. F.; Ross, J. S.; Fulkerson, S.; Bower, J.; Satariano, J.; Price, D.; Glenzer, S. H. 2006. High Magnetic Field Generation for Laser-Plasma Experiments, *Conference on High Plasma Diagnostics*, Williamsburg, VA, USA.
- Popova, E. N.; Sudareva, S. V.; Popov, V. V.; Radopnova, L. A.; Romanov, E. P.; Vorob'eva, A. E.; Dergunova, E. A.; Malafeeva, O. V.; Khlebova, N. E.; Shikov, A. K. 2000. Plastic Deformation of Composites Cu/Nb, Cu/Nb(Ti) and Cu-Sn/Nb(NbTi), *The Physics of Metals and Metallography* 90(2): 199–208.
- Praddaude, H.; Foner, S. 1974. Production of Quasistatic High Magnetic Fields by Switching Low Voltage DC Generators, *IEEE Transactions on Magnetics* 10(3): 701–703.
- Rosseel, K.; Herlach, F.; Boon, W.; Bruynseraede, Y. 2001a. Zylon-reinforced High Magnetic Field Coils for the K. U. Leuven Pulsed Field Laboratory, *Physica B* 294–295: 657–660.
- Rosseel, K.; Herlach, F.; Boon, W.; Bruynseraede, Y. 2001b. Multi-composite Wires for Pulsed Field Coils, *Physica B* 294–295: 679–683.
- Rosseel, K.; Herlach, F.; Vanacken, J.; Lagutin, A.; Bruynseraede, Y.; Humbeeck, J. V. 2004. 50 T Pulsed Field Coils Using Multi-Composite Wire, *Physica B* 346–347: 571–575.
- Sato, R.; Groessinger, R.; Bertorello, H.; Broto, J. M.; Davies, H. A.; Estevez-Rams, E.; Gonzales, J.; Matutes, J.; Sinnecker, J. P.; Sagredo, V. 2006. High Magnetic Field Facilities in Latin America, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 627–630.
- Schneider-Muntau, H. J.; Han, K.; Bernar, N. A.; Swenson, C. A.; Walsh, R. 2004. Materials for 100 T Monocoil Magnets, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14(2): 1153–1156.
- Schneider-Muntau, H. J. 2006. Pulsed Monocoil Magnets for Highest Fields, *Current Applied Physics* 6: 54–58.

- Shikov, A.; Patsyrnyi, V.; Nikulin, A.; Kozlenkova, N.; Polikarpova, M.; Khlebova, N. 2002. Investigation on the CuNb In-Situ Microcomposites Conductivity During the Process of Tensile Testing, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 12(1): 1767–1770.
- Sims J. R.; Hill, M. A.; Walsh, R.P. 1994. Developments in Materials for High-Field Magnets, *IEEE Transactions on Magnetics* 30(4): 2211–2213.
- Singleton, J.; Mielke, C. H.; Migliori, A.; Boebinger, G. S.; Lacerda, A.H. 2004. The National High Magnetic Field Laboratory Pulsed-Field Facility at Los Alamos National Laboratory, *Physica B* 346–347: 614–617.
- Suski, W.; Palewski, T.; Nizhankovskii, V. I.; Klamut, J. 2006. Research Facilities of International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures at Wrocław, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 603–606.
- Suzuki, O.; Sakamoto, K.; Imanaka, Y.; Kido, G. 2001. Fabrication of Pulsed Magnets With a Linear-Type Coil-Winding Machine, *Physica B* 294–295: 661–664.
- Swenson, C. A.; Marshall, W. S.; Gavrilin, A. V.; Han, K.; Schilling, J.; Sims, J. R.; Schneider-Muntau, H. J. 2004. Progress of the Insert Coil for the US-NHMFL 100 T Multi-Shot Pulse Magnet, *Physica B* 346–347: 561–565.
- Swenson, C. A.; Gavrilin, A. V.; Han, K.; Walsh, R. P.; Schneider-Muntau, H. J.; Rickel, D. G.; Schilling, J. B.; Ammerman, C. U.; Sims, J. R. 2006. Performance of 75 T Prototype Pulsed Magnet, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 16(2): 1650–1655.
- Takeyama, S.; Osada, T.; Miura, N. 2004. Solid-state Physics Towards Pulsed Ultra-high Magnetic Fields at ISSP, *Physica B* 346–347: 576–581.
- Vanacken, J.; Liang, L.; Rosseell, K.; Boon, W.; Herlach, F. 2001. Pulsed Magnet Design Software, *Physica B* 294–295: 674–678.
- Višniakov, N.; Novickij, J.; Zaveckas, V.; Kačianauskas, R. 2006a. Featured Measurements of Mechanical Properties of Electrotechnical Materials for Pulsed Magnets, *Measurement Science Review* 6(2), Section 3: 26–29.
- Višniakov, N.; Novickij, J.; Ščekaturovienė, D.; Šukšta, M. 2006b. Mechanical Properties of Winding Conductors Affected by Cyclic Thermal Overloads, *Solid State Phenomena* 113: 541–544.
- Watanabe, K.; Awaji, S.; Takahashi, K.; Motokawa, M. 2001. Hybrid Magnets and Cryogen-Free Superconducting Magnets Developed at the High-Field Laboratory for Superconducting Materials, *Physica B* 294–295: 541–546.
- Wosnitza, J.; Bianchi, A. D.; Herrmannsdorfer, T.; Wuensch, R.; Zherlitsyn, S.; Zvyagin, S. 2006. Status quo of the Dresden HMFL, *Journal of Physics, Conference Series* 51: 619–622.
- Zherlitsyn, S.; Herrmannsdorfer, T.; Skourski, Z.; Sytcheva, A.; Wosnitza, J. 2006. Pulsed Magnet Design at the Dresden High Magnetic Field Laboratory, *Journal of Physics, Conference series* 51: 583–586.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose

- Bartkevičius, S.; Novickij, J. 2009. The Investigation of Magnetic Field Distribution of Dual Coil Pulsed Magnet, *Electronics and Electrical Engineering* 4(92): 20–23. ISSN 1392-1215 (Thomson ISI Web of Science).
- Bartkevičius, S.; Novickij, J. 2008a. The Investigation of Stress Distribution in Pulsed Magnets, *Electronics and Electrical Engineering* 7(87): 7–10. ISSN 1392-1215 (Thomson ISI Web of Science).
- Bartkevičius, S.; Novickij, J. 2008b. The Influence of Pulsed Magnet Heating on Maximal Value of Generated Magnetic Field, *Measurement Science Review* 8(4/3): 94–97. ISSN 1335–8871 (COPERNICUS).
- Bartkevičius, S.; Novickij, J. 2007. The Investigation of Thermodynamic Processes in Pulsed Magnets, *Electronics and Electrical Engineering* 5(77): 19–22. ISSN 1392-1215 (Thomson ISI Web of Science).
- Bartkevičius, S.; Novickij, J.; Stankevič, V.; Cimperman, P. 2006. Data Processing of Manganite Sensors Array for Non-Homogeneous Pulsed Magnetic Field Measurements, *Electronics and Electrical Engineering* 4(68): 69–72. ISSN 1392-1215 (INSPEC).

Stankevič, V.; Anisimovas, F.; Arbutis, A.; Plaušinitienė, V.; Novickij, J.; Bartkevičius, S. 2005. Preparation and Properties of Polycrystalline and Epitaxial Manganite Films for Pulsed Magnetic Field Application, *Electronics and Electrical Engineering* 5(61): 33–37. ISSN 1392-1215 (INSPEC).

Višniakov, N.; Novickij, J.; Bartkevičius, S. 2006c. Simplified Numerical Simulation of Pulsed Magnets with a Finite Element Method, *Electronics and Electrical Engineering* 3(67): 47–50. ISSN 1392-1215 (INSPEC).

Straipsniai kituose leidiniuose

Bartkevičius, S.; Novickij, J.; Višniakov, N. 2008c. Geometry Optimization of Pulsed Inductors, in *Proceedings of the 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference*, Vilnius, Lithuania: 125.

Višniakov, N.; Bartkevičius, S.; Ščekaturovienė, D. 2006d. The Numerical Simulation of Reinforced High Magnetic Field Coil, in *Proceedings of 5-th International DAAAM Baltic Conference „Industrial Engineering- Adding Innovation Capacity of Labour Force and Entrepreneurs“*, Tallinn, Estonia: 311–314. ISBN 9985-894-92-8 (Thomson ISI Proceedings).

Saulius BARTKEVIČIUS

STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ DAUGKARTINIO
NAUDOJIMO INDUKTORIŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

THE INVESTIGATION OF HIGH MAGNETIC FIELD
LONG-LIFE OPERATION INDUCTORS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical Engineering and Electronics (01T)

Autoriaus kontaktinis adresas
el. paštas *sbartkevicius@yahoo.com*

2009 04 22. 10,50 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius