

На правах рукописи

Нгуен Мань Кьонг

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ
МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2010

Работа выполнена на кафедре «Информационные и измерительные системы и технологии» ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горбатенко Николай Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Булгаков Алексей Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
Гайдук Анатолий Романович

Ведущая организация: Донской Государственный Технический Университ

Защита диссертации состоится «15» октября 2010 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.304.02 при ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» в аудитории № 107 главного корпуса по адресу: 346428, г. Новочеркасск Ростовской обл., ул. Просвещения, 132.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)». С текстом автореферата можно ознакомиться на сайте ЮРГТУ (НПИ) www.npi-tu.ru.

Автореферат разослан «__» сентября 2010 г.

Ученый секретарь совета,
профессор, кандидат технических наук

А.Н. Иванченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Расширение областей применения и функциональных возможностей современных электротехнических систем связано с требованиями оптимального использования свойств применяемых материалов, повышения качества узлов и систем в целом. Выполнение этих условий связано с необходимостью совершенствования, как конструкции, так и технологии производства систем. Исключительная роль технологии объясняется сильной зависимостью параметров узлов от состава материала, его свойств и видов обработки. К таким узлам электротехнических систем, безусловно, относятся электромагниты. Обеспечение соответствия электромагнитов техническим условиям во многом зависит от организации самого процесса производства, гарантирующего устойчивое качество и его непрерывное улучшение. Важным является не только соответствие требованиям отдельной партии электромагнитов, но и стабильность их качества в долгосрочной перспективе, уменьшения потерь, связанных с несовершенством технологии производства. Решить эти задачи позволяет селективная сборка изделий. Анализ работ в этом направлении, показывает, что наиболее перспективным является применением адаптивного подхода, позволяющего выполнять корректировку параметров процесса изготовления деталей.

Выходные характеристики электромагнитов в значительной степени определяются магнитными свойствами деталей. Следовательно, для повышения качества электромагнитов необходимо решить задачу обеспечения заданных магнитных свойств путем селективной сборки по магнитным свойствам. Важными элементами комплекса технических средств автоматизированных систем управления технологическим процессом изготовления электромагнитов являются устройства контроля магнитных характеристик деталей. Существующие в настоящее время устройства не обеспечивают требуемой точности и производительности определения наиболее информативных магнитных характеристик материала деталей, а значит, не соответствуют в полной мере требованиям современного серийного производства электромагнитов. В этой связи становится актуальным решение задачи разработки автоматического устройства контроля магнитных свойств деталей электромагнитов, позволяющего получать измерительную информацию, необходимую для эффективного управления технологическим процессом изготовления электромагнитов.

Работа выполнена в соответствии с программой развития направления развития науки, технологий и техники РФ «Информационно-телекоммуникационные технологии и электроника» (утверждено указом Президента РФ от 30.03.02 г.); научным направлением Южно-Российского государственного технического университета (НПИ) «Теория и принципы построения информационно-измерительных систем и систем управления» (утвержденно решением ученого совета университета от 25.01.03 г. и переутверждено 1.03.06 г.); договором о сотрудничестве в области образования, науки и техники между ЮРГТУ (НПИ) и Техническим университетом Ильменау (ФРГ) от 14.12.2001 г.

Цель работы. Разработка автоматического устройства контроля магнитных свойств деталей электромагнитов, позволяющего повысить выход годных изделий путем реализации метода селективной сборки по магнитным свойствам.

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационной работы необходимо решить следующие основные задачи:

– разработать метод селективной сборки электромагнитов, позволяющий повысить выход годных изделий.

– разработать метод, позволяющий уменьшить объем информации необходимой для формирования групп допуска селективной сборки.

– разработать алгоритм селективной сборки электромагнитов, позволяющий реализовать метод сборки электромагнитов по магнитным свойствам деталей.

– разработать математическую модель стационарного магнитного поля, позволяющую с высоким быстродействием и точностью рассчитывать параметры магнитного поля при реализации натурно-модельного метода определения магнитных характеристик деталей.

– создать автоматическое устройство контроля магнитных свойств деталей электромагнитов, позволяющее получать измерительную информацию, необходимую для эффективного управления технологическим процессом изготовления электромагнитов.

Методы исследований: методы теории электромагнитного поля, электрических и магнитных цепей, автоматического управления, математической статистики, теории измерений, численные методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений, математического моделирования с использованием пакетов прикладных программ Maxwell, FEMM, LabView, MathCAD, Micro-Cap.

Научная новизна работы.

1. Разработан метод селективной сборки, отличающийся от известных тем, что основан на учете зависимости тягового усилия от магнитных свойств деталей электромагнита, полученной путем моделирования состояния электромагнита в рабочих условиях его эксплуатации.

2. Разработан метод описания семейства магнитных характеристик на основе метода главных компонент, позволяющий значительно сократить объем информации, необходимой для формирования групп допуска селективной сборки.

3. Разработан алгоритм селективной сборки электромагнитов, позволяющий реализовать метод сборки на основе моделирования тяговых характеристик.

4. Разработана комбинированная математическая модель магнитного поля на основе дифференциальных уравнений с частными производными, базирующаяся на измерении магнитного потока по границе исследуемой области и последующим расчетом характеристик магнитного поля во всей области. Применение модели позволяет с высоким быстродействием и точностью рассчитывать параметры магнитного поля методом конечных элементов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются корректностью допущений, принимаемых при математическом моделировании и при разработке устройства, использованием метрологически аттестованного оборудования при проведении испытаний разработанных устройства, согласованием теоретических положений с результатами экспериментальных исследований и критическим обсуждением основных результатов работы с ведущими специалистами в области теории автоматического управления технологическими процессами магнитоизмерительной техники на всероссийских и международных научных конференциях.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Разработано автоматическое устройство контроля магнитных свойств деталей электромагнитов, позволяющее получать измерительную информацию, необходимую для эффективного управления технологическим процессом изготовления электромагнитов.

Разработан программный комплекс на основе технологии LabView, позволяющий создать интегрированную среду для сбора и обработки данных о магнитном состоянии испытуемых деталей, моделирования его изменений под воздействием технологической операции сборки электромагнитов, а также управления работой средств автоматизации процесса испытаний.

Разработанная модель магнитного поля на основе дифференциальных уравнений с частными производными, позволяет реализовать натурно-модельный метод определения магнитных характеристик материала деталей с высокой точностью и быстродействием в автоматических устройствах контроля.

Результаты работы используются (получен ряд актов внедрений) в научно-исследовательской и производственной деятельности и в учебном процессе ЮРГТУ (НПИ).

Основные положения, выносимые на защиту:

- метод селективной сборки, основанный на учете зависимости тягового усилия от магнитных свойств деталей электромагнита;
- метод описания семейства магнитных характеристик малой размерности;
- алгоритм селективной сборки электромагнитов на основе моделирования их тяговых характеристик;
- комбинированная модель магнитного поля на основе дифференциальных уравнений с частными производными и экспериментальных данных для реализации натурно-модельного метода определения магнитных характеристик материала деталей;
- структуры, алгоритмы, конструктивные и схемотехнические решения автоматического контроля магнитных свойств деталей для систем управления технологическим процессом изготовления электромагнитов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- VII Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instru-

ments», г. Москва, 28-29 ноября 2008 г.;

– 53th Международном научном colloquiume, г. Ильменау (ФРГ), 8-12 сентября 2008 г.;

– Международном научно-практическом colloquiume «Мехатроника – 2009», ЮРГТУ(НПИ), г. Новочеркасск, 10-11 июня 2009 г.;

– XVII Международной конференции по постоянным магнитам, Суздаль, 21-25 сентября 2009 г.

– Научных семинарах кафедры «Информационно-измерительная и медицинская техника» ЮРГТУ (НПИ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 1 свидетельство о регистрации программного продукта.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и приложений. Общий объем работы 169 страниц, включая 3 страницы приложений, 84 иллюстраций, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассмотрены особенности технологического процесса изготовления электромагнитов. Показано, что минимизация энергопотребления, миниатюризация значительно повысили требования к их техническим характеристикам и качеству изготовления. Во многом они определяются технологическим процессом изготовления деталей и изделия в целом. В производственных условиях невозможно обеспечить идеальность технологического процесса, это приводит к тому, что воздействия операций при обработке деталей носят случайный характер, вследствие чего характеристики и параметры получаемых в результате готовых изделий имеют разброс. Вероятностный характер воздействия технологических операций обусловлен разнообразием и сложностью операций, сложной нелинейной зависимостью свойств ферромагнитных деталей от многих факторов, а так же невозможностью обеспечить абсолютную детерминированность технологических операции, определяемых векторами управляющих воздействий. Кроме того, опыт массового производства показывает, что, несмотря на стремление заказчика при закупке обеспечить идентичность свойств сырья, магнитные свойства закупаемых ферромагнитных материалов имеют разброс. Ввиду этого в процессе производства изделий играет селективная сборка, когда точность изготовления деталей заменяется точностью при сортировке. Повышение точности контроля требует, как правило, значительно меньших затрат по сравнению с повышением точности технологического процесса.

Анализ электромагнитов как объекта исследований показал, что составляющие его детали могут иметь существенно нелинейные характеристики. Несмотря на относительную простоту конструкций, свойства электромагнитов

зависят от многих факторов. Это значительно осложняет исследование электромагнитов. Поэтому применение удельных показателей не оправдано в качестве контролируемых параметров для селективной сборки электромагнитов. Наиболее адекватно, в статическом режиме работы, их можно оценить с помощью тяговых характеристик $F_3 = f(\delta)_{I=\text{const}}$. С целью изучения возможности селективной сборки электромагнитов путем сортировки деталей по магнитным свойствам проводились экспериментальные исследования тяговой характеристики пропорционального электромагнита втяжного типа. Эксперименты выполнялись с помощью автоматизированной установки для измерения тяговых характеристик фирмы Zwick Roell, представленной фирмой Steinbeis-Transfezentrum Mechatronik г. Ильменау (ФРГ). Использовались якоря, сделанные из разных инструментальных сталей (X45NiCrMo4 – 2 шт.; 90MnV8 – 3 шт.; 16MnCr5 – 4 шт.; 9SMnPb28 – 2 шт.), направляющая втулка (9SMnPb28 – 1 шт.), корпуса (из отожженной и не отожженной конструкционной стали по 3 шт. каждого типа). Усредненные тяговые характеристики, полученные для разных комбинаций деталей, показаны на рис. 1. Проведенные исследования показали, что магнитные характеристики материала деталей оказывают значительное влияние на тяговые характеристики электромагнита.

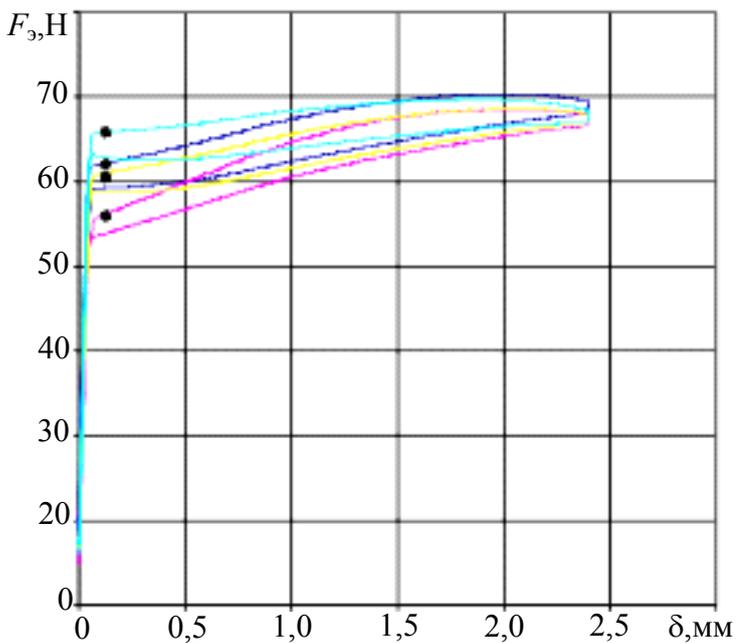


Рис. 1. Тяговые характеристики электромагнита

Создание эффективных систем управления качеством электромагнитов сдерживается тем, что известные методы селективной сборки не используют в качестве величин влияния наиболее информативные характеристики – магнитные характеристики материала деталей. Перспективным направлением решения данной проблемы является создание автоматического устройства контроля для получения необходимой в процессе производства измерительной информации о магнитных свойствах деталей электромагнитов. Учитывая

это, были определены задачи, подлежащие решению в данной работе.

Во второй главе разработан метод селективной сборки основанный на учете зависимости тягового усилия от магнитных свойств деталей электромагнита, полученной путем моделирования состояния электромагнита в рабочих условиях его эксплуатации.

Для серийного производства предлагается использовать адаптивно-селективную сборку (АСС), теоретические основы которой разработаны в техническом университете г. Ильнау (ФРГ) профессором К.П. Цохером. Метод поясняется рис. 2 и базируется на

следующих понятиях: определение реального вероятностного распределения величин влияния X_i изготовленных узлов и отдельных деталей; назначение приемлемых границ групп допусков $[\lambda_{is}, \pi_{is}]$ для обеспечения требуемых функциональных допусков δY_{kt} признака качества Y_k для собираемых узлов или изделий в целом; коррекция границ групп допусков и параметров процесса вследствие изменяющегося во времени

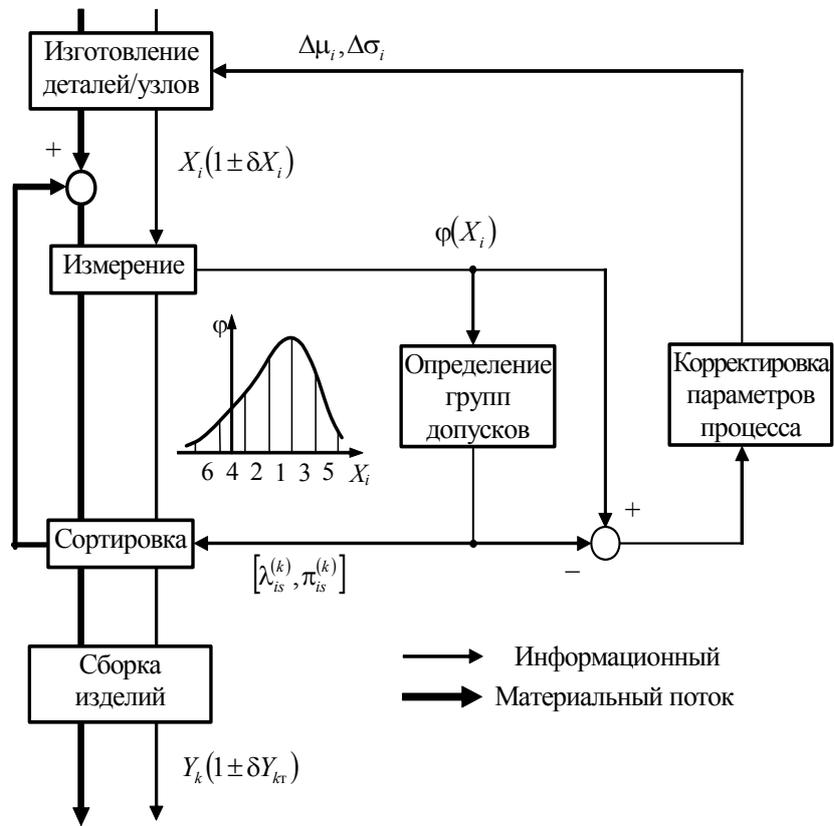


Рис. 2. Схема адаптивно-селективной сборочной технологии

состояния технологического процесса; проведение определенной стратегии сборки в зависимости от состояния промежуточного накопителя и расхода узлов и отдельных деталей.

АСС технология включает в себя селективный компонент, на принципах которого построена система определения и оптимизации границ групп допусков, и адаптивный компонент, реализующий корректировку параметров процесса изготовления деталей, соответствующую изменению его состояния с течением времени. Изменение во времени параметров технологического процесса изготовления деталей ведет к изменению характера кривой вероятностного распределения действительных значений величин влияния, что происходит вследствие изменения характеристик процесса изготовления – математического ожидания $\Delta\mu_i$ и среднеквадратического отклонения $\Delta\sigma_i$.

В основу модели допуска деталей для сборки предлагается функциональная взаимосвязь тягового усилия F от магнитных свойств деталей $X(B(H))$ электромагнита:

$$F_k = f_k(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где $k = 1, \dots, q$, q – количество электромагнитов; $i = 1, \dots, n$, n – количество деталей.

Допустимое отклонение δF_k тягового усилия F_k k -го электромагнита при реализации АСС оценивается неравенством

$$\delta F_k \leq \sum_{i=1}^n |\alpha_{k_i}(X_i)| \delta X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\beta_{k_i,j}(X_i)| \delta X_i \delta X_j,$$

где δX_i – относительный допуск магнитной характеристики i -ой детали X_i , $\delta X_i = (\Delta X_i / X_i) 100\%$, $\Delta X_i = (X_{\max} - X_{\min}) / 2$ – абсолютный допуск магнитной характеристики X_i ; α_{k_i} – весовой коэффициент первого порядка,

$\alpha_{k_i}(X_i) = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_i} \frac{X_i}{F_k}$; $\beta_{k_i,j}$ – весовой коэффициент второго порядка,

$$\beta_{ij}(X_i) = \frac{\partial^2 f(X_1, \dots, X_n)}{\partial X_i \partial X_j} \frac{X_i X_j}{2F_k}.$$

Точность изготовления деталей при селективной сборке заменяется точностью измерения отклонений параметров величин влияния, а, следовательно, точностью их сортировки. Успешная реализация АСС по магнитным свойствам во многом определяется автоматическим устройством контроля. Поэтому были рассмотрены требования и предложена методика расчета погрешности контроля магнитных характеристик по критерию ошибок первого и второго рода.

Оценку влияния отклонения магнитных характеристик деталей от заданных, а также назначение приемлемых границ групп допусков $[\lambda_{is}, \pi_{is}]$ величин влияния для обеспечения требуемых характеристик электромагнитов осуществляется на основе моделирование магнитного состояния деталей электромагнитов.

Электромагниты относятся к сложным электротехническим устройствам, технические и эксплуатационные характеристики которых определяются электромагнитной цепью, конструкцией, геометрическими размерами, используемыми материалами и другими параметрами. Выполненный анализ методов моделирования тяговой характеристики электромагнита показал, что целесообразно использовать математическое моделирование на модели, построенной на основе теории электромагнитного поля. Она позволяет с высокой точностью определять тяговую силу F в результате рассмотрения поля в ферромагнитных телах и окружающем их пространстве как результат сложения поля, создаваемого внешними источниками, и поля, создаваемого объемными и поверхностными молекулярными токами ферромагнетика. В ходе реализации таких моделей выполняется численный расчет магнитного поля, который приводит к значительным затратам. Увеличивается время определения тяговой силы F , требуется вычислительные средства большой мощности. Это является основным препятствием применения таких моделей для селективной сборки электромагнитов. Однако многие конструкции электромагнитов имеют пространственную конфигурацию, позволяющую выполнять расчет магнитного поля в двумерной постановке: сведению, в общем случае объемного магнитного поля, к

плоскопараллельному или к плоскомеридианному. Это позволяет снизить указанные затраты. Следует отметить, что для решения поставленной задачи нет необходимости знать распределение силы по выделенному объему, а требуется определить только результирующую силу, действующую на объем. Поэтому сила \bar{F} , действующая на объем V в магнитном поле, может быть найдена путем суммирования элементарных сил $d\bar{F} = \bar{T}_n dS$, приложенных к элементам поверхности S , охватывающей объем V

$$\bar{F} = \oint_S \bar{T}_n dS_z, \quad (1)$$

где \bar{T}_n – вектор натяжения, $\bar{T}_n = \bar{T}_{nn} + T_{n\tau}$, \bar{T}_{nn} – нормальная составляющая натяжения, $\bar{T}_{nn} = \bar{n} (B_n^2 - B_\tau^2) / (2\mu)$; $\bar{T}_{n\tau}$ – тангенциальная составляющая натяжения, $\bar{T}_{n\tau} = (B_n B_\tau) / \mu$; $\bar{B}_n = \bar{n} B_n$ – нормальная составляющая магнитной индукции; $\bar{B}_\tau = \bar{\tau} B_\tau$ – тангенциальная составляющая магнитной индукции; $\bar{n}, \bar{\tau}$ – внешние нормальная и тангенциальная составляющие к элементу поверхности dS , на котором определяется натяжение; μ – магнитная проницаемость материала.

Уравнения магнитного поля (уравнения Максвелла), уравнение (1), магнитные характеристики материала деталей образуют математическая модель тяговой характеристики электромагнита. Возможность применения модели для селективной сборки исследовалось экспериментально. Определялось изменение тяговой силы от изменения магнитных свойств материала деталей электромагнита, показанного на рис. 3. В предложенной модели изменялись параметры основной кривой намагничивания материала деталей. Выбор диапазона изменения параметров обусловлен несовершенством технологического процесса изготовления деталей и для максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} и магнитной индукции насыщения B_s не превышает $\pm 20\%$. Как следует из рис. 4 – 7 (1 – вариация B_s, μ_{\max} материала якоря, 2 – вариация B_s, μ_{\max} материала втулки, 3 – вариация B_s, μ_{\max} материала корпуса) существует значительная зависимость тяговой силы от изменения параметров B_s и μ_{\max} . В большей степени на тяговую силу оказывает влияние μ_{\max} – максимальное изменение тяговой силы наблюдается для втулки. Относительное изменение тяговой силы δF составило от -27 до $+61$ процента. Изменение B_s для этой конструкции электромагнита оказывает меньшее влияние. Для втулки δF составило от -7 до $+6$ процентов.

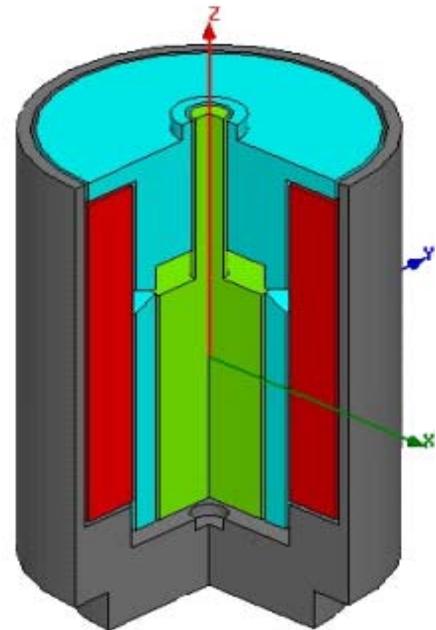


Рис.3. Внешний вид электромагнита

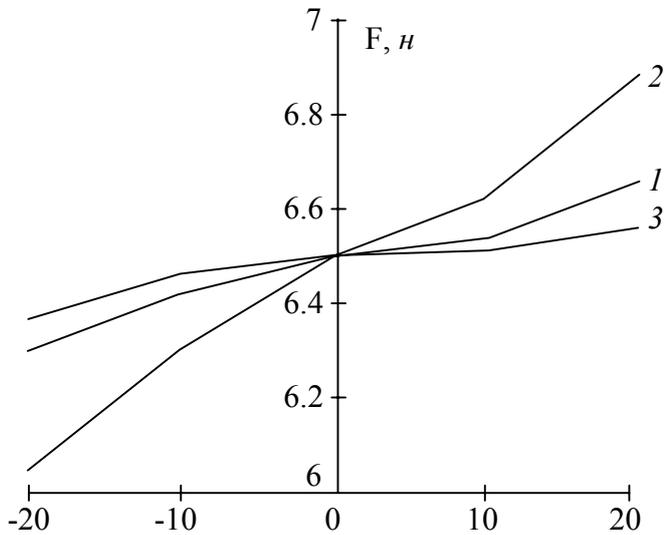


Рис.4. Зависимость тяговой силы от относительного изменения B_s материала деталей

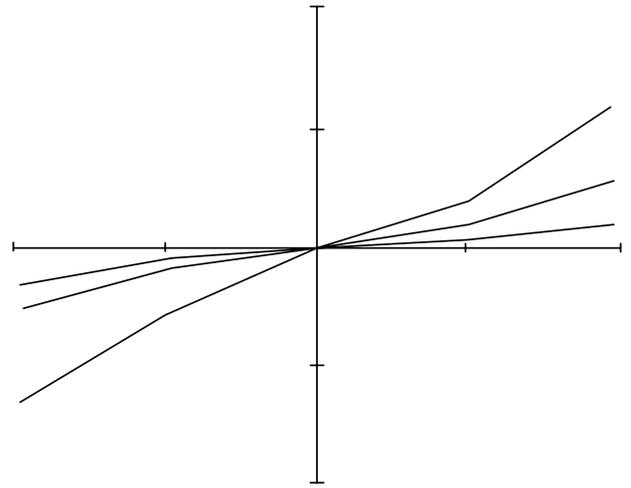


Рис.5. Относительное изменение тяговой силы от относительного изменения B_s материала деталей

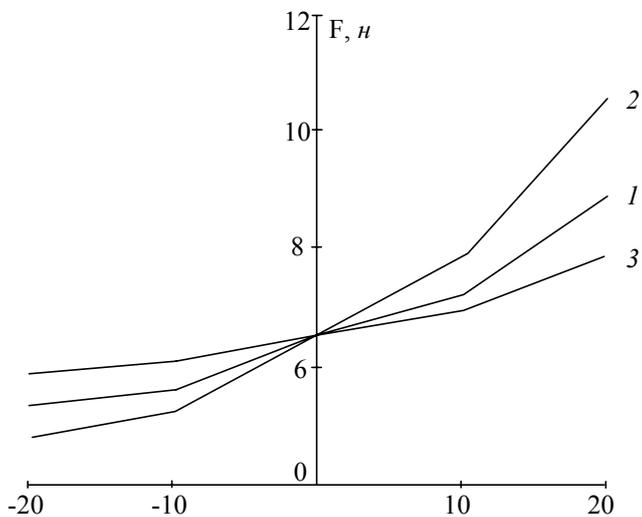


Рис.6. Зависимость тяговой силы от относительного изменения μ_{\max} материала деталей

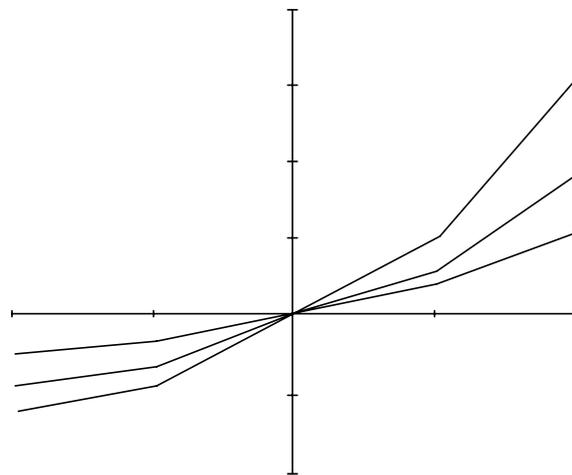


Рис.7. Относительное изменение тяговой силы от относительного изменения B_s материала

деталей
 $\delta B, \%$

Исследования показали, что предложенная математическая модель тяговой характеристики электромагнита позволяет реализовать метод селективной сборки по магнитным характеристикам. Хорошие результаты моделирования достигаются даже в случае упрощенного представления изменения характеристики материала – изменением параметров B_s и μ_{\max} . Учет изменения всей характеристики (основной кривой намагничивания) позволит построить более адекватную модель тяговых

характеристик. Однако требует хранить большой объем информации. Для его оптимизации предлагается использовать описание семейства основных кривых намагничивания с помощью метода главных компонент.

Координаты точек основных кривых намагничивания (ОКН) $B(H)$ в силу зависимости магнитных параметров от многих технологических режимов и не учитываемых случайных помех, а так же наличия случайной составляющей погрешности измерения, можно считать случайными величинами. Исходя из этого, каждую ОКН можно рассматривать как вектор, сформированный следующим образом: на ОКН для фиксированных значений напряжённости H_i определяются значения индукции $B_1(H_i)$, которые и являются элементами вектора B_1 . Таким же образом формируются векторы и для остальных ОКН семейства, причём значения индукции определяются при тех же значениях напряжённости. Полученные таким образом вектора записываются в одну матрицу B , размерности $n \times k$, где n количество фиксируемых точек, а k число исследуемых кривых

$$B = \begin{bmatrix} B_1(H_1) & B_2(H_1) & \cdots & B_i(H_1) & \cdots & B_k(H_1) \\ B_1(H_2) & B_2(H_2) & \cdots & B_i(H_2) & \cdots & B_k(H_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_1(H_i) & B_2(H_i) & \cdots & B_i(H_i) & \cdots & B_k(H_i) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_1(H_n) & B_2(H_n) & & B_i(H_n) & & B_k(H_n) \end{bmatrix}.$$

Для нахождения ковариации определяется вектор выборочных средних по строкам \bar{B} . Следующим шагом определяются отклонения от среднего для каждого наблюдения и сводятся эти отклонения в матрицу F , каждый элемент которой формируется по формуле

$$f_{ij} = B_j(H_i) - \bar{B}_j; \quad i=1 \div n \quad j=1 \div k.$$

Затем определяются вектор характеристических чисел λ , и матрица характеристических векторов β матрицы S

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}; \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{21} & \cdots & \beta_{n1} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{1n} & \beta_{2n} & \cdots & \beta_{nn} \end{bmatrix}.$$

Используя полученные матрицы, находится матрица главных компонент

$$Z = \beta^T \cdot B.$$

Главные компоненты упорядочиваются в соответствии со значимостью, затем используется критерий восстановления характеристик и малозначимые компоненты отбрасываются.

Предложенный метод позволяет сократить массив семейства ОКН (рис. 8, а)) до массива семейства ОКН после выделения главных компонент (рис. 8, б)), и, следовательно, обеспечить оптимальную классификацию деталей электромагнитов.

Разработан алгоритм селективной сборки электромагнитов, позволяющий реализовать метод сборки на основе моделирования тяговых характеристик. Алгоритм, состоит из следующих этапов.

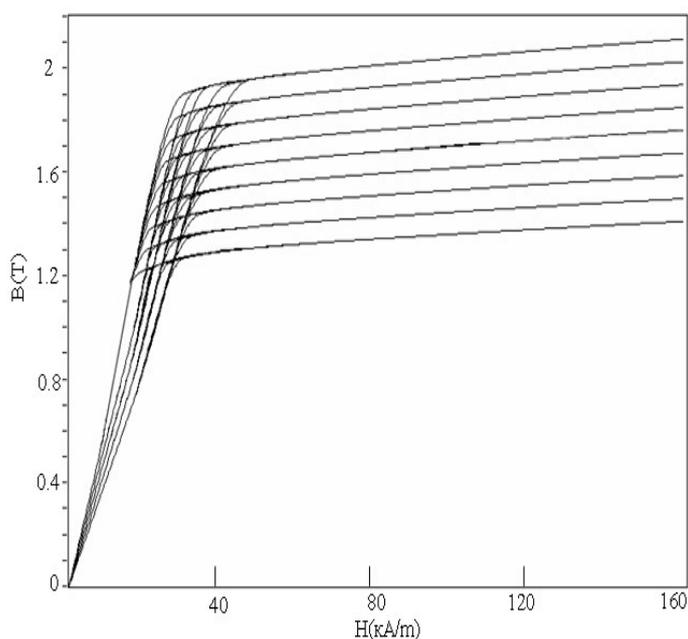


Рис.8 а) Исходное семейство основных кривых намагничивания кроме номинальных, принимали значения $\mu \pm 20\%$ и $\mu \pm 10\%$ от номинала при значении $B \pm 20\%$; $\pm 15\%$; $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$

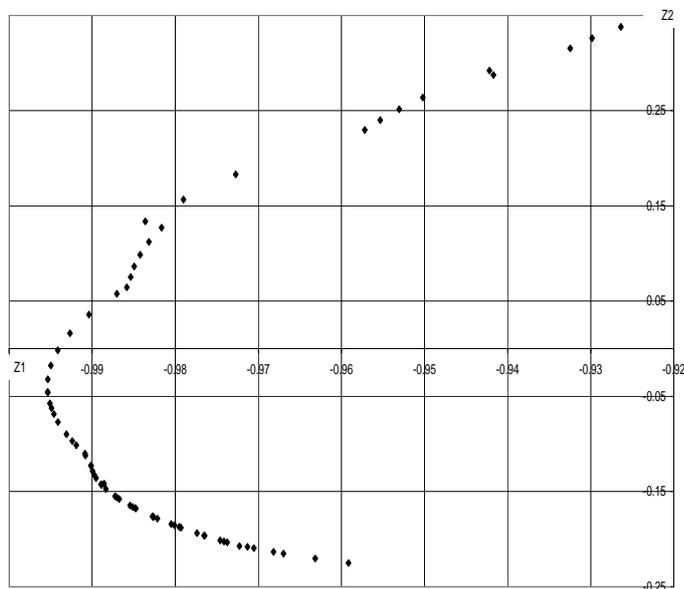


Рис.8.б) Семейство основных кривых намагничивания (кроме номинальных, принимали значения $\mu \pm 20\%$; $\pm 15\%$; $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ от номинала при значении $B \pm 20\%$; $\pm 15\%$; $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ от номинала) после выделения главных компонент Z_1 и Z_2

Этап 1. С учетом возможных разбросов величин влияния – основных кривых намагничивания материала деталей определяют максимальные диапазоны их изменений. Применяя метод главных компонент, оптимизируют объемы хранимой статистической информации – вариации основных кривых намагничивания. Выделяют наиболее информативные компоненты. Исходя из метрологических характеристик устройств контроля магнитных свойств деталей, определяют границы групп допусков $[\lambda, \pi]$ по полученным компонентам для обеспечения требуемых функциональных допусков δF признака качества F .

Этап 2. Для каждой комбинации групп допусков деталей T осуществляют моделирование тяговых характеристик электромагнита. По результатам моделирования строят таблицу годности изделий.

Этап 3. Выполняют контроль деталей электромагнитов с сортировкой на группы допуска. Операция сборки, обеспечивающая максимальный выход годных электромагнитов начинается с любой детали классификационного уровня, на котором находится их максимальное количество. В качестве пары выбираются с учетом таблицы годности деталь также соответствующая классификационному уровню с максимальным количеством деталей.

Этап 4. По результатам контроля деталей и сборки электромагнитов

определяют изменение распределения действительных значений величин влияния вследствие вариации характеристик процесса изготовления – математического ожидания $\Delta\mu$ и среднеквадратического отклонения $\Delta\sigma$ и осуществляют корректировку технологического процесса.

Приведен пример реализации алгоритма. Анализ полученных результатов показывает, что применение селективной сборки позволяет увеличить выход годных изделий на семьдесят процентов.

В третьей главе показано, что для выполнения селективной сборки электромагнитов необходимо определять магнитные характеристики материала деталей путем их испытания деталей в не полностью замкнутой магнитной цепи. Анализ известных методов показал, что определение характеристик материала деталей в таких магнитных цепях в виде зависимости $B = f(H)$ в общем случае затруднительно т.к. задача определения характеристик материала деталей плохо обусловлена. Решить проблему позволяют натурно-модельные испытания деталей.

Рассмотрены особенности натурно-модельного метода в условиях массового производства и определены требования к средствам измерения и моделирования стационарного магнитного поля. В результате обзора и анализа известных моделей и методов расчета магнитного поля установлено, что известные модели и методы расчета не достаточно эффективны при решении задач моделирования в системах с не-полностью замкнутой магнитной цепью.

Выбор математической модели и метода расчета магнитного поля обусловлен особенностью магнитной системы установки: ее геометрическими размерами; границами магнитных полей; характером поля (плоскопараллельное, плоскомеридианное, трехмерное), а также свойствами испытуемых деталей и их геометрическими размерами. Основными критериями выбора модели являются требуемые точностью и время определения статических магнитных характеристик (СМХ) деталей электромагнитов в условиях массового производства. Первый параметр обусловлен требованием метода селективной сборки – погрешность определения СМХ не должна превышать 5%. Второй – необходимостью испытания всей номенклатуры деталей электромагнитов во временном режиме, достаточном для безостановочной работы автоматизированных линий производства электромагнитов (1000 деталей в час). Критерию выбора модели поля магнитной системы электромагнита отвечает математическая модель, построенная на основе дифференциальных уравнений с частными производными.

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial A_1}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_1}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial A_1}{\partial r} - \frac{A_1}{r^2} = \begin{cases} 0 & \text{в } S_e - S_k; \\ -\mu_0 J_k & \text{в } S_k; \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu r} \frac{\partial (A_2 r)}{\partial r} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где A_1 – векторный магнитный потенциал в области S_e , не занятой ферромагнетиками; A_2 – векторный магнитный потенциал в области ферромагнетиков S_m ; J_k – плотность тока в намагничивающей катушке S_k .

Для реализации модели в системах со сложной конфигурацией рекомендуется использовать МКЭ. Но, для обеспечения малой погрешности расчета магнитного поля, необходимо формировать конечно-элементную сетку с большим количеством элементов. Это увеличивает время расчета и, следовательно, снижает быстродействие устройства контроля СМХ деталей электромагнитов.

Путь к решению проблемы быстродействия заложен в самом методе натурно-модельных испытаний. Эксперимент и моделирование могут применяться поочередно с одновременным усложнением или эксперимента или математических моделей. Для достижения одной и той же погрешности определения СМХ материала деталей можно, например, упростить условия и аппаратуру эксперимента, усложнив расчет магнитного поля системы и наоборот.

Учитывая это, предлагается комбинированная модель магнитного поля. Ее суть заключается в следующем – измеряется магнитный поток по границе исследуемой области, а затем расчетным путем МКЭ определяются характеристики магнитного поля во всей области.

Сокращение размерности системы уравнений (2) возможно путем оптимизации области расчета. Для этого вводятся граничные условия. Предлагается использование граничных условий Дирихле. Для плоскомеридианных магнитных полей с использованием векторного потенциала выражение их можно представить в следующем виде

$$A = (A_0 + A_1 r + A_2 z) e^{j\varphi}. \quad (3)$$

Условия Дирихле предполагают, что магнитный поток Φ параллелен границам. В свою очередь магнитный поток Φ , сцепленный с замкнутым контуром, ограничивающим поверхность S , связан с магнитным векторным потенциалом соотношением

$$\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{S} = \int_S \text{rot} \bar{A} d\bar{S}.$$

По теореме Стокса $\int_S \text{rot} \bar{A} d\bar{S} = \oint_L \bar{A} d\bar{l}$, поэтому $\Phi = \oint_L \bar{A} d\bar{l}$. В плоскомеридианном

поле векторный потенциал можно выразить через магнитный поток, сцепленный с кольцевым контуром, плоскость которого нормальна оси z . Беря циркуляцию векторного потенциала по замкнутому круговому контуру, проходящему через точку $Q(r, z)$, и учитывая, что векторный потенциал имеет лишь одну составляющую, совпадающую с касательной к этому контуру $A = A_\varphi$, Φ и A связаны формулой $\Phi = 2\pi r_Q A(Q)$. Таким образом, экспериментально определив магнитный поток по линиям характерных сечений граничных поверхностей можно

определить по формуле (3) граничные условия, позволяющие сократить область расчета и тем самым увеличить быстродействие устройства контроля СМХ.

Исследования показали, что для обеспечения малой погрешности расчета магнитного поля достаточно трех измерительных катушек. Их расположение схематично показано на рис. 9, где ИО – испытуемый образец; Я – ярмо; НК – намагничивающая катушка; ИК_В – измерительная катушка магнитной индукции; ИК_{г1}, ИК_{г2}, ИК_{г3} – измерительные катушки граничных условий; ПН – преобразователь напряженности магнитного поля. В этом случае расчетная область представляет собой пространство, ограниченное коаксиальными цилиндрическими и торцевыми поверхностями по месту расположения ИК_{г1}, ИК_{г2}, ИК_{г3}.

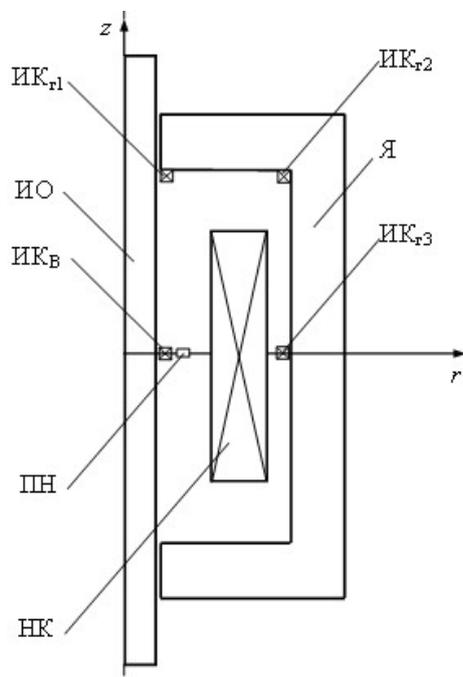


Рис.9. Магнитная система устройства контроля СМХ

Соотношения (2), (3), и характеристики $B = f(H)$ образуют комбинированную математическую модель магнитного поля магнитной системы для устройства контроля СМХ деталей электромагнитов. Применение этой модели позволяет эффективно рассчитывать параметры магнитного поля методом конечных элементов.

С целью проверки предложенной математической модели и возможности практического применения МКЭ были проведены измерительные и вычислительные эксперименты.

Для экспериментов использовалась магнитная система, показанная на рис. 9. Измерялись магнитные потоки с помощью измерительных катушек: ИК_В – в центральном сечении испытуемого образца; ИК_{г1}, ИК_{г2}, ИК_{г3} – в районе задания граничных условий. Магнитная индукция определялась по формуле $B = \Phi_B / S_{обр}$, где Φ_B – магнитный поток в катушке ИК_В, $S_{обр}$ – площадь сечения катушки ИК_В. Напряженность магнитного поля измерялась преобразователем Холла HAL815 фирмы *Micronas* (ПН) у поверхности образца в районе его центрального сечения при значениях напряженности магнитного поля H_e создаваемая намагничивающей катушкой, обеспечивающих изменение магнитного состояния образца от размагниченного состояния до насыщения. Погрешность измерения магнитного потока и напряженности магнитного поля не превышала соответственно 0,5% и 1%. Магнитная индукция определялась по формуле $B = \Phi / S_{обр}$, $S_{обр}$ – площадь этого сечения. Вычисления магнитной индукции и напряженности магнитного поля выполнялись также в районе расположения измерительных преобразователей ИК_В и ПН.

На рис. 10.а) показана магнитная система с конечно-элементной сеткой без

задания граничных условий с использованием экспериментальных данных. Сетка строилась исходя из того, что количество элементов должно обеспечить требуемую точность расчета магнитного поля при реализации натурно-модельного метода. На рис. 10.б) приведена магнитная система с конечно-элементной сеткой с заданием граничных условий с использованием экспериментальных данных.

Благодаря введению новых граничных условий количество конечных элементов уменьшено с 33350 до 24126.

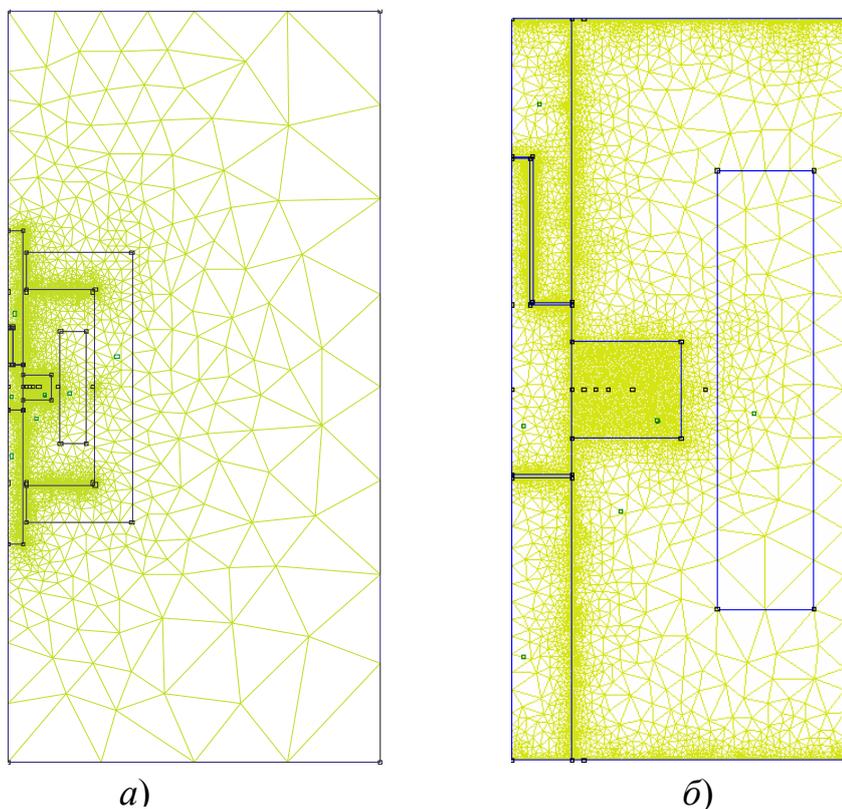


Рис. 10. Магнитная система с конечно-элементной сеткой

Анализ результатов показывает, что время определения ОКН при введении граничных условий на основе экспериментальных данных равно 85 сек, что на 41 % меньше времени расчета в системе на 10.а). Так как система (рис.10) имеет плоскостную асимметрию, то анализировались результаты, полученные с одинаковыми (симметричными) граничными условиями по торцовым краям магнитной системы и данные с расчетами, полученными с несимметричными гранич-

ными условиями. В последнем случае вводились измерительные катушки ИКг1с, ИКг2с, расположенные зеркально относительно оси r , катушкам ИКг1, ИКг2. На рис. 11 показаны графики относительной погрешности определения ОКН для случая симметрии (1) и асимметрии (2) в зависимости от МДС. Следовательно, в ходе эксперимента достаточно измерять магнитный поток, не учитывая асимметрию магнитной системы. Это позволит сократить число измерительных катушек для

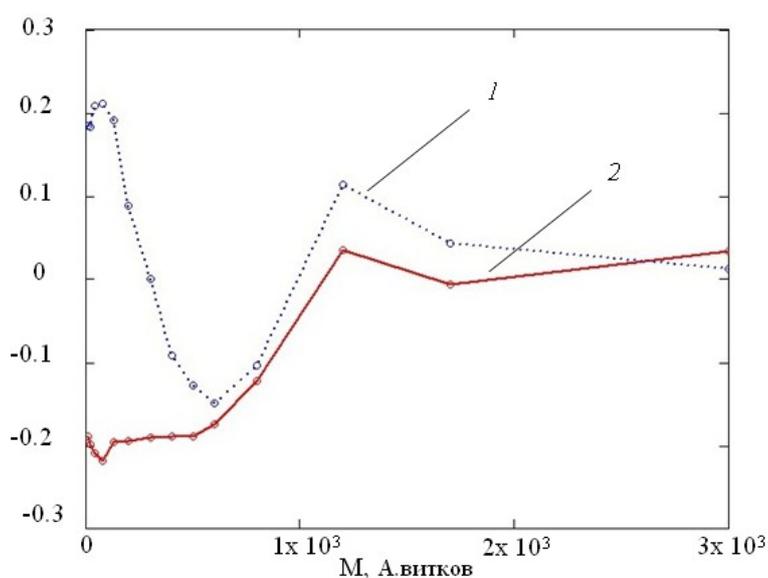


Рис.11. Погрешности расчета основной кривой намагничивания для случая симметрии и асимметрии граничных условий

получения экспериментальных данных, необходимых для задания граничных условий.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная комбинированная модель позволяет эффективно решать задачи моделирования при определении статических магнитных характеристик натурно-модельным методом.

В **четвертой** главе рассматривается разработанное автоматическое устройство активного технологического контроля (АУК) магнитных свойств деталей электромагнитов. Показано, что современные АСУТП включают целый ряд автоматизированных систем различных уровней системной организации, функционирующих в реальном масштабе времени. Все большую роль играют системы на базе персональных компьютеров (ПК). К ним относится разработанное АУК. Разработка таких устройств, относящихся к аппаратно-программным комплексам сложная и трудоемкая задача. Она решена благодаря использованию оборудования фирмы National Instruments (NI), предлагающий широкий спектр устройств ввода-вывода информации, позволяющих решить практически любые задачи оцифровки измерительных сигналов и формирования аналоговых сигналов управления. В сфере технологий разработки программного обеспечения использовалась среда визуального и графического программирования LabVIEW NI, позволяющая реализовать концепцию виртуальных приборов. Структурная схема устройства приведена на рис.12, внешний вид экспериментального устройства – на рис.13.

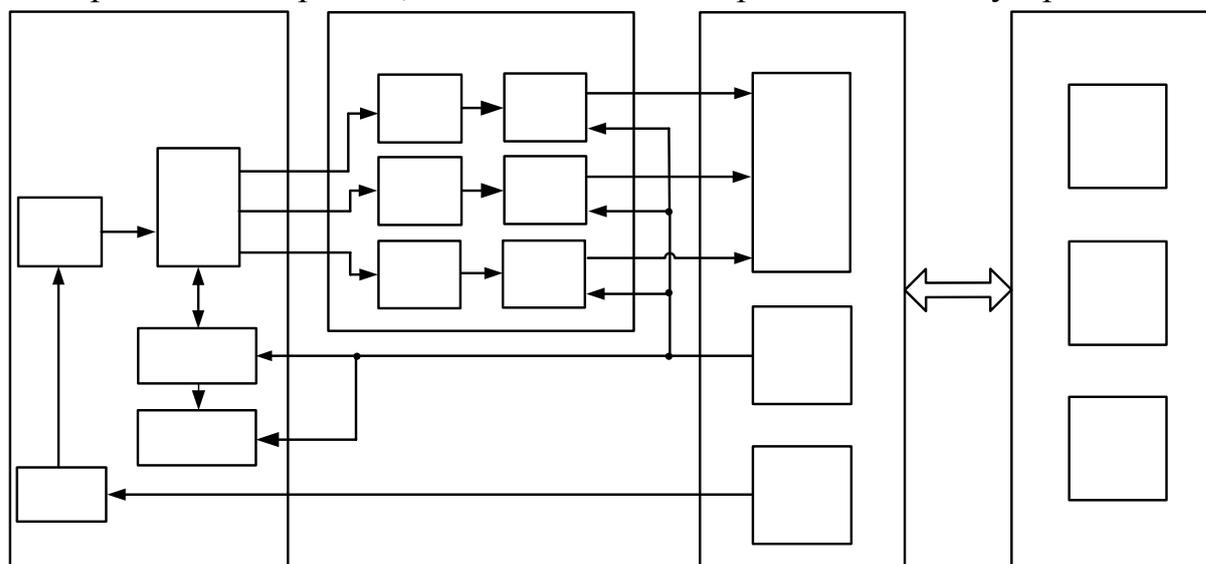


Рис. 12. Структурная схема устройства

АУК работает следующим образом. Очередная испытуемая деталь (ИД) с помощью механизма подачи и разбраковки деталей (МПИР) загружается в измерительную позицию в намагничивающей системе (НС). Ток, создаваемый управляемым источником тока (УИТ), обеспечивает перемагничивание ИИ в соответствии с программой испытаний при максимальном быстродействии, что повышает производительность устройства контроля.

Сигналы, пропорциональные изменению магнитной индукции в центральном

сечении ИД, магнитного потока на границе области расчета магнитного поля и напряженности магнитного поля у поверхности ИД, с измерительных катушек магнитной индукции (ИКИ), магнитного потока (ИКП) и преобразователя напряженности (ПН) поступают на входы усилители каналов измерения магнитной индукции (УИ), магнитного потока (УП) и напряженности магнитного поля (УН), где усиливаются и затем подаются на аналоговые входы интерфейсной платы NI USB

6251, в которую входят аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый (ЦАП) преобразователи, блок цифрового ввода/вывода (ЦВВ). Управление процессом перемagnetивания и ввод измерительной информации о напряженности магнитного поля и скорости изменения магнитной индукции и магнитного потока в ИД осуществляется при помощи блоков АЦП/ЦАП интерфейсной платы NI USB 6251.

Экспериментально полученная магнитная характеристика детали $B(H)_э$ методом натурно-модельного эксперимента преобразуется в магнитную характеристику материала детали $B(H)_м$ (подпрограмма «Моделирование магнитных свойств материала» (МСМ)). Далее с помощью подпрограммы «Классификация магнитных характеристик» (КМХ) все детали разделяются на группы по уровню магнитных свойств материала. Подпрограмма «Моделирование эксплуатационных характеристик электромагнитов» (МЭХ) осуществляет подбор комплектов деталей электромагнита, обеспечивающего заданные эксплуатационные характеристики и выдает управляющий сигнал в модуль селективной сборки (МСС).

Программная часть прибора выполнена в графической среде программирования LabVIEW и позволяет: создать интегрированную среду для сбора и обработки данных о магнитном состоянии ИД, моделирование магнитных характеристик материала испытуемого изделия, а также управления работой средств автоматизации процесса испытаний. АУК входит в состав АСУТП производства электромагнитов. В цеховых условиях на работу электронной аппаратуры оказывает значительное влияние действие электромагнитных помех. Оно особенно критично для измерительных каналов устройства контроля. Для решения этой проблемы, на основании проведенных исследований, в программном обеспечении устройства создана подпрограмма цифровой фильтрации измерительных сигналов магнитной индукции, магнитного потока и напряженности магнитного поля.



Рис. 13. Внешний вид экспериментального устройства для контроля магнитных свойств деталей

Метрологические испытания АУК показали, что устройство позволяет с погрешностью не более 3% и высокой производительностью – не менее 1000 деталей в час, определять характеристики деталей электромагнитов, сортировать их на группы для последующей сборки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Повышение качества электромагнитов – актуальная проблема, одним из путей решения которой является внедрение современных автоматизированных систем управления технологическим процессом их изготовления, позволяющих реализовать селективную сборку изделий по магнитным характеристикам материала деталей электромагнитов.

2. Перспективным направлением решения данной проблемы является создание автоматического устройства контроля для получения необходимой в процессе производства измерительной информации о магнитных свойствах деталей электромагнитов. Разработан новый метод селективной сборки, основанный на учете зависимости тягового усилия от магнитных свойств деталей электромагнита, полученной путем моделирования состояния электромагнита в рабочих условиях его эксплуатации. Анализ и анализ методов моделирования тяговой характеристики электромагнита показал, что математические модели, построенные на основе теории электромагнитного поля, наиболее адекватно отражают процессы, проходящие в электромагните. Применение для описания величины влияния – основной кривой намагничивания позволяет повысить точность определения тяговых характеристик, но требует хранить большой объем информации. Для его оптимизации предложено использовать описание семейства этих характеристик с помощью метода главных компонент.

6. Разработан алгоритм селективной сборки электромагнитов, позволяющий реализовать метод сборки на основе моделирования тяговых характеристик. Приведен пример реализации алгоритма. Анализ полученных результатов показал, что применение селективной сборки позволяет увеличить выход годных изделий на семьдесят процентов.

7. Анализ известных методов показал, что определение характеристик материала деталей в полностью замкнутой магнитной цепи в виде зависимости $B = f(H)$ в общем случае затруднительно. При проведении испытаний ферромагнитных деталей в таких магнитных цепях задача определения характеристик материала изделий плохо обусловлена. Для решения этой проблемы предлагается использовать натурно-модельный метод.

8. В результате обзора и анализа моделей и методов расчета магнитного поля установлено, что известные модели и методы расчета не достаточно эффективны при решении задач моделирования в системах с полностью замкнутой магнитной цепью.

9. Разработана новая комбинированная математическая модель магнитного поля на основе дифференциальных уравнений с частными производными, базирующаяся на измерении магнитного потока по границе исследуемой области и

последующим расчетом характеристик магнитного поля во всей области. Применение модели позволяет с высоким быстродействием и точностью рассчитывать параметры магнитного поля методом конечных элементов.

10. Разработано автоматическое устройство контроля магнитных характеристик материала деталей, предназначенное для автоматизированных систем управления технологическим процессом изготовления электромагнитов. Случайная погрешность контроля магнитных параметров при доверительной вероятности 0,95 не превышает ± 3 %. Производительность устройства 1000 деталей в час. Его применение позволяет повысить качество продукции и получить значительный экономический эффект.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.* **Кьонг, Н.М.** Метод селективной сборки на основе моделирования магнитного состояния деталей электромагнитов / Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спецвыпуск: Проблемы мехатроники – 2009. – С. 110-112.

2.* **Кьонг, Н.М.** Построение устройств измерения магнитных характеристик изделий из ферромагнитных материалов с использованием технологии National Instruments / Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спецвыпуск: Информационно-измерительная техника и технологии. – С. 56-59.

3.* **Кьонг, Н.М.** Using digital filters of Labview in measuring techniques / Н. М. Кьонг // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2010. – №2. – С. 24-26.

4. **Кьонг, Н.М.** Аппаратно-программный комплекс для испытания постоянных магнитов на платформе National Instruments // Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг // XVII Междунар. конф. по постоянным магнитам, Суздаль, 21-25 сент. 2009 г.: тез. докл. – М., 2009. – С. 144-145.

5. **Горбатенко, Н.И.** Измерения магнитных величин в микроэлектромеханических системах / Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг, Е. Калленбах, Й. Баумбах // 53 Междунар. науч. colloquium: материалы конф. – Ильменау, 2008. – С. 215 – 216

6. **Кьонг, Н.М.** Устройство активного технологического контроля магнитных параметров изделий из ферромагнитных материалов / Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сборник трудов VII науч.-практич. конф.: Москва, 28-29 ноября 2008 г. – М.:РУДН, 2008. – С. 51-52.

7. **Горбатенко, Н.И.** Натурно-модельные испытания постоянных магнитов / Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг [и др.] // XVII Междунар. конф. по постоянным магнитам, Суздаль, 21-25 сент. 2009 г.: тез. докл. – М., 2000. – С. 128-129.

8. **Гречихин, В.В.** Моделирование магнитных систем в натурно-модельном эксперименте / Ю.А. Бахвалов, Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кьонг // XVII Междунар. конф. по постоянным магнитам, Суздаль, 21-25 сент. 2009 г.: тез. докл. – М., 2009. – С. 188-189.

9. **Гречихин, В.В.** Комбинированные модели электромагнитных полей микроэлектромеханических систем / Ю.А. Бахвалов, Н.И. Горбатенко, В.В. Гречихин, Н.М. Кыонг // 53 Междунар. науч. colloquium: материалы конф. – Ильянау, 2008. – С. 213 – **Ю. Свид. об оф. рег. прогр. для ЭВМ 2010613416 Российская Федерация** Определение магнитных характеристик изделий из ферромагнитных материалов натурно-модельным методом / Кыонг Н.М., Гречихин В.В., Горбатенко Н.И.; Роспатент. – № 2010613416; заявл. 29.03.2010; зарег. 24. 05.2010.

Символом * отмечены работы в рецензируемом научном журнале, входящем в перечень ВАК.

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах: [1] – идея использования магнитных характеристик для селективной сборки; [2,6,4] – разработка функциональной и принципиальной схемы, изготовление макетного образца, проведение экспериментальных исследований; [8,9] – построение дискретной модели и алгоритма реализации; [5,7] – проведение экспериментальных исследований; [10] – разработка программного обеспечения.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ

Автореферат

Подписано в печать __.09.2010.

Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Издательство ЮРГТУ (НПИ)

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

тел., факс (863-52) 5-53-03