МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ

на бакалаврскую работу студента

Маннонова Иномжона Сирожидиновича
(Фамилия, имя и отчество)

Тема бакалаврской работы Маннонова И.С. посвящена исследованию возможности использования Ni – Zn ферритов для создания практически не отражающего радиоволны покрытия при частотах менее 1ГГц.

Преимуществами применения ферритов в качестве радиопоглощающих материалов являются: дешевизна, пожароустойчивость, термоустойчивость при высоких температурах, стабильность параметров при длительной эксплуатации. Однако, известные Ni-Zn-ферритовые радиопоглощающие материалы малоэффективны в диапазоне частот менее 20 МГц. Основной причиной этого является недостаточно высокие значения магнитной и диэлектрической проницаемостей, поэтому задача повышения магнитной и диэлектрической проницаемости ферритовых материалов является актуальной.

При работе над выпускной квалификационной работой Маннонов И С. показал удовлетворительное знание предмета, умение пользоваться научно-технической литературой, проявил самостоятельность при решении конкретных научно-исследовательских задач. Маннонов И.С. выполнил обзор основных современных технологий получения ферритовых материалов, изучил методики измерения магнитной и диэлектрической проницаемостей, применил их для изучения температурных зависимостей магнитной и диэлектрической проницаемостей Ni-Zn ферритов различных составов. При выполнении экспериментальной части работы Маннонов И.С. провел анализ воздействия различных технологических параметров на радиопоглощающие характеристики ферритовых материалов.

ВКР выполнена грамотно, в соответствии с техническим заданием и заслуживает оценки “хорошо“, а Маннонов И.С. квалификации бакалавра по направлению «Электроника и наноэлектроника»

Руководитель

к. ф. – м. н., доцент кафедры «НиМЭ» С.Е.Игошина

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04 007
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов
тема бакалаврской работы

Студент группы 21ПД1 — номер группы; подпись, дата 09.06.2025; Маннонов И.С. — фамилия, иниц.

Руководитель доцент — должность; подпись, дата 09.06.25; Игошина С.Е. — фамилия, иниц.

ПГУ
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель — должность; подпись, дата 16.06.25; Рыжова Т.Н. — фамилия, иниц.

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 09.06.25 № 10)

Заведующий кафедрой 09.06.25 — подпись, дата; Пронин И.А. — фамилия, иниц.

Работа защищена с оценкой хор. (протокол ГЭК от 17.06 № 9)

Секретарь ГЭК 17.06.25 — подпись, дата; Вольсков А.А. — фамилия, иниц.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из 65 страниц, 19 рисунков,списка использованных источников из 11 наименованийи 3-х приложений.

Ключевые слова: радиопоглощающие ферриты, распространение электромагнитных волн, волновое уравнение, отражательная способность, частотная зависимость

Цель: работы является изучение исследование влияния базового состава и технологических режимов на способность ферритов к поглощению электромагнитного излучения.

Задачи:

1. Моделирование процессов распространении электромагнитного поля в ферромагнитной среде.

2. Решение системы уравнение Максвелла для электромагнитных волн ферромагнитных среде

3. Анализ экспериментальных данных по влиянию технологических режимов на получение радиопоглащающие ферритов на их поглощение Ni-Zn ферритов

Актуальность данной темы связана с одной стороны с большим интересом современной науки к теме “ радиопоглощающий феррит ” с другой стороны недостаточной ее разработанность. Это дает возможность создавать тонкие покрытия на основе Ni-Zn феррита для защиты от электромагнитного излучения в диапазоне частот 10-50 Мгц.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……......4
1 Анализ литературных данных о свойствах, методах получения Ni-Zn ферритов.....8
1.1 Общие сведения о ферритах. Описание исследуемых составов ферритов.....10
1.2 Анализ работ, связанных с исследованием влияния базового состава и технологических режимов на способность ферритов к поглощению электромагнитного излучения.....16
2 Изучение процесса распространения плоского электромагнитного поля в ферромагнитной среде.....17
2.1Решение задачи распространения плоского электромагнитного поля в проводящей среде.....18
2.2 Постановка и решение краевой задачи о распространении плоского электромагнитного поля в ферромагнитной среде..... 20
3. Влияние технологических факторов на радиопоглощающие характеристики Ni-Zn ферритов.....25
3.1 Методика эксперимента.....26
3.2 Результаты исследований по влиянию технологических режимов измельчения, формования и спекания на радиопоглощающие характеристики Ni-Zn ферритов…….....35
Заключение.....45
Список использованных источников..... .50
Приложение А.Задания на ВКР
Приложение Б. Образцы изделий, изготовленных на ООО «Мета – феррит».....45
Приложение В. Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде.....47

Приложение Г. Отношение амплитуд падающей и отраженной волны в равных единицах. Показывает величину затухания.....49
Приложение Ж. Заявление и протокол проверит на оригинальность в системе « Антиплагиат. ВУЗ».....67
Приложение Д. Презентация на ВКР.....68

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях активного применения электронных устройств, работающих на высоких частотах, возникает серьезная проблема электромагнитного загрязнения помещений. Отражение волн от стен создает повышенный уровень излучения, который представляет опасность как для здоровья сотрудников, так и для стабильной работы оборудования.В связи с этим особую актуальность приобретает разработка эффективных решений по снижению интенсивности электромагнитного излучения. Перспективным направлением является использование специальных покрытий из материалов с высокой поглощающей способностью. Такие покрытия должны соответствовать ряду важных требований: обладать значительным электрическим сопротивлением, выдерживать высокие температуры и при этом иметь минимальное собственное сопротивление. Дополнительным преимуществом является возможность нанесения покрытий небольшой толщины, что делает их практичными в применении.

Эффективность экранирования определяется двумя ключевыми процессами: рассеянием энергии и интерференцией волн. При этом важнейшую роль играют физические характеристики самого материала покрытия – его магнитная и диэлектрическая проницаемость.

Научные исследования подтверждают оптимальный принцип работы экранирующих покрытий: максимальная эффективность достигается тогда, когда толщина материала сопоставима с длиной волны защищаемого диапазона. Именно при таком соотношении происходит наиболее эффективное подавление излучения за счет интерференционных процессов.

Практическое значение этого принципа заключается в том, что при проектировании защитных покрытий необходимо учитывать частоту защищаемого излучения и соответствующим образом подбирать толщину материала для достижения максимального экранирующего эффекта.

Уменьшить длину волны, в материале можно за счёт увеличения показателя преломления [2]:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}\ : \qquad (1.1),$$

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \qquad (1.2)$$

В интервале частот от 50 МГц до 1000 МГц для поглощения электромагнитного излучения применяются покрытия на основе ферритов.

Уникальное свойство ферритов заключается в их способности эффективно поглощать электромагнитное излучение благодаря оптимальному сочетанию двух ключевых характеристик: высокой магнитной проницаемости и значительного удельного электрического сопротивления.

Современные требования к защитным покрытиям ставят перед разработчиками амбициозные задачи. Для создания эффективных экранов толщиной менее 10 миллиметров, работающих в диапазоне частот до 50 МГц, необходимо получить материал с особым параметром – произведением диэлектрической и магнитной проницаемостей (ε·μ), превышающим значение 107.

Анализ существующих решений показывает интересную закономерность: хотя магнитная проницаемость современных радиопоглощающих ферритов уже близка к максимально возможным значениям (в мегагерцовом диапазоне они достигают 2000-3000), их диэлектрическая проницаемость остается относительно низкой (не превышает 100).

Перспективным направлением развития является целенаправленное повышение диэлектрической проницаемости ферритов. Это открывает возможности для создания более совершенных радиопоглощающих материалов, способных эффективно работать в требуемом диапазоне частот при сохранении компактных размеров защитных покрытий.

Научные исследования в области электромагнитной защиты показывают перспективность использования Ni-Zn ферритов для создания эффективных поглотителей излучения на частотах до 100 МГц. Теоретические расчеты указывают на возможность достижения высоких значений магнитной (до 2000) и диэлектрической (до 2000) проницаемости при размере частиц около 10 мкм.

Практические результаты демонстрируют, что существующие образцы Ni-Zn ферритов обеспечивают магнитную проницаемость до 2400, однако диэлектрическая проницаемость ограничена значением 100. Это позволяет создавать защитные слои толщиной более 10 мм, эффективно работающие в диапазоне 50-100 МГц.

Ключевым направлением развития технологии является совершенствование состава и методов производства ферритовых материалов. Особое внимание уделяется разработке специальных добавок и оптимизации технологических режимов для достижения высокой диэлектрической стабильности в мегагерцовом диапазоне.

Практическая значимость этих исследований заключается в возможности создания тонких защитных покрытий на основе Ni-Zn ферритов, обеспечивающих эффективную защиту от электромагнитного излучения в критически важном диапазоне частот от 10 до 50 МГц. Это открывает перспективы для разработки компактных и эффективных решений в области электромагнитной безопасности.

Современное состояние исследований в области ферритовых материалов показывает существенный пробел в изучении ферритов, полученных

методом спекания порошков. Хотя известно, что температура спекания при использовании золь-гель синтеза влияет на размер зерна и намагниченность насыщения, а также изучены свойства ферритов Mn, Ni и Cu с разным содержанием Zn, сравнительный анализ формирования зеренной структуры при химическом синтезе и керамической технологии остается недостаточно исследованным.

Основная цель исследования заключается в комплексном изучении влияния различных добавок и оптимизации технологических режимов на создание ферритов с повышенной диэлектрической проницаемостью в диапазоне частот 20-100 МГц.

Ключевые задачи исследования охватывают:

Анализ влияния базового состава феррита на его диэлектрические характеристики

Изучение воздействия различных добавок и их концентраций на электрические свойства материала

Оценка влияния микроструктуры на эффективность радиопоглощающих свойств

Исследование изменений электрического сопротивления материала

Научная новизна работы заключается в исследовании способов повышения эффективности широкополосных никель-цинковых ферритов путем усиления роли диэлектрических подсистем в формировании их радиопоглощающих

свойств под воздействием различных технологических факторов.

Практическая значимость исследования обусловлена растущим интересом к разработке радиопоглощающих ферритов при одновременном

недостатке фундаментальных исследований в этой области. Результаты работы открывают возможности для создания тонких защитных покрытий на основе Ni-Zn ферритов, обеспечивающих эффективную защиту от электромагнитного излучения в критически важном диапазоне частот 10-50 МГц.

1 Свойства, применение и виды ферритов

1.1Общие сведения о ферритах. Описание исследуемых составов ферритов

Ферриты представляют собой особый класс металлических сплавов на основе железа, характеризующихся уникальной кристаллической структурой, напоминающей кубическую форму. Именно благодаря этой структуре материалы приобретают особые магнитные свойства, что делает их незаменимыми в современной магнитной инженерии.

Процесс производства ферритовых сердечников включает несколько этапов: сначала происходит прессование специальной порошковой смеси, затем материал подвергается процессу спекания, в результате чего формируется керамический компонент. Магнитные характеристики ферритов обусловлены специфическим взаимодействием металлических ионов с ионами кислорода в кристаллической решетке оксида.

Классификация ферритов основывается на их кристаллической структуре и магнитных свойствах. Выделяют три основных типа;

- ферриты-гранаты (мягкие) - включают микроволновые ферриты;
- ферриты-шпинели (мягкие) - представлены NiZn-, MnZn- и MgMnZn ферритами;
- гексаферриты (твердые) - включают ферриты на основе бария и стронция с гексагональной структурой.

Области применения ферритов чрезвычайно широки. Они активно используются в различных электронных устройствах: трансформаторах, индукторах, системах телекоммуникаций. Особое значение ферриты имеют в технологиях преобразования энергии и защиты от электромагнитных помех,

что делает их критически важными для современной электроники и электротехники.

Большая часть исследований, связанных с ферритами, проводилась после 1950-х годов благодаря расширению технологий в различных областях.

Ферриты состоят из оксида железа в качестве основного компонента и оксидов металлов. В зависимости от кристаллической структуры ферриты бывают следующих типов:

- шпинельный феррит;
- гранат;
- ортоферрит;
- гексагональные ферриты;

Ферриты занимают лидирующие позиции среди магнитных материалов благодаря ряду существенных преимуществ перед чистыми металлами. Их высокая электропроводность, доступная стоимость и простота производства в сочетании с превосходными магнитными характеристиками делают их незаменимыми в современной технике.

Области применения ферритов чрезвычайно разнообразны: от военной техники (радары) до бытовой электроники. Они активно используются в системах аудио- и видеозаписи, цифровой памяти, спутниковой связи, микроволновых устройствах. Ферриты находят применение в антенных системах радиоприемников, трансформаторах телевизоров, широкополосных преобразователях, фильтрах, ультразвуковых генераторах и других высокотехнологичных устройствах.

Классификация ферритов включает два основных типа:

Мягкие ферриты - применяются в качестве сердечников трансформаторов для телевидения, телекоммуникационного оборудования, медицинских систем и промышленной электроники

Твёрдые ферриты - используются для создания постоянных магнитов в громкоговорителях и микродвигателях

Технологические характеристики ферритов определяются несколькими ключевыми параметрами;

- намагниченность насыщения (M_S);

- коэрцитивная сила (H_C);

- начальная проницаемость (μi;

- уровень потерь;

Особенности применения зависят от частоты работы устройства. Поликристаллические ферриты с минимальными потерями особенно эффективны на высоких частотах. Важно отметить, что оптимальное сочетание всех характеристик для конкретного применения достигается путем модификации состава материала, добавления специальных присадок и корректировки технологии производства. Это позволяет точно настраивать параметры ферритов под требования конкретного технического решения.

1.2 Анализ работ, связанных с исследованием влияния базового состава и технологических режимов на способность ферритов к поглощению электромагнитного излучения

Развитие нанотехнологий значительно расширило возможности исследования ферритов. Современные методы синтеза в нанометровом диапазоне открыли новые перспективы изучения магнитных материалов, позволив наблюдать уникальные явления, такие как суперпарамагнетизм, коллективные магнитные возбуждения, особенности распределения катионов и другие интересные эффекты на уровне наночастиц.

Производство ферритов традиционно базируется на керамической технологии, которая в промышленных масштабах требует длительного времени и высоких температур для обработки исходных оксидов. Несмотря

на это, данный метод остается наиболее распространенным способом получения ферритовых материалов.

Особого внимания заслуживают ферриты системы Ni-Zn со структурой шпинели. Их широкое применение в электронной аппаратуре обусловлено превосходными характеристиками;

- высокая магнитная проницаемость на высоких частота;

- превосходное электрическое сопротивление;

- высокая механическая прочность;

- хорошая химическая стабильность;;

- доступная стоимость;

Уникальная особенность Ni-Zn ферритов заключается в специфическом распределении катионов по кристаллической решетке. Цинк преимущественно занимает тетраэдрические позиции, тогда как никель предпочитает октаэдрические участки. Это делает Ni-феррит типичным обратным ферритом, а Zn-феррит – нормальным ферритом. Такое распределение катионов описывается формулой (ZnxFe1-x)[Ni1-xFe1+x]O4.

Многочисленные исследования этой системы позволили детально изучить ее свойства и выявить ряд структурных особенностей, что открывает дополнительные возможности для оптимизации характеристик материалов под конкретные технические задачи.

Исследования магнитных и диэлектрических свойств ферритов Ni-Zn, синтезированных обычным способом, были опубликованы многими исследователями [12-16]. Обычный способ является наиболее распространенным способом получения ферритов на протяжении многих десятилетий. Мохан и др. [17] изучали диэлектрические свойства никель-цинковых ферритов NixZn1-xFe2O4, где *x* изменялся от 0,2 до 1,0 и синтезированных обычным керамическим способом. Они исследовали

зависимость Ni-Zn-ферритов от частоты, температуры и состава. Они обнаружили, что диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь уменьшаются с увеличением содержания цинка до x=0,4. За пределами x=0,4 они наблюдали прогрессивное увеличение этих параметров. Они предположили, что изменение диэлектрической проницаемости линейно зависит от изменения доступных ионов железа на октаэдрических участках. Диэлектрическая проницаемость уменьшалась с увеличением частоты. Максимальная диэлектрическая дисперсия наблюдалась при x=0,8, что можно объяснить на основе имеющихся ионов железа на октаэдрических участках.

Они измерили удельное сопротивление, и диэлектрическая проницаемость была обратно пропорциональна квадратному корню удельного сопротивления. Кроме того, диэлектрические потери отражались в удельном сопротивлении, что более низкие потери демонстрировали более высокое удельное сопротивление и наоборот. В их исследовании диэлектрическая проницаемость постепенно увеличивалась с ростом температуры вплоть до определённой температуры, которая обозначена как температура диэлектрического перехода Ts. Однако, за пределами этой температуры значения диэлектрической проницаемости для всех образцов, как было обнаружено, непрерывно уменьшались. В более поздней статье Ранга и Равиндер [18] обсуждали проводимость $Ni1\text{-}xZnxFe_2O_4$ как функцию состава и температуры. Они наблюдали увеличение проводимости с содержанием цинка и температурой. Они вычислили концентрацию носителей заряда и наблюдали более высокий носитель заряда при более высокой температуре вплоть до температуры магнитного перехода. За пределами этой температуры концентрация носителей заряда уменьшалась.

Дальнейшие исследования также были проведены Эль-Сайедом [19] по

электропроводности Ni1-xZnxFe2O4 (x = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 и 0,9), которые были получены методом керамической обработки. Они обнаружили самую низкую проводимость и более высокую энергию активации для x=0,3 в никель-цинковом феррите.

Аджмал и Максуд [20] исследовали замещение Zn в системе Ni1-xZnxFe2O4 и проверили влияние на физические свойства. Они изучили изменение содержания цинка на сопротивление постоянному току, диэлектрическую проницаемость и коэффициент потерь. Было отмечено, что диэлектрическая проницаемость увеличивалась с увеличением концентрации Zn. Значения удельного сопротивления находились в диапазоне от 1,629×106 до 3,0×103 Ом·см. Коэффициент потерь оставался в диапазоне 9,057–0,456 при изменении частоты от 80 Гц до 1 МГц соответственно.

Различные исследователи наблюдали, что намагниченность имеет самые высокие значения для x = 0,3 / 0,4 в Ni1-xZnxFe2O4 [21-23]. Поэтому было решено, что будет очень интересно провести дальнейшие исследования с различным замещением ионов, сохранив Ni0,7Zn0,3Fe2O4 в качестве исходного соединения.

Однако для синтеза ферритовых материалов использовались различные мокрые методы, такие как шаровая мельница,гидротермальный, золь-гель, микроэмульсии и соосаждение. Каждый метод имеет уникальные преимущества.

Но попытка улучшить физические свойства ферритов путём нового проектирования в синтезе по-прежнему является предметом первостепенного интереса. Недавно золь-гель методы использовались для приготовления сверхтонкого, однородного и воспроизводимого порошка. В недавнем прошлом было обнаружено, что золь-гель метод имеет явные преимущества по сравнению с обычной сухой обработкой. Конечной целью является изготовление ферритов с лучшими физическими и магнитными свойствами,

которые полезны в различных промышленных применениях.

Коэффициент отражения слоя феррита, на несенного на металлическую поверхность, при нормальном падении электромагнитных волн определяется следующим выражением:

$$R = \frac{\sqrt{\mu/\varepsilon}\, jtg(kd\sqrt{\mu\varepsilon}) - 1}{\sqrt{\mu/\varepsilon}\, jtg(kd\sqrt{\mu\varepsilon}) + 1}, \qquad (1.1)$$

где μ = μ' – μ", ε = ε' – ε" – комплексная магнитная и диэлектрическая проницаемости феррита соответственно;

d– толщина слоя, мм.;

k– волновое число в вакууме (k = ω/c = 2π/λ),

где ω – циклическая частота, Гц.;

λ – длина волны в вакууме, нм.

Для слоя малой толщины при $kd\sqrt{|\mu\varepsilon|} << 1$ отсутствие отражения соответствует условиям

*Kd*μ' = 1или μ"= C/ ω*d*; μ'<< 1.

Второй порядок приближения уточняет требование для ε', которое принимает вид:

μ' ≤ ε' /3 при ε"<< 1.

Таким образом, условие отсутствия отражения электромагнитных волн может быть записано, как

$$\sqrt{\frac{|\varepsilon|}{\mu''}} << 1. \qquad (1.2)$$

В результате анализа условий согласования волновых сопротивлений поглощающего слоя феррита и свободного пространства установлено, что в соответствии с дисперсионной зависимостью магнитной проницаемости ферриты характеризуются двумя рабочими диапазонами значительного поглощения электромагнитной энергии: основным в области низких и дополнительным в области высоких частот. Для каждого диапазона

поглощения характерна согласующая толщина ферритового слоя (d_{m1} основная, d_{m2} дополнительная), которая соответствует случаю практически полного поглощения на согласующей частоте (f_{m1} основная, f_{m2} дополнительная).

Согласующая толщина d_{m1}не зависит от длины волны и является простой функцией Сноека:

$$d_{m1}=c/2\pi S, \qquad (2.3)$$

где c– скорость света, м/с; $S = (\mu_н - 1)f_u$ – параметр Сноека, ГГц.

Параметр Сноека для известных ферритов со структурой шпинели не превышают 10 ГГц, а величина d_{m1}не превышает 4 мм.

В зависимости от свойств феррита согласующая частота f_{m1}изменяется в пределах от нескольких мегагерц до 2000 МГц. Было установлено, что отношение между согласующей частотой f_{m1}и резонансной f_u (f_u соответствует радиочастотному резонансу) зависит от величины начальной магнитной проницаемости. Область этих отношений находится в интервале от 3 до 27, причем большему значению f_{m1}/f_uсоответствует большее значение $\mu_н$.

Относительный рабочий диапазон радио поглощающих ферритов, определяемый как отношение диапазона, в котором коэффициент стоячей волны(КСВ) не превышает 1,2, к величинеf_{m1}увеличивается с возрастанием диэлектрической и магнитной проницаемостей материала.

В широком частотном диапазоне поглощения электромагнитного излучения оптимальная толщина d_{m2}ферритового покрытия пропорциональна длине волны. Для дополнительной согласующей частоты f_{m2}, которая изменяется в зависимости от свойств феррита в пределах от 5000 до 12000 МГц, наблюдается постоянное значение произведения $f_{m2}f_{m1}\cdot d_{m2}$, составляющее 28 – 30 ГГц·мм.

В диапазоне частот от 10 до 1000 МГц никель-цинковые ферриты получили наибольшее практическое применение благодаря их высокой эффективности в поглощении электромагнитного излучения по сравнению с альтернативными материалами [24-27].

Для понимания механизмов формирования характеристик ферритов критически важно изучение диаграмм состояния, особенно тех, что показывают взаимосвязь между составом и свойствами материалов. Множество исследований посвящено анализу диаграмм, демонстрирующих корреляцию между составом и характеристиками никель-цинковых ферритов. Важно отметить, что диаграммы состав-свойство, построенные на их основе, могут существенно различаться, так как они сильно зависят от технологических условий производства ферритов. Именно поэтому наблюдаются вариации свойств ферритов, полученных разными исследователями при использовании идентичных составов.

Кроме того, характеристики ферритов также определяются параметрами их микроструктуры (начальной магнитной проницаемостью, коэрцитивной силой и другими показателями), что дополнительно увеличивает разброс измеряемых параметров.

2 Изучение процесса распространения плоского электромагнитного поляв ферромагнитной среде

2.1 Решение задачи распространения плоского электромагнитного поля в проводящей среде

В настоящее время материалы, поглощающие радиоволны, не только активно используются для обеспечения электромагнитной совместимости в вычислительной технике, но также рассматриваются перспективы их применения в медицинской сфере 8,9.

В ходе исследований удалось значительно уменьшить коэффициент поглощения энергии электромагнитного излучения в биомедицинских имплантатах с антенными системами за счет применения пластин из ферритового материала.

Запишем систему уравнений Максвелла:

$$rot\,\vec{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$rot\vec{H} - \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} \quad (2.4)$$

$$div\,\vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

$$div\,\vec{D} = 0 \quad (2.6)$$

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad (2.8)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.9)$$

Пренебрегая токами смещения $\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ в уравнение (1.2) (среда проводящая) и используя (1.5) и (1.7), перепишем уравнения (1.1) и (1.2) в виде:

$$rot\ \vec{E} + \frac{\mu}{c}\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \tag{1.10}$$

$$rot\vec{H} = \frac{4\pi\sigma}{c}\vec{E} \tag{1.11}$$

Возьмём rot от обеих частей равенства (1.8), продифференцируем по t равенство (1.9), исключим из полученных результатов Н, воспользуемся соотношениями (1.4) и (1.6) и известным равенством векторного анализа: $rot\ rot\ \vec{a} = grad\ div\ \vec{a} - div\ grad\ \vec{a}$ это приведёт к уравнению:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu}\ div\ grad\ \vec{E} \tag{1.12}$$

Аналогично получаем уравнение:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu}\ div\ grad\ \vec{H} \tag{1.13}$$

Данные уравнения соответствуют условиям процесса распространения плоского электромагнитного поля в проводящей среде.

1.2 Постановка и решение краевой задачи о распространении плоского электромагнитного поля в ферромагнитной среде

Феррит, поглощающий радиоволны, все чаще используется при производстве безэховых камер, которые устраняют отражение радиоволн от стенок камеры.

На сегодняшний день для изготовления порошков никель-цинковых ферритов преимущественно применяются методы химического синтеза. Однако материалы, полученные методом спекания из этих порошков, требуют более детального изучения. Исследования 9 демонстрируют прямую зависимость: с повышением температуры спекания порошков, синтезированных по технологии золь-гель, возрастают как средний размер зерна, так и показатель намагниченности насыщения феррита.

Известны композиции радио поглощающего феррита, содержащие оксиды никеля, меди, цинка и железа (патенты США № 5421089 и 6146545). Поглощение радиоволн радио поглощающим ферритом происходит из-за магнитных потерь, вызванных резонансом стенок магнитного поля и магнитного резонанса. Недостатками известных ферритовых композиций являются недостаточное поглощение радиоволн в диапазоне частот от 10 МГц до 1000 МГц.

Патент был получен В.Г. Андреевым. Он описал получение феррита с высокими свойствами радио поглощения.

Технический результат достигается за счет того, что композиция из радио поглощающего феррита, содержащего оксиды никеля, меди, цинка и железа, а также титаны кальция, содержит следующие компоненты %:

Оксид никеля	10,0 – 16,0
Оксид меди	2,0 – 6,0
Оксид цинка	28,0 – 33,0
Титанат кальция	0,5 – 5,0
Оксид железа -	остальное

Для расчета данной задачи будем использовать следующие условия:

$$\varepsilon = 10$$
$$\mu = 1150$$
$$l = 0.008 \text{ м}$$
$$\gamma = 10^8 \text{Гц}$$
$$E_0 = 0.1 \text{ В/м}$$
$$\sigma = 10^{-6} \text{ См/м} \qquad (2.14)$$

Рассматриваемая среда обладает электропроводностью, так, что в ней могут возникать токи проводимости. Избыточные заряды отсутствуют.

Учитывая данные условия, запишем уравнения Максвелла в следующем виде:

$$\left[\nabla\vec{E}\right] = -\frac{1}{c} * \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \nabla\vec{\mathrm{B}} = 0 \quad (2.15)$$

$$\left[\nabla\vec{\mathrm{B}}\right] = \frac{4\pi\mu}{\mathrm{c}}\sigma\vec{\mathrm{E}} + \frac{\varepsilon\mu}{\mathrm{c}}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}, \nabla\vec{E} = 0 \quad (2.16)$$

Возьмём ротор от первого из уравнений:

$$\left[\nabla, \left[\nabla\vec{E}\right]\right] = \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t}\left[\nabla\vec{\mathrm{B}}\right] \quad (2.17)$$

В результате получим обобщённое волновое уравнение

$$\Delta E - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{4\pi\mu\sigma}{\mathrm{c}^2}\frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

В нашей работе рассматривается случай плоской волны.

$$E_{xx} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}E_{tt} - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2}E_t = 0 \quad (2.19)$$

Поставленная краевая задача – это задача на отрезке, поэтому для ее решения применим метод Фурье или метод разделения переменных.

Найдам решение уравнения

$$E_{xx} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}E_{tt} - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2}E_t = 0 \quad (2.20)$$

для 0 <x< ℓ , удовлетворяющее однородным граничным условиям:

$$E(0,t) = E_0(1 - R_e) \quad (2.21)$$

$$E\left(\frac{l}{2}, t\right) = E_0\frac{z_0}{z_t}T_e \quad (2.22)$$

$$\left.\frac{\partial E(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial E(x,t)}{\partial x}\right|_{x=\frac{l}{2}}$$

И начальных условиях:

$$E(x,0) = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

$$E_t(x,0) = 0, \quad (2.23)$$

где $R_e -$ коэффициент отражения в случае E – поляризации;

T_e – коэффициент прохождения в случае E – поляризации.

Поставим основную вспомогательную задачу: найти решение уравнения

$$E_{xx} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} E_{tt} - \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} E_t = 0 \tag{2.24}$$

не равное тождественно нулю, удовлетворяющее однородным граничным условиям и представимое в виде произведения

$$E(x,t) = E(x)E(t), \tag{2.25}$$

где $E(x)$- функция только переменного x,

$E(t)$- функция только переменного t.

$$\frac{\mathrm{X''(x)}}{\mathrm{X(x)}} = -\lambda^2 \tag{2.26}$$

$$\mathrm{X''(x)} + \lambda^2 \mathrm{X(x)} = 0$$

$$\mathrm{k^2} + \lambda^2 = 0$$

$$\mathrm{k_{1,2}} = \pm i\lambda$$

$$\mathrm{X(x)} = \mathrm{C_1 cos(x\lambda)} + \mathrm{C_2 sin(x\lambda)} \tag{2.27}$$

Используя граничные условия, получим выражения для нахождения C_1 и C_2

$$\begin{cases} X(0) = C_1 \\ X(\frac{l}{2}) = C_1 \cos\lambda\frac{l}{2} + C_2 \sin\lambda\frac{l}{2} \\ C_2 = -C_1 \sin\lambda\frac{l}{2} + C_2 \cos\lambda\frac{l}{2} \end{cases} \tag{2.28}$$

Анализ нашей задачи показывает, что при $R_e \to 1$, а $T_e \to 0$ мы приходим к задаче Штурма – Лиувилля. Соответственно значение параметра:

$$\lambda = \frac{\pi n}{l} \tag{2.29}$$

Из (1.6), найдём:

$$C_1 = E_0(1 - R_e) \tag{2.30}$$

$$C_2 = \frac{E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e - E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{2}}{\sin\frac{\pi n}{2}} \quad (2.31)$$

$$X_n(x) = E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{l}x + \frac{E_0 \frac{z_0}{z_t} T_e - E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{2}}{\sin\frac{\pi n}{2}}\sin\frac{\pi n}{l}x \quad (2.32)$$

Выражение (1.10) является решением задачи (1.4).

На следующем этапе рассмотрим уравнение

$$-\varepsilon\mu\frac{\omega^2}{c^2}T''(t) - 4\pi\mu\frac{\sigma\omega}{c^2}T'(t) + \lambda^2 T(t) = 0 \quad (2.33)$$

$$T''(t) + \frac{4\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega}T'(t) - \frac{\lambda^2}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}T(t) = 0 \quad (2.34)$$

Запишем характеристическое уравнение для уравнения (1.12):

$$k^2 + \frac{4\pi}{\varepsilon(T)}\frac{\sigma}{\omega}k - \frac{\lambda^2}{\varepsilon(T)\mu(T)}\frac{c^2}{\omega^2} = 0 \quad (2.35)$$

$$D = \frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2} + \frac{\lambda^2}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2} \quad (2.36)$$

$$k_{1,2} = -\frac{2\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega} \pm \sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2} + \frac{\lambda^2}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}} \quad (2.37)$$

Корни характеристического уравнения действительные и различные, поэтому решение можно представить в виде

$$T(t) = C_3\exp(k_1 t) + C_4\exp(k_2 t) \quad (2.38)$$

Таким образом, решение краевой задачи имеет вид

$$U(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x)\cdot T_n(t) \quad (2.39)$$

Коэффициенты C_3 и C_4 определяются через начальные условия следующим образом:

$$\begin{cases} E(x,0)=\sum_{n=1}^{\infty}[E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{l}x+\frac{E_0\frac{z_0}{z_t}T_e-E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{2}}{\sin\frac{\pi n}{2}}\sin\frac{\pi n}{l}x](C_3+C_4) \\ E_t(x,0)=\sum_{n=1}^{\infty}[E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{l}x+\frac{E_0\frac{z_0}{z_t}T_e-E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{2}}{\sin\frac{\pi n}{2}}\sin\frac{\pi n}{l}x](C_3k_1+C_4k_2) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$E_0(1-R_e)(C_3+C_4)=\frac{4}{l}\int_0^{\frac{l}{2}}\frac{E_0}{\varepsilon}\cos\frac{\pi n}{l}\xi d\xi \quad (2.41)$$

$$E_0(1-R_e)(C_3k_1+C_4k_2)=0 \quad (2.42)$$

$$C_3=\frac{4\sin\frac{\pi n}{2}}{\varepsilon(1-R_e)\pi n}\frac{k_2}{k_2-k_1} \quad (2.43)$$

$$C_4=\frac{4\sin\frac{\pi n}{2}}{\varepsilon(1-R_e)\pi n}\frac{k_1}{k_1-k_2} \quad (2.44)$$

$$T_n(t)=\frac{4\sin\frac{\pi n}{2}}{\varepsilon(1-R_e)\pi n}[\frac{k_2}{k_2-k_1}\exp(k_1t)+\frac{k_1}{k_1-k_2}\exp(k_2t)] \quad (2.45)$$

Выражение (1.2.23) является решением задачи (1.2.11).

Поэтому распространение электромагнитного поля в ферромагнитной среде будет иметь следующий вид

$$E(x,t)=[E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{l}x+\frac{E_0\frac{z_0}{z_t}T_e-E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{2}}{\sin\frac{\pi n}{2}}\sin\frac{\pi n}{l}x]\times$$
$$\times\frac{4\sin\frac{\pi n}{2}}{\varepsilon(1-R_e)\pi n}[\frac{k_2}{k_2-k_1}\exp(k_1t)+\frac{k_1}{k_1-k_2}\exp(k_2t)] \quad (2.46)$$

где

$$k_1 = -\frac{2\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega} - \sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2} + \frac{\lambda^2}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}} \quad (2.47)$$

$$k_2 = -\frac{2\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega} + \sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2} + \frac{\lambda^2}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}} \quad (2.48)$$

На рисунках 1.1 и 1.2 показан процесс затухания электромагнитной волны на выходе из материала экрана.

Выводы:

1. Амплитуда волны значительно уменьшается, пройдя половину толщины образца. Это очень важно, так как полученный результат подтверждается экспериментально в работе [3].

2. Время затухания составляет 0.2с, что соответствует данным эксперимента.

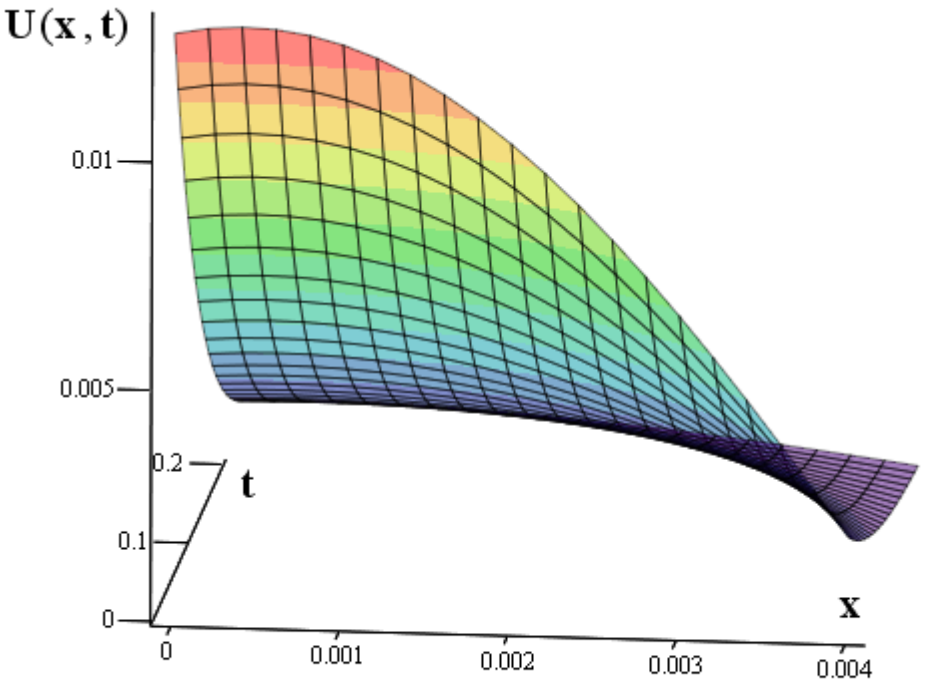


Рисунок 2.1 – Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде

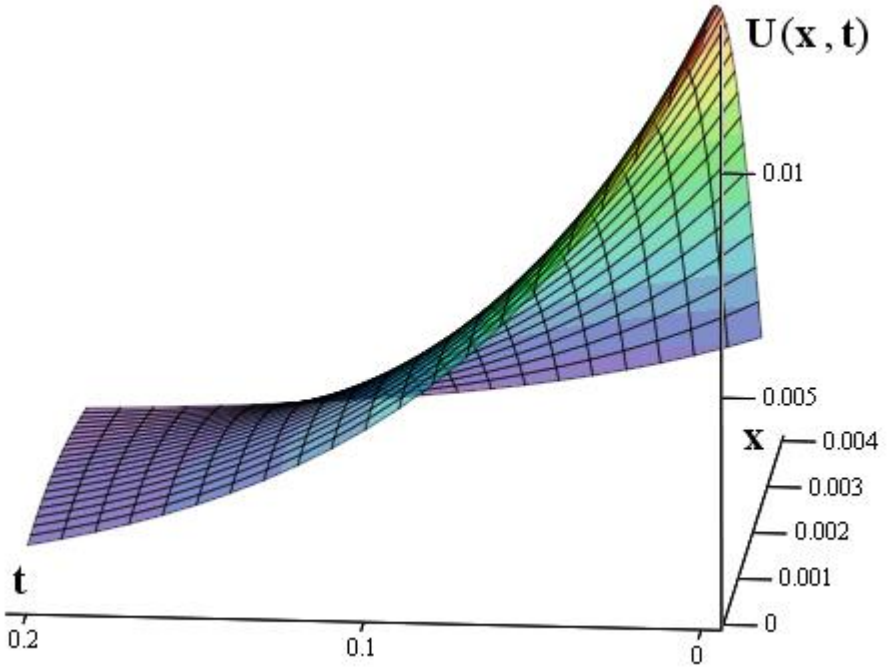


Рисунок 2.2 - Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде

3 Влияние технологических факторов на радио поглощающие характеристики Ni-Zn ферритов

3.1 Методика эксперимента. Влияние режимов измельчения на плотность ферритов

Исследования показывают [28], что увеличение плотности ферритовых материалов напрямую влияет на рост их магнитной и диэлектрической проницаемости. При агрегации частиц образуются значительные межчастичные поры, которые сохраняются после процесса спекания, что негативно сказывается на общей плотности конечного продукта [29].

В процессе прессования заготовок возможно появление крупных межгранульных пустот из-за недостаточной деформации гранул, что препятствует получению плотных изделий после спекания [25]. Эффективное разрушение агрегатов достигается за счет тщательного измельчения материала, а устранение межгранульных пор обеспечивается правильным подбором связующих компонентов.

Визуальное представление последовательности производства ферритов с использованием оксидной технологии можно увидеть на схеме 3.1

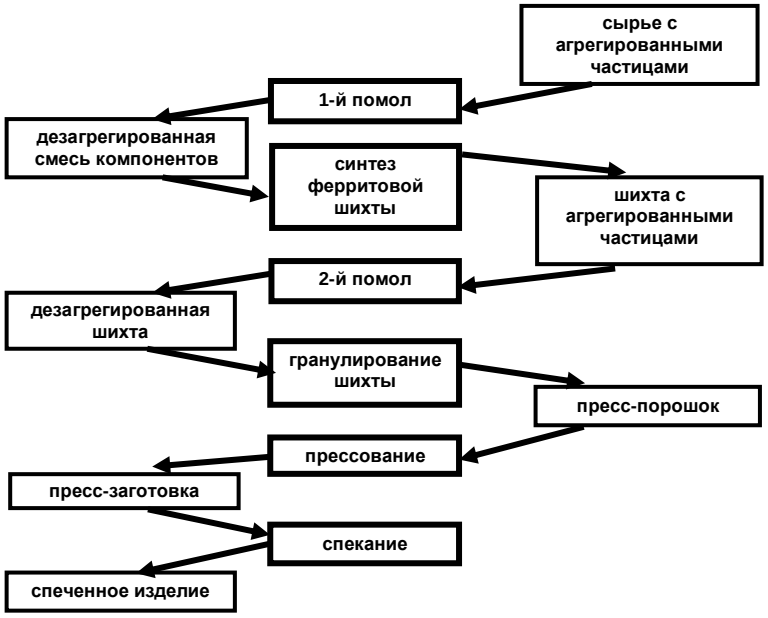
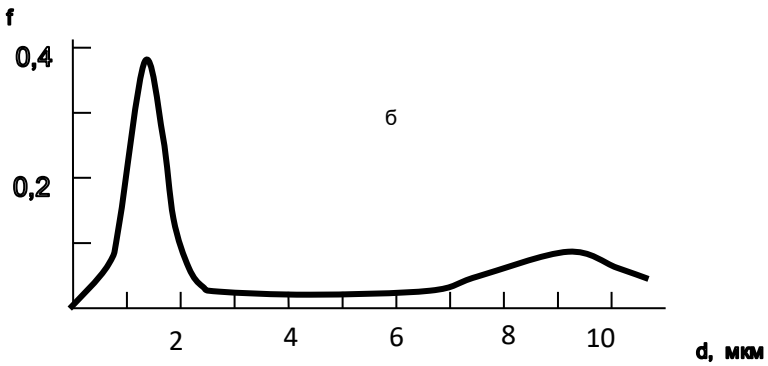


Рисунок 3.1 – Схема получения ферритов по оксидной технологии

В процессе производства ферритов исходные оксидные компоненты, используемые для их изготовления, а также конечный ферритовый порошок, полученный методом высокотемпературного синтеза, часто содержат крупные агломераты. Этот факт наглядно демонстрируется графическими данными, представленными на рисунках 3.2 и 3.3..



а) исходный оксида железа; б) смеси компонентов после первого измельчения

Рисунок 3.2 – Распределение частиц по размерам [29]

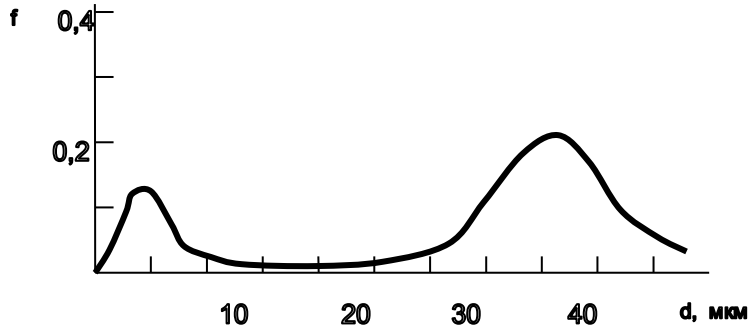


Рисунок 3.3 – Кривая распределения частиц по размерам после синтеза ферритовой шихты, полученной прокалкой при 900ºС [29]

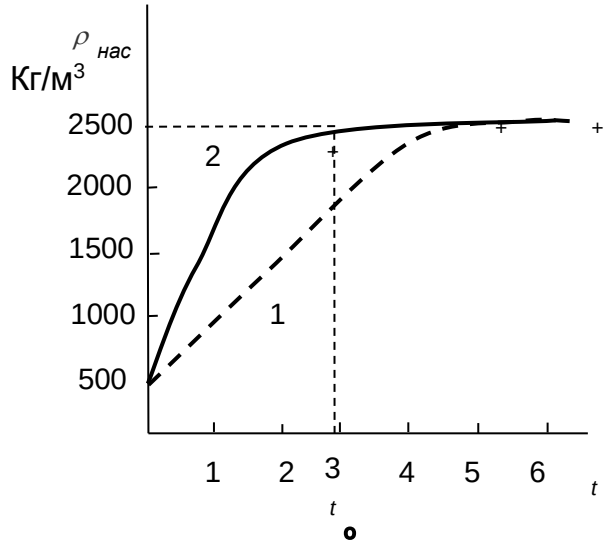
В процессе производства агрегаты характеризуются повышенной пористостью и образуются во время термической обработки сырьевых компонентов. При этом отдельные частицы прочно соединяются между собой, формируя структуры, которые значительно крупнее исходных элементов. Образование агрегатов также возможно в ходе синтеза ферритовой шихты. Особенно прочные агрегаты возникают на этапе синтеза при температурах свыше 800ºС, что существенно осложняет их последующее измельчение. Пресс-порошки представляют собой агрегаты с высокой прочностью, особенно при размерах частиц феррита менее 1 мкм.

При прессовании образуются крупные межгранульные поры, которые сохраняются даже после процесса спекания. Наличие таких крупных пор в спеченных ферритах препятствует движению доменных границ, что приводит к существенному снижению магнитной и диэлектрической проницаемости материала.

Успешность процесса разрушения агрегатов зависит от их прочности и обычно достигается путем измельчения как исходных компонентов, так и готового ферритового порошка. Важно отметить, что при этом размеры первичных частиц остаются практически неизменными, в то время как

размеры агрегатов значительно уменьшаются. Это способствует увеличению насыпной плотности порошков и плотности спеченных заготовок.

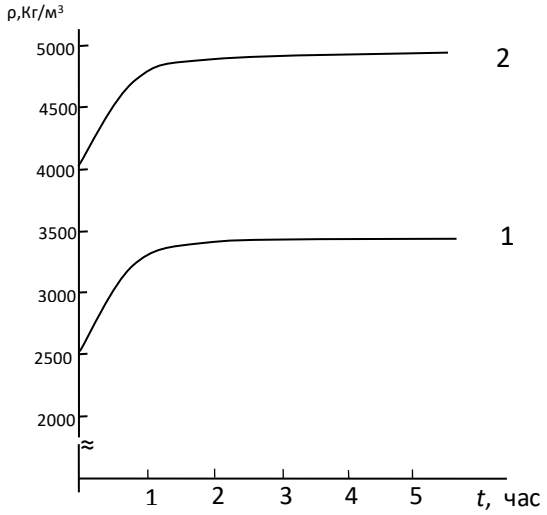
В рамках данного исследования степень дезагрегации при измельчении порошков определялась по динамике роста насыпной плотности ρнас (см. рисунок 3.4). Анализ данных показывает, что повышение частоты сухого измельчения шихты в вибромельнице М-10 с 25 до 50 Гц позволяет уменьшить время измельчения в 2,5-3,2 раза.



1 - частота вибрации 25 Гц, амплитуда 2 мм; 2 - частота вибрации 50 Гц, амплитуда 2 мм, t_o – оптимальное время помола

Рисунок 3.4 – Увеличение насыпной плотности порошков Ni-Zn-феррита в процессе обработки в вибромельнице М-10

Исследования подтвердили, что дезагрегация шихты позволяет повысить плотность сырых пресс-заготовок и спеченных изделий (рисунок 3.5).



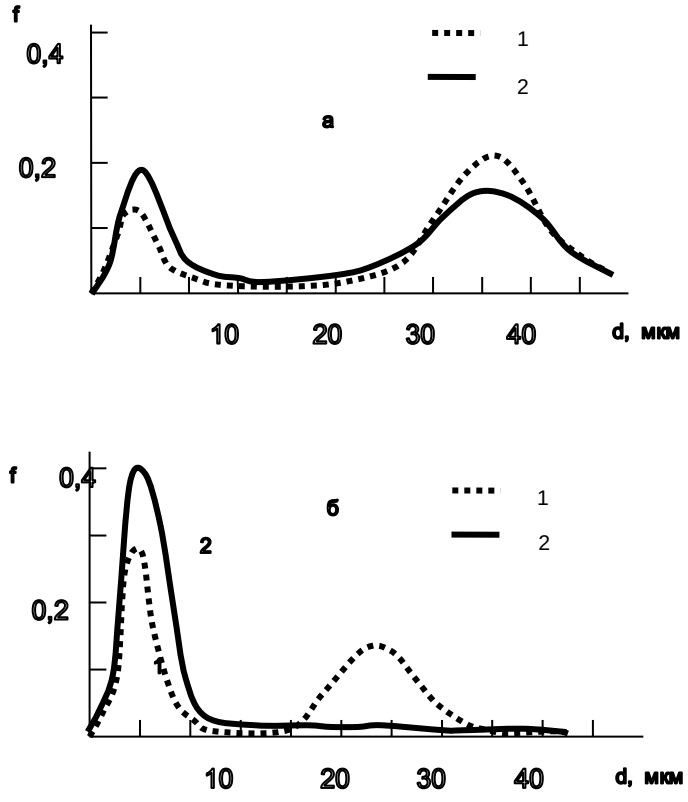
1 - пресс-заготовки, полученных прессованием под давлением 140 МПа; 2 –изделия после спекания при 1260 °С).

Рисунок 3.5 – Влияние на плотность времени измельчения Ni-Zn ферритового порошка в вибромельнице с частотой вибрации 50 Гц

Анализ кривой распределения частиц показывает, что при измельчении происходит существенное уменьшение количества агрегатов, что наглядно видно по снижению пика на графике (см. рисунок 3.6).

При этом важно отметить, что сам процесс измельчения в вибрационной мельнице практически не влияет на размер первичных частиц материала, которые представляют собой кристаллические образования. Эти кристаллические структуры отличаются высокой механической устойчивостью и характеризуются значительной сопротивляемостью к разрушению.

Тем не менее, в ходе измельчения на поверхности кристаллитов могут формироваться различные структурные повреждения и микродефекты.



1) 25 Гц; 2) 50 Гц и длительность измельчения: а)1 час; б) 2 часа

Рисунок 3.6 – Зависимость кривой распределения частиц шихты Ni-Zn феррита по размерам, полученных измельчением в вибромельнице при различных частотах вибрации вибромельницы

В процессе разработки технологии измельчения ферритовых материалов применялись два типа оборудования: аттриторы и вибрационные мельницы. Сравнительный анализ показал, что вибрационные установки демонстрируют существенно лучшие результаты при разрушении агломератов – они обеспечивают более быструю и качественную дезагрегацию материала.

Преимущество вибрационных мельниц обусловлено характером воздействия на измельчаемый материал. В отличие от аттриторов, где основной механизм измельчения основан на истирании, в вибрационных установках преобладает ударное воздействие мелющих тел, что обеспечивает более эффективное разрушение агрегатов.

Экспериментально установлено, что производительность вибрационной мельницы возрастает при увеличении двух ключевых параметров: амплитуды и частоты колебаний. Это объясняется тем, что при повышении данных характеристик мелющие шары получают большее ускорение и совершают больше ударов в единицу времени, что напрямую влияет на качество и скорость измельчения материала.

Конструктивные особенности вибрационных мельниц периодического действия подробно представлены в графическом материале (см. схему 3.7). Именно эти характеристики оборудования определяют его высокую эффективность при работе с ферритовыми порошками.

Исследования показали, что частота колебаний вибрационной мельницы ω более существенно влияет на эффективность измельчения, чем величина амплитуды A. Это можно объяснить тем, что при увеличении амплитуды линейно возрастает лишь ударная сила мелющих шаров F, в то время как с повышением частоты колебаний увеличивается не только сила удара F пропорционально квадрату частоты согласно выражению (3.1), но и количество соударений шаров[59].

$$F \approx kA\omega^2 \qquad (3.1)$$

Установлено влияние режимов измельчения порошков в вибрационной мельнице, связующих и поверхностно-активных веществ на свойства ферритов.

С увеличением продолжительности измельчения растут плотность диэлектрическая и магнитная проницаемости исследуемых ферритов. Это можно объяснить более эффективным разрушением агрегатов и формированием в ферритах крупнозернистой микроструктуры с малой пористостью (рисунок 3.10).

Показано, что увеличение частоты вращения дебалансного вала вибрационной мельницы с 1500 об/мин до 3000 об/мин, значительно улучшает радио поглощающие свойства ферритов и сместило пик поглощения в сторону низких частот, за расчёт уменьшения пористости (рисунок 3.11). При этом время сухого измельчения, достижение максимальной утрясённой насыпной плотности и следовательно, обеспечивающее эффективную дезагрегацию исходных компонентов и синтезированных ферритовых порошков сокращается с четырёх часов до одного часа, а достигаемая насыпная плотность изменяется с 1500 до 2000 кг/м^3 (рисунок 3.8). Это можно объяснить возрастанием силы удара шаров, пропорциональной квадрату частоты ($F \sim \omega^2 A$), т.е. происходит более полная дезагрегация.

Показано, что увеличение частоты вибрации вибрационной мельницы с 25 до 50 Гц позволяет увеличить магнитную и диэлектрическую проницаемости ферритовых образцов. Это также можно объяснить более эффективным разрушением агрегатов и формированием в ферритах крупно-зернистой микроструктуры с малой пористость. (рисунок 3.9).

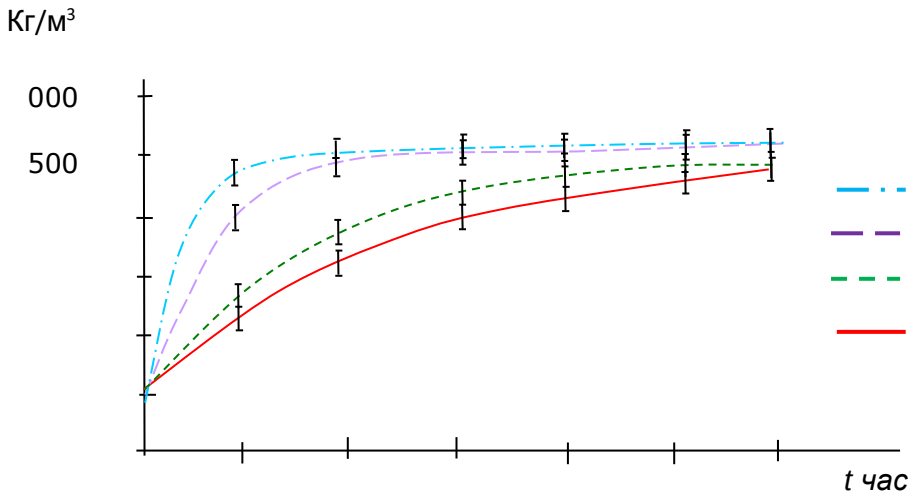


Рисунок 3.8 - Влияние длительности измельчения и частоты вибрации корпуса вибромельницы М-10 на насыпную плотность Ni-Zn-ферритовых порошков

На рисунке 3.8: 1- 50 Гц; 2 – 25 Гц; 1 – 3000 об/мин+0,3 масс. %ТЭА, 2 –3000 об/мин, 3 – 1500 об/мин +0,3 масс. % ТЭА, 4 – 1500 об/мин

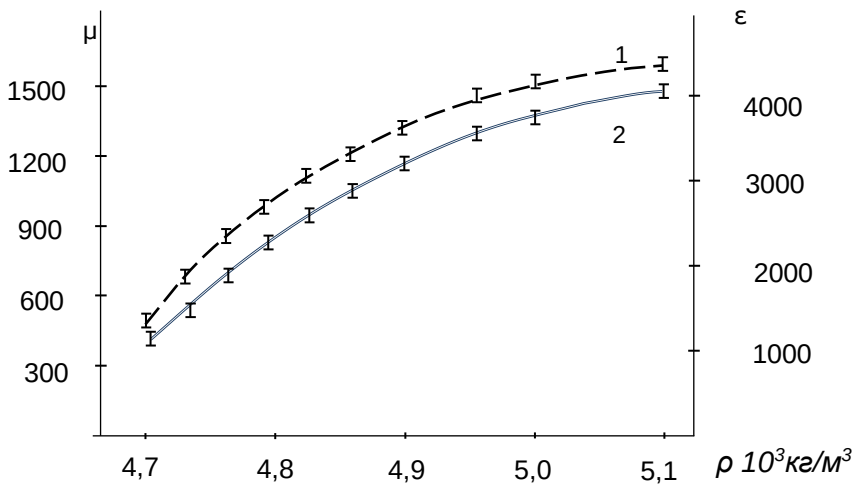


Рисунок 3.9 – Влияние плотности феррита состава $Ni_{0,3}Zn_{0,7}Fe_2O_4$ на магнитную (1), диэлектрическую (2) проницаемость, при частоте f = 1МГц.

Принцип работы вибрационной мельницы основан на сложном механизме измельчения материала. При вращении дебалансного вала корпус мельницы с шарами и шихтой совершает колебательные движения по эллиптической траектории, близкой к круговой. Это обеспечивает два основных способа измельчения: ударное воздействие шаров и их истирающее действие. Движение шаров происходит по инерции в направлении, противоположному качаниям корпуса, при этом материал перемещается вдоль корпуса по спиральной траектории.

Исследования процесса измельчения показали интересную зависимость: увеличение амплитуды колебаний приводит к смещению пика поглощения в область низких частот, что связано со значительным снижением пористости материала.

Оптимизация производства ферритовых магнитов включает несколько важных технологических этапов:

Предварительная подготовка гранул размером 8-10 мм

Прокалка в течение 2 часов при температуре 1100-1300°C

Дополнительное измельчение до среднего размера частиц 80-90 мкм

Результаты исследований показали следующие особенности:

При сканирующей электронной микроскопии обнаружены агломераты частиц различных форм размером в десятки микрометров

Рентгеновская дифракция выявила наличие фаз $SrFe_{12}O_{19}$ и $BaFe_{12}O_{19}$ с примесью 2-39% гематита

Максимальные значения энергетического произведения $(BH)max = 930$ Дж/м³ и остаточной магнитной индукции $Br = 72,8$ мТл достигаются при температуре прокалки 1300°C

Влияние состава на магнитные свойства:

Замена стронция на барий ухудшает магнитные параметры

Оптимальные характеристики для Ba-ферритов достигаются при температуре 1100°C

Частичное восстановление свойств достигается уменьшением размера частиц до 45-50 мкм

Магнитные взаимодействия в материале проявляются по-разному в зависимости от напряженности поля: при низких полях доминируют обменно-связанные взаимодействия, при высоких – дипольные. Сила этих взаимодействий коррелирует с температурой прокалки материала.

3.2 Влияние режимов измельчения на радио поглощающие свойства ферритов

Многие публикации были сосредоточены на улучшении магнитных, химических, механических и радио поглощающих свойств ферритов путем повышения температур прокалки или использования более мелких частиц

вплоть до нанометрового диапазона. Это влечёт за собой значительное увеличение технологических и экономических требований к процессу. Основной вклад этого исследования должен заключаться в предоставлении обзора экономически подходящей установки, пригодной для рутинного и устойчивого массового производства, а также мелкосерийного производства.

Существует множество методов синтеза и технологических установок. Таким образом, каждое исследование уникально и имеет свое значение. Поэтому даже сегодня публикации по этой теме все еще публикуются.

Целью исследования является анализ воздействия различных технологических параметров на радиопоглощающие характеристики ферритовых материалов. В частности, рассматривается влияние следующих факторов:

- режимы измельчения порошков в вибрационной мельнице;

- типы используемых связующих веществ;

- поверхностно-активные добавки;

Экспериментальные данные показывают прямую зависимость между продолжительностью измельчения и электрофизическими характеристиками ферритов. При увеличении времени обработки наблюдается рост как диэлектрической, так и магнитной проницаемости материала.

Механизм данного явления связан с двумя ключевыми процессами:

Более эффективным разрушением агрегатных структур

Формированием крупнозернистой микроструктуры с пониженной пористостью

Такое изменение структуры материала приводит к улучшению его электромагнитных свойств, что делает возможным целенаправленное управление характеристиками ферритов путем оптимизации процесса измельчения и выбора технологических добавок (рисунок 3.10).

Исследования показали, что увеличение частоты вращения дебалансного вала вибрационной мельницы с 1500 об/мин до 3000 об/мин, улучшило

Радио поглощающие свойства ферритов и сместило пик поглощения в сторону низких частот, за счёт уменьшения пористости (рисунок 3.11).

При этом время сухого измельчения, достижение максимальной утрясенной насыпной плотности и следовательно, обеспечивающее эффективную дезагрегацию исходных компонентов и синтезированных ферритовых порошков сокращается с четырех часов до одного часа, а достигаемая насыпная плотность изменяется с 1500 до 2000 кг/м^3 (рисунок 3.8). Это можно объяснить возрастанием силы удара шаров, пропорциональной квадрату частоты ($F \sim \omega^2 A$), т.е. происходит более полная дезагрегация.

Показано, что увеличение частоты вибрации вибрационной мельницы с 25 до 50 Гц позволяет увеличить магнитную и диэлектрическую проницаемости ферритовых образцов. Это также можно объяснить более эффективным разрушением агрегатов и формированием в ферритах крупно-зернистой микроструктуры с малой пористостью. (рисунок 3.9).

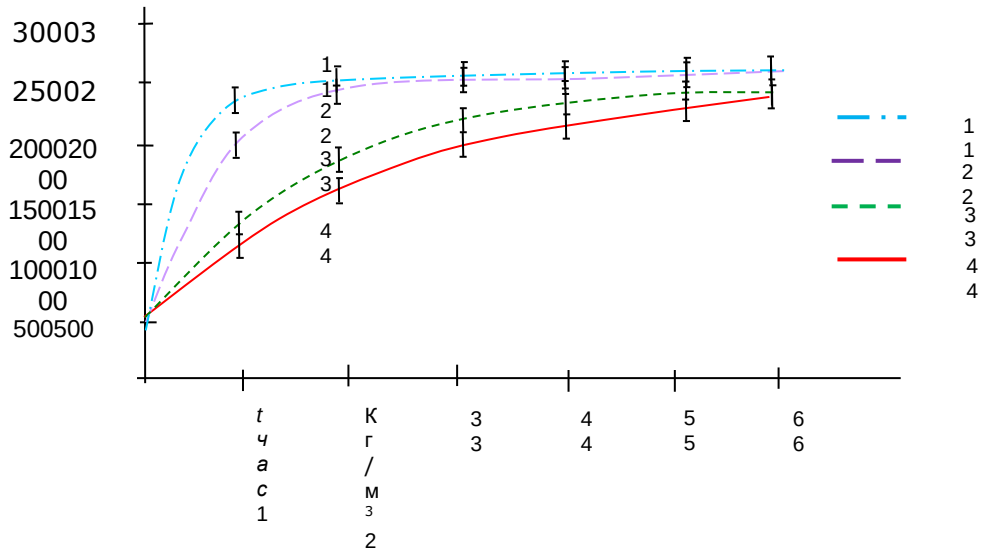


Рисунок 3.8 - Влияние длительности измельчения и частоты вибрации корпуса вибромельницы М-10 на насыпную плотность Ni-Zn-ферритовых порошков: 1- 50 Гц; 2 – 25 Гц

1 – 3000 об/мин+0,3 масс. %ТЭА, 2 –3000 об/мин,

3 – 1500 об/мин +0,3 масс. % ТЭА, 4 – 1500 об/мин

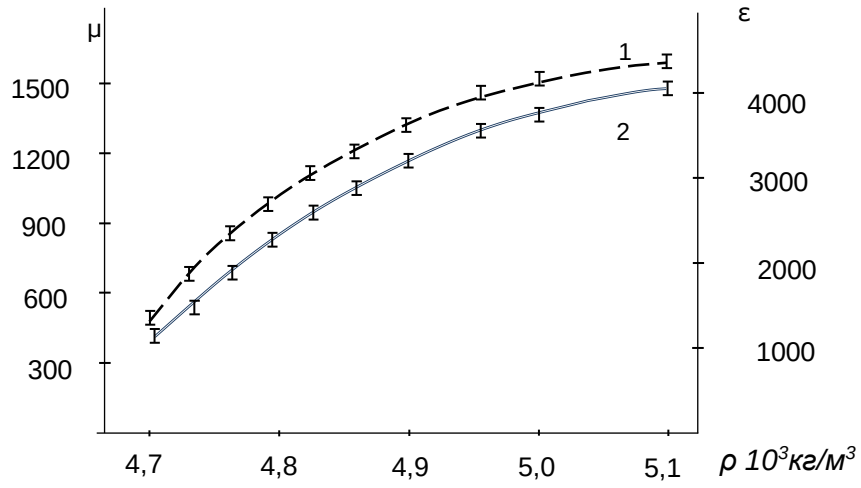
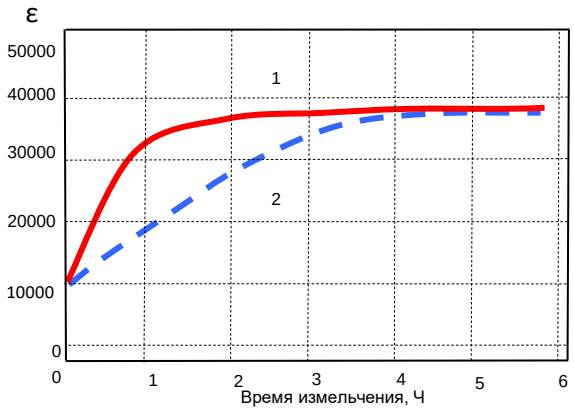
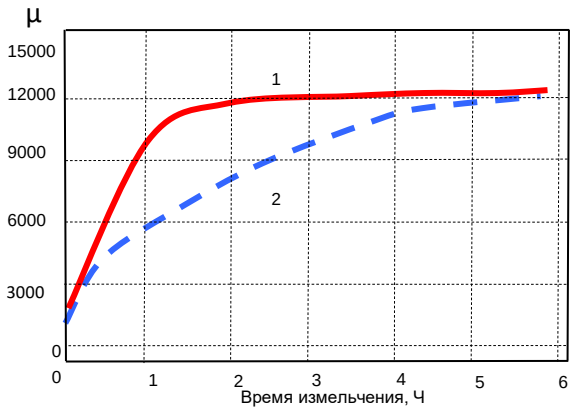


Рисунок 3.9 – Влияние плотности феррита состава $Ni_{0,3}Zn_{0,7}Fe_2O_4$ на магнитную (1), диэлектрическую (2) проницаемость, при частоте f = 1МГц.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Влияние вибрации корпуса вибромельницы М-10 на а) диэлектрическую, б) магнитную проницаемость образцов феррита $Mn_{0.603}Zn_{0.273}Fe_{0.124}Fe_2O_4$: 1- частота 50 Гц, 2 – частота 25 Гц. Измерения проводились на частоте 100 кГц.

При вращении дебалансного вала корпус мельницы со стальными шарами и измельчаемой шихтой приводится в колебательное движение по эллиптической траектории, довольно близкой к круговой траектории. Поэтому возможен механизм измельчения не только ударом шаров, но и их истиранием. Как правило, движение шаров в вибромельнице происходит по инерции противоположную сторону, соответствующую круговым качаниям корпуса.

Измельчаемый материал перемещается вдоль корпуса образуя траекторию в виде спирали. При этом исследования показали, что увеличение амплитуды колебаний, также смещает пик поглощения в сторону низких частот (рисунок 3.12), за счет уменьшения пористости, но износ оборудования увеличивается в значительно большей степени, чем при увеличении частоты вращения дебалансного вала вибрационной мельницы. (возрастание силы удара линейно зависит от амплитуды колебаний).

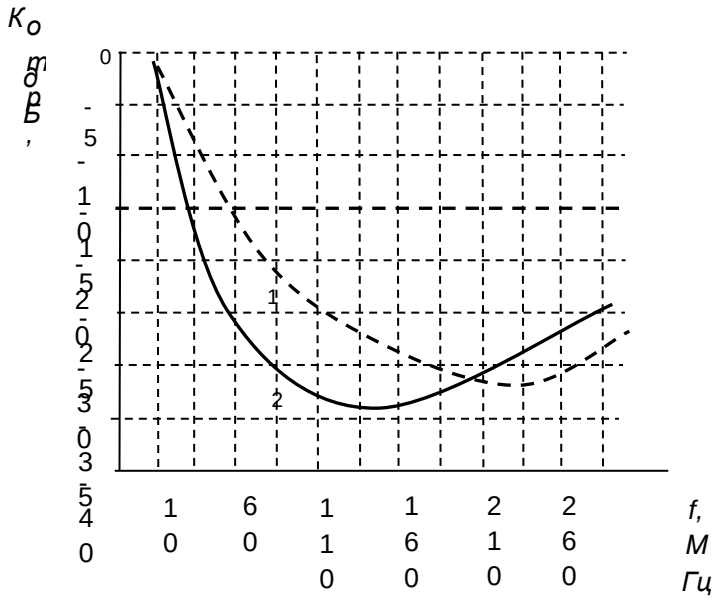


Рисунок 3.11 – Влияние частоты вращения дебалансного вала на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита состава: $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$:1 – 1500 об/мин 2 – 3000 об/мин. Время измельчения 2ч.

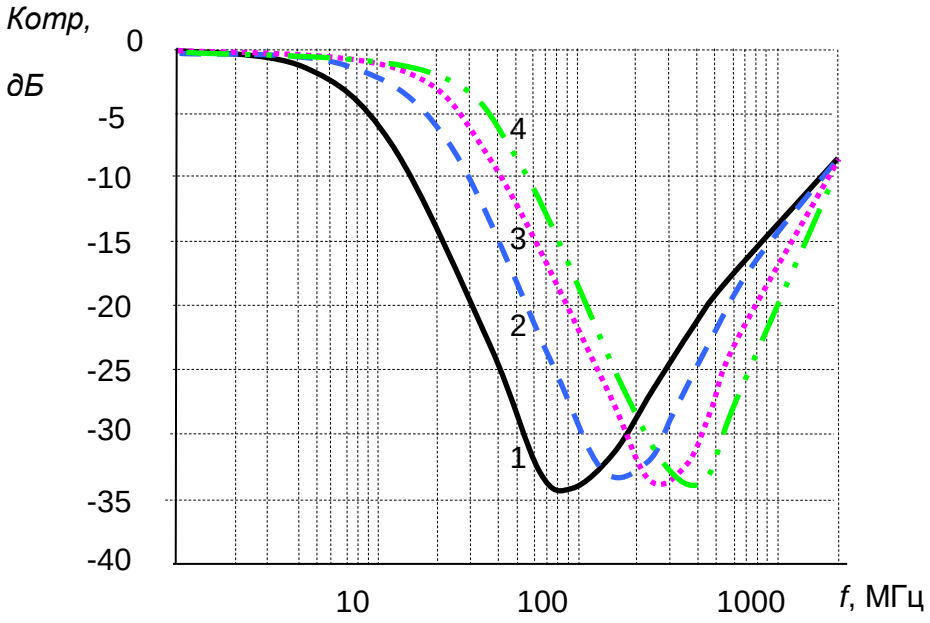


Рисунок 3.12 – Влияние амплитуды колебаний по вертикали корпуса вибромельницы на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита состава: $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$: 1 – 8 мм, 2 – 6 мм, 3 – 4 мм, 4 – 2 мм при частоте 1500 об/мин.

С помощью автоматизированного дифрактометра ДРОН-3М и “D-5000” фирмы “Siemens” (Германия) в $Fe_{k\alpha}$- и $Cu_{k\alpha}$- излучениях, проводились исследования фазового состава и структурных особенностей ферритовых образцов. Для оценки полноты ферритизации синтезированных ферритовых порошков измеряли удельной намагниченности σ_s на установке БУ-3.

Открытую пористость $П_{откр}$ ферритовых изделий определяли измерением объёма воды, поглощённой порами при кипячении в течении 10 минут:

$$П_{откр} = (m_2 - m_1)\ 100 / V, \qquad (3.1)$$

где m_1 и m_2 - масса исходного и насыщенного водой образцов соответственно; V - объем образцов, определяемый гидростатическим взвешиванием.

Закрытую пористость $П_{закр} = П_{общ} - П_{откр}$, определяли гидростатическим взвешиванием:

$$П_{закр} = [\ 1 - m_1\gamma_m / (m_1 - m_3)\ \gamma_{маг}\ ].\ 100, \qquad (3.2)$$

где γ_m- плотность жидкости;

$\gamma_{маг}$ - плотность (рентгеновская) ферритового материала;

m_3 - масса образца в жидкости.

Для гидростатического взвешивания образцов использовали изопропиловый спирт, обладающий минимальным поверхностным натяжением (14 мН/м²) и хорошей смачиваемостью, что обеспечивает полноту пропитывания жидкости в поры.

С помощью методов ртутной пирометрии и электронной микроскопии оценивали особенности распределения пор в образцах по размерам.

Строение границ, средний размер зерна, среднее квадратическое отклонение их по размерам, а также распределение пор по поверхности, фазовый состав и многое другое определялось металлографическим анализом.Для металлографических исследований использовали шлифы.

Шлифовку, полировку и травление осуществляли до достижение заданного качества шлифов для исследований..

Шлифование исследуемых ферритовых образцов проводили на шлифовальных порошках М20, М14, М7, М3, М1, а в некоторых случаях на алмазных пастах АСМ–1 и АСМ–0,5, в механическом режиме. В отдельных случаях шлифование осуществляли с помощью шлифовальных станков.

Затем промытые водой образцы полировали. Применяли два вида полировальных станков: притирочные и вибрационные.

Применение водных суспензий полировальных абразивов на основе дисперсных порошков MgO, Al_2O_3, Cr_2O_3, Fe_2O_3с размером частиц абразивных порошков от 0,1 до 1 мкм.обеспечивало получение требуемого качества полировки.

Для полировки иногда применяли алмазную пасту марки АСМ–0,5. Качество приготовленных шлифов оценивалось по отсутствию рисок и царапин при наблюдении под оптическим микроскопом.

После полирования образцы, промытые четырёх хлористым углеродом (этиловым спиртом), подвергались травлению.

Среди известных способов травления в технологии исследования микроструктуры ферритов, таких как химическое, термическое, электролитическое, в данной работе предпочтение отдавалось химическому и термическому [27].Так как они наиболее доступны и просты в осуществлении.При химическом травлении использовали водный раствор плавиковой кислоты.

С целью получения снимков поверхности образцов использовали металлографический просвечивающий микроскоп МИМ–7, сканирующий электронный микроскоп Mira3 Tescan и Zeiss.

С помощью снимков микроструктуры методом случайных секущих оценивали размеры зерне. По числу точек пересечения произвольной секущей с линиями межзеренных границ можно судить о среднем размере зерна по формуле:

$$\overline{D} = \frac{\sum_i N_i D_i}{\sum N_i}, \qquad (3.3)$$

где $\overline{D}$ – средний размер зерна, мкм;

N_i – количество зерне, попавших в i–интервал;

D_i– среднее значение интервала.

Разно зернистость зерне испытуемых образцов ферритов оценивали по выражению:

$$R = \frac{\sum_i \left|\overline{D} - D_i\right| \cdot N_i}{\overline{D} \cdot \sum N_i} \cdot 100\%, \qquad (3.4)$$

45где R – разно зернистость;

$\overline{D}$ – средний размер зерна, мкм;

D_i– среднее значение интервала;

N_i – количество зерен, попавших в i–интервал.

Микроструктурный анализ выполняли на микроскопе МИМ-8М, сканирующих электронных микроскопах Mira3 Tescan и Zeiss.

Для определения точки Кюри ферритовые образцы предварительно измельчали с помощью дробильной установки. После этого помощью сеток отбирали фракции 0,18 - 0,2 мм. Отобранную фракцию помещали в термостат с электромагнитом и осуществляли медленный нагрев со скоростью 1ºС в минуту. Измерением температуры, соответствующей отрыву частиц исследуемого феррита от электромагнита, вычисляли точку Кюри образцов.

Для проведения рентгеноструктурного анализа опытных образцов ферритов при нормальных условиях использовалась рентгеновская установка ДРОН-3 в медном Кα-излучении, отфильтрованном фильтром. Фильтр приготавливался в виде тонкой прослойки порошка диоксида марганца толщиной порядка 0,15 мм, путаем наклеивания на бумагу.

Для проведения рентгеноструктурного анализа ферритовых образцов порошки, полученные путём дробления ферритовых образцов и последующего растирания раздробленный массы в ступке. Регистрация сигналов осуществлялось с помощью считчика Гейгера-Мюллера с записью дифракционной картины на самописце ЭПП-09.

Расшифровка рентгенограмм и вычисление периода кристаллической решётки осуществлялось по известным стандартным методикам фазового анализа поликристаллов [94]. Для исследованных образцов ферритов соотношения между межплоскостными расстояниями и индексами Миллера (*hkl*) практически удовлетворяли формуле:

$$d^2 = a^2/(h^2 + k^2 + l^2) \qquad (3.5)$$

где a – период решётки, соответствующий кубической сингонии в случае пренебрежимо малых искажений решётки, лежащих в пределах точности измерений, нм; h,k,l – индексы Миллера; d – межплоскостное расстояние, нм.

Для вычисления постоянных решётки использовались линии (511), (440), (731). Колебания температуры при измерениях лежали в пределах 22-25°С. Абсолютная ошибка в определении периода решетки образцов составляла $\pm$0,00018 нм.

Величину предела прочности вычисляли помощью выражения:

$$\sigma_{изг.} = M_{max}/W, \qquad (3.6)$$

где M_{max}– величина максимального изгибающего момента, обеспечивающая разрушение образца; W – момент силы сопротивления изгибу поперечного сечения образца. В случае прямоугольного сечения с высотой h и шириной b

$$W = b \cdot h^2/6. \qquad (3.7)$$

4 Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера-исследователя

Научно-исследовательская работа инженера-исследователя осуществляется на рабочих местах, представляющих собой прямоугольные столы стандартного размера (1500х700) мм, с расположенными на них комплектами оборудования:

вакуумной насос;

компьютером, включающим в свой состав системный блок, жидкокристаллический монитор, клавиатуру и мышь;

- вакуумметр ионизационно термопарный ВИТ2;

- насос ВН 250;

- установка вакуумного напыления УВН-71П-3;

- поршневой компрессор FUBAG HP 3;

- алмаз – М для скрайбирования;

- бинокулярный стереоскопический микроскоп;

- шкаф для компонентов.

Влияние освещения на производительность труда человека, по-видимому, более критично в современной жизни, следовательно, большую часть времени человек проводит в помещении в различных условиях освещения. От офисных до домашних работ условия освещения оказывают существенное влияние на общее качество внутренней среды,

1 4 Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера-исследователя

Научно-исследовательская работа инженера-исследователя осуществляется на рабочих местах, представляющих собой прямоугольные столы стандартного размера (1500х700) мм, с расположенными на них комплектами оборудования:

вакуумной насос;

компьютером, включающим в свой состав системный блок, жидкокристаллический монитор, клавиатуру и мышь;

вакуумметр ионизационно термопарный ВИТ2;

насос ВН 250;

установка вакуумного напыления УВП-71П-3;

поршневой компрессор FUBAG HP 3;

алмаз – М для скрайбирования;

бинокулярный стереоскопический микроскоп;

шкаф для компонентов.

Влияние освещения на производительность труда человека, по-видимому, более критично в современной жизни, следовательно, большую часть времени человек проводит в помещении в различных условиях освещения. От офисных до домашних работ условия освещения оказывают существенное влияние на общее качество внутренней среды,

производительность и комфорт пользователя. В то же время оптимальное освещение для определенной цели на рабочем месте будет способствовать многим атрибутам устойчивой физической среды. Существуют рекомендуемые уровни освещения для определенной цели, предложенные национальными органами власти в разных странах. Однако исследователи освещения проводили различные эксперименты по производительности человека в различных рекомендуемых условиях освещения, и стандарты часто сообщались ими как ненадлежащие. Таким образом, любая конкретная связь между освещенностью и производительностью человека по-прежнему остается неясной и повышает дальнейшую потребность в исследованиях в этой области. Настоящее исследование рассматривает связь между освещенностью, цветовым контрастом задачи и производительностью задачи, чтобы определить любую конкретную освещенность для максимальной производительности человека. В работе [ ] описан эксперимент, который проводился на группе аспирантов аналогичного возраста. На основе эксперимента, проводимого в научной

лаборатории, влияние освещения на работоспособность проводилось на этих 71 субъекте, в ходе которого изучалось, как различные уровни освещенности и контрастности влияют на производительность задачи. Анкетный опрос, проводимый в ходе каждого сеанса, также позволял оценить субъективное впечатление от освещения при использовании четырех различных уровней освещенности в ходе эксперимента.

Более ранние исследования показали, что существует противоречие в типе задачи, и многие утверждали, что тип задачи может влиять на выполнение задачи и не будет справедливо оцениваться в отношении связи с освещенностью. Чтобы избежать усложнения, связанного с задачей, типом задачи, выбранным в текущем исследовании, являлась карта Ландольта С, которая была впервые представлена британским исследователем Уэстоном в

1945 году (Эрик, С. 1986. Рабочие места: психология физической среды в офисах и на фабриках). Диаграмма Ландольта С с двумя различными контрастами и двумя различными схематическими комбинациями были представлены участникам в хронологическом порядке.

Освещенность влияет на производительность человека. На основе текущего эксперимента, вывести конкретную связь между производительностью задачи и освещенностью оказалось сложно. Из анализа было замечено, что увеличение освещенности может повысить производительность до определенного уровня, но чрезмерная освещенность вызывает падение производительности, а также отражает более высокий уровень неудовлетворенности.

У настоящего исследования также есть некоторые ограничения. Эксперимент был основан только на четырех различных уровнях освещенности. Результат мог быть другим для более высоких, чем 400 лк или ниже, чем 50 лк. С другой стороны, уровень освещенности был увеличен с 200 лк до 400 лк напрямую, без какого-либо измеренного между ними уровня

производительности. Постепенное увеличение освещенности с 200 лк до 400 лк может указывать на наивысшую производительность определенной освещенности, а после этого уровня производительность начала падать. Что является недостатком исследования.

Выполнение задания не предсказывает субъективные впечатления от освещения. С данными, полученными в ходе эксперимента, было видно, что при одинаковых уровнях освещения разные субъекты демонстрируют разную производительность и даже имеют разную реакцию в зависимости от уровня их удовлетворенности. Литература и более ранние исследования не проводили широкой оценки связи контраста и производительности.

Настоящее исследование ясно показывает, что цветовой контраст оказывает значительное влияние на производительность. Из анализа было видно, что более высокая контрастность обеспечивает лучшую производительность, а также повышенную удовлетворенность среди субъектов.

Согласно представленному выше анализу, можно сделать вывод, что изменение и улучшение освещения влияет на производительность, что также отмечалось во многих более ранних исследованиях, но в настоящем исследовании рассматривается обновленный сценарий в лабораторной среде. Текущее исследование показывает, что повышение уровня освещенности в первую очередь повышает производительность человека. После определенного уровня, который в этом эксперименте составлял 400 люкс, наблюдается тенденция к снижению производительности. Кроме того, анализ показывает, что освещенность оказывает значительное влияние на уровень удовлетворенности испытуемых. С другой стороны, изменение контрастности показывает четкое последовательное изменение производительности задач. Высококонтрастное изображение на картинке стимулирует улучшение производительности человека. В исследовании оценка взаимосвязи между освещенностью, уровнями контрастности и

производительностью задач представлена в виде ряда сравнений. Таким образом, текущее исследование представляет собой сценарий человеческой производительности при различных уровнях освещенности в спроектированной лабораторной среде, тем самым оно служит методологией и базой данных для поддержки будущих исследований, сообщая об освещенности для строительства внутренней среды и помогая соответствующим специалистам оценить текущее исследование для дальнейших исследований.

Как известно, минимальная освещенность рабочего места согласно нормативам, (E) определяется уравнением:

$$E = \frac{F \cdot m \cdot e \cdot p \cdot Y}{1000 \cdot K_3 \cdot h}, \quad (4.1)$$

где F – световой поток светильника, лм;

m – коэффициент, учитывающий отраженную составляющую света и действие удаленных светильников (1,05 – 1,2);

e = e1 + e2 +…+ ei – условная освещенность, которая создавалась бы i-м светильником при установке в нем лампы 1000 лм;

p – расстояние от плоскости, в которой расположена контрольная точка, до проекции светильника, м;

Y = Y1 + Y2 +…+ Yi – коэффициент, учитывающий переход от горизонтальной плоскости к вертикальной;

КЗ – коэффициент запаса, учитывающий запыление светильников и износ источников света (1,5-2);

h – высота подвеса светильников над расчётной поверхностью, м.

Будем анализировать условия для научно-исследовательской работы в лаборатории, которая представляет собой помещение длиной 6.10 м,

шириной 5 м и высотой 3,5 м, установлено 12 светильников типа ОД с прямым косинусным светораспределением. В каждом из светильников установлено 2 люминесцентные лампы ЛБ-80 (световой поток 5200 лм). На рисунке представлено расположение светильников в помещении.

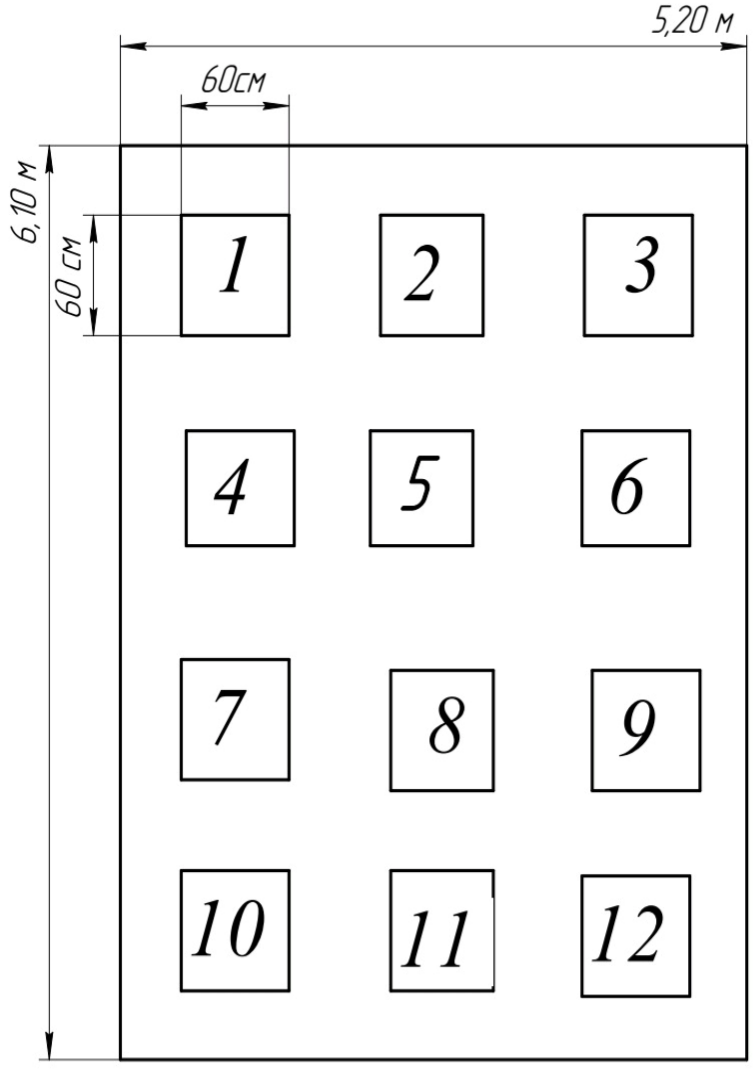


Рисунок 4.1 – Расположение светильников в научно-исследовательской лаборатории:

Рассчитаем общий световой поток от ламп в лаборатории: ЛБ-80, имеющие световой поток 5200 лм, то F = 2·5200 лм = 10400 лм.

Для светодиодных ламп известен коэффициент, который учитывает составляющую света, которая отражается и действие удаленных светильников m = 1.1.

В научно-исследовательской лаборатории небольшое выделение пыли, поэтому примерный коэффициент запаса светильников светодиодных ламп КЗ = 1,5

Высота плоскости нормирования освещенности определяется высоте 0,8 м от пола, можно рассчитать высоту подвеса светильников над рабочей поверхностью:

h = 3,4 м – 0,8 м =2,6 м

Таким образом, можно рассчитать условную освещенность, которая будет создаваться i-м светильником при включении лампы 1000 лк, что видно из уравнения:

$$e_i = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha_i}{h^2}, \qquad (7.2)$$

где Iα – сила света по направлению к точке:

αi – угол между нормалью к поверхности, которой принадлежит точка и лучом падающего света, определяемый выражением:

$$\alpha_i = arctg(\frac{d_i}{h}), \qquad (7.3)$$

где di – расстояние от контрольной точки А до проекции светильника.

$$d1 = d2 = d3 = d4 = \sqrt{1{,}5^2\,м + 1{,}5^2\,м} = 2{,}1м \qquad (7.4)$$

Определим αi,:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = arctg(\frac{2{,}1м}{2{,}6м}) = 38^\circ \quad (7.5)$$

Определим ei:

I1=I2=I3=I4=225 кд, (7.8)

$$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = \frac{225кд * \cos^3 38^\circ}{(2{,}6)^2} = 16{,}3лк \quad (7{,}9)$$

56 Исходя из условной освещенности, которая создавалась бы i-м светильником, определим:

e = e1 + e2 + e3 + e4 = 16,3 лк. (7.12)

Рассчитаем Yi, по выражению:

$$Y_i = cos\,\theta + \frac{d_i}{h} sin\,\theta \quad . \quad (7.13)$$

где θ - угол наклона вертикальной плоскости, равный 90°;

$$Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_4 = 0{,}27, \quad (7.14)$$

С учетом всего выше изложенного, рассчитаем освещенность рабочего места инженера исследователя по выражению (7.1):

$$E = \frac{10400 * 1{,}5 * 1{,}1 * 16{,}3 * 0{,}27}{1000 * 1{,}5 * 2{,}6} = 19лк \quad (7{,}16)$$

Мы получили данные расчёта для освещенности рабочего места инженера-исследователя: E = 19 лк вполне удовлетворяют СНиП 23-05-95. Таким образом, система освещения, реализованная в научно-исследовательской лаборатории, полностью удовлетворяет требованиям безопасности труда и удобства работы.

В лаборатории в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 приняты все меры противопожарной безопасности: рубильники прямого доступа для быстрого отключения установки от сети; огнетушители ОХП-10 и ОХПВ-10; напротив лаборатории имеется выход на запасную лестницу для быстрой эвакуации в случае пожара.

Заключение

В результате проделанной работы была сформулирована краевая задача о распространении электромагнитного поля в ферромагнитной среде, поставлены граничные и начальные условия, проведено решение методом разделения переменных.

Полученное решение задачи

$$E(x,y,t)=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty}A_{n,m}\cdot[E_0(1-R_e)\cos\frac{\pi n}{l}x+\frac{E_0\frac{z_0}{z_t}T_e}{\sin\frac{\pi n}{2}}\sin\frac{\pi n}{l}x]\cdot\sin(\frac{\pi\cdot m}{d}y)\times$$

$$\times\frac{8\sin\frac{\pi\cdot n}{2}(1-\cos\pi\cdot n)}{\pi^2 n\cdot m\cdot\varepsilon(1-R_e)}[\frac{k_2}{k_2-k_1}\exp(k_1 t)+\frac{k_1}{k_1-k_2}\exp(k_2 t)]$$

где

$$A_{n,m}=\sqrt{\frac{4}{[E_0^2(1-R_e)^2+E_0^2(\frac{z_0}{z_t})^2T_e^2]\cdot l\cdot d}},$$

$$k_1=-\frac{2\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega}-\sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2}+\frac{\lambda}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}},$$

$$k_2=-\frac{2\pi}{\varepsilon}\frac{\sigma}{\omega}+\sqrt{\frac{4\pi^2}{\varepsilon^2}\frac{\sigma^2}{\omega^2}+\frac{\lambda}{\varepsilon\mu}\frac{c^2}{\omega^2}},$$

$$\lambda = (\frac{\pi \cdot n}{l})^2 + (\frac{\pi \cdot m}{d})^2 .$$

позволяет проанализировать процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде.

В результате проверенного численного анализа отражений от экспоненциально неоднородного слоя магнитом диэлектрика, нанесённого на металл при нормальном падении электромагнитной волны на образец, выяснили, что в узкой области частот значение коэффициента отражения изменяется от R=0,8 (≈1МГц) до R=0,01 (≈3 МГц). Полученные значения хорошо согласуются с данными эксперимента лишь в узкой области частот ((≈1МГц), что, возможно, объясняется уменьшением значения магнитной проницаемости при увеличении частоты.

Установлено влияние режимов измельчения порошков в вибрационной мельнице, связующих и поверхностно-активных веществ на радио поглощающие свойства ферритов.

Установлено, что с увеличением продолжительности измельчения растут плотность диэлектрическая и магнитная проницаемости исследуемых ферритов.

Таким образом, дальнейшее исследование материалов на основе Ni – Zn ферритов и технологий по дальнейшему совершенствованию и развитию помехозащищенности систем автоматизированного управления представляет интерес.

СПИСОКИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев А. Г., Штагер Е. А.. Физические основы Stealth-технологии. Вестник Российской академии естественных наук, 1997, № 2 (1), с. 139-146.

2. Д. Фоксвел, Д. Джаксен.Подход к обеспечению скрытности: создание малозаметных кораблей. *Jane'sIDR (InternationalDefenseReview), Vol. 31, September1998, p. 43-45,47-48.*

3. *L. Garnero, A. Franchois, J. Hugonin, C. Pichot, and N. Joachimowicz, "Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, pp. 1801-1807, Nov. 1991.*

4. Покусин Д.Н., Чухлебов Э.А., Залесский М.Ю. Комплексная магнитная проницаемость ферритов в области естественного ферромагнитного резонанса. // Радиотехника и электроника, 1991, т. 36, №11. С. 2085-2091.

5. Бибиков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения. Труды XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: Изд. НПФ «Саквоее» (ISBN 978-5-904259-01-3), 2009. – С. 1578-1584.

ПГУ 2.11.03.04.007 ПЗ

6. *L. Sun, J. Guo, Q. Ni, E. Cao, Y. Zhang, W. Hao, L. Ju, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 29, 5356 (2018). DOI: 10.1007/s10854-017-8501-2*

7. *T. Tangcharoen, A. Ruangphanit, W. Pecharapa, Ceram. Int., 39, 239 (2013). DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.10.069*

8. *J. A. Stoll, D. Lachowicz, A. Kmita, et al., Int. J. Mol. Sci.* ***24****, 5685 (2023).*

9. *5. M. M. Soliman, M. E. Chowdhury, A. Khandar, et al., Sensors* ***21****, 3163 (2021).*

10. *A. A. Birajdar. Introduction, types and applications of ferrites. CHAPTER 1*

11.A. S. Albuquerque, J. D. Ardisson, W. A. A. Macedo, M. C. M. Alves, J. Appl. Phys. 87 (2000) 4352.

11. *S. R. Murthy, B. Ramaiah, J. Mater. Sci. Lett.*

12. *19 (2000) 703. M. Ajmal, A. Maqsood, Mater. Lett. 62 (2008) 2077.*

13. *P. Yadoji, R. Peelamedu, D. Agrawal, R. Roy, Mater. Sci. Engg. B 98 (2003) 26*

14. *A.K.M. Akther Hossaina, S.T. Mahmuda, M. Sekib, T. Kawaib, H. Tabata, J. Magn. Magn. Mater. 312 (2007) 210.*

15. *A.M. Abdeen, J. Magn. Magn. Mater. 185 (1998) 199.*

16. *Mohan, G.R., D. Ravinder, A.V. Reddy, B.S. Boyanov, Mater. Lett., 40 (1999) 3*

17. *G. Ranga Mohan, D. Ravinder, A.V. Ramana Reddy,B.S. Boyanov, Mater. Lett.*

18. *A. M. El-Sayed, Mater. Chem. Phys. 82 (2003) 583*

19. *Muhammad Ajmal, Asghari Maqsood, Mater. Sci. Engg: B, 139 (2007) 164.*

20. *Santosh S. Jadhav, Sagar E. Shirsath, B. G. Toksha, S. J. Shukla, K. M. Jadhav, Chin. J. Chem. Phys. 21 (2008) 381.*

21. *S. V. Kakatkar, S. S. Kakatkar, R. S. Patil, A. M. Sankpal, S. S. Suryawanshi, D. N. Bhosale, S. R. Sawant, Phys. Stat. Sol (b). 198 (1996) 853.*

22. *Wang Li, Li Fa-Shen, Zhou Qing-Guo, Chin. Phys. 9 (2000) 685*

23. Ю.Д. Третьяков, Н.Н. Олейников. Физико – химические основы термической обработки ферритов. – М.: Изд. МГУ,1973.

24. Бекбулатов М.С. // Физические и физико-химические свойства ферритов: Сборник.- Минск: Наука и техника, 1966, с.55-58.

25. Балашов А.М., Черкасов А.П., Хохлов М.А., др. // Сб. Физические и физико-химические свойства ферритов. - Минск: Наука и техника, 1975.

26. Летюк Л.М., Журавлев Г.И. Химия и технология ферритов.

27. *Diethelm C.W. Ferrite als magnetostriktive Resonatoren und deren Anwendung als Elemente eletrischer Filter //Bull. Techn. PTT. - 1951. - Bd. - №8. - S. 281-297.*

28. Проблемы порошкового материаловедения. Часть V. Технология производства порошковых ферритовых материалов / Под ред. акад. РАН В.Н.Анциферова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 408 с.

29. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. Физические свойства и практическое

30. Алексеев А. Г., Штагер Е. А.. Физические основы Stealth-технологии. Вестник Российской академии естественных наук, 1997, № 2 (1), с. 139-146.

31. Д. Фоксвел, Д. Джаксен.Подход к обеспечению скрытности: создание малозаметных кораблей. *Jane'sIDR (InternationalDefenseReview), Vol. 31, Septem-ber1998, p. 43-45,47-48.*

32. *L. Garnero, A. Franchois, J. Hugonin, C. Pichot, and N. Joachimowicz, "Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 39, pp. 1801-1807, Nov. 1991.*

33. Покусин Д.Н., Чухлебов Э.А., Залесский М.Ю. Комплексная магнитная проницаемость ферритов в области естественного ферромагнитного резонанса. // Радиотехника и электроника, 1991, т. 36, №11. С. 2085-2091.

34. Бибиков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения. Труды XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: Изд. НПФ «Саквоее» (ISBN 978-5-904259-01-3), 2009. – С. 1578-1584.

35. *L. Sun, J. Guo, Q. Ni, E. Cao, Y. Zhang, W. Hao, L. Ju, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 29, 5356 (2018). DOI: 10.1007/s10854-017-8501-2*

36. *T. Tangcharoen, A. Ruangphanit, W. Pecharapa, Ceram. Int., 39, 239 (2013). DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.10.069*

37. *J. A. Stoll, D. Lachowicz, A. Kmita, et al., Int. J. Mol. Sci.* ***24****, 5685 (2023).*

38. *5. M. M. Soliman, M. E. Chowdhury, A. Khandar, et al., Sensors* ***21****, 3163 (2021).*

39. *A. A. Birajdar. Introduction, types and applications of ferrites. CHAPTER 1*

11.A. S. Albuquerque, J. D. Ardisson, W. A. A. Macedo, M. C. M. Alves, J. Appl. Phys. 87 (2000) 4352.

40. *S. R. Murthy, B. Ramaiah, J. Mater. Sci. Lett.*

41. *19 (2000) 703. M. Ajmal, A. Maqsood, Mater. Lett. 62 (2008) 2077.*

42. *P. Yadoji, R. Peelamedu, D. Agrawal, R. Roy, Mater. Sci. Engg. B 98 (2003) 269.*

43. *A.K.M. Akther Hossaina, S.T. Mahmuda, M. Sekib, T. Kawaib, H. Tabata, J. Magn. Magn. Mater. 312 (2007) 210.*

44. *A.M. Abdeen, J. Magn. Magn. Mater. 185 (1998) 199.*

45. *Mohan, G.R., D. Ravinder, A.V. Reddy, B.S. Boyanov, Mater. Lett., 40 (1999) 39.*

46. *G. Ranga Mohan, D. Ravinder, A.V. Ramana Reddy,B.S. Boyanov, Mater. Lett. 40 (1999) 39.*

47. *A. M. El-Sayed, Mater. Chem. Phys. 82 (2003) 583*

48. *Muhammad Ajmal, Asghari Maqsood, Mater. Sci. Engg: B, 139 (2007) 164.*

49. *Santosh S. Jadhav, Sagar E. Shirsath, B. G. Toksha, S. J. Shukla, K. M. Jadhav, Chin. J. Chem. Phys. 21 (2008) 381.*

50. *S. V. Kakatkar, S. S. Kakatkar, R. S. Patil, A. M. Sankpal, S. S. Suryawanshi, D. N. Bhosale, S. R. Sawant, Phys. Stat. Sol (b). 198 (1996) 853.*

51. *Wang Li, Li Fa-Shen, Zhou Qing-Guo, Chin. Phys. 9 (2000) 685*

52. Ю.Д. Третьяков, Н.Н. Олейников. Физико – химические основы термической обработки ферритов. – М.: Изд. МГУ,1973.

53. Бекбулатов М.С. // Физические и физико-химические свойства ферритов: Сборник.- Минск: Наука и техника, 1966, с.55-58.

54. Балашов А.М., Черкасов А.П., Хохлов М.А., др. // Сб. Физические и физико-химические свойства ферритов. - Минск: Наука и техника, 1975. - С.203

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
Задания на ВКР

«Утверждаю»
зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05» июня 2025 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 21ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Маннонов Иномжон Сирожидинович
(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Игошина Светлана Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов

Тема утверждена приказом ПГУ № 582/о от « 25. 04 »2025 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

Исследование радиопоглощающих свойств ферромагнитных материалов с высокой диэлектрической и магнитной проницаемостью на примере Ni - Zn ферритов

Никель-цинковые ферриты системы $NiO-ZnO-Fe_2O_3$

Технология влияние частоты и амплитуды колебания рабочей камеры вибрационной мельница при измельчении порошков Ni-Zn ферритов на их радиопоглощающие свойства

Диапазон температур: от -50 до +155 °С

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащихразработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1. Изучение процесса распространения плоского электромагнитного поля в ферромагнитной среде

2. Свойства, применение и виды ферритов

3. Влияние технологических факторов на радиопоглощающие характеристики Ni-Zn ферритов

4. Анализ влияния освещенности научно-исследовательской лаборатории на работу инженера-исследователя

-

5.2 Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

Слайд 1-3 Постановка задачи. Цели работы

Слайд 4 Объект и методы исследования

Слайд 5-7 Анализ результатов исследования современных источников

Слайд 8-9 Постановка эксперимента, полученные результаты

Слайд 10-13 Анализ экспериментальных зависимостей.

Слайд 14 Выводы

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

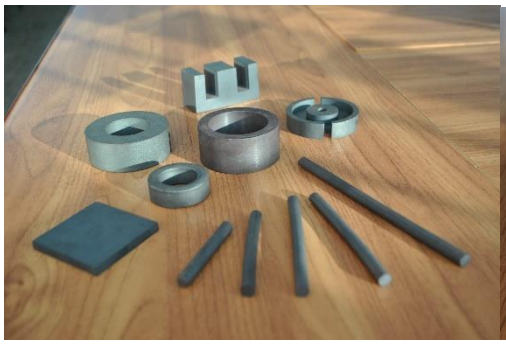
55. Летюк Л.М., Журавлев Г.И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия, 1983.

56. *Diethelm C.W. Ferrite als magnetostriktive Resonatoren und deren Anwendung als Elemente eletrischer Filter //Bull. Techn. PTT. - 1951. - Bd. - №8. - S. 281-297.*

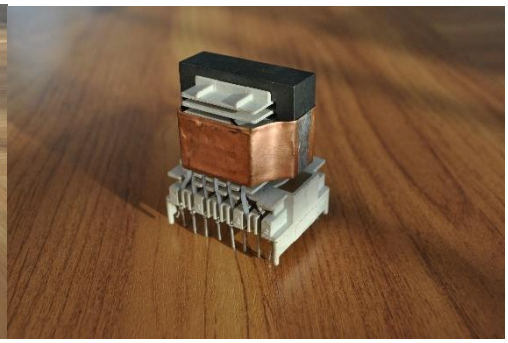
57. Проблемы порошкового материаловедения. Часть V. Технология производства порошковых ферритовых материалов / Под ред. акад. РАН В.Н.Анциферова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 408

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

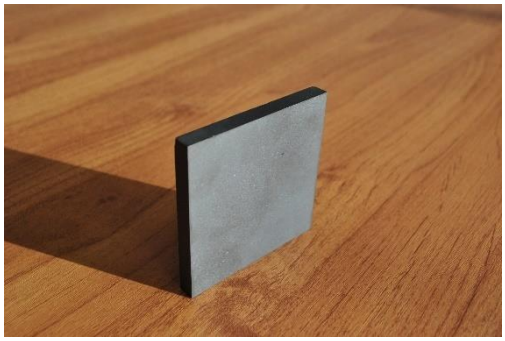
Образцы изделий, изготовленных на ООО «Мета – феррит»



Основные типоразмеры ферритовых изделий



Высокочастотный силовой трансформатор с ферритовыми сердечниками



Опытные образцы радио поглощающих материалов на основе Ni-Zn ферритов 60х60х8мм

Приложение Б

(обязательное)

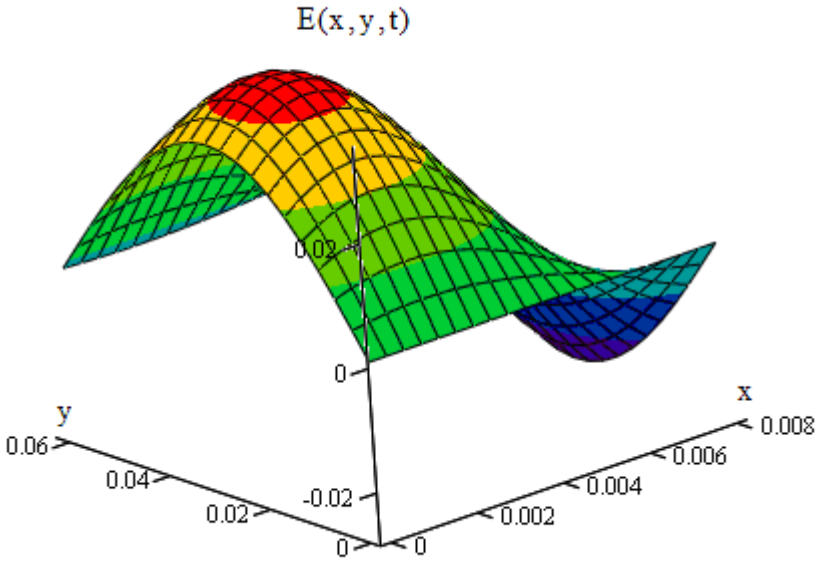


Рисунок 1.1 – Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде (двумерный случай) для момента времени t =0.1с

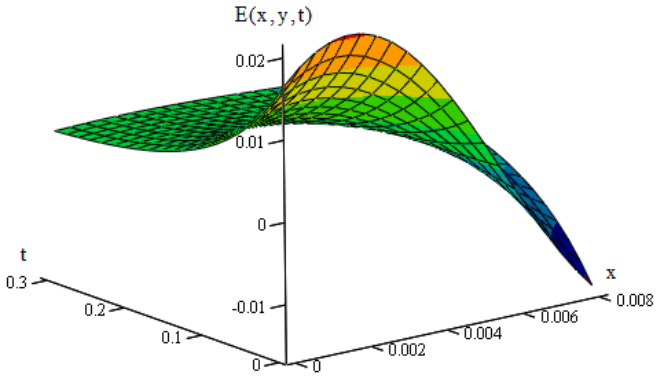


Рисунок 1.2 – Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде (двумерный случай)

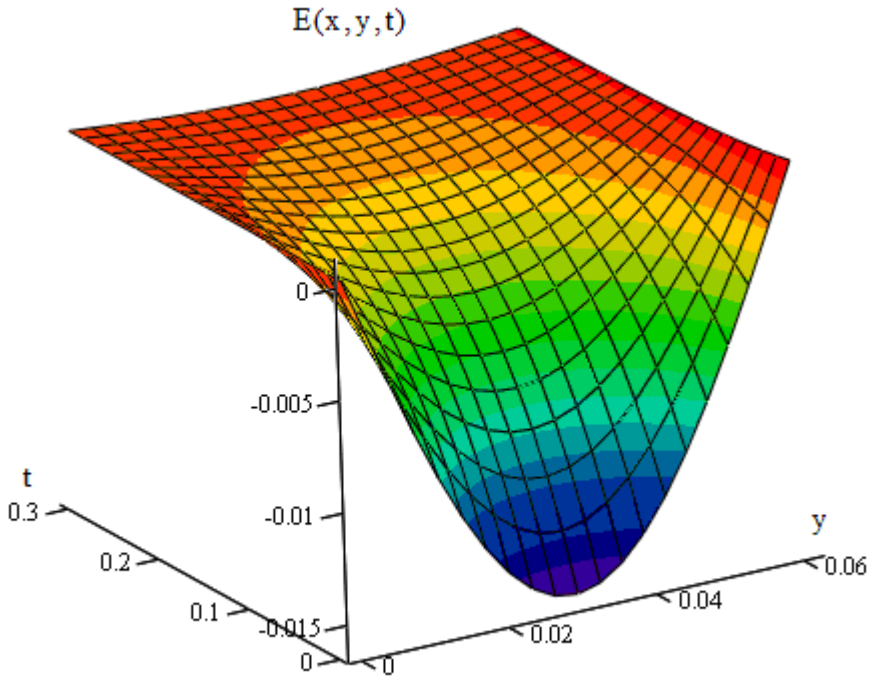


Рисунок 1.3 – Процесс затухания электромагнитной волны в ферромагнитной среде (двумерный случай)

Приложение В

(обязательное)

Отношение амплитуд падающей и отражённой волны в равных единицах.

Показывает величину затухания.

Отношение амплитуд	Отношение мощностей	Значение в дБ
1,00	1,00	0
0,89	0,79	- 1
0,79	0,63	- 2
0,71	0,50	- 3
0,63	0,40	- 4
0,56	0,32	- 5
0,50	0,25	- 6
0,45	0,20	- 7
0,40	0,16	- 8
0,35	0,13	- 9
0,32	0,10	- 10
0,28	0,079	- 11
0,25	0,063	- 12
0,22	0,050	- 13
0,20	0,040	- 14
0,18	0,032	- 15
0,16	0,025	- 16
0,125	0,016	- 18
0,10	0,010	- 20

Ректору Пензенского государственного университета Гулякову А.Д.
студента 4 курса ФИТЭ очной формы обучения
Маннонов Иномжон Сирожидинович

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Маннонов Иномжон Сирожидинович , студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат.ВУЗ» бакалаврской работы на тему « Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов », выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Подпись студента

ВКР представлена на проверку « 09» 06 2025 г

Руководитель ВКР Игошина С. Е.

Протокол

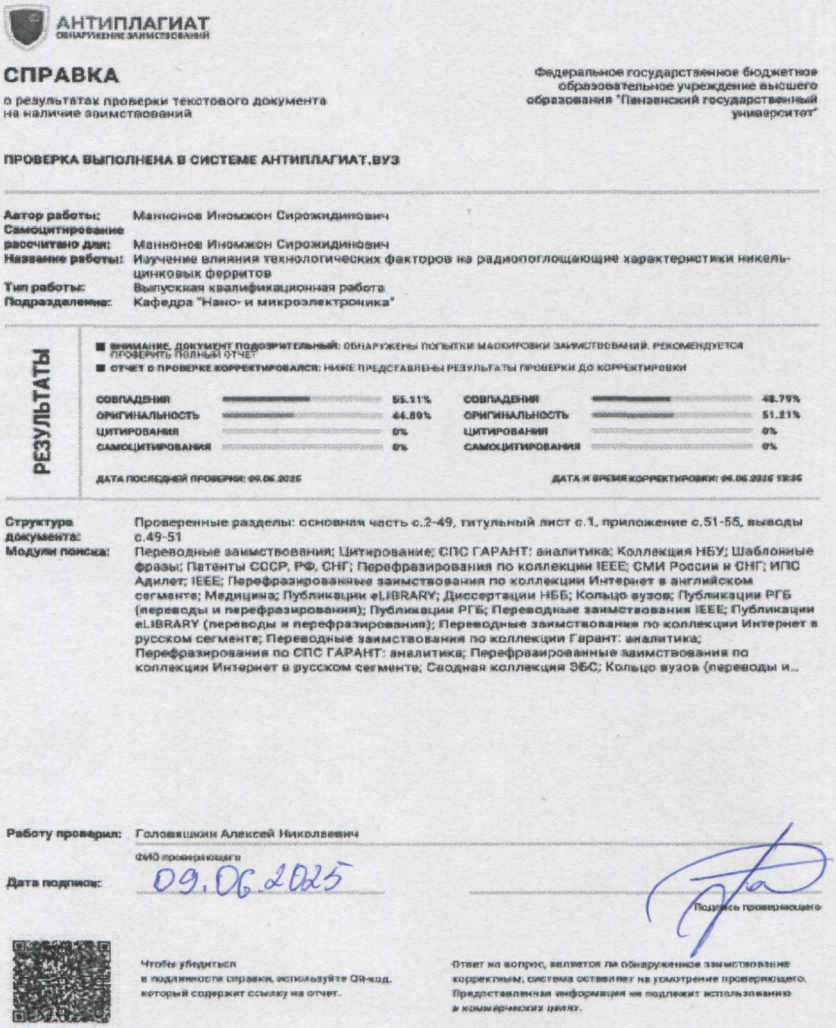
Проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной бакалаврской работы на тему « Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов»

студента 4 курса Маннонов И.С.

направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника,

профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»

Руководитель ВКР Игошина С. Е.



АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы:	Маннонов Иномжон Сирожидинович
Самоцитирование рассчитано для:	Маннонов Иномжон Сирожидинович
Название работы:	Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов
Тип работы:	Выпускная квалификационная работа
Подразделение:	Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ВНИМАНИЕ. ДОКУМЕНТ ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЙ: ОБНАРУЖЕНЫ ПОПЫТКИ МАСКИРОВКИ ЗАИМСТВОВАНИЙ. РЕКОМЕНДУЕТСЯ ПРОВЕРИТЬ ПОЛНЫЙ ОТЧЕТ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	55.11%	СОВПАДЕНИЯ	48.79%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	44.89%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	51.21%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 09.06.2025 ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 09.06.2025 13:35

Структура документа:	Проверенные разделы: основная часть с.2-49, титульный лист с.1, приложение с.51-55, выводы с.49-51
Модули поиска:	Переводные заимствования; Цитирование; СПС ГАРАНТ: аналитика; Коллекция НБУ; Шаблонные фразы; Патенты СССР, РФ, СНГ; Перефразирования по коллекции IEEE; СМИ России и СНГ; ИПС Адилет; IEEE; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Медицина; Публикации eLIBRARY; Диссертации НББ; Кольцо вузов; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации РГБ; Переводные заимствования IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Сводная коллекция ЭБС; Кольцо вузов (переводы и...

Работу проверил: Головашкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи: 09.06.2025

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

«09 »06 2025 год _____ Игошина С.Е.

подпись фамилия, инициалы

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет"

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Маннонов Иномжон Сирожидинович
Самоцитирование рассчитано для: Маннонов Иномжон Сирожидинович
Название работы: Изучение влияния технологических факторов на радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ВНИМАНИЕ, ДОКУМЕНТ ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЙ:** ОБНАРУЖЕНЫ ПОПЫТКИ МАСКИРОВКИ ЗАИМСТВОВАНИЙ. РЕКОМЕНДУЕТСЯ ПРОВЕРИТЬ ПОЛНЫЙ ОТЧЕТ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ		55.11%	СОВПАДЕНИЯ		48.79%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		44.89%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		51.21%
ЦИТИРОВАНИЯ		0%	ЦИТИРОВАНИЯ		0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 09.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 09.06.2025 13:35

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2-49, титульный лист с.1, приложение с.51-55, выводы с.49-51
Модули поиска: Переводные заимствования; Цитирование; СПС ГАРАНТ: аналитика; Коллекция НБУ; Шаблонные фразы; Патенты СССР, РФ, СНГ; Перефразирования по коллекции IEEE; СМИ России и СНГ; ИПС Адилет; IEEE; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Медицина; Публикации eLIBRARY; Диссертации НББ; Кольцо вузов; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации РГБ; Переводные заимствования IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Сводная коллекция ЭБС; Кольцо вузов (переводы и...

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи: 09.06.2025

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.