**Андреев Вячеслав Николаевич. Автоматизированное электротехническое оборудование для технологического контроля высокоэнергетических постоянных магнитов в импульсном поле : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 Чебоксары, 2006 151 с. РГБ ОД, 61:07-5/1346**

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

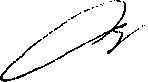
***На правах рукописи***

Андреев Вячеслав Николаевич

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ИМПУЛЬСНОМ ПОЛЕ

Специальность 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Научный руководитель д-р техн. наук, профессор В.А. Нестерин

Чебоксары 2006

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Исследование электромагнитных процессов в силовом импульсном

блоке контролирующего оборудования 14

[1Л. Электрические схемы импульсного оборудования для намагничивания и контроля постоянных магнитов 14](#bookmark3)

1. Переходные процессы в ИИМП бестрансформаторного типа 18
2. Переходные процессы в ИИМП трансформаторного типа 23
3. Влияние постоянного магнита на параметры импульса 28
4. Расчет и оптимизация конструкции индукторных систем, обеспечивающих

необходимую однородность поля и длительность импульса 32

1. [Выводы 37](#bookmark8)

Глава 2. Математическая модель состояния постоянного

магнита 39

1. Дифференциальные уравнения состояния магнитного вещества 40
2. Упрощенная модель состояния постоянного магнита в разомкнутой

магнитной цепи на основе понятия размагничивающего фактора 45

1. Математические модели постоянного магнита в разомкнутой магнитной

цепи с учетом реального распределения намагниченности 55

1. [Выводы 59](#bookmark17)

Глава 3. Методика натурно-модельного исследования свойств

высококоэрцитивных постоянных магнитов в разомкнутой цепи в импульсном магнитном поле 60

1. Принцип построения системы натурно-модельного эксперимента

по контролю свойств постоянных магнитов 60

1. Математическая модель системы контроля постоянных магнитов 67
2. Математическое представление материала постоянного магнита в ходе

натурно-модельного эксперимента 71

1. Уравнение связи постоянного магнита с измерительной катушкой 72

з

1. Алгоритм восстановления свойств магнитного материала по методу

натурно-модельного эксперимента 74

1. Анализ методической погрешности натурно-модельного эксперимента...80 Глава 4. Реализация метода контроля свойств высокоэнергетических

постоянных магнитов в импульсном магнитном поле в автоматизированном

электротехническом оборудовании 84

1. Функциональная схема и устройство установки контроля гистерезисных

параметров редкоземельных магнитов 84

1. Особенности системы регистрации экспериментальных данных 88
2. Обработка данных эксперимента 91
3. Расчет магнитной характеристики по экспериментальным данным 94
4. Пример контроля образца постоянного магнита на установке ТКМГП 95
5. Распечатка отчета и другие возможности 101
6. [Выводы 102](#bookmark23)

[Заключение 104](#bookmark24)

[Список литературы 105](#bookmark25)

Приложение 1. Стенд контроля магнитов полуавтоматический ТКМГП-8....118

Приложение 2. Техническое задание 142

Приложение 3. Акт внедрения 145

Приложение 4. Акт внедрения 146

Приложение 5. Акт внедрения 147

Приложение 6. Отчет о проведении анализа конструкторской документации

на экологическую безопасность изделия коэрцитиметр ТКМГП-9 148

ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* Применение постоянных магнитов (ПМ) в технике ежегодно увеличивается. За последние годы отмечается большой спрос на ПМ из редкоземельных магнитотвердых материалов (РЗМ), типа NdFeB, SmCo [1-7]. Отличительной особенностью этих материалов максимальная коэрцитивная сила, которая делает эти магниты лидерами по применению в новых изделиях. Препятствием во взаимоотношениях между поставщиками магнитов и потребителями остается определение свойств ПМ.

Важной задачей является технологический и приемо-сдаточный контроль свойств РЗМ в процессе изготовления ПМ сложной формы. Известно, что режимы технологического процесса значительно влияют наконечные свойства магнита, которые от партии к партии могут иметь широкий разброс. При этом в процессе технологического контроля свойств материала ПМ в образцах сложной формы, не прошедших механическую обработку, можно допустить сравнительные испытания при наличии эталонных ПМ. Поэтому создание оборудования для оперативного технологического контроля магнитных параметров ПМ является актуальной задачей повышения качества изделий электротехники.

Увеличение производства редкоземельных высококоэрцитивных ПМ и непрерывное расширение их области применения в ответственных изделиях с экстремальными условиями работы (повышенная температура до 170 °С, воздействие размагничивающих полей) вызывает необходимость дальнейших исследований и разработки новых эффективных методов производственного контроля свойств этих магнитов. Одним из наиболее перспективных является метод контроля свойств материалов редкоземельных ПМ в разомкнутой цепи с применением импульсных полей. Этот метод открывает перспективы получить информацию, как о первоначальной кривой намагничивания, так и обо всей кривой размагничивания и ее параметрах: остаточной индукции и намагниченности, коэрцитивной силе, энергетическом произведении на основе испытания образцов ПМ сложной формы.

Большой вклад в развитие теории и методов испытания свойств материалов ПМ внесли отечественные ученые: Чечерников В.И., Шихин

1. Я., Коген-Дален В.В., Сергеев В.Г., Ягола Г.К., Курбатов П.А., Нестерин
2. А., Андриевский Е.А. и др. [8-29]. С появлением РЗМ многие методы и оборудование оказались непригодными для контроля свойств ПМ. Недостатком широко известных методов и средств контроля в замкнутой магнитной цепи является сложность их применения для технологического контроля магнитных характеристик непосредственно на готовых ПМ. Кривая размагничивания магнитотвердых материалов в такой аппаратуре может достоверно определяться лишь в ограниченном диапазоне напряженностей магнитного поля, что недостаточно для современных магнитотвердых материалов.

Для ведения массового технологического контроля ПМ из магнитотвердых материалов наиболее пригоден метод контроля гистерезисных параметров в разомкнутой магнитной цепи в импульсном магнитном поле [8, 30]. Главное преимущество такого оборудования состоит в том, что оно способно создавать достаточно сильные магнитные поля при сравнительно малой потребляемой из сети мощности [8]. Если потребляемая мощность импульсной установки 1-3 кВт то для создания равного магнитного поля в электромагните потребуется мощность в несколько десятков кВт. Вопрос создания сильных магнитных полей в индукторных системах хорошо изучен [31-33]. В научных трудах анализу переходных процессов в системах типа «источник - индуктор» отводится достаточно места, каждый автор решает этот вопрос применительно к своей задаче [34-36]. Т.к. индукторная система является частью импульсного оборудования, то проектирование ее связано с применением комплексной математической модели, основанной на совместном анализе электромагнитных переходных процессов в силовой разрядной цепи и процессов диффузии магнитного поля в ПМ [35]. Вопросам проектирования импульсного оборудования посвящена большая часть работ профессора Нестерина В.А. [8, 30, 37 - 76], работы других авторов [77 - 84]. В части моделирования электромагнитных полей в ферромагнитных средах большой вклад внесен работами ученых: Тамм И. Е., Поливанова К.М., Демирчяна К.С., Неймана Л.Р., Коровкина Н.В., Чечурина В.Л., Тикадзуми

С., Арнольда Р., Вонсовского С.В., Курбатова П.А. [23, 85 - 89].

Важную роль в производстве играет автоматизация технологических процессов. Автоматизация позволяет освободить человека от монотонного труда, обеспечить его безопасность, повысить качество и точность управления оборудованием, увеличить производительность труда, а в контролирующем оборудовании, в частности, повысить точность результатов контроля свойств материалов. Автоматизированное оборудование сравнительно быстро окупается за счет снижения эксплуатационных расходов и повышения объемов и качества продукции [90]. Применение вычислительной и микропроцессорной техники является важным условием автоматизации оборудования, делает этот процесс доступным для широкого круга задач. При проектировании автоматизированного контролирующего оборудования решаются следующие задачи: разработка математического обеспечения; создание программного обеспечения алгоритма управления и обработки данных; механизация оборудования; проектирование измерительных датчиков. Задача управления технологическим процессом на стадии проектирования автоматизированного оборудования решаются на основе имитационного моделирования, результатом которого является синтез алгоритма управления сложным электротехническим комплексом [91]. Задача реализации алгоритма управления в части создания программного обеспечения решается программированием на языках высокого уровня (Delphi, LabView) [92-97]. Задача обработки данных - с помощью процессорных средств измерения, отличающихся тем, что их программируемая вычислительная мощность входит в состав измерительной цепи и участвует в получении результатов измерения, выполняя часть измерительной процедуры [98]. Результатом решения этих задач является управляющая программа для ПК, с помощью которой осуществляется управление и мониторинг автоматизированного оборудования, а также обработка и анализ данных. В контролирующем оборудовании для определения магнитных свойств материала применяются индукционные измерительные преобразователи или датчики Холла, которые объединяются в многофункциональные датчики для получения комплексных данных об объекте исследования. Такие датчики отличаются тем, что позволяют осуществить автоматическое избирательное преобразования требуемой физической величины из общей совокупности, воздействующих на вход датчика сигналов, исключая влияние дестабилизирующих факторов [99]. Задача механизации оборудования решается с помощью исполнительных механизмов на основе электроприводов двигателя постоянного тока или вентильного электродвигателя под управлением микропроцессорной техники, запрограммированной на языке низкого уровня [100- 106].

Особое внимание при создании импульсного технологического оборудования отводиться мерам защиты линий связи от внешних и взаимных помех. Наиболее эффективными из них являются скрутка, экранирование и гальваническая развязка [107-109]. В цифровых линиях связи для технологического оборудования дополнительным средством защиты является применение протоколов передачи данных, устойчивых к действию помех [92-96, ПО].

*Целью работы* является разработка методики и создание автоматизированного высокопроизводительного электротехнического комплекса для технологического контроля свойств высококоэрцитивных ПМ сложной формы в импульсном поле.

*Для достижения поставленной цели в диссертации решались следующие задачи:*

1. Разработка методики контроля магнитных характеристик магнитотвердых материалов на основе натурно-модельного эксперимента применительно к разомкнутой магнитной цепи в импульсном магнитном поле.
2. Разработка математической модели ПМ с учетом анизотропии магнитных свойств высококоэрцитивных магнитотвердых материалов.
3. Разработка алгоритма и программного обеспечения, позволяющего восстанавливать магнитную характеристику, пропорциональную кривой размагничивания материала по экспериментальной интегральной магнитной характеристике образца ПМ.
4. Создание и внедрение автоматизированного электротехнического оборудования, реализующего натурно-модельный метод контроля гистерезисных параметров высококоэрцитивных ПМ в разомкнутой цепи в импульсном магнитном поле.

*Методы исследования.* При исследовании переходных процессов в импульсном конденсаторном оборудовании, разработке математической модели ПМ используются методы теории электрических цепей и электромагнитного поля, физических основ магнетизма и теории дифференциальных и алгебраических уравнений. Определение гистерезисных параметров высококоэрцитивных ПМ осуществляется на основе натурно-модельного эксперимента в разомкнутой магнитной цепи в импульсном магнитном поле. При восстановлении кривой размагничивания применялся метод аппроксимации нелинейной функции кусочно-ломанной кривой в сочетании с итерационным методом подбора параметров линейных отрезков.

*Достоверность полученных результатов* обеспечена соответствием результатов экспериментов контроля РЗМ ПМ по предлагаемой методике и замеров кривых размагничивания образцов в замкнутой магнитной цепи, анализом методической погрешности и повторяемостью результатов контроля на одних и тех же образцах ПМ.

*Научная новизна:* 1. Предложен метод натурно-модельного эксперимента для восстановления характеристики размагничивания материала по интегральной экспериментальной характеристике размагничивания ПМ в разомкнутой магнитной системе в импульсном поле, отличающийся тем, что учитывает неоднородное распределение поля в ПМ и позволяет снизить методическую погрешность в сравнении с известным методом усреднения поля по всему объему ПМ.

1. Разработана математическая модель системы ПМ-индуктор- измерительная катушка, отличающаяся тем, что в ней учтена анизотропия магнитных свойств материала, что особенно важно для применения ее в алгоритме восстановления кривой размагничивания материала ПМ.
2. Разработано автоматизированное электротехническое оборудование для контроля свойств высококоэрцитивных ПМ отличающееся тем, что на нем можно производить контроль ПМ произвольной формы предложенным методом натурно-модельного эксперимента.
3. Применена усовершенствованная измерительная система катушек с двойной компенсацией помех для контроля магнитного потока в импульсном магнитном поле, отличающаяся более высокой точностью, благодаря снижению сигнала помехи за счет применения дополнительных компенсирующих катушек.

*Практическая ценность.* Разработано и внедрено автоматизированное электротехническое оборудование для сравнительной оценки гистерезисных параметров магнитных материалов высокоэнергетических ПМ сложной формы в разомкнутой магнитной цепи в импульсном поле. Данное оборудование позволяет сократить время на технологический экспресс­контроль свойств материала при массовом производстве и применении высококоэрцитивных ПМ, а также снизить уровень брака, т.к. позволяет отбраковывать и сортировать магниты уже на промежуточной стадии технологического процесса, а не по результатам испытаний готового изделия в сборе.

*На защиту выносится:* 1. Метод натурно-модельного эксперимента в разомкнутой магнитной системе в импульсном магнитном поле применительно к оценке магнитных свойств материала ПМ. Метод состоит в объединении в единый процесс экспериментального определения интегральных магнитных характеристик и моделирования параметров магнитного материала ПМ.

1. Математическая модель системы ПМ-индуктор-измерительная катушка с учетом анизотропии магнитных свойств высококоэрцитивных магнитотвердых материалов, позволяющая реализовать метод натурно­модельного эксперимента для технологического контроля гистерезисных параметров магнитотвердых материалов на образцах сложной формы.
2. Автоматизированное электротехническое оборудование

для технологического контроля параметров высокоэнергетических ПМ в импульсном магнитном поле. В этом оборудовании реализована методика натурно-модельного эксперимента и применена усовершенствованная конструкция измерительных катушек с двойной компенсацией помех.

*Реализация результатов работы.* Разработанное

при непосредственном участии автора импульсное контролирующее оборудование для высокоэнергетических ПМ внедрено в ОАО «ЧЭАЗ» г. Чебоксары, ООО «Элмаг» г. Владимир. Это оборудование использовано при освоении новых изделий на базе высокоэнергетических ПМ и позволяет улучшить качество магнитных систем, благодаря отбраковке ПМ.

*Апробация работы.* Основные положения и результаты диссертационной работы автора докладывались и обсуждались на всероссийских конференциях и международных симпозиумах.

и

*Публикации.* Содержание диссертации отражено в 18 опубликованных научных работах автора. На импульсную намагничивающую установку получен патент РФ.

*Структура и объем работы.* Работа изложена на 151 странице, содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы и 6 приложений.

Во введении приводится аналитический обзор литературы по теме диссертации, описаны перспективы применения высокоэнергетических ПМ, даны основные термины и определения, обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования и приведено краткое содержание работы.

В главе 1 рассмотрены две наиболее часто встречающиеся схемы импульсного оборудования трансформаторного и бестрансформаторного типа на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), предназначенные для намагничивания ПМ в системах контроля их параметров. Получены основные соотношения, описывающие переходные процессы в системе «накопитель энергии - индуктор» [111]. Даны рекомендации по выбору геометрических размеров индукторов для осевого намагничивания, обеспечивающих наибольшую амплитуду и однородность поля в зоне индуктора при заданной длительности импульса тока и емкости накопителя [112]. Анализ влияния длительности импульса на однородность намагничивания обоснованно указывает на возможность полного намагничивания до насыщения всего объема и отсутствие значимого влияния вихревых токов на процесс намагничивания ПМ. Получены условия и даны рекомендации по выбору параметров схем, обеспечивающих необходимую длительность, амплитуду и степень затухания импульса.

В главе 2 рассмотрен известный метод определения кривой размагничивания по измеренной зависимости магнитного потока ПМ в функции напряженности магнитного поля с использованием коэффициента размагничивания [8, 30, 113, 114]. Недостатком метода является требование

постоянства намагниченности по объему образца, а это в разомкнутой магнитной системе имеет место только для образцов правильной формы. Выполнен обзор математических моделей изделий из магнитных материалов. Проанализирован диапазон применимости этих моделей применительно к реализации метода натурно-модельного эксперимента для контроля свойств ПМ в импульсном магнитном поле в разомкнутой магнитной цепи. Дано обоснование выбора модели с кусочно-постоянной аппроксимацией намагниченности по элементарным объемам, как наиболее подходящей при разработке метода натурно-модельного эксперимента для контроля свойств ПМ в импульсном магнитном поле в разомкнутой магнитной цепи в качестве основы для получения математической модели ПМ в измерительной системе.

В главе 3 рассматриваются принципы построения системы натурно­модельного эксперимента по контролю свойств ПМ в разомкнутой магнитной системе в импульсном поле. Разрабатывается более совершенная методика натурно-модельного эксперимента определения свойств магнитотвердых материалов, в которой применяется математическая модель ПМ [115-123]. Метод контроля и прогнозирования магнитных свойств материала, основанный на объединении в единый процесс опытного определения и моделирования магнитных характеристик и параметров ПМ, носит название натурно-модельного эксперимента. Он позволяет учесть неоднородное распределение поля в ПМ и снизить методическую погрешность в сравнении с известным методом усреднения поля по объему ПМ. Выполнен анализ методической погрешности метода.

В главе 4 приведены результаты реализации методики натурно­модельного эксперимента контроля высокоэнеретических ПМ в импульсном магнитном поле в разомкнутой цепи. Практическая реализация автоматизированного электротехнического оборудования и программного продукта осуществлена в виде образца импульсного коэрцитиметра типа ТКМГП, разработанного и изготовленного в ОАО «ЧЭАЗ» при непосредственном участии автора [111, 124, 125]. Оборудование позволяет снизить затраты времени на технологический контроль магнитных свойств материала при массовом производстве и применении ПМ любой формы, что позволит оперативно вносить изменения в технологический процесс и снизить уровень брака. Применена усовершенствованная измерительная система катушек с двойной компенсацией помех для контроля магнитного потока в импульсном магнитном поле, позволяющая снизить сигнал помехи за счет применения дополнительных компенсирующих катушек. В результате испытаний опытного образца оборудования ТКМГП подтверждено соответствие реальных функциональных возможностей и параметров коэрцитиметра расчетным данным и выявлено наличие дополнительных возможностей. Произведена также проверка установки на экологическую безопасность в процессе производства и эксплуатации.

В заключении по результатам диссертационной работы сделаны выводы.

Работа выполнялась на кафедре «Электромеханики и технологии электротехнических производств» ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университета им. И.Н. Ульянова» и в отделе электрических машин ОАО «ЧЭАЗ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Предложена математическая модель ПМ в измерительной системе, позволяющая с учетом анизотропии свойств ПМ применить методы исследования свойств магнитных материалов на образцах сложной формы в разомкнутой магнитной системе в импульсном магнитном поле.
2. Разработана и реализована методика натурно-модельного определения свойств высококоэрцитивных ПМ в разомкнутой магнитной цепи в импульсном магнитном поле, позволяющая производить технологический контроль при массовом производстве и применении ПМ.
3. Предложена измерительная катушка с двойной компенсацией помех и способ ее калибровки в переменном магнитном поле, позволяющий производить калибровку с помощью стандартного лабораторного оборудования и меньшими затратами времени, чем при других способах.
4. Составлен алгоритм и программное обеспечение для ПК, управляющего процессом работы всего электротехнического комплекса и позволяющего автоматизировать процесс контроля и документального оформления результатов.
5. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработан и внедрен автоматизированный электротехнический комплекс технологического оборудования, позволяющий производить контроль гистерезисных свойств магнитотвердых материалов в импульсном магнитном поле в разомкнутой магнитной цепи в условиях производства и промышленного применения ПМ сложной формы (Приложения 3, 4, 5). Произведена экспертиза конструкторской документации на экологическую безопасность (Приложение 6). На импульсную намагничивающую установку получен патент РФ.