

Научная статья

УДК 621.3.013.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29104>



Г.С.С. Баган ✉, *А.Г. Калимов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ bagan307@yahoo.fr

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ФЕЙЕРВЕРКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ


Аннотация. В статье рассматривается задача оптимизации параметров конструкции двухслойной катушки, предназначенной для использования в сверхпроводниковом индуктивном накопителе энергии. Постановка соответствующей задачи предполагает поиск максимальной запасенной энергии магнитного поля при фиксированной длине сверхпроводниковой ленты второго поколения при температурах 22° К и 77° К. Используемый метод оптимизации основан на применении алгоритма фейерверков с улучшенной стратегией выбора промежуточных решений. Запасенная энергия накопительной системы рассчитывается за счет совместного решения интегрального уравнения магнитного поля и уравнения критического состояния сверхпроводникового материала. Серия численных экспериментов была проведена с целью сопоставления основных характеристик предлагаемой стратегии реализации алгоритма фейерверков с альтернативными оптимизационными технологиями, включая традиционную реализацию этого метода, а также, генетического алгоритма.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, высокотемпературные сверхпроводники второго поколения, критический ток, сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии, алгоритм оптимизации фейерверков.

Для цитирования:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.29104>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29104>G.S.S. Bagan , A.G. KalimovPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia bagan307@yahoo.fr

APPLICATION OF THE FIREWORKS ALGORITHM FOR DESIGN OPTIMIZATION OF DOUBLE PANCAKE SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICE

Abstract. The article deals with optimization problem of double pancake coil design parameters, intended for superconducting magnetic energy storage system. The corresponding problem formulation involves the search for the maximum stored energy of magnetic field for fixed length of second generation superconducting tape at temperatures of 22° K and 77° K. The optimization method used is based on fireworks algorithm with an improved selection strategy for choosing intermediate solutions. The stored energy of the storage system is determined by jointly solving integral equation of magnetic field and the equation of critical state of superconducting material. A series of numerical experiments was carried out in order to compare the main characteristics of the proposed strategy for implementing the fireworks algorithm with alternative optimization technologies, including the traditional implementation of this method, as well as the genetic algorithm.

Keywords: renewable energy, second-generation high-temperature superconductors, critical current, superconducting magnetic energy storage, fireworks optimization algorithm.

Citation:

G.S.S. Bagan, A.G. Kalimov, Application of the fireworks algorithm for design optimization of double pancake superconducting inductive energy storage device, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 96–109, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29104>

Введение. В последнее время значительное развитие во всем мире получили системы возобновляемой энергетики, в том числе солнечные и ветровые электростанции. Интеграция таких систем в электрические сети осложняется из-за нестабильности генерируемой электроэнергии, мощность которой критически зависит от погодных условий [1]. Для сглаживания колебаний мощности в общую структуру систем возобновляемой энергетики вводятся накопители энергии, использующие различные технические решения. Одним из наиболее перспективных направлений решения этой проблемы является разработка и создание сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН) [2, 3]. По сравнению с альтернативными техническими решениями СПИН характеризуется высокой плотностью запасаемой энергии, малыми потерями, длительным сроком службы и быстрой реакцией на изменяющиеся условия эксплуатации. Особенностью конструкции СПИН является необходимость охлаждения сверхпроводникового материала до криогенных температур. С появлением высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП 2-го поколения) появилась возможность создания относительно недорогих сверхпроводниковых накопителей, работающих при температурах порядка 80° K и выше [4–7]. Это позволяет охлаждать сверхпроводники жидким азотом и, следовательно, существенно снизить стоимость криогенной системы по сравнению со сверхпроводниковыми накопителями, для функционирования которых нужны существенно более низкие температуры (< 20° K).

Одним из существенных шагов в разработке сверхпроводниковой накопительной системы является оптимизация ее геометрических параметров. Методы стохастической оптимизации наиболее подходят для проектирования сложных электротехнических систем [8, 9], к которым относятся сверхпроводящие катушки, входящие в состав СПИНа. Наиболее популярными на сегодняшний день стохастическими методами оптимизации таких систем являются имитация отжига и генетический алгоритм [6, 10]. В данной статье для оптимизации конструкции двухслойной сверхпроводниковой катушки предлагается использовать относительно новый подход, основанный на алгоритме фейерверков.

Формулировка проблемы

Первым шагом в разработке СПИНа является выбор типа конфигурации катушек. С этих позиций обычно рассматриваются два варианта – тороидальные и соленоидальные системы. Первый из них теоретически обладает большей эффективностью благодаря низкому уровню полей рассеяния. Однако, на практике создание таких обмоток сопряжено с необходимостью решения сложных технологических проблем и приводит к резкому росту стоимости продукции. Поэтому наиболее перспективной в настоящее время считается соленоидальная конфигурация сверхпроводниковых катушек СПИНа.

Для оптимизации сверхпроводниковых катушек в литературе, в основном, упоминаются три подхода: минимизация объема обмотки катушки при заданной накопленной энергии [4, 5], минимизация общей длины требуемой ленты [6, 11] или максимизация накопленной энергии при фиксированной длине сверхпроводниковой ленты [7]. В настоящей статье мы используем последний из перечисленных подходов. Его предпочтительность связана с тем, что промышленно выпускаемые ленты 2-го поколения имеют фиксированную предельную длину.

Накопленная энергия, в сверхпроводящей катушке, может быть рассчитана по формуле (1)

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

где V – объём катушки, $A(M)$ и $J(M)$ – соответственно векторный магнитный потенциал и плотность тока в точке M в катушке.

Рассмотрим двухслойную сверхпроводниковую катушку, намотанную лентой на основе оксида иттрия-бария-меди (YBCO) длиной L , как это показано на рис. 1а. Ее поперечное сечение показано на рис. 1б.

Вследствие цилиндрической симметрии рассматриваемой системы вектора плотности тока и векторного магнитного потенциала имеют только одну угловую компоненту. В процессе моделирования магнитных полей в этой системе 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 (1) можно аппроксимировать суммой (2):

$$W = \sum_k \pi r A_k J_k \Delta r \Delta z, \quad (2)$$

где Δr и Δz – размеры каждой ячейки. Плотность тока J_k в каждом элементе ограничена критической плотностью, которая, в свою очередь, зависит от величины и направления вектора индукции магнитного поля B_k в этом элементе. Связь между этими двумя характеристиками определяется моделью критического состояния сверхпроводника [12]. Для сверхпроводниковых лент 2-го поколения обычно используют модифицированную модель Кима, учитывающую свойства анизотропии, которая характерна для подобных материалов [13]. Эта модель является эмпири-

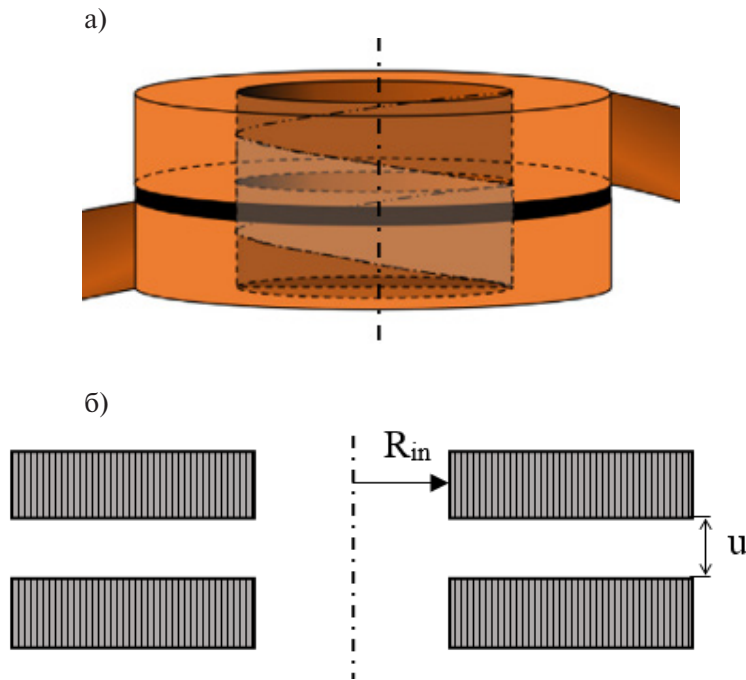


Рис. 1. а) Двухслойная сверхпроводниковая катушка;
б) Поперечное сечение двухслойной сверхпроводниковой катушки

Fig. 1. a) Double layer superconducting coil; b) Cross section of a double-layer superconducting coil

ческой, ее параметры определяются на основе экспериментальных исследований и зависят как от типа используемого сверхпроводникового материала, так и от технологических особенностей процесса изготовления ленты [14].

$$J_c(\mathbf{B}) = J_{c0} \frac{B_0}{B_0 + |B_{\perp}|}, \quad (3)$$

здесь $J_{c0} = 6,58 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $B_0 = 1,49 \text{ Тл}$ при температуре 22° К и $J_{c0} = 1,11 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $B_0 = 0,12 \text{ Тл}$ при температуре 77° К . B_{\perp} является компонентой индукции магнитного поля, перпендикулярной к поверхности ленты.

Очевидно, что максимальная энергия, которую может накапливать сверхпроводниковая катушка, зависит от распределения плотности тока по объему катушки. Существуют различные вычислительные технологии для определения этой зависимости. Различают подходы к решению этой задачи, основанные на решении системы дифференциальных уравнений электромагнитного поля (Н-φ, А-V, Т-А и Н- формулировки) [15–17] и подход, основанный на интегральном методе представления характеристик магнитного поля [18]. В данной статье для определения распределения тока в сверхпроводящей катушке использовался второй из них. Распределение плотности тока в этом случае определяется однозначно и не требует расчета переходного процесса в сверхпроводниковой системе, что необходимо при реализации дифференциальных методов. Основной идеей интегрального метода расчета критического тока является совместное решение уравнения критического состояния (3) и интегрального уравнения Био-Савара (4):

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV. \quad (4)$$

После получения распределения плотности тока производится расчет энергии, запасенной в магнитном поле катушки. Общее время вычислений существенно зависит от количества витков катушки индуктивности. Оно меняется в пределах от 30 с до 160 с для двухслойной катушки в зависимости от величины ее внутреннего радиуса. Указанная особенность процедуры поиска целевой функции затрудняет применение подходов, основанных на равномерном исследовании области определения параметров задачи. Сложность решаемой задачи и очевидная некорректность операции численного дифференцирования целевой функции объясняют целесообразность использования метода стохастической оптимизации. В пользу этого выбора свидетельствует, также, то обстоятельство, что исследуемая функция имеет несколько локальных экстремумов в области поиска параметров задачи. В предлагаемой работе для решения поставленной задачи выбран активно развивающийся в настоящее время, обладающий высокой эффективностью, метод фейерверков [19–21].

Описание алгоритма фейерверков

Алгоритм фейерверков хорошо известен своей простотой реализации и эффективностью в решении задач оптимизации в электротехнике. Впервые он был предложен в 2010 году Тань Ин и Чжу Юаньчунем [22–24]. В основе этого итерационного метода лежит набор операций, имитирующих явление фейерверков, включая генерацию искр во время взрыва, мутацию фейерверков, отбор лучших наборов искр для следующей итерации. Сначала N фейерверков выбираются случайным образом в пределах пространства поиска; затем в результате их взрывов генерируется новый набор искр, качество каждой из которых оценивается по величине целевой функции, зависящей от ее координат. Каждая искра затем порождает новый фейерверк. На каждой итерации осуществляется выбор N новых искр из набора исходных фейерверков и сгенерированных в результате их взрывов искр на основе специально сформированной стратегии отбора. На этом этапе некоторые искры ‘мутируют’ – их координаты принудительно изменяются, минуя процедуру взрыва. В целом алгоритм фейерверков характеризуется четырьмя основными операциями: взрыв, мутация, масштабирование и отбор.

Оператор взрыва. Взрыв является основной операцией и направлен на создание нескольких искр, имитирующих явление фейерверков. Когда фейерверк взрывается, вокруг него появляется множество мелких осколков (искр). Фейерверк или искра считаются относительно плохими, если значение их целевых функций близко к наихудшему значению этой величины Y_{\max} . В этой ситуации при большей амплитуде взрыва вокруг него будет генерироваться меньшее количество искр. Аналогично фейерверк или искра считаются относительно хорошими, если значение их целевой функции близко к наилучшему значению Y_{\min} . В этом случае вокруг точки взрыва будет генерироваться больше искр с меньшей амплитудой разлета [24]. Амплитуда A_i и количество искр S_i определяются оператором взрыва соответственно формулами (5) и (6).

$$A_i = \hat{A} \frac{f(x_i) - Y_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - Y_{\min}) + \varepsilon}; \quad (5)$$

$$S_i = m \frac{Y_{\max} - f(x_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (Y_{\max} - f(x_i)) + \varepsilon}, \quad (6)$$

где \hat{A} и m – параметры, управляющие амплитудой взрыва и количеством искр соответственно. Y_{\min} и Y_{\max} представляют собой наилучшее и наихудшее значения целевой функции соот-

ветственно, N – количество фейерверков, $f(x_i)$ – значение целевой функции фейерверка x_i , а параметр ε – наименьшая константа компьютера, которая используется для предотвращения обнуления знаменателя. В оригинальном методе фейерверков вводятся ограничения на количество искр, генерируемых в момент взрыва. Они определяются соотношениями (7).

$$\begin{cases} S_i = a & \text{if } S_i < a \\ S_i = b & \text{if } S_i > b \\ S_i = \text{round}(S_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь a и b – константы, которые, соответственно, фиксируют минимальное количество искр и максимальное количество искр и $\text{round}()$ – операция округления к ближайшему целому.

Форма или качество фейерверка определяется количеством искр по отношению к амплитуде. Фейерверк обладает более высоким качеством, если он генерирует большее количество искр в меньшем по объему пространстве. Поиск оптимума обычно осуществляется путем соединения двух стратегий: разведка и эксплуатация. Разведка заключается в поиске неизведанных областей, это выполняется, например, путем случайного выбора переменных, определяющих генерацию искр. Эксплуатация заключается в активизации исследований в потенциально перспективном регионе. Разведка позволяет получить неточную локализацию глобального оптимума, в то время как эксплуатация уточняет это решение, повышая точность оптимума. При реализации алгоритма фейерверков устанавливается баланс между возможностями разведки и эксплуатации за счет увеличения либо уменьшения амплитуд взрыва соответственно. Таким образом, увеличение амплитуды взрыва позволяет выйти из области локального экстремума, а уменьшение амплитуды взрыва способствует усилению локального поиска в перспективных областях.

Оператор мутации позволяет лучше диверсифицировать популяцию искр. Его основная идея заключается в том, чтобы случайным образом изменить набор координат случайно выбранного фейерверка. Это дает возможность исследовать области, в которых по каким-то причинам не оказалось искр от предыдущих взрывов.

Масштабирование. Этот оператор необходим для возвращения в реальное пространство искр, образующихся в ходе взрывов, которые выходят за границы рабочего пространства.

Отбор. Именно на основе этой операции алгоритм отбирает искры нового поколения. Классическая стратегия отбора заключается, во-первых, в том, чтобы сохранить лучшую искру для следующего поколения. Во-вторых, другие искры для нового поколения выбираются с использованием стратегии, основанной на расстоянии между ними, чтобы дать больше шансов на выбор искр, наиболее удаленных от области их основной концентрации. Вероятность отбора каждой искры в классическом алгоритме фейерверков x_i равна:

$$p(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{x_j \in K} R(x_j)}, \quad (8)$$

где $R(x_i) = \sum_{j=1}^K s(x_i, x_j) = \sum_{j=1}^K \|x_i - x_j\|$ обозначает сумму расстояний между искрой x_i и другими искрами x_j . K – совокупность искр, генерируемых оператором взрыва и оператором мутации.

Для повышения эффективности метода фейерверков мы ввели новый параметр N_{best} в стратегию отбора наиболее перспективных искр. Если N – это общее количество искр, выбранных для следующего поколения, то N_{best} – это количество первых лучших искр. В этом случае

$N - N_{best}$ равно количеству искр, выбираемых стратегией расстояния. Параметр N_{best} вычисляется на каждой итерации по формуле (9). Он изменяется от единицы до максимального значения Max_{best} в зависимости от номера итерации таким образом, чтобы расставить приоритеты для разведки на первых итерациях и способствовать эксплуатации на последних итерациях. Цель состоит в том, чтобы активизировать исследования вокруг лучших искр по мере роста номера итерации.

$$N_{best} = \text{round} \left(1 + \frac{Max_{best} - 1}{Max_{iteration}} \cdot It \right). \quad (9)$$

Здесь Max_{best} – желаемое максимальное количество первых лучших искр, I_t – номер текущей итерации и $Max_{iteration}$ – максимальное количество итераций.

Результаты

Для проведения теоретических исследований свойств сверхпроводниковой катушки была выбрана лента SCS12040, произведенная компанией SuperPower Inc. Эта компания производит ленты стандартной длины от 200 до 500 м [25]. Была проведена оптимизация геометрии катушки на основе алгоритма фейерверков с новой стратегией выбора при рабочих температурах катушки 22° К и 77° К. В зависимости от рабочих температур и минимальной и максимальной стандартной длины, было проведено моделирование четырех различных вариантов СПИН:

1. двухслойная катушка, работающая при температуре 22° К, намотанная сверхпроводниковой лентой длиной 200 м;
2. двухслойная катушка, работающая при температуре 22° К, намотанная сверхпроводниковой лентой длиной 500 м;
3. двухслойная катушка, работающая при температуре 77° К, намотанная сверхпроводниковой лентой длиной 200 м;
4. двухслойная катушка, работающая при температуре 77° К, намотанная сверхпроводниковой лентой длиной 500 м.

Критерием остановки при проведении серии вычислений было выбрано количество итераций, равное 10. В табл. 1 приведены результаты, полученные для каждого из перечисленных выше вариантов. Установлено, что оптимальные радиус и расстояние между слоями не постоянные, но зависят от условий моделирования, то есть от полной длины ленты и рабочей температуры.

Таблица 1

Оптимальные значения в каждом случае

Table 1

Optimal values in each case

Оптимальные значения	1-й случай	2-й случай	3-й случай	4-й случай
Накопленная энергия [Дж]	3433,90	13595,59	67,93	265,94
Внутренний радиус [мм]	81,15	96,61	89,78	117,78
Расстояние между слоями [мм]	9,88	17,21	11,41	19,94

Результаты расчетов, приведенные в таблицах, показывают, что максимальная энергия, запасенная при температуре 22° К, примерно в 50 раз выше, чем энергия, запасенная при 77° К. Однако, на практике необходимо принимать во внимание соотношение стоимостей криогенных систем для этих двух случаев. Температура в 77° К достигается за счет охлаждения катушки относид

тельно дешевым жидким азотом, в то время как, для достижения температуры в 22°K требуются дорогостоящие и энергоемкие криогенераторы, либо взрывоопасный жидкий водород.

Сравнение результатов оптимизации, проведенное для сверхпроводниковых лент различной длины показывает, что запасенная энергия растет почти квадратично с увеличением этой характеристики. Такая зависимость далеко неочевидна, поскольку максимально допустимое магнитное поле в сверхпроводниковых системах ограничено величиной критической индукции, и критический ток в катушке, следовательно, уменьшается с ростом количества витков в ней.

Обсуждение результатов

Для оценки эффективности модифицированного метода фейерверков (ММФ) было проведено его сравнение с классической формулировкой метода фейерверков (КМФ) и с генетическим алгоритмом (ГА). Сопоставление получаемых результатов проводилось на основе модели, предполагающей рабочую температуру 77°K и длину сверхпроводниковой ленты 500 м. На рис. 2 приведены результаты расчета оптимального значения запасенной энергии при использовании трех вышеуказанных методов оптимизации. Видно, что модифицированный алгоритм фейерверков, предлагаемый в настоящей статье, обладает наиболее быстрой сходимостью.

Чтобы оценить, с одной стороны, эффективность классического метода фейерверков по сравнению с генетическим алгоритмом, а с другой – влияние предлагаемой новой стратегии отбора на поиск решения, анализируется совокупность результатов, полученных в серии численных экспериментов. С этой целью пять раз выполняется 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 табл. 2 представлены оптимальные энергии, среднее значение, стандартное отклонение серии экспериментов каждого алгоритма, включая предлагаемый новый модифицированный метод фейерверков. Анализ рис. 2 показывает, что оба алгоритма фейерверков в процессе выполнения десяти итераций дают гораздо 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 выбора перспективных искр расширяет область оптимальных значений.

Таблица 2

Оптимальные энергии при применении различных оптимизационных алгоритмов

Table 2

Optimal energies using various optimization algorithms

	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

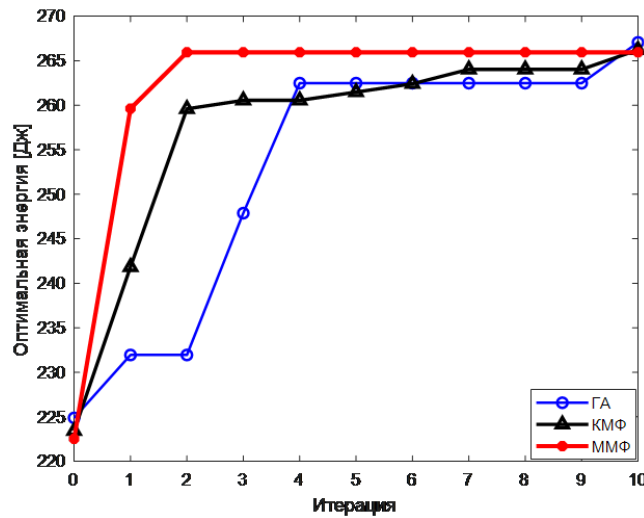


Рис. 2. Эволюция оптимального значения для различных алгоритмов
 Fig. 2. Optimal value evolution during execution of each algorithm

Количество оценок и время выполнения, при каждой симуляции представлены на табл. 3.

Таблица 3

Количество оценок и время выполнения для различных оптимизационных алгоритмов

Table 3

Number of evaluations and execution time for various optimization algorithms

	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

Табл. 4 представляет скорости оценок каждой симуляции, среднее значение, стандартное отклонение каждого алгоритма. Здесь параметр "скорость оценок" представляет собой отношение количества оценок каждой симуляции ко времени выполнения. Видно, что этот параметр для предлагаемой здесь новой стратегии выбора перспективных искр как минимум вдвое выше, чем у других алгоритмов.

Как отмечалось выше, время расчета запасенной накопительной системой энергии сильно зависит от внутреннего радиуса катушки. Поиск оптимума в областях с небольшим радиусом требует значительных затрат времени. Именно этим объясняется сравнительно большое время выполнения оптимизационных расчетов в случае применения генетического алгоритма. 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.

Таблица 4

Скорости оценок для различных оптимизационных алгоритмов

Table 4

Evaluation rates for various optimization algorithms

	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

Заключение

Оптимизация параметров конструкции сверхпроводниковой катушки является ключевым этапом разработки СПИН. В предлагаемой работе эта задача решается для двухслойной катушки путем применения алгоритма фейерверков с новой стратегией выбора перспективных искр на каждой итерации оптимизационной процедуры. Энергия магнитного поля, запасаемая сверхпроводниковым накопителем и используемая в качестве целевой функции оптимизации, существенно зависит от распределения плотности тока в катушке. Эта взаимосвязь моделируется на основе интегрального метода, предложенного авторами в статье [18]. Разработанная оптимизационная процедура была применена для решения ряда модельных задач применительно к двухслойным сверхпроводниковым катушкам. В качестве параметров оптимизации принимались внутренний радиус обмотки и расстояние между слоями. В одном из вариантов была получена накопленная энергия СПИН, равная 13,6 кДж для сверхпроводниковой ленты длиной 500 м. В серии численных экспериментов проведен анализ эффективности предлагаемого модифицированного алгоритма фейерверков. Для этого проведено его сравнение, с одной стороны, с генетическим методом оптимизации, а с другой – с алгоритмом фейерверков с классической стратегией отбора наиболее перспективных искр. Полученные результаты показали, что алгоритм фейерверков с новой предлагаемой стратегией выбора наиболее перспективных искр быстрее сходится к области глобального экстремума и сокращает время поиска оптимального результата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Chawda G.S., Shaik A.G., Shaik M., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B., Mahela O.P., Kaliannan P. Comprehensive review on detection and classification of power quality disturbances in utility grid with renewable energy penetration, IEEE Access, 8 (2020) 146807–146830. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014732
- [2] Chen L., Chen H., Li Y., Li G., Yang J., Liu X., Xu Y., Ren L., Tang Y. SMES-battery energy storage system for stabilization of a photovoltaic-based microgrid, IEEE Trans. Appl. Supercond., 28 (4) (2018) 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2018.2799544

- [3] **Mukherjee P., Rao V.V.** Superconducting magnetic energy storage for stabilizing grid integrated with wind power generation systems, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 7 (2) (2019) 400–411. DOI: 10.1007/s40565-018-0460-y
- [4] **Yanbo C., Cheng K.W.E.** The optimal parameters design of HTS-SMES magnets, 2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, (2006) 126–131. DOI: 10.1109/PE-SA.2006.343084
- [5] **Xinjie Y., Ming S.** Optimization design of SMES solenoids considering the coil volume and the magnet volume, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18 (2) (2008) 1517–1520. DOI: 10.1109/TASC.2008.921968
- [6] **Sun Q., Zhang Z., Lin L., Qiu Q., Liu D., Zhang G., Dai S.** Design method of SMES magnet considering inhomogeneous superconducting properties of YBCO tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 24 (3) (2014) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2014.2304241
- [7] **Hekmati A., Hekmati R.** Double pancake superconducting coil design for maximum magnetic energy storage in small scale SMES systems, *Cryogenics (Guildf.)*, 80 (2016) 74–81. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.09.009
- [8] **Коровкин Н.В., Потиеенко А.А.** Использование генетического алгоритма для решения задач электротехники // *Электричество*. 2002. Т. 11. С. 2–15.
- [9] **Shehata A.A., Refaat A., Ahmed M.K., Korovkin N.V.** Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups Particle Swarm Optimization technique, *Arch. Electr. Eng.*, 70 (1) (2021) 161–172. DOI: 10.24425/ae.2021.136059
- [10] **Zhou X., Tang Y., Jing S., Zhang C., Gong K., Zhang L., Li Y.** Cost estimation models of MJ class HTS superconducting magnetic energy storage magnets, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28 (4) (2018) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2821363
- [11] **Zimmermann A.W., Sharkh S.M.** Design of a 1 MJ / 100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, *Energy Reports*, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023
- [12] **Yu D., Liu H., Zhang X., Gong T.** Critical current simulation and measurement of second generation, high-temperature superconducting coil under external magnetic field, *Materials (Basel)*, 11 (3) (2018) 339. DOI: 10.3390/ma11030339
- [13] **Robert B.C., Fareed B.C., Ruiz H.S.** How to choose the superconducting material law for the modelling of 2G-HTS coils, *Materials (Basel)*, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [14] **Yuan W.** Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage. Springer London, London (2011). <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-742-6>
- [15] **Arsenault A., Sirois F., Grilli F.** Implementation of the H- ϕ Formulation in COMSOL Multiphysics for simulating the magnetization of bulk superconductors and comparison with the H-formulation, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021) 1–11. DOI: 10.1109/TASC.2020.3033998
- [16] **Musso A., Breschi M., Ribani P.L., Grilli F.** Analysis of AC loss contributions from different layers of HTS tapes using the A-V formulation model, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021) 1–11. DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [17] **Баган С., Говор В.М., Калимов А.Г.** Моделирование распределений магнитного поля и плотности тока в сверхпроводниковых индуктивных накопителях энергии // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. 2022. Т. 2. № 87. С. 94–102.
- [18] **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
- [19] **Imran A.M., Kowsalya M.** A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 62 (2014) 312–322. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034
- [20] **Zhang Q., Liu H., Dai C.** Fireworks explosion optimization algorithm for parameter identification of PV model, 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), (2016) 1587–1591. DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512529

- [21] **Shi Y., Yan Y., Liu Y.** Research on optimized reconfiguration of distribution network based on improved fireworks Algorithm, Proceedings – 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) (2020) 70–74, DOI: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136513
- [22] **Tan Y., Zhu Y.** Fireworks algorithm for optimization, Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2010. Lecture Notes in Computer Science, 6145 (2010) 355–364. DOI: 10.1007/978-3-642-13495-1_44
- [23] **Li X-G., Han S-F., Gong C-Q.** Analysis and improvement of fireworks algorithm, Algorithms, 10 (1) (2017). DOI: 10.3390/a10010026
- [24] **Li J., Tan Y.** A comprehensive review of the fireworks algorithm, ACM Comput. Surv., 52 (6) (2019) 1–28. DOI: 10.1145/3362788
- [25] SuperPower Inc. 2G HTS Wire Specification. Режим доступа: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>. (дата обращения: 10.11.2022)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАГАН Гонtrand Стев Седжро – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: bagan307@yahoo.fr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-5525>

КАЛИМОВ Александр Гелиевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

REFERENCES

- [1] **G.S. Chawda, A.G. Shaik, M. Shaik, S. Padmanaban, J.B. Holm-Nielsen, O.P. Mahela, P. Kaliannan,** Comprehensive review on detection and classification of power quality disturbances in utility grid with renewable energy penetration, IEEE Access, 8 (2020) 146807–146830. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014732
- [2] **L. Chen, H. Chen, Y. Li, G. Li, J. Yang, X. Liu, Y. Xu, L. Ren, Y. Tang,** SMES-battery energy storage system for stabilization of a photovoltaic-based microgrid, IEEE Trans. Appl. Supercond., 28 (4) (2018) 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2018.2799544
- [3] **P. Mukherjee, V.V. Rao,** Superconducting magnetic energy storage for stabilizing grid integrated with wind power generation systems, J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 7 (2) (2019) 400–411. DOI: 10.1007/s40565-018-0460-y
- [4] **C. Yanbo, K.W.E. Cheng,** The optimal parameters design of HTS-SMES magnets, 2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, (2006) 126–131. DOI: 10.1109/PE-SA.2006.343084
- [5] **Y. Xinjie, S. Ming,** Optimization design of SMES solenoids considering the coil volume and the magnet volume, IEEE Trans. Appl. Supercond., 18 (2) (2008) 1517–1520. DOI: 10.1109/TASC.2008.921968
- [6] **Q. Sun, Z. Zhang, L. Lin, Q. Qiu, D. Liu, G. Zhang, S. Dai,** Design method of SMES magnet considering inhomogeneous superconducting properties of YBCO tapes, IEEE Trans. Appl. Supercond., 24 (3) (2014) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2014.2304241
- [7] **A. Hekmati, R. Hekmati,** Double pancake superconducting coil design for maximum magnetic energy storage in small scale SMES systems, Cryogenics (Guildf)., 80 (2016) 74–81. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.09.009
- [8] **N.V. Korovkin, A.A. Potiyenko,** Ispolzovaniye geneticheskogo algoritma dlya resheniya zadach elektrotehniki // Elektrichestvo. 2002. T. 11. S. 2–15.

- [9] **A.A. Shehata, A. Refaat, M.K. Ahmed, N.V. Korovkin**, Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups Particle Swarm Optimization technique, *Arch. Electr. Eng.*, 70 (1) (2021) 161–172. DOI: 10.24425/ae.2021.136059
- [10] **X. Zhou, Y. Tang, S. Jing, C. Zhang, K. Gong, L. Zhang, Y. Li**, Cost estimation models of MJ class HTS superconducting magnetic energy storage magnets, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28 (4) (2018) 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2821363
- [11] **A.W. Zimmermann, S.M. Sharkh**, Design of a 1 MJ / 100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage, *Energy Reports*, 6 (5) (2020) 180–188. DOI: 10.1016/j.egy.2020.03.023
- [12] **D. Yu, H. Liu, X. Zhang, T. Gong**, Critical current simulation and measurement of second generation, high-temperature superconducting coil under external magnetic field, *Materials (Basel)*, 11 (3) (2018) 339. DOI: 10.3390/ma11030339
- [13] **B.C. Robert, M.U. Fareed, H.S. Ruiz**, How to choose the superconducting material law for the modeling of 2G-HTS coils, *Materials (Basel)*, 12 (7) (2019) 1–19. DOI: 10.3390/ma12172679
- [14] **W. Yuan**, *Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage*. Springer London, London (2011). <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-742-6>
- [15] **A. Arsenault, F. Sirois, F. Grilli**, Implementation of the H- ϕ Formulation in COMSOL Multiphysics for simulating the magnetization of bulk superconductors and comparison with the H-formulation, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021) 1–11. DOI: 10.1109/TASC.2020.3033998
- [16] **A. Musso, M. Breschi, P.L. Ribani, F. Grilli**, Analysis of AC loss contributions from different layers of HTS tapes using the A-V formulation model, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (2) (2021) 1–11. DOI: 10.1109/TASC.2020.3033587
- [17] **S. Bagan, V.M. Govor, A.G. Kalimov**, Modelirovaniye raspredeleniy magnitnogo polya i plotnosti toka v sverkhprovodnikovykh induktivnykh nakopitelnykh energii // *Izvestiya NTTs Yedinoy energeticheskoy sistemy*. 2022. T. 2. № 87. S. 94–102.
- [18] **A.G. Kalimov, S. Bagan, V.M. Govor**, Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems, *Global Energy*, 28 (3) (2022) 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301
- [19] **A.M. Imran, M. Kowsalya**, A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 62 (2014) 312–322. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034
- [20] **Q. Zhang, H. Liu, C. Dai**, Fireworks explosion optimization algorithm for parameter identification of PV model, 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), (2016) 1587–1591. DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512529
- [21] **Y. Shi, Y. Yan, Y. Liu**, Research on optimized reconfiguration of distribution network based on improved fireworks Algorithm, *Proceedings – 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)* (2020) 70–74, DOI: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136513
- [22] **Y. Tan, Y. Zhu**, Fireworks algorithm for optimization, *Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2010. Lecture Notes in Computer Science*, 6145 (2010) 355–364. DOI: 10.1007/978-3-642-13495-1_44
- [23] **X-G. Li, S-F. Han, C-Q. Gong**, Analysis and improvement of fireworks algorithm, *Algorithms*, 10 (1) (2017). DOI: 10.3390/a10010026
- [24] **J. Li, Y. Tan**, A comprehensive review of the fireworks algorithm, *ACM Comput. Surv.*, 52 (6) (2019) 1–28. DOI: 10.1145/3362788
- [25] SuperPower Inc. 2G HTS Wire Specification. Rezhim dostupa: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>. (data obrashcheniya: 10.11.2022)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gontrand S.S. BAGAN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: bagan307@yahoo.fr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-5525>

Alexander G. KALIMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

Поступила: 05.02.2023; Одобрена: 01.03.2023; Принята: 20.03.2023.

Submitted: 05.02.2023; Approved: 01.03.2023; Accepted: 20.03.2023.