## Для заказа доставки данной работы воспользуйтесь поиском на сайте по ссылке: <http://www.mydisser.com/search.html>

# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

КРИВОРОЖСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## На правах рукописи

### Рожненко Жанна Георгиевна

## УДК 621.3.013.22+621.318.24

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

НАМАГНИЧИВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ

БЕЗГИСТЕРЕЗИСНЫХ СРЕД

Специальность 05.09.05 – теоретическая электротехника

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени кандидата технических наук

 Научный руководитель – д.т.н., проф.,

 Толмачев Станислав Трофимович

#### Кривой Рог -2007

# СОДЕРЖАНИЕ

стр.

|  |  |
| --- | --- |
| ВВЕДЕНИЕ………………………………………………………………..РАЗДЕЛ 1. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД В БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ …….1.1. Состояние вопроса ……………………………………………….......1.2. Термодинамические потенциалы и ограничения……………………1.3. Принцип взаимности в интегральной форме (случай прямоугольных декартовых координат)……………………..………………………………..1.4. Асимптотическое свойство характеристик намагничивания………1.5. Принцип взаимности в интегральной форме (случай полярных и сферических координат)…………………………………..……………………...1.6. Применение выпуклых функций для моделирования анизотропной ферромагнитной среды………………………………………………………..….Выводы к разделу 1………………..…………………….………………..РАЗДЕЛ 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ С ОБРАТИМЫМИ СВОЙСТВАМИ…………………………………...2.1. Материальное уравнение модельной анизотропной шихтованной среды……………………………………………………………………………….2.2. Применение сплайн-аппроксимации…………………………………2.3. Пример реализации математической модели анизотропной среды на основе выпуклых функций.…………………………………………………...2.4. Производящая функция для выпуклых потенциалов ………………Выводы к разделу 2………………………………….…………..………..РАЗДЕЛ 3. ВЕКТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВAНИЯ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ ………...…...…3.1. Особенности магнитных свойств и характеристик намагничивания листовых электротехнических сталей …………………………………………..3.2. Численное моделирование магнитных свойств холоднокатаной электротехнической стали ……………………………………………………….Выводы к разделу 3…………..……………………………………............РАЗДЕЛ 4. ПРИВЕДЕННЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ УПОРЯДОЧЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД…….. 4.1. Общие свойства упорядоченных гетерогенных сред ……………….4.2. Симметрия и анизотропия упорядоченных гетерогенных сред ……4.3. Эффективные свойства нелинейной гетерогенной среды…………..4.3.1.Общий случай нелинейной анизотропной среды…………….4.3.2.Случай линейных магнетиков…………………………………4.3.3. Примеры численной реализации………………………………4.4. Комплексное решение задачи магнитостатики в системе с упорядоченной гетерогенной средой …...……………………………………………...Выводы к разделу 4…………………..…………………………….............ЗАКЛЮЧЕНИЕ.……….………………………………………..…………..ПРИЛОЖЕНИЕ А. Материалы по внедрению результатов диссертации ………………………………………………………..…………….………….ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Библиотека математических моделей векторных характеристик намагничивания холоднокатаных ЭТС…………………………СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ…………………….... | 4141419253134394546465361657172728592939395100101103105108112113116118120 |

ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение ЭВМ в область инженерных и научных исследований дало мощный толчок развитию полевых методов расчета сложных электрофизических объектов. Важной составной частью полевых задач является математическое моделирование квазистатических магнитных полей, что обусловлено их широким практическим применением (электрические машины, трансформаторы, управляемые реакторы, магнитные сепараторы и др.).

Проблема построения качественной математической модели состоит из двух частей: 1 - разработки методов численной реализации основных уравнений поля (уравнений Максвелла) на основе использования эффективных вычислительных схем и 2 – разработки способов максимально полного и строгого учета физических свойств используемых магнитных материалов.

Подавляющее большинство научных работ посвящено первой части проблемы. В результате этих исследований разработаны эффективные методы моделирования квазистатических магнитных полей в устройствах с достаточно сложной геометрией (см., например, [1-3]). Значительно меньше внимания уделено проблеме построения и корректного учета уравнений материального состояния сред. Для рассматриваемого класса задач это эквивалентно построению векторной характеристики намагничивания ***В***(***Н***) или ***J***(***Н***), реализующей совместный учет эффекта насыщения и выраженной анизотропии магнитных свойств.

Для конкретизации исследуемой проблемы важно сделать следующее методическое замечание. С учетом технических приложений в работе рассмотрены как условно непрерывные (сплошные) среды (например, электротехнические стали), так и дискретно-периодические (гетерогенные) среды с макроскопическими включениями дискретной фазы. В рамках классической макроскопической электродинамики под материальными уравнениями ***В***(***Н***) или ***J***(***Н***), которые дополняют полевые уравнения Максвелла, понимают локальную связь между векторами поля, усредненными по “физически бесконечно малым” элементам объёма [4, 5]. Поэтому более или менее выраженная дискретность реальных сред должна быть согласована с уровнем неоднородности поля, которая характеризуется так называемой пространственной дисперсией. Пренебрежение пространственной дисперсией реальных сред эквивалентно принятию допущения о локальности отклика среды на поле. Другими словами, в общем случае вектор магнитной индукции ***В*** (или намагниченности ***J***) является сложной нелинейной функцией не только поля ***Н***, но и его пространственных (и временных) производных. Установление такой связи между векторами магнитного поля (материальных уравнений среды) – это задача атомно-молекулярной теории вещества. Такие исследования применительно к “сплошным” средам позволяют выявить некоторые качественно новые явления (оптическая активность среды, процессы в плазме и др.) [4-7]. Однако они, как правило, выходят за рамки классической электродинамики и в данной работе не рассматриваются. Что же касается гетерогенных сред с макроскопическими включениями, то материальные уравнения состояния для них должны рассматриваться как уравнения приведенной однородной среды. Такие уравнения пригодны для использования при расчете распределения магнитного поля в системах, где размеры включений на два-три порядка меньше, чем размеры основного устройства, формирующего магнитное поле (например, полиградиентных сепараторах, мелковолокнистых композиционных материалах и др.).

Совместный учет нелинейности и анизотропии магнитных материалов при решении электротехнических задач оказывает существенное влияние на конечные результаты расчета. При этом важно учитывать не только точность решения дискретных аналогов уравнений Максвелла, но и полноту и точность учета магнитных свойств материалов. Например, в статье [8] показано, что при учете смешанных или эквивалентных кривых намагничивания листовых электротехнических сталей Э330 и Э0300 (снятых соответственно на полосовых или кольцевых образцах) расхождение расчетного и экспериментального тока намагничивания асинхронных двигателей мощностью 30 кВт составило 49% (для смешанной) и 22% (для эквивалентной кривой намагничивания). Отметим, что оба метода измерения характеристик намагничивания регламентированы соответствующими ГОСТами [9]. Таким образом, недооценка важности проблемы определения и корректного использования векторных характеристик намагничивания нелинейных анизотропных материалов является одним из ограничительных факторов на пути дальнейшего прогресса в области анализа сложных электротехнических устройств на основе современных математических методов и вычислительных средств.

Определенные трудности возникают уже при учете эффекта насыщения в нелинейных изотропных средах [10-20]. Эти трудности существенно возрастают при учете нелинейных анизотропных свойств магнитных материалов, к которым относится большинство электротехнических сталей. И если в двумерной постановке имеются определенные успехи в моделировании нелинейных анизотропных свойств магнитных материалов, то проблема корректного описания трехмерной векторной зависимости ***В***(***Н***) или ***J***(***Н***) остается практически неразработанной.

Известные способы учета нелинейной анизотропии отличаются большим многообразием и существенно зависят как от выбранного метода численного анализа, так и от объёма и характера справочной информации. В ряде работ (см., например, [16, 17]) анизотропию магнитных свойств учитывают скалярной зависимостью μ-1 = *g*(*В*2, cos β), где β - угол между направлениями поля ***В*** и главной оси анизотропии. Применяется также аналитическая аппроксимация семейства характеристик *B*=*F*(*H*, α), где *В*, *Н* – модули магнитной индукции и напряженности магнитного поля, α - угол между вектором ***H*** и направлением прокатки [18]. Очевидно, указанные способы приводят к частичной потере информации о магнитных свойствах среды. Это же в еще большей степени относится к описанию анизотропных магнитных свойств системой соотношений *Вi* = *Вi* (*Нi*) или диагональным тензором статической магнитной проницаемости μ*ii*(***H***), *i*=1, 2, 3 [19]. Указанные подходы не базируются на фундаментальных законах перемагничивания сред с обратимыми свойствами, что неизбежно сказывается на точности и достоверности результатов вычислений.

Обращает на себя внимание также неоднозначность трактовки ограниченной справочной информации о нелинейных анизотропных свойствах материалов. Очевидно, что в случае нелинейной анизотропии в семействе характеристик *B*=*F*(*H*, α) *В* и *Н* не могут быть одновременно модулями соответствующих векторов – речь может идти только о проекции одного из векторов поля на направление другого, т.е. о так называемых характеристиках продольного намагничивания. При этом, как показано в диссертации, рассмотрение справочных характеристик намагничивания для конкретного материала в виде *B||*=*F*(*H*, α) или *Н||*=*F*(*В*, α) при восполнении ортогональных составляющих дает различные векторные модели намагничивания ***Н***(***В***) или ***В***(***Н***). Таким образом, отсутствие четких указаний на условия и результаты эксперимента может служить дополнительным источником погрешностей.

Некоторые общие идеи и закономерности намагничивания ферромагнетиков в безгистерезисном приближении рассмотрены в работах Э.В. Колесникова [21] и Р.В. Фильца [22, 23], которые применили энергетические потенциалы для построения векторной математической модели намагничивания листовых анизотропных сталей. Вопросы построения материальных уравнений ферромагнитных сред в достаточно общей постановке рассмотрены также в работах С.Т. Толмачева [24-30]. В этих работах на основе законов термодинамики обратимых процессов и в предположении отсутствия выраженной пространственной дисперсии сформулированы общие принципы построения феноменологических моделей нелинейных сред без гистерезиса, включая упорядоченные гетерогенные среды. В частности, показано, что для широкого класса материалов корректная математическая модель магнитной среды ***В***(***Н***) может быть построена в классе выпуклых (для ***J***(***Н***) – строго выпуклых) функций. Это обстоятельство делает оправданным широкое использование сплайн-аппроксимации, которая сочетает в себе не только экстремальное свойство наилучшего приближения, но и обеспечивает локальную выпуклость аппроксимирующих функций [30].

Важную роль в теории определяющих уравнений нелинейных анизотропных сред без гистерезиса играет интегральный принцип взаимности, впервые сформулированный в диссертации С.Т. Толмачева [25] и развитый автором данной диссертации в совместных с С.Т. Толмачевым и личных публикациях [32-37]. Этот универсальный принцип, вытекающий из законов обратимых процессов перемагничивания, является достаточно сильным конструктивным средством построения корректных математических моделей магнитного состояния среды и широко используется в данной диссертации.

Другие вопросы построения математической модели анизотропных магнитных материалов (соотношения термодинамики обратимых процессов, использования теории выпуклых, эллиптических и обобщенных аналитических функций, применения сплайн-аппроксимации и др.) изложены в публикациях автора [38-43].

**Актуальность темы.** На основании вышеизложенного, актуальность разработки методов определения векторных характеристик намагничивания нелинейных анизотропных безгистерезисных сред обусловлена:

* недостаточностью, а в трехмерном случае и полным отсутствием справочной информации по нелинейным анизотропным свойствам магнитных материалов;
* незавершенностью теории векторных материальных уравнений и отсутствием исследования практических аспектов построения корректных математических моделей магнитного состояния, основанных на этой теории;
* активным использованием нелинейных анизотропных материалов в различных устройствах электромеханики и электроэнергетики;
* постоянно возрастающими требованиями к качеству расчета и проектирования электротехнических устройств с использованием эффектов магнитного поля.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Научно-исследовательская работа по теме диссертации тесно связана с направлением научных исследований кафедры электромеханики Криворожского технического университета и является составной частью госбюджетной темы №20-582-05 “Математические модели и методы компьютерного анализа электромеханических систем” (№ ГР: 0105U007338). Роль автора при выполнении вышеуказанной НИР состояла в разработке математических моделей нелинейных анизотропных безгистерезисных сред и в проведении с их использованием расчетов электромагнитных систем в полевой постановке.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состоит в разработке методов определения векторных характеристик намагничивания нелинейных анизотропных сред в безгистерезисном приближении и построении на этой основе математических моделей, обеспечивающих повышение точности и достоверности расчетов электрофизических процессов и полей в сложных электромагнитных устройствах и системах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

* развить теорию сплошных и дискретно-периодических (гетерогенных) ферромагнитных нелинейных анизотропных сред с обратимыми свойствами, в частности, обобщить интегральный принцип взаимности и исследовать свойства выпуклых функций с целью конструирования на их основе энергетических потенциалов для определения векторных характеристик намагничивания;
* обосновать минимальный объем базовой экспериментальной информации о характеристиках намагничивания анизотропных материалов без гистерезиса, обеспечивающий полноту и точность учета их магнитных свойств;
* установить связь между элементами симметрии и анизотропией линейных и нелинейных гетерогенных структур;
* разработать и научно обосновать машинно-ориентированные способы построения и применения математических моделей анизотропных ферромагнитных материалов;
* создать и апробировать библиотеки программных модулей для реализации векторных характеристик магнитного состояния основных марок анизотропных листовых электротехнических сталей.

*Объект исследований*  - магнитные системы и материалы с нелинейными анизотропными свойствами.

*Предмет исследования* – универсальные свойства анизотропных материалов, способы построения векторных моделей их магнитного состояния и влияние анизотропии на распределение магнитного поля.

*Методы исследования.* Решение сформулированных в диссертации задач достигнуто с использованием методов теории магнитостатики, термодинамики обратимых процессов, теории выпуклых, эллиптических и обобщенных аналитических функций, теории интегральных уравнений, теории приближения, в частности теории сплайнов, методов численного дифференцирования и интегрирования.

**Научная новизна полученных результатов:**

* развита теория нелинейных анизотропных сред с обратимыми свойствами, в частности впервые теоретически доказано, что для обратимых процессов намагничивания нелинейных анизотропных сред интегральный принцип взаимности выполняется не только в двумерном, но и в трехмерном пространствах;
* впервые теоретически обоснована возможность воссоздания векторной характеристики намагничивания среды с нелинейными анизотропными свойствами по семейству характеристик только для одной составляющей базового вектора магнитного поля - ***В, Н*** или ***J***. Тем самым установлен минимальный объём исходной информации, достаточной для построения векторной модели намагничивания;
* теоретически обоснован и практически подтвержден тезис о том, что оптимальным по компактности, универсальности и простоте реализации способом идентификации магнитного состояния нелинейной анизотропной среды является установление зависимости скалярного энергетического потенциала от одного из векторов поля - напряженности, магнитной индукции или намагниченности;
* предложен способ построения векторной характеристики намагничивания среды с нелинейными анизотропными свойствами на основе новых выражений для энергетических потенциалов с использованием свойств выпуклых функций;
* установлена взаимосвязь между элементами симметрии упорядоченных гетерогенных сред и их эффективной магнитной анизотропией. Доказано, что в нелинейном случае изотропной является только среда с круговыми цилиндрами, квадратным или гексагональным параллелограммом периодов и изотропными магнитными свойствами фаз;
* получил последующее развитие метод идентификации магнитных свойств упорядоченных гетерогенных сред со структурной и магнитной анизотропией при отсутствии ограничений на геометрию и магнитные свойства фаз.

**Практическое значение полученных результатов:**

* сформулированные требования к методике и объему экспериментальных исследований магнитных свойств нелинейных анизотропных материалов могут быть использованы при изменении и совершенствовании традиционных подходов и методов магнитных измерений характеристик намагничивания;
* выполненные в форме программных модулей математические модели распространенных марок листовой электротехнической стали легко стыкуются с универсальными методами численного моделирования полевых задач, что обеспечивает повышение точности и надежности результатов анализа;
* разработанные алгоритмы и программы расчета эффективных параметров сложных гетерогенных сред со структурной и магнитной анизотропией расширяют возможности анализа ряда новых задач, постановка и решение которых ранее были затруднительны или невозможны (сложные композиционные материалы, полиградиентные сепараторы, периодические решетки сложной геометрии, геометрически упорядоченные каналы, конструктивные зазоры).
* результаты диссертационной работы внедрены в ООО “ПО Индустриал-Сервис” в виде “Библиотеки математических моделей векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей”, которая используется в процессе послеремонтной паспортизации электрических двигателей переменного тока и трансформаторов путем расчета влияния характеристик магнитопроводов на паспортные и эксплуатационные характеристики оборудования.
* результаты диссертационной работы реализованы при выполнении научно-исследовательской госбюджетной темы, а также внедрены в учебный процесс на кафедре электромеханики Криворожского технического университета при изложении дисциплин «Теоретические основы электротехники» для бакалавров и «Основы научных исследований» для магистров.

 **Личный вклад соискателя.** Новые научные положения и результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В опубликованных в соавторстве научных трудах автору диссертации принадлежат: в [32] – разработана программа и выполнены вычислительные эксперименты для подтверждения достоверности интегрального принципа взаимности; в [33, 37, 43] – развиты теоретические положения интегрального принципа взаимности с учетом асимптотических свойств нелинейных анизотропных сред; установлено, что векторная характеристика магнитного состояния анизотропной среды без гистерезиса может быть восстановлена по семейству характеристик намагничивания только для одной составляющей базового вектора поля; в [34, 35] – обобщение принципа взаимности на трехмерный случай прямоугольных декартовых и сферических координат; в [36] – предложен модифицированный метод сплайнов для эффективного использования при разработке нелинейной векторной модели анизотропных магнитных сред; в [38] – предложены новые выражения для энергетических потенциалов с использованием выпуклых функций; в [40] – практическими расчетами проиллюстрирована возможность повышения точности вычисления магнитного поля при учете векторных характеристик намагничивания; в [41, 42] – усовершенствование математической модели магнитного поля в упорядоченных гетерогенных средах со структурной и магнитной анизотропией и определение их эффективных характеристик намагничивания.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и отдельных разделов докладывались и обсуждались на: II Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике, 10-13 сентября 1991 г., г. Винница; международной научно-технической конференции “Перспективні методи та технічні засоби підвищення ефективності енергоємних установок та технологічних комплексів гірничо-металургійної промисловості”, 19 січня 2004 р., м. Кривий Ріг; международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых научных работников “Електротехніка і електромеханіка” (ЕТЕМ-2004), 25-27 листопада 2004 р., м. Миколаїв; международной научно-технической конференции “Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості -2005”, 17-21 травня 2005 р., м. Кривий Ріг; “XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering”, July 4-7, 2005, Lviv; международной научно-технической конференции “Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов” - (SIEMA 2006), 19-21 октября 2006 г., г. Харьков; 4-й международной научно-технической конференции “Інформаційна техніка та електромеханіка” (ITEM-2007), 17-19 квітня 2007 р., м. Луганськ; на семинаре “Электрофизические процессы в технологических системах” Научного Совета НАН Украины по комплексной проблеме “Научные основы электроэнергетики”, сентябрь, 2007 г., г. Киев.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 12 публикациях, из них 9 статей опубликованы в научных специализированных изданиях, три статьи - в материалах научно-технических конференций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача разработки методов определения векторных характеристик намагничивания нелинейных анизотропных сред в безгистерезисном приближении. Задача решена путем учета универсальных законов обратимых процессов намагничивания, математического моделирования нелинейной анизотропии электротехнических материалов и разработки программных средств для его реализации, что позволило повысить точность и достоверность расчетов электрофизических процессов и полей в сложных электромагнитных устройствах.

1. В результате анализа научно-технической литературы показано, что в настоящее время отсутствуют четко сформулированные и обоснованные универсальные закономерности обратимых процессов намагничивания нелинейных анизотропных магнитных материалов, которые могут быть положенные в основу построения их математических моделей.

2. Развита теория нелинейных анизотропных сред с обратимыми свойствами, в частности, впервые теоретически доказано, что для обратимых процессов намагничивания произвольных нелинейных анизотропных сред интегральный принцип взаимности выполняется не только в двумерном, но и в трехмерном пространствах.

3. Асимптотические свойства характеристик намагничивания безгистерезисных материалов, установленные на основе интегрального принципа взаимности, позволяют сделать важный в теоретическом и практическом отношениях вывод, что воссоздание векторной характеристики намагничивания среды с нелинейными анизотропными свойствами возможно по семейству характеристик только для одной составляющей базового вектора магнитного поля. Тем самым обоснован минимальный объём исходной информации, достаточной для построения векторной модели магнитного состояния.

4. Доказано, что эффективный метод построения феноменологических векторных моделей нелинейной анизотропной среды может быть реализован путем применения выпуклых функций. Предложен способ построения векторной характеристики намагничивания среды с нелинейными анизотропными свойствами на основе новых аналитических выражений для энергетических потенциалов с использованием свойств выпуклых функций.

5. Теоретически обоснован и подтверждён практическими расчетами вывод о том, что оптимальным по универсальности, точности и простоте реализации материального уравнения нелинейной анизотропной среды является построение скалярной функции энергетического потенциала в ***В***-или ***Н***-пространстве. Точность воспроизведения магнитных свойств нелинейных анизотропных материалов существенно зависит в первую очередь от точности измерения угловых характеристик продольного намагничивания. Основные усилия при экспериментальном исследовании магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей должны быть направленные на совершенствование методов магнитных измерений этих характеристик, которые содержат исчерпывающую информацию для построения векторной модели намагничивания.

6. Впервые проанализирована взаимосвязь между элементами симметрии и магнитными свойствами фаз упорядоченных гетерогенных сред и их влияние на приведенные анизотропные свойства среды. Установлено, что в линейном случае изотропия приведенных свойств возможна только для квадратного и гексагонального параллелограммов периодов при условии, что порядок симметрии включений произвольной формы кратен порядку симметрии 4*mm* и 6*mm* соответственно. Эта изотропия не сохраняется в случае нелинейных включений. Изотропной является только среда с круговыми цилиндрами и изотропными магнитными свойствами фаз при квадратном или гексагональном параллелограммах периодов.

7. В отличие от макроскопически однородных сред определение приведенных магнитных свойств упорядоченной гетерогенной среды требует решения комплекса полевых задач по определению распределения вектора намагниченности с последующим его усреднением в пределах параллелограмма периодов. Для решения этой задачи развит интегральный метод расчета векторных характеристик поля, свободный от ограничений на геометрические и магнитные характеристики непрерывной и дискретной фаз и разработан комплекс программ для его реализации.

8. Достоверность и обоснованность научных выводов обеспечена использованием корректных методов исследований, апробацией основных положений и полученных результатов на научных конференциях и результатами их практического приложения при расчетах магнитных полей в конкретных электротехнических устройствах.

9. Результаты диссертационной работы использованы в ООО “ПО Индустриал-сервис” в виде библиотеки математических моделей векторных характеристик намагничивания холоднокатаных ЭТС, а также основанных на её использовании алгоритмов и программ для расчета магнитных полей в электрических машинах при их послеремонтной паспортизации.

Результаты диссертации могут быть использованы для анализа сложных электромагнитных устройств (сложные композиционные материалы, полиградиентные сепараторы, периодические решетки сложной геометрии, геометрически упорядоченные каналы, конструктивные зазоры), математическое моделирование которых ранее были затруднительны или невозможны, а также при совершенствовании традиционных методов измерения магнитных свойств материалов с нелинейной анизотропией.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маергойз И. Д. Итерационные методы расчета статических полей в неоднородных анизотропных и нелинейных средах. – К.: Наук. думка, 1979. – 210 с.
2. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров–электриков / П. Сильвестр, Р. Феррари; – М.: Мир, 1986. – 90 с.
3. Фильц Р. В., Дышовый Р. В. Безытерационный метод расчета статического вихревого магнитного поля в нелинейной безгистерезисной среде // Изв. вузов. Электромеханика. – 1971. – № 9. – С. 947– 951.
4. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц; – М.: Гостехиздат, 1957. - 532 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. - 504 с.
6. Бредов М. М. Классическая электродинамика / М. М. Бредов, В.В. Румянцев, И.Н. Топтыгин; – М.: Наука, 1985. -399 с.
7. Туров Е.А. Материальные уравнения электродинамики. – М.: Наука, 1983. -158 с.
8. Кравчик А.Э., Бойко Е.П. Учет магнитной анизотропии электротехнической стали при расчете трехфазных асинхронных двигателей // Электротехника. – 1976. – №5. – С. 36-37.
9. ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Взамен ГОСТ 12119-80 ; Введ. 01.07.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 4 с.
10. Пентегов И.В., Красножон А.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей // Електротехніка і Електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 66– 70.
11. Мустафаев Р.А., Набиев М.А., Гулиев З.А., Гаджибалаев Н.М. К аппроксимации кривой намагничивания // Электричество. – 2004. – № 5. – С. 17– 19.
12. Набиев М.А., Гулиев З.А., Гаджибалаев Н.М. К решению уравнений Максвелла для ферромагнитной среды // Электричество. – 2002. – № 3. – С. 27– 30.
13. Городецкий П.Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. – К.: Вища шк., 1956. – 60 с.
14. Бессонов Л.А. Электрические цепи со сталью. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
15. Соколов С.Е. Аппроксимация кривых намагничивания ферромагнитных устройств // Электричество. – 1991. – № 9. – С. 84-86.
16. Дойников Н.Р., Пузынович Ю.Т. Численное моделирование магнитостатических полей с учетом магнитной анизотропии стали // ЖТФ. – 1975. – Т. 45, Вып. 11.– С. 2204-2206.
17. Endo K., Kihara M., Takasaki E. Modification of Linda to treat the grain orientation effect // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1973. – Vol. NS-20, № 3. – P. 716-718.
18. Тенетко Н.И., Черемисов И.Я. Приближенные аналитические выражения семейств характеристик намагничивания холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей // Техническая электродинамика. – 1990. – № 3. – С. 18-23.
19. Расчет трехмерных электромагнитных полей / О.В. Тозони, И.Д. Маергойз; – К.: Техніка, 1974. – 352 с.
20. Король Е.Г. Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №2. – С. 31-34.
21. Колесников Э.В., Ткачев А.Н., Горбунцов А.Ф. Экспериментальное исследование и математическое моделирование планарного перемагничивания холоднокатаной стали // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1983. – №6. – С. 23-30.
22. Фильц Р.В. Определение магнитных свойств шихтованного ферромагнетика // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1970. – №3. – С. 257-261.
23. Фильц Р.В., Ком Я.М. Об аппроксимации характеристик ферромагнитных анизотропных безгистерезисных материалов при трехмерном намагничивании // Теоретическая электротехника. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Вып. 37. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те. – 1984. – С. 100-107.
24. Толмачев С.Т. Специальные методы решения задач магнитостатики. – К.: Вища школа, 1983. –166 с.
25. Толмачев С.Т. Теория и методы нелинейной магнитостатики сложных сред и систем: Дис. … доктора техн. наук: 05.09.05; – Защищена 16.12.1985; Утверждена 05.09.1987.– Кривой Рог, 1985. – 394 с.: ил. – Библиогр. с.: 378-394.
26. Ильченко А.В., Толмачев С.Т. Определяющие уравнения нелинейной ферромагнитной среды // Тезисы докл. Всес. научн.-течн. конф. “Проблемы нелинейной электротехники” – ч. 3. – Киев: Наук. Думка, 1981. – С.39-42.
27. Толмачев С.Т. Нелинейная магнитостатика упорядоченных гетерогенных структур // Тезисы докл. Всес. научн.-течн. конф. “Проблемы нелинейной электротехники” – ч. 3. – Киев: Наук. Думка, 1981. – С. 42-46.
28. Толмачев С.Т. Магнитные свойства нелинейной среды с упорядоченными неоднородностями // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1983. – №6. – С. 31-37.
29. Толмачев С.Т. Расчет силовых полей фильтр-сепараторов // Обогащение руд. – 1980. – №1. – С. 19-22.
30. Толмачев С.Т., Данилейко О.К. Расчет магнитных характеристик роторных фильтр-сепараторов с разреженной упаковкой стержней и шаров // Обогащение руд. – 1975. – №2. – С. 39-42.
31. Завьялов Ю.С. Сплайны в инженерной геометрии / Ю.С. Завьялов, В.А. Леус, В.А. Скороспелов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224с.
32. Толмачев С.Т., Рожненко Ж.Г. Принцип взаимности для магнитной среды без гистерезиса // Электричество. – 1992. – №12. – С. 51-53.
33. Толмачев С.Т., Рожненко Ж.Г. Математическая модель ферромагнитных анизотропных материалов в безгистерезисном приближении // Разработка рудных месторождений: Научно-техн. сб. – Криворожский технический университет, 2004. – Вып. 85.– С. 113-117.
34. Толмачев С.Т., Рожненко Ж.Г. Универсальные свойства кривых намагничивания безгистерезисной среды // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 5(28). – С. 8-12.
35. Толмачев С.Т., Рожненко Ж.Г. Векторная математическая модель анизотропных электротехнических сталей // Електротехніка і електромеханіка ЕТЕМ-2004: Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих наукових робітників. Миколаїв, 25-27 листопада 2004 р. – Миколаїв, 2004. – С. 114-115.
36. Рожненко Ж.Г., Толмачев С.Т. Интегральный принцип взаимности в теории и практике определяющих уравнений нелинейной анизотропной среды // Технічна електродинаміка. – 2005. – №1. – С. 3-8.
37. Рожненко Ж.Г., Толмачев С.Т. Асимптотические свойства характеристик намагничивания безгистерезисных анизотропных материалов // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2005. – Вип. 7.– С. 132-135.
38. Tolmachev S.T., Rozhnenko Z.G. The Theory of the Defining Equations for Nonlinear Anisotropic Materials // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. – Lviv, 2005. – Р. 97-100.
39. Рожненко Ж.Г. Способы идентификации магнитных свойств нелинейных анизотропных материалов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2005. – №4/2 (16). – С. 86-89.
40. Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Рожненко Ж.Г. Математическое моделирование магнитного поля с учетом нелинейных анизотропных свойств среды // Вестник Национального технического университета (ХПИ): Сб. научн. трудов. Тем. вып. “Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов.” – Харьков, 2006. – № 36. – С. 128– 133.
41. Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Рожненко Ж.Г., Бондаревський С.Л. Математическое моделирование магнитного поля с двоякопериодической структурой // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – Луганськ, 2007. – № 1 (14). – С. 141– 146.
42. Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Рожненко Ж.Г., Бондаревський С.Л. Приведенные свойства магнитной среды с двоякопериодической структурой поля// Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. –Луганськ, 2007. – № 2 (15). – С. 133– 137.
43. Толмачев С.Т., Ильченко А.В., Рожненко Ж.Г. Математическое моделирование нелинейных анизотропных материалов без гистерезиса // Перспективні методи та технічні засоби підвищення ефективності енергоємних установок та технологічних комплексів гірничо-металургійної промисловості: Міжнародна науково-технічна конференція з проблем електромеханіки та енергозбереження. Кривий Ріг, 19 січня 2004 р.– Кривий Ріг, 2004. – С. 52.
44. Микаэлян М.А. Методические вопросы термодинамики диэлектриков //Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168, №12. – С. 1331-1339.
45. Микаэлян М.А. Термодинамические неравенства для магнитной проницаемости вещества // Краткие сообщения по физике. – Физический институт им. П.Н.Лебедева – 2002. – №9. – С. 33-45.
46. Большая Советская Энциклопедия. –3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1974. –Т. 15. – 632с.
47. Титов В.В. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная; – Л.: Энергия, 1967. – 127с.
48. Фильц Р.В. Дифференциальный сеточный метод расчета магнитного поля в нелинейных средах // Доклады АН УССР. Сер. А. – 1979. – №9. – С. 710-713.
49. Сидельников А.В. Способы описания магнитных свойств анизотропной безгистерезисной стали при расчетах электромагнитных полей // Электротехника. – 1989. – №4. – С. 65-68.
50. Дорожко Л.И. Расчет характеристик анизотропной стали при поперечном подмагничивании // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – №1. – С. 140-143.
51. Дорожко Л.И. Характеристики анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки // Электричество. – 1972. – №3. – С. 88-90.
52. Дружинин В.В., Куренных Л.К., Чистяков В.К. Исследование характеристик холоднокатаной электротехнической стали под разными углами к направлению прокатки // Электричество. – 1971. – №3. – С. 85-86.
53. Холоднокатаные электротехнические стали: [Справочник] / Б.В. Молотилов. – М.: Металлургия, 1989. -168 с.
54. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240с.
55. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. – М.: Энергия, 1973. – 304 с.
56. Калинин Е.В., Любивый В.И., Першин В.В., Тильк В.Т. Анализ и математическое описание характеристик намагничивания анизотропныххолоднокатаных электротехнических сталей // Электротехника. – 1985. – № 10. – С. 34-37.
57. Экспериментальное исследование и математическое описание векторных характеристик намагничивания анизотропных листовых электротехнических сталей [Электронный сборник] / Е.В. Калинин // Электротехника. – 2000. – № 2. Режим доступа: http://electro.nizhny.ru/papers/6/00607.html.
58. Магнитное поле в кольцевом шихтованном сердечнике с анизотропными свойствами [Электронный сборник] / Е.В. Калинин // Электротехника. – 2000. – № 4. – Режим доступа: http://webknow.ru/astronomija\_00128.html.
59. Измерение магнитных характеристик листовых электротехнических сталей на кольцевых образцах [Электронный сборник] / Е.В. Калинин // Электротехника. – 2001. – № 6. – Режим доступа: [http://www.commerce.net.ua/ news42828.html](http://www.commerce.net.ua/%20news42828.html).
60. Coleman B.D., Dill E.H. Thermodynamic Restrictions on the Constitutive Equations of Electromagnetic Theory // Zeitschrift fur angewandte Mathematic und Physic (ZAMP). – 1971. – Vol. 22, No 4. – P. 691-702.
61. Акулов Н.С. Ферромагнетизм. – М.-Л.: Гостехиздат, 1939. – 188 с.
62. Най Д. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. – М.: Мир, 1967. – 304 с.
63. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская; – М.: Наука, – 1979. – 304 с.
64. Поливанов К.М. Ферромагнетики. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 256 с.
65. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
66. Киржниц Д.А. Всегда ли справедливы соотношения Крамерса-Кронига для диэлектрической проницаемости вещества // Успехи физических наук. – 1976. – Т. 119, Вып. 2. – С. 357-369.
67. Киржниц Д.А. Общие свойства электромагнитных функций отклика // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 152, Вып. 3. – С. 399- 422.
68. Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высшая шк., 1979. – 432 с.
69. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1970. – Т. 3. – 656 с.
70. Рокафеллар Р. Выпуклый анализ. – М.: Мир, 1973. – 469 с.
71. Белоусов Е.Г. Введение в выпуклый анализ и целочисленное программирование. – М.: Изд-во МГУ, 1977. – 196 с.
72. Неравенства / Харди Г.Г. и др. – М.: Гос. изд. иностранной л-ры, 1948. – 456 с.
73. Теория и оптимизация в задачах и упражнениях / Ашманов С.А., Тимохов А.В.; – М.: Наука, 1991. – 448 с.
74. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
75. Сборник задач по оптимизации: Теория. Примеры. Задачи / В.М. Алексеев и др.– М.: Наука, 1984. – 288 с.
76. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уоми; – М.: Мир, 1972. – 316 с.
77. Завьялов Ю.С. Методы сплайн-функций. / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко; – М.: Наука, 1980. – 352 с.
78. Бор К., де. Практическое руководство по сплайнам. / Пер. с англ. В.К. Галицкого, С.А. Шестакова, под ред. В.И. Скурихина. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
79. Черемисов И.Я., Тенетко Н.И., Корнилов В.И. Метод расчета характеристики намагничивания ярма статора двухполюсного турбогенератора // Электротехника. – 1970. – №1. – С. 46-49.
80. Рейнборт Г. Магнитные материалы и их применение. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.
81. Электротехнические стали. Дубров Н.Ф., Лапкин Н.И. – М.: Металлургиздат, 1963. – 384 с.
82. Калинин Е.В., Любивый В.И., Дианова Н.Я. Исследование характеристик магнитной анизотропиитрансформаторной электротехнической стали: Сб. науч. тр. – Чебоксары, 1982. – С. 52-57.
83. Потёмкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.х. – М.: Диалог- МИФИ, 1999. – Т. 1-2.
84. Дьяконов В.П. MATLAB 6/ 6.1/ 6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН- Пресс, 2002. – 768 с.
85. Maxwell J.K. A triatise on Electricity and Magnetism. – Duver, 1895. –Vol. 2. – 500 p.
86. Rayleigh J.W. On the Influence of Obstacles Arranged in Rectangular Order upon the Properties of a Medium // Phil. mag. – 1892. – Vol. 5. – P. 481-505.
87. Толмачев С.Т. Расчет потенциального поля в дискретно-периодических средах // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – №12. – С. 1298-1305.
88. Толмачев С.Т. Двоякопериодическая задача магнитостатики // ЖВМ и МФ. – 1983. – № 6. – С. 1402-1409.
89. Толмачев С.Т. Применение теории обобщенных аналитических функций к исследованию задач магнитостатики // Теоретическая электротехника: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Львов: Вища шк., Изд-во при Львов. ун-те, 1984. – Вып. 37. – С. 107-114.
90. Векуа И.Н. Обобщенные аналитические функции. – М.: Физматгиз, 1959. – 628 с.
91. Ахиезер Н.И. Элементы теории эллиптических функций. – М.: Наука, 1970. – 304 с.
92. Теория функций / Гурвиц А., Курант Р.; – М.: Наука, 1968. –648 с.

Для заказа доставки данной работы воспользуйтесь поиском на сайте по ссылке: <http://www.mydisser.com/search.html>