

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ «ELCUT»
ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОЙ ГОЛОВКИ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ
С ВЫСОКОЙ РАВНОМЕРНОСТЬЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студентки 4 курса 2022 группы
направления подготовки 03.03.02 «Физика» Института физики
Передумовой Екатерины Александровны

Научный руководитель
к.т.н.

В. А. Малярчук

Заведующий кафедрой
общей, теоретической и компьютерной физики
д.ф.-м.н., профессор

В. М. Аникин

Саратов 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последнее время технологии значительно совершенствовались, в результате чего произошел скачок вычислительной мощности компьютеров. Данный факт предоставил разработчикам моделирующих программ новые возможности. Прежде всего, это расчеты электромагнитного поля, которые ранее имели принципиальные сложности, связанные с решением уравнений Максвелла.

Нюансом, часто осложняющим использование современных методов электромагнитного моделирования, является не столько производительность, как низкая точность и объективность моделей. Классические компоненты ВЧ/СВЧ цифрового устройства делятся на активные и пассивные. Чаще всего активные устройства представляются моделями с заданной нелинейностью с корреляцией характеристик как во время моделирования, так и во время экспериментов (в различных диапазонах режимов устройств). Пассивные блоки описываются линейными моделями, адекватно описывающими параметры и режимы работы. Поэтому при проектировании устройств необходимы специальные методы и подходы, облегчающие решение задач по моделированию.

К примеру, для решения этих проблем часто используются модели, использующие классические нелинейные параметры (X-параметры и S-функции) вместо используемых ранее компактных математических моделей. При моделировании пассивных устройств задача значительно упрощается, так как линейные модели практически не зависят от внешних условий. Поэтому пассивные блоки делятся на компоненты с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Цель и задачи выпускной квалификационной работы:

обзор современных программных комплексов по моделированию физических полей,

проведение сравнительного анализа российских и зарубежных программ;

рассмотрение распределения магнитного поля в катушках индуктивности;

моделирование нескольких конфигураций магнитной головки малых размеров с высокой равномерностью распределения магнитного поля и выявление картины поля каждой из конфигураций;

выявление оптимальной формы магнитной головки.

Структура выпускной квалификационной работы. Работа включает лист обозначений и сокращений, введение, три части:

Теоретическую часть.

Сравнительный анализ зарубежных и отечественных компьютерных программ моделирования физических полей. Обзор программы моделирования ELCUT.

Практическую часть. Создание модели магнитной головки малых размеров; Моделирование магнитного поля головки разных конфигураций; Поиск конфигурации магнитной головки с высокой равномерностью поля;

заключение; список использованной литературы (22 наименования). Общий объем работы – 43 с.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Теоретическая часть содержит формулы, на основе которых проводится моделирование распределения магнитного поля, а также обсуждение общих свойств алгоритмов численного моделирования физических процессов.

2 Сравнительный анализ зарубежных и отечественных компьютерных программ моделирования физических полей.

Анализ программ. Для наглядности построена таблица, в которой ряд программ моделирования (ANSYS Multiphysics, Maxwell, COMSOL Multiphysics, ELCUT, Code Aster, Salome, Elmer) рассмотрен с позиций областей применения, степени разработанности, особенностям геометрии решаемых задач, финансовой доступности, возможных затруднений, которые могут испытывать пользователи.

В качестве «фаворита» определена по большинству параметров программа ELCUT, для которой присущи: дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса, высокая степень автоматизации всех операций и низкая стоимость программы.

Обзор программы моделирования ELCUT. Программа ELCUT, разработка ООО «Тор» (Санкт Петербург)– единственный российский общеупотребительный инструмент общего назначения для моделирования низкочастотных электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов. Имеет множество пользователей в этой индустрии и профильных вузах. Программа предназначена для широкого круга пользователей, включая тех, которые решают полевые задачи от случая к случаю. Это повышает требования к концептуальной простоте и интуитивной ясности пользовательского интерфейса.

В основу математического аппарата ELCUT положены исследования в области численного моделирования, выполненные акад. К.С. Демирчяном, проф. В.В. Домбровским, проф. Ю.В. Ракитским и их учениками: Ю.П. Кизимовичем, Е.Э. Мазиным, С.А. Пригожиным и др.

В настоящее время формулировки электромагнитных задач ELCUT представляют собой квазистатические задачи, в которых отсутствуют либо ток смещения, либо закон электромагнитной индукции, т.е. уравнения не содержат вторых производных по времени. Для расчета электрического поля предлагается формулировка электростатики, электрического поля постоянных токов в проводящем массиве, гармоническая во времени формулировка электрического поля переменных токов, учитывающая токи утечки в слабо проводящем диэлектрике и такая же задача во временной области, позволяющая включить в модель произвольный импульс приложенного напряжения и нелинейные свойства диэлектрика.

Важно отметить, что магнитное поле рассчитывается в магнитостатическом приближении, т.е. поле постоянного тока и постоянного магнита, в частотной области с гармоническим временным изменением поля с учетом вихревых токов в проводящем материале и во временной области с решением нестационарной электромагнитной задачи по-прежнему в квазистационарном приближении, т.е. без учета тока смещения, в качестве общего физического дополнения предлагаются

статическая и динамическая тепловые задачи системы твердых тел и задача расчета двумерного упруго-деформированного состояния. В программе организована автоматическая общая физическая связь задач из разных физических разделов, позволяющая четко описывать термическое и механическое действия электромагнитных явлений, а также влияние температуры на электропроводность материалов.

Для разработки технических приборов, таких как соленоиды, электродвигатели, магнитные экраны и антенны в настоящее время применяются программы моделирования магнитного поля. Главный интерес в данных расчетах являются такие величины как напряженность магнитного поля, индукция и, кроме этого потоки поля в обмотках трансформаторов и двигателей. В широком спектре программных комплексов, применяемых для решения таких задач высокое место занимает российская программа Elcut, которая предоставляет широкие возможности для разработчиков и конструкторов технологических установок. Комплекс Elcut применяется для решения задач моделирования магнитного поля в 2d и 3d версиях. При постановке задачи формулируются следующие аспекты:

1. Физические характеристики сред и материалов
2. Параметры источников поля – постоянный и переменный электрический ток, внешнее поле.
3. Условие Дирихле, детерминированные значения индукции, константы поверхностного потенциала .
4. Расчетные данные: потенциал магнитного поля, индукция и напряженность, энергия, индуктивности материалов и деталей.
5. Специальные условия геометрии поверхностей.

Магнитные моменты включаются в расчет механических напряжений элементов и конструкций.

Для реализации решения задачи с использованием программы Elcut важно пройти следующие этапы:

1. Определить алгоритм задачи с описанием параметров.
2. Построить геометрическую модель устройства в 2d или 3d.
3. Ввести физические данные материалов.
4. Провести решение задачи с анализом результатов.

Физические свойства материалов и сред увязываются с пространственными характеристиками устройства с помощью расстановки пространственных или плоскостных. Для этого используются метки блоков и ребер с описанием граничных условий. Важнейшими физическими характеристиками при таком моделировании считаются магнитная проницаемость, коэрцитивная сила магнита и параметры источников поля.

3. Практическая часть.

Цель: Моделирование малой магнитной головки катушки индуктивности такой формы, чтобы распределение магнитного поля на торце катушки было равномерным.

Описание задачи:

Тип задачи: нестационарное магнитное поле

Класс модели: осесимметричная

Единицы длины: миллиметры

Для полного наблюдения процесса распределения линий магнитной индукции хватает 0,05с.

Построение геометрической модели:

1. Построение общего пространства с границей нулевого поля:

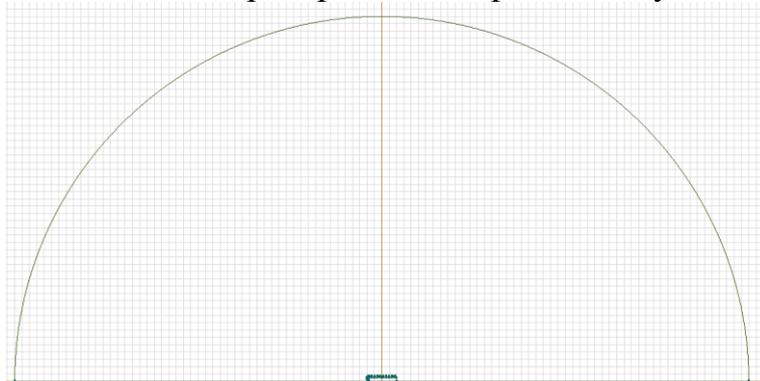


Рисунок 1 – Построение геометрической модели: нулевое поле

Построение катушки индуктивности с обмоткой

Сетка привязки составляет 0,5 мм. S ширина сердечника - 2см.

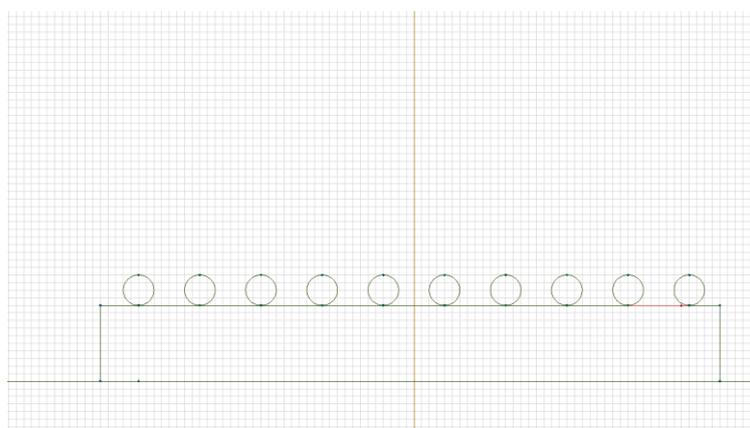


Рисунок – 2. Построение геометрической модели: катушка индуктивности.

Создание меток и свойств меток.

Метки блоков:

Воздух (магнитная проницаемость – 1; электропроводность – 0 См/м; источники поля – 0 В).

Обмотка (магнитная проницаемость – 1; электропроводность 56000000 См/м; источники поля – 220 В)

Сердечник (магнитная проницаемость – 500; электропроводность – 10000000 См/м; источники поля – 0 В)

Метки ребер:

Нулевое поле (магнитный потенциал – 0)

Построение сетки конечных элементов

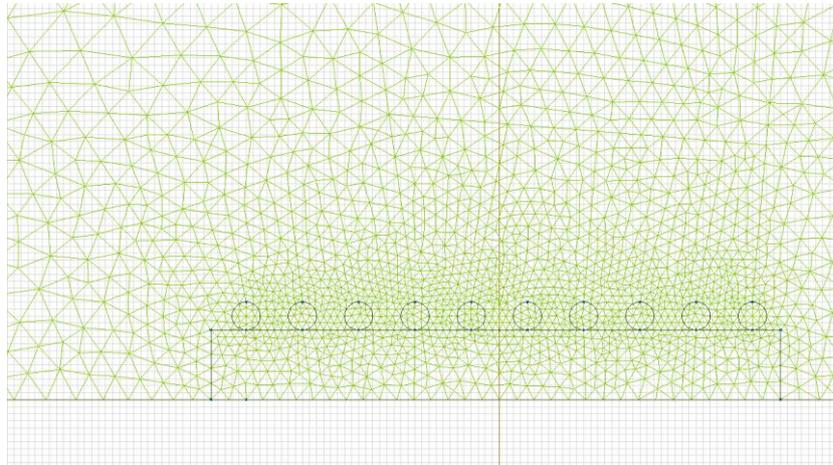


Рисунок 3 – Сетка дискретизации модели.

Моделирование магнитного поля головки.

Для того чтобы понять, каким должно выглядеть верное решение поставленной задачи, проанализируем картину поля исходной катушки.

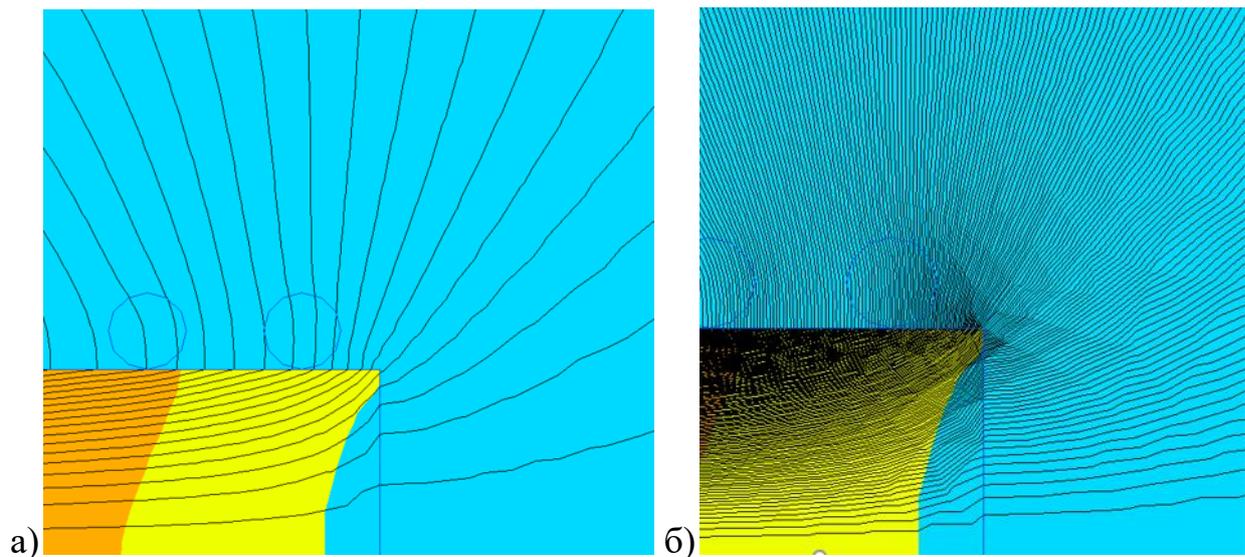


Рисунок 4 – Распределение магнитных линий исходной катушки индуктивности:

- а) с шагом силовых линий 0.003 Вб;
- б) с шагом силовых линий 0,0003 Вб)

Как можно заметить, поле на торце исходной модели неоднородно. Магнитные линии сосредотачиваются ближе к краю катушки индуктивности, из чего следует вывод, что правильным решением будет подобрать вогнутую конфигурацию головки катушки.

Вогнутая конфигурация головки.

Построение геометрической модели вогнутой головки:

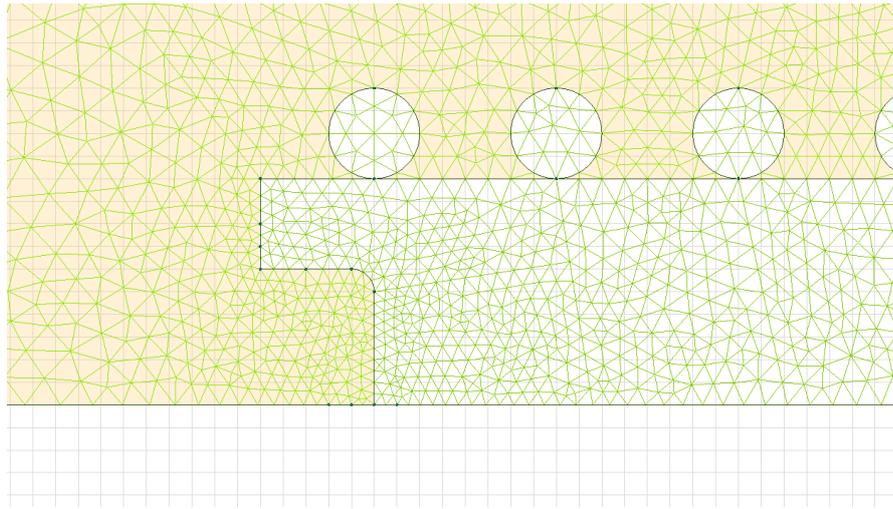


Рисунок 5 – Геометрическая модель головки вогнутой конфигурации.

Решение

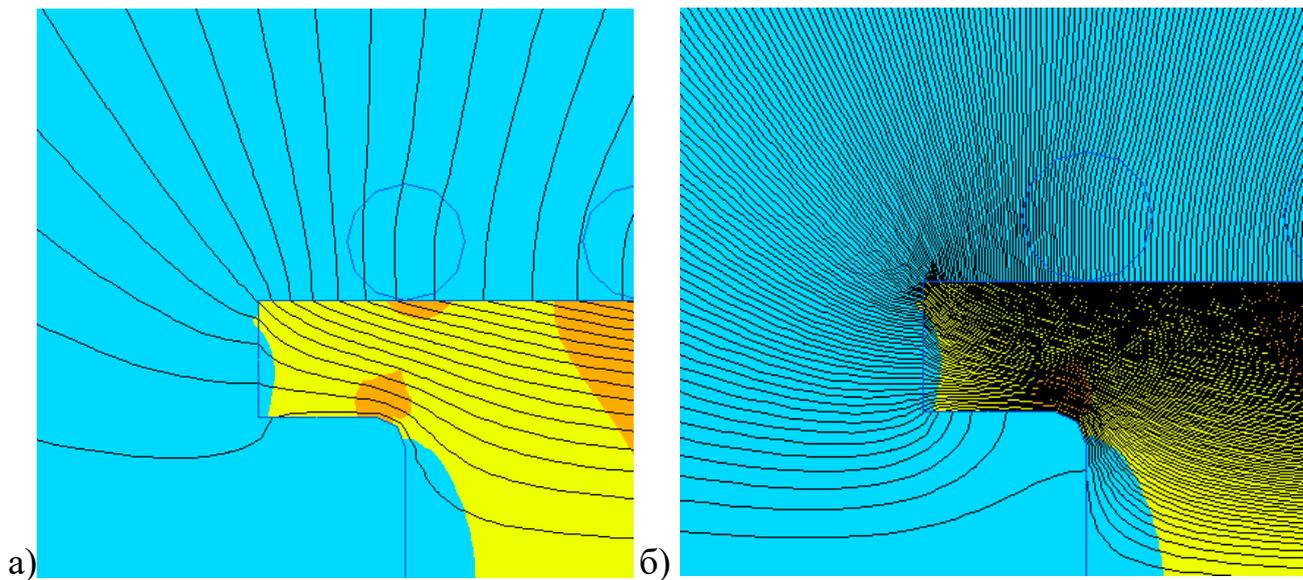


Рисунок 6 – Вогнутая конфигурация модели головки:

а) с шагом силовых линий $-0,003$ Вб;

б) с шагом силовых линий $0,0003$ Вб

Распределение торцевого магнитного поля в катушке индуктивности с выбранной конфигурацией головки более равномерно.

Оптимально подобранные размеры углубления магнитной головки

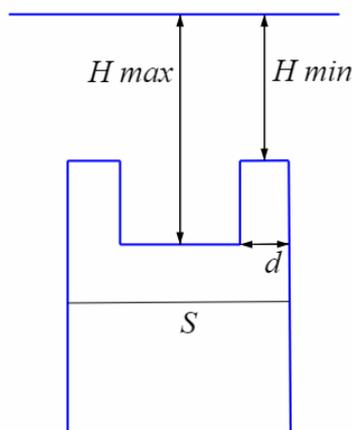


Рисунок 7. Схематичное изображение магнитной головки вогнутой конфигурации

Таблица. Найденные значения параметров

S	H_{min}	H_{max}	d
10 мм	2 мм	4,5 мм	2 мм

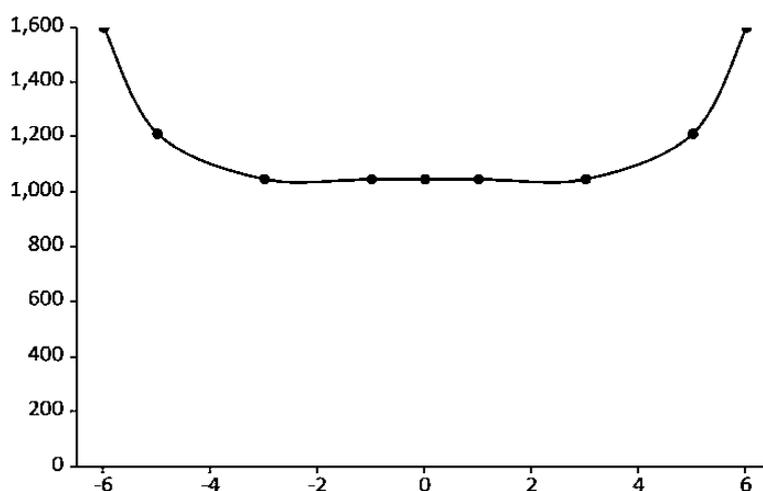


Рисунок 8. График распределения линий магнитной индукции на торце катушки.

ВЫВОДЫ

Основные результаты, полученные при работе над выпускной квалификационной работой, состоят в следующем:

1. Дан обзор ведущих программ моделирования физических полей. Проведена сравнительная характеристика зарубежных и российских программ, выявлена ведущая программа.
2. Подробно рассмотрено распределение магнитного поля в катушках индуктивности. Изучен эффективный метод расчета поставленной задачи.
3. Было смоделировано несколько конфигураций магнитной головки малых размеров с высокой равномерностью распределения магнитного поля. Выявлены картины поля каждой из конфигураций.

4. Произведен анализ выбранных конфигураций модели и выявлена наиболее эффективное глубина выемки в сердцевине магнитной головки. Построен график распределения магнитного поля катушки с выбранной конфигурацией головки.

Список использованной литературы

1. Elcut. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Санкт-Петербург: ООО «Тор», 2013.
2. Официальный сайт Elcut. Магнитостатика. http://elcut.ru/dcmag_r.htm.
3. Игнатъева Т. А., Федотова Н. И. Использование программного продукта Elcut при решении задач магнитостатики // Молодой ученый. 2014 № 21 (80). С. 161–164.
4. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2006. 576 с.
5. Кожанова Е. Р., Захаров А. А., Ткаченко И. М. Возможность применения вейвлет-функции Гаусса первого порядка для моделирования продольного распределения магнитного поля реверсивных магнитных периодических систем // Молодой ученый. 2014. № 2 (61). С. 149–152.
6. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. Л.: Энергия, 1974, 288 с. с ил.
7. Царев В. А., Спиридонов Р. В. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учебное пособие. Саратов: изд-во «Новый ветер», 2010. 352 с.
8. Мельников Ю. А. Постоянные магниты электровакуумных СВЧ приборов. Изд-во «Советское радио», 1967. 183 с.
9. Permanent Magnets in Theory and Practice. Malcolm McCaig. Halsted Press, Div. of J. Wiley and Sons, New York, NY, 1977.
10. Кожанова Е. Р., Захаров А. А. Применение модернизированной вейвлет-функции «Французская шляпа» для аппроксимации продольного распределения магнитного поля в магнитных реверсивных фокусирующих системах // Молодой ученый. 2012. № 9. С. 25–29.
11. Кожанова Е. Р., Захаров А. А., Ткаченко И. М. Применение вейвлет-функций Гаусса второго порядка для аппроксимации продольного распределения магнитного поля различных видов МПФС // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП–2012: Материалы 10-й юбилейной междунаро. научно-технич. конференции (19–20 сентября 2012, Саратов). Саратов, 2010. С. 446–451.
12. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами, М. : «Энергия», 1969. С. 73–85.
13. Ганзбург Л. Б., Федотов А. И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. Л.; Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. С. 151–233.
14. Introduction to Magnetic Materials. B. D. Cullity. AddisonWesley Publishing Co., Reading, Massachusetts. 1972.
15. Бамдас, А. М., Савиновский Ю.А. Дроссели переменного тока радиоэлектронной аппаратуры (катушки со сталью). М.: Советское радио, 2002. 248 с.
16. Аггау Магнитное поле. Электромагнитная индукция: Справочные материалы. М. : Айрис-пресс, 2013. С. 51-59.
17. Берковский, Б.М. Полевиков В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции М.: 1988. 838 с.
18. Гулд, Х.,Тобочник Я..Компьютерное моделирование в физике. Т. 1. М., 1990. 150 с.
19. Irradiating Magnetic Materials, D. I. Gordon, ElectroTechnology, June 1965. P. 42–45
20. Алямовский, Андрей. SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2007. 282 с.
21. Сагдеева Ю.А., Копысов С.П., Новиков А.К. Введение в метод конечных элементов: Методическое пособие. 2011. С. 6–38.