

На правах рукописи

Баган Гонtrand Стев Седжро



**Оптимизация характеристик сверхпроводящего магнита
индуктивной накопительной системы солнечной электростанции**

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: **Калимов Александр Гелиевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шишигин Сергей Леонидович**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Института машиностроения, энергетики и транспорта, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет» (ФГБОУ ВО ВоГУ), г. Вологда.

Запретилина Елена Руслановна
кандидат технических наук, главный специалист НТЦ «Синтез», отдел БИ2, Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»), г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета У. 2.4.1.39 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У. 2.4.1.39
кандидат технических наук, доцент



Миневич Татьяна Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень проработанности темы исследования. В последние годы во всем мире наблюдается интенсивный рост использования возобновляемых источников энергии. С одной стороны, это объясняется развитием экономической и промышленной деятельности, что ведет к увеличению потребления энергии в условиях роста цен на ископаемое топливо. С другой стороны, использование традиционных источников энергии является причиной выбросов парниковых газов, которые негативно влияют на состояние окружающей среды. Для удовлетворения потребностей растущего энергопотребления и решения климатических проблем использование возобновляемых источников энергии, в частности, солнечных и ветровых энергоустановок, является наиболее перспективным решением. Необходимо, однако, отметить, что существенным недостатком этих энергетических ресурсов является их нестабильность. Действительно, мощность, вырабатываемая фотоэлектрическими источниками, меняется в зависимости от случайных климатических условий, таких как интенсивность солнечного излучения, облачность, время суток, температура окружающей среды. В случае ветроэнергетических систем естественные и непредсказуемые колебания скорости ветра вызывают значительные колебания мощности, генерируемой ветротурбинами. Для смягчения неблагоприятных последствий этих явлений и обеспечения надежности и высокого качества электроэнергии генерирующие объекты систем возобновляемой энергетики объединяются с различными накопителями энергии, такими как гидроаккумуляторы, химические батареи, индуктивные накопители и т. д.

На практике накопительные устройства принято характеризовать их энергоемкостью на единицу объема устройства и максимальной мощностью разряда. Одним из перспективных направлений развития подобных систем является использование сверхпроводниковых индуктивных накопителей (СПИН). В отличие от большинства альтернативных решений, СПИНЫ обладают одновременно сравнительно большой энергоемкостью и, одновременно, высокой мощностью заряда / разряда.

Практические исследования и всестороннее математическое моделирование показали, что в электрических сетях, объединяющих фотоэлектрические или ветровые электростанции со СПИНАми, удастся стабилизировать мощность в точке соединения отдельных систем, выровнять нагрузку, улучшить пропускную способность и качество сетевой мощности, избежать резких перепадов в локальных энергетических системах.

СПИН в основном состоит из четырех основных частей: сверхпроводниковой катушки, криогенной системы, блока преобразователя, модуля управления. Сверхпроводниковая катушка является центральным компонентом СПИНа. По специфическим характеристикам сверхпроводящие материалы условно делятся на две группы: низкотемпературные сверхпроводники (НТСП), охлаждаемые, как правило, жидким гелием, и высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), работающие при температуре кипения жидкого азота. Среди ВТСП особо можно выделить группу ленточных сверхпроводников 2-го поколения, которая характеризуется оптимальным соотношением их стоимости и основных технических характеристик. ВТСП проводник 2-го поколения представляют собой медную ленту шириной в несколько миллиметров, на которую нанесен тонкий слой сверхпроводниковой керамики, а также несколько слоев стабилизирующих материалов. Следствием такой конструкции является резкая

анизотропия электромагнитных свойств проводника. Электрический ток распределяется неравномерно по ширине ленты, и для его описания требуется детальный анализ распределения магнитного поля, создаваемой всей магнитной системой СПИНа, а также учет специфических свойств сверхпроводникового материала, задаваемых моделью критического состояния.

Таким образом, одной из основных проблем, которые необходимо решить при разработке и проектировании СПИНов, на основе ВТСП 2-го поколения, является моделирование распределения плотности тока и определение критического тока сверхпроводниковой системы. В последние годы в этом направлении выполнен целый ряд исследований, тема продолжает оставаться актуальной и интересной для международного научного сообщества.

Разработка новых эффективных подходов к описанию сверхпроводящей катушки и оптимизации магнитной энергии с учетом электромагнитных и механических условий является в целом актуальной темой для современной теоретической электротехники и соответствует разделу "В рамках научной специальности разрабатываются... прикладные аспекты интеграции информационных технологий и объектов электротехники, электроэнергетики ...", паспорт специальности 2.4.1. - Теоретическая и прикладная электротехника.

Близкой тематикой в России занимались А. Ю. Архангельский, С. А. Егоров, И. А. Кабанов, а также зарубежные ученые: Shen B., Sotelo G.G., W. Yuan, F. Trillaud, A.W. Zimmermann, S. Noguchi, C. Yanbo, K. Higashikawa, Y. Xinjie, Q. Sun, A. Nekmati, и другие исследователи.

Цель работы: Целью работы является разработка новой математической модели сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии и оптимизация параметров накопителя с учетом механических напряжений в обмотке магнита, возникающих в процессе его эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решались следующие научные задачи:

1. Разработать новый подход к расчету распределения плотности тока и индукции магнитного поля в ленте ВТСП 2-го поколения.
2. Разработать математическую модель СПИНа с целью определения критического тока в сверхпроводниковой катушке.
3. Сформулировать задачу оптимизации сверхпроводниковой катушки.
4. Разработать эффективную стратегию отбора перспективных решений для алгоритма фейерверков.
5. Выполнить оценку эффективности новой стратегии отбора при сравнении с другими оптимизационными алгоритмами.
6. Создать математическую модель многослойной сверхпроводниковой катушки.
7. Выполнить оптимизацию конструкции двухслойной, четырехслойной и шестислойной сверхпроводниковых катушек.
8. Провести двухцелевую оптимизацию сверхпроводниковой катушки.

Научная новизна работы и теоретическая значимость работы заключаются в том, что:

1. Разработан новый подход к моделированию ВТСП 2-го поколения, основанный на совместном решении интегрального уравнения электромагнитного поля и уравнения состояния материала сверхпроводника.

2. Разработан алгоритм расчета критического тока в СПИНе из сверхпроводниковых лент 2-го поколения.
3. Предлагается новая стратегия отбора перспективных решений для улучшения алгоритма фейерверков.
4. Разработан подход к оптимизации конструкции двухслойной, четырехслойной и шестислойной сверхпроводниковых катушек на основе применения модифицированного метода фейерверков.
5. Разработан подход к двухцелевой оптимизации конструкции шестислойной сверхпроводниковых катушек.

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы в моделировании ВТСП 2-го поколения, разработке и проектировании СПИНов, для определения оптимальных характеристик многослойных сверхпроводниковых катушек.

Методология и методы исследования: Основные методы исследования, использованные в работе: математическое и численное моделирование, статистический анализ, одно- и многокритериальная ограниченная нелинейная стохастическая оптимизация, алгоритм фейерверков и генетический алгоритм (GA). Для решения данных задач применялись программные пакеты MATLAB (версия R2021a) и Spyder Anaconda (версия 3.7).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новый подход к моделированию критических токов в ВТСП 2-го поколения, основанный на решении системы уравнений для векторного магнитного потенциала и для модели критического состояния.
2. Модификация стратегии отбора перспективных искр для улучшения эффективности алгоритма фейерверков.
3. Оптимизация конструкции многослойных сверхпроводниковых катушек на основе применения модифицированного метода фейерверков при рабочих температурах 77° К и 20° К.
4. Двухцелевая оптимизация конструкции шестислойной сверхпроводниковой катушки при рабочей температуре 20° К.

Степень достоверности результатов, подтверждена сравнением нового подхода к расчету критических токов с результатами экспериментального исследования; выполнением расчетов в высококачественных программных обеспечениях Matlab и Spyder Anaconda, которые были проверены многолетней практикой успешных расчетов; адекватностью выбора исходных данных для численного моделирования. Обоснованность предложенной стратегии отбора алгоритма фейерверков подтверждается сравнением результатов с другими алгоритмами.

Апробация результатов работы: Основные положения диссертации обсуждались и докладывались на международной научной электроэнергетической конференции «International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2021)», (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2021), на конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники «2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2022 ElConRus)», (Санкт-Петербург, 25–28 января 2022), на конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники «2023 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical

and Electronic Engineering (2023 ElConRus)», (Санкт-Петербург, 24–27 января 2023), и на «IEEE AFRICON CONFERENCE (AFRICON-2023)», (Найроби, Кения, 20–22 сентября 2023).

Публикации: По результатам данной исследовательской работы опубликованы 8 научных работ, из которых 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 4 статьи опубликованы в международных журналах и трудах конференций, одна из них в издании, индексируемом международной наукометрической базой Scopus.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех главы, заключения, списка литературы из 99 наименований и содержит 104 страниц основного текста. Содержание работы иллюстрируется 30 рисунками, 13 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, представлена цель работы, научная новизна, теоретическое и практическое значение работы, ее методы, и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе предлагается новый метод моделирования распределения плотности тока в катушках, созданных с использованием ВТСП 2-го поколения. Была исследована зависимость критического тока в катушке от ее структуры (внутреннего радиуса и количества витков). Также было исследовано влияние выбранной модели критического состояния на распределение плотности тока в критическом состоянии. Новый подход применен для расчета накопленной энергии и механических напряжений в многослойных сверхпроводниковых катушках. Определены зависимости максимальной накопленной энергии от внутреннего радиуса в случае однослойной катушки, намотанной сверхпроводниковой лентой длиной 500 м.

Основной идеей разработанного нового метода моделирования распределения плотности тока в СПИНах на основе ВТСП 2-го поколения является решение системы уравнений, одно из которых характеризует модель критического состояния сверхпроводникового материала, второе задает связь индукции магнитного поля с распределением плотности электрического тока (1).

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}, \quad \text{где } \vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \vec{J} \frac{dV}{r} \quad (1)$$

Интегрирование в (1) проводится по области, занятой материалом проводника. Уравнение критического состояния сверхпроводникового материала задает зависимость критической плотности тока от индукции магнитного поля. Для сверхпроводниковых лент 2-го поколения наиболее удобной является так называемая модифицированная анизотропная модель Кима в виде соотношения:

$$J_c(B_{\perp}, B_{\parallel}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \frac{\sqrt{k^2 |B_{\parallel}|^2 + |B_{\perp}|^2}}{B_0}\right)^{\alpha}} \quad (2)$$

Где k , α , J_{c0} и B_0 – эмпирические параметры, зависящие от свойств сверхпроводникового материала. Параметр k характеризует степень анизотропии материала и обычно намного меньше единицы.

Объединение соотношений (1) и (2) приводит к формированию нелинейного интегрального уравнения, в котором плотность тока является неизвестной величиной. В связи с тем, что ток протекает по тонкому слою, фактически плотность тока является скалярной переменной, а направление соответствующего вектора определяется структурой и положением витков обмотки.

Для численного решения системы уравнений (1) – (2), прежде всего, проводится дискретизация расчетной области. В качестве примера рассмотрим однослойную цилиндрическую катушку, намотанную сверхпроводниковой лентой 2-го поколения. Она состоит из n витков (Рис. 1-а). Такая задача обладает цилиндрической симметрией, соответственно расчетная область может быть сведена к поперечному сечению обмотки (Рис. 1-б).

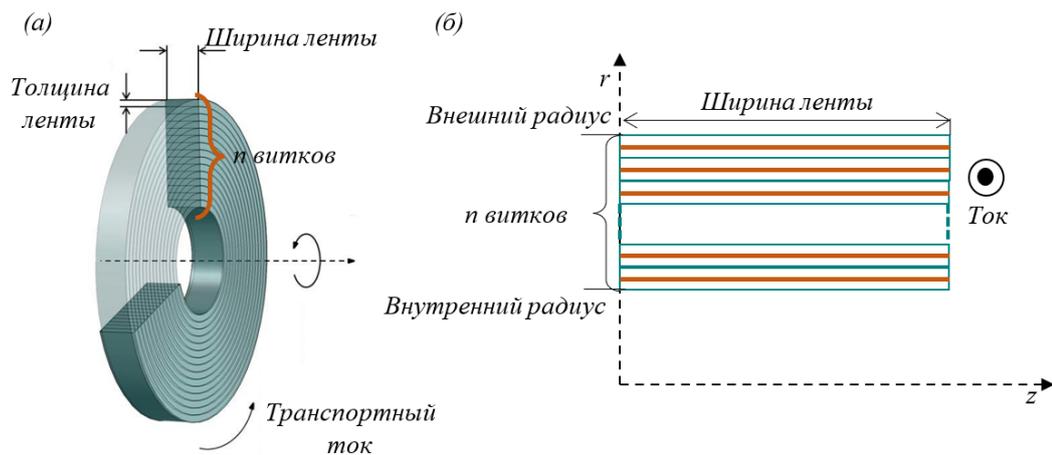


Рис. 1. Однослойная сверхпроводниковая катушка. (а) общий вид, (б) поперечное сечение обмотки.

При создании математической модели поперечное сечение каждого витка сверхпроводникового накопителя разбивается на некоторое число прямоугольных элементов, в пределах каждого из которых плотность тока предполагается постоянной и зависящей от величины индукции магнитного поля в центре элемента. В результате такого представления уравнения (1) – (2) могут быть заменены системой нелинейных алгебраических уравнений.

Согласно теории критического состояния, проникновение магнитного поля (а соответственно и токов) в сверхпроводниковые материалы 2-го рода может происходить только через их поверхности, причем в каждой точке материала ток либо отсутствует, либо равен критическому значению. Применительно к используемой процедуре дискретизации обмотки этот принцип приводит к трем возможным состояниям каждого отдельно взятого элемента: а) внутри элемента протекает критический ток, величина которого определяется значением индукции магнитного поля в центре этого элемента; б) ток внутри элемента равен нулю; в) ток в элементе имеет промежуточное значение, не превышающее критическую величину. Присутствие элементов последнего типа означает, что в некоторой их части протекает ток с критическим значением плотности, а в оставшемся пространстве ток либо равен нулю, либо направлен в противоположную сторону.

Указанные особенности распределения плотности тока в сверхпроводниковых лентах были интегрированы в алгоритм решения системы уравнений (1) – (2). Следствием указанных особенностей является то, что распределение плотности тока в витках обмотки при

фиксированном транспортном токе не определено однозначно и зависит от предыстории, от того каким именно образом был индуцирован рассматриваемый транспортный ток.

Созданная математическая модель и ее численная реализация были применены для определения критического тока сверхпроводниковой катушки. Для достижения этой цели ток в обмотке в рамках предлагаемого метода моделирования постепенно плавно увеличивается, начиная с нулевого уровня. Критическим считается состояние, при котором все элементы хотя бы одного из витков переходят в критическую группу при дополнительном условии протекания всех токов в одном направлении. При проведении серии численных экспериментов мы использовали наиболее широко используемую в настоящее время в литературе модель критического состояния Кима (3) с параметрами $\alpha=0,7$; $k=0,29515$; $J_{c0}=28,5 \cdot 10^9$ А/м; $B_0=42,65$ мТ.

В качестве примера применения разработанного метода расчета распределения плотности тока рассмотрим многовитковую катушку, намотанную сверхпроводниковой лентой шириной 4 мм. Толщина ленты включая изоляцию равно 0,293 мм. Количество витков варьируется в пределах от 1 до 200. Проведенные расчеты показали, что величина критического тока составила в случае одновитковой катушки почти равна $I_c = 102$ А. Это расчетное значение практически совпадает с паспортным значением 4-миллиметровых лент, выпускаемой компанией Superpower Inc.: $I_c = 80\text{--}117$ А – экспериментально измеренный ток (при $T = 77$ К). Данное обстоятельство подтверждает корректность и достаточную для практического применения точность результатов, получаемых с использованием разработанной математической модели.

Для иллюстрации итерационной процедуры определения критического тока на рис. 2 приведены распределения плотности тока для катушки, состоящей из 32 витков для различных значений транспортного тока (40%, 60%, 80%, и 100% от критического уровня). Полученный в конечном итоге критический ток составил $I_c = 64,3$ А.

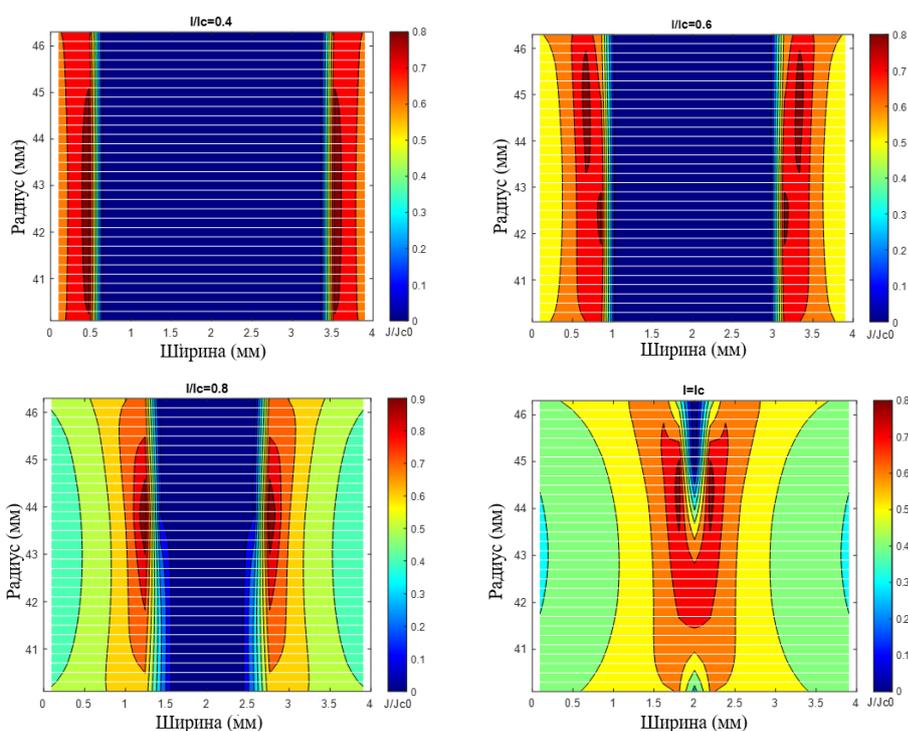


Рис. 2. Распределение плотности тока в сверхпроводниковых лентах. Число витков в катушке $N = 32$, внутренний радиус $R = 40$ мм.

Как видно из приведенных диаграмм в критическом режиме, только 9-я, и 10-я ленты от внутреннего радиуса полностью находятся в критическом состоянии, таким образом, именно они ограничивают максимально возможный ток в катушке.

Для катушек с большим числом витков деградация критического тока усиливается. как это видно из результатов, приведенных на Рис. 3. Расчетное значение этой характеристики для катушек, состоящих из 100 ÷ 200 витков в 2 раза меньше, чем значение критического тока одновитковой катушки (см. рис. 3).

Исследование зависимости критического тока от внутреннего радиуса показало, что деградация критического тока в одновитковой катушке практически отсутствует при любом значении этого параметра. Но в случаях многovitковой катушки, он заметно изменяется при изменении внутреннего радиуса катушки в пределах от 5 до 50 мм. За пределами этой области критический ток остается практически постоянным.

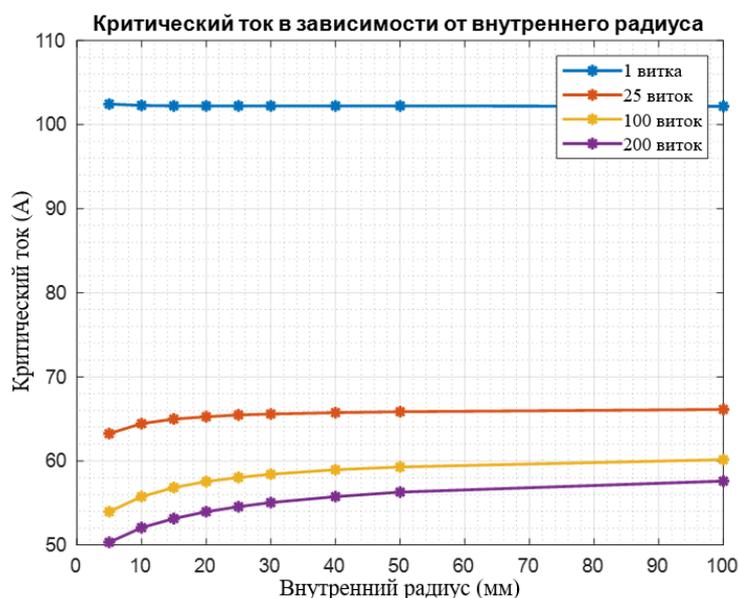


Рис. 3. Критический ток в зависимости от внутреннего радиуса для катушек с различным числом витков.

Предлагаемый в настоящей работе подход был применен для расчета накопленной магнитной энергии и возникающих механических напряжений. Энергия магнитного поля вычисляется по формуле (3).

$$W = \frac{1}{2} \int_V \vec{A}(M) \vec{J}(M) dV, \quad (3)$$

где V — объём катушки, $A(M)$ и $J(M)$ — соответственно векторный магнитный потенциал и плотность тока в точке M в катушке. Вследствие цилиндрической симметрии, которой обладает рассматриваемая система, вектора плотности тока и векторного магнитного потенциала имеют только одну угловую компоненту. В этом случае выражение (3) можно переписать в виде (4).

$$W = \int_S \pi \cdot r \cdot A_\theta(M) \cdot J_\theta(M) ds \quad (4)$$

Согласно вышеописанному подходу, в процессе моделирования магнитных полей поперечное сечение катушки разбивается на простейшие элементы прямоугольной формы, в пределах каждого из которых плотность тока J_k и величина векторного магнитного потенциала A_k считаются постоянными. Соответственно, выражение (4) можно аппроксимировать суммой (5):

$$W = \sum_k \pi \cdot r \cdot A_k \cdot J_k \cdot \Delta r \cdot \Delta z, \quad (5)$$

где Δr и Δz – размеры каждой ячейки. Плотность тока J_k в каждом элементе ограничена критической величиной, которая, в свою очередь, зависит от уровня и направления вектора индукции магнитного поля B_k в этом элементе. Максимальная энергия, которую может накапливать сверхпроводниковая катушка, зависит от распределения плотности тока по объему катушки в критическом состоянии. В качестве примера применения предлагаемого алгоритма рассматривается расчет максимальной запасенной энергии в однослойной сверхпроводниковой катушке, представленной на рис. 4, при различных внутренних радиусах. Параметры используемой в расчетах ленты (500 м длины и 12 мм ширины) соответствуют характеристикам промышленно выпускаемого ВТСП проводника.

Серия численных экспериментов показала, что запасенная энергия является самой высокой для значений внутреннего радиуса менее 200 мм. Сначала накопленная магнитная энергия увеличивается при изменении внутреннего радиуса от 5 мм до 110 мм, а затем уменьшается при изменении внутреннего радиуса от 110 мм до 500 мм. Действительно, поскольку длина ленты постоянна, увеличение радиуса приводит к уменьшению количества витков и, следовательно, к увеличению значения критического тока. Это хорошо объясняет увеличение магнитной энергии в диапазоне радиусов от 5 мм до 110 мм. Однако уменьшение числа витков снижает напряженность магнитного поля, тогда как энергия пропорциональна не только току в катушке, но и напряженности магнитного поля. Это объясняет тот факт, что магнитная энергия уменьшается при последующем увеличении значения внутреннего радиуса.



Рис. 4. Максимальная энергия в зависимости от внутреннего радиуса при 500 м длины ленты.

Важным ограничением на возможности использования сверхпроводниковых систем являются механические напряжения, возникающие в результате воздействия сил Лоренца на проводник с током. Эти напряжения (σ) могут вызывать структурные дефекты и привести к деградации критического тока вследствие возникающих деформаций. Механические напряжения могут быть приближенно определены следующим образом:

$$\sigma = J \cdot B_{//} \cdot r \quad (6)$$

Где r — радиус катушки. $B_{//}$ и J , соответственно, являются параллельной составляющей плотностью магнитного поля и средней плотностью тока. Эти характеристики могут быть определены на основе разработанного подхода.

Во второй главе рассматривается определение оптимальных геометрических характеристик сверхпроводникового накопителя энергии. Для этого детально исследован и применен метод фейерверков – один из стохастических методов решения задач оптимизации.

Алгоритм фейерверков (Fireworks algorithm, FWA) быстро развивается в последнее время благодаря простоте своей реализации и высокой эффективности при решении сложных задач оптимизации в электротехнике. Он представляет собой метаэвристический метод, который позволяет определить глобальный оптимум целевой функции с помощью набора операторов, включающих процедуры разведки и подробного исследования (эксплуатации). Численные эксперименты с различными тестовыми функциями показывают, что он может быстрее сходиться к глобальному оптимуму по сравнению с типичными генетическими алгоритмами оптимизации. FWA характеризуется четырьмя основными операциями: взрыв, мутация, масштабирование и отбор. Взрыв приводит к генерации новых точек в некоторой области исследуемого пространства вокруг исходной точки. Мутация порождает случайные отклонения исследуемых точек рождения новых искр. Масштабирование позволяет уменьшать или увеличивать область, перекрываемую очередным взрывом. Отбор позволяет акцентировать внимание на исследовании наиболее перспективных областей пространства. Для улучшения скорости и точности сходимости была исследована новая стратегия отбора перспективных искр. Она заключается во введении нового параметра N_{best} при отборе наиболее перспективных искр. Если N — это общее количество искр, выбранных для следующего поколения, то N_{best} — это количество первых лучших искр. Параметр N_{best} вычисляется на каждой итерации по формуле (7). Он изменяется от минимального значения N_{best_min} до максимального значения N_{best_max} в зависимости от номера итерации таким образом, чтобы расставить приоритеты для разведки на первых итерациях и способствовать эксплуатации на последних итерациях. Цель этого преобразования состоит в том, чтобы улучшать исследования вокруг лучших искр по мере роста номера итерации.

$$N_{best} = \mathit{round} \left(N_{best_min} + \frac{N_{best_max} - 1}{Max_{iteration}} \cdot It \right) \quad (7)$$

Здесь N_{best_min} и N_{best_max} — желаемые минимальное и максимальное количество первых лучших искр, соответственно It — номер текущей итерации и $Max_{iteration}$ — максимальное количество итераций. В этом случае $N - N_{best}$ равно количеству искр, выбираемых стратегией расстояния.

Алгоритм фейерверков с новой стратегией отбора перспективных искр был подробно исследован на примере оптимизации параметров двухслойной сверхпроводниковой катушки (Рис. 5). В качестве целевой функции использовалась запасенная энергия магнитного поля W .

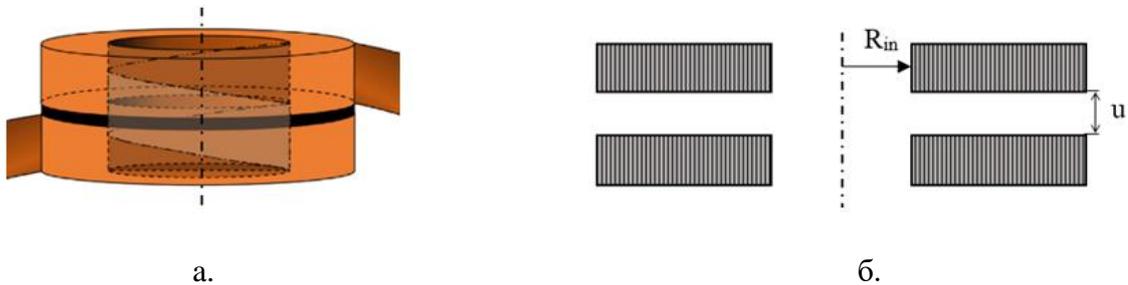


Рис. 5. -а) Двухслойная сверхпроводниковая катушка; б) Поперечное сечение двухслойной сверхпроводниковой катушки

Поскольку распределение плотности тока и вектора магнитного потенциала является функцией геометрических параметров катушки, запасенная магнитная энергия также зависит от этих параметров. В случае моделирования двухслойной катушки при фиксированной длине ленты геометрическими параметрами являются внутренний радиус и расстояние между слоями (рис. 5.б). Тогда задача оптимизации формулируется в виде:

$$\text{Maximize } W = f(R_{in}, u) \Leftrightarrow \text{Minimize } -f(R_{in}, u) \quad (8)$$

Для сверхпроводниковой ленты SCS12040 длиной 250 м на слой катушки максимальная энергия, накапливаемая двухслойной катушкой при 77°K , составила 266 Дж.

Кроме того, серия численных экспериментов была проведена с целью сопоставления характеристик модифицированного метода фейерверков (ММФ) с классической формулировкой метода фейерверков (КМФ) и с генетическим алгоритмом (ГА). Критерием остановки при проведении серии вычислений было выбрано количество итераций, равное 10. На рис. 6 приведены результаты расчета оптимального значения запасенной энергии при использовании трех вышеуказанных методов оптимизации. Видно, что модифицированный алгоритм фейерверков, обладает наиболее быстрой сходимостью.

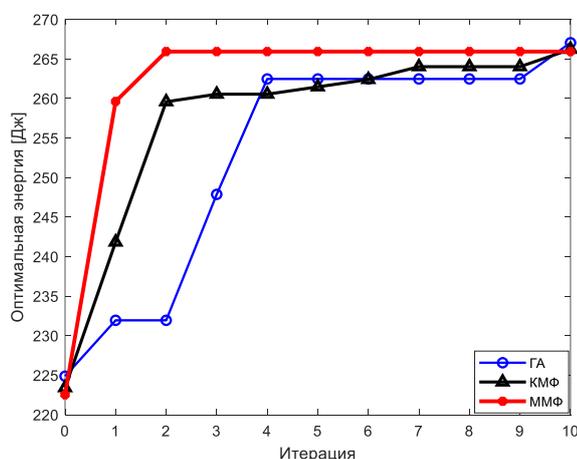


Рис. 6. Эволюция оптимального значения для различных алгоритмов

Чтобы оценить, с одной стороны, эффективность классического метода фейерверков в сравнении с генетическим алгоритмом, а с другой - влияние предлагаемой новой стратегии отбора перспективных искр на поиск решения, пять раз выполнялась оптимизация одной и той же накопительной системы с одними и теми же базовыми параметрами оптимизации. В связи с тем, что применяемые процедуры являются стохастическими, результаты их работы не обязательно совпадают в различных сериях численных экспериментов.

В таблице 1 представлены оптимальные энергии, среднее значение, стандартное отклонение серии экспериментов каждого алгоритма, включая предлагаемый новый модифицированный метод фейерверков.

Таблица 1: Оптимальные энергии при применении различных оптимизационных алгоритмов

	Оптимальные энергии [Дж]		
	ГА	КМФ	ММФ
1-я оптимизация	238,61	266,22	263,84
2-я оптимизация	261,91	264,79	265,39
3-я оптимизация	238,64	265,19	264,88
4-я оптимизация	262,77	265,96	263,29
5-я оптимизация	267,06	265,17	265,94
Максимальное значение	267,06	266,22	265,94
Среднее значение	253,80	265,47	264,67
Стандартное отклонение	13,99	0,6	1,09

Анализ таблицы 1 показывает, что оба алгоритма фейерверков в процессе выполнения десяти итераций дают существенно более высокое среднее значение оптимумов с меньшим стандартным отклонением, чем у генетического алгоритма. Следует также отметить, что по сравнению с классической формулировкой предложенная новая стратегия отбора перспективных искр расширяет область оптимальных значений. Количество оценок и время выполнения при каждой симуляции представлены в таблице 2.

Таблица 2: Количество оценок и время выполнения для различных оптимизационных алгоритмов

	Количество оценок			Время выполнения [мин]		
	ГА	КМФ	ММФ	ГА	КМФ	ММФ
1-я оптимизация	101	161	145	112,54	93,02	29,54
2-я оптимизация	101	152	149	113,60	77,31	28,84
3-я оптимизация	101	166	149	72,07	99,16	29,08
4-я оптимизация	101	169	148	97,46	101,44	30,77
5-я оптимизация	101	171	149	50,25	95,52	31,84

В таблице 3 показаны скорости оценок каждой симуляции, среднее значение, стандартное отклонение каждого алгоритма. Здесь параметр "скорость оценок" представляет собой отношение количества оценок каждой симуляции ко времени выполнения.

Таблица 3: Скорости оценок для различных оптимизационных алгоритмов

	Скорости оценок [Оценки / мин]		
	ГА	КМФ	ММФ
1-я оптимизация	0.90	1.73	4.91
2-я оптимизация	0.89	1.97	5.17
3-я оптимизация	1.40	1.67	5.12
4-я оптимизация	1.04	1.67	4.81
5-я оптимизация	2.01	1.79	4.68
Наилучшее значение	2.01	1.97	5.17
Среднее значение	1.25	1.77	4.91
Стандартное отклонение	0.48	0.13	0.21

Видно, что этот параметр для предлагаемой новой стратегии отбора перспективных искр как минимум вдвое выше, чем у других алгоритмов. Анализ совокупности результатов, полученных в серии численных экспериментов, показывает, что особенностью методов фейерверков является относительно быстрый выход в область глобального оптимума с последующим подробным исследованием окрестностей решения. Необходимо отметить, что существенное сокращение времени расчетов при использовании метода фейерверков связано с особенностью решаемой задачи и это преимущество не обязательно сохранится при решении других оптимизационных задач.

В третьей главе рассматриваются результаты оптимизации многослойных катушек, направленной на максимизацию запасаемой ими магнитной энергии. Исследовались свойства магнитной системы при рабочих температурах 77° К и 20° К.

Многослойная соленоидальная катушка — это катушка, состоящая из нескольких коаксиальных слоев (не менее 2), соединенных последовательно друг с другом. Соответственно, ток, протекающий через сверхпроводниковую ленту, одинаков независимо от слоя. Однако распределение плотности тока может изменяться при переходе от одного из них к другому. Слои катушки при этом не будут находиться в критическом состоянии одновременно. Действительно, только один виток одного из слоев, который находится в критическом состоянии, определяет максимально возможный ток всей магнитной системы. Положение этого витка заранее неизвестно. Оно зависит от геометрических параметров катушки, таких как, внутренние радиусы слоев, расстояния между ними.

Рассмотрим две различные задачи оптимизации: первая проблема (П1) не учитывает ограничения, вызванные механическими напряжениями в обмотках, и вторая проблема (П2), при формулировке которой подобные ограничения принимаются во внимание. Целевая функция задач обоих типов представляет собой функцию (9), количество переменных которой пропорционально количеству слоев катушки.

$$\text{Minimize } -f(R_{in}, u) \quad (9)$$

Неравенство (10) задает ограничение механических напряжений на ленточном проводнике катушки.

$$|\sigma| = |g(R_{in}, u)| \leq \sigma_{Limite} \quad (10)$$

Здесь R_{in} – вектор переменных, относящихся к внутренним радиусам. Также u – вектор переменных, относящихся к расстоянию между слоями, $f(R_{in}, u)$ – целевая функция, определяющая энергию, $g(R_{in}, u)$ – функция, задающая величину механического напряжения. Для предельного напряжения σ_{limite} , которое не должно превышать, мы принимаем величину 600 МПа. Это напряжение является пределом, при превышении которого критический ток снижается более, чем на 5%. Этот предел допускает деформацию сверхпроводящей ленты до 0,4% при 77° К. Энергия и механическое напряжение рассчитываются на основе распределений плотности тока и магнитного поля, определенных подходом, разработанным в первой главе. Решение задачи П1 включает только уравнение (9), в то время как решение задачи П2 включает уравнение (9) и неравенство (10).

Для решения двух поставленных выше задач оптимизации П1 и П2 рассмотрим 4 различных варианта многослойных катушек, намотанных 12-миллиметровой сверхпроводниковой лентой от производителя Superpower. Поперечное сечение одной из исследованных магнитных систем показано на рис. 7.

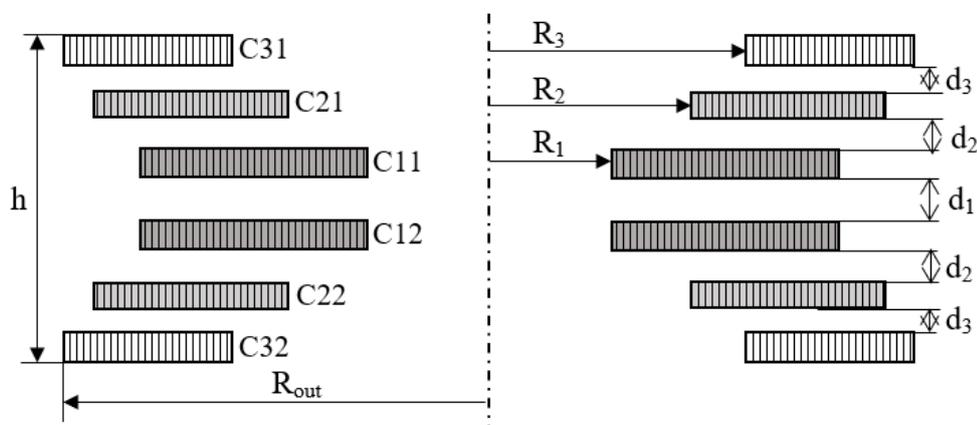


Рис. 7. Поперечное сечение шестислойной катушки

Катушка А: катушка из 2 слоев, длина ленты, используемой для каждого слоя, постоянна и равна 250 м. Она состоит из идентичных слоев C11 и C12 с внутренним радиусом R_1 , d_1 — это расстояние между C11 и C12.

Катушка Б: катушка из 2 слоев, длина ленты, используемой для каждого слоя, постоянна и равна 500 м. Ее поперечное сечение имеет такое же представление, как и у катушки А.

Катушка В: катушка из 4 слоев, длина ленты, используемой для каждого слоя, постоянна и равна 500 м. Она состоит из идентичных слоев C11 и C12 с внутренним радиусом R_1 , C21 и C22 с внутренним радиусом R_2 . d_1 — это расстояние между C11 и C12, а d_2 — это расстояние между C11 и C21, которое принимается равным расстоянию между C12 и C22.

Катушка Г: катушка из 6 слоев, длина ленты, используемой для каждого слоя, постоянна и равна 500 м. Она состоит из идентичных слоев С11 и С12 внутренним радиусом R_1 , С21 и С22 с внутренним радиусом R_2 , аналогично С31 и С32 с внутренним радиусом R_3 . d_1 — это расстояние между С11 и С12, d_2 — это расстояние между С11 и С21, которое принимается равным расстоянию между С12 и С22 а d_3 — это расстояние между С21 и С31, которое также соответствует расстоянию между С22 и С32.

Задача П1 решается для каждого варианта катушек при рабочих температурах 77°К и 20°К , а задача П2 решается для каждого варианта катушек только при рабочей температуре 77°К из-за отсутствия достоверных данных о порогах механических напряжений и деформаций для ленты при 20°К . Используемой моделью критического состояния является МКС 3 с параметрами $\alpha=1$; $k=0$; $J_{c0}=6,58 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$; $B_0 = 1,49 \text{ Тл}$ при температуре 20°К и $\alpha=1$; $k=0$; $J_{c0}=1,11 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$; $B_0 = 0,12 \text{ Тл}$ при температуре 77°К .

На рис. 8 и рис. 9 показаны максимальные накопленные энергии для каждого варианта катушки при температурах 77°К . В таблице 4 приведены параметры оптимальных катушек, полученные при решении проблемы П1.

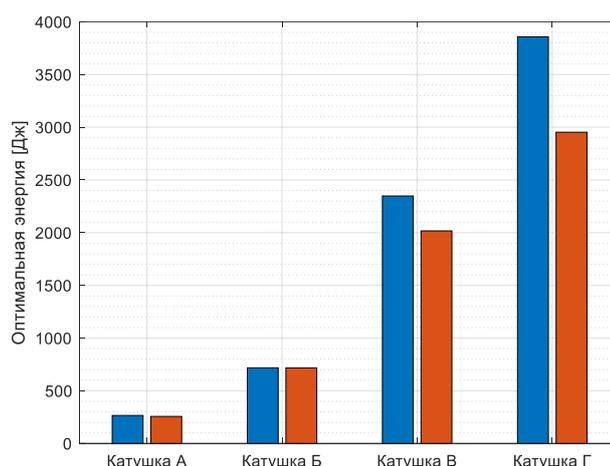


Рис. 8. Оптимальная энергия каждой катушки при температуре 77°К

Таблица 4: Оптимальные параметры сверхпроводниковых катушек с различным количеством слоев. Длина сверхпроводниковой ленты в каждом слое равна 500 м.

Характеристики	2-слойная катушка	4-слойная катушка		6-слойная катушка		
Количество параметров	2	4		6		
Запасаемая энергия, Дж	718,10	2348,2		3858,2		
Внутренний радиус, мм	227,1	266,0	342,9	381,5	374,4	263,2
Расстояние между слоями, мм	49,7	22,0	20,2	33,1	9,4	10,6

Механические напряжения для решений, приведенных на Рис. 8, минимальны в случае катушек А и Б. Таким образом, ограничение их значений практически не влияет на

характеристики оптимального решения. Но их влияние отчетливо заметно в случаях катушек В и Г. При ограничении механического напряжения пороговым значением максимальная запасенная энергия магнитного поля снижается на 15% и 25% в случаях катушек В и Г, соответственно.

На Рис. 9 показаны максимальные накопленные энергии для каждого варианта катушки при температурах 20 ° К.

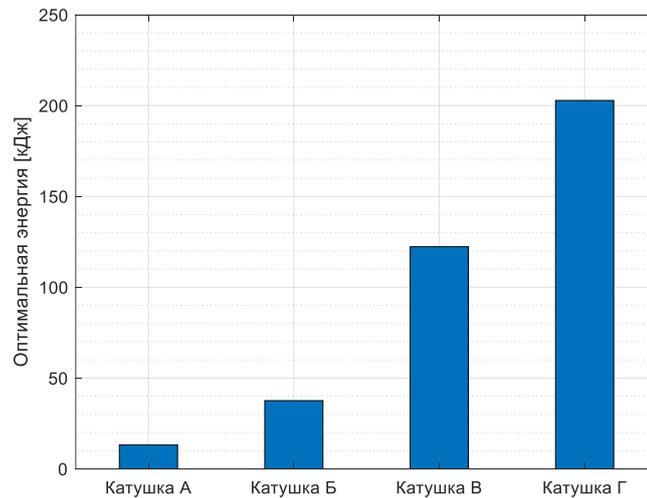


Рис. 9. Оптимальная энергия каждой катушки при температуре 20° К

Анализ приведенных диаграмм показывает, что максимальная энергия, запасенная при температуре 20° К, примерно в 50 раз выше, чем энергия, запасенная при 77° К. Однако, на практике необходимо принимать во внимание влияние механических напряжений и соотношение стоимостей криогенных систем для этих вариантов. Температура в 77° К достигается за счет охлаждения катушки относительно дешевым жидким азотом, в то время как, для достижения температуры в 20° К требуются дорогостоящие и энергоемкие криогенераторы, либо взрывоопасный жидкий водород.

Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволяет сделать заключение, что удвоение длины используемой ленты приводит к увеличению запасенной магнитной энергии примерно в 2,8 раза для двухслойной катушки. Кроме того, удвоение длины проводника за счет удвоения количества слоев при одинаковой длине на слой приводит к увеличению магнитной энергии примерно в 3,3 раза. Таким же образом, утроение количества слоев при одинаковой длине сверхпроводниковой ленты в каждом слое дает выигрыш в запасенной энергии в 5,5 раз.

В четвертой главе предлагается подход к многоцелевой оптимизации для многослойной катушки при рабочей температуре 20° К с использованием известного генетического алгоритма сортировки второго поколения (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm 2, NSGA-II). Цель моделирования заключается в том, чтобы найти наилучший компромисс между накопленной энергией магнитного поля и механическим напряжением.

Рассмотрим шестислойную катушку, показанную на рис. 7. Задача оптимизации заключается в максимизации магнитной энергии и минимизации механической нагрузки на

элементы катушки. В предыдущих главах было показано, что эти две величины зависят от внутренних радиусов слоев, расстояний между ними, а также от геометрических характеристик используемой сверхпроводниковой ленты. Ранее (в предыдущей главе) длина ленты в пределах каждого слоя считалась постоянной и равной 500 м, но в этой главе этот параметр рассматривается как переменная задачи оптимизации. Предполагается, что изменение длины ленты в каждом слое катушки влияет на соотношение запасенной магнитной энергии и механического напряжения. Задача оптимизации сформулирована следующим образом:

$$\begin{cases} \text{Max } W = f(R_{in}, L, u) \\ \text{Min } \sigma = g(R_{in}, L, u) \end{cases} \quad (11)$$

Где R_{in} , u , L , являются вектором внутренних радиусов, вектором расстояний между слоями и вектором длин ленты слоя, соответственно. Уравнение (11) преобразуется в стандартную формулировку задачи многоцелевой оптимизации, представленную в (12).

$$\begin{cases} \text{Min } (-W) = -f(R_{in}, L, u) \\ \text{Min } \sigma = g(R_{in}, L, u) \end{cases} \quad (12)$$

Результаты моделирования дали 184 оптимальных недоминирующих решений. Рис. 10 представляет фронт Парето, полученный в результате решения проблемы оптимизации. Вдоль оси x на этом рисунке отложена магнитная энергия, накопленная в катушках, вдоль оси y отложено механическое напряжение.

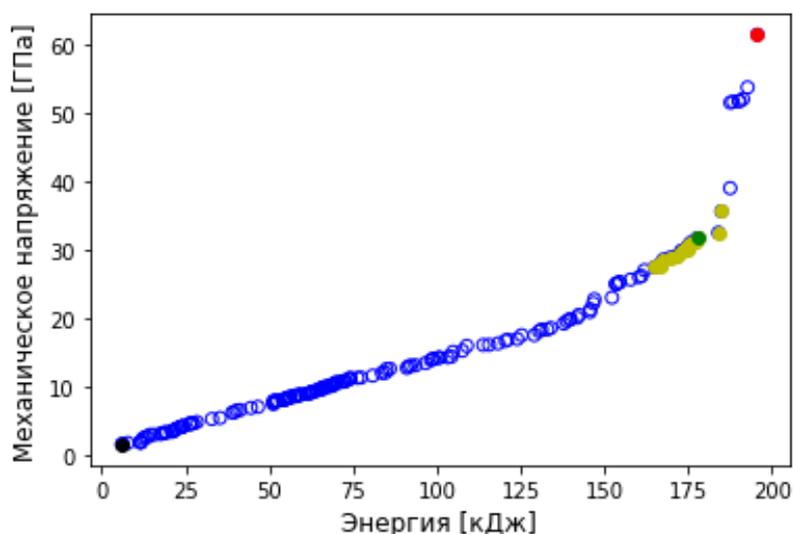


Рис. 10. Фронт Парето. Компромисс между энергией и механическим напряжением.

На приведенной кривой можно отметить три основные зоны. Первая зона соответствует изменению запасенной энергии от 5 кДж до 150 кДж. В этой области энергия быстро нарастает, в то время как механические напряжения изменяются относительно медленно. Вторая зона, которая расположена между 165 кДж, и 185 кДж характеризуется резким изменением угла наклона соответствующей зависимости. Последняя зона расположена между значениями энергии 185 кДж и 196 кДж. В этой последней области можно заметить очень быстрое увеличение

механических напряжений на фоне незначительного изменения накопленной энергии. Механическое напряжение почти удваивается, в то время как увеличение энергии составляет всего 6 %.

На рис. 10 красной точкой отмечено решение, соответствующее наибольшей накопленной энергии (195,73 кДж) и худшему значению механического напряжения (61,47 ГПа). С другой стороны, отмеченное черной точкой решение характеризуется наименьшим механическим напряжением (примерно 1,53 ГПа) и наихудшим значением накопленной энергии (5,98 кДж). В целом, результаты хорошо показывают, что механические напряжения на элементы катушки очень высоки при 20° К. Это определяется большим транспортным током (примерно в 50 раз превышающим ток при температуре 77° К), который, в свою очередь, создает сильное магнитное поле.

Таблица 5: Оптимальное решение и соответствующие основные параметры

Величина	Значения		
Энергия (кДж)	178,03		
Механическое напряжение (ГПа)	31,69		
Внутренние радиусы (мм)	223,01	185,94	191,74
Внешние радиусы (мм)	310,43	284,97	288,79
Длины ленты (м)	496	500	499
Расстояния между слоями (мм)	31,20	47,52	20,99
Количество витков	298	338	331
Высота (мм)	240,22		

Анализ приведенной зависимости позволяет сделать заключение, что наилучшее компромиссное решение находится в промежуточной зоне, расположенной между областью, характеризующейся быстрым ростом накопленной магнитной энергии, и областью, характеризующейся быстрым ростом механического напряжения на витки катушки. Таким образом, точки желтого цвета представляют собой наилучшие компромиссы, среди которых оптимальное решение, выбранное для этой проблемы, выделено зеленым цветом. В таблице 5 приведены основные параметры, соответствующие выбранному оптимальному решению.

Заключение

В диссертационной работе рассматриваются проблемы моделирования сверхпроводниковой катушки, предназначенной для сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии, и применение алгоритма фейерверков для решения проблем оптимизации такой катушки. Сформулируем основные выводы по работе.

1. Разработан новый подход к моделированию магнитных систем, созданных с использованием ВТСП 2-го поколения, и основанный на совместном решении интегрального уравнения электромагнитного поля и уравнения критического состояния материала сверхпроводника. Использование этого подхода позволяет определить распределения плотности тока и индукции магнитного поля в ленте ВТСП 2-го поколения.

2. Моделирование критических токов в катушках на основе ВТСП 2-го поколения показало, что полученные результаты совпадают с паспортным значением для 4-миллиметровых лент, выпускаемой компанией Superpower Inc. Их сравнение с экспериментальными и численными результатами, полученными другими авторами подтверждает корректность выполненного математического моделирования.
3. Исследованы зависимости критического тока от геометрических параметров катушки и выбранных параметров модели критического состояния. Показано, что величина критического тока существенно зависит от количества витков и диаметра катушки.
4. Показано, что критический ток обмотки, выполненной из ВТСП ленты 2-го поколения, может значительно отличаться в меньшую сторону от критического тока короткого образца. Степень деградации критического тока может достигать уровня в 20% - 40% и зависит от геометрии обмотки.
5. Исходя из предлагаемого подхода, разработаны математические модели расчета накопленной магнитной энергии и механических напряжений в элементах сверхпроводниковой катушки.
6. Выполнена оптимизация конструкции сверхпроводниковой катушки с использованием относительно недавно предложенного метода фейерверков. Предложено улучшение соответствующего алгоритма в части применения новой стратегии отбора перспективных искр. По сравнению с генетическим алгоритмом и классическим алгоритмом фейерверков, новая стратегия отбора обладает более быстрой сходимостью.
7. Задачи оптимизации сверхпроводниковой катушки сформулированы и решены для двухслойной, четырехслойной и шестислойной катушек на основе применения модифицированного метода фейерверков при рабочих температурах 77° К и 20° К. Результаты решений показывают, что при увеличении количества слоев обмотки в 2 – 3 раза запасенная энергия магнитного поля увеличивается в 3.3 – 5.5 раз.
8. Проведена двухцелевая оптимизация конструкции шестислойной сверхпроводниковой катушки при рабочей температуре 20° К с помощью генетического алгоритма недоминантной сортировки второго поколения (далее NSGA-II), реализованного в известном фреймворке ruToo на языке программирования Python. Результаты показывают, что механические напряжения на элементы катушки очень высоки при 20° К и практически не могут быть меньше. 1,53 ГПа в случае шестислойной катушки. Оптимальное компромиссное решение дает накопленную магнитную энергию, равную 178,03 кДж, и максимальное механическое напряжение в проводнике около 31,69 ГПа.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Govor Vladislav M., Kalimov Alexander G., Bagan Steve, Kobzar Evgenii N., Mannanov Emil R. Numerical Simulation of Frequency-dependent AC Transport Losses in HTS 2G Tape with Copper Stabilizer. Proceedings of 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2022 ElConRus), 2022. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755604 (**SCOPUS**)
2. Калимов А. Г., Баган С., Говор В. М. Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии // Глобальная энергия. 2022. Т. 28. № 3. С. 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301. (**ВАК**)
3. Говор В. М., Калимов А. Г., Баган С. Моделирование распределений магнитного поля и плотности тока в сверхпроводниковых индуктивных накопителях энергии // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2022. Т. 2. № 87. С. 94–102. (**ВАК**)
4. Баган Г.С.С., Калимов А.Г. Применение алгоритма фейерверков для оптимизации конструкции двухслойного сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 96–109. DOI: 10.18721/JEST.29104 (**ВАК**)
5. Баган С., Важнов С.А., Калимов А.Г., Миневиц Т.Г. Оптимизация конструкции сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии для систем возобновляемой энергетики. // Современные достижения научно-технического прогресса. 2023. Т. 8. № 3 С. 5-8. DOI: 10.18411/sdntp-05-2023-01.
6. Steve Bagan, Alexander Kalimov, Sergey Vazhnov. Definition of Critical Currents in Superconducting Magnetic Energy Storage Systems. (ISEPC-2021). (**SCOPUS**). (В печати).
7. G. S. S. Bagan, A. G. Kalimov, V. M. Govor, M. R. Aza-Gnandji, Application of the fireworks algorithm to the superconducting coil design for magnetic energy storage system, ElConRus - 2023. (**SCOPUS**). (В печати).
8. G. S. S. Bagan, M. R. Aza-Gnandji, A. G. Kalimov, M. Kple, Multi-objective Optimization of 2G-HTS Coil for Magnetic Energy Storage System Using NSGA-II Algorithm, AFRICON - 2023. (**SCOPUS**). (В печати).