

УДК 537.613
 DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-22-37

Моделирование градиентных гипомагнитных полей на базе квадратных катушек Гельмгольца^{*}

М. С. Емельянова, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. А. Мурашов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Катушки Гельмгольца широко применяются для создания управляемых магнитных полей в задачах калибровки магнитометров, тестирования электромагнитных систем, экспериментах по исследованию свойств материалов и биотестированию. Существующие ограничения области однородности магнитных полей создают трудности для реализации экспериментальных исследований. Использование многоуровневых генераторов с регулировкой токов в катушках позволяет формировать градиентные поля, что ускоряет биотестирование и повышает его точность. Работа посвящена моделированию градиентных гипомагнитных полей с использованием квадратных катушек Гельмгольца. В COMSOL Multiphysics 6.1 разработана конечно-элементная модель для анализа магнитных полей, создаваемых катушками с постоянным током во взаимодействии с внешним магнитным полем Земли. Исследованы закономерности формирования полей при различных ориентациях катушек относительно углов склонения и наклона вектора напряженности магнитного поля. Проведены исследования закономерности формирования градиентных гипомагнитных полей в пространстве между квадратными катушками Гельмгольца, размещенными во внешнем магнитном поле Земли, с использованием конечно-элементного моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics. Исследовано влияние токов в катушках на распределение напряженности гипомагнитного поля в пространстве и вдоль оси. Получены зависимости информативных параметров градиентной кривой напряженности гипомагнитного поля от значения токов в катушках, позволяющие построить управляющие функции токами в квадратных катушках Гельмгольца для формирования многоуровневых полей с регулируемым коэффициентом ослабления. Результаты численного моделирования, выполненного для случаев равномерного и градиентного распределения магнитных полей, получили экспериментальное подтверждение. Проведенные натурные эксперименты позволили сопоставить расчетные данные с фактическими измерениями, что свидетельствует о высокой достоверности разработанной модели.

Ключевые слова: магнитное поле, квадратные катушки Гельмгольца, градиент напряженности магнитного поля, моделирование.

Введение

Катушки Гельмгольца находят широкое применение при решении разнообразных задач, к основным из которых относится калибровка магнитометров [1] для навигационных, геофизических, аэрокосмических и других приложений [2, 3].

Катушки Гельмгольца используются для создания управляемых условий при тестировании электромагнитных систем (двигатели, трансформаторы, генераторы), где требуется оценка влияния магнитного поля на функциональность оборудования [4], а также в экспериментах по исследованию свойств материалов, включая анализ их намагничивания и взаимодействия с внешними воздействиями [5].

Одним из основных применений катушек Гельмгольца являются исследования влияния

магнитных полей на биологические объекты [6–8].

Для создания управляемых магнитных полей широко применяются катушки Гельмгольца, традиционно выполненные в круговой геометрии.

В задачах, где рабочая область имеет прямоугольную или квадратную форму, использование квадратных катушек Гельмгольца становится более практичным решением, позволяющим создать контролируемую рабочую зону с заданным уровнем магнитного поля [9, 10]. Известно использование одно-, двух- или трехкомпонентных катушек с различной комбинацией направлений и уровней задаваемой силы тока [11], а также различных комбинированных систем («кольца Гельмгольца – соленоид», «кольца Гельмгольца – цилиндрический соленоид») [12, 13].

© Емельянова М. С., Мурашов С. А., 2025

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZZN-2025-0003 (численное моделирование) и Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова 2025 г. EMC-2025 (экспериментальные исследования).

Значительное количество исследований посвящено расчету и моделированию магнитных полей катушек Гельмгольца различной геометрии, учитывающих разнообразные граничные условия, влияние параметров обмотки (число витков, радиус изгиба катушек, расстояние между проводниками, размер катушки, сила тока, тип источника питания) на особенности пространственного распределения поля [14–16].

При расчете и моделировании используются: теория электромагнетизма и принцип суперпозиции [17, 18], разложение в ряд Тейлора по всем пространственным переменным [19], метод эквивалентных цепей [20], генетические алгоритмы [21], методы конечных элементов, реализованные, в частности, в программной среде Comsol [22, 23].

В ряде задач исследуется возможность генерации переменных магнитных полей [24, 25], а также градиентных катушек для магнитокардиографических систем [26].

Большинство исследований в области расчета и моделирования магнитных систем направлено на их оптимизацию с позиций достижения максимальной однородности магнитного поля [27–29].

Для оценки влияния гипомагнитных полей на формирование безопасной окружающей среды широко используется метод биотестирования, состоящий в регистрации действия магнитного поля на тест-объекты [30, 31]. Следует отметить, что в задачах биотестирования зона однородности гипомагнитных полей для катушек Гельмгольца весьма ограничена, что значительно удлиняет время биотестирования. Основное пространство представляет собой градиентное магнитное поле, которое остается нереализованным в однофакторных экспериментах. В работе [32] предложено техническое решение формирования градиентного поля с использованием многоуровневого генератора, обеспечивающего ослабление магнитного поля до нескольких различных уровней с использованием всего внутреннего объема и подстройку параметров системы в режиме реального времени, что приводит к ускорению экспериментов по биотестированию и повышению их достоверности.

Задача управления градиентным магнитным полем требует знания функций управления токами в квадратных катушках Гельмгольца, обеспечивающих заданный уровень и градиент формируемого магнитного поля, которые могут быть получены с использованием методов конечно-элементного моделирования.

Цель работы – исследование закономерностей формирования градиентных гипомагнитных полей на базе квадратных катушек Гельмгольца с использованием метода конечно-элементного моделирования.

Модель градиента гипомагнитного поля на базе катушек Гельмгольца

В среде численного моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics 6.1 построена конечно-элементная модель для исследования и конфигурирования магнитных полей в пространстве между квадратными катушками Гельмгольца с постоянным током заданной величины при взаимодействии с постоянным внешним магнитным полем (например, полем Земли).

В экспериментах катушки Гельмгольца ориентируют в пространстве для обеспечения их контролируемого взаимодействия с полем Земли (подавить, усилить, сделать равномерным или градиентным). Направление напряженности магнитного поля H в некоторой точке на планете характеризуется склонением – углом α_D отклонения (decline) вектора напряженности магнитного поля от географического меридiana (в горизонтальной плоскости) – и наклонением – углом α_I отклонения (incline) от линии горизонта (в вертикальной плоскости).

В случае квадратного сечения катушек Гельмгольца компенсация влияния склонения выполняется простым поворотом катушек вокруг вертикальной оси так, чтобы в направлении одной из их сторон горизонтальная компонента магнитного поля обращалась в 0, а вдоль другой стороны, соответственно, принимала максимальное значение. При создании модели принято, что стороны катушек параллельны, соответственно, осям x и y прямоугольной декартовой системы координат, предлагаемой COMSOL Multiphysics по умолчанию. Не изменяя ориентацию осей в модели, будем полагать, что ось x лежит в вертикальной плоскости, в которой горизонтальная компонента магнитного поля Земли максимальна (то есть ось x повернута на угол α_D относительно географического меридiana и совпадает с направлением горизонтальной проекции напряженности магнитного поля Земли H_h), при этом ось y оказывается в вертикальной плоскости, в которой $H_h = 0$ (рис. 1).

Ось z перпендикулярна осям x и y и совпадает с направлением вертикальной компоненты напряженности магнитного поля Земли H_V (в северном полушарии вектор H_V направлен

вниз) и с осью катушек Гельмгольца. Начало координат находится в центре пространства между катушками.

Для компенсации наклонения катушки Гельмгольца наклоняют на угол α_I так, чтобы их оси были параллельны направлению силовых линий магнитного поля Земли (плоскости поперечного сечения катушек перестают быть горизонтальными). Для удобства моделирования и визуализации принято, что при наклонении катушек изменяется не ориентация координатных осей x , y , z и привязанная к ним геометрия катушек, а направление магнитного поля по отношению к катушкам. Для полной компенсации направления магнитного поля полный вектор его напряженности H должен быть ориентирован по нормали к плоскостям катушек (совпадать с осью z). В модели предусмотрен параметр MFAngle для произвольного задания угла наклона внешнего однородного магнитного поля H относительно поверхности катушек. Если предполагается, что катушки лежат горизонтально, то MFAngle следует принять равным наклонению α_D , характерному для данной местности (направление поля «вниз» соответствует отрицательному значению угла, «вверх» – положительному). Если в постановке задачи предполагается компенсация направления магнитного поля Земли путем наклона ка-

тушек относительно горизонтальной плоскости, то следует принять MFAngle, соответственно, -90 или 90° .

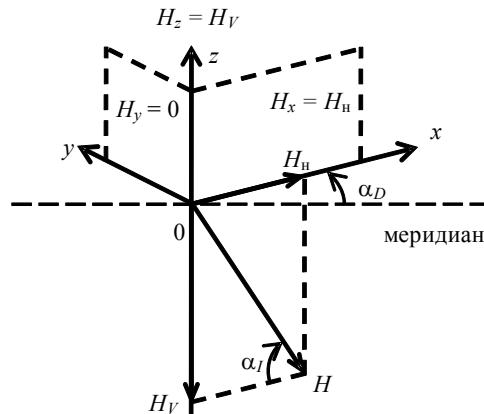


Рис. 1. Определение системы координат в магнитном поле Земли

Fig. 1. Definition of the coordinate system in the Earth's magnetic field

В таблице 1 представлены параметры, значения которых можно задать перед расчетом модели. В столбце «Типовое значение» в качестве примера представлены значения параметров в таком виде, как они указаны в COMSOL Multiphysics. Ряд параметров вычисляются на основе других.

Таблица 1. Параметры, задаваемые при моделировании

Table 1. Parameters set during modeling

Имя параметра	Типовое значение	Назначение
currentL	-0,178 [A]	Сила постоянного тока в нижней катушке
currentU	-0,222 [A]	Сила постоянного тока в верхней катушке
Distance (L)	0.6 [m]	Расстояние между катушками
MFAngle	-73 [deg]	Наклонение (угол) внешнего магнитного поля относительно оси x , откладываемый в сторону оси z
MFB	MFH*mu0 const	Индукция внешнего магнитного поля (в воздухе)
MFH	42 [A/m]	Напряженность внешнего магнитного поля
Nturns	100	Число витков в намотке катушки
NturnsW	10	Число витков по ширине намотки в один ряд
ROIxy	sizeA*2	Область интереса, длина в горизонтальной плоскости
ROIz	distance*3	Область интереса, высота
sizeA	0,8 [m]	Сторона квадрата катушки
sizeTh	wireD * Nturns / NturnsW	Толщина намотки (оценочная)
spaceLayer	0,05 [m]	Толщина слоя по краям пространства
spaceXY	ROIxy*2	Воздушное пространство, длины в направлениях x , y
spaceZ	ROIz*2	Воздушное пространство, высота
wireD	0,2 [mm]	Диаметр провода намотки

Под квадратной формой катушек понимается намотка витков на основание квадратной формы. При моделировании катушек принято упрощение, при котором отдельные витки не

имеют геометрического представления, а образуют единый объем, по которому протекает такой же ток, что и суммарно по всем виткам обмотки. Число витков задается параметром

$N_{turns} = 100$. Витки должны быть уложены в $N_{turns}W = 10$ рядов по 10 витков, поэтому сечение зоны обмотки представляет собой прямоугольник, стороны которого определяются диаметром провода $wireD = 0,2$ мм, умноженным на число витков в ряду $N_{turns}W$ или на число витков по высоте $N_{turns}/N_{turns}W$. В данном случае сечение обмотки квадратное со стороной $sizeTh = 2$ мм. Длина стороны основания катушки $sizeA = 0,8$ м и расстояние между катушками $distance = 0,6$ м отсчитываются относительно серединных линий в зоне обмотки, углы оснований катушки скруглены для снижения эффекта сингулярности, присущего методу конечных элементов в участках с острыми углами, а также для устранения резких перегибов в на-

правлении распространения тока. В реальных катушках проводники также имеют некоторый радиус изгиба, а не прямой угол. Через катушки проходит секущая плоскость $xz|_{y=0}$ для создания поперечных сечений, в которых в дальнейшем будет задана величина и направление тока.

Вокруг катушек Гельмгольца задана «область интереса» (ROI, region of interest) в виде прямоугольного параллелепипеда с ребрами в направлениях x , y , z , назначение которой – обеспечивать визуализацию магнитных полей в указанной системе координат с отсечением картины поля за пределами этой области. Размеры области определяются размерами катушек из соотношений $ROI_{xy} = 2sizeA$, $ROI_z = 3distance$ (рис. 2).

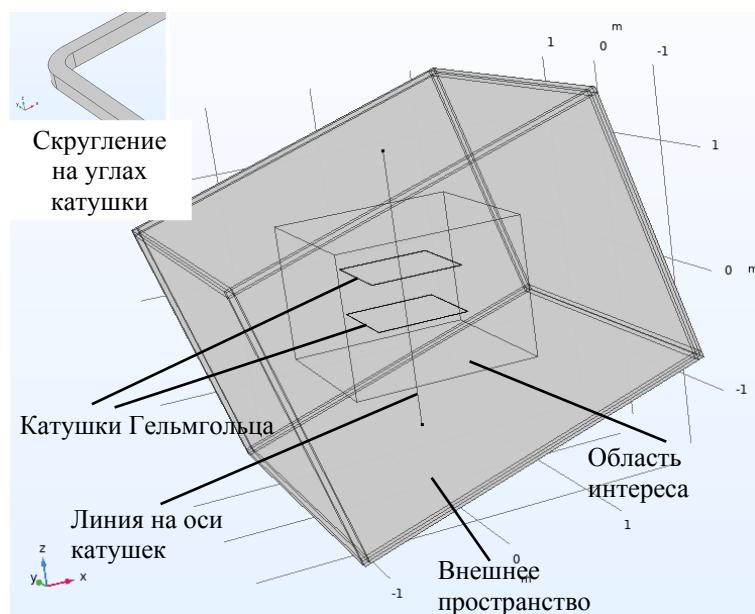


Рис. 2. Геометрия модели

Fig. 2. Geometry of the model

Для обеспечения условия однородности внешнего магнитного поля область интереса с катушками помещена в более крупное общее пространство, также имеющее форму прямоугольного параллелепипеда, повернутого в пространстве так, чтобы две его противоположные грани выступали полюсами внешнего однородного магнитного поля и были перпендикулярны силовым линиям этого поля. Угол поворота определяется в градусах как $90^\circ - MFAngle$ вокруг оси y . Размеры пространства в направлениях x и y – $spaceXY = 2ROI_{xy}$, в направлении z – $spaceZ = 2ROI_z$.

Также в геометрии присутствует отрезок прямой линии, направленной через всю геометрию вдоль ось z (ось катушек Гельгольца).

Предполагается построение распределений магнитных полей вдоль этой линии при анализе результатов моделирования. COMSOL Multiphysics автоматически интерполирует решения, полученные в узлах сетки конечных элементов, для любой точки в пространстве решений. Линия на уровне геометрии введена для того, чтобы некоторые узлы сетки принадлежали этой линии, снижая погрешность интерполяции.

Катушки выполнены из меди. Использован материал Copper из стандартной библиотеки COMSOL Multiphysics, удельная электрическая проводимость которого $\sigma_{\text{меди}} = 5,998 \cdot 10^7$ См/м. Для «области интереса» и окружающего пространства задан материал «воздух» (Air) с удель-

ной электрической проводимостью $\sigma_{\text{воздух}} = 0 \text{ См/м}$. Для всех материалов относительная магнитная проницаемость $\square = 1$, относительная диэлектрическая проницаемость $\square = 1$.

Решается статическая задача магнитного поля постоянного тока. Моделирование выполняется с использованием модуля Magnetic Fields (mf) COMSOL Multiphysics, поле магнитного потенциала описывается полиномами второго порядка. Раздел физической постановки в дереве модели, содержащий используемые элементы COMSOL Multiphysics, показан на рисунке 3. Во вложенном элементе Ampère's Law выбирается физическая модель расчета. Поскольку материалы в модели не имеют магнитного гистерезиса, выбрана модель Relative permeability с линейной зависимостью между индукцией B и напряженностью H магнитного поля. Тип материала Nonsolid (свойства материала не зависят от его деформации и ориентации). Таким образом, модель строится на следующей системе уравнений:

$$\nabla H = J; \quad (1)$$

$$B = \nabla A; \quad (2)$$

$$J = \sigma E; \quad (3)$$

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (4)$$

где ∇ – оператор Лапласа; J – вектор плотности тока; A – векторный магнитный потенциал; σ – удельная электрическая проводимость; E – напряженность электрического поля; \square – относительная магнитная проницаемость материала; $\square_0 = 4 \square \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума.

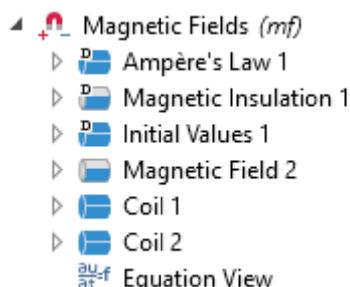


Рис. 3. Задействованные элементы модуля Magnetic Fields

Fig. 3. Engaged elements of the Magnetic Fields module

Внешнее магнитное поле задается с помощью элемента Magnetic Field. Абсолютное значение напряженности H внешнего магнитного поля, определенное в параметре MFH равным 42 А/м (поле Земли в городе Ижевске), в виде

граничного условия применяется ко всем граням (внешним поверхностям) внешнего пространства по компонентам $H_x = \text{MFHcos(MFAngle)}$ и $H_z = \text{MFHsin(MFAngle)}$. Направление поля задается углом MFAngle. Для отключения внешнего магнитного поля перед началом расчета модели можно задать MFH = 0. На рисунке 4 представлена топология напряженности внешнего магнитного поля в сечении $xz|_{y=0}$. Видно, что поле однородное.

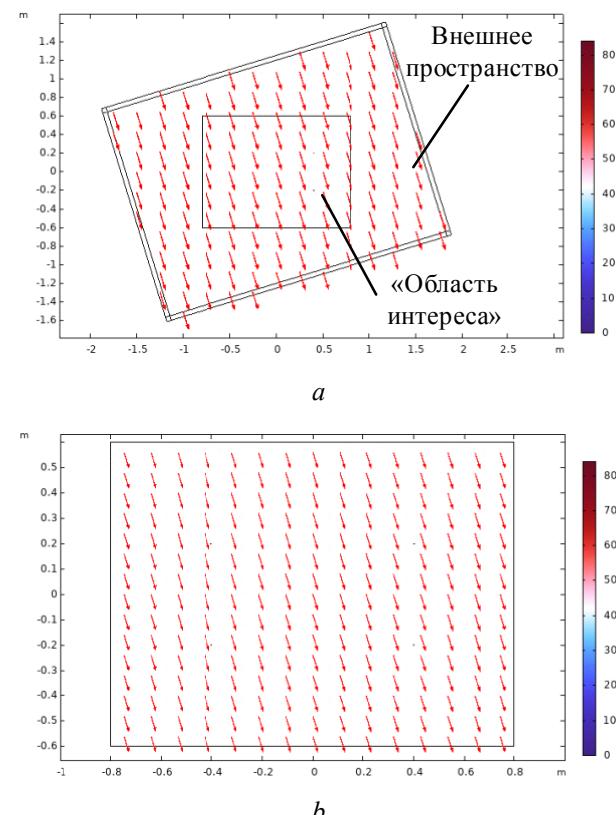


Рис. 4. Топология напряженности внешнего магнитного поля (А/м) при MFAngle = -73° (серый цвет шкалы соответствует магнитному полю Земли): вся область моделирования (а); только «область интереса» (б)

Fig. 4. Topology of the external magnetic field strength (A/m) at MFAngle = -73° (gray scale color corresponds to the Earth's magnetic field): entire modeling region (a); “region of interest” only (b)

Для задания физических свойств тока в катушках Гельмгольца использован элемент Coil (отдельно для каждой катушки). Модель проводника катушки выбрана «однородный многовитковый» (Homogenized multturn). Тип катушки численный (Numeric) означает, что катушка представляет собой не линейный соленоид (тип Linear) или катушку, ось которой направлена по окружности (тип Circular), а имеет произвольную форму, и путь тока COMSOL Multiphysics будет анализироваться первым при решении

задачи. Для этого в разделе Study дерева проекта должен быть помещен первый шаг Coil Geometry Analysis (второй шаг – расчет статической задачи Static). В элементе Coil также задаются: ток возбуждения в витке (параметр currentL или currentU, в амперах), число витков (параметр Nturns), проводимость проводника (аналогична проводимости меди), диаметр проводника (параметр wireD), линейная зависимость между B и H – модель намагничивания Relative permeability, где относительная магнитная проницаемость берется из свойств материала (меди). Внутри элемента Coil создается вложенный элемент Geometry Analysis, в котором выбирается объемная геометрия соответствующей катушки. Внутри Geometry Analysis во вложенном элементе Input выбирается поперечное сечение катушки (поверхность, созданная секущей плоскостью $xz|_y = 0$ на этапе создания геометрии), через которое будет протекать ток в прямом или обратном направлении. На рисунке 5 показан фрагмент обмотки катушки и выбранное направление тока, отмеченное стрелкой; обмотка катушки замкнутая, ее часть до сечения сделана невидимой специально.

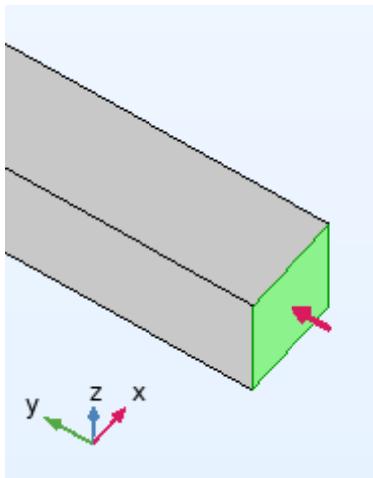


Рис. 5. Выбор сечения с током и направления тока при настройке элемента Coil / Geometry Analysis / Input

Fig. 5. Selection of cross-section with current and current direction at setting of Coil / Geometry Analysis / Input element

Сетка конечных элементов состоит из тетраэдров, треугольников, ребер и вершинных элементов. Топология строится автоматически. Для размеров выбран критерий Extremely fine – самый мелкий вариант из предлагаемых – за исключением внешнего пространства, для которого выбран критерий Finer (рис. 6). Размер конечных элементов при этом зависит от размеров

геометрии. Самые мелкие конечные элементы создаются на обмотке катушки и в ее окрестностях таким образом, что на каждой стороне квадрата поперечного сечения обмотки имеется минимум по два поверхностных конечных элемента (рис. 7).

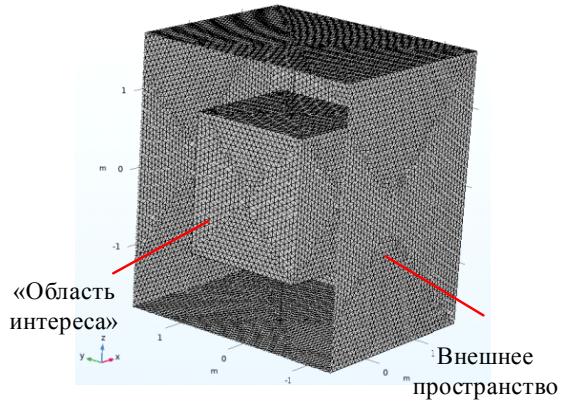


Рис. 6. Сетка поверхностных конечных элементов на границах областей пространства (в разрезе)

Fig. 6. Mesh of surface finite elements on the boundaries of space regions (in section)

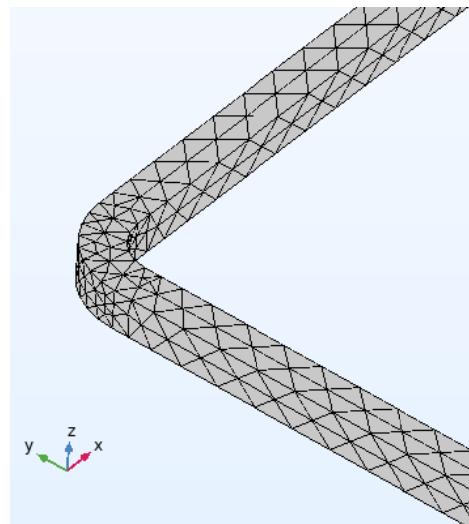


Рис. 7. Сетка поверхностных конечных элементов обмотки катушки

Fig. 7. Surface finite element mesh of the coil winding

На рисунках 8, 9 представлена сетка объемных конечных элементов, цветовая шкала характеризует качество сетки (чем ниже балл от 0 до 1, тем больше асимметрия – skewness – конечного элемента, ухудшающая сходимость). Согласно встроенному в COMSOL Multiphysics инструменту оценки сетки среднее качество элементов по критерию близости длин сторон каждого элемента составляет 0,65, что является удовлетворительным. Всего в модели свыше 2,6 млн конечных элементов.

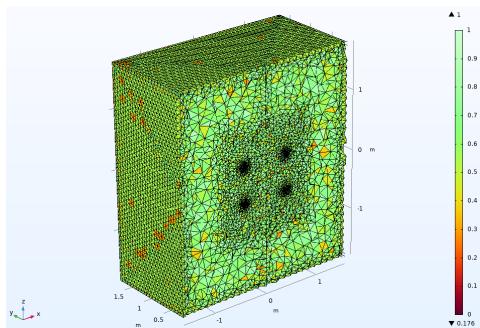


Рис. 8. Сетка объемных конечных элементов (в разрезе по границам конечных элементов вдоль плоскости $xz|_{y=0}$)

Fig. 8. Volumetric finite element mesh (in section by finite element boundaries along the $xz|_{y=0}$ plane)

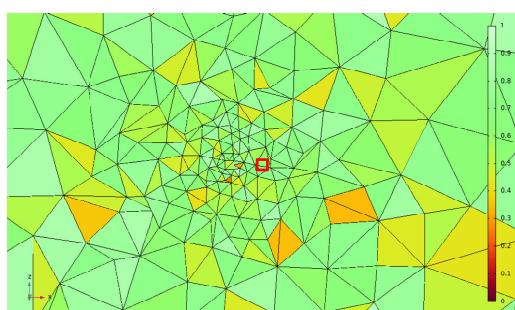


Рис. 9. Увеличенное изображение сетки объемных конечных элементов (в разрезе по границам конечных элементов вдоль плоскости $xz|_{y=0}$) в окрестностях сечения катушки Гельмгольца (выделено красным квадратом)

Fig. 9. Magnified image of the bulk finite element mesh (in section by the finite element boundaries along the $xz|_{y=0}$ plane) in the vicinity of the Helmholtz coil cross-section (highlighted in red square)

Результаты моделирования и их обсуждение

Топология магнитного поля в плоскости $xz|_{y=0}$ при наличии токов силой 70 мА в нижней

и 300 мА в верхней катушках Гельмгольца под действием внешнего магнитного поля 42 А/м при MFAngle = -90° представлена на рисунке 10. Густота линий показывает однородность магнитного поля. Катушки Гельмгольца показаны в виде сечений их обмоток (точками из-за относительно малого размера).

В качестве примера на рисунках 11, 12 представлено пространственное распределение напряженности градиентного магнитного поля в различных сечениях плоскости z и плоскости x при различных токах I_1 и I_2 . В исследуемой области (внутри катушек) имеет место существенный градиент магнитного поля в плоскости между катушками при $x = 0$ и высокая однородность поля в плоскости $z = 0$, что говорит о возможности размещения тест-объектов практически во всей рабочей зоне генератора.

Рассмотрим закономерности формирования градиента напряженности магнитного поля вдоль оси x . Рисунок 13 представляет варианты распределения напряженности магнитного поля по координате при постоянном токе в одной обмотке и меняющихся токах во второй обмотке. Видно, что минимальное значение напряженности достижимо при максимальной разнице в токах I_1 и I_2 . При этом напряженность магнитного поля внутри катушек относительно магнитного поля Земли (42 А/м) меняется от 30 А/м до магнитного вакуума (около 0,3...0,5 А/м). То есть возможна реализация коэффициента ослабления магнитного поля от 1,4 раза до более чем в 100 раз. При этом наибольшая неравномерность поля наблюдается вблизи катушек. Для токов с максимальной разницей имеет место ограничение области, соответствующей плавному ослаблению поля (L_{\min}), составляющее около четверти зоны между катушками, где проведение биотестирования не рекомендуется.

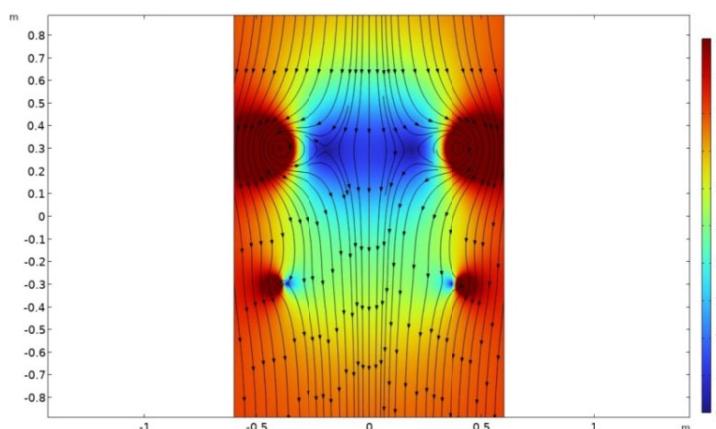


Рис. 10. Топология напряженности внешнего магнитного поля (А/м) в плоскости $xz|_{y=0}$ при MFAngle = -90°

Fig. 10. Topology of the external magnetic field strength (A/m) in the plane $xz|_{y=0}$ at MFAngle = -90°

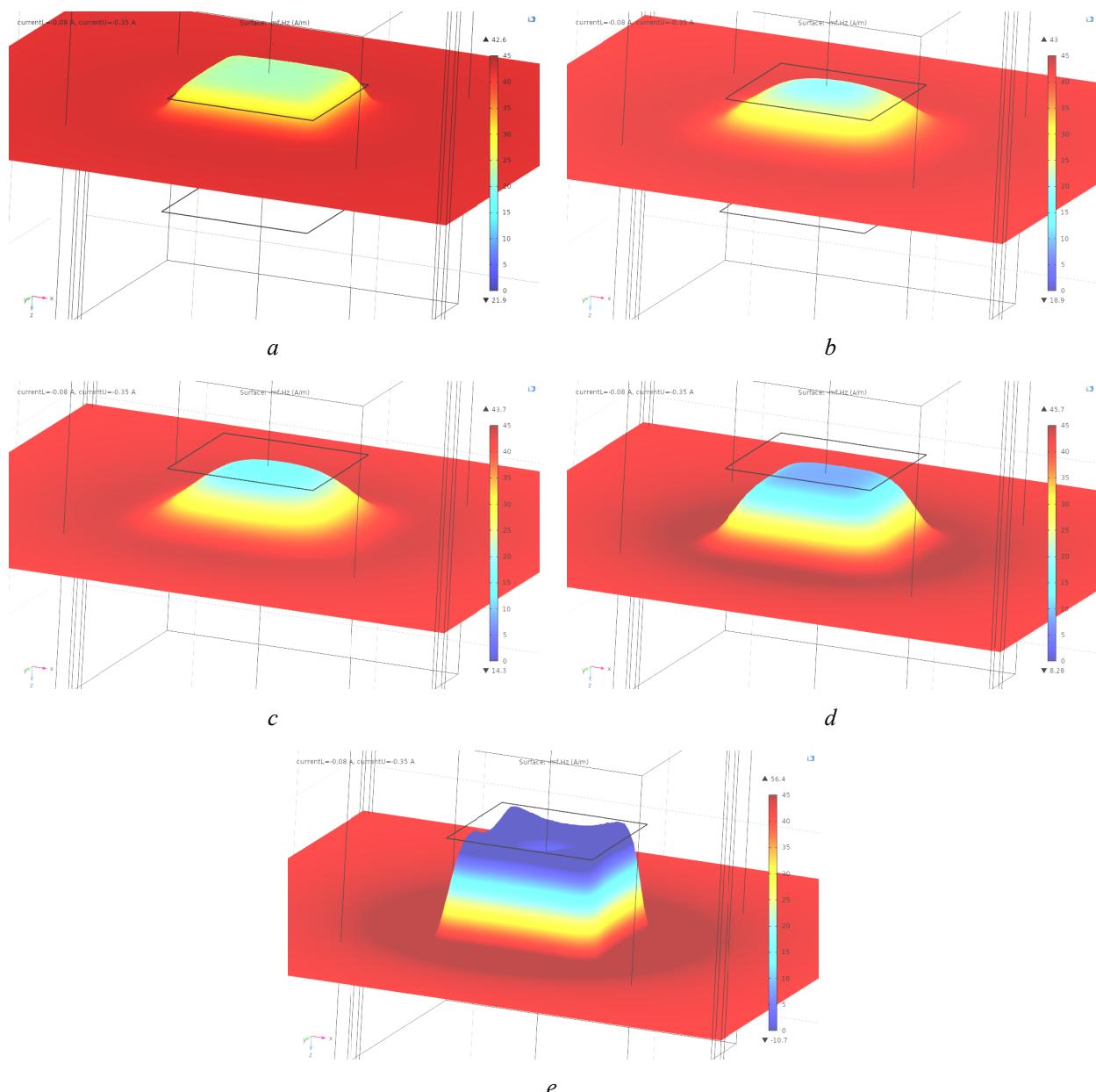


Рис. 11. Пространственное распределение напряженности магнитного поля в сечениях, перпендикулярных оси z : $-0,2$ м (а), $-0,1$ м (б), 0 м (в), $0,1$ м (д), $0,2$ м (е) ($I_1 = 350$ мА и $I_2 = 80$ мА)

*Fig. 11. Spatial distribution of magnetic field strength in sections perpendicular to the z axis:
-0.2 m (a), -0.1 m (b), 0 m (c), 0.1 m (d), 0.2 m (e) ($I_1 = 350$ mA and $I_2 = 80$ mA)*

На рисунке 14 изображено распределение напряженности магнитного поля от центров катушек при токе в первичной катушке 60 мА, ток в вторичной катушке 300 мА. Для расчетов необходимо значение максимальной (H_{\max}) и минимальной (H_{\min}) напряженности магнитного поля, минимальная напряженность магнитного поля достигается в точке L_{\max} . $K1$ и $K2$ обозначают расположение катушек Гельмгольца на $-0,3$ и $0,3$ м.

Рассмотрим влияние токов I_1 и I_2 на величину характерных точек на кривой распределения напряженности магнитного поля: максимум напряженности H_{\max} , минимум напряженности H_{\min} , поле по центру между катушками H_0 , положение на оси L_{\min} , соответствующее минимуму магнитного поля (рис. 15).

Зависимости влияния токов I_1 и I_2 на значения H_{\max} , H_{\min} , H_0 и L_{\min} представлены на рисунках 15–18.

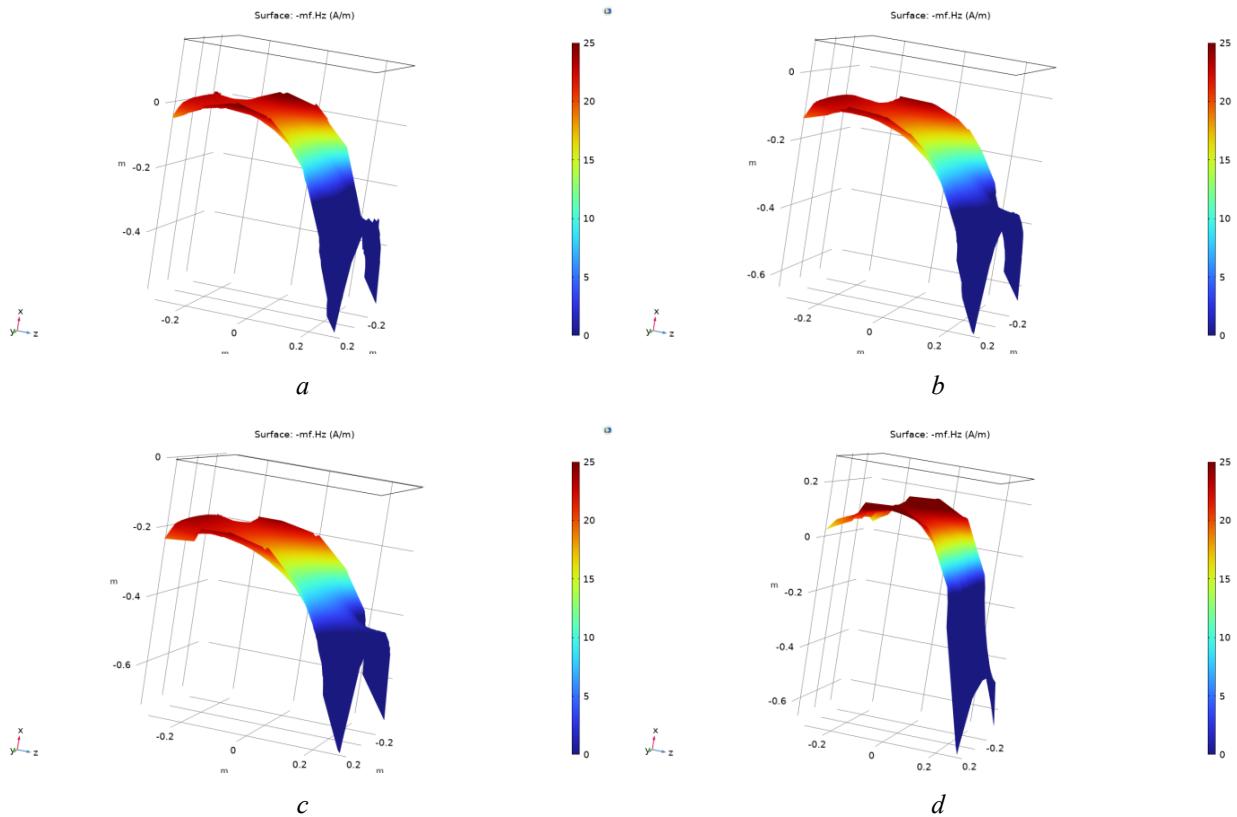


Рис. 12. Пространственное распределение напряженности магнитного поля в сечениях, перпендикулярных оси x : 0 м (*a*), 0,1 м (*b*), 0,2 м (*c*), 0,3 м (*d*) ($I_1 = 350$ мА и $I_2 = 80$ мА)

Fig. 12. Spatial distribution of magnetic field strength in cross sections perpendicular to the x -axis: 0 m (*a*), 0,1 m (*b*), 0,2 m (*c*), 0,3 m (*d*) ($I_1 = 350$ mA and $I_2 = 80$ mA)

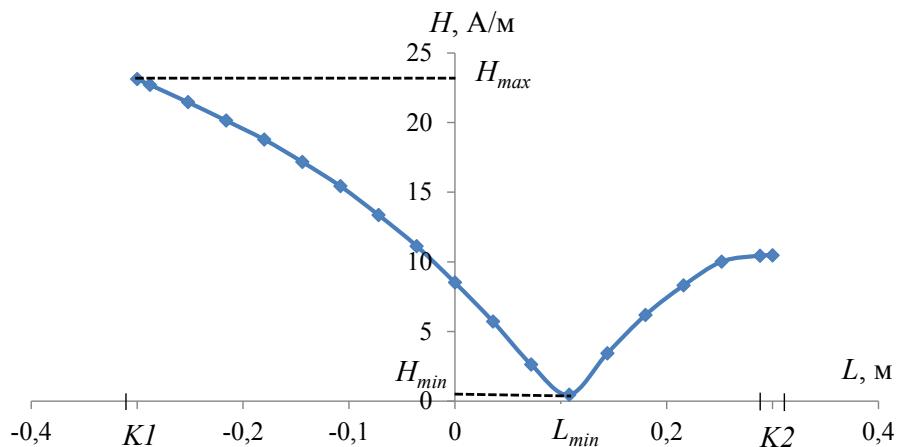


Рис. 13. К выбору характерных точек на кривой напряженности магнитного ($I_1 = 300$ мА и $I_2 = 60$ мА)

Fig. 13. To the choice of characteristic points on the magnetic intensity curve ($I_1 = 300$ mA and $I_2 = 60$ mA)

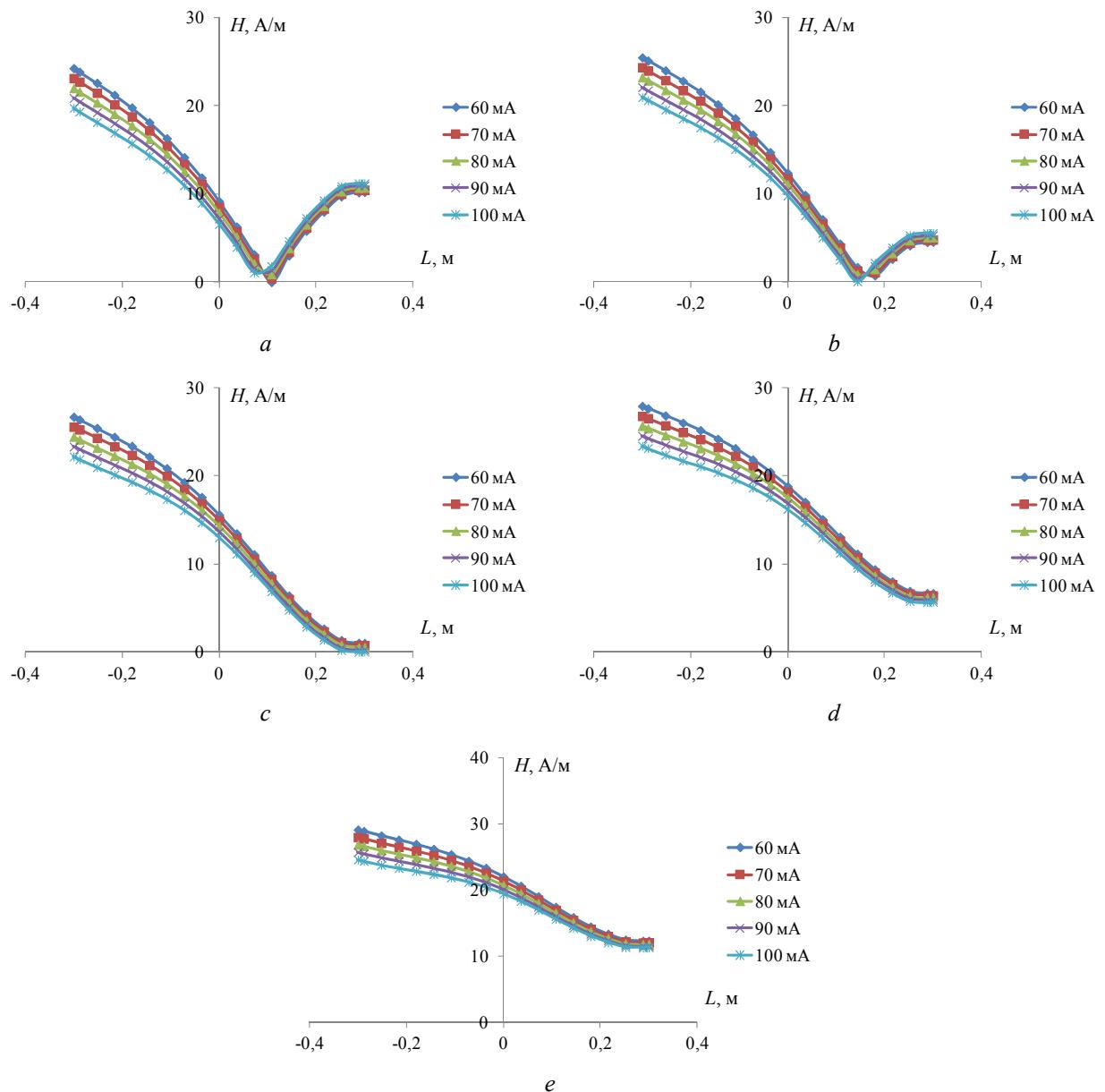


Рис. 14. Распределение напряженности магнитного поля от центров катушек при токе в первичной катушке:
250 mA (*a*), 300 mA (*b*), 350 mA (*c*), 400 mA (*d*), 450 mA (*e*)

Fig. 14. Distribution of magnetic field strength from the coil centers at current in the primary coil:
250 mA (*a*), 300 mA (*b*), 350 mA (*c*), 400 mA (*d*), 450 mA (*e*)

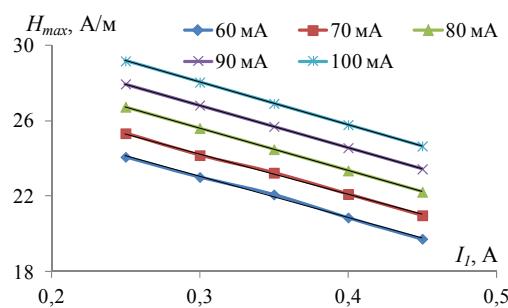


Рис. 15. Зависимости влияния токов I_1 и I_2
на значения H_{\max}

Fig. 15. Dependences of influence of currents I_1 and I_2
on H_{\max} values

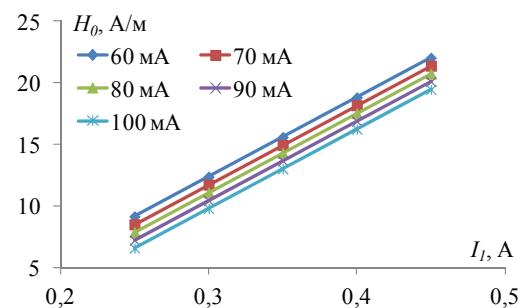


Рис. 16. Зависимости влияния токов I_1 и I_2
на значения H_0

Fig. 16. Dependences of the influence
of currents I_1 and I_2 on the values of H_0

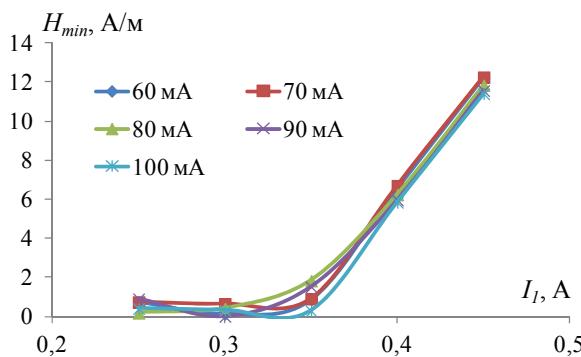


Рис. 17. Зависимости влияния токов I_1 и I_2 на значения H_{\min}

Fig. 17. Dependencies of influence of currents I_1 and I_2 on H_{\min} values

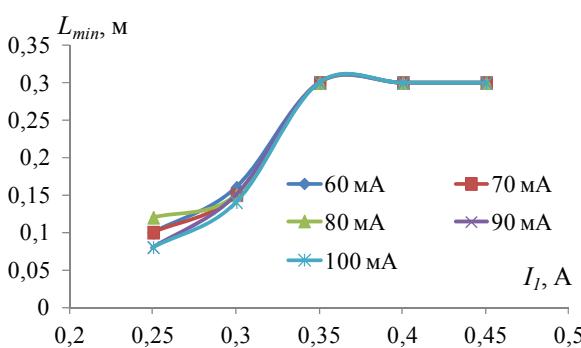


Рис. 18. Зависимости влияния токов I_1 и I_2 на значения L_{\min} минимума напряженности магнитного поля H_{\min} в области однозначного поведения кривой

Fig. 18. Dependences of the influence of currents I_1 and I_2 on the values of L_{\min} minimum magnetic field strength H_{\min} in the region of single-valued behavior of the curve

Закономерности формирования характерных точек градиентного магнитного поля могут быть аппроксимированы приближенными формулами, полученными с использованием регрессионного анализа:

$$H_{\max} = 22,25 + 0,124I_1 - 0,0221I_2; \quad (5)$$

$$H_0 = -3,073 - 0,0644I_1 + 0,0644iI_2; \quad (6)$$

$$H_{\min} = \begin{cases} 0,45 & \text{при } I_2 < 0,35 \text{ А,} \\ -14,94 - 0,0117I_1 + 0,0568I_2 & \text{при } I_2 \geq 0,35 \text{ А.} \end{cases} \quad (7)$$

Следует отметить, что градиент наблюдаемого распределения напряженности магнитного поля является неравномерным внутри зоны тестирования. Введем понятие нормированного

градиента напряженности магнитного поля $\text{grad}H_n$, определяемое различием поля в двух соседних точках кривой L_{k+1} и L_k , отнесенного к среднему значению напряженности на данном участке \overline{L}_k :

$$L_k \text{ grad}H_n = \frac{H_k - H_{k+1}}{L_k(L_{k+1} - L_k)}. \quad (8)$$

На рисунке 19 представлен нормированный градиент распределения напряженности магнитного поля при различных токах I_1 при токе $I_2 = 250$ мА.

Результаты моделирования проверены экспериментально на катушках квадратной геометрии размером 800×800 мм размещенных друг от друга на расстоянии 600 мм с числом витков $n = 100$. Токи выбирались исходя из формирования равномерного магнитного поля по центру катушек ($I_1 = I_2 = 270$ мА), и для градиентного магнитного поля ($I_1 = 300$ мА и $I_2 = 70$ мА). Для управления токами в катушках использовался двухканальный источник питания БП-5, контроль токов осуществлялся с использованием амперметра мультиметра Agilent multimeter. Для измерений использовался измеритель постоянного магнитного поля (портативный трехкомпонентный магнитометр ИГМП-3к), закрепленный в геометрическом центре системы катушек, перемещаемый с помощью координатного стола с шагом 50 мм. Для компенсации склонения и наклонения вектора напряженности магнитного поля Земли система катушек была развернута в направлении N – S (север – юг) и обеспечен наклон системы на 17° (рис. 20).

Результаты сравнения распределения напряженности магнитного поля, полученные экспериментально и при моделировании для случаев равномерного распределения и градиентного распределения, представлены на рисунках 21, 22.

Отметим удовлетворительное согласование результатов равномерного распределения магнитного поля с расчетами с использованием известных калькуляторов катушек Гельмгольца. Наблюданное соответствие результатов эксперимента и моделирования говорит об адекватности предложенной модели и возможности ее использования для построения управляющих функций токами генератора для других вариантов построения многоуровневых градиентных полей, в том числе гипермагнитных с произвольной геометрией.

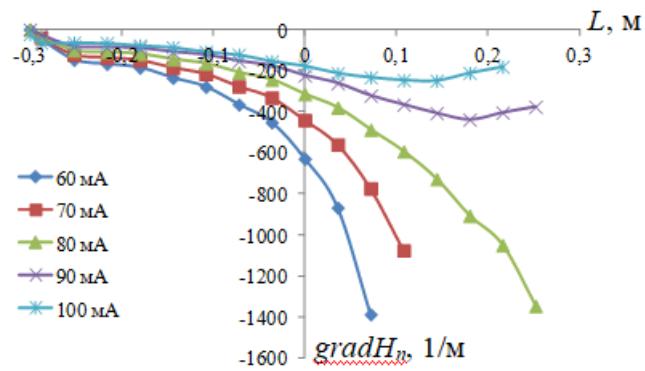


Рис. 19. Нормированный градиент напряженности магнитного поля при различных токах I_2 при токе $I_1 = 250$ мА

Fig. 19. Normalized gradient of magnetic field strength at different currents I_2 at current $I_1 = 250$ mA

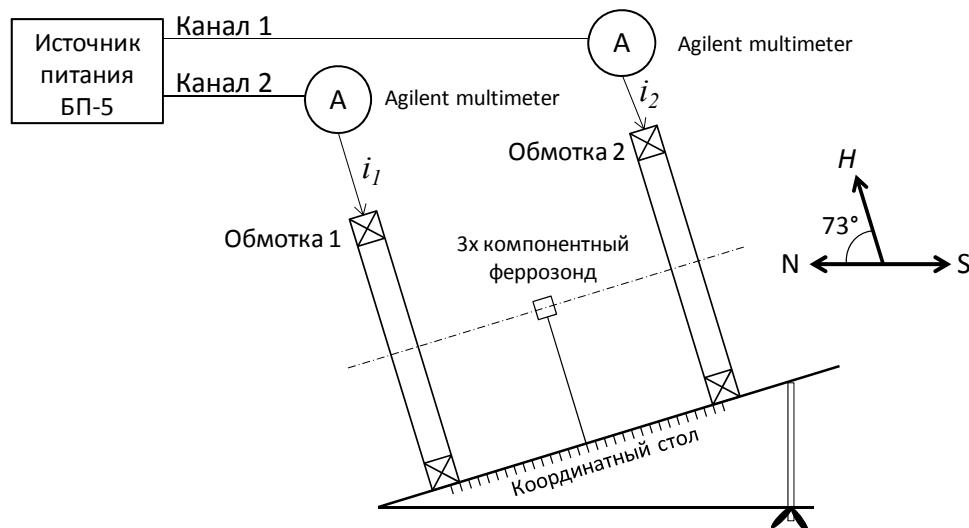


Рис. 20. Функциональная схема экспериментальных исследований по оценке распределения напряженности МП

Fig. 20. Functional scheme of experimental studies on estimation of MF intensity distribution

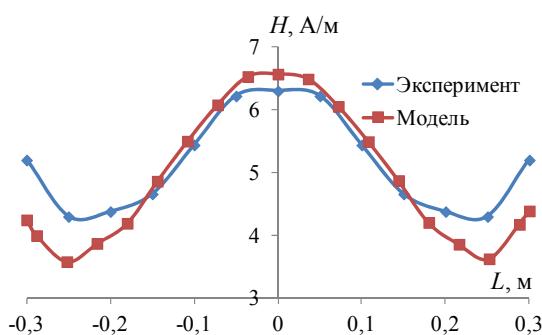


Рис. 21. Результаты сравнения распределения напряженности магнитного поля, полученные экспериментально и при моделировании: при токах $I_1 = I_2 = 270$ мА (случай равномерного распределения)

Fig. 21. Results of comparison of MF intensity distribution obtained experimentally and by modeling: at currents $I_1 = I_2 = 270$ mA (case of uniform distribution)

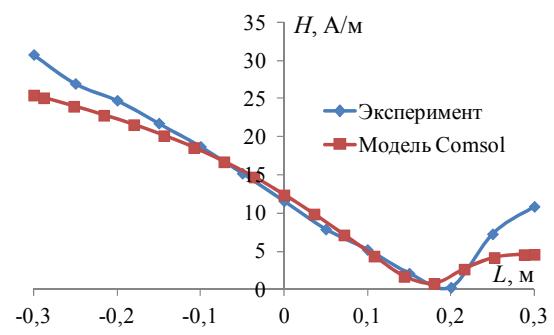


Рис. 22. Результаты сравнения распределения напряженности магнитного поля, полученные экспериментально и при моделировании: при токах $I_1 = 300$ и $I_2 = 70$ мА (случай градиентного распределения)

Fig. 22. Results of comparison of MF intensity distribution obtained experimentally and by modeling: at currents $I_1 = 300$ and $I_2 = 70$ mA (case of gradient MF distribution)

Выводы

1. В среде численного моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics построена конечно-элементная модель формирования градиентных гипомагнитных полей в пространстве между квадратными катушками Гельмгольца, размещенными во внешнем магнитном поле Земли.

2. Исследовано взаимное влияние токов в каждой из катушек на формирование градиента напряженности гипомагнитного поля в различных сечениях пространства и вдоль оси катушек Гельмгольца.

3. Исследовано влияние токов на информативные параметры градиентной кривой напряженности гипомагнитного поля (максимальное и минимальное значения напряженности, напряженность поля по центру между катушками). С использованием регрессионного анализа построены функции зависимости информативных параметров от значения токов в катушках, которые могут рассматриваться как обобщенные управляющие функции токами в квадратных катушках Гельмгольца для формирования многоуровневых полей с регулируемым коэффициентом ослабления.

4. Результаты моделирования подтверждены экспериментально для случаев равномерного и градиентного распределения магнитных полей.

5. Разработанная конечно-элементная модель может быть использована для построения функций управляющих токов при формировании магнитных полей в катушках Гельмгольца произвольной геометрии, а также гипермагнитных и комбинированных (переменных и постоянных) магнитных полей.

Библиографические ссылки

- Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров / В. Е. Баранова, П. Ф. Баранова, С. В. Муравьев, С. В. Учайкин // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 52–56. EDN TUDZAH.
- Batista D., Granziera F., Tosin M., Melo L. (2018) Three-Axial Helmholtz Coil Design and Validation for Aerospace Applications: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 54, no. 1, pp. 392-403. DOI: 10.1109/TAES.2017.2760560
- Beiranvand R. (2017) Effects of the Winding Cross-Section Shape on the Magnetic Field Uniformity of the High Field Circular Helmholtz Coil Systems: IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 64, no. 9, pp. 7120-7131. DOI: 10.1109/TIE.2017.2686302.
- Nieves F.J., Bayón A., Gascón F. (2019) Optimization of the magnetic field homogeneity of circular and conical coil pairs: Review of Scientific Instruments. Vol. 90, no. 4, pp. 045120. DOI: 10.1063/1.5079476
- Saqib M., Francis N.S., Francis N.J. (2020) Design and Development of Helmholtz Coils for Magnetic Field: 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, pp. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059109
- Гипомагнитные условия: способы моделирования и оценка воздействия / А. А. Артамонов, М. К. Карташова, Е. В. Плотников, Н. А. Константина // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 357–370. EDN YGPTRN.
- Компьютерная система генерации и регистрации низкочастотных магнитных полей в магнитобиологических экспериментах / В. С. Мартынюк, Н. А. Темурьянц, А. В. Яценко [и др.] // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2003. Т. 16, № 1 (55). С. 71–73.
- Trevino T., Rector T., Lutz K. (2022) Design and Build of Electromagnetic HelmHoltz Coil: 51st International Conference Environmental Systems, Minessota.
- Baranov P., Baranova V. (2016) Modeling axial 8-coil system for generating uniform magnetic field in COMSOL. MATEC Web of Conferences: 4th Russian Forum for Young Scientists with International Participation “Space Engineering”, Tomsk. Vol. 48, p. 03001. DOI: 10.1051/confmatec/20164803001. EDN WWFYXD.
- Brewer M.R. (2012) CubeSat Attitude Determination and Helmholtz Cage Design: thesis. Ohio: Air force institute of technology, 92 р.
- Контрольно-измерительное устройство для управления магнитным полем катушек Гельмгольца / Е. Н. Блажкова, В. В. Бадашев, П. В. Кременской [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2022. № 1 (85). С. 161–167. EDN RLDBIY.
- Гормаков А. Н., Ульянов И. А. Расчет и моделирование магнитных полей, создаваемых системой «кольца Гельмгольца – соленоид» // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 40–45. EDN TNQLR.
- Фишбайн Л. А., Бушманов В. И. Сравнение пространственной неоднородности магнитных полей колец Гельмгольца и цилиндрических соленоидов // Инновации в науке. 2015. № 44. С. 7–12. EDN TQSWAT.
- Adil M., Rakisheva Z. (2018) Design and Simulation of Uniform Magnetic Field. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. Vol. 6, pp. 232-236. DOI: 10.17694/bajce.475537
- Erzhanova N. (2024) Determining magnetic field strength as a function of current in Helmholtz coils. Technobius Physics. Vol. 2, p. 0016. DOI: 10.54355/tbusphys/2.3.2024.0016
- Li J., Zhu X., Sun Y. (2024) Optimal design of thick-walled circular coils for uniform magnetic field generation. Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 57, p. 455001. DOI: 10.1088/1361-6463/ad6672
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023689378 Российская Федерация. Экспресс-калькулятор магнитной ин-

дукции десятикатушечных систем / П. Ф. Баранов, И. А. Затонов. EDN ZDXNGS.

18. Математическое моделирование магнитных полей постоянных магнитов цилиндрической формы и эквивалентных им соленоидов / Ю. Н. Слесарев, Б. В. Малышев, А. А. Борисова, А. А. Воронцов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 4 (20). С. 150–157. EDN XКОMCN.

19. Фишбейн Л. А. О магнитном поле системы колец Гельмгольца // Международный журнал гуманистических и естественных наук. 2023. № 9–1 (84). С. 289–293. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-9-1-289-293. EDN MIJCIQ.

20. Chen X., Luo J., Lin D. (2021) Analysis and Visualization of Magnetic Field for Multi-dimensional Helmholtz Coils Based on PEEC: IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Shanghai, China, pp. 1-7. DOI: 10.1109/PEAS53589.2021.9628580

21. Zhu X., Xing M., Liu Ch. (2023) Optimization of composite Helmholtz coils towards high magnetic uniformity. Engineering Science and Technology, an International Journal. Vol. 47, p. 101539. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101539

22. Ke W., Qingwen F., Hongliang P. (2020) Research on Magnetic Field Uniformity of Compensated Helmholtz Coil: 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), Harbin, pp. 175-179. DOI: 10.1109/ICMCCE51767.2020.00046

23. Baranova V.E., Baranov P.F. (2014) The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings, Omsk, November 11-13, 2014. Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005634

24. Feng Y., Li Y., Feng H., Yuan H. (2021) Method for generating variable magnetic field based on Helmholtz coil and its simulation research: 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII), Zhuhai, China, 22-24 January 2021. Zhuhai, pp. 61-64. DOI: 10.1109/ISMII52409.2021.00020

25. Schill R.A., Karin H. (2001) Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low ac magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field. Review of Scientific Instruments. Vol. 72, no. 6, p. 2769-2776. DOI: 10.1063/1.1368853

26. Zhao F., Zhou X., Xie X., Wang K. (2021) Design of Gradient Magnetic Field Coil Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Magneto-cardiography Systems: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 70, pp. 1-9. DOI: 10.1109/TIM.2021.3106677

27. Huang Y., Jiang L., Lei H. (2022) Optimal coil configuration analysis for the high-uniformity and large-caliber magnetic field immunity testing system. Journal of Industrial Information Integration. Vol. 30, pp. 100384. DOI: 10.1016/j.jii.2022.100384

28. Nismayanti A., Jannah H., Rugayya S. (2021) Helmholtz coils model as pulsed electromagnetic field

therapy devices for fracture healing using comsol multi-physics. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1763, no 1, pp. 012060. DOI: 10.1088/1742-6596/1763/1/012060

29. Álvarez A.F., Mejía É.F., Ramírez H.C., Jaramillo C.R. (2016) Analysis of the Magnetic Field Homogeneity for an Equilateral Triangular Helmholtz Coil. Progress in Electromagnetics Research M. Vol. 50, pp. 75-83. DOI: 10.2528/PIERM16062309

30. Ломаев Г. В., Емельянова М. С. Влияние вариаций магнитного поля Земли на эмбриональное развитие G. Gallus // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1(23). С. 127–131. EDN SNHTRZ.

31. Емельянова М. С., Ломаев Г. В. К вопросу об онтогенезе пчел в гипомагнитном поле Земли // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 157–159. EDN TCUJOZ.

32. Емельянова М. С., Муравьев В. В. Многоуровневый градиентный генератор для исследования влияния гипомагнитных полей на биообъекты // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27. № 8(314). С. 17–27. DOI: 10.14489/td.2024.08.pp.017-027. EDN IVOJLF.

References

1. Baranova V.E., Baranova P.F., Muravyov S.V., Uchaikin S.V. (2015) [Creation of a uniform magnetic field using a system of axial coils for calibrating magnetometers]. *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 5, pp. 52-56. EDN TUDZAH (in Russ.).
2. Batista D., Granziera F., Tosin M., Melo L. (2018) Three-Axial Helmholtz Coil Design and Validation for Aerospace Applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 54, no. 1, pp. 392-403. DOI: 10.1109/TAES.2017.2760560
3. Beiranvand R. (2017) Effects of the Winding Cross-Section Shape on the Magnetic Field Uniformity of the High Field Circular Helmholtz Coil Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 64, no. 9, pp. 7120-7131. DOI: 10.1109/TIE.2017.2686302.
4. Nieves F.J., Bayón A., Gascón F. (2019) Optimization of the magnetic field homogeneity of circular and conical coil pairs. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 90, no. 4, pp. 045120. DOI: 10.1063/1.5079476
5. Saqib M., Francis N.S., Francis N.J. (2020) Design and Development of Helmholtz Coils for Magnetic Field: 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, pp. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059109
6. Artamonov A.A., Kartashova M.K., Plotnikov E.V., Konstantinova N.A. (2019) [Hypomagnetic conditions: modeling methods and impact assessment]. *Medicina ekstremal'nyh situacij*. Vol. 21, no. 3, pp. 357-370. EDN YGPTPH (in Russ.).
7. Martynyuk V.S., Temuryants N.A., Yatsenko A.V. (2003) [Computer system for generating and recording low-frequency magnetic fields in magnetobiological experiments]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya*. Vol. 16, no. 1(55), pp. 71-73 (in Russ.).

8. Trevino T., Rector T., Lutz K. (2022) Design and Build of Electromagnetic HelmHoltz Coil: 51st International Conference Environmental Systems, Minessota.
9. Baranov P., Baranova V. (2016) Modeling axial 8-coil system for generating uniform magnetic field in COMSOL. MATEC Web of Conferences: 4th Russian Forum for Young Scientists with International Participation "Space Engineering", Tomsk. Vol. 48, p. 03001. DOI: 10.1051/confmatec/20164803001. EDN WWFYXD.
10. Brewer M.R. (2012) CubeSat Attitude Determination and Helmholtz Cage Design: thesis. Ohio: Air force institute of technology, 92 p.
11. Blazhkova E.N., Badashev V.V., Kremenskoy P.V. (2022) [Control and measuring device for controlling the magnetic field of Helmholtz coils]. *Inzhenernyj vestnik Doma*. No. 1 (85), pp. 161-167. EDN RLDBIY (in Russ.).
12. Gormakov A.N., Ulyanov I.A. (2015) [Calculation and modeling of magnetic fields created by the "Helmholtz rings - solenoid" system]. *Fundamental'nye issledovaniya*. No. 3, pp. 40-45. EDN TNILQR (in Russ.).
13. Fishbein L.A., Bushmanov V.I. (2015) [Comparison of spatial inhomogeneity of magnetic fields of Helmholtz rings and cylindrical solenoids]. *Innovacii v nauke*. No. 44, pp. 7-12. EDN TQSWAT (in Russ.).
14. Adil M., Rakisheva Z. (2018) Design and Simulation of Uniform Magnetic Field. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 6, pp. 232-236. DOI: 10.17694/bajece.475537
15. Erzhanova N. (2024) Determining magnetic field strength as a function of current in Helmholtz coils. *Technobius Physics*. Vol. 2, p. 0016. DOI: 10.54355/tbusphys/2.3.2024.0016
16. Li J., Zhu X., Sun Y. (2024) Optimal design of thick-walled circular coils for uniform magnetic field generation. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol. 57, p. 455001. DOI: 10.1088/1361-6463/ad6672
17. Baranov P.F., Zatonov I.A. [Certificate of state registration of computer program No. 2023689378 Russian Federation. Express calculator of magnetic induction of ten-coil systems]. EDN ZDXNGS (in Russ.).
18. Slesarev Yu.N., Malyshev B.V., Borisova A.A., Vorontsov A.A. (2016) [Mathematical modeling of magnetic fields of permanent cylindrical magnets and their equivalent solenoids]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. No. 4 (20), pp. 150-157. EDN XKOMCN (in Russ.).
19. Fishbein L.A. (2023) [On the magnetic field of the Helmholtz ring system]. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyj i estestvennyj nauk*. No. 9-1(84), pp. 289-293. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-9-1-289-293. EDN MIJCIQ (in Russ.).
20. Chen X., Luo J., Lin D. (2021) Analysis and Visualization of Magnetic Field for Multi-dimensional Helmholtz Coils Based on PEEC: IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Shanghai, China, pp. 1-7. DOI: 10.1109/PEAS53589.2021.9628580
21. Zhu X., Xing M., Liu Ch. (2023) Optimization of composite Helmholtz coils towards high magnetic uniformity. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Vol. 47, p. 101539. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101539
22. Ke W., Qingwen F., Hongliang P. (2020) Research on Magnetic Field Uniformity of Compensated Helmholtz Coil: 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), Harbin, pp. 175-179. DOI: 10.1109/ICMCCE51767.2020.00046
23. Baranova V.E. Baranov P.F. (2014) The Helmholtz coils simulating and improved in COMSOL. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings, Omsk, November 11-13, 2014. Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005634
24. Feng Y., Li Y., Feng H., Yuan H. (2021) Method for generating variable magnetic field based on Helmholtz coil and its simulation research: 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII), Zhuhai, China, 22-24 January 2021. Zhuhai, pp. 61-64. DOI: 10.1109/ISMII52409.2021.00020
25. Schill R.A., Karin H. (2001) Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low ac magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 72, no. 6, p. 2769-2776. DOI: 10.1063/1.1368853
26. Zhao F., Zhou X., Xie X., Wang K. (2021) Design of Gradient Magnetic Field Coil Based on an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Magnetocardiography Systems: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 70, pp. 1-9. DOI: 10.1109/TIM.2021.3106677
27. Huang Y., Jiang L., Lei H. (2022) Optimal coil configuration analysis for the high-uniformity and large-caliber magnetic field immunity testing system. *Journal of Industrial Information Integration*. Vol. 30, p. 100384. DOI: 10.1016/j.jiii.2022.100384
28. Nismayanti A., Jannah H., Rugayya S. (2021) Helmholtz coils model as pulsed electromagnetic field therapy devices for fracture healing using comsol multiphysics. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1763, no 1, pp. 012060. DOI: 10.1088/1742-6596/1763/1/012060
29. Álvarez A.F., Mejía É.F., Ramírez H.C., Jaramillo C.R. (2016) Analysis of the Magnetic Field Homogeneity for an Equilateral Triangular Helmholtz Coil. *Progress in Electromagnetics Research M*. Vol. 50, pp. 75-83. DOI: 10.2528/PIERM16062309
30. Lomaev G.V., Emelyanova M.S. (2014) [The influence of variations in the Earth's magnetic field on the embryonic development of G. Gallus]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. No. 1 (23), pp. 127-131. EDN SNHTRZ (in Russ.).
31. Emelyanova M.S., Lomaev G.V. (2014) [On the issue of ontogenesis of bees in the hypomagnetic field of the Earth]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. No. 2 (24), pp. 157-159. EDN TCUJOZ (in Russ.).
32. Emelyanova M.S., Muravyov V.V. (2024) [Multilevel gradient generator for studying the influence of hypomagnetic fields on biological objects]. *Kontrol'. Diagnostika*. Vol. 27, no. 8 (314), pp. 17-27. DOI: 10.14489/td.2024.08.pp.017-027. EDN IVOJLF-131 (in Russ.).

Gradient Hypomagnetic Fields Modeling Based on Square Helmholtz Coils

M.S. Emelyanova, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S.A. Murashov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Helmholtz coils are widely used to generate controlled magnetic fields in magnetometer calibration, electromagnetic system testing, material property research experiments, and biotesting. Existing limitations in the homogeneity region of magnetic fields create difficulties in implementing experimental studies. Using multilevel generators with adjustable currents in coils allows generating gradient fields, which speeds up biotesting and increases its accuracy. This work is devoted to modeling gradient hypomagnetic fields using square Helmholtz coils. In COMSOL Multiphysics 6.1, a finite element model has been developed for analyzing magnetic fields generated by DC coils interacting with the Earth's external magnetic field. The patterns of field formation for different coil orientations relative to the declination and inclination angles of the magnetic field vector have been studied. The study of the formation patterns of gradient hypomagnetic fields in the space between square Helmholtz coils placed in the external magnetic field of the Earth was carried out using finite element modeling in the COMSOL Multiphysics software environment. The effect of currents in the coils on the distribution of the hypomagnetic field intensity in space and along the axis was investigated. Dependences of the informative parameters of the gradient curve of the hypomagnetic field intensity on the value of currents in the coils were obtained, allowing one to construct control functions for currents in square Helmholtz coils to form multi-level fields with an adjustable attenuation coefficient. The results of numerical modeling performed for cases of uniform and gradient distribution of magnetic fields were experimentally confirmed. The conducted full-scale experiments made it possible to compare the calculated data with actual measurements, which indicates a high reliability of the developed model.

Keywords: magnetic field, square Helmholtz coils, magnetic field strength gradient, modeling.

Получено 05.05.2025

Образец цитирования

Емельянова М. С., Мурашов С. А. Моделирование градиентных гипомагнитных полей на базе квадратных катушек Гельмгольца // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 2. С. 22–37. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-22-37

For Citation

Emelyanova M.S., Murashov S.A. (2025) [Gradient Hypomagnetic Fields Modeling Based on Square Helmholtz Coils]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2, pp. 22-37. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-22-37 (in Russ.)