



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Катедра “Електрически апарати”

Маг. инж. Георги Иванов Иванов

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И ТОПЛИНИ
ИЗОЛАЦИОННИ СИСТЕМИ ЗА
СВРЪХПРОВОДИМИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ
АПАРАТИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за присъждане на образователна и научна степен
ДОКТОР

Област 5. Технически науки
Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и
автоматика

Научна специалност: Електрически апарати

Научни ръководители:
проф. д.т.н. инж. Илиана Маринова
доц. д-р инж. Валентин Матеев

София, 2024

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електрически апарати“ към Електротехнически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 04.06.2024г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 10.10.2024 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-52 от 24.06.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д.т.н. инж. Иван Ячев
2. доц. д-р инж. Йоско Балабозов
3. проф. д-р инж. Георги Павлов
4. проф. дн инж. Галина Чернева
5. проф. д-р инж. Васил Димитров

Рецензенти:

- проф. д.т.н. инж. Иван Ячев
проф. д-р инж. Георги Павлов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок 12, кабинет № 12222.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електрически апарати“ на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната работа са проведени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти по актуални тематика на катедра „Електрически апарати“.

Автор: маг. инж. Георги Иванов Иванов

Заглавие: ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И ТОПЛИННИ ИЗОЛАЦИОННИ СИСТЕМИ
ЗА СВРЪХПРОВОДИМИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В годините са предлагани и приложени успешно редица свръхпроводящи устройства в електротехниката: силови кабели, електромагнити за задвижване, сензори за измерване на магнитни полета и т.н. Въпреки обещаващите си качества, при тези устройства са налице особености и проблеми, предизвикани от криогенните работни температури, специфичните електромагнитни характеристики, взаимодействието им с несвръхпроводящи електрически устройства, както и проблеми, свързани с конструктивните материали и техните характеристики в този температурен диапазон. Ниските работни температури променят електрическите изолационни качества на материалите, изискват употребата на специфични топлоизолационни конструкции, подпомагащи охлаждането и поддържането на необходимата работна температура.

С появата на високотемпературната свръхпроводимост и технологичния напредък по изработване на свръхпроводници от втори род, които работят при температури на течния азот, се създава възможността за сравнително по-достъпно конструиране и разработване на електромагнитни системи и устройства с намотки, изработени от ново поколение HTS-2G свръхпроводници. Малки електрически загуби, висока токова плътност и силни магнитни полета, които може да се постигнат в свръхпроводящ режим, са желани характеристики за всички електротехнически устройства.

Дисертацията е насочена към изследване на характеристиките на свръхпроводящи лентови проводници от второ поколение, както и съпътващите ги проблеми при изработката на свръхпроводящи електротехнически устройства.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е да се изследват свръхпроводими електрически хибридни индуктивни системи от намотки с лентови свръхпроводници от второ поколение. Поставената цел е реализирана чрез изпълнение на следните задачи:

1. Изследване на електромагнитните характеристики посредством теоретични и числени модели на свръхпроводими електрически апарати при криогенни температури в течен азот;
2. Изследване на топлинни характеристики и модели на свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот;
3. Изследване на приложимостта на електроизолационни материали за работа и конструиране на свръхпроводящи електрически апарати, при криогенни температури в течен азот;
4. Изследване на работни характеристики на високотемпературни лентови свръхпроводници от второ поколение за конструиране на свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот;
5. Конструиране на хибридна електромагнитна система от намотки, изработени от лентови свръхпроводници, за работа при криогенни температури в течен азот;

При изпълнението на поставените задачи са използвани съвременни числени методи за анализ на електромагнитни, топлинни, флуидни полета и вериги при различни режими, както и модерни компютърни автоматизирани системи за измерване и наблюдение на динамични процеси.

При конструирането и разработването на прототипи са използвани различни видове лентови свръхпроводници от второ поколение. Охлаждането и поддържането на системата в свръхпроводящо състояние е осъществено с течен азот и подходящи топлоизолационни материали. При конструирането са използвани съвременни методи за тримерно проектиране и методи за бързо прототипиране.

Научна новост

1. Изследване на работните характеристики на последно поколение свръхпроводими лентови проводници от втори род, работещи при криогенни температури в течен азот;
2. Създаване на компютърни модели за решаване на смесени задачи за топлинни, флуидни и електромагнитни полета на свръхпроводящи електротехнически устройства;
3. Изследване и определяне на електрически и топлинни загуби в свръхпроводящи електрически апарати в различни режими;
4. Изследване на различни проблеми при проектиране на свръхпроводящи електрически апарати за работа в криогенни температури в течен азот;
5. Изследване и изпитване на електроизолационни композитни материали за приложения в криогенни температури в течен азот;
6. Създаване и изпитване на прототипи на индуктивни свръхпроводящи електрически устройства за криогенни температури в течен азот;
7. Изпитване на свръхпроводящи електрически устройства, изработени от свръхпроводящи лентови проводници и определяне на работните им характеристики при криогенни температури в течен азот.

Апробация

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на национални и международни конференции и са публикувани в индексирани издания:

- 15th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF) 2023;
- Рецензирано списание Energies 2023;
- 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA) 2023;
- 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF) 2022;
- XXXI International Scientific Conference Electronics (ET) 2022;
- 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF) 2020;
- 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA) 2020;
- 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF) 2019;
- 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA) 2019.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са представени в 9 научни публикации. Всички публикации са на английски език. 4 от публикациите са на национални конференции, 4 на международни конференции и 1 публикация е в онлайн списание. Всички 9 публикации са с индексирани в Scopus, като две от тях са и в WoS.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 122 страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, заключение, основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 137 литературни източници, като 134 са на латиница и 4 на кирилица. Работата включва общо 121 фигури и 38 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

В тази глава са разгледани основни характеристики, термини и основни понятия свързани със свръхпроводимостта. Направен е преглед на приложимостта на свръхпроводящите лентови проводници в енергетиката, индустрията, медицината, както и проблеми свързани с моделирането. Разгледани са архитектури и технологии за изработката високотемпературни лентови свръхпроводници от второ поколение. В главата са набелязани основни проблеми при работата със свръхпроводящи материали за криогенни температури в течен азот, както и тенденции за развитие на свръхпроводимостта.

1.1 Въведение в свръхпроводимостта

Свръхпроводниците се характеризират с отсъствието на електрическо съпротивление под специфична критична температура T_c , позволявайки им през тях да протичат големи токове без електрически загуби. В зависимост от техните температури на преход се различават свръхпроводници от I и II род.

Свръхпроводниците от I род са чисти метали и се характеризират със следните характеристики [27,103,9]:

- отсъствие на електрическо съпротивление в свръхпроводящо състояние ($\rho=0$);
- идеален диамагнетизъм в свръхпроводящо състояние ($\mathbf{B}=0$);
- критична температура, при която влизат в свръхпроводящо състояние $T < T_c$;
- критичен ток, при който свръхпроводника излиза от свръхпроводящо състояние $I < I_c$;
- критична стойност на интензитета на полето, при който свръхпроводника излиза от свръхпроводимост $\mathbf{H} < \mathbf{H}_c$.

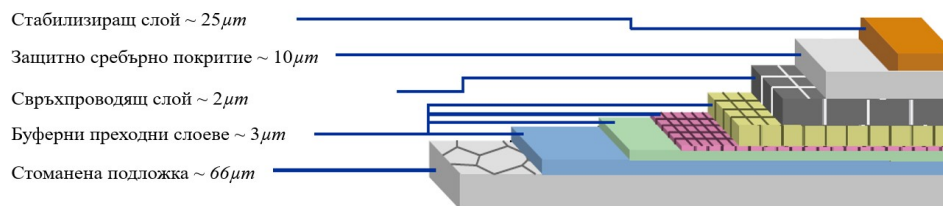
Свръхпроводниците от II род притежават всички характеристики на свръхпроводници от I род и са материали, които има значително по-висока температура на прехода T_c , обикновено са сплави на различни видове метали. Свръхпроводниците от II род се характеризират с две критични магнитни полета \mathbf{B}_{c1} и \mathbf{B}_{c2} , при които свръхпроводимостта се разрушава.

Високотемпературните свръхпроводници (съкратено High- T_c или HTS) са материали, които влизат в свръхпроводящ режим при температура на прехода (T_c) над 30K. В табл. 3 са дадени типични свръхпроводящи материали и техните температури на преход.

Табл. 3 Критични температури на прехода T_c на свръхпроводящи материали [103,9,119,28,29]

T_c , [K]	Свръхпроводник	Клас
4.2	Hg	Метални нискотемпературни свръхпроводници
9.2	Nb	
20	<i>Температура на течния водород</i>	
26	LaFeAs(O,F)	Свръхпроводници на основата на желязо
41	CeFeAs(O,F)	
55	SmFeAs(O,F)	
77	<i>Температура на течния азот</i>	
90	YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (YBCO)	Свръхпроводници на основата на медни оксиди
94	GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ (GdBCO)	
205	H ₃ S	Свръхпроводници при големи налягания (>100GPa)

Още от откриването на свръхпроводимостта над 77 K на високотемпературни свръхпроводници (HTS), са разработени изследвани няколко техники за производство на проводници. За да се постигнат по-високи критични токове I_c , по-високи магнитни полета, структурно и механично устойчиви проводници, както и потенциал за евтино производство, е разработено второ поколение (2G) технология за производство на композитен проводник, основана на отлагане на тънък свръхпроводящ слой. HTS-2G лентов проводник се състои от стоманена неръждаема подложка, която е електрополирана и почистена. Върху нея са отложени няколко междинни буферни слоя, които да позволят технологично да се отложи свръхпроводящия слой, както и да осигурят необходимата дифузия при процеса на отлагане. Буферните слоеве се отлагат чрез разпрашаване. Върху тях се отлага свръхпроводящия слой, който обикновено е редкоземно съединение на меден оксид (Rare Earth Barium Copper Oxide–(RE)BCO). Това се постига чрез химическо отлагане. Свръхпроводящият слой е с кристална структура и е запечатан със слой сребро Ag с помощта на цилиндрично магнетронно разпръскване. Този сребърен слой защитава (RE)BCO филма, като същевременно осигурява добър електрически контакт [16,110]. На фигура 1.11 е дадена примерна архитектура на HTS-2G свръхпроводящ проводник. Високотемпературните свръхпроводящи проводници HTS-2G са неидеални свръхпроводници от II род. Това предполага, че преходът от свръхпроводящо състояние до стайна температура $T=293\text{K}$ отнема известно време, изпитвайки преход към смесено състояние, като магнитното поле не прониква напълно в свръхпроводника



Фиг. 1.11 Архитектура на лентов свръхпроводник HTS-2G [110].

1.2 Приложения на свръхпроводимостта

Благодарение на уникалните свойства на свръхпроводящите материали, те намират приложения в редица сфери на индустрията, медицината и енергетиката. Основното приложение на свръхпроводимостта е в областта на нискотемпературните свръхпроводници, което е ограничено и специфично приложение [29,129]. Те са използвани често за постигане на високи магнитни полета в областта на физиката и в медицината за ядрено-магнитни резонансни системи за диагностика. Напоследък, свръхпроводниците постигнаха по-широки приложения в енергетиката и индустрията, след откриването високотемпературната свръхпроводимост и създаването на нови проводници. Високотемпературната свръхпроводимост намира приложение за производство на различни електротехнически устройства в енергетиката:

- Силови кабели;
- Трансформатори;
- Двигатели и генератори;
- Токоограничители;
- Системи за съхранение на енергия и др.

В индустрията, високотемпературната свръхпроводимост намира приложение главно за изработване на сензори, електромагнити за задвижване, системи за транспорт и медицинска апаратура.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРАНЕ НА СВРЪХПРОВОДИМИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ

Тази глава е посветена на основните формулировки на математичната физика, използвани при създаването на компютърните модели в дисертацията. Моделирани са електромагнитни, флуидни и топлинни полета.

Изградени са теоретични модели на двумерни (2D) и тримерни (3D) електромагнитни, топлинни и флуидни полета на изследваните електрически апарати като са формулирани смесени задачи за изследване на полета, процеси и явления при свръхпроводими електромагнитни системи.

При моделиране и изчисляване на електромагнитните характеристики на изследваните свръхпроводими електрически апарати е използван метод с крайни елементи (МКЕ) [1-3,90,104], който е подробно е описан в инженерната и научна литература [7,26,86,95,101]. За реализация на приложения МКЕ са използвани софтуерни продукти за моделиране на процеси COMSOL [13] и ANSYS-MAXWELL [6].

1. Моделиране на електромагнитно поле на свръхпроводими електрически апарати

При моделиране на 2D електромагнитни задачи за свръхпроводящо приложение в криогенни температури в течен азот е използвана \mathbf{A} - V формулировка [1,3,104]:

$$(2.5) \quad \nabla^2 \mathbf{A} + \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \gamma \nabla V = -\mu_0 \mathbf{J}$$

където \mathbf{A} е магнитния вектор потенциал, V е скаларния електрически потенциал, μ_0 е магнитната проницаемост на вакуум ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$), γ е електрическата проводимост на материала и \mathbf{J} е токовата плътност на източника.

При моделиране на 3D електромагнитни задачи за свръхпроводящо приложение в криогенни температури в течен азот е използвана следната \mathbf{T} - Ω формулировка [1,3,90,104].

$$(2.7) \quad \nabla \frac{1}{\gamma} \mathbf{T} + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H} + \mathbf{T} - \nabla \Omega) = \mathbf{0};$$

$$(2.8) \quad \nabla \mu (\mathbf{H} + \mathbf{T} - \nabla \Omega) = \mathbf{0},$$

където Ω е магнитния скаларен потенциал във всеки възел определен в цялата област на решението, \mathbf{T} е електрическият вектор потенциал, определен само в регионите, които са електропроводими. γ , μ , и \mathbf{H} са електрическата проводимост на материала, магнитната проницаемост на материала и интензитета на магнитното поле.

2. Топлинно моделиране на свръхпроводими електрически апарати

Основен етап от проектирането и изследването на свръхпроводящи електрически устройства е моделирането на топлинни и флуидни полета. При изготвяне на моделите за свръхпроводими електротехнически устройства, работещи в криогенни температури в течен азот са решавани смесени задачи за топлинни и флуидни полета.

Флуидното поле, създадено от течния азот, който се използва за охлаждане на свръхпроводящите електрически апарати, се дефинира с уравнението на Навие-Стокс [2,3, 6,13]:

$$(2.9) \quad \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \nabla [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F},$$

където ρ е плътността на флуида, \mathbf{v} е скоростта на флуида, \mathbf{I} матрица, съдържаща идентификационните коефициенти, p е налягане, \mathbf{F} е обемна сила, действаща на средата от гравитацията N/m^3 и \mathbf{K} е кинематичния вискозитет, за който:

$$(2.10) \quad \mathbf{K} = \mu(\nabla\mathbf{v} + (\nabla\mathbf{v})^T),$$

където μ е коефициент на динамичния вискозитет, който зависи от температурата.

Топлинните процеси във флуидните зони се описват чрез уравнението [2,6,13]:

$$(2.12) \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}$$

където ρ плътността на флуида, C_p е специфичния топлинен капацитет на течния азот, \mathbf{q} е конвекцията, T е температурата, Q - източник на топлина, Q_{vd} - източник на топлина от вискозно триене и Q_p - източник на топлина зададен в локална зона или точка.

Конвекцията-топлопренасянето от твърдо тяло към флуид се определя от уравнението [2,6,13]

$$(2.13) \quad \mathbf{q} = -k \nabla T$$

където k е коефициент на топлоотдаване чрез конвекция от повърхността на твърдото тяло към флуида.

Топлопроводимостта в областите, които са в твърдо агрегатно състояние се описва от уравнението [2,6,13,69]

$$(2.14) \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q,$$

където ρ е плътност на материала kg/m^3 , λ е коефициент на топлопроводимост W/mK , C_p е специфичен топлинен капацитет, q е обемна плътност на източниците на топлина.

Когато се моделира движение на флуид в електротехническо устройство с подвижни части, които са в твърдо агрегатно състояние (например ротационна система с ротор, статор и охлаждащ флуид), задачата за разпределение на топлинното и флуидно поле се свежда до решаване на енергийни уравнения. Във флуидните зони се решава уравнението [2,6,13]

$$(2.15) \quad \frac{d}{dt}(\rho \mathbf{E}_t) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho \mathbf{E}_t + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}) + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v})$$

където k_{eff} е коефициент на ефективната топлопроводимост ($k+k_i$, където k_i е коефициент на топлопроводимост, определен от модела на турбуленция, който се използва), \mathbf{J} е дифузионният поток, ρ е плътността на флуида, p е налягане, T е температурата, $\bar{\tau}_{eff}$ е тензор на напрежението \mathbf{v} е скоростта на флуида. Енергията \mathbf{E}_t на единица маса се дефинира от [2,6,13]

В зоните, които се намират в твърдо агрегатно състояние, уравнението за пренос на енергия има следната форма [2,6,13]

$$(2.17) \quad \frac{d}{dt}(\rho h) + \nabla \cdot (\mathbf{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h$$

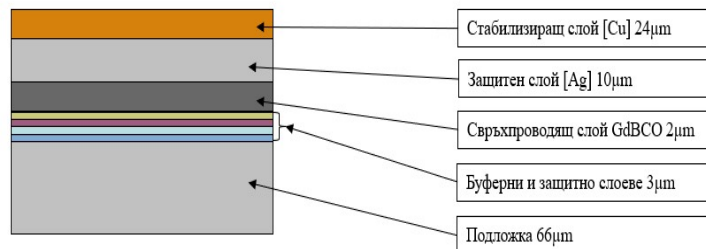
където ρ плътността на материала, k е коефициент на конвекция, T е температурата и S_h източник на топлина.

ГЛАВА 3. ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИ НА СВРЪХПРОВОДИМИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ ПРИ КРИОГЕННИ ТЕМПЕРАТУРИ В ТЕЧЕН АЗОТ

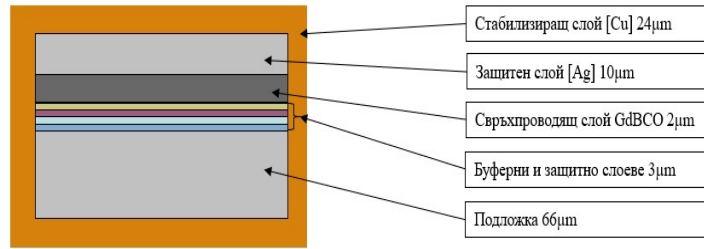
В тази глава са разгледани четири конструкции на лентови свръхпроводящи проводници от второ поколение. Създадени са заместващи електрически схеми за лентови свръхпроводници от второ поколение. Създадени са 2D и 3D компютърни модели за изследваните типове проводници. Получени са резултати за разпределението на магнитното поле, матрицата на индуктивностите, както и са пресметнати импедансите и техните еквивалентни загуби. Използваните HTS-2G лентови свръхпроводници в дисертацията са предоставени от водещи фирми производители-Fujikura, Япония и SuperOx, Русия.

1. Свръхпроводими лентови проводници от второ поколение

Различават се два типа архитектури на свръхпроводници HTS-2G. Проводници със стабилизиращ слой, който е повърхностно разположен, обичайно се използва медна лента (Cu) фиг. 3.1 и проводници, при които стабилизиращия слой обгръща и капсулова всички слоеве и също е изработен от мед, фиг. 3.2. Всички архитектури се характеризират с подложка, върху която се отлагат няколко междинни и защитни слоеве. Дебелината и материала на използваната подложка варира в зависимост от производителите, най-често тя се изработва от неръждаема стомана (Hastelloy), а дебелината и е оразмерена за конкретния тип проводник. Буферните слоеве са с обща дебелина от 2 μm до 3 μm в зависимост от вида свръхпроводящия слой, който се отлага върху тях. Тяхната функция е да осигурят технологична възможност да се отложи HTS слоя. Свръхпроводящият слой е с обща дебелина от 2 μm до 3 μm в зависимост от използвания материал. Върху него се отлага благороден метал, най-често сребро (Ag), с обща дебелина от 8 μm до 10 μm . Функцията на благородния метал е да предпазва свръхпроводящия слой от разрушаване и да осигури необходимата висока проводимост между повърхностния слой и свръхпроводника. В свръхпроводящо състояние при достигната критична температура на фазовия преход $T < T_c$, работния слой става свръхпроводящия материал [34, 36]. Стабилизиращият слой се отлага последен, най-често се използва мед. Неговата функция е да осигури необходимата електрическа проводимост, да предпази слоя с благороден метал и да стабилизира конструкцията. Дебелината на стабилизиращия слой варира в зависимост от технологията, която използват производителите от 18 μm до 26 μm . В топло състояние при $T > T_c$, електрическите параметри на свръхпроводящия лентов проводник се определя изцяло от електрическите характеристики на използваните материали в архитектурата [34, 36]. На фиг. 3.1 и фиг. 3.2 са показани две от най-често срещаните архитектури на свръхпроводящи лентови проводници-с единичен меден стабилизиращ слой и с капсуловащ меден стабилизиращ слой.



Фиг. 3.1 Архитектура на HTS единичен повърхностен стабилизиращ слой.



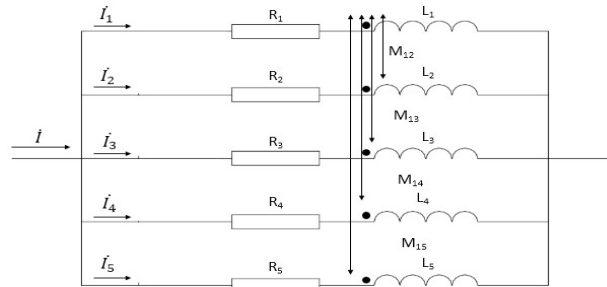
Фиг. 3.2 Архитектура на HTS с капсуловащ стабилизиращ слой.

При изработване на прототипи, представени в последващите глави на дисертацията, са използвани свръхпроводници с архитектура с капсуловащ стабилизиращ меден слой. Използвани са четири различни типа HTS-2G лентови проводници с капсуловащ слой при изработката на свръхпроводящи електромагнитни хибридни системи от намотки.

2. Електромагнитни характеристики и модели на свръхпроводими електрически апарати

2.1 Анализ на индуктивността на свръхпроводящ лентов проводник от втори род

Създадена е заместваща схема на HTS-2G лентов проводник. На фиг. 3.6 е показаната опростената заместваща електрическа схема на свръхпроводящ лентов проводник от втори род в топло състояние $T > T_c$.



Фиг. 3.6 Опростена заместваща схема на свръхпроводящ лентов проводник.

За опростената заместваща схема еквивалентният импеданс на един слой на веригата се определя по формула 3.1 [7,87,115,134]

$$(3.1) \quad \dot{Z}_i = R_i + j\omega(L_i \pm M_{ij})$$

където \dot{Z}_i е импеданса на i -ия слой на веригата, R_i е съпротивлението на слоя, L_i е собствена индуктивност и M_{ij} е взаимна индуктивност между паралелните клонове.

Еквивалентният пад на напрежение може да се запише в матричен вид като 3.3 [7,87,115,134]

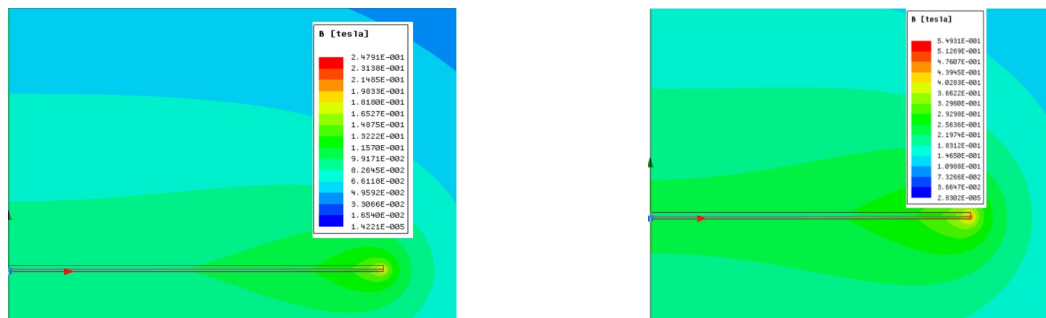
$$(3.3) \quad \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{51} & \dots & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_5 \end{bmatrix}^T$$

Уравнение 3.3 може да се запише и във вид, в който импедансът е представен от матриците на индуктивностите и съпротивлението

$$(3.4) \quad \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_5 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_5 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{11} & \dots & M_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{51} & \dots & L_{55} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_5 \end{bmatrix}^T$$

В студено състояние $T < T_c$, когато свръхпроводникът премине в свръхпроводящ режим и съпротивлението на HTS отсъства, в определянето на импеданса в този слой ще участва само индуктивността. В свръхпроводящо състояние пълният импеданс Z_i зависи от взаимните и собствени индуктивности на HTS-2G лентовия проводник, както и от неговата архитектура, въпреки отсъствието на съпротивление [A7, A8].

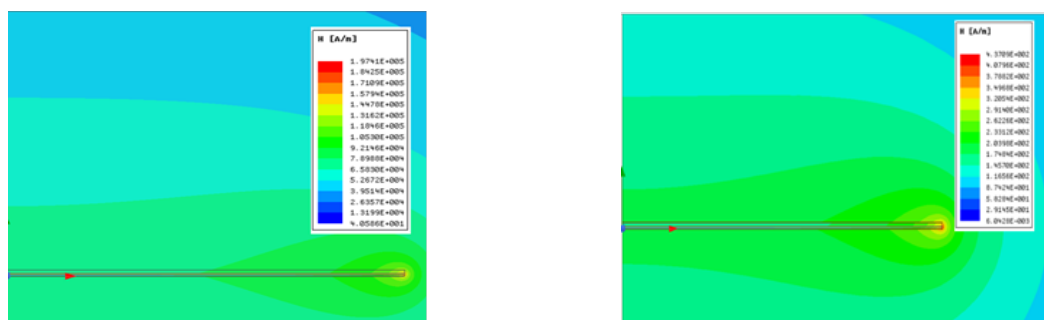
На фиг. 3.9 е показана изчислената индукция B, T на създаденото резултантно магнитно поле за двата вида моделирани архитектури при $I=450A$.



а) свръхпроводник с единичен стабилизиращ слой 12-30Ag-24Cu-60NPI б) свръхпроводник с капсуловащ слой 12-30Ag-24Cu-60NPI

Фиг. 3.9 Индукция на магнитното поле в моделите на проводниците.

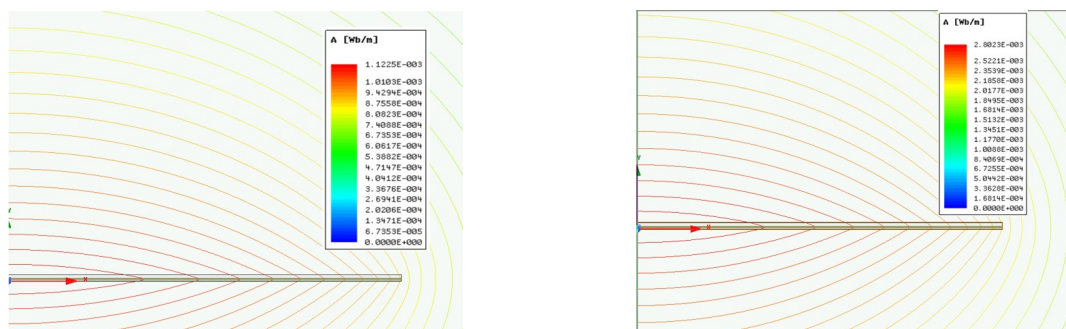
На фиг. 3.10 е показан изчисления интензитет $H, A/m$ на създаденото резултантно поле за двата вида изследвани архитектури при $I=450A$.



а) свръхпроводник с единичен стабилизиращ слой 12-30Ag-24Cu-60NPI б) свръхпроводник с капсуловащ слой 12-30Ag-24Cu-60NPI

Фиг. 3.10 Интензитет на магнитното поле в моделите на проводниците.

На фиг. 3.11 са показани магнитните силови линии за вектор потенциал A , изчислен за половината от геометрията на моделираните проводници.



а) свръхпроводник с единичен стабилизиращ слой 12-30AG-24CU-60NPI б) свръхпроводник с капсуловащ стабилизиращ слой 12-30Ag-24Cu-60NPI

Фиг. 3.11 Визуализация на екипотенциални силови линии за вектор потенциал на двете моделирани конструкции.

В табл. 3.5 и 3.6 са дадени изчислените матрици на собствени L_i и взаимни M_{ij} индуктивности за двата типа изследвани архитектури. Всички получени стойности са за дължина на проводника от $l=1000mm$. По главния диагонал на матрицата се получават собствените индуктивности L_i .

Табл. 3.5 Собствени L_i и взаимни M_{ij} индуктивности за лентов свръхпроводник с капсуловащ стабилизиращ слой 12-30Ag-24Cu-60Н

	1 слой	2 слой	3 слой	4 слой	5 слой
1 слой	$L_{11}=354.74, nH$	$M_{12}=355.67, nH$	$M_{13}=355.67, nH$	$M_{14}=355.67, nH$	$M_{15}=355.67, nH$
2 слой	$M_{21}=355.68, nH$	$L_{22}=359.04, nH$	$M_{23}=358.57, nH$	$M_{24}=358.26, nH$	$M_{25}=358.13, nH$
3 слой	$M_{31}=355.67, nH$	$M_{32}=358.57, nH$	$L_{33}=359.29, nH$	$M_{34}=359.15, nH$	$M_{35}=359.02, nH$
4 слой	$M_{41}=355.67, nH$	$M_{42}=358.26, nH$	$M_{43}=359.15, nH$	$L_{44}=359.42, nH$	$M_{45}=359.33, nH$
5 слой	$M_{51}=355.67, nH$	$M_{52}=358.13, nH$	$M_{53}=359.02, nH$	$M_{54}=359.33, nH$	$L_{55}=359.41, nH$

Табл. 3.6 Собствени L_i и взаимни M_{ij} индуктивности за лентов свръхпроводник с единичен стабилизиращ слой 12-30Ag-24Cu-60НPI.

	1 слой	2 слой	3 слой	4 слой
1 слой	$L_{11}=358.96, nH$	$M_{12}=358.49, nH$	$M_{13}=358.18, nH$	$M_{14}=358.05, nH$
2 слой	$M_{21}=358.49, nH$	$L_{22}=359.2, nH$	$M_{23}=359.06, nH$	$M_{24}=358.93, nH$
3 слой	$M_{31}=358.18, nH$	$M_{32}=359.06, nH$	$L_{33}=359.34, nH$	$M_{34}=359.24, nH$
4 слой	$M_{41}=358.05, nH$	$M_{42}=358.93, nH$	$M_{43}=359.24, nH$	$L_{44}=359.32, nH$

Изчислен е импедансът Z за максималната собствена индуктивност и максималната взаимна индуктивност на моделираните свръхпроводящи лентови проводници. Резултатите са нанесени в табл. 3.7

Табл. 3.7 Импеданс при максимални собствени L_i и взаимни M_{ij} индуктивности

Тип лентов свръхпроводник	Импеданс Z за собствените индуктивности	Импеданс Z за взаимните индуктивности
	$\mu\Omega$	$\mu\Omega$
12-30Ag-24Cu-60НPI	112.833	338.015
12-30Ag-24Cu-60Н	112.858	449.861

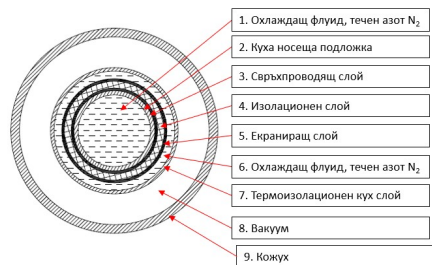
ГЛАВА 4. ТОПЛИНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИ НА СВРЪХПРОВОДЯЩИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ ПРИ КРИОГЕННИ АЗОТНИ ТЕМПЕРАТУРИ

В главата са разгледани два вида флуидно охлаждане с течен азот на свръхпроводящи устройство: статично свръхпроводящо устройство (силов кабел) и ротационно устройство, съставено от два ротора и статор, което се охлажда с флуид.

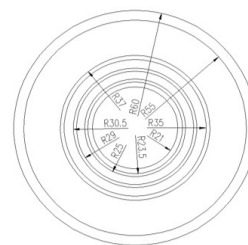
1. Моделиране на флуидно охлаждане на статични свръхпроводящи електрически устройства

Представител на статични електрически свръхпроводящи устройства е силов свръхпроводящ кабел. Разработен топлинен модел на свръхпроводящ силов кабел с двуканална система за охлаждане с принудителна циркулация. Създаден е двумерен модел, за да се изследват топлинните потоци, възникващи по време на преходен-установен и статичен-динамичен режим. За моделирането е използван софтуерен продукт

COMSOL и МКЕ [13]. Решени са свързани топлинна и флуидна задачи. Използвани са флуидни и топлинни уравнения, които са подробно описани в глава втора т.2. уравнения 2.9-2.14 На фиг. 4.4 е показана геометрията на моделирания свръхпроводящ кабел и геометричните размери.



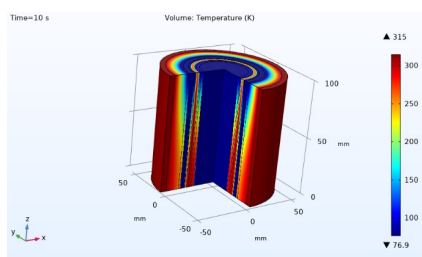
а) Сечение на HTS силов кабел



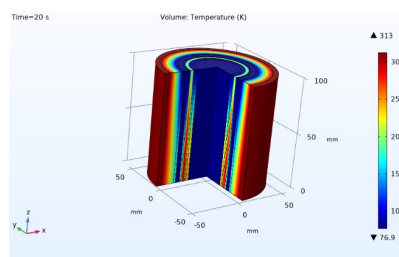
б) Геометрични размери на HTS кабел

Фиг. 4.4 Конструкция и размери на HTS силов кабел.

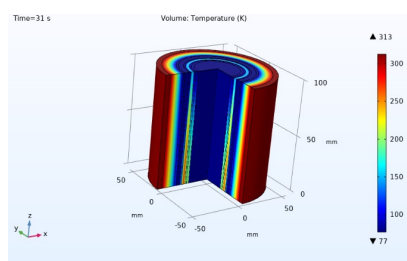
Решени са топлинна и флуидна времезависими задачи. Дължината на създадения модел е $l=100\text{mm}$. На фиг. 4.6 са показани получените резултати за разпределение на температурата във вътрешността на моделирания свръхпроводящ кабел през интервал от $t=10\text{s}$.



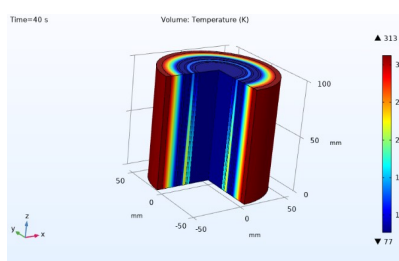
а) $t=10\text{s}$



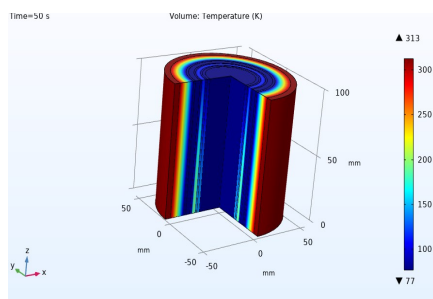
б) $t=20\text{s}$



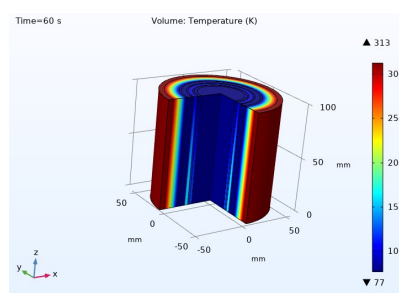
в) $t=30\text{s}$



г) $t=40\text{s}$



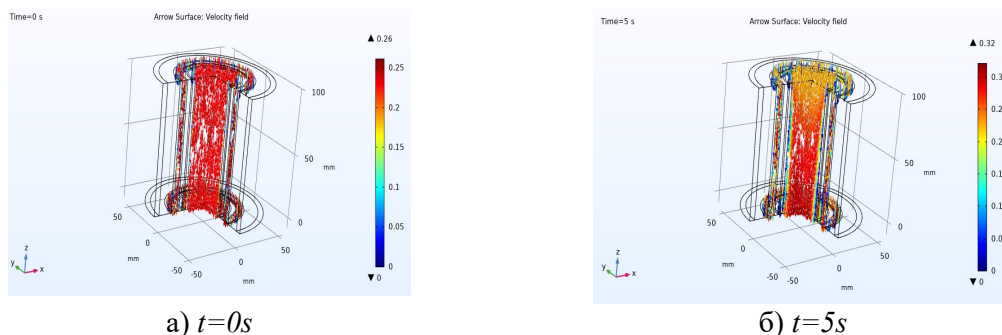
д) $t=50\text{s}$



е) $t=60\text{s}$

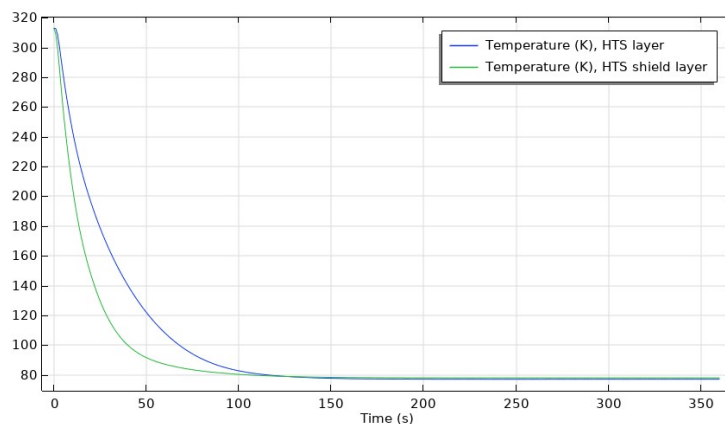
Фиг. 4.6 Разпределение на температурата във свръхпроводящ силов кабел по време на първоначално охлаждане $T=f(t)$.

На фиг. 4.8 е показано разпределението на векторите на скоростта на охлаждащия флуид, течен азот в момента $t=0s$ и $t=5s$. Въпреки първоначалната зададена еднаква скорост във охлаждащите канали, скоростта на флуида в по-тесните канали намалява, което допринася по-добрия топлообмен между екраниращия свръхпроводник и течния азот.



Фиг. 4.8 Скорост на охлаждащия флуид на HTS кабел.

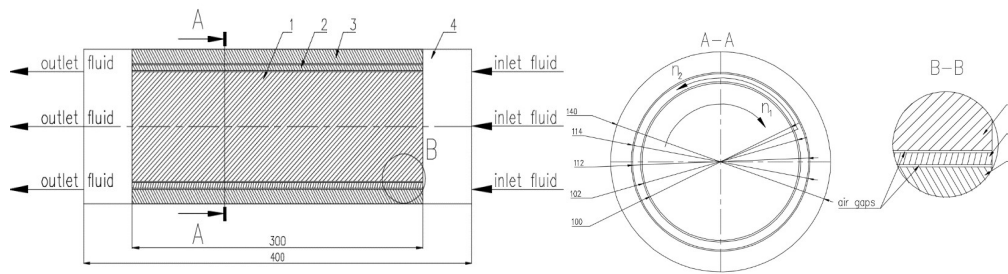
Изчислена е температурата на свръхпроводящите слоеве – HTS екраниращ слой и основния работен HTS слой. На фиг. 4.7 е показано разпределение на температурата на двата слоя във функция от времето докато се установи преходния процес. Екраниращия слой достига по-бързо критичната температура $T_c = 77\text{ K}$ поради по-голямата контактуваща повърхност, докато свръхпроводящия слой достига по-бавно установена температура поради влошения топлообмен т.е той не контактува директно с флуида, а със подложката, скелета, върху който е навит. Установяване на топлинния режим ще зависи от дължината на силовия кабел и скоростта на флуидния поток



Фиг. 4.7 Температурата $T=f(t)$ на свръхпроводящите слоеве.

2. Моделиране на флуидно охлаждане на динамични свръхпроводящи електрически устройства

Създаден и разгледан е опростен модел на ротационно устройство, състоящо се от два ротора, статор и охлаждащи се с флуид. Загубите, които се отделят в тези устройства, създават топлинни проблеми, които могат да бъдат решени чрез замяната на охлаждащия флуид с течен азот [20,21,37,40,124]. Използването на подобрени охладителни системи повишава ефективността на електрическите устройства. Внедряването на свръхпроводящи материали в такива устройства помага да се намалят електрическите загуби, поради отсъствието на електрическо съпротивление [17,71,88]. Съществуват разработени различни концепции за оразмеряване и изчисляване на охладителни системи за такива електрически устройства като: аналитични модели, числени методи, параметрични модели и те са достъпни в литературата [5,17,44,45,71,88].



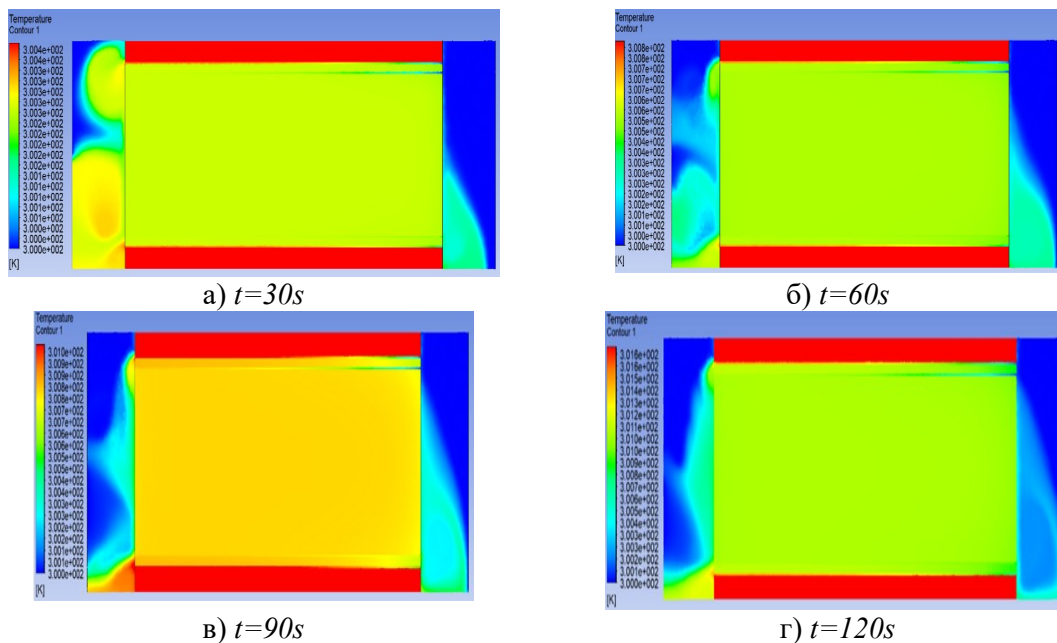
Фиг. 4.9 Модел на устройство с два ротора и статор и размери.

Позиция 1 е вътрешен ротор, който извършва ротационно движение с ъглова скорост $n_1=117$ rpm, позиция 2 е среден ротор, който извършва ротационно движение с ъглова скорост $n_2=27$ rpm, позиция 3 е статор $n_3=0$ rpm. Посоката на ротация е показана на фиг. 4.9. Всички ротори и статор са дефинирани с характеристиките на стомана. За входящ несвиваем флуид е избран въздух със скорост $v=0.2$ m/s и температура $T=300$ K. На всички ротори и статор са зададени плътности на мощността. В табл. 4.4 са дадени мощността, обема и скоростта на всички стоманени компоненти.

Табл. 4.4 Мощност, обем и скорост на ротационен модел

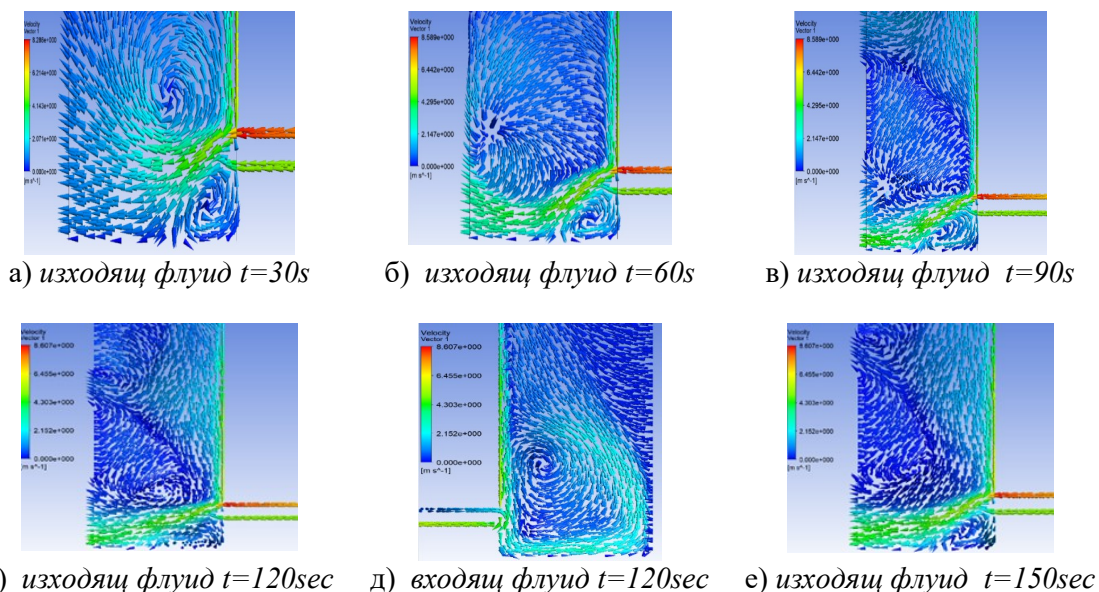
	Плътност на мощността $S_n, W/m^3$	Обем V, m^3	Ъглова скорост $n,$ rpm
1. Вътрешен ротор	36 005,43	2356×10^{-6}	177
2. Среден ротор	36 005,43	504×10^{-6}	-27
3. Статор	36 005,43	1560×10^{-6}	0

Изследвани са разпределението на температурата в обема на създадения модел. Изчислена е скоростта и топлинното поле на охлаждащия флуид в преходен режим. На фиг.4.13 е показано разпределението на температурата в загряващите се ротори, флуид и охлаждателни канали.



Фиг. 4.13 Разпределение температурата на система с флуидно охлаждане $T=f(t)$.

На фиг.4.14 са показани векторите на скоростта на охлаждащия флуид. Векторите на скоростта преминават през охладителните канали и излизайки от тях създават турбулентно движение.



Фиг. 4.14 Вектори на скоростта на изхода и входа на охладителните канали.

В табл. 4.4 са дадени изчислените прегрявания на двата ротора и статора. Изчисленото максимално прегряване на статора за изследвания период от време е $\theta = 12.858 K$

Табл. 4.4 Изчислени максимални прегрявания θ на ротори и статор

Максимални прегрявания		
Статор	Среден ротор	Вътрешен ротор
$\theta=12.858K$	$\theta=10.141K$	$\theta=9.507K$

ГЛАВА 5. ИЗОЛАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СВРЪХПРОВОДЯЩИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АПАРАТИ ПРИ КРИОГЕННИ АЗОТНИ ТЕМПЕРАТУРИ

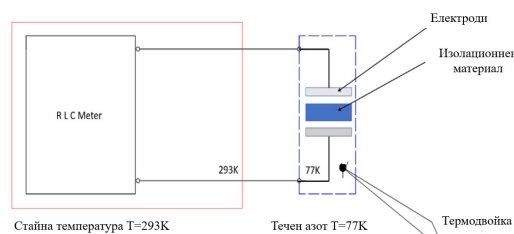
В главата са разгледани и изследвани при криогенни температури в течен азот различни електроизолационни материали, които типично се използват в електрическите апарати. Изследвани са и топлоизолационни 3D принтирани конструкции за криогенно приложение с различни запълвания на стените.

1. Електроизолационни композитни материали за криогенни азотни температури

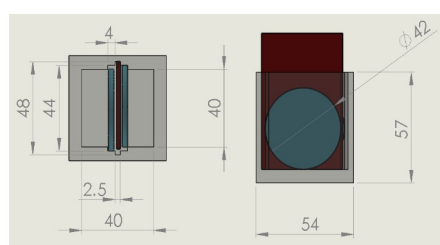
Проведен е опитен експеримент, при който са тествани двадесет и шест композитни материали [78] в топло и студено състояние. Измерени са техните капацитети C и ъгълът θ . От измерения ъгъл са изчислени диелектричната проникваемост на материалите и $tn\delta$ [39,72,114]. Измерените резултати в топло и студено състояние са сравнени.

Схемата на опитна постановка е показана на фиг. 5.1. Експерименталната постановка се състои от RLC анализатор, два електрода и проба от изолационен материал, която поставена между двата електрода, вана с течен азот, в която са потопени електродите и пробата изолационен материал. Ваната за течен азот е реализирана чрез

метод за бързо прототипиране от пластмаса. Изработените електроди са метални с диаметър $d=42mm$ и разстояние между тях от $s=2.5mm$. Два отвода са изведени от центъра на електродите, на които е измерен ъгълът θ и капацитет C с RLC анализатора. На фиг. 5.2 са показани геометричните размери на ваната за течен азот и електродите, а на фиг. 5.3 е показана реализираната опитна постановка.

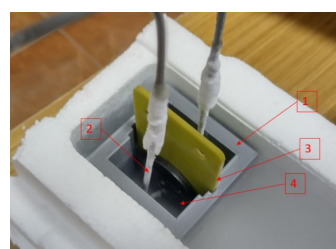


Фиг. 5.1 Схема на опитна постановка за измерване на капацитет C и ъгълът θ .



Фиг. 5.2

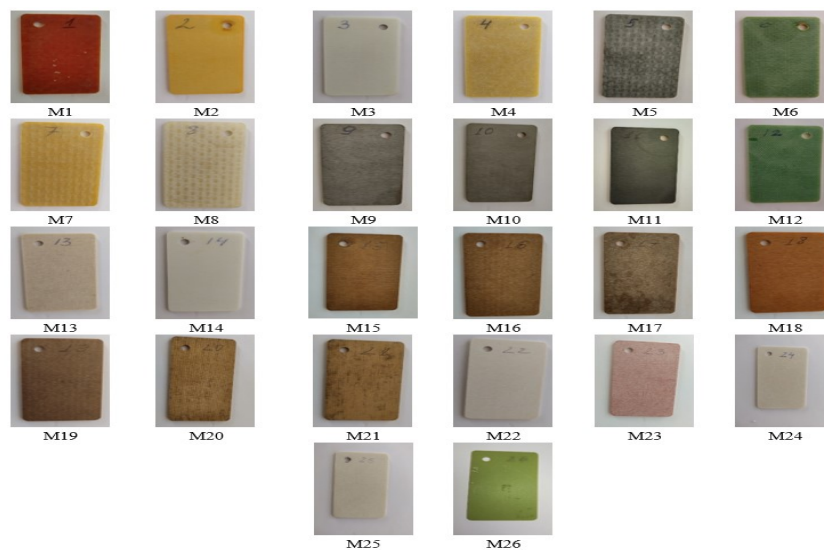
Геометрични размери на ваната за течен азот и плочи.



Фиг. 5.3

Опитна постановка, 1-ваната, 2-плочи, 3-изолационна проба, 4-течен азот.

За експеримента са използвани двадесет и шест различни композитни материали, които се използват в типични конструкции за електрически съоръжения и устройства. Всички изследвани материали са съставени от пропорции смола и други изолационни материали [A2]. Типично се използват различни платове, стъкло, хартия и различни изолационни влакна [78]. Пробите от изолационни материали са плочки, които имат дебелина $s=2.5mm$. На фиг. 5.4 са показани образци на измерените електроизолационни материали



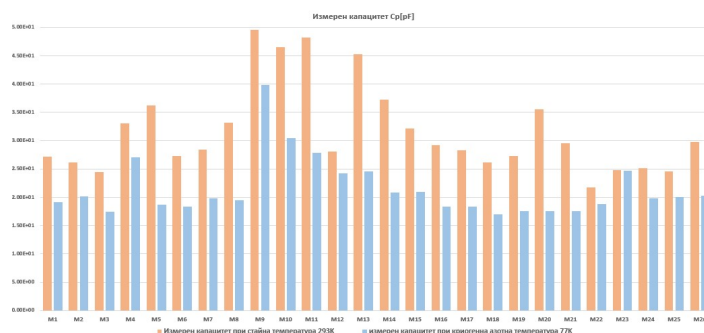
Фиг. 5.4 Образци на изследваните електроизолационни материали.

Измерени са опитни резултати за капацитета C и ъгълът θ . От измерения ъгъл θ са изчислени тангенсите от ъгъла на диелектрични загуби $tan\delta$ за измерените електроизолационни материали. За изчисление на диелектричната проницаемост е използвана формулата за паралелен кондензатор

$$(5.1) \quad C = \epsilon \frac{A}{d}$$

където C е капацитетът на кондензатора, ϵ е диелектричната проницаемост на материала, A е площта на плочите и d е разстоянието между плочите.

На фиг. 5.5 са показани измерените резултати за капацитета C при стайна температура $T=293K$ и след като материалите са охладени в течен азот $T=77K$. Измерените резултати показват намаляване в капацитетите C, pF на електроизолационните материали, когато са поставени в криогенни температури, което води до промяна на електроизолационните им свойства.



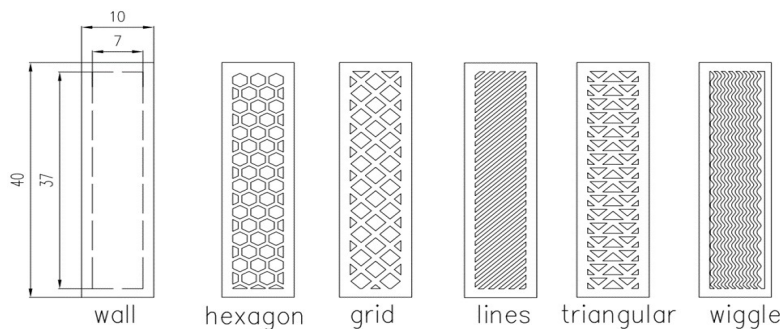
Фиг. 5.5 Капацитет C (pF) на изследваните композитни изолационни материали при $T=293K$ и $T=77K$.

2. Теплоизолационни материали за криогенни азотни температури

Предизвикателствата поставени пред теплоизолационните материали за криогенни азотни температури, в които работят хибридни свръхпроводящи електрически устройства, са от една страна да осигурят добра температурна изолация за да не позволяват големи загуби към околната среда и от друга страна да бъдат механично устойчиви при ниски температури [112]. За топлинната изолация, предназначена за криогенни приложения, околната среда ще бъде прегрята спрямо температурите на течния азот $T=77$ K, което налага необходимостта от добро координиране и оптимизиране на теплоизолационните свойства на материалите [33,43].

Създаден е 2D топлинен модел за изследване на коефициента на топлопроводност при различни видове запълване на стените на полимерен материал, реализиран с 3D принтиране. На фиг. 5.6 са показани размерите на моделираната геометрия и видовете запълване, което е взето предвид в анализа.

В табл. 5.5 са дадени изчислените коефициенти на запълване на геометрията.



Фиг. 5.6

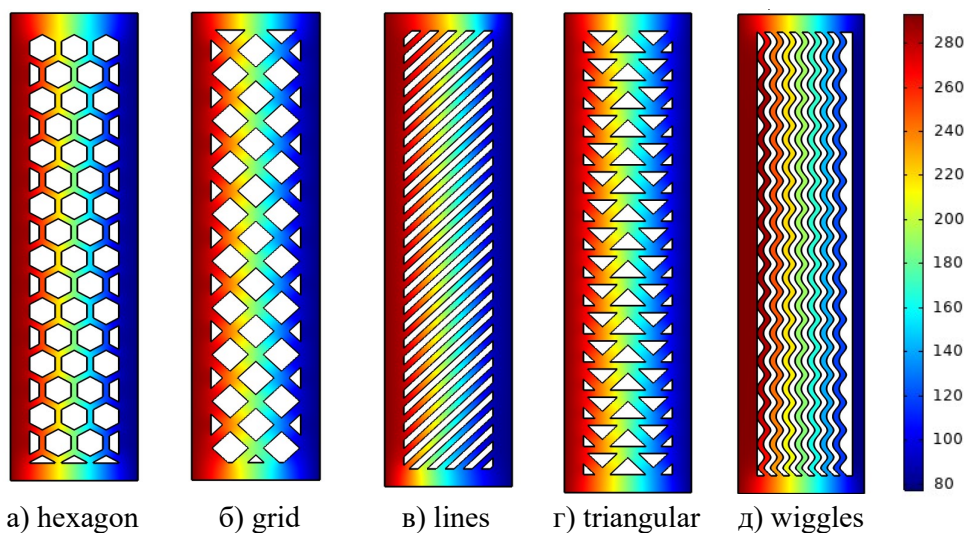
Размери на геометрията и видове запълване.

Предложен е подход за изследване на различни видове запълване при изработване на стените чрез метод за бързо прототипиране 3D FDM принтиране. Коефициентът на топлопроводност е определен със статичен топлинен модел с метода на крайните елементи.

Табл. 5.5 Коефициенти на запълване на стените на изследваните модели

номер	Видове запълване	Коефициент на запълване на стената k_f
1	hexagon	0.71793
2	grid	0.71843
3	lines	0.70638
4	triangular	0.77600
5	wiggle	0.70739

Статичният модел е решен и са изчислени коефициентите на топлопроводност λ . На фиг. 5.8 е показано разпределението на температурата вътре в стените на геометриите при различните запълвания. Отчетено е, че запълването тип „lines” и „wiggles” не разпределят температурата равномерно в стената. При останалите видове запълвания температурата е разпределена равномерно в обема на стените. В табл. 5.6 са дадени изчислените коефициенти на топлопроводимост λ за изследваните модели и видовете запълвания.

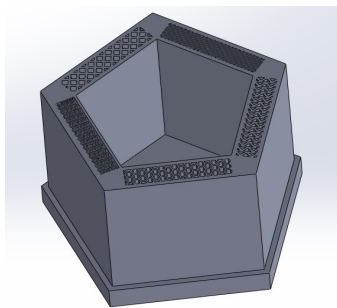


Фиг. 5.8 Разпределение на температурата в стените на изследваните модели.

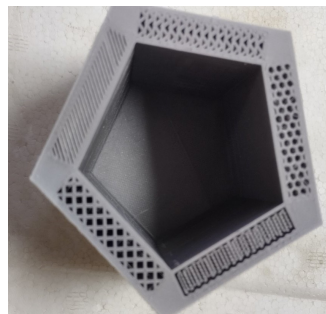
Табл. 5.6 Изчислени коефициенти на топлопроводност

номер	видове запълване	λ [W/m.K]
1	hexagon	0.17391
2	grid	0.17351
3	lines	0.17391
4	triangular	0.14614
5	wiggle	0.17271

Получените резултати са проверени експериментално. Проведен е опит с течен азот и 3D принтиран модел на петогълник, чийто пет страни са изработени с различните видове запълвания. Моделът е изработен като контейнер за да може вътрешността му да се запълни с течен азот. По стените на създадения прототип е измерена температурата. На фиг. 5.9 е показан създадения 3D модел и изработения прототип.



а) 3D модел



б) прототип

Фиг. 5.9 Модел на петогълник със стени с различни видове запълвания.

Създаденият тестови образец, със стени, изработени от различни видове запълвания, е напълнен с течен азот $T=77\text{ K}$. Измерена е температура T в центъра на всяка от стените с калибрирана термодвойка. Резултатите от проведения експеримент са дадени в табл. 5.7. Най-лоши топлоизолационни свойства притежава запълване тип „hexagon”. Въпреки неравномерното разпределение на температурата запълванията тип „lines” и „wiggles” показват най-добри топлоизолационни свойства при проведените опитни измервания.

Табл. 5.7 Измерена температура

номер	видове запълване	Температура $T\text{ K}$
1	hexagon	195
2	grid	192
3	lines	199
4	triangular	190
5	wiggle	205

ГЛАВА 6. ХИБРИДНА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СИСТЕМА ОТ НАМОТКИ ОТ ЛЕНТОВИ СВРЪХПРОВОДНИЦИ ПРИ КРИОГЕННИ АЗОТНИ ТЕМПЕРАТУРИ

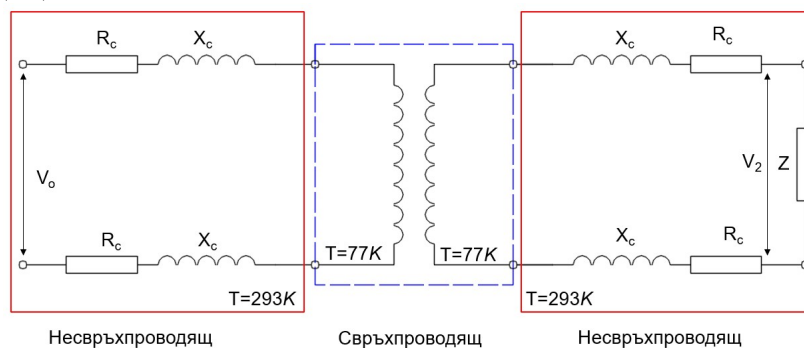
Главата е посветена на създаване и изпитване на различни конструкции на хибридни свръхпроводящи електрически устройства за работа в криогенни азотни температури. Реализирани са модели на електромагнитни свързани намотки, които са захранени с променливо напрежение с различни типове HTS-2G проводници. Предложени са конструктивни решения и съображения при изработка на хибридни свръхпроводящи електромагнитни системи. Използвани са данни и натрупания опит, получени от създадените теоретични и компютърни модели.

1. Хибридна свръхпроводяща система с намотка с лентов HTS проводник от второ поколение и измерване на индуктивността

1.1 Хибридна свръхпроводяща индуктивна система

Хибридна свръхпроводяща индуктивна система се състои от компоненти и устройства, които са претърпели фазов преход $T < T_c$ и се намират в свръхпроводящо състояние, и устройства и компоненти, които не са свръхпроводящи. Хибридността на системата е по отношение на термичните и електрическите свойства. Части от системата работят при криогенни температури и се наричат студени $T=77\text{ K}$, което е температурата на течния азот. Несвръхпроводящите компоненти и части от системата работят при стайни температури $T=293\text{ K}$ и се наричат топли. Хибридната система се състои от две свръхпроводящи намотки, работещи в криогенни температури на течния азот и са електромагнитно свързани. Първичната намотка е захранена с променливо напрежение.

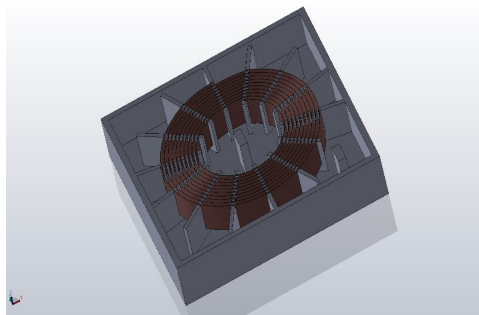
Отчетени са вътрешните електрически съпротивления на измервателните уреди и проводниците. Към вторичната намотка е свързано съпротивление-товар. Всички части на хибридната система, които не са свръхпроводящи се намират извън течния азот и ще работят при стайни температури. На фиг. 6.1 е показана електрическа схема на хибридна свръхпроводяща система.



Фиг. 6.1 Хибридна свръхпроводяща система.

1.2 Характеристики на свръхпроводящи намотки за хибридна индуктивна система

Създадени са два прототипа на свръхпроводящи намотки, използвайки лентови свръхпроводници от второ поколение 12-30Ag-24Cu-60Н и 12-30Ag-24Cu-60Н-PI, които са подробно описани в глава трета т. 3.1 Фиг. 6.2 е показана създадената 3D геометрия и на фиг. 6.3 са показана реализираните прототипи.



Фиг. 6.2

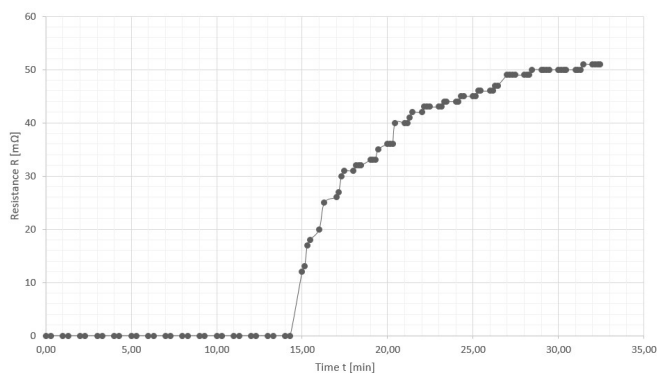
3D модел на свръхпроводяща намотка



Фиг. 6.3

Прототипи на свръхпроводящи намотки с лентови проводници.

На фиг. 6.7 е показана графика на опитно измерено съпротивление $R, m\Omega$ във функция от времето t на намотка 1, която излиза от свръхпроводящо състояние след като е била в среда с течен азот $T=77K$ и е оставена да се затопля от температурата на околната среда $T=293K$. Измерването на съпротивлението е проведено през интервал от време $t=30s$.

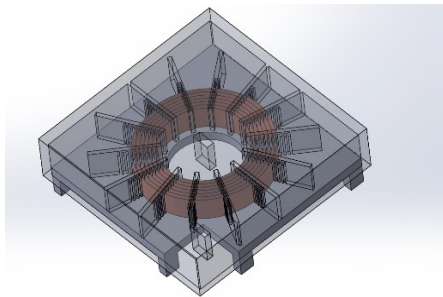


Фиг. 6.7 $R=f(t)$ на свръхпроводяща намотка 1 излизаща от свръхпроводящо състояние.

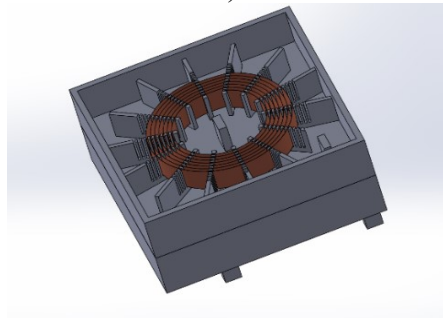
2. Проектиране на хибридна свръхпроводяща система от намотки

Проектирани са четири варианта на свръхпроводяща хибридна електромагнитна система от намотки:

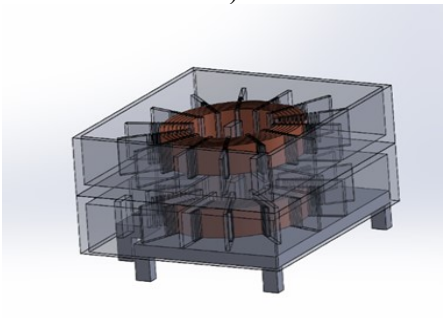
- *Свръхпроводяща система от електромагнитно свързани намотки без магнитопровод* - конструкцията е показана фиг. 6.9
- *Свръхпроводяща система от намотки с магнитопровод* - конструкцията е показана на фиг. 6.10
- *Свръхпроводяща система от намотки с разглобяем магнитопровод* - конструкцията е показана на фиг. 6.11
- *Свръхпроводяща система от намотки с мантиен тип магнитопровод* - конструкцията е показана на фиг. 6.12



а)



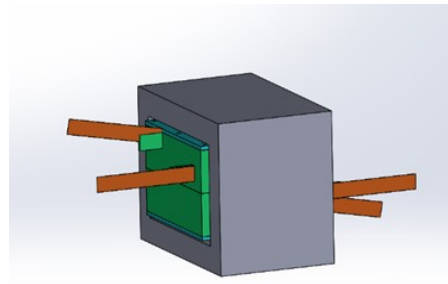
б)



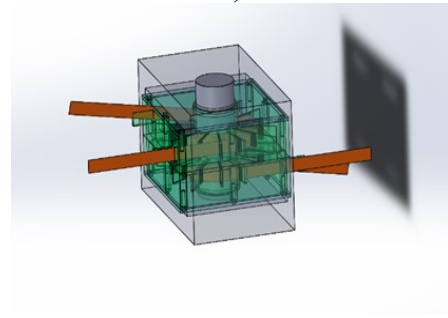
в)

Фиг. 6.9

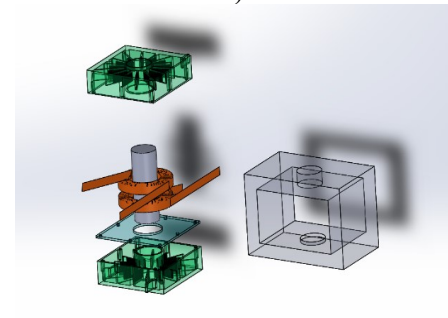
HTS система от намотки без магнитопровод.



а)



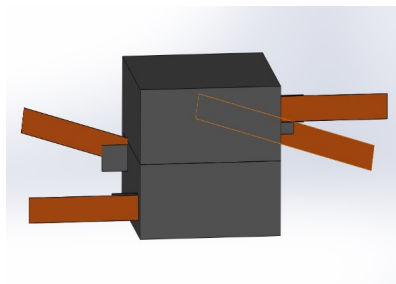
б)



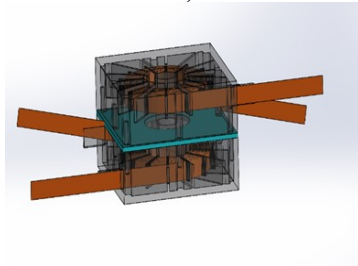
в)

Фиг. 6.10

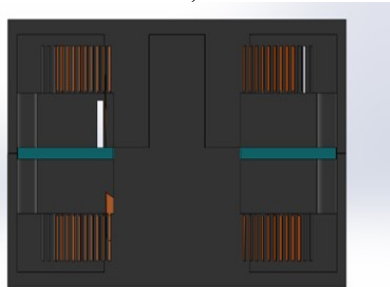
HTS система от намотки с магнитопровод.



а)



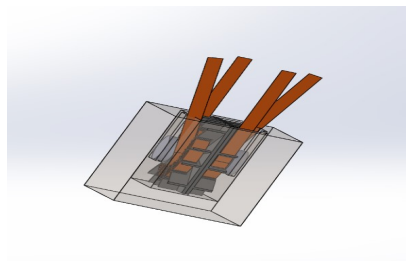
б)



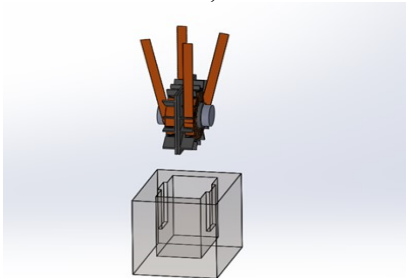
в)

Фиг. 6.11

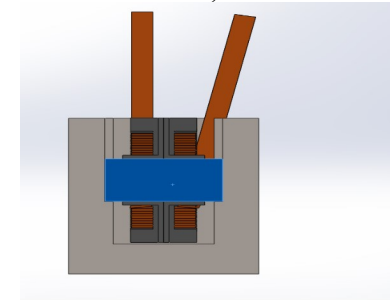
HTS система от намотки с разглобяем магнитопровод.



а)



б)



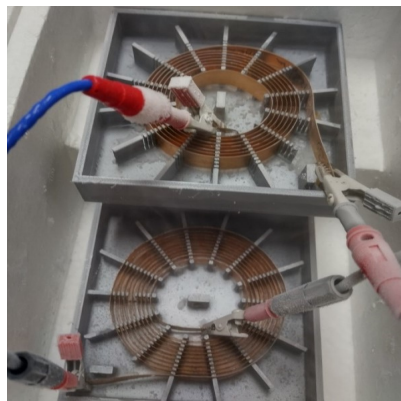
в)

Фиг. 6.12

HTS система от намотки с мантиен тип магнитопровод.

3. Изработване и изпитване на HTS системи от намотки

3.1 Изпитване на HTS система от намотки:



Фиг. 6.14

Опитна постановка с HTS система от индуктивно свързани намотки.

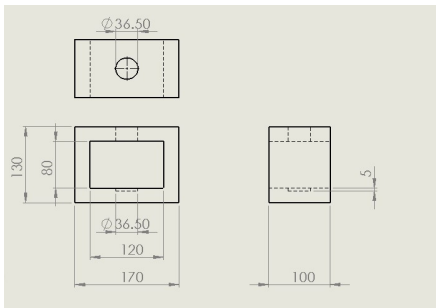
В табл. 6.5 са дадени стойности за измерения ток през първичната намотка I_1 и индуцираното напрежение във вторичната намотка U_2 .

Табл.6.5 Първичен ток I_1 и вторично напрежение U_2 , за свръхпроводяща HTS система без магнитопровод

№	Ток I_1, A	Напрежение U_2, mV
1	10.32	0.420
2	11.03	0.452
3	5.20	0.203
4	7.20	0.273
5	10.40	0.423
6	12.50	0.522
7	15.00	0.636
8	17.50	0.756
9	19.80	0.852

3.2 Изпитване на HTS система от намотки с магнитопровод:

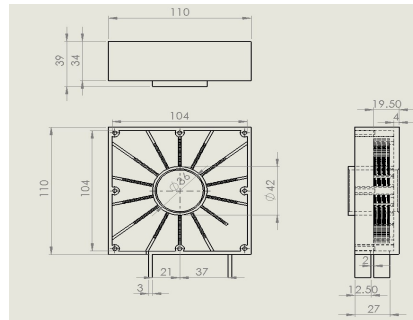
На фиг. 6.15 са показани размери на изработения магнитопровод, а на фиг. 6.16 изработените контейнери с намотки.



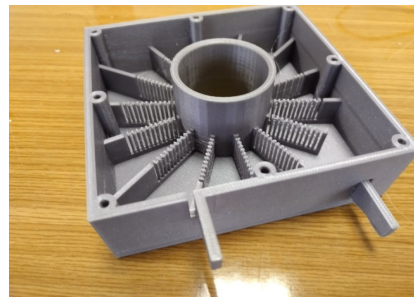
а) размери на магнитопровод



б) магнитопровод



а) размери на контейнери за намотки



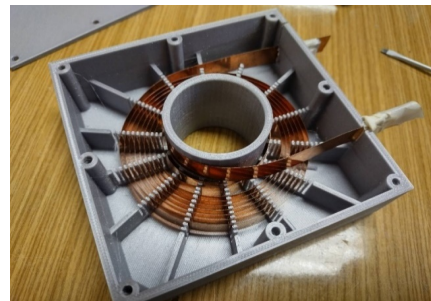
б) изработени контейнери за намотки



в) събран магнитопровод

Фиг. 6.15

Магнитопровод на HTS система.



в) навита намотка в контейнер

Фиг. 6.16

Контейнери на HTS система от намотки.

На фиг. 6.17 са показани снимки от изработения прототип на HTS система от индуктивно свързани намотки с цял магнитопровод. Намотки са плоски, спираловидни и изработени от лентов HTS проводник от второ поколение. Краищата на намотките са укрепени с хартиена лента.

Табл.6.6 Данни за намотки на HTS система цял магнитопровод

Наименование	Навивки	Вътрешен диаметър	Външен диаметър	температура T_c	Свърхпроводник	Разгъната дължина на проводника l
	бр	mm	mm	K	тип	mm
Първична Намотка 1	9.5	45	82	77	HTS wire 12-30Ag-24Cu-60H	1650
Вторична Намотка 2	7.5	45	92	77	HTS wire 12-30Ag-24Cu-60H-PI	1500



а)



б)

Фиг. 6.17 Прототип на HTS система от намотки с магнитопровод.

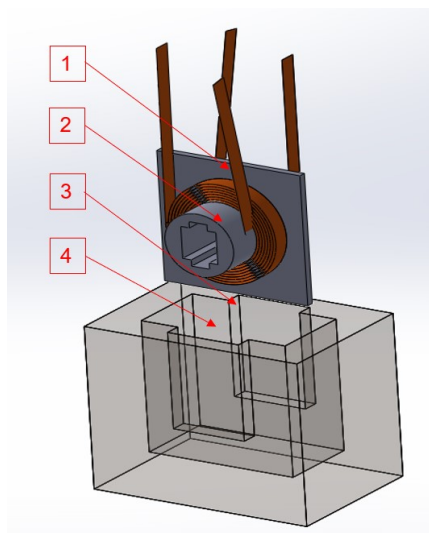
В табл. 6.7 са дадени стойности за измерените: напрежение U_1 и ток през първичната намотка I_1 , и индуцираното напрежение във вторичната намотка U_2 .

Табл.6.7 Първичен ток I_1 и вторично напрежение U_2 за свръхпроводяща HTS система с магнитопровод

№	Напрежение U_1, mV	Ток I_1, A	Напрежение U_2, mV
1	56.00	4.520	2.150
2	48.00	4.160	2.160
3	86.00	7.420	3.560
4	51.00	4.810	2.400
5	116.00	10.500	4.600
6	48.00	4.700	2.290
7	157.00	4.180	2.930

3.3 Изпитване на HTS система от намотки с мантиен тип магнитопровод:

Създаден е мантиен тип магнитопровод, който е 3D принтиран и е изработено ядро за намотките, в което да се постави електротехническа стомана за да се подобри електромагнитната връзка и намали разсейването на магнитния поток. Материалът, от който е изработен прототипът на магнитопровода е слабо магнитен $\mu_r=100\div150$. Магнитопроводът е използван и като контейнер за течния азот. Намотките са навити върху цилиндър, в който се подрежда електротехническа стомана и се използва за ядро [A1,A3]. На фиг. 6.20 са показани 3D модел и скица с размери на създадения прототип.



б) 1-HTS намотки; 2-цилиндър с основа; 3-мантиен магнитопровод, 4-течен азот

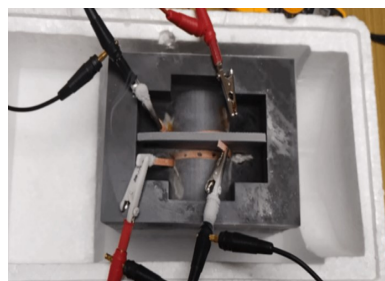
Фиг. 6.20

HTS система от намотки с мантиен тип магнитопровод и размери.

На фиг 6.22 са показани реализираните опитни постановки и прототипи.



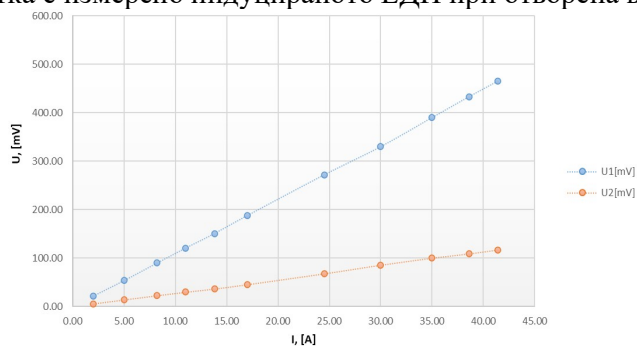
а) HTS Прототип 1



б) HTS Прототип 2

Фиг. 6.22 Прототипи на HTS система от намотки с мантиен тип магнитопровод.

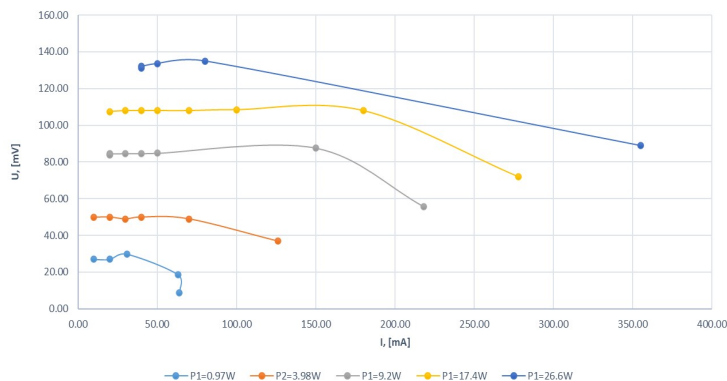
На фиг 6.23 са показани определените характеристики на празен ход, измерени HTS прототип 1. Първичната намотка е захранена с променливо напрежение, а във вторичната намотка е измерено индуцираното ЕДН при отворена вторична верига.



Фиг. 6.23 V-A характеристика на празен ход $U_1=f(I_1)$ и $U_2=f(I_1)$ на прототип 1

Определени са товарни характеристики на изследваните прототипи за HTS системи от намотки с мантиен тип магнитопровод. Захранена е първичната намотка с променливо

напрежение, мощността P_1 е постоянно, а към вторичната е свързано съпротивление R_T с различни стойности. Измерени са първичното U_1 и вторично U_2 напрежението и токовете I_1 и I_2 . Електромагнитната хибридна свръхпроводяща система е охладена с течен азот $T=77K$, а останалата част от електрическата система при стайни температури $T=293K$. На фиг. 6.27 са показани снетите V-A характеристики на вторичната намотка на HTS прототип 1 при различна мощност P_1 на захранване на първичната намотка.



Фиг. 6.27 V-A характеристика на вторичната намотка $U_2=f(I_2)$ при различни стойности на R_T на прототип 1 на HTS система от намотки.

3.4 Изпитване на трансформатор в криогенни температури в течен азот

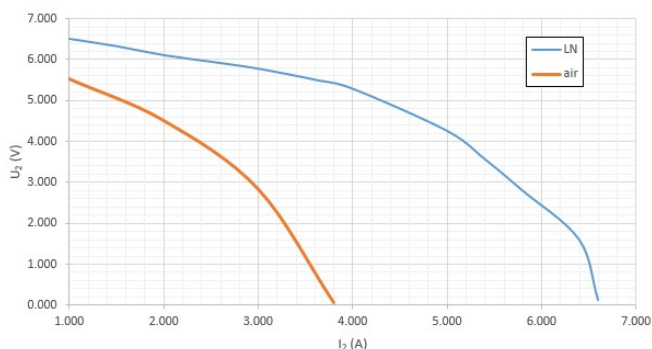
Изпитан е трансформатор $U_1=220V$, $U_2=6-6V$ $I=500mA$ в стайна температура $T=293K$ и в азотни криогенни температури $T=77K$.

На фиг. 6.30 е показана снимка на трансформатора и опитната постановка. Трансформаторът е измерен при стайна температура и след това е злят с течен азот. На фиг. 6.26 са показани определените товарни V-A характеристики



Фиг. 6.30

Трансформатор $U_1=220V$, $U_2=6-6V$ $I=500mA$ охладен в течен азот.

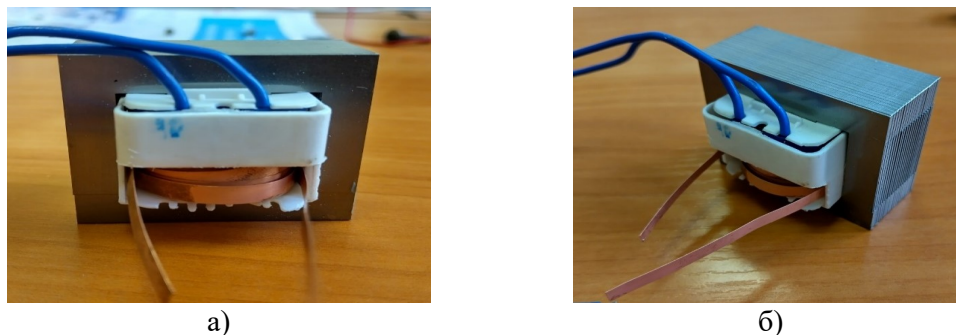


Фиг. 6.31

V-A характеристика на вторичната намотка $U_2=f(I_2)$ на Трансформатор $U_1=220V$, $U_2=6-6V$ $I=500mA$ при стайна температура и охладен в течен азот.

3.5 Създаване и изпитване на HTS хибридна система от намотки

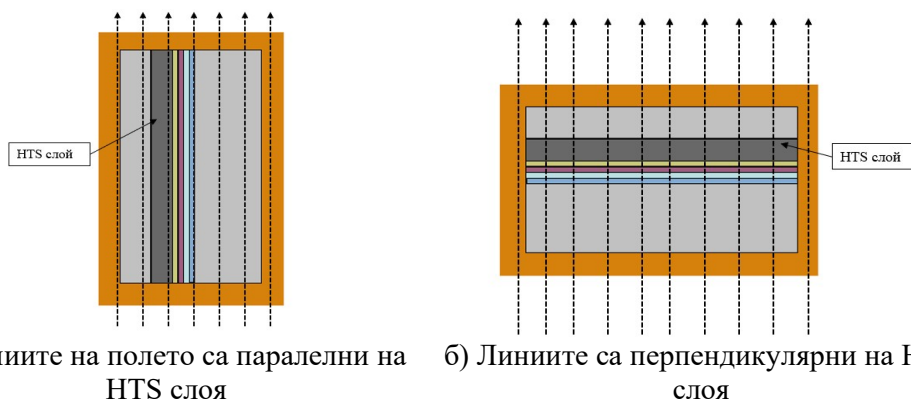
Създадена хибридна система от електромагнитно свързани намотки: едната намотка е изработен от HTS лентов проводник, а другата е изработена от кръгъл меден проводник с диаметър 0.5 мм. Двете намотки са монтирани на магнитопровод, изработен от електротехническа стомана. На фиг. 6.32 са показани снимки на създадената хибридна електромагнитна система .



Фиг. 6.32 Хибридна HTS електромагнитна система.

При създаването на моделите и разработването на решения за изследване на хибридни HTS системи от намотки, както и натрупания опит от проведените експерименти, са обобщени в следните изводи, които представят набор от конструктивни и технологични съображения за проектиране на свръхпроводими хибридни електромагнитни системи:

- 1.1 Свръхпроводящата част и намотки е необходимо да се поддържат непрекъснато в свръхпроводящо състояние $T < T_c$. Това съображение обуславя необходимостта свръхпроводящата част и намотки да бъдат поставени и охладени в контейнер от течен азот LN_2 , който е топлоизолиран от околната среда с подходяща топлинна изолация. Разработени са няколко прототипа на контейнери за свръхпроводящи намотки, които едновременно позволят навиване на лентовия свръхпроводник от второ поколение, достъп до краищата и началата на намотката, издържат механичните натоварвания на свиване на материалите в криогенно температури и топлоизолация от околната среда;
- 1.2 При провеждането на опитни измервания са наблюдавани анизотропни свойства на HTS-2G лентови проводници по отношение на ориентацията им спрямо магнитния поток, както е показано на фиг. 6.40. Проводниците имат различни характеристики в зависимост от ориентацията на проводника и HTS слоя спрямо посоката на полето.



а) линиите на полето са паралелни на HTS слоя б) Линиите са перпендикулярни на HTS слоя

Фиг. 6.40 HTS проводник в магнитно поле.

- 1.3 Спойките в свръхпроводящите и несвръхпроводящите части от хибридна система, които са потопени в течен азот, не е подходящо да бъдат изработени от калай. След изваждане от течния азот, калаят започва да се разрушава поради ефекта наречен „калаена чума“ и е възможно да прекъсне електрическата верига. За електрическа връзка и контакт се използват контактни съединения, които осигуряват електрически контакт с натиск;
- 1.4 Свръхпроводящите лентови проводници допускат големи токови натоварвания, въпреки сравнително малките си геометрични размери, което обуславя висока токова плътност в проводящия слой. Това трябва да се взема предвид при подбора на сечения на проводниците и контактните съединения за несвръхпроводящите части, които ще работят свързани към HTS системата. Разликата в сеченията на проводниците, породена от разликата в проводимостите на материалите, обуславя необходимостта от специфични конструктивни решения на прехода между свръхпроводящата и несвръхпроводящата електрически вериги от системата;
- 1.5 В електрически устройства, предназначени за свръхпроводящо приложение, които работят свързани към несвръхпроводящи системи, съществува хибридна природа по отношение на работните температури и електромагнитните характеристики. Части от системата ще работят в криогенни температури в течен азот $77K$, а останалите несвръхпроводящи електрически устройства при стайни температури $293K$. Електромагнитните характеристики на HTS системата зависят от работната температура, т.е. дали проводниците се намират в свръхпроводящо състояние, смесено проводящо състояние или са извън свръхпроводящо състояние. Несвръхпроводящите устройства ще изпитват различни електромагнитни натоварвания в зависимост от състоянието, в което се намират HTS устройствата;
- 1.6 Наличието на индуктивност L и отсъствието на електрическо съпротивление R в свръхпроводящи хибридни системи ще влияе върху времеконстантата на възникващите преходни процеси ;
- 1.7 Отсъствието на електрическо съпротивление R и наличието на индуктивен импеданс в свръхпроводяща част на хибридни системи създава несиметричност при възникване на електрически преходни процеси. Несвръхпроводящите части от системата трябва да може да ограничават възникващите преходни процеси, което обуславя необходимостта от прецизно съгласуване на електромагнитните характеристики. Възникване на късо съединение в HTS устройство трябва да се ограничи от несвръхпроводящите части на системата. Това съображение налага необходимостта от мерки за защитата на уреди и устройства, които работят свързани към HTS от възникване на къси съединения;
- 1.8 Времеконстантата на хибридна свръхпроводяща система е различна в топло $T > T_c$ и в студено състояние $T < T_c$, и предполага разлики в свръхпроводящите и несвръхпроводящите части, които ще повлияват възникващите в електрическата система електрически преходни процеси. Времеконстантата τ , когато системата се намира в свръхпроводящо състояние, се определя изцяло от активното електрическо съпротивление на несвръхпроводящите части и индуктивностите на свръхпроводящия слой и несвръхпроводящите слоеве;
- 1.9 При HTS-2G лентови проводници се наблюдава времезакъснение при фазовия преход по отношение на температурата T_c и електрическото съпротивление R , което трябва да се вземе под внимание в хибридни HTS системи. Въпреки че критичната температура T_c на фазов преход е премината, проводниците се намират в смесено свръхпроводящо състояние, което поражда възникване на електрическо съпротивление в проводника при по-високи температури. При проведените експерименти е установена температурен диапазон от $77K \div 110K$, в който проводниците се намират в смесено свръхпроводящо състояние. Този ефект може да се използва за повишаване на работните температури на свръхпроводящите части на хибридни HTS електрически системи;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свръхпроводниците HTS-2G може успешно да заменят съществуващите конвенционални проводници и да бъдат използвани във вече оразмерени електромагнитно електротехнически устройства. Този нов вид проводници са бързо развиващо се направление в електротехниката и енергетиката за постигане на високи енергийни плътности в сравнително малки обеми, създаване на силни магнитни полета и намалени електрически загуби.

Високотемпературните лентови свръхпроводници от втори род HTS-2G, които работят при температури на течния азот, са подходящи и перспективни за създаването на електрически хибридни устройства, които са изградени свръхпроводящи и несвръхпроводящи контури, използвайки познати аналитични и технологични методи за изчисление и конструиране от конвенционалната електротехника. Хибридизацията по отношение на използваните проводници е метод за използване на предимствата, които предоставяват свръхпроводящите и традиционните проводници.

С развитието и технологичния напредък при производството на лентови свръхпроводници, откриването на нови материали, които са свръхпроводими при по-високи работни температури, свръхпроводимостта предоставя широки възможности за създаване на устройства с подобрени работни характеристики.

НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научните и научно-приложните приноси на дисертационната работа са обобщени по следния начин:

- 1) Формулирани, разработени и приложени са електромагнитни и топлинни компютърни модели при изследване на хибридни свръхпроводими индуктивни системи.
- 2) Изследвани са работни характеристики на реални архитектури високотемпературни лентови свръхпроводници от второ поколение за конструиране на свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот.
- 3) Изследвани са индуктивни параметри на системи от намотки, изработени от високотемпературни лентови свръхпроводници от второ поколение, за конструиране на свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот, посредством разработени компютърни модели със съсредоточени и разпределени параметри.
- 4) Разработени са модели за определяне на електрически и топлинни загуби при променлив ток на високотемпературни лентови свръхпроводници от второ поколение за конструиране на свръхпроводящи електрически апарати.
- 5) Изследвана е приложимостта на типични електроизолационни материали за реализиране на свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот.
- 6) Разработена е методология за проектиране на свръхпроводящи електрически апарати, работещи при криогенни температури в течен азот.
- 7) Проектирани, разработени и лабораторно изпитани са прототипи на индуктивни свръхпроводящи електрически апарати при криогенни температури в течен азот.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- A1. Ivanov, G., Mateev, V., & Marinova, I. (2023, September). Superconducting HTS-2G Hybrid Magnetic Mutual Induction System in Liquid Nitrogen. In 2023 15th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), pp. 1-4. Scopus.
- A2. Ivanov, G., Mateev, V., & Marinova, I. (2023, June). Experimental Study of Insulation Composite Materials Electrical Properties in Liquid Nitrogen. In 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 1-4. Scopus.
- A3. Ivanov, G., Spasova, A., Mateev, V. and Marinova, I., 2023. Applied complex diagnostics and monitoring of special power transformers. *Energies*, 16(5), p.2142. Scopus, WoS.
- A4. Ivanov, G., Mateev, V., & Marinova, I. (2022, September). Static and Transient Characteristics of Hybrid HTS Coils. In 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), pp. 1-4. Scopus.
- A5. Mateev, V., Ivanov, G., & Marinova, I. (2022, September). Modeling of microfluidic cell with electrodes for impedance measurements. In 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), pp. 1-5. Scopus.
- A6. Ivanov, G., Mateev, V., & Marinova, I. (2020, September). Modeling of Cooling System for High-temperature Superconducting Cables. In 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), pp. 1-4. Scopus.
- A7. Mateev, V., Ivanov, G., & Marinova, I. (2020, June). Comparison of Electromagnetic Formulations for Multilayer HTS Power Cable Modeling. In 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), pp. 1-4. Scopus.
- A8. Mateev, V., Ivanov, G., & Marinova, I. (2019, September). Inductance analysis of multilayer HTS Power Cable. In 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), pp. 1-4. Scopus.
- A9. Mateev, V., Ivanov, G., & Marinova, I. (2019, June). Modeling of fluid flow cooling of high-speed rotational electrical devices. In 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 1-5. Scopus, WoS.

SUMMARY

ELECTRICAL AND THERMAL INSULATION SYSTEMS FOR SUPERCONDUCTING ELECTRICAL APPARATUS

Author: M.Sc. Eng. Georgi Ivanov Ivanov

Over the years, several superconducting devices have been proposed and successfully applied in electrical engineering: power cables, drive electromagnets, sensors for measuring magnetic fields, etc. Despite their promising qualities, these devices have peculiarities and problems caused by cryogenic operating temperatures, specific electromagnetic characteristics, their interaction with non-superconducting electrical devices, as well as problems related to construction materials and their characteristics in this temperature range. Low operating temperatures change the electrical insulation qualities of the materials, requiring the use of specific thermal insulation structures, supporting cooling and maintaining the required operating temperature.

In this work electromagnetic and thermal computer models have been formulated, developed and applied in the study of hybrid superconducting inductive systems. Performance characteristics of second-generation high-temperature flat superconductor architectures for the construction of superconducting electrical devices at cryogenic nitrogen temperatures have been investigated. Inductive parameters of coil systems made of second-generation high-temperature flat superconductors for the construction of superconducting electrical devices at cryogenic nitrogen temperatures were investigated by means of developed computer models with lumped and distributed parameters. Models have been developed for determining electrical and thermal losses at alternating current. The applicability of typical electrical insulating materials for the realization of superconducting electrical devices at cryogenic nitrogen temperatures has been investigated. A methodology has been developed for the design of superconducting electrical devices operating at cryogenic nitrogen temperatures. Prototypes of inductive superconducting electrical devices at cryogenic nitrogen temperatures were designed, developed and laboratory tested.

The results obtained and the conclusions drawn show a promising potential for the development of superconducting electrical apparatus and devices. HTS-2G superconductors can successfully replace existing conventional wires and be used in already existing electrotechnical devices. This new type of conductors is a rapidly developing direction in electrical engineering and energy for achieving high energy densities in relatively small volumes, creating strong magnetic fields and reduced electrical losses. High-temperature flat superconductors of the second generation HTS-2G, which operate at liquid nitrogen temperatures, are suitable and promising for the creation of electric hybrid devices. Hybridization in terms of the wires used is a method of using the advantages that superconducting and traditional wires provide.

With the development and technological advances in the production of band superconductors, the discovery of new materials that are superconducting at higher operating temperatures, superconductivity provides ample opportunities to create devices with improved performance.