



Saulius BARTKEVIČIUS

**THE INVESTIGATION OF HIGH MAGNETIC
FIELD LONG-LIFE OPERATION INDUCTORS**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)**

1619-M

Vilnius  **LEIDYKLA
TECHNIKA 2009**

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Saulius BARTKEVIČIUS

**THE INVESTIGATION OF HIGH MAGNETIC
FIELD LONG-LIFE OPERATION INDUCTORS**

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

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).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Zigmantas JANKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Dr Habil Saulius BALEVIČIUS (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Antanas ŽILIUKAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Opponents:

Prof Dr Habil Stanislavas SAKALAUSKAS (Vilnius University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Assoc Prof Dr Zita SAVICKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a. m. on 2 June 2009.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 30 April 2009.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Saulius Bartkevičius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Saulius BARTKEVIČIUS

**STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ DAUGKARTINIO
NAUDOJIMO INDUKTORIŲ TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

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).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Zigmantas JANKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

habil. dr. Saulius BALEVIČIUS (Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Roma RINKEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Antanas ŽILIUKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Stanislavas SAKALAUSKAS (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

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

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2009 m. birželio 2 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@adm.vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2009 m. balandžio 30 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTV leidyklos „Technika“ 1619-M mokslo literatūros knyga.

General Characteristic of the Dissertation

Problem and Topicality of the Work

Generating constant high magnetic field (HMF) in many cases is an expensive luxury because of expensive facilities, materials and other resources needed. Therefore scientists often turn to lower energy consumption pulsed technologies. Pulsed magnetic fields up to 40–60 T produced by simple means enabled even budget-limited laboratories to achieve outstanding results in such promising fields like particle physics, molecular biology, medicine, material research, etc. A relatively simple system consisting of capacitor bank, pulsed switch and inductor connected in series can be used to generate pulsed magnetic field of this amplitude. However, simple principle of operation requires great efforts to ensure longer operation of applied pulsed inductors. The design of non-destructive pulsed coils is a multi-dimensional technical task because they operate under extreme Lorentz forces and Joule heating.

Pulsed inductors that generate up to 50 T and their long-life operation issues were addressed in the dissertation. To break down them effective technique to synthesize inductor geometrical and material models was developed, inductor mathematical and computer models created, electrophysical processes during the pulse in various inductors were examined. Retrievals of non-destructive inductor geometrical configurations were performed. Software developed and results gained were successfully used to design new pulsed inductor prototypes.

Object of Research

The objects of this research are HMF pulsed inductors.

Aim of the Work

The objective of this work was to develop a technique for inductor geometrical-material model synthesis, long-life operation inductor parameter retrieval algorithm and computer-aided calculation packages.

Tasks of the Work

Tasks of the work were following:

1. To develop technique for inductor geometry-material model synthesis.
2. After creating mathematical-computer inductor model to analyze thermodynamic, electromagnetic and magnetomechanical processes in pulsed inductors.
3. To determine parameter feasibility criteria for long-life operation inductors and to develop algorithm for retrieval of their geometries.

4. To retrieve long-life operation inductor parameter ranges.
5. To design prototypes of inductors for condensed matter research.

Methodology of Research

Analytical, numerical and experimental methods were applied. Electrophysical models and retrieval algorithms were realized numerically in *Matlab*[®], verifications were carried out in *ANSYS*[®] and experimentally.

Scientific Novelty of the Work and its Value

Dissertation offers new universal and flexible technique to evaluate inductor output parameters: generated magnetic field amplitude, pulse form and duration, winding heating and mechanical stress distribution in inductor cross-section while entering geometrical and material parameters as an input.

A technique mentioned enabled to develop long-life operation inductor parameter retrieval algorithms and computation packages while entering desired output parameter ranges. The result is inductor “vitality zone”, i.e. inductor parameters that let inductor windings not to overheat and not to overstress during the pulse. Such inductors can be used for multiple-pulses (more than 100 pulses) and therefore are called long-life operation inductors. A technique was developed to form inductor geometry-material models for the analysis. This difficult task is easily framed, solved, fastened and simplified as a result.

Practical Value of the Work Results

The solutions offered provide simple, fast, cheap, sustained pulse inductor design and reliable maintenance along with proper material and experimental environment selection. Analysis of complex tasks, e.g. different materials for every layer, varying layer thicknesses, as well as partial tasks is possible. Calculation packages were written in *Matlab*[®] and are easy to improve and elaborate. The packages are successfully employed in HMF laboratory at Vilnius Gediminas technical university and Semiconductor Physics Institute.

50 T class inductor and dual-inductor system for cryostat at Vilnius Semiconductor Physics Institute were proposed using dissertation results.

Defended Propositions

1. Developed geometry synthesis technique enables to erect virtual inductor models at least ten times faster than using software packages that operate with Finite Element Methods (FEMs), while entering winding cross-section geometry, materials, inductor winding and layer numbers only.
2. The existence of “vitality zone”, which enables analysis of inductor behaviour when changing their winding cross-section, power supply

electrophysical parameters and parameters of experimental environment, is essentially determined by generated magnetic field, material heating and mechanical overloads.

3. Using developed software calculating results demonstrate acceptable (deviation less than 5%) conformance with experimental and FEM modelling results.

Approbation of the work Results

The results of this 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, COPERNICUS 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. Results were applied in two VGTU qualification scientific works and two contracts supported by the Lithuanian State Science and Studies Foundation.

The Scope of the Dissertation

The scientific work contains introduction, lists of notations, four chapters, list of references and list of author's publications on the subject of dissertation. The work covers 110 pages, 36 figures, 7 tables, 27 numerated formulas and 78 bibliographic sources.

1. Analytical Review of HMF Pulsed Inductor Design and Analysis

Chapter 1 presents a brief review of methods to generate HMF marking pulsed field as one of most effective: least energy consuming, fairly easy to produce, high amplitude, long-enough pulse duration for most of the experiments and applications. The system consisting of capacitor bank, thyristor switch and inductor (coil) is used to generate 40–80 T, 1–500 ms non-destructive magnetic field in regional laboratories. Further on, an overview of different types of pulsed inductor constructions is given; main problems and latest solutions, concerning inductor winding technologies, materials, conductor types, electrophysical processes taking place in windings during the pulse are discussed. Inductor computer modelling and their geometry optimization problems and various approaches are introduced in the last section.

2. HMF Inductor Mathematical Model and Geometry Retrieval Procedure

The first part of chapter 2 is devoted to the description of new technique for virtual inductor geometry and material model synthesis. It was observed that every inductor cross-section (2D model) or at least one layer can be composed

of winding elements (Fig. 1) in most cases consisting of conductor, insulation and reinforcement layers. Such models are simple to program, algorithms are not complex and fast allowing to determine all geometrical inductor parameters, e.g. wire length, resistance, inductivity, insulation and reinforcement layer thicknesses and areas, which along with material properties are the basis for inductor electrophysical processes analysis. To form the inductor only one winding cross-section geometrical and material parameters are needed.

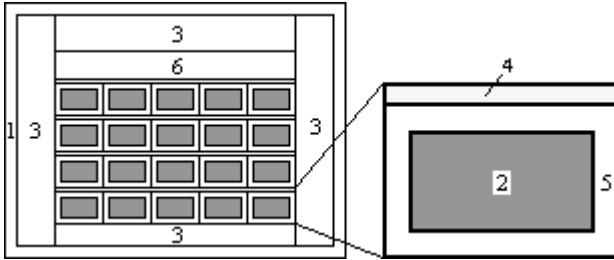


Fig. 1. Inductor and one winding-element cross-section: 1 – environment, 2 – conductor, 3 – container, 4 – layer reinforcement, 5 – insulation, 6 – outer enforcement

In the second part of the chapter inductor mathematical model was created.

In the third part inductor “vitality zone” is defined as parameter set (feasible winding and layer number, bore diameter, pulse rise time, maximum generated magnetic field and maximum mechanical stresses, power supply, material and environment electrophysical parameters) of inductors, of which winding temperature and mechanical stresses after the pulse do not exceed permissible temperature of insulation and yield strength of weakest material in the construction. “Vitality zone” identifies long-life operation inductors that are tested at same power supply configuration and environmental temperature.

Further on the algorithm for the “vitality zone” retrieval is described. It includes:

1. The setting of input parameters: bore diameter $2a_1$, minimum and maximum number of windings n_{11} , n_{12} and layers n_{21} , n_{22} one winding cross-section model, minimum and maximum desirable magnetic field (B_{min} , B_{max}), maximum allowable winding heating temperature T_{max} , minimum pulse rise time t_{min} , maximum Von Misses stresses σ_{VMmax} , power supply voltage U_0 and capacitance C_C , ambient temperature T_0 .
2. The calculation of basic inductor geometrical and electrical parameters.
3. The solution of thermodynamic, electromagnetic and magnetomechanical models for pulse form, winding heating and heat dissipation, maximum current, distribution of magnetic field and stresses in windings.

4. Changing n_{11} , n_{21} and repeating the procedure until n_{12} and n_{22} are reached.

Inductors that fulfill B_{min} , B_{max} , T_{max} , t_{min} and σ_{VMmax} requirements fall into “vitality zone”. All the partial, final results and transients, if wished, can be presented graphically. This universal algorithm carries out the analysis of inductor set behaviour, as well as thorough analysis of individual inductors and is shown to be the basis for “vitality zone” retrieval software package.

3. Retrieval of HMF Long-Life operation Inductor Parameters

Chapter 3 is intended for the investigation of electrophysical processes in inductors during the pulse and “vitality zone” retrievals.

First of all three different one winding cross-sections are formed (referring to geometry-material synthesis technique) with 1.7×0.8 mm CuNb (“A” cross-section), 1.7×0.8 mm Cu (“B”) and 4.2×2.37 mm CuNb (“P” for Prototype) wires, *Kapton*[®] insulation and *Zylon*[®] reinforcement, all used in VGTU High magnetic field laboratory. After this thermodynamic, electromagnetic and magnetomechanical processes were thoroughly analyzed in inductors with “A”, “B” and “P” winding cross-sections. Laboratory inductor “A” had $n_1 = 13$ windings/layer, $n_2 = 6$ layers and laboratory inductor “B” – $(n_1; n_2) = (13; 6)$, prototype inductor “P” – $(n_1; n_2) = (10; 6)$. 50 T was reached by applying $U_0 = 3700$ V (“A”), 2850 V (“B”), 4000 V (“P”) at $a_1 = 6$ mm, $T_0 = 77$ K, $C_C = 10,800$ μ F.

Results showed that inductor “A” was highly overheated with winding $T_{max} = 1240$ K after the pulse and applicable only up to 38 T because T_{max} for *Kapton*[®] is 676 K. Inductor “B” was highly overstressed with $\sigma_{VMmax} = 1.4$ GPa when σ_{VMmax} for Cu should not exceed 0.25 GPa (Cu yield strength) and appeared to be applicable only up to 20 T. Inductor “P” proved to be a good candidate for 50 T class inductor generating $B_{0max} = 49$ T at $T_{max} = 118$ K, $\sigma_{VMmax} = 1.1$ GPa, σ_{VMmax} still exceeding CuNb yield strength (0.83 GPa) but not exceeding tensile strength (1.12 GPa). The results for inductor “P” are shown in Fig. 2.

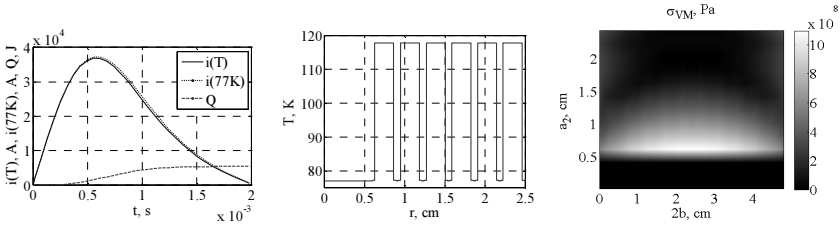


Fig. 2. Inductor “P”. Pulse current $i(T)$, current without evaluated heating $i(77$ K), layer temperature $T(r)$, Von Mises stress distribution in windings σ_{VM}

Table 1. “Vitality zone” retrieval parameters

Criteria	Inductor and Value		
	„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
n_{11} :step: n_{12}	2:1:30	2:1:30	2:1:30
n_{21} :step: n_{22}	2:2:8	2:2:8	2:2:8

and magnetomechanical analysis different U_0 for retrievals was chosen: 2100 V for inductors with winding cross-section “A”, 1000 V for “B” and 3000 V for “P”. a_1 and T_0 were kept at 6 mm and 77 K for all experiments. “Vitality zones” are shown in Fig. 3.

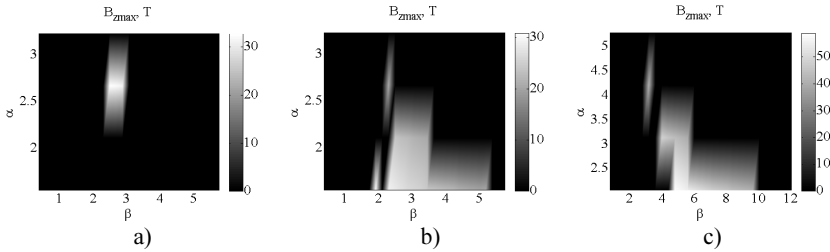


Fig. 3. Inductor “vitality zones” for winding cross-section “A” (a), “B” (b), “P” (c)

“Vitality zones” in Fig. 3 show that with winding cross-sections “A” and “B” no more than 30–35 T can be achieved, while with cross-section “P” different winding-layer combinations give over 40 T with $(n_1;n_2) = (12-25;2)$, $(10-15;4)$, $(8;6)$ (here α = outer diameter/ a_1 , β = half length/ a_1). 50 T is reached with $(n_1;n_2) = (15-16;2)$ and $(n_1;n_2) = (10;4)$, the latter with longer pulse duration.

Finally, different “vitality zones” were analyzed for “P” winding type inductors when $U_0 = 2600$ V, 3400 V ($a_1 = \text{const} = 6$ mm), $a_1 = 3$ mm, 9 mm ($U_0 = \text{const} = 3000$ V). Comparing with results in Fig. 3c) “vitality zone” drifts in both cases were observed together with changing maximum feasible magnetic field amplitude when changing a_1 and constant maximum magnetic field amplitude when changing U_0 . It was also shown that “vitality zone” is the universal data that allows analysing long-life operation inductor behaviour under different conditions.

In all cases only minor (few Kelvin) heat dissipations were observed during the pulse.

After different inductors were analyzed, “vitality zone” retrieval parameters (Table 1) were determined and program for retrieval written. Additionally, referring to the results from thermodynamic, electromagnetic

4. Verification and Application of Research Results

The 4th chapter is divided into two parts. In the first part the verification for inductor $(n_1;n_2) = (10;4)$ with “P” winding cross-section was carried out in ANSYS® and inductor “A” $((n_1;n_2) = (13;6))$ was tested in the laboratory using memorized oscilloscope and calibrated manganite sensor placed in the centre of the inductor bore.

Fig. 4 and 5 show experimental and modelling results for inductor “A”. Compared results in both cases (author’s modelling vs. ANSYS® and experiment) showed 2–5% deviations for magnetic field/stress analysis which means that thermodynamic analysis outcomes also coincide because magnetic field/stresses are determined by the current.

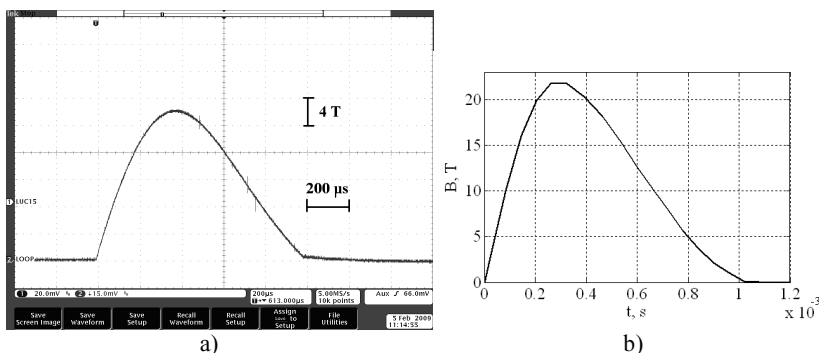


Fig. 4. Inductor “A”. Experimental (a) and modelling results (b) when $T_0 = 77$ K, $U_0 = 2$ kV. a) $B_{0max} = 22.4$ T, b) $B_{0max} = 21.8$ T

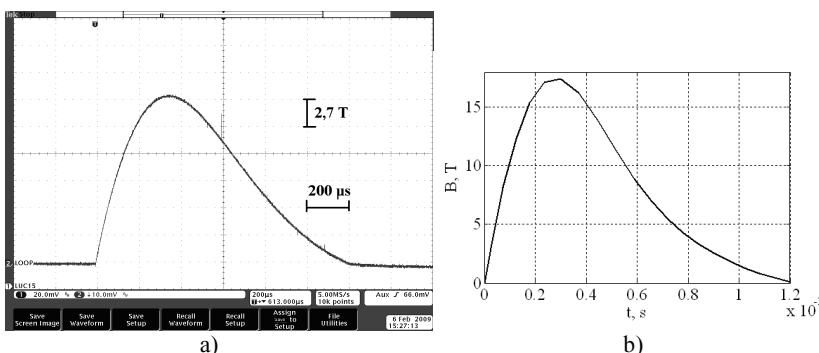


Fig. 5. Inductor “A”. Experimental (a) and modelling results (b) when $T_0 = 293$ K, $U_0 = 2$ kV. a) $B_{0max} = 16.8$ T, b) $B_{0max} = 17.4$ T

In the second part of the chapter inductor prototypes were designed. A proposition for 50 T class inductor composed of “P” type winding cross-sections, configuration of $(n_1;n_2) = (10;4)$, was made. As seen in Fig. 6, thick outer reinforcement with *Zylon*[®]+*Epoxy* is used to distance container to avoid magnetic fields generated by inductive currents in it (high pulse $d\Phi/dt$).

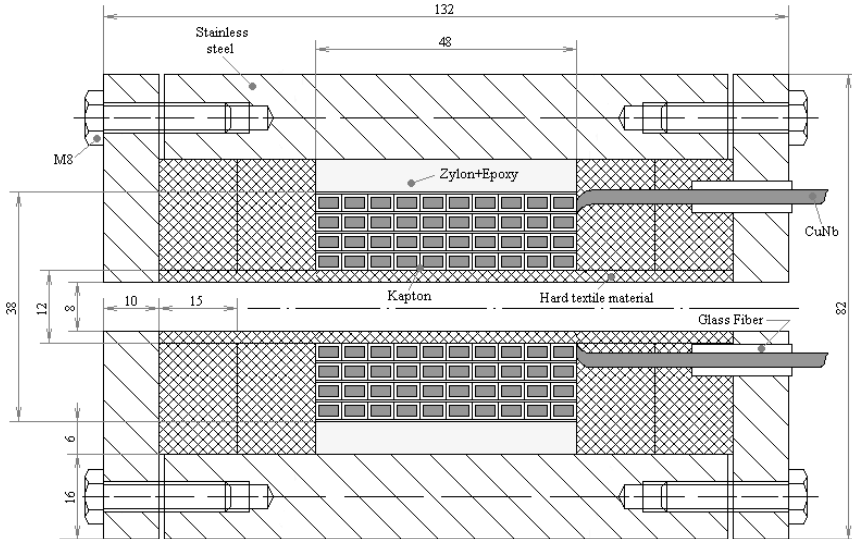


Fig. 6. 50 T class inductor

Finally a large bore ($a_1 = 30$ mm) dual Helmholtz construction inductor with optical channel for laser beam was proposed. Inductor has to be mounted on closed cycle He^4 cryostat SRDK-408 camera and used for condensed matter research at Semiconductor Physics Institute in Vilnius.

To start the design a maximum energy of laboratory capacitor bank was chosen (86,4 kJ at $U_0 = 4000$ V), “vitality zone” for “P” type winding cross-section was found and $(n_1;n_2) = (6;6)$ inductor generating 7.5 T, ~ 5 ms pulse was selected for being relatively small in size and large in inductance. Inductor winding temperature after 4 consecutive pulses was $T_{max} = 420$ K ($T_0 = 293$ K) reducing current by 3.7% and magnetic field to 7.3 T. Further on, computer codes to determine the distance between outer inductor walls in dual system and effective generated magnetic field were written in order to fulfil field non-homogeneity requirements of $h(z_h) = 0.1\%$ in space of $z_h = 10$ mm. It was found that magnetic field of 10.5 T could be generated by the system. Calculation results are shown in Fig. 7. The distances between coil ends and

centres for required non-homogeneity are 15.3 mm and 44.1 mm respectively. It was also calculated that magnetic field would be reduced to 6.5 T inside the cryostat camera due to 4 mm camera brass wall (skin depth of 8.2 mm at $f = 125$ Hz). Magnetic fields up to 10 T inside the camera could be reached after increasing capacity of the battery by factor 2.5 up to 27 mF.

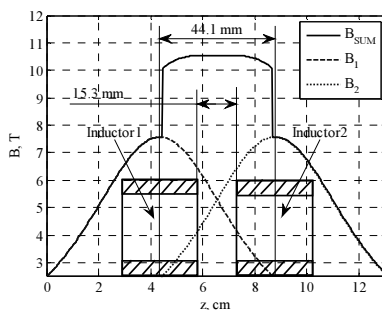


Fig. 7. Dual Helmholtz coil system: $B_{SUM} = 10.5$ T, $h(z_n) < 0.1\%$

Fig. 8 shows the detailed design of the dual coil system.

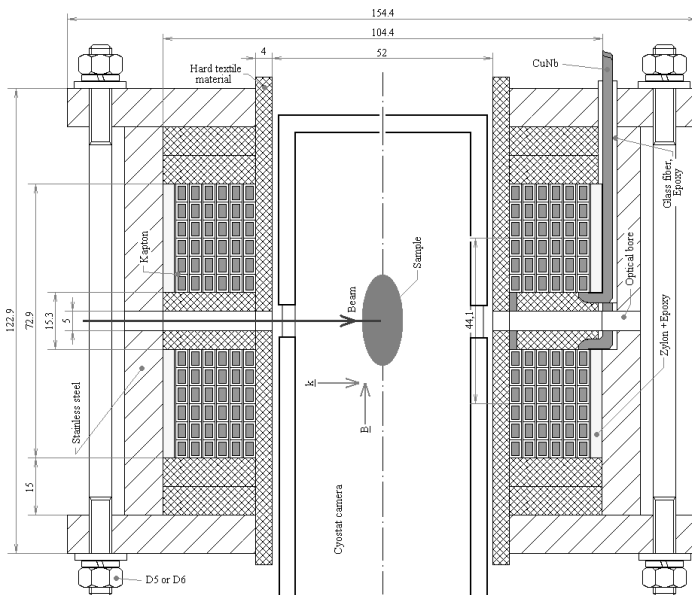


Fig. 8. Prototype of dual inductor for cryostat SRDK-408

General Conclusions

1. After thorough known pulsed inductor design and software analysis inductor geometry-material model synthesis technique was proposed that enabled to erect virtual inductor models faster than using FEM operating software packages, while entering winding cross-section geometry, materials, inductor winding and layer numbers only.
2. Inductor mathematical model was elaborated and calculation packages for integrated inductor virtual geometry synthesis, process evaluation and long-life operation parameter retrievals were created in *Matlab*[®].
3. The analysis of three winding cross-section model “A”, “B” and “P” inductor “vitality zones” has proved that the existence of “vitality zone”, which enables evaluation of inductor behaviour when changing their winding cross-section, power supply electrophysical parameters and parameters of experimental environment, is essentially determined by generated magnetic field, material heating and mechanical overloads.
4. „Vitality zones“ for different winding cross-sections have shown that with “A” type winding cross-section up to 35 T (limited by heating), “B” type 30 T (limited by mechanical conductor strength) and “P” type 55 T (limited by mechanical conductor strength) HMF can be generated when ambient temperature for all experiments is $T_0 = 77$ K.
5. The verification of results when modelling inductors that fall into “vitality zone” using *ANSYS*[®] and by measuring their axial magnetic field experimentally has proved the confidence of developed model because all the deviations were less than 5%.
6. Investigations conducted enabled to recommend a 50 T class inductor design for manganite and other condensed matter research. Inductor composed of “P” type winding cross-sections (4.2×2.37 mm CuNb, *Kapton*[®] insulation, *Zylon*[®] interlayer reinforcement) and of configuration $(n_1;n_2) = (10;4)$ when $a_1 = 6$ mm, $W_{CP} = 48.6$ kJ ($U_0 = 3000$ V) would be able to generate 50 T, 1 ms non-destructive magnetic field pulses.
7. Using designed software and research results the inductor with optical channel for cryostat was proposed. Dual coil, each of configuration $(n_1;n_2) = (6;6)$, $a_1 = 30$ mm and composed of “P” type winding cross-sections would generate magnetic field pulses up to 6.5 T, 4–5 ms with non-homogeneity of 0.1% in 10 mm central area of the camera using available laboratory capacitor bank ($U_{0max} = 4000$ V, $C_C = 10,800$ μF). In order to extend magnetic system capabilities, it was proposed to increase battery capacitance by factor of 2.5, i.e. up to 27,000 μF.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the Reviewed Scientific Periodical Publications

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

In the Other Editions

- 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. 2006b. 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).

About the Author

Saulius Bartkevičius was born in Vilnius, on 22nd of December 1980.

After graduating from Vilnius Mykolas Biržiška gymnasium in 1999 he was granted the Bachelor's degree in Electrical and electronic engineering at

the Faculty of Electronics of Vilnius Gediminas Technical University in 2003, and the Master's degree in the same field at the Faculty of Electronics of Vilnius Gediminas Technical University in 2005. In 2003–2004 he studied for one semester at FH Stralsund and one semester at TU Braunschweig, Germany. From 2005 S. Bartkevičius is a PhD student at Vilnius Gediminas Technical University and works as a project engineer in “Siemens” company.

STIPRIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ DAUGKARTINIO NAUDOJIMO INDUKTORIŲ TYRIMAS

Tiriamoji problema ir darbo aktualumas

Stipraus pastovaus magnetinio lauko generavimas yra didelė prabanga dėl reikalingos infrastruktūros, energetinių ir kitų resursų, todėl paplitę impulsinio iki 40–60 T magnetinio lauko srauto tankio (toliau – magnetinio lauko) generavimo būdai įgalino mažesnius biudžetus turinčias laboratorijas pasiekti pasaulinio lygio rezultatų įvairiose mokslinių tyrimų srityse. Minėtosios amplitudės magnetinį lauką galima generuoti sistemoje kondensatorių baterija-tiristorinių raktų blokas-induktorius, tačiau paprastas veikimo principas neuztikrina, kad induktorius bus tinkamas daugkartiniams eksperimentams. Impulsinių induktorių kūrimas yra sudėtingas daugiamatis uždavinys dėl impulso metu juose pasireiškiančių didelių šiluminių ir mechaninių perkrovų.

Disertacijoje nagrinėjami daugkartinio naudojimo (tarnaujančių > 100 impulsų) stipraus impulsinio magnetinio lauko induktorių, gebančių generuoti iki 50 T magnetinio lauko impulsus, kūrimo ir ilgaamžiškumo problemos. Jas sprendžiant sukurta induktorių geometrijos sintezės metodika, sudaryti induktorių matematiniai ir kompiuteriniai modeliai, ištirti impulso metu induktorių apvijose vykstantys šiluminiai ir mechaniniai procesai, atlikta daugkartinio naudojimo induktorių geometrijų paieška. Sukurtas programinis aprūpinimas induktorių skaičiavimams įgalina nustatyti induktorių, tinkamų daugkartiniam impulsiniam magnetiniam laukui generuoti, parametrus. Darbo rezultatai sėkmingai pritaikyti kuriant įvairius induktorių prototipus.

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 induktorių parametru tinkamumo kriterijus ir sukurti geometrijos paieškos algoritmą.
4. Nustatyti daugkartinio naudojimo impulsinių induktorių tinkamų parametru ribas.
5. Sukurti impulsinių induktorių prototipus įvairiems medžiagų fizikiniams tyrimams.

Tyrimų metodika

Sukurti analitiniai modeliai perkelti į skaitmeninius *Matlab*[®] aplinkoje. Rezultatų patikra atlikta induktorius modeliuojant *ANSYS*[®] ir eksperimentiškai.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

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

Pasiūlyta induktoriaus geometrijos sintezės metodika leidžia sukurti tokių induktorių geometrijos paieškos, pasirinkus norimų išėjimų parametru ribas, algoritmus ir programinę įrangą. Paieška atliekama nurodžius vienos vijos skerspjūvio geometriją ir medžiagų fizikinius parametrus. Paieškos rezultatas – induktorių „gyvavimo zona“ – pagrindinių parametru (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 leistiniųjų.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Pasiūlyti sprendimai garantuoja paprastesnę, greitesnę, pigesnę, patikimesnę, analizę paremtą impulsinių induktorių gamybą ir eksploatavimą, medžiagų, skirtų induktoriams vynioti, aplinkų, kuriose vyksta eksperimentai, tinkamą parinkimą. Programinė įrangą nesudėtinga, todėl ją nesunkiai galima

tobulinti, derinti, keisti, pritaikyti skirtingiems ar daliniams uždaviniams, su kuriais susiduriama vnyiojant impulsinius induktorius, spręsti. Remiantis darbo rezultatais, pasiūlytas 50 T klasės impulsinio induktoriaus prototipas ir magnetinė sistema fizikinėms medžiagų savybėms tirti. Sukurtoji programinė įranga taikoma VGTU Stiprių magnetinių laukų laboratorijoje, 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 tema paskelbti devyni straipsniai, iš jų: trys straipsniai žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI Web of Science sąrašą, keturi – žurnaluose, įtrauktuose į INSPEC ir COPERNICUS duomenų bazes, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI Proceedings duomenų bazėje, vienas – kitų tarptautinių konferencijų medžiagoje, perskaityti septyni pranešimai Lietuvos bei užsienio konferencijose. Autoriaus darbai remtasi dviejuose VGTU kvalifikaciniuose ir dviejuose Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo remiamuose darbuose.

Disertacijos struktūra

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

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

Pirmajame skyriuje aptariama stipraus magnetinio lauko reikšmė šiuolaikiniam 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, sukuriama 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 vnyiojimo 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.

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 paketuose 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 parametų – „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 parametų, 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 (1,7×0,8 mm CuNb) galima

generuoti iki 35 T (magnetinį lauką riboja apvijų išsilimas ir mechaniniai įtempiai), „B“ (1,7×0,8 mm Cu) – 30 T (magnetinį lauką riboja mechaniniai įtempiai), „P“ (4,2×2,37 CuNb) – 55 T (magnetinį lauką riboja mechaniniai įtempiai) daugkartinius magnetinio lauko impulsus, kai pradinė aplinkos temperatūra $T_0 = 77$ K.

5. Modeliuojant induktorių, patenkantį į „gyvavimo zoną“, ANSYS® aplinkoje bei atlikus ašinio magnetinio lauko matavimus vienam iš tokių induktorių, patvirtinta, kad surakta programine įranga atliktų skaičiavimų – generuojamo magnetinio lauko ir mechaninių įtempių – rezultatų neapibrėžtis neviršija 5 %.
6. Taikant atliktų tyrimų metodiką ir suraktą programinę įrangą, pasiūlytas 50 T klasės induktoriaus (skirto medžiagų magnetovaržos, magneoptiniams tyrimams, manganitų jutiklių kalibravimui) prototipas: 10 vijų ir 4 sluoksnių induktoriumi, sudarytu iš „P“ tipo vijų skerspjuvių (4,2×2,37 mm CuNb, Kapton® izoliacija, Zylon® tarp sluoksnius 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 skerspjuvis) 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.

Trumpos žinios apie autorių

Saulius Bartkevičius gimė 1980 m. gruodžio 22 d. Vilniuje.

1999 m. baigęs Vilniaus Mykolo Biržiškos gimnaziją 2003 m. įgijo elektros ir elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2005 m. įgijo elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. S. Bartkevičius 2003–2004 m. semestrą mokėsi Vokietijoje FH Stralsund, o 2004 – semestrą TU Braunschweig. Nuo 2005 m. – studijuoja doktorantūrą Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektrotechnikos katedroje ir dirba projektų inžinieriumi UAB „Siemens“.

Saulius BARTKEVIČIUS

**THE INVESTIGATION OF HIGH MAGNETIC FIELD LONG-LIFE
OPERATION INDUCTORS**

Summary of Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering (01T)

Saulius BARTKEVIČIUS

**STIPTIŲ MAGNETINIŲ LAUKŲ DAUGKARTINIO NAUDOJIMO
INDUKTORIŲ TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2009 04 22. 1,25 sp. l. Tiražas 60 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto

leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

<http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,

J. Jasinskio g. 16A, LT-01112 Vilnius