

На правах рукописи



Гусев Олег Валерьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛАБЫХ ЭФФЕКТОВ
НАВЕДЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА
ОСНОВЕ ДИАГРАММЫ ПРЕЙЗАХА**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ярославль – 2009

Работа выполнена в Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Вечфинский Владимир Сигизмундович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Рудый Александр Степанович,

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ИЗМИРАН
Старченко Сергей Владимирович

Ведущая организация: Ярославский государственный технический
университет

Защита состоится «__» ноября 2009 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.002.05 при Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова по адресу: 150000, г. Ярославль, ул. Советская д.14.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова по адресу: 150000, г. Ярославль, ул. Полушкина роща, д. 1.

Автореферат разослан «__» октября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Глызин С.Д

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Эффективное развитие современной техники трудно представить без использования новых материалов обладающих различными, сложными комплексами физических свойств. Особое место среди таких соединений занимают магнитные материалы, которые широко используются в электро- и радиотехнической, аэрокосмической и ядерной, электронной и приборостроительной отраслях промышленности. Необходимый комплекс эксплуатационных свойств будущего материала получают варьируя химический состав, либо изменяя внешние воздействия, оказываемые на образец. К таким воздействиям можно отнести термомагнитную (ТМО) обработку. В результате одного из видов ТМО, а именно – при термонамагничивании, в материале возникает так называемая наведенная магнитная анизотропия (НМА). Однако НМА, обычно рассматриваемая в физике, значительно отличается от той, которая анализируется в данной работе.

“Обычная” НМА проявляется в виде перетяжки на частных петлях гистерезиса в районе нулевого магнитного поля. Однако, во-первых, данная перетяжка не несет явной информации об условиях, в которых она создавалась. В тоже время особый вид НМА, рассматриваемый в данной работе, проявляется также в особых “дефектах” или стягиваниях петли гистерезиса, которые несут информацию о напряженности и направлении поля термонамагничивания (H_T), температуре (T_X), от которой охлаждался образец и о давлении (P_X), которое действовало на образец при термонамагничивании.

Во-вторых, перетяжка вызванная “обычной” НМА, как правило, на два порядка больше рассматриваемых нами. В-третьих, перетяжка, возникающая в нулевом поле, наблюдается при измерении петли гистерезиса в любом направлении относительно оси образца. Максимальная величина перетяжек, рассматриваемых нами, наблюдается при измерении частной петли гистерезиса вдоль направления поля (H_T), в котором происходило термонамагничивание, и не фиксируется при измерении петли перпендикулярно H_T . Авторами данный вид анизотропии, обуславливающей информационные перетяжки, был назван однонаправленной наведенной магнитной анизотропией (ОНМА). Исследование явлений ОНМА и НМА позволило разработать методы, используемые для определения палеонапряженности геомагнитного поля. Это метод ступенчатого перемагничивания и метод зонда. Оба метода важны при разработке теории генерации геомагнитного поля, при изучении закономерностей его инверсий. В тоже время первичный анализ характеристик горных пород имеет большое прикладное значение в палеомагнитных исследованиях при поиске мест залегания полезных ископаемых, в частности, нефти и газа. Явления, характерные для наведенной магнитной анизотропии, интенсивно изучаются в последние годы, однако, несмотря на обширные исследования, механизмы ее возникновения не всегда понятны. Это относится так же и к

новым эффектам ОНМА, которые исследованы далеко не до конца. Помимо этого, не разработано большинство математических моделей данного явления. Подобные модели необходимы для получения количественных характеристик открытых эффектов ОНМА, а так же для выявления скрытых закономерностей гистерезисных процессов протекающих в материале. Модели эффектов ОНМА важны для техники магнитных методов неразрушающего контроля, в которых основным является мониторинг магнитного состояния вещества. Большой интерес представляет разработка математической модели методов определения поля термонамагничивания H_T , которая необходима как для геофизики, так и для физики ферромагнитных окислов. Кроме того система математических моделей ОНМА важна при разработке программного обеспечения для поддержки экспериментальных исследований.

Цель диссертационной работы

Основной целью данной диссертационной работы являются:

- разработка математических моделей основных эффектов магнитной памяти ОНМА;
- разработка моделей методов определения напряженности магнитного поля;
- разработка единой системы моделей явления ОНМА, основанной на диаграмме Прейзаха;
- разработка программного комплекса для параметрической идентификации моделей и поддержки экспериментальных исследований эффектов ОНМА.

Методы исследования

При построении математических моделей эффектов ОНМА в диссертационной работе использовалась теория наведенной магнитной анизотропии, статистический метод анализа гистерезисных явлений на основе диаграмм Прейзаха, а так же методы компьютерного моделирования. Для параметрической идентификации разработанных моделей использовался нелинейный метод наименьших квадратов с минимизацией целевой функции методом доверительных областей (Trust-Region). Фильтрация сигнала осуществлялась цифровым фильтром, синтезированным численными методами, основу которых составляет теорема Чебышева об альтернансе.

Научная новизна работы

1. В работе проведен синтез физико-математических моделей основных эффектов однонаправленной наведенной магнитной анизотропии возникающих на скомпенсированной дифференциальной петле гистерезиса (СДПГ).
2. Проведен синтез моделей методов определения поля термонамагничивания образцов (H_T).

3. Теоретически установлено, что величина поля термонамагничивания не влияет на форму распределения плотности микрогистерезисных циклов Прея-заха и, как следствие, на форму дефекта на СДПГ.
4. На основе представленных в диссертации математических моделей разработана общая система моделей эффектов ОНМА и моделей методов определения поля термонамагничивания.
5. Разработан программно-аналитический комплекс для анализа эффектов ОНМА ферромагнитных материалов и горных пород, а так же для параметрической идентификации разработанных моделей.

Положения, выносимые на защиту

1. Модели эффектов магнитной памяти ОНМА и методов определения поля термонамагничивания.
2. Система разработанных моделей эффекта ОНМА и методов определения поля термонамагничивания.
3. Компьютерный программный комплекс для анализа ОНМА горных пород и ферромагнетиков.

Теоретическая и практическая ценность работы

Полученные в диссертации результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение. Работа вносит вклад в описания процессов перемагничивания образцов, обладающих эффектами ОНМА. Результаты работы могут быть применены для решения многих задач геофизики, геологии и физики ферромагнитных материалов. В рамках предложенной физико-математической модели рассчитаны теоретические зависимости параметров искажений возникающих на дифференциальных петлях гистерезиса. Показана связь параметров теоретической модели со структурой ферромагнетика. Особенно важно, что параметры расчета носят ясный и очевидный физический характер. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить анализ экспериментальных петель гистерезиса и производить их параметрическую идентификацию. Реализованные в программном комплексе современные методы спектрального анализа позволяют оценивать частотный состав любых периодических и непериодических сигналов. Это может найти свое применение в системах телеметрии для обработки данных либо в технике неразрушающего контроля.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на Всероссийских семинарах по геомагнетизму (геофизическая обсерватория “Борок” Объединенного Института Физики Земли РАН, 2006, 2007), на семинаре Санкт-Петербургского государственного университета (СпбГУ, кафедра физики Земли 2006), на международной конференции “Problems of Geocosmos” (Санкт-Петербургский универси-

тет, 2006, 2008), на семинаре Института геофизики Словацкой Академии Наук (Братислава, Словакия, 2007), на международной молодежной научной конференции “Гагаринские чтения” (Москва, 2007), на XXVII Российской школы посвященной 150-летию К.Э. Циолковского (Миасс, 2007).

Доклады сделанные на международной конференции по проблемам машиноведения (институт им. А.А. Благонравова РАН, Москва 2007, 2008) были дважды отмечены почетными дипломами.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 2 статьи в изданиях из списка ВАК, 8 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Из совместных публикаций в диссертацию включены результаты, полученные автором.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, 1 приложения и списка литературы из 101 наименования. Общий объём диссертации составляет 128 страниц.

Краткое содержание работы

Во **введении** дается обоснование актуальности работы, формулируются цель и основные задачи диссертации.

Первая глава посвящена описанию основных эффектов магнитной памяти ОНМА, дан обзор ее основных свойств. Приводится математическое описание базовой методики детектирования основных эффектов ОНМА.

При изучении эффектов ОНМА измерялись так называемые скомпенсированные дифференциальные частные петли гистерезиса намагниченности (СДПГ). От обычных дифференциальных петель гистерезиса СДПГ отличаются тем, что в них почти отсутствует первая гармоника ЭДС. Первая гармоника отвечает за обратимую намагниченность и не несет информацию об эффектах ОНМА.

На данный момент, для всех открытых эффектов ОНМА, общими является искажения на СДПГ. С физической точки зрения, возникновение дефекта на СДПГ связано с образованием так называемых “гигантских” потенциальных барьеров. Данные барьеры являются следствием диффузионной стабилизации доменных границ. На рис. 1 показаны два основных эффекта ОНМА: стягивание в области полей термообработки H_T (рис. 1а) и асимметрия петли (рис. 1б).

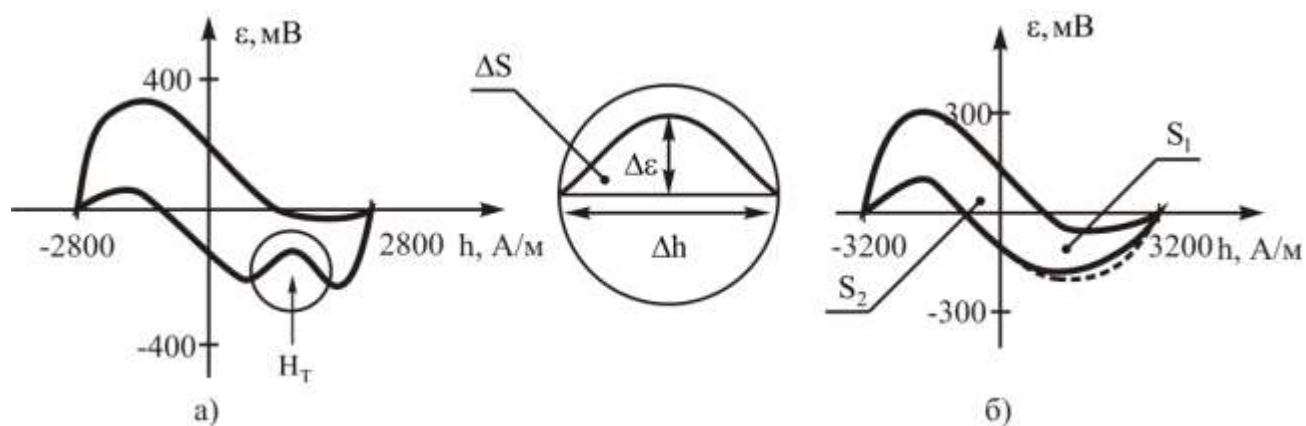


Рис. 1. Проявления искажений на СДПГ:
 а – стягивание петли в районе поля H_T ; б – асимметрия СДПГ;
 стрелкой показаны положение перетяжки

За параметры перетяжки на СДПГ приняты, ее глубина ($\Delta \epsilon$), ширина (Δh) и площадь (ΔS). Количественный анализ параметров перетянутой области позволяет судить о степени искажения кристаллической структуры материала. Было доказано, что разброс дефектов и их концентрация влияет на ширину перетянутой области (Δh). Размер инородных включений влияет на высоту перетяжки ($\Delta \epsilon$). Площадь перетяжки (ΔS) характеризует общие потери энергии на перемагничивание.

Асимметрия СДПГ характеризуется величиной отношения площадей петли “слева” – S_2 и “справа” – S_1 от нулевого магнитного поля. Данный параметр или степень асимметрии (S_1/S_2) зависит от амплитуды переменного поля воздействующего на образец, величины поля термообработки (H_T) и от способа подхода к температуре T_x , при которой происходило термонамагничивание (т.е. “сверху” от температуры Кюри, либо “снизу” от значения комнатных температур).

Одновременно с перетяжкой на СДПГ для многих термонамагниченных образцов горных пород и ферромагнетиков наблюдается эффект нелинейности зависимости идеальной парциальной намагниченности от постоянного подмагничивающего поля ($I_{\text{рп}} = f(H)$), открытый В.А. Шашкановым и В.В. Металловой. В экспериментах было выявлено, что нелинейность $I_{\text{рп}} = f(H)$ ферромагнетиков, подвергнутых термомагнитной обработке в поле H_T , возникала при напряженности постоянного подмагничивающего поля $H \approx H_T$. Перетяжки на петлях гистерезиса и эффект нелинейности идеальной парциальной намагниченности от постоянного подмагничивающего поля названы эффектами магнитной памяти 1-го рода (МП-1). Причем, как показывают эксперименты, ОНМА ферромагнитных материалов несет информацию не только о напряженности поля термонамагничивания, но также о направлении его действия. Все эффекты МП-1 наблюдаются только на образцах, в состав которых входят многодоменные, т.е. содержащие сравнительно крупные зерна ферромагнитных минералов с большим числом дефектов.

Для термонамагниченных образцов с асимметричными петлями гистерезиса наблюдается эффект изменения (как правило, уменьшения) угла наклона зависи-

мости $I_{\text{гpi}} = f(H)$ при значениях напряженности подмагничивающего поля $H > H_T$. Эти два эффекта (асимметрия и “излом” зависимости $I_{\text{гpi}} = f(H)$ для полей $H > H_T$) называют эффектами магнитной памяти 2-го рода (МП–2). Помимо фиксации образцом магнетика величины поля термонамагничивания H_T и его направления, ранее проведенные эксперименты доказали, что ферримагнетик так же может запоминать температуру, при которой происходило термонамагничивание. Было доказано, что при охлаждении образца ферримагнетика от некоторой температуры T_X , меньшей температуры Кюри в магнитном поле, на ее петлях гистерезиса возникает перетяжка или асимметрия т.е. происходит стабилизация доменной структуры образца. В ходе последующего нагрева перетяжки возникали на СДПГ при приближении к температуре T_X , достигали при T_X максимальной величины и далее исчезали.

В значительной степени на эффекты ОНМА оказывает влияние давления, действующего на образец. Поставленные ранее эксперименты показали (во всех проведенных экспериментах образцы подвергались одноосному статическому сжатию), что все параметры перетяжки (высота Δh , ширина $\Delta \varepsilon$, и площадь ΔS) уменьшаются с увеличением давления.

Во **второй главе** представлены физико-математические модели эффектов магнитной памяти ОНМА, которые проявляются в виде искажений СДПГ.

Наглядная интерпретация эффектов ОНМА, возникающих при термонамагничивании образца, представлена в терминах диаграммы Прейзаха. С позиции диаграммы Прейзаха весь магнетик разбит на участки, распределённые по внутренним полям и коэрцитивным силам. Все домены образца разделяются на две группы: безгистерезисные домены и домены Прейзаха. Каждый i -й домен Прейзаха в необратимой части своего намагничивания характеризуется прямоугольной петлей гистерезиса, которая определяется значением критического поля H_{0j} и поля смещения H_{bj} . На диаграмме Прейзаха состояние образца представляется в координатах H_{0j} и H_{bj} (либо a и b). На данном поле размещены все микродомены (иначе говоря, микрогистерезисные циклы) данного ферримагнетика и отображается их плотность в выбранном направлении. Главная диагональ диаграммы означает геометрическое место точек с равными критическими полями слева и справа от нулевой оси соответствующих частицам с симметричной петлей гистерезиса. Различные виды намагниченности выражаются через плотность распределения микрогистерезисных циклов - $\rho(a,b)$, являющейся функцией критических полей a и b .

В случае возникновения в образце ОНМА на диаграмме Прейзаха возникают полосы с измененной плотностью микрогистерезисных циклов, расположенные вдоль линии, параллельной биссектрисе диаграммы и отстоящей от нее на расстоянии $\sqrt{2}H_T$. Эти полосы обусловлены диффузионным последствием (или иначе диффузионной стабилизацией доменных границ) в поле термонамагничивания H_T . При этом искажения СДПГ, возникающие при наличии в ферримагнетике ОНМА, на один–два порядка слабее, чем обычная перетяжка в нулевом магнит-

ном поле и часто выглядят как дополнительная слабая деформация обычных перетянутых петель. В таком случае на диаграмме Прейзаха выделяются полосы с переменной плотностью микрогистерезисных циклов. Это особенно заметно, если рассматривать распределение плотности микрогистерезисных циклов в направлении перпендикулярном главной диагонали диаграммы.

С точки зрения модели движения 180° доменной границы (ДГ) с позиции диаграммы Прейзаха, задержки и скачки в движении доменных границ на “гигантских” барьерах можно интерпретировать как области пониженной и повышенной плотности микрогистерезисных циклов. Модель движения ДГ схематически может быть представлена зависимостью энергетического профиля системы в виде производной граничной энергии ($\partial E / \partial X$) от координаты X . Реальные образцы ферритов, вследствие не идеальной микроструктуры, всегда обладают внутренними дефектами (пустоты, микротрещины, инородные включения и т.д.), что определяет сложный характер функции $f(x) = \partial E / \partial X$. Высота энергетических барьеров или, по-другому говоря потенциальных ям, зависит от распределения микродефектов, их природы и концентрации в некотором объеме образца. Взаимодействие ДГ с потенциальным барьером будет происходить до тех пор, пока при некотором значении критического поля (H_K) не произойдет скачок. В физике ферритов эти скачки называются скачками Баркгаузена. Таким образом, частота скачков Баркгаузена и их величина зависят от пространственного распределения микродефектов ферритоматериала.

Из анализа экспериментально построенных диаграмм Прейзаха мы предложили формулы распределения плотности микрогистерезисных циклов, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами полученными в более ранних работах:

$$P_{U1,2}(a, b) = p_0 \left\{ 1 + k_1 \left(\frac{a - b - 2H_T}{k_2} \right) \cdot \exp \left[- \left(\frac{a - b - 2H_T}{k_2} \right)^2 \right] \right\}, (1)$$

$$P_{S1,2}(a, b) = p_0 \left\{ 1 + k_1 \left[1 - \left(\frac{a - b - 2H_T}{k_2} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{a - b - 2H_T}{k_2} \right)^2 \right] \right\}, (2)$$

где p_0 – плотность микрогистерезисных циклов для участка диаграммы Прейзаха, не подвергшейся изменению в процессе термонамагничивания; k_1 – безразмерный коэффициент, определяющий амплитуду изменения плотности микрогистерезисных циклов относительно p_0 в области перестройки; k_2 – имеет размерность поля и определяет ширину области измененной плотности, a и b – критические поля частиц. Обозначений U и S для функций $p(a,b)$ соответствует виду эффекта нелинейности.

Представленные в диссертационной работе модели с трёхмерным видом распределения плотности микрогистерезисных циклов были рассчитаны с помощью

разработанной среды с графическим интерфейсом пользователя (GUI– Graphical User Interfaces), пакета компании MathWorks Inc. – MATLAB (R2007b).

На основе предложенных видов распределения плотности микрогистерезисных циклов Прейзаха предложена формула для расчета СДПГ термонамагниченных образцов обладающих эффектами магнитной памяти ОНМА:

$$\varepsilon = -A \cdot B \cdot \cos(\omega t) \pm \sin(2\omega t) \mp \frac{k_1 k_2}{h} \cdot \cos(\omega t) \cdot \left(\exp \left[-4 \left(\frac{-h \sin(\omega t) \pm H_T}{k_2} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{-h \sin(\omega t) + h + 2H_T}{k_2} \right)^2 \right] \right) - C \cdot \cos(3\omega t), \quad (3)$$

$$\text{где } A = 8nSh^2\omega I_c p_0; \quad B = \left(\frac{1 + 4\pi\chi + 3\pi C_0 h^2}{8\pi h I_c p_0} + 2 \right); \quad C = \frac{3}{8} \left(\frac{C_0 h}{I_c p_0} \right).$$

В выражениях для коэффициентов А и В используются следующие обозначения: S – площадь витка датчика, измеряющего СДПГ; n – число витков датчика; ω – частота магнитного поля; h – амплитуда магнитного поля; χ – начальная магнитная восприимчивость; H_T – напряженность воздействовавшего поля намагничивания; I_c – магнитный момент.

Смена знака в выражении (3) соответствует переходу от восходящей петли к нисходящей. В выражении (3) параметрами, определяющими глубины и ширину измененной плотности микрогистерезисных циклов, являются коэффициенты k_1 и k_2 соответственно. Сужение перетяжки СДПГ соответствует уменьшению коэффициентов k_1 и k_2 . С физической точки зрения коэффициент k_1 определяется соотношением между энергией “гигантских” потенциальных барьеров и уровнем неизменной ОНМА, коэффициент k_2 функционально зависит от абсолютной энергии и ширины “гигантских” барьеров.

При расчете ассиметричных СДПГ применялись та же формула, что и для расчета перетянутых СДПГ. Это объясняется аналогичными процессами протекающими в материале при образовании искажений на СДПГ. При моделировании ассиметричных СДПГ учитывалось то, что ассиметрия в распределении плотности циклов определяемая функцией $p(a,b)$, распространена на всей плоскости диаграммы Прейзаха. Таким образом при вычислении ассиметричных петель гистерезиса участвовала лишь часть функции (1), заключенная между ее экстремумами, и не требовалось вводить какую-либо другую специальную функцию $p(a,b)$. Представленные на рис. 2 экспериментальные и теоретические СДПГ находятся в хорошем согласии.

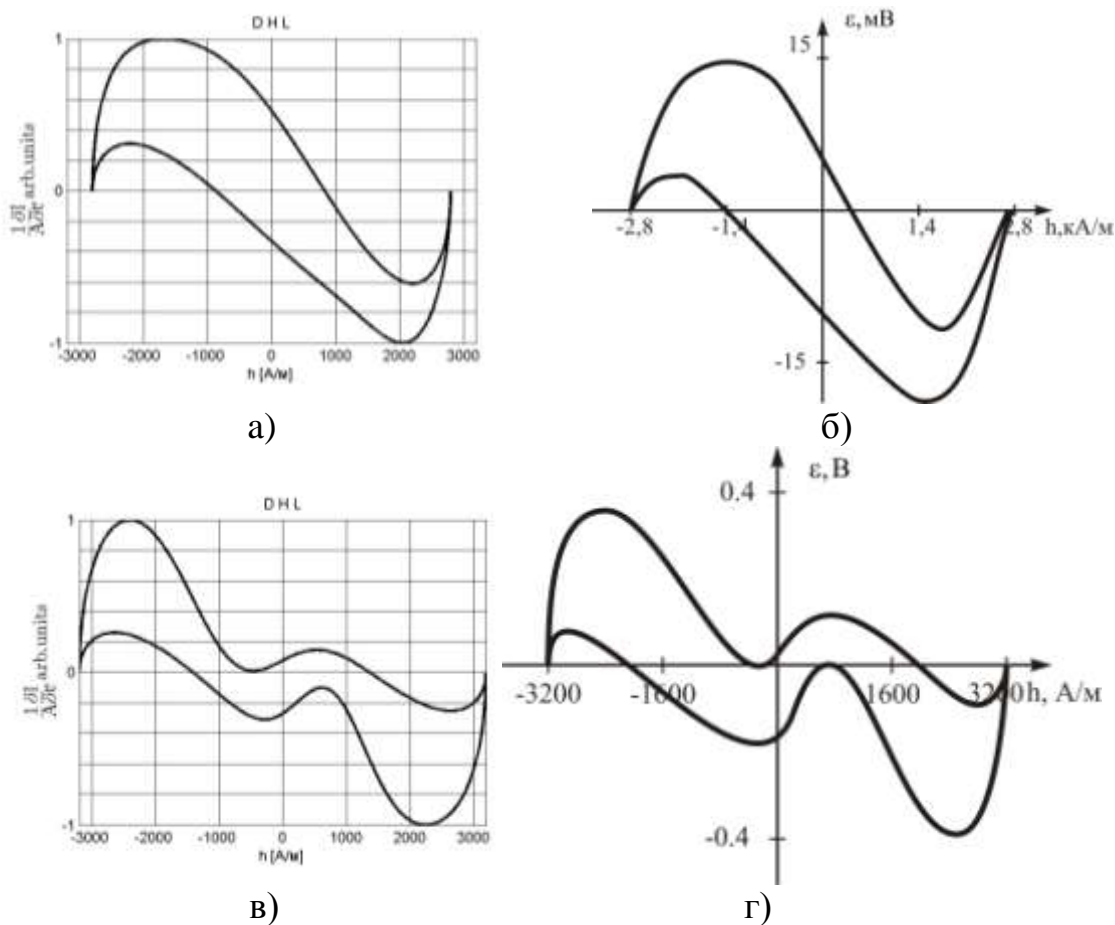


Рис.2. а, в – экспериментальная асимметричная и перетянутая СДПГ; б, г – теоретическая асимметричная СДПГ; коэффициента модели (рис.2а): $k_1=-0.88$; $k_2=3500$; $B=0.53$; $C=0.1$; теоретическая СДПГ с эффектом перетяжки, коэффициента модели (рис.2в): $k_1=-0.88$; $k_1=1.64$; $k_2=2200$; $B=0.86$; $C=0.9$; $H_T=700$ А/м

Экспериментальные графики взяты из работ А. Н. Ершова, Д. С. Великанова, В. С. Вечфинского. При этом были преобразованы единицы измерения напряженности магнитного поля в единицы СИ.

Как видно из рис.2, компьютерное моделирование теоретических СДПГ по выведенным формулам показывает, что расчет эффектов ОНМА проведен на основе правильных предпосылок и хорошо отражает физику наведенной магнитной анизотропии.

Третья глава посвящена разработке физико-математических моделей методов определения поля термонамагничивания H_T . Представлены математические модели метода ступенчатого перемангничивания (СП) и метода зонда. Помимо этого в главе представлена обобщенная, трехмерная диаграмма Прейзаха, а так же система разработанных в диссертации моделей.

В основе метода СП лежит предположение об асимметрии распределения частиц Нееля на диаграмме Прейзаха. Согласно теории Нееля полная идеальная намагниченность I_{ti} , образовавшаяся в равномерно заполненном ансамбле частиц Нееля прямо пропорциональна напряженности постоянного поля, в котором она

создана. Если неелевский ансамбль подвергается перестройке, то на графике зависимости $I_{rpi}(H)$ будут наблюдаться искажения. Местоположение данных искажений зависит от величины поля термонамагничивания H_T . Практически метод СП реализовался с помощью создания в ферримагнетике “квазиидеальной” намагниченности I_{rqi1} , которая в дальнейшем замещается “квазиидеальной” намагниченностью I_{rqi2} , наводимой ступенчато. Расчет процесса СП, как замещения одной квазиидеальной намагниченности на другую, выполнен на основе теории, изложенной в книге В.И. Белокопя, В.В. Кочегуры, Л.Е. Шолпо “Методы палеомагнитных исследований горных пород”. В диссертации было выведено следующее выражение для моделирования метода СП:

$$\delta I_r = 2I_C P_0 H_m h \cdot \left(\frac{h}{h_1} - 2 \right) +$$

$$+ I_C P_0 k_1 k_2 \left\{ \int_0^h \exp \left[- \frac{\left(2 \cdot H_m \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{h_1} \right) - 2H_T \right)^2}{k_2^2} \right] da - \int_0^h \exp \left[- \frac{\left(\frac{H_m \cdot a}{h_1} - 2H_T \right)^2}{k_2^2} \right] da \right\}, (4)$$

где H_m – максимальное значение поля смещения, h_1 – половина амплитуды переменного магнитного поля, $p(a,b)$ – функция описывающая распределение плотности микрогистерезисных циклов.

На рис.3 представлены экспериментальные и теоретические зависимости метода СП.

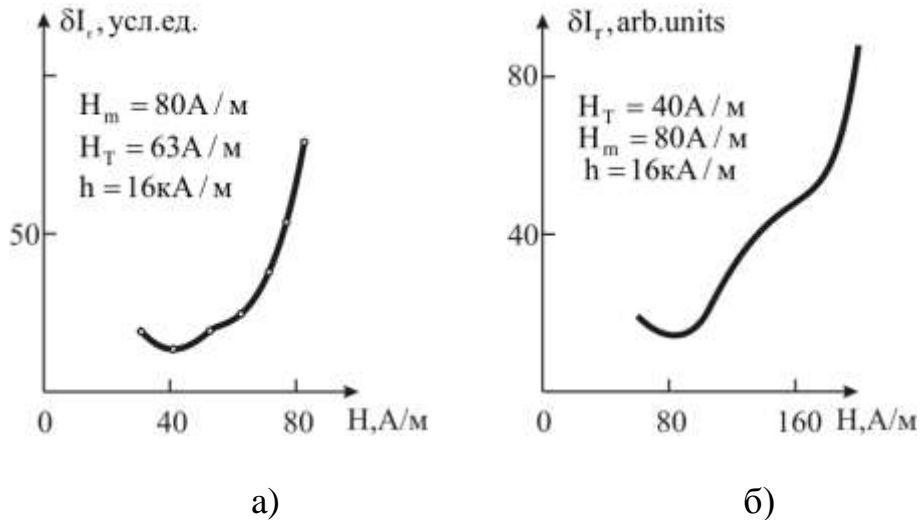


Рис. 3. Кривые метода ступенчатого перемангнивания:
а – экспериментальная кривых метода СП, полученная на слабомагнитном образце (экспериментальный график взят из работ В.А. Шашкановым и В.В. Металловой);
б – теоретическая кривая

В ряде случаев, для определения поля H_T , использовался иной метод. Как уже было сказано, местоположение перетяжки на СДПГ определяется полем H_T . В ряде случаев искажение, возникающее на петле гистерезиса, довольно трудно различимо из-за своей расплывчатости. В этом случае определение напряженности поля термонамагничивания H_T так же затруднено. При этом применялся иной метод, названный методом зонда.

Рассмотрим модель движения 180° доменной границы в ферритмагнетике, обладающем ОНМА. В исходном состоянии граница находится в точке, соответствующей минимуму энергии образца в отсутствие внешнего магнитного поля. При приложении переменного магнитного поля ДГ начинает колебаться в некотором интервале около своего начального положения. С ростом амплитуды переменного поля h этот интервал увеличивается. Если к переменному полю добавить дополнительное постоянное поле H_0 (поле смещения), то центр интервала колеблющейся ДГ будет смещаться. Таким образом, увеличивая H_0 , при неизменной амплитуде переменного поля h , происходит своеобразное зондирование внутренней структуры образца. Данный метод получил название метода зонда. Для метода зонда характерно то, что при неизменной амплитуде переменного поля процент колеблющихся доменных границ остается практически постоянным. Максимум же величины перетяжки возникающей на СДПГ, будет в том случае, когда интервал колебания ДГ будет в районе “гигантского” потенциального барьера.

В диссертации, для описания метода зонда, была предложено следующее теоретическое выражение:

$$\varepsilon = -A V \cos \omega t \pm \sin 2 \omega t - \mp \frac{k_1 k_2}{h} \cos \omega t \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{4 \left(h \sin(\omega t) - H + H_T \right)^2}{k_2^2} \right] - \exp \left[-\frac{\left(h \sin(\omega t) - 2H + 2H_T \right)^2}{k_2^2} \right] \right\}, (5)$$

$$\text{где } A = nSh^2 \omega 8\pi I_c p_0; B = \left(\frac{1 + 4\pi\chi}{8\pi I_c p_0 h} + 2 \right).$$

Здесь в выражениях для коэффициентов A и B используются аналогичные обозначения, как и в формуле (3). Смена знака в выражении (5) соответствует переходу от нисходящей петли гистерезиса к восходящей, а дополнительный член (H), отвечает за постоянное поле смещения. Представленные в диссертации результаты расчета и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом, что говорит о правильности сделанных теоретических предпосылок.

Экспериментальные данные, полученные в ранних работах, показали, что наиболее чутко на эффекты памяти ОНМА реагирует пятая гармоника. В связи с этим был произведен численный гармонический анализ выражения (5). Теория, так же как и эксперимент, показали, что на графике функции $A_5 = f(H, \text{ при } h_m = \text{const})$, наблюдаются искажения в районе поля H_T .

Как было сказано, эффекты магнитной памяти ОНМА наблюдаются только в образцах с многодоменными зёрнами магнетиков. Анализ экспериментально по-

строенных диаграмм Прейзаха образцов, обладающих ОНМА, выявил, что плотность микрогистерезисных циклов относительно быстро спадает вдоль биссектрисы и мало меняется в перпендикулярном ей направлении. Поэтому для функции $p(a,b)$ была принята следующая формула:

$$P_0(a, b) = p_0 \left[\frac{k^2}{k^2 + a + b^2} \right].$$

В этой модели плотность микрогистерезисных циклов многодоменных частиц наибольшая при $a=b=0$ и не меняется в направлении перпендикулярном биссектрисе, что является упрощением по сравнению с распределением циклов на экспериментально полученных диаграммах Прейзаха.

В соответствии с вышесказанным и по результатам исследований различных типов ОНМА была предложена обобщенная модель диаграммы Прейзаха. Плотность микрогистерезисных циклов обобщенной диаграммы образца магнетика, обладающего ОНМА, описывается следующей формулой:

$$P(a, b) = P_0(a, b) [1 - P_1(a, b) + P_2(a, b) + P_3(a, b)],$$

где $P_0(a,b)$ – плотность циклов МД зерен образца магнетика; $P_1(a,b)$ – выражает асимметрию в распределении циклов, относительно линии $a - b = 2H_T$, возникшую в результате термонамагничивания; $P_2(a,b)$ определяет вид и положение перетяжки на частной петле гистерезиса обусловленной МП-1; $P_3(a,b)$ описывает дезаккомодацию начальной магнитной восприимчивости в нулевом магнитном поле.

Как уже было сказано асимметрия и перетяжка наиболее ярко выражены на петлях гистерезиса образцов измеренных вдоль направления поля, создавшего стабилизированную доменную структуру, и не видны на петлях, полученных в перпендикулярном направлении. Это означает, что в перпендикулярном направлении $P_1(a,b) = P_2(a,b) = 0$. Предложенная обобщенная модель $p(a,b)$ хорошо согласуется с экспериментальными данными (полученными в ранних работах) по измерению частных петель гистерезиса в диапазоне магнитных полей $0 - 16$ кА/м.

На основе предложенных моделей, разработана общая система эффектов магнитной памяти ОНМА (рис.4).

Нелинейность функции $I_{гpi} = f(H)$ (рис. 4а) и излом магнитной восприимчивости $\chi = f(H)$ (рис. 4б) в районе поля H_T являются основными экспериментальными зависимостями, приводящими к эффектам ОНМА. По существу с нелинейной зависимости $I_{гpi} = f(H)$ и начались исследования нового вида НМА. На основе этого эффекта В. А. Шашкановым и В. В. Металловой был разработан метод ступенчатого перемангничивания. Представленная модель метода СП (рис.4в), основанная на предположении о переменной плотности микрогистерезисных циклов, хорошо согласуется с ранее полученными экспериментальными данными. Магнитная восприимчивость вещества является структурно зависимым параметром, дефект на графике функции $\chi = f(H)$ наблюдается в районе поля H_T . С физической точки зрения это объясняется увеличением потенциальных барьеров преодолеваемых доменной границей при перемещении в новое положение равновесия.

Из эффекта нелинейности $\chi = f(H)$ вытекают асимметрия и дефекты на дифференциальных петлях гистерезиса ферромагнетиков. Входящие в систему результаты моделирования (рис.4г,д,е) на основе диаграмм Пре́йзаха позволяют с уверенностью сказать, что используемая функция $p(a,b)$, характеризующая распределение плотности микрогистерезисных циклов, позволяет хорошо описать экспериментальные данные. Найденные коэффициенты моделей адекватно согласуются с данными эксперимента и не противоречат физическому смыслу.

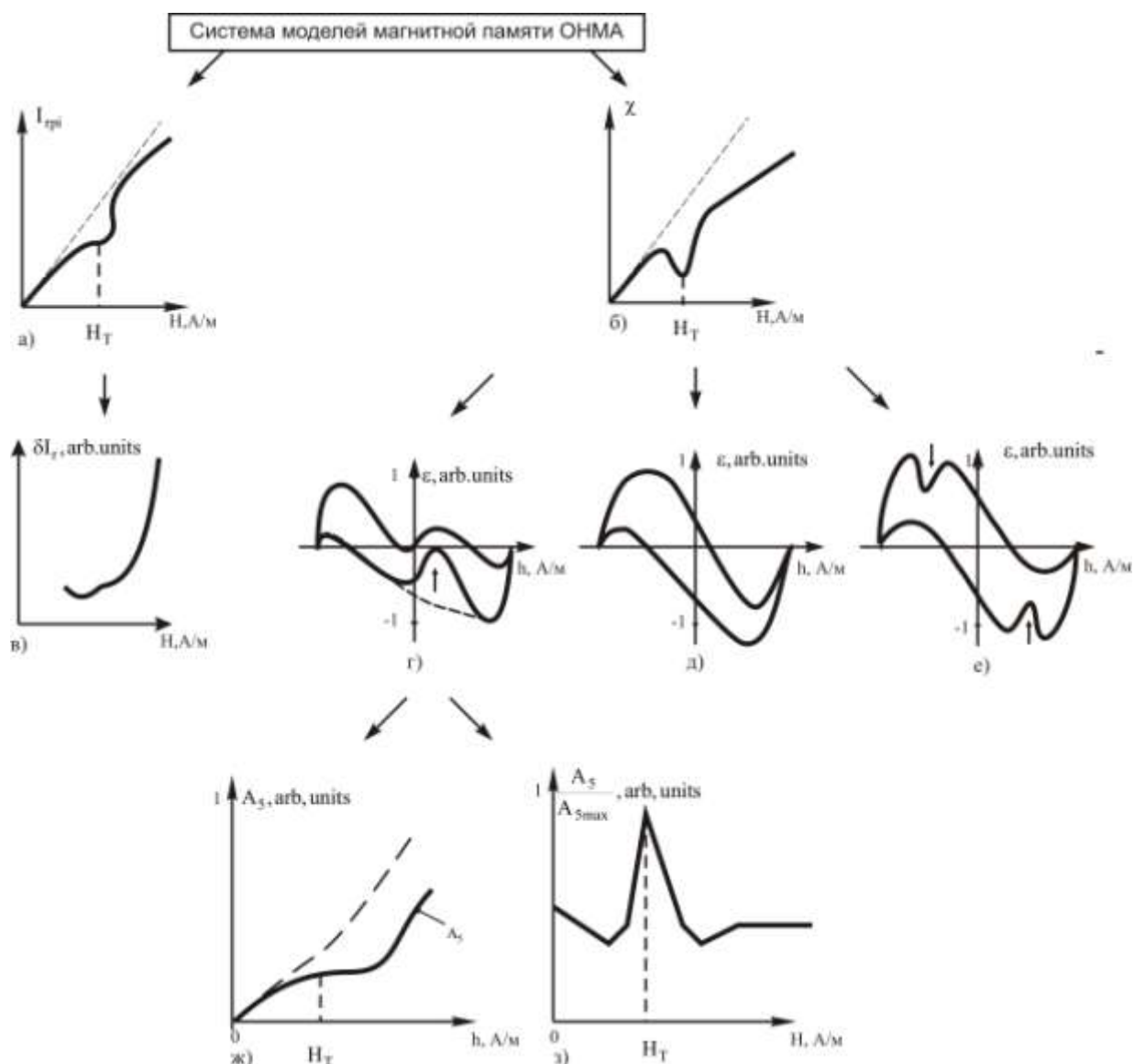


Рис.4. Система разработанных моделей магнитной памяти ОНМА

Грубо определить напряженность поля термонамагничивания H_T можно по месту положения перетяжки на СДПГ образца. Для более точного определения величины поля H_T сигнал, составляющий дифференциальную петлю гистерезиса, раскладывался на составляющие его гармоники. При этом, как было ранее экспериментально доказано, наибольшую информацию о величине поля H_T несет пятая

гармоника сигнала ЭДС датчика. Модель точного метода определения поля H_T по пятой гармонике при воздействии на магнетик одновременно двух полей: переменного и постоянного магнитного полей приведена на рис.4ж,з.

Проведенные в диссертации теоретические расчеты подтверждают, что пятая гармоника сигнала, составляющего СДПГ, чутко реагирует на эффекты ОНМА. Таким образом, из созданной системы моделей явления ОНМА следует, что основные предпосылки теорий влияния различных факторов на эффекты памяти ОНМА верны. Результаты компьютерного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В **четвертой главе** представлено описание двух разработанных программ, названных “HLoop” и “PIdentification”.

Для оцифровки сигнала датчика, составляющего ДПГ образца, использовался модуль L – Card E14 – 140D (внесен в Госреестр средств измерений). Разработанный комплекс программ, состоит из двух частей.

1. Программную часть, позволяющую определять параметры модели, исходя из обеспечения наилучшей ее точности с экспериментальными данными (программа “PIdentification”).

2. Программную часть, позволяющую анализировать частотный состав индукционного датчика, осуществлять фильтрацию данных и отображать ДПГ/СДПГ образцов (программа “HLoop”).

Реализованные в программе “HLoop” современные методы спектрального оценивания (метод Уэлча, метод MUSIC - Multiple Signal Classification, авторегрессионный метод с расчетом параметров модели модифицированным ковариационный методом), являются существенным нововведением, поскольку ранее основным методом определения частотных компонент сигнала являлся аппарат ДПФ. Используемый для анализа метод Уэлча, относится к классу непараметрических методов спектрального оценивания. Получаемые с их помощью оценки спектральной плотности мощности линейно зависят от мощности синусоид присутствующих в данных. В связи с этим методы данного класса, по сравнению с параметрическими, точнее отображают распределение спектральной плотности мощности по частоте. В ряде случаев при анализе эффектов ОНМА накопление достаточного объема выборки не представляется возможным, поэтому для оценки спектра по малой выборке, применялся авторегрессионный метод с расчетом параметров модели модифицированным ковариационный методом и метод MUSIC (MUSIC - Multiple Signal Classification). Важно отметить, что отличительной особенностью метода MUSIC является возможность получение фазового спектра сигнала.

Ранее, для подавления паразитных гармоник сигнала, применялись активные фильтры, построенные на операционных усилителях. Последние имели ряд недостатков (трудность аппаратной реализации, фазовые искажения вносимые в фильтруемый сигнал, неполное подавление необходимых гармоник). В связи с этим фильтрация сигнала осуществлялась программно с помощью оптимального КИХ–

фильтра. Фильтры полученные данным способом не вносят фазового искажения в сигнал подвергаемый фильтрации и в меньшей степени подвергаются эффектам квантования коэффициентов. В основе синтеза оптимального КИХ-фильтра лежит полиномиальный алгоритм Ремеза, теоретическим обоснованием которого служит чебышевская аппроксимация частотной характеристики идеального фильтра.

Для построения СДПГ/ДПГ образца стояла задача выделения одного периода полигармонического сигнала. Для ее решения использовалась автокорреляционная функция. Использование функции объясняется тем, что автокорреляционная функция периодического сигнала является периодической и не зависит от начальной фазы сигнала.

Подбор численных значений параметров моделей, так чтобы они наилучшим образом согласовались с экспериментальными данными, реализован в программе “PIdentification” и осуществлялся с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (Nonlinear Least Squares). Значения коэффициентов моделей a_1, a_2, \dots, a_k определяются как решение задачи минимизации суммы квадратов невязок, т.е. суммы квадратов расстояний от точек данных $(x_j, y_j)_{j=1,2,\dots,n}$, до приближающей их кривой $y(x_j; a_1, a_2, \dots, a_k)$.

Для минимизации целевой функции использовался метод доверительных областей (Trust-Region). Алгоритм Trust-Region (в случае задачи без ограничений) основан на построении модельной функции q , которая приближает исходную в некоторой окрестности текущей точки x . Пробный шаг s рассчитывается посредством минимизации (или приблизительной минимизации) в выбранной окрестности N . Такой подход составляет так называемую подзадачу доверительной области:

$$\min_s q(s) \quad s \in N,$$

при выполнении условия $f(x + s) < f(x)$ текущая точка переходит в новое значение $x + s$, в противном случае текущая точка остается без изменения и область доверия N претерпевает некое сокращение и расчет пробного шага повторяется. Результатом работы алгоритма, являются значения коэффициентов модели и значения критериев пригодности приближения.

В качестве среды разработки программ “HLoop” и “PIdentification” использовалась среда GUIDE системы MATLAB (R2007b). Разработанные программы предназначены для функционирования в среде ОС Windows 9x или старше, которая сама по себе предъявляет определенные требования к конфигурации компьютера. Минимальные требования: процессор x486, 5 Мб свободного места на жестком диске для установки и работы программы, SVGA-видеокарта, RAM 8 Мб.

Заключение

1. Проведена систематизация эффектов ОНМА, исходя из их физической сущности и проявления в экспериментах. Подобная систематизация имеет большое теоретическое значение и в дальнейшем позволит внести необходимые по-

правки в предложенные модели явления однонаправленной наведенной магнитной анизотропии.

2. На основе диаграммы Прейзаха разработаны модели эффектов магнитной памяти однонаправленной магнитной анизотропии. Из результатов моделирования видно, что внешние воздействия, оказываемые на магнитный материал, в широких пределах влияют на величину распределения плотности микрогистерезисных циклов. Однако при этом величина поля термонамагничивания не влияет на форму распределения плотности микрогистерезисных циклов и, как следствие, на форму перетяжек и асимметрии СДПГ ферромагнетика.

3. Количественный анализ коэффициентов моделей дает возможность определять среднюю величину скачков Баркгаузена, которые в свою очередь зависят от числа дефектов и их статистического распределения. Поэтому построенная комплексная модель эффектов ОНМА будет полезна в прикладных и фундаментальных исследованиях.

4. Проведенная параметрическая идентификация моделей с помощью нелинейного метода наименьших квадратов и минимизацией целевой функции методом доверительных областей (Trust-Region method) показала хорошее соответствие между экспериментальными данными и разработанными моделями.

5. Все найденные значения параметров моделей не противоречат физическому смыслу, что говорит о правильности сделанных теоретических предположений. Используемая функция, описывающая распределение плотности фиктивных частиц $p(a,b)$, позволяет достаточно точно описывать экспериментальные результаты.

6. Разработан универсальный программный комплекс, позволяющий производить исследования ОНМА любым из методов (измерение СДПГ, метод СП, анализ высших гармоник). Данный комплекс имеет важное значение для повышения эффективности обработки экспериментальных результатов при измерении параметров магнитных материалов. Он может найти применение в научных учреждениях, занимающихся изучением проблем геофизики и магнитного поля Земли. Следует подчеркнуть, реализованные в комплексе современные методы цифровой обработки сигналов, позволяют проводить анализ любых периодических и непериодических сигналов.

В приложении представлены результаты работы разработанных программ.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю проф. В.С. Вечфинскому: он не только направлял мою научную работу, но и помогал в преодолении различных организационных препятствий.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК

- [1] Гусев, О.В. Гигантские скачки Баркгаузена в базальтовых лавах Камчатки / В. С. Вечфинский, С. С. Соловьева, О.В. Гусев // Физика Земли. – 2008. – №3. – С.92–96.
- [2] Гусев, О.В. Математическое моделирование частных ассиметричных дифференциальных петель гистерезиса ферромагнетиков / О.В. Гусев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.– 2008. – С.54–57.

Другие публикации

- [3] Гусев, О.В. Систематизация эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии горных пород / О.В. Гусев, В.С. Вечфинский, С.С. Соловьева // Материалы международной школы семинара: Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. – Москва, Россия, 2006. – С. 37–40.
- [4] Гусев, О.В. The Barkgauzen effect and induced magnetic anisotropy of rocks / O. V. Gusev, V. S. Vetchfinski, S. S. Solovyeva, V. V. Fedin // International Conference on Problems of Geocosmos: Book of Abstracts. – St. Petersburg, May 23-27, 2006. – P. 107.
- [5] Гусев, О.В. Применение активного фильтра для установки измерения эффектов наведенной магнитной анизотропии. / О.В. Гусев, В. С. Вечфинский, С. С. Соловьева, В. В. Федин // Вестник Рыбинской Государственной Авиационной Технологической Академии им. П. А. Соловьева: Сборник научных трудов. Рыбинск, 2007. – №2 (12)., С. 124–127.
- [6] Гусев, О.В. Моделирование гигантских скачков Баркгаузена в ферритах с наведенной магнитной анизотропией / О.В. Гусев // Научные труды XXXIII международной молодежной научной конференции “Гагаринские чтения”. – Москва, Россия, 2007. – С. 99–100.
- [7] Гусев, О.В. Динамика граничного слоя в материале с упорядоченной доменной структурой / О.В. Гусев // Материалы всероссийской XVIII научной конференции “Современные проблемы математики и естествознания”. – Нижний Новгород: ННИМЦ, 2007. – С. 23.
- [8] Гусев, О.В. Методы определения условий термомагнитной обработки ферромагнитных материалов / О.В. Гусев, В.В. Федин // Краткие сообщения XXVII Российской школы. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2007. – С. 99–101.

- [9] *Гусев, О.В.* Системный анализ методов численного определения параметров наведенной магнитной анизотропии / О.В. Гусев, В. В. Федин, С. С. Соловьева // *Естественные и технические науки.* – Москва, 2007. – №6 (32). – С. 54–57.
- [10] *Гусев, О.В.* Диагностика параметров магнитных материалов применяемых в производстве энергоемких устройств / О.В. Гусев // *Материалы XIX международной конференции “Современные проблемы машиноведения”.* – Москва, ин-т. им. А.А.Благоднарова РАН, 5-7 декабря 2007г. – С.109.
- [11] *Гусев, О.В.* Математическое моделирование петли магнитного гистерезиса материала обладающего слабым эффектом наведенной магнитной анизотропии / О. В. Гусев // *Избранные труды XIX международной конференции “Современные проблемы машиноведения”.*– Москва, ин-т. им. А.А.Благоднарова РАН, 2008. – С. 20–26.
- [12] *Гусев, О.В.* Контроль прочности ферритовых изделий и степени износа деталей машин / О. В. Гусев // *Материалы XX международной конференции “Современные проблемы машиноведения”.* – Москва, ин-т. им. А.А.Благоднарова РАН, 10-12 ноября 2008г. – С.73.
- [13] *Гусев, О.В.* Methods of analysis of effects of induced magnetic anisotropy of igneous rocks / V. S. Vetchfinski, V. V. Fedin, O. V. Gusev // *Book of Abstracts VII International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Russia, 2008.* – P. 214–215.