

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

Затонов Иван Андреевич

**ИСТОЧНИК МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ОДНОРОДНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.2.4 – Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины)

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Баранов Павел Федорович

кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Воробьев Максим Сергеевич

доктор технических наук, ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, ведущий научный сотрудник Лаборатории плазменной эмиссионной электроники

Лысенко Игорь Евгеньевич

доктор технических наук, ООО «Маппер», г. Москва, руководитель проекта по организации НТО.

Защита диссертации состоится 21.01.2025 года в 15:00 часов на заседании диссертационного Совета ДС.ТПУ.31 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
ДС.ТПУ.31, кандидат технических наук

A stylized handwritten signature in blue ink, belonging to P. F. Baranov.

Баранов П.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Измерение и воспроизведение параметров магнитного поля является важной задачей науки и техники. Одной из основных характеристик магнитного поля является магнитная индукция – способность магнитного поля производить работу. Магнитная индукция, по сути, характеризует интенсивность магнитного поля и измеряется в Теслах (Тл). Магнитные поля по частоте колебаний подразделяются на постоянные (статические), низкочастотные (до 300 Гц), среднечастотные (от 300 Гц – 100 кГц) и высокочастотные (свыше 100 кГц), а по значению магнитной индукции на сверхсильные (свыше 100 Тл), сильные (от 1 до 100 Тл), средние (от 0,01 до 1 Тл), слабые (менее 0,01 Тл).

Наиболее востребованной областью магнитных измерений является область слабых магнитных полей, что подтверждается анализом актуальных потребностей в биомедицинских исследованиях и медицинской практике, системах квантовых вычислений, фундаментальных исследованиях и оборонном комплексе. Типовой диапазон измерений магнитометров для слабых постоянных магнитных полей составляет от 10^{-8} до 10^{-4} Тл; погрешность измерения доходит до долей нТл.

Согласно государственной поверочной схеме, для средств измерений магнитной индукции в качестве рабочих эталонов второго разряда и рабочих средств измерений для воспроизведения магнитной индукции до 10^{-9} Тл применяются меры магнитной индукции, в которых чаще всего используются катушки Гельмгольца и модификации на их основе для генерации однородного магнитного поля.

Несмотря на простоту изготовления катушек Гельмгольца, к их ключевому недостатку относится достаточно малый объем создаваемого однородного магнитного поля по сравнению со своими геометрическими размерами. Увеличение области однородности магнитного поля требует увеличения габаритных размеров катушек. Увеличить объем однородного поля можно за счет наращивания числа катушек в системе и изменения конструкции катушек. Так были спроектированы круглые катушки Максвелла, Браунбека, Бэкера, МакКихана, Гаррета, квадратные Гельмгольца, Меррита и Рубена др. Однако расчётные параметры (коэффициенты соотношений количества витков и расстояний между катушками) для систем, состоящих более чем из двух катушек имеют большое количество значащих цифр в дробной части, что затрудняет их практическую реализацию и достижение расчетного уровня однородности. Особенно это становится критичным при реализации малогабаритных систем катушек. При том обычно расчеты систем катушек не учитывают влияния сечения провода намотки на однородность магнитного поля, а анализ однородности традиционно проводится только вдоль оси симметрии катушек.

Одним из направлений совершенствования источника магнитной индукции для воспроизведения слабых магнитных полей может быть разработка и исследование систем многих катушек одинакового радиуса, как наиболее простых в

изготовлении. В таких системах увеличение объема однородности достигается наращиванием числа отдельных катушек.

Целью диссертационной работы является аналитический расчет, конечно-элементный анализ, практическая реализация и экспериментальные исследования конструкций систем катушек для воспроизведения магнитной индукции слабого постоянного магнитного поля с высокой степенью однородности.

В соответствии с поставленной целью, были сформулированы следующие задачи:

- 1) разработка универсальных аналитических выражений для анализа однородности магнитного поля, создаваемого системами катушек;
- 2) расчет и анализ конструкций систем катушек с высокой степенью однородности магнитного поля с учетом влияния сечения провода намотки катушек на однородность магнитного поля;
- 3) разработка регулируемого источника тока для питания систем катушек;
- 4) изготовление и экспериментальные исследования конструкций систем катушек с высокой степенью однородности для воспроизведения магнитной индукции слабого постоянного магнитного поля.

Методы исследования. Теоретическая часть работы выполнена на основе методов теории электромагнитного поля, теории погрешностей, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования. При расчетах и моделировании использовалось лицензионное программное обеспечение.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной на практике точностью экспериментальных данных, полученных при апробации систем катушек с применением эталонных средств измерений, с результатами моделирования и теоретических исследований. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с использованием современных прецизионных средств измерений, прошедших периодические поверку и калибровку.

Научная новизна работы

1. Рассчитаны конструкции систем из десяти круглых катушек одинакового радиуса для создания однородного магнитного поля и на основе полученных универсальных аналитических выражений для анализа магнитной индукции и неоднородности магнитного поля в любой точке пространства внутри систем круглых катушек проведена оценка неоднородности магнитного поля создаваемого ими.
2. Выбрано схемотехническое решение и на его основе реализован трехдиапазонный регулируемый источник тока, управляемый напряжением, который совместно с рассчитанными по предложенной модели конструкциями десятикатушечных систем позволяет воспроизводить магнитную индукцию в диапазоне от 10^{-10} до 10^{-4} Тл.
3. Реализованы и экспериментально исследованы рассчитанные конструкции систем из десяти круглых катушек одинакового радиуса, обеспечивающие высокую степень однородности магнитного поля.

Практическая ценность работы. Разработанные в ходе диссертационных исследований конструкции систем из десяти круглых катушек и трехкаскадный

регулируемый источник тока, управляемый напряжением, могут найти широкое применение при калибровке и градуировке малогабаритных типов датчиков магнитного поля и магнитометров на их основе, при построении компактных мер магнитной индукции с высокой степенью однородности магнитного поля. Разработанный экспресс-калькулятор может применяться для анализа неоднородности магнитного поля в любой точке пространства внутри систем круглых катушек при их проектировании.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использованы при выполнении следующих НИР:

- Грант РНФ № 17-79-10083 «Планарный феррозондовый преобразователь для системы магнитного вакуума квантового компьютера», 2017-2019 гг.
- Грант ФЦП № 14.578.21.0232 «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России», «Интеллектуальный инерциальный модуль на основе микроэлектромеханических датчиков с функциями гироскопа, акселерометра и магнитометра для систем ориентации, и навигации транспортных средств с автоматизированным управлением», 2017-2020 гг.
- Грант РФФИ № 20-57-S52001 «Формирование и исследование «фотонных крючков» с помощью компонент микрооптики для задач перспективных информационных технологий», 2020-2021 гг.
- Грант РФФИ № 21-57-10001 «3D-печать светоизгибающих фотонных переключателей в оптическом и терагерцовом спектральных диапазонах», 2021-2022 гг.

Результаты работы также используются: в ООО «Эксперт» (г. Томск) при реализации проекта по созданию системы калибровки датчиков магнитного поля и магнитометров; в учебном процессе в отделении Электронной инженерии Томского политехнического университета.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные универсальные выражения позволяют проводить расчеты магнитной индукции и неоднородности магнитного поля в любой точке пространства внутри систем круглых катушек независимо от их количества.
2. Реализованный трехдиапазонный регулируемый источник тока, управляемый напряжением, обеспечивает питание систем катушек в диапазоне токов от 0,1 мкА до 100 мА при напряжениях на входе от 0,02 В до 2 В с относительной погрешностью коэффициента преобразования менее 0,2 % в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкА и менее 0,1 % в остальном диапазоне.
3. Разработанные конструкции систем из десяти круглых катушек радиусом 50 мм позволяют воспроизводить магнитную индукцию с неоднородностью магнитного поля менее 0,02 % в объеме 30 % от радиуса.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- IV Международный молодёжный форум «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, 2016 г.;
- V Международный молодёжный форум «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, 2017 г.;
- VIII International Scientific and Practical Conference Information and Measuring Equipment and Technologies (IME&T 2017), г. Томск, 2017 г.;
- XII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2018), г. Новосибирск, 2018 г.;
- International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR 2018), г. Чэнду, Китай, 2018 г.
- International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2019), г. Воронеж, 2019 г.;
- XV Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL-2021, г. Томск, 2021 г.;
- XVI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON-2022), г. Томск, 2022 г.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 13 публикациях: 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, из них две статьи проиндексированы в базах данных WoS и Scopus; 6 статей в трудах международных и российских конференций, проиндексированных в WoS и Scopus; 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 3 статьи в рецензируемых научных сборниках трудов международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и приложений. Работа содержит 154 страницы основного текста, включая 109 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Воспроизведение слабого постоянного магнитного поля» приведен анализ метрологического обеспечения измерений магнитной индукции слабых постоянных магнитных полей в Российской Федерации. Приводятся основные метрологические характеристики магнитометров для измерения и мер магнитной индукции для воспроизведения слабых магнитных полей, включенных в Государственный реестр (Госреестр СИ) средств измерений. Типовой диапазон измерений магнитометров для слабых постоянных магнитных полей составляет от 10^{-8} до 10^{-4} Тл, погрешность измерения составляет единицы нТл для феррозондовых магнитометров и доли нТл для магнитометров на эффекте Оверхаузера.

Согласно государственной поверочной схеме для средств измерений магнитной индукции, в качестве рабочих эталонов второго разряда и рабочих средств измерений для воспроизведения магнитной индукции до 10^{-9} Тл применяются меры магнитной индукции. Для значений свыше 10-100 мкТл воспроизведение магнитной индукции в мерах магнитной индукции осуществляется на основе соленоида, а для значений ниже 10-100 мкТл на основе систем соосных катушек, чаще всего катушек Гельмгольца. Для мер на основе соленоида неоднородность магнитной индукции в рабочей области составляет $\pm 0,1-0,3$ %, при отношении размеров рабочей области к габаритным размерам соленоида ≈ 1 к 30. Для мер на основе систем соосных катушек неоднородность магнитной индукции в рабочей области составляет $\pm 0,007-0,7$ %, при отношении размеров рабочей области к габаритным размерам системы катушек от ≈ 1 к 20 до ≈ 1 к 5. Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного магнитного поля варьируются от ± 2 % до $\pm 0,02$ % и зависят в первую очередь от характеристик источника тока, питающего катушки.

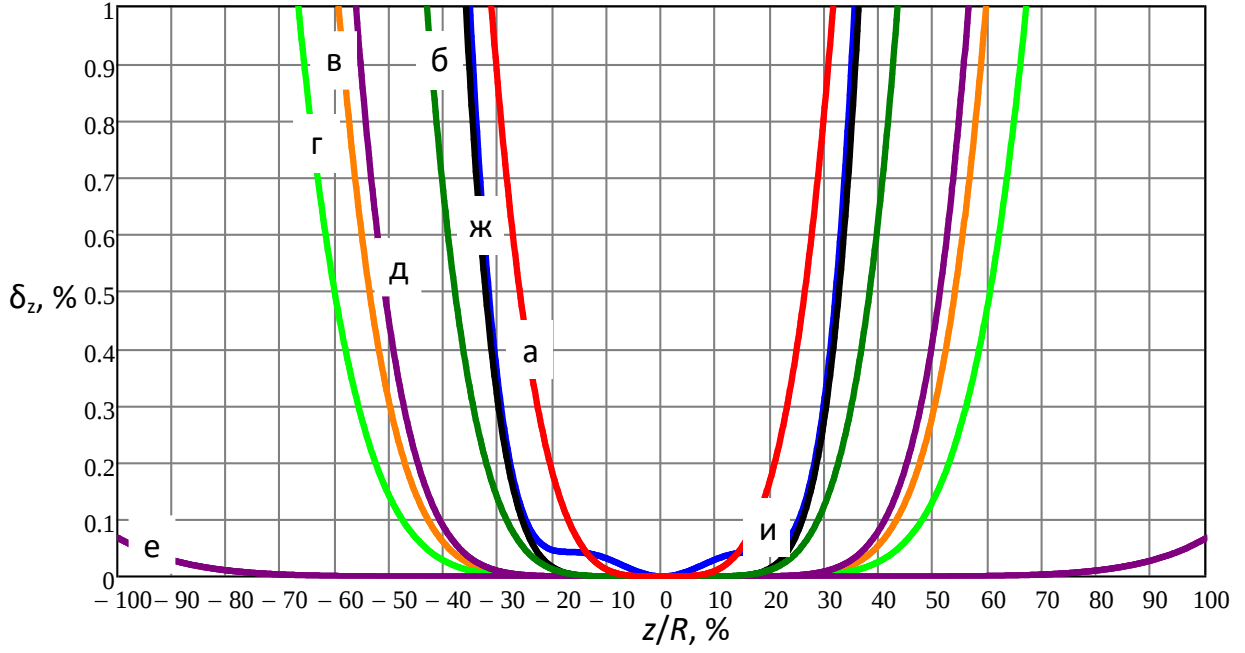
Анализ общих принципов воспроизведения магнитной индукции слабого постоянного магнитного поля показывает, что для создания области однородного магнитного поля нашли применения соленоиды, аксиальные 2-х катушечная система Гельмгольца, 3-х катушечные Максвелла и Меррита, 4-х катушечные Браунбека, Бэкера, МакКихана, Гаррета, Меррита, 5-ти катушечные Рубена, а так же их модификации. Конструктивно системы катушек можно разделить на круглые (наиболее часто применяемые), квадратные, треугольные и сложной формы.

На рисунке 1 приведены графики относительной неоднородности магнитного поля вдоль оси симметрии z , создаваемого круглыми, радиуса R , катушками Гельмгольца, Максвелла, Браунбека, Бэкера, МакКихана, Гаррета, квадратными четырехкатушечной системой Меррита и пятикатушечной системой Рубена с длиной стороны квадрата d , рассчитанные по формуле:

$$\delta_z = \frac{(|B(z) - B(0)|)}{B(0)} \cdot 100. \quad (1)$$

Увеличение числа катушек в системе ведет к увеличению области однородности магнитного поля, однако расчётные параметры (коэффициенты соотношений количества витков и расстояний между катушками) для систем, состоящих более чем из двух катушек, имеют большое количество значащих цифр в дробной части, что затрудняет их практическую реализацию и достижение расчетного уровня однородности. Особенно это становится критичным при реализации малогабаритных систем катушек.

Одним из направлений совершенствования мер магнитной индукции для воспроизведения слабых магнитных полей может быть расчет многокатушечных систем одинакового радиуса, как наиболее простых в изготовлении. В таких системах увеличение объема однородности достигается увеличением числа отдельных катушек. Примером многокатушечной системы одинакового радиуса является система Бэкера, состоящая из 4 катушек.



Системы катушек: (а) – Гельмгольца; (б) – Максвелла; (в) – Браунбека; (г) – Бэкера; (д) – МакКихана; (е) – Гаррета; (ж) – Меррита; (и) – Рубена.

Рисунок 1 – Неоднородность $\delta_z(z/(R=d))$ магнитного поля, создаваемого системами катушек

Многокатушечные системы одинакового радиуса рассчитываются с помощью итерационного алгоритма: при расчёте систем, состоящих из n пар симметрично расположенных от центра системы катушек, необходимо вычислить n неизвестных расстояний h от симметричной пары катушек до центра системы и $(n - 1)$ неизвестных коэффициентов k , определяющих число витков в соответствующих парах катушек как kN .

Для вычисления неизвестных параметров многокатушечной системы необходимо выражение вида:

$$\begin{aligned}
 B(z) = 0.5\mu_0 INR^2 \left\{ \left[R^2 + (z + h_1)^2 \right]^{-3/2} + \left[R^2 + (z - h_1)^2 \right]^{-3/2} + \right. \\
 + k_1 \left[R^2 + (z + h_2)^2 \right]^{-3/2} + k_1 \left[R^2 + (z - h_2)^2 \right]^{-3/2} + \dots \\
 \left. \dots + k_{n-1} \left[R^2 + (z + h_n)^2 \right]^{-3/2} + k_{n-1} \left[R^2 + (z - h_n)^2 \right]^{-3/2} \right\},
 \end{aligned} \quad (2)$$

для заданного числа пар симметрично расположенных катушек разложить в ряд Тейлора, и составить систему нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} B^{(2)}(z=0) = 0 \\ \dots \\ B^{(4n-2)}(z=0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Точное решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (3) приводит к вещественным результатам с большим количеством знаков в дробной части. На практике любая система катушек может быть реализована только с целым числом витков, а с технологической точки зрения расстояния от пар катушек до центра системы должны быть кратными заданному уровню точности изготовления. Итерационная методика предполагает, что после точного решения системы уравнений (3), параметры первой пары катушек округляются с заданной точностью, и расчёт повторяется для меньшего числа параметров. Шаги методики повторяются до тех пор, пока не будут рассчитаны параметры всех пар катушек с целым числом витков и расстояниями до центра системы с заданной точностью.

Во второй главе «Расчёт и моделирование систем катушек» описаны методы расчёта магнитного поля систем катушек на основе закона Био-Савара-Лапласа, методик Симпсона, Макдональда и Джексона. Для анализа магнитной индукции систем катушек, создающих однородное магнитное поле, предлагается использовать методику на основе закона Био-Савара-Лапласа, так как данная методика позволяет рассчитать магнитную индукцию в любой точке рассматриваемой системы с одинаковой точностью независимо от геометрии конструкции.

Рассмотрим в общем виде расчет магнитной индукции круговой двухкатушечной системы, показанной на рисунке 2.

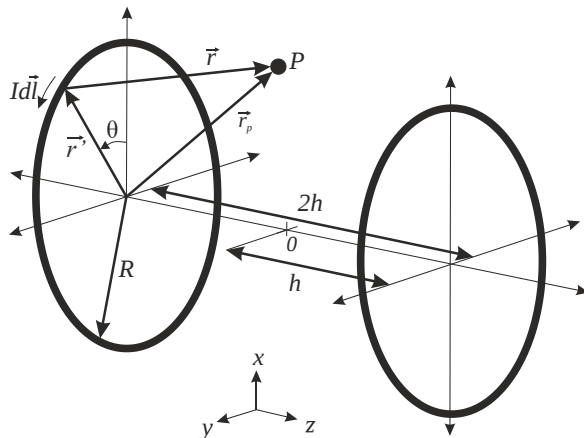


Рисунок 2 – Круговая двухкатушечная система

Предположим, что ось симметрии двухкатушечной системы коллинеарна оси OZ , и катушки находятся на расстоянии $\pm h$ от центра координат. Расчет магнитной индукции пары круглых катушек производится согласно формуле:

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I d\vec{l}_1 \times \vec{r}_1}{|\vec{r}_1|^3} + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I d\vec{l}_2 \times \vec{r}_2}{|\vec{r}_2|^3}, \quad (4)$$

где $d\vec{l}_1$, $\vec{r}_1$, $d\vec{l}_2$ и $\vec{r}_2$ – вектора, соответствующие катушкам с координатами по оси симметрии $z = h$ и $z = -h$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м.

При расчёте поля в декартовых координатах результирующий вектор магнитной индукции можно выразить формулой:

$$\vec{B}(x, y, z) = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k} = (B_{x_1} + B_{x_2}) \hat{i} + (B_{y_1} + B_{y_2}) \hat{j} + (B_{z_1} + B_{z_2}) \hat{k}. \quad (5)$$

где B_x , B_y и B_z – компоненты вектора магнитной индукции в декартовой системе координат; $\hat{i}$, $\hat{j}$, $\hat{k}$ – единичные векторы в декартовой системе координат.

Упростим выражение (5) и запишем:

$$\vec{B}(x, y, z) = \sum_{m=1}^n \left(B_{x_m} \hat{i} + B_{y_m} \hat{j} + B_{z_m} \hat{k} \right). \quad (6)$$

Выражение (6) является универсальным для любого числа аксиальных катушек. В случае описания двухкатушечной системы коэффициент n равен 2.

Введём следующие обозначения для модуля квадрата радиус вектора r , соответствующих катушкам, расположенным в положительной (F_{m+}) и отрицательной (F_{m-}) части координат при $n = 2$:

$$F_{m+} = (z + h_m)^2 + (x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta)^2; \quad (7)$$

$$F_{m-} = (z - h_m)^2 + (x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta)^2. \quad (8)$$

Для упрощения записи введём постоянную величину:

$$B_{const} = \mu_0 N I R / 4\pi, \quad (9)$$

где N – количество витков в катушках; I – сила тока, протекающего через катушки, А;

С учетом выражений (4) и (9) выразим компоненты вектора магнитной индукции:

$$B_{x_m} = B_{const} \int_0^{2\pi} \left(\frac{(z + h_m) \cos \theta}{F_{m+}^{3/2}} + \frac{(z - h_m) \cos \theta}{F_{m-}^{3/2}} \right) d\theta; \quad (10)$$

$$B_{y_m} = B_{const} \int_0^{2\pi} \left(\frac{(z + h_m) \sin \theta}{F_{m+}^{3/2}} + \frac{(z - h_m) \sin \theta}{F_{m-}^{3/2}} \right) d\theta; \quad (11)$$

$$B_{z_m} = B_{const} \int_0^{2\pi} \left(\frac{R - x \cos \theta - y \sin \theta}{F_{m+}^{3/2}} + \frac{R - x \cos \theta - y \sin \theta}{F_{m-}^{3/2}} \right) d\theta. \quad (12)$$

Выражения (10-12) позволяют вычислить компоненты вектора магнитной индукции в любой точке пространства внутри системы из двух катушек. Для расчета магнитной индукции в системах с большим числом отдельных катушек необходимо в подынтегральных функциях выражений (10-12) увеличить число слагаемых пропорционально количеству анализируемых катушек.

Для аналитической оценки неоднородности магнитного поля, создаваемого круглыми системами катушек, в программном обеспечении Matlab был написан экспресс-калькулятор, реализующий расчет магнитной индукции по формулам (6-12) и неоднородности магнитного поля по формуле (1).

На основе итерационной методики были рассчитаны параметры десятикатушечных систем круглых катушек. Все расчёты были проведены для катушек с заданным радиусом 50 мм при номинальном токе через систему катушек 1 мА, и количестве витков в первой паре катушек N равным 10, с требуемым уровнем неоднородности менее 0,01 % на расстояниях $\pm R/2$ от геометрического центра вдоль аксиальной оси системы (ось Z). Из-за округления параметров катушек и при увеличении числа катушек в системе, итерационная методика расчёта приводит не к единственному конечному результату, а к нескольким, каждый из которых удовлетворяет начальным условиям по заданной области однородности

магнитного поля. В таблице 1 приведены полученные результаты расчетов параметров для трех вариантов десятикатушечной системы.

Таблица 1 – Рассчитанные параметры десятикатушечных систем

Номер пары катушек	Расстояние от центра системы до пар катушек, мм	Число витков в парах катушек
Десятикатушечная система № 1		
1	10,0	10
2	19,0	20
3	50,0	19
4	65,0	40
5	218,0	203
Десятикатушечная система № 2		
1	10,0	10
2	19,0	20
3	50,0	19
4	65,0	40
5	164,0	55
Десятикатушечная система № 3		
1	10,0	10
2	19,0	20
3	50,0	19
4	63,0	38
5	153,0	39

На рисунке 3 показана зависимость неоднородности магнитного поля рассчитанных десятикатушечных систем вдоль оси Z , полученная в экспресс-калькуляторе.

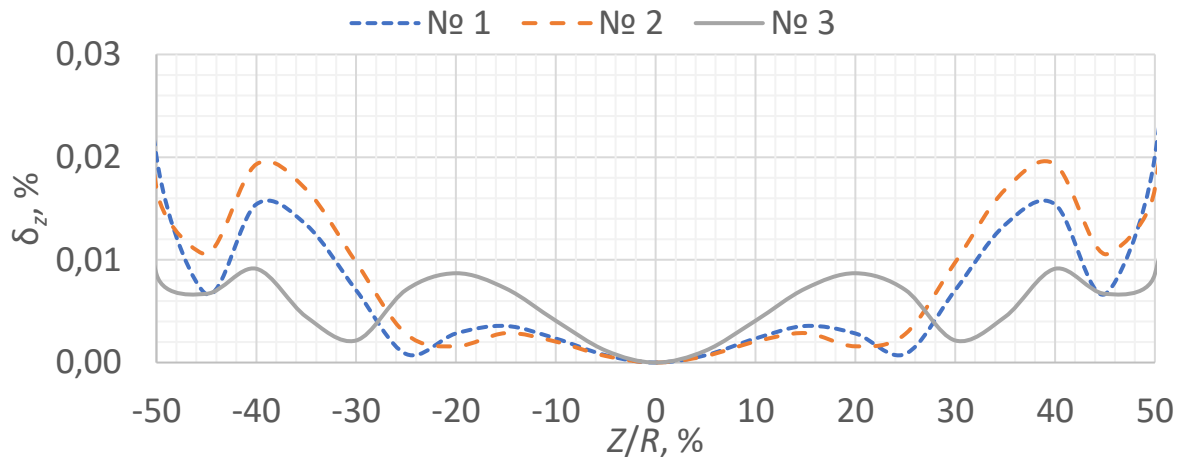


Рисунок 3 – Неоднородность магнитного поля десятикатушечных систем вдоль оси Z

На рисунке 4 представлен контурный график неоднородности магнитного поля десятикатушечной системы №3 в диапазоне относительной неоднородности от 0 до 0,1 % с шагом 0,01 %.

Использованная методика расчёта систем катушек не учитывает влияние сечения провода намотки катушек, а также ширины и толщины катушек на одно-

родность магнитного поля. С целью уточнения результатов аналитических расчётов, десятикатушечные системы были промоделированы в среде конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics, позволяющей проанализировать влияние геометрических размеров катушек (рисунок 5) на однородность магнитного поля

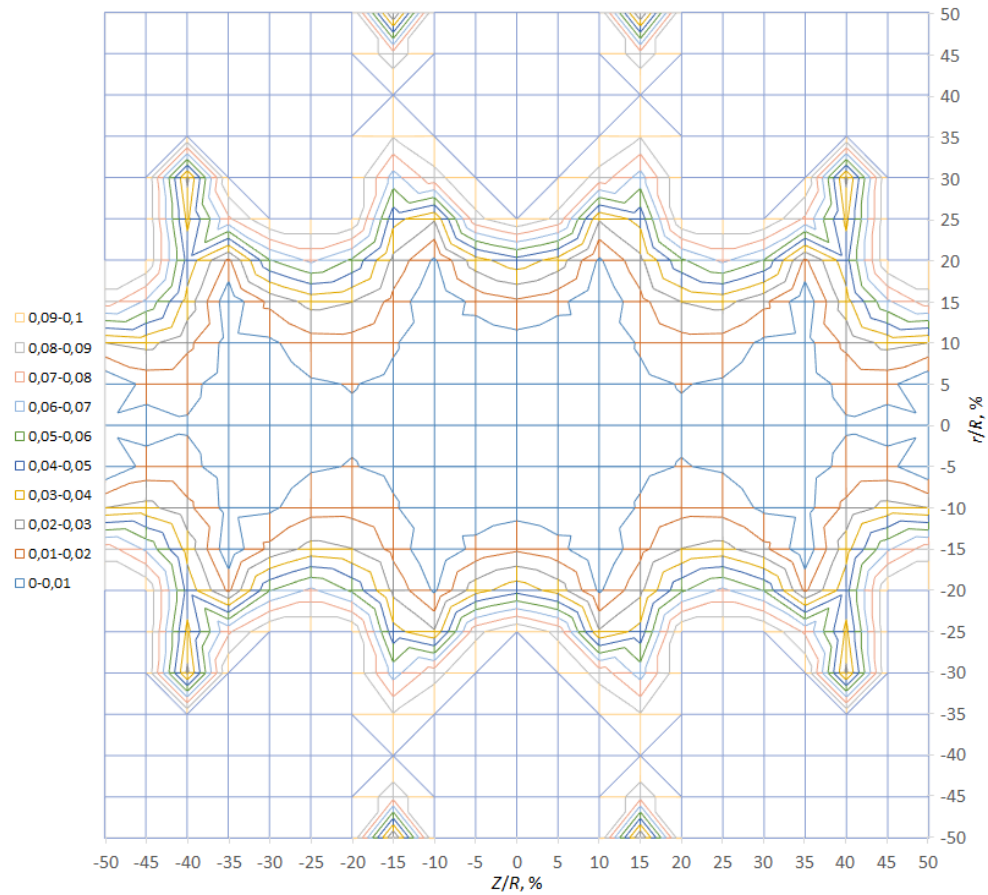


Рисунок 4 – Контурный график неоднородности магнитного поля десятикатушечной системы №3 с шагом 0,01 %

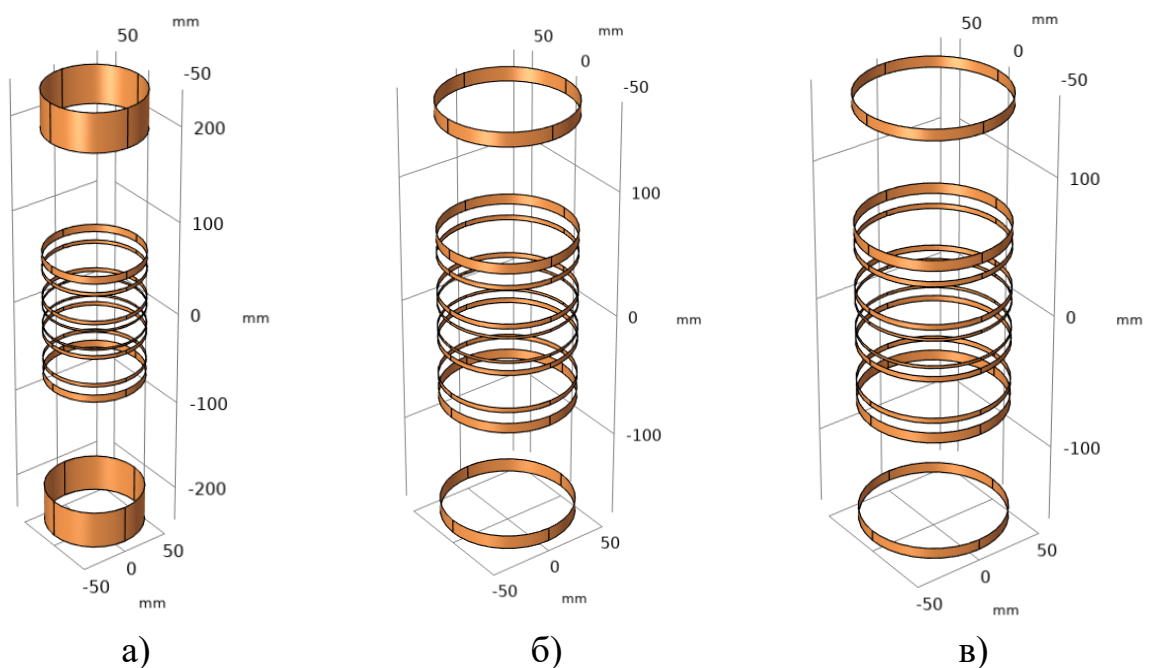
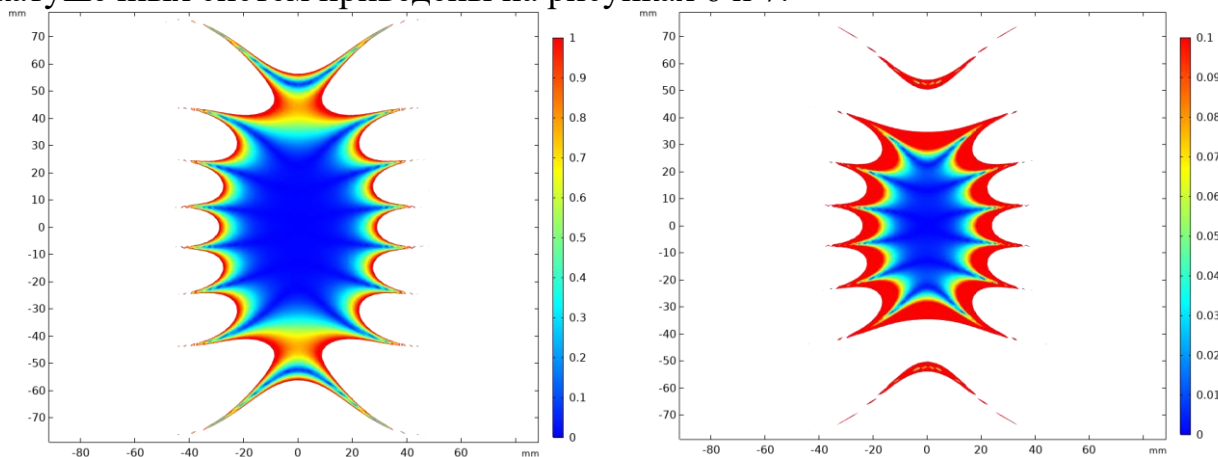
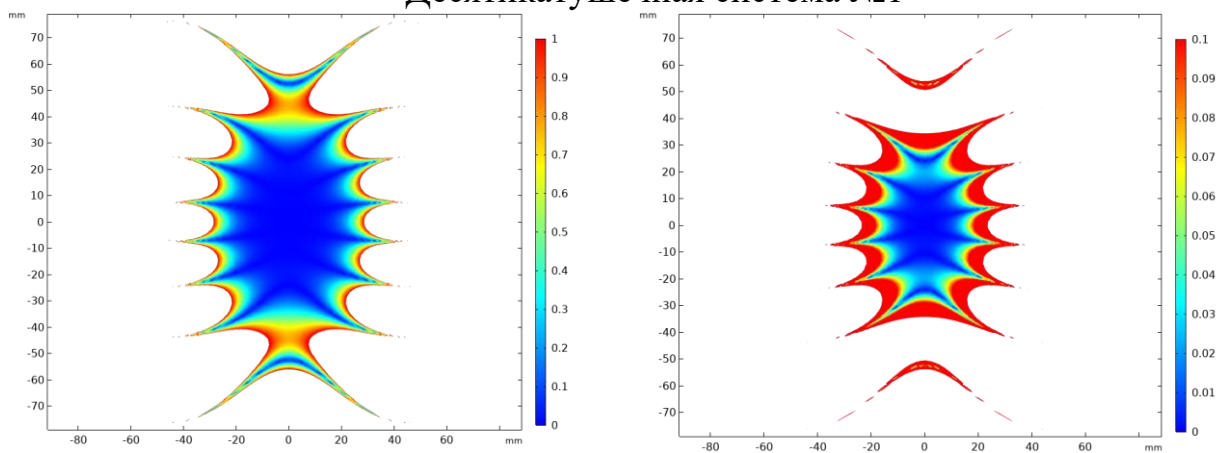


Рисунок 5 – Геометрия десятикатушечных систем: № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)

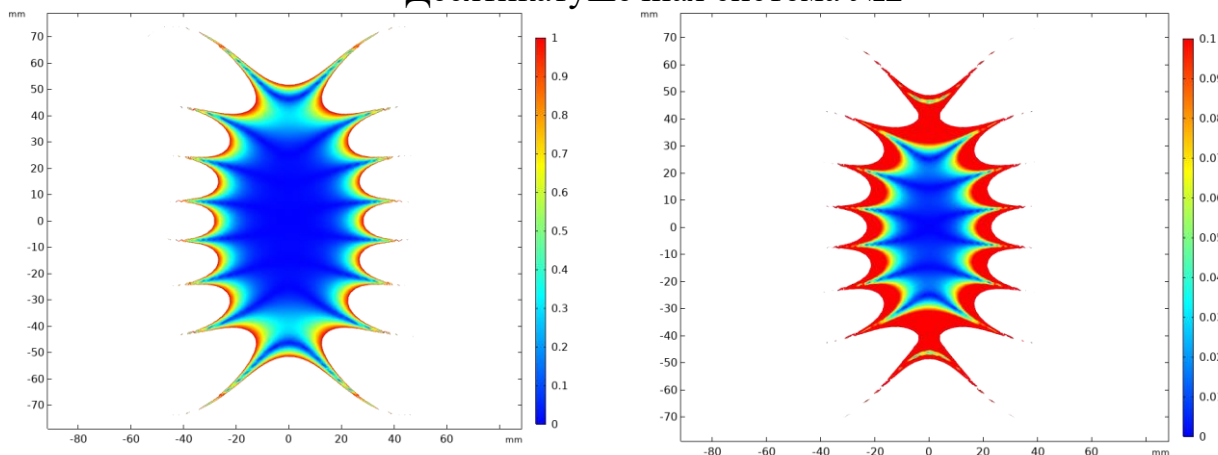
Результаты конечно-элементного анализа геометрии рассчитанных десятикатушечных систем приведены на рисунках 6 и 7.



Десятикатушечная система №1



Десятикатушечная система №2



Десятикатушечная система №3

Рисунок 6 – Распределения магнитного поля в десятикатушечных системах вдоль оси Z

Из распределения магнитного поля и графических зависимостей на рисунках 6 и 7, следует, что результаты конечно-элементного анализа десятикатушечных систем практически совпали с результатами аналитических расчетов. Поскольку наибольшую однородность обеспечивают десятикатушечные системы № 1 и № 3, то именно их целесообразно реализовать на практике для дальнейшего исследования.

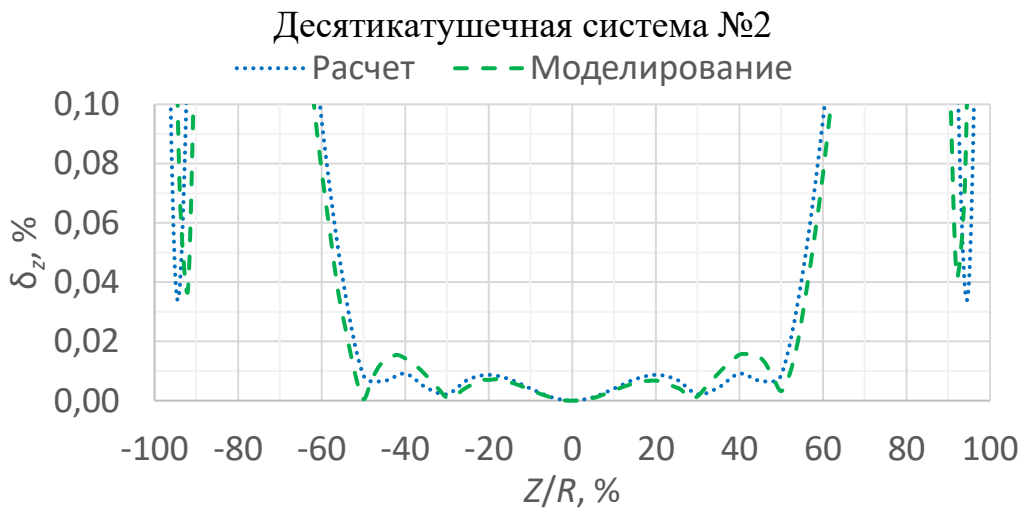
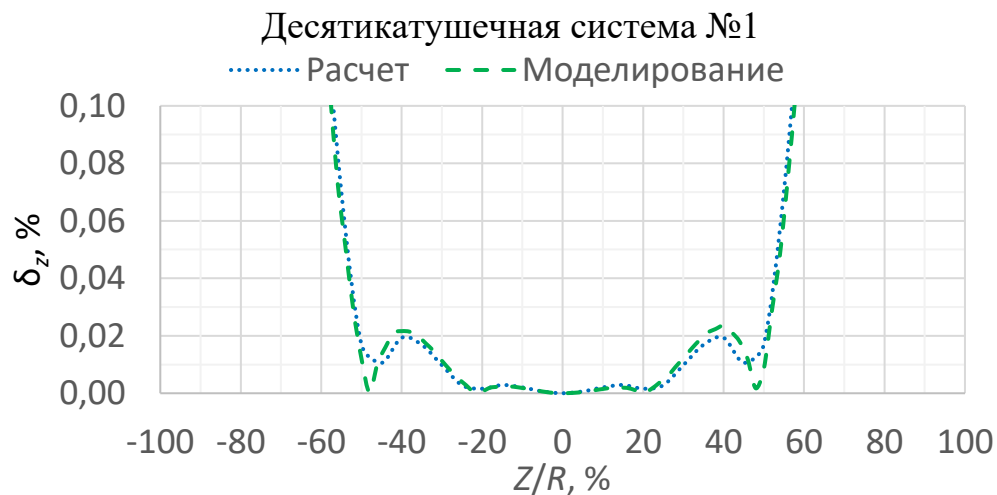
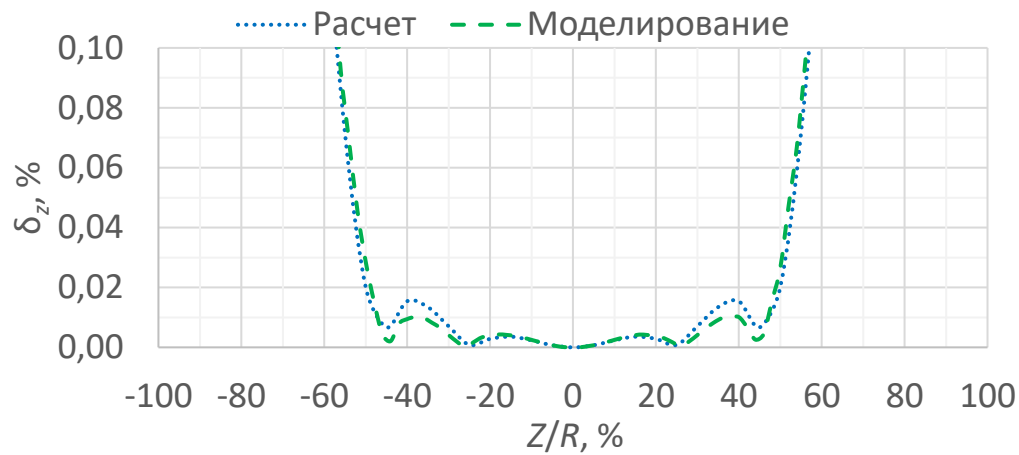


Рисунок 7 – Неоднородность магнитного поля десятикатушечных систем вдоль оси Z

В третьей главе «Разработка источника тока для систем катушек» приводится описание разработки управляемого источника постоянного тока, работающего преимущественно на индуктивную нагрузку для питания систем катушек. Приводится краткий обзор схем построения источников тока. На основе схемного решения компании Texas Instruments по реализации управляемого преобразователя напряжения в ток для заземленной нагрузки реализован трехдиапа-

зонный прецизионный регулируемый источник тока, управляемый напряжением. Результаты расчетов и конечного элементного анализа показали, что коэффициент преобразования десятикатушечных систем составляет приблизительно 1 мА / 1 мкТл. Таким образом, диапазон выходного тока для источника тока должен составлять от 100 мА до 100 нА для обеспечения воспроизведения магнитной индукции в диапазоне от 100 мкТл до 0,1 нТл с помощью рассчитанных десятикатушечных систем.

Схемотехническая модель спроектированного источника тока в среде моделирования NI Multisim представлена на рисунке 8. Для стабилизации работы схемы и минимизации высокочастотных помех дополнительно между выходом каждого ОУ и затвором соответствующего транзистора установлен резистор, отсекающий ОУ от емкостной нагрузки цепи затвора, а также конденсатор, формирующий отрицательную обратную связь для высокочастотной помехи.

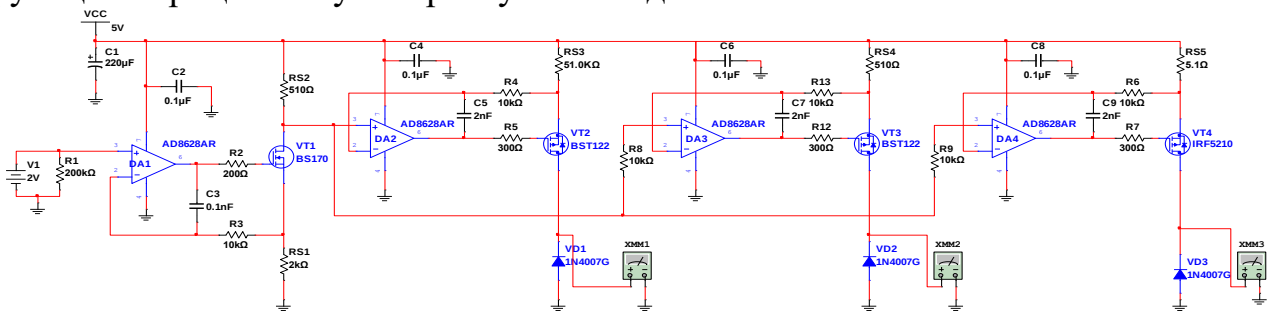


Рисунок 8 – Схемотехническая модель источника тока

Номиналы элементов источника тока рассчитаны таким образом, чтобы при изменении входного управляющего напряжения от 20 мВ до 2 В выходной ток первого каскада регулировался в диапазоне от 0,1 до 10 мкА; ток второго каскада регулировался в диапазоне от 10 до 1000 мкА; ток третьего каскада регулировался в диапазоне от 1 до 100 мА.

Для оценки влияния разброса значений номиналов пассивных компонентов был применен метод Монте-Карло. Для всех пассивных компонентов был установлен допуск на отличие значения от номинального в 0,1 %, проведено по 50 симуляций для каждого заданного значения входного управляющего напряжения, измеряли выходной ток, после чего рассчитывались такие показатели, как: относительная погрешность, среднее значение относительной погрешности и среднее значение среднеквадратического отклонения относительной погрешности в соответствии с выражениями (13-15).

$$\delta_i = \left(|I_{\text{НОМ}} - I_{\text{ВЫХ}i}| \right) / I_{\text{НОМ}} \cdot 100 \quad (13)$$

где $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный выходной ток источника тока, А; $I_{\text{ВЫХ}i}$ – i -ое измеренное значение выходного тока, А; i – номер результата измерений.

$$\bar{\delta} = 1/n \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (14)$$

где n – количество проведённых измерений.

$$\bar{S} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2 / n(n-1)} \quad (15)$$

Результаты моделирования показали, что источник тока линеен во всем диапазоне от 0,1 мкА до 100 мА, погрешность коэффициента преобразования источника тока не превышает 0,1 % в указанном диапазоне. Внешний вид изготовленного источника тока показан на рисунке 9.

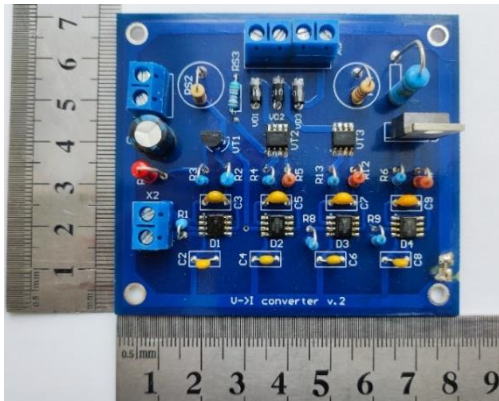


Рисунок 9 – Внешний вид печатной платы источника тока

Для оценки метрологических характеристик разработанного источника тока управляющее напряжение задавалось с помощью генератора-калибратора Fluke 5520A, выходной ток измерялся с помощью мультиметра Agilent 3458A, питание схемы источника тока осуществлялось от лабораторного блока питания GPD-74303S, к выходу исследуемого каскада источника тока для создания однородного магнитного поля была подключена восьмикатушечная система, разработанная коллективом научной группы автора ранее. Таким образом метрологические характеристики источника тока определялись при работе на реальную, высокоиндуктивную нагрузку, а не на холостом ходу. Входное управляющее напряжение задавалось в диапазоне от 0,01 до 0,1 В с шагом 0,01 В, в диапазоне от 0,1 до 2 В с шагом 0,1 В. Для каждого установленного значения напряжения выходной ток измерялся 5 раз, после чего рассчитывались показатели погрешности, в соответствии с выражениями (13-15).

Относительная погрешность коэффициента преобразования источника тока в диапазоне от 0,05 до 0,2 мкА не превышает 0,2 %, в диапазоне от 0,2 мкА до 100 мА составила менее 0,1 %.

Для оценки влияния сопротивления нагрузки на выходной ток к выходу третьего канала источника тока подключали переменный резистор при входном управляющем напряжении 2 В, что соответствует номинальному выходному току 100 мА, изменяли сопротивление резистора в диапазоне от 0 до 50 Ом и с помощью мультиметра Agilent 3458A измеряли выходной ток.

Из результатов измерений следует, что диапазон допустимых сопротивлений нагрузки составляет от 0 до 42 Ом. В указанном диапазоне относительная погрешность преобразования не превышает 0,1 %.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования систем катушек с высокой степенью однородности» описан процесс изготовления десятикатушечных систем для создания однородного магнитного поля на основе технологии 3D-печати методом послойного наплавления, и приведены результаты экспериментальных исследований однородности магнитного поля изготовленных систем.

Для каждой десятикатушечной системы каркас был разбит на три сектора ввиду технологических ограничений по высоте печати 3D-принтера, а также требований по габаритам к каркасу для возможности выполнения последующей намотки катушек автоматизированным способом. Габаритный чертеж десятикатушечной системы № 3 и ее 3D-модель приведены на рисунке 10.

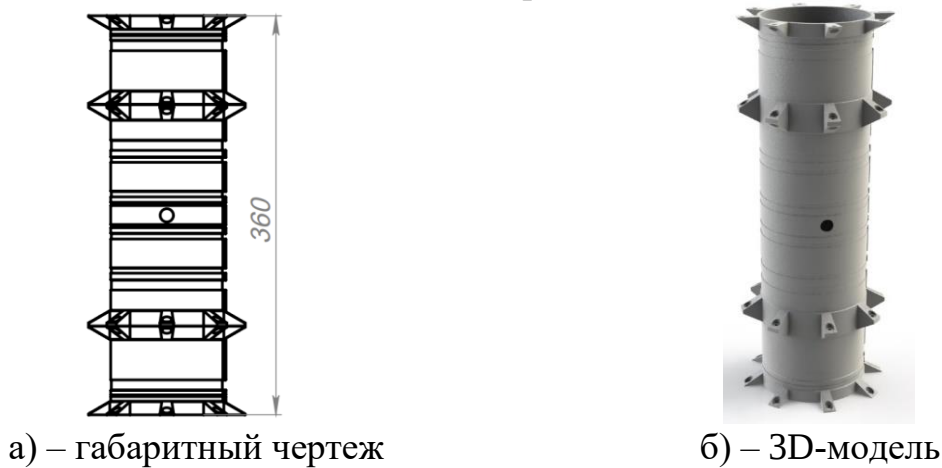


Рисунок 10 – Конструкция десятикатушечной системы № 3

В качестве материала для 3D-печати каркаса использовался полиактид (ПЛА, PLA). При подготовке моделей каркасов к печати были выставлены следующие параметры: высота слоя – 0,1 мм; диаметр сопла 3D-принтера – 0,4 мм; температура сопла 3D-принтера – 220 °С; температура стола 3D-принтера – 50 °С. Итоговое общее время печати моделей каркасов составило 122 часа. Намотка катушек на каркас производилась эмалированным проводом ПЭТВ-2 диаметром 0,18 мм. Катушки на каждый из трех каркасов наматывались отдельно, с последующим последовательным соединением методом пайки. Намотка производилась на намоточном станке. Сборка систем катушек осуществлялась при помощи латунного крепежа. Выводы от крайних катушек для подключения источника тока были припаяны на приборные разъемы. С целью фиксации положения катушек на каркасе витки катушек были пропитаны клеем.

На рисунке 11 представлен внешний вид изготовленного макета десятикатушечной системы № 3.

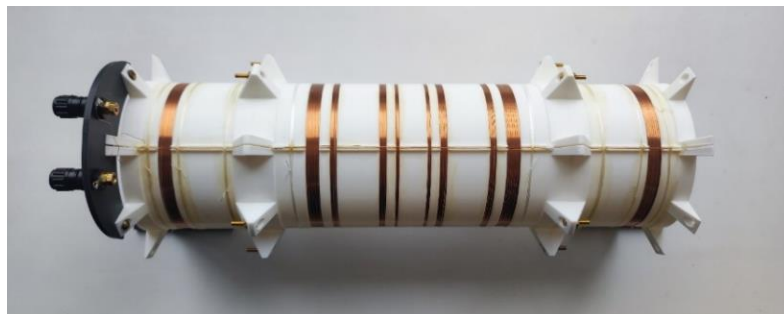


Рисунок 11 – Внешний вид макета десятикатушечной системы № 3

Экспериментальные исследования изготовленных десятикатушечных систем проводились с помощью магнитометра Mag-01H, феррозондового датчика магнитного поля НВ0391.5-20, магнитоизмерительного канала НВ0300.2, мультиметра Agilent 3458A и синхронного усилителя. Система катушек запитывалась от разработанного источника тока – рисунок 12.

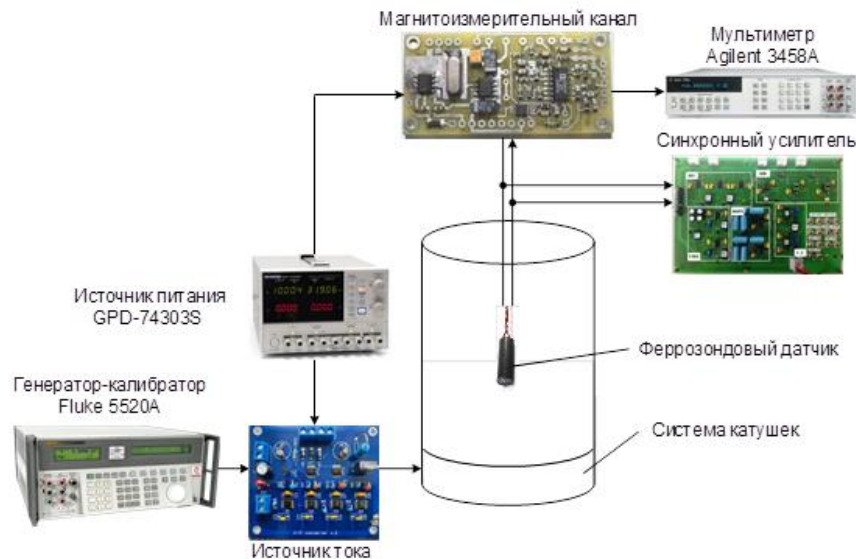


Рисунок 12 – Схема для исследования систем катушек

С помощью генератора-калибратора Fluke 5520A задавалось управляющее напряжение для источника тока. Магнитометром Mag-01H измеряли магнитное поле в геометрическом центре системы катушек, затем, вместо датчика магнитометра Mag-01H, в центр системы катушек помещается феррозондовый датчик магнитного поля HB0391.5-20, подключенный к магнитоизмерительному каналу HB0300.2. Магнитоизмерительный канал HB0300.2 обеспечивает возбуждение датчика HB0391.5-20 и кондиционирование выходного сигнала с него. Магнитоизмерительный канал преобразует сигнал с выхода феррозондового датчика в постоянное напряжение, пропорциональное измеряемой магнитной индукции. Напряжение с выхода магнитоизмерительного канала измеряли при помощи мультиметра Agilent 3458A, также напряжение с выхода феррозондового датчика на удвоенной частоте возбуждения контролировалось синхронным усилителем. Питание схемы источника тока и магнитоизмерительного канала осуществлялось от лабораторного блока питания GPD-74303S.

Для автоматизированной оценки однородности магнитного поля, создаваемого десятикатушечными системами, был собран экспериментальный стенд на основе шестиосевого робота-манипулятора Kuka KR4 R600 – рисунок 13.

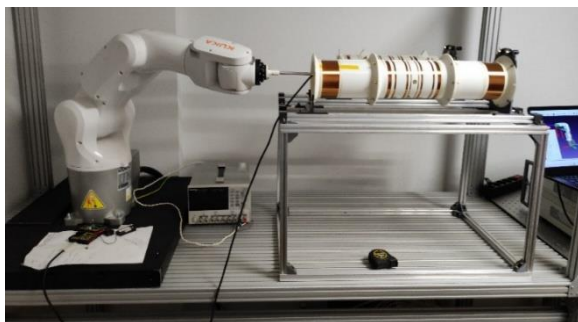


Рисунок 13 – Экспериментальный стенд для оценки однородности магнитного поля

Датчик магнитного поля, помещаемый внутрь системы катушек, был закреплён на капролоновой штанге, зафиксированной во фланце робота-манипулятора. Многокатушечная система позиционировалась таким образом, чтобы минимизировать влияние внешнего магнитного поля.

Магнитное поле внутри системы катушек измерялось в горизонтальных плоскостях на расстояниях $0, \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 25, \pm 30, \pm 35, \pm 40$ мм от центра системы. Каждая плоскость образует сечение цилиндра в форме окружности, центр которой принимается за начало отсчета положений точек, в которых измерялось магнитное поле. Позиционирование датчика магнитного поля осуществлялось согласно шаблону, изображённому на рисунке 14. В каждой точке, определяемой шаблоном, магнитное поле измерялось в направлении аксиальной оси системы катушек (ось Z).

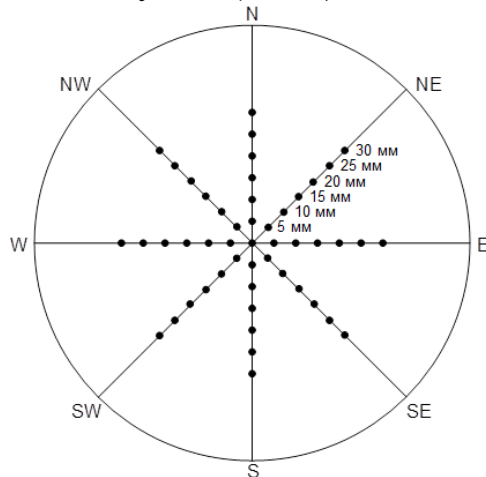
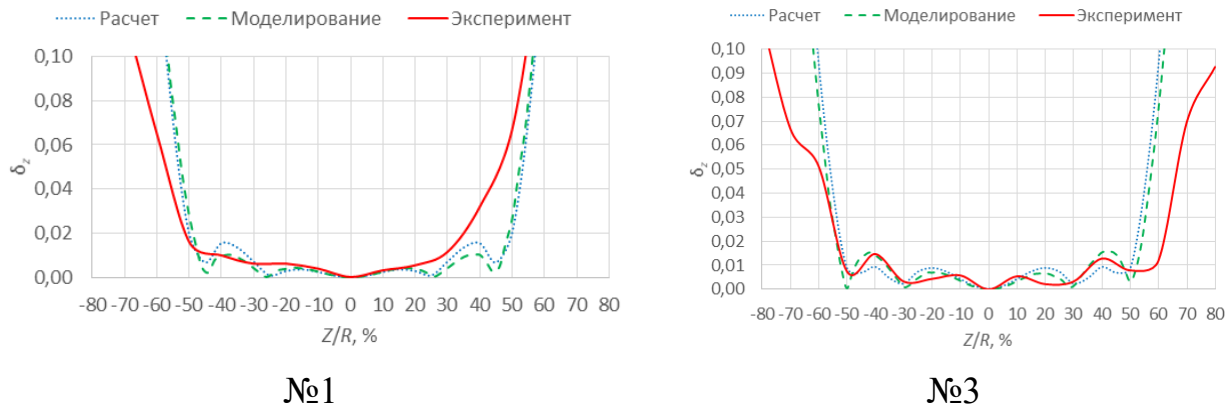


Рисунок 14 – Измерительный шаблон

На рисунке 15 приведены зависимость неоднородности магнитного поля десятикатушечных систем №1 и №3 вдоль оси Z, измеренные непосредственно в центре системы.



№1

№3

Рисунок 15 – Неоднородность магнитного поля десятикатушечных систем №1 и №3 вдоль оси Z, измеренные в центре системы

На рисунке 16 представлены контурные графики неоднородности магнитного поля десятикатушечной системы №3 с шагом $0,02\%$ для осей WE, NS, NWSE и NESW (см. измерительный шаблон).

Результаты экспериментального исследования десятикатушечной системы №1 показали, что относительно геометрического центра системы неоднородность магнитного поля не превышает $0,02\%$ в объеме 30% от радиуса системы. На расстоянии 50% от центра системы неоднородность магнитного поля не превышает $0,1\%$. Значение магнитной индукции в центре десятикатушечной системы №1 при токе 1 мА составляет $1,11\text{ мкТл}$, и отличается от полученного в результате моделирования на $0,6\%$.

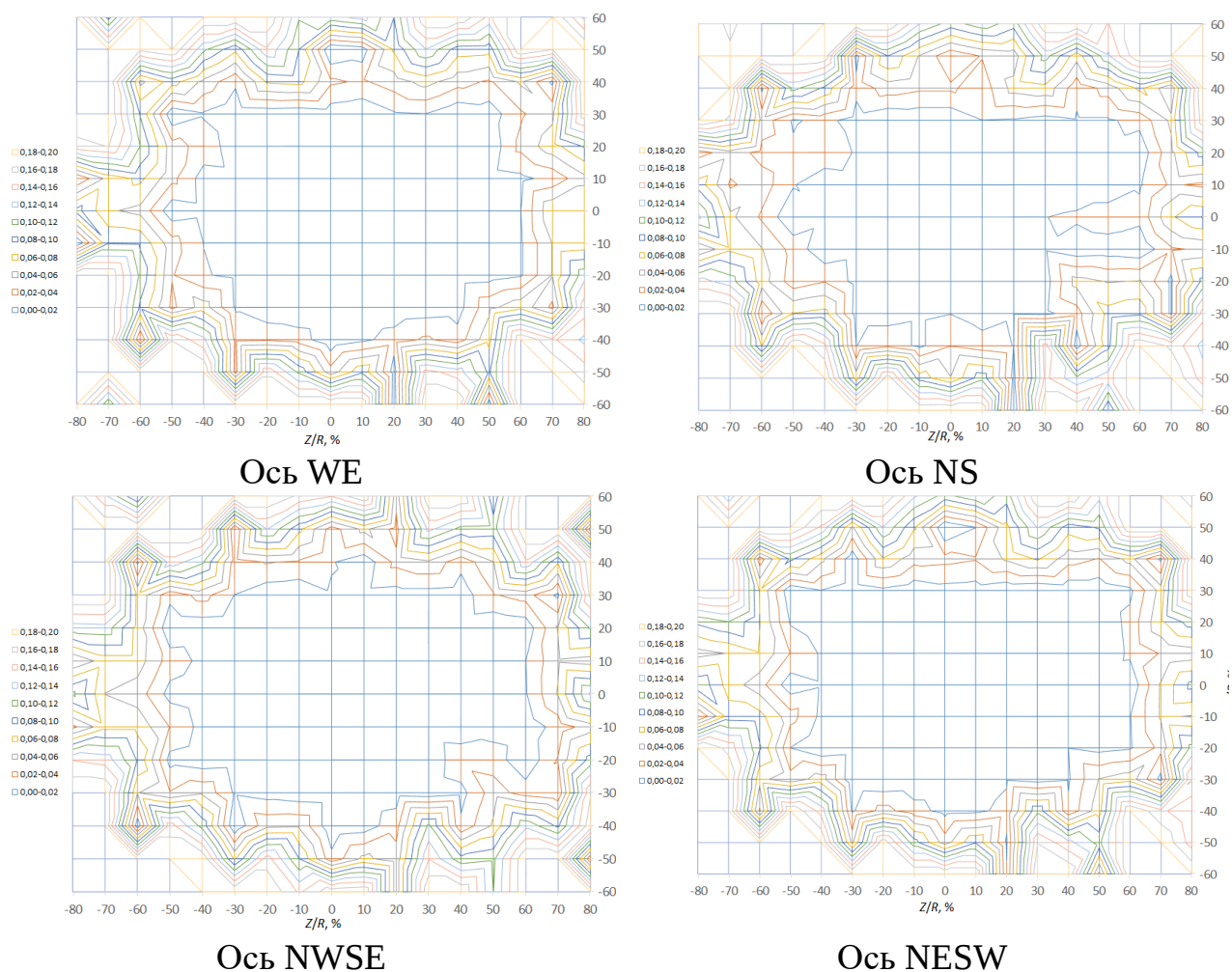


Рисунок 16 – Графики неоднородности магнитного поля десятикатушечной системы №3 с шагом 0,02 %

Результаты экспериментального исследования десятикатушечной системы №3 показали, что относительно геометрического центра системы неоднородность магнитного поля не превышает 0,02 % в объеме 30 % от радиуса системы. На расстоянии 50 % от центра системы неоднородность магнитного поля не превышает 0,02 %. Значение магнитной индукции в центре десятикатушечной системы №3 при токе 1 мА составляет 1,07 мкТл, и отличается от полученного в результате моделирования на 0,4 %.

Таким образом десятикатушечная система №3 является более предпочтительной по сравнению с исполнением №1 как с точки зрения однородности магнитного поля внутри системы, так и с точки зрения меньших габаритных размеров и количества витков в отдельных катушках, что делает ее более технологичной и экономически выгодной в производстве.

В приложении диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны универсальные аналитические выражения для анализа однородности магнитного поля, создаваемого системами круглых катушек и на их основе написан экспресс-калькулятор, позволяющий рассчитать

магнитную индукцию и неоднородность магнитного поля в любой точки пространства внутри системы катушек.

2. На основе итерационной методики были рассчитаны параметры десятикатушечных систем круглых катушек с высокой степенью однородности магнитного поля и проведен конечно-элементный анализ конструкции этих катушек, который позволил подтвердить правильность расчетов с учетом влияния геометрически размеров на однородность магнитного поля.
3. Реализован и экспериментально исследован трехдиапазонный регулируемый источник тока, управляемый напряжением, который обеспечивает питание систем катушек в диапазоне токов от 0,1 мкА до 100 мА при напряжениях на входе от 0,02 В до 2 В с относительной погрешностью коэффициента преобразования менее 0,2 % в диапазоне от 0,1 до 0,2 мкА, менее 0,1 % в остальном диапазоне.
4. Экспериментально показано, что разработанные конструкции систем из десяти круглых катушек радиусом 50 мм позволяют воспроизводить магнитную индукцию с неоднородностью магнитного поля менее 0,02 % в объеме 30 % от радиуса.
5. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР, финансируемых в рамках РНФ, ФЦП и РФФИ.
6. Разработанные десятикатушечные системы, источник тока, экспериментальный стенд на основе шестиосевого робота-манипулятора Кука используются для исследования и калибровки датчиков магнитного поля и магнитометров в ООО «Эксперт», а также в учебном процессе отделения электронной инженерии Томского политехнического университета, что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных WoS или Scopus

1. **Zatonov, I.** Dual phase lock-in Amplifier with Photovoltaic Modules and Quasi-Invariant Common-Mode Signal / Baranov P., Zatonov I., Duc B.B. // Electronics. – 2022. – Т. 11. – №. 9. – С. 1512.
2. **Zatonov, I.** Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology / A. A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya [et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12. – No 2. – P. 117-123.

Патенты и свидетельства о Государственной регистрации программ для ЭВМ

3. **Затонов, И.А.** Экспресс-калькулятор магнитной индукции десятикатушечных систем / П.Ф. Баранов, И.А. Затонов // Свидетельство о Государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023689378 Правообладатель Томский политехнический университет (RU); Оpubл. 29.12.2023

4. **Затонов, И.А.** Патент № 2786062 С1, МПК G01R 19/10, H03F 3/191. Аналоговый синхронный усилитель: № 2021136651: заявл. 10.12.2021: опубл. 16.12.2022 / П.Ф. Баранов, И.А. Затонов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Статьи в трудах конференций, индексируемых в базах данных WoS или Scopus

5. **Zatonov, I.** Phase Compensation of Voltage Follower / Baranov P., Zatonov I., Stukach O. // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2022. – P. 1-5.
6. **Zatonov, I.** Photonic hook: A new sub-wavelength-scale selfbending light beam / I. V. Minin, I. A. Zatonov, L. Yue [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 12086. – P. 1208616.
7. **Zatonov, I.** Photonic hook - A new type of self-bending structured light beams / P. F. Baranov, I. A. Zatonov, D. B. Bui // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1614. – P. 012106.
8. **Zatonov, I.** The Numerical simulation of the shielded helmholtz coils system magnetic field / I. Zatonov, P. Baranov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 155. – P. 01038.
9. **Zatonov, I.** Magnetic field computation and simulation of the coil systems using Comsol software / I. Zatonov, P. Baranov, A. Kolomeyev // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 160. – P. 01006.
10. **Zatonov, I.** Numerical simulation of the betatron magnetic field using ELCUT software / I. Zatonov, M. Shtein // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – P. 03007.

Статьи в других изданиях

11. **Затонов, И.А.** Применение программного пакета Elcut для подбора параметров магнитного поля бетатрона / И. А. Затонов // Инженерия для освоения космоса: Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием, Томск, 12–14 апреля 2016 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 130-135.
12. **Затонов, И.А.** Исследование тепловой картины поля бетатрона / И. А. Затонов // Инженерия для освоения космоса : сборник научных трудов V Международного молодежного форума, Томск, 18–20 апреля 2017 года / Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. – С. 75-81
13. **Затонов, И.А.** Расчет и моделирование многокатушечных систем генерации сверхдлинноволнового магнитного поля / И.А. Затонов, П.Ф. Баранов, А. Коломейцев // Наука. Технологии. инновации: Сборник научных трудов: в 9 частях, Новосибирск, 03–07 декабря 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 119-122.