

**На правах рукописи**



**КАРПУХИН Эдуард Владимирович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
НАКЛАДНЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ**

**Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**ПЕНЗА – 2012**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия» на кафедре «Электроника и электротехника».

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор  
**Демин Станислав Борисович.**

**Официальные оппоненты:** **Михайлов Петр Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ЗАО «НИИФИ и ВТ», г. Пенза,  
научный сотрудник;  
**Белоусов Евгений Федорович,**  
кандидат технических наук, профессор,  
директор ФГОУ СПО «Пензенский  
государственный политехнический  
колледж».

**Ведущая организация** – ОАО «Электромеханика», г. Пенза.

Защита диссертации состоится 06 июня 2012 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 при Пензенской государственной технологической академии по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия».

Автореферат разослан 04 мая 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**Чулков Валерий Александрович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие химической и добывающей промышленности требует совершенствования приборов для измерения уровня (уровнемеров) жидких сред. Основными требованиями к уровнемерам остаются высокие точность, разрешающая способность и быстродействие, возможность работы с агрессивными средами, низкая себестоимость изготовления и высокая надежность в эксплуатации.

Большинство известных уровнемеров, использующих разные физические принципы функционирования, предназначены для работы в составе систем автоматического учета (САУ) жидких сред.

В ряде отраслей химического производства при выборе метода физического измерения уровня жидких сред учитывается химическое влияние среды на контактируемые элементы проектируемого уровнемера. Поэтому при работе с подобными средами предпочтительным является применение бесконтактных методов измерения уровня, которые, однако, не всегда обеспечивают требуемые технические характеристики.

Анализ современного состояния техники в данной области выявляет определенные преимущества ультразвуковых уровнемеров, использующих явление продольной магнитострикции, где в качестве носителей информации об уровне жидкой среды выступают упругие ультразвуковые волны (УЗВ) кручения. Такие уровнемеры получили название магнитострикционных преобразователей уровня (МПУ).

Применение магнитострикционных уровнемеров является наиболее перспективным из-за широкой области их возможного применения, высоких технических и эксплуатационных показателей, относительно низкой себестоимости изготовления. По принципу построения они являются аналого-цифровыми приборами и легко интегрируются в различные САУ.

Указанные достоинства объясняют все более широкое применение МПУ в различных отраслях зарубежной и отечественной промышленности. Разработкой и производством МПУ занимаются крупные зарубежные и отечественные компании, такие как MTS Systems Corporation Sensors Division (США), MTS Sensors Technology Corporation Ushikubo Bldg (Япония), MTS Sensor Technologie GmbH & Co KG (Германия), ЗАО ПТФ «НОВИПТЕХ» (г. Королев, Московская область), НПП «СЕНСОР» (г. Заречный, Пензенская область), ЗАО «Росприбор» (г. Москва) и др. Весомый вклад в развитие отечественной измерительной магнитострикционной техники внесли такие известные ученые, как Э.А. Артемьев, С.Б. Демин, А.И. Надеев, Б.С. Петровский, С.В. Петровых, О.Н. Петрищев, В.С. Шпинь, В.Х. Ясовеев и др. Разработки этих ученых позволили создать магнитострикционные приборы различного назначения, способные выдерживать конкуренцию с импортными аналогами и занять достойное место на российском рынке.

Разработка новых и усовершенствование имеющихся математических методов моделирования МПУ является важной и актуальной задачей, решение которой необходимо для развития российской промышленности и продвижения оте-

чественной продукции на мировой рынок. Настоящая диссертация посвящена решению указанной задачи путем разработки новых методов математического моделирования и всестороннего исследования моделей нового вида ультразвуковых приборов уровня – накладных МПУ (НМПУ) на УЗВ кручения. Это позволит улучшить их технические и эксплуатационные показатели, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким физическим экспериментам на этапе проектирования.

**Объект исследования** – накладные магнитострикционные преобразователи уровня на ультразвуковых волнах кручения.

**Предмет исследования** – математические модели магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня, обеспечивающие адекватное представление процессов возбуждения и считывания акустических волн в условиях влияния факторов технологического объекта.

**Целью диссертационной работы** является математическое моделирование магнитных полей нового подкласса приборов – накладных магнитострикционных преобразователей уровня, разработка эффективных численных методов и комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента, направленных на их совершенствование.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи.

1. Анализ современного состояния исследований в области математического моделирования магнитных полей магнитострикционных преобразователей уровня с целью уточнения моделей.

2. Проведение математического моделирования магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня с учетом факторов влияния технологического объекта.

3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных численных методов расчета магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня.

4. Создание комплекса проблемно-ориентированных программ с использованием эффективных численных методов для проведения вычислительного эксперимента накладных магнитострикционных преобразователей уровня.

5. Проведение комплексных исследований моделей накладных магнитострикционных преобразователей уровня, направленных на их совершенствование.

**Методы исследований** – методы математического моделирования и вычислительной математики, математического анализа и теории поля, теории магнитных цепей. Численные расчеты магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня выполнены с использованием прикладных пакетов систем компьютерной математики MATLAB v.7.8, ELCUT v.5.

#### **Научная новизна работы**

1. Впервые выполнено математическое моделирование магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня с учетом факторов влияния технологического объекта, позволяющее улучшить их технические и

эксплуатационные характеристики, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам.

2. Создана методика моделирования магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня на основе анализа их магнитных цепей.

3. Предложен эффективный численный метод расчета магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня и методика получения их непрерывных характеристик, обеспечивающая высокую производительность при заданной точности.

4. Разработан комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента накладных магнитострикционных преобразователей уровня, учитывающий их конструктивные особенности.

#### **Практическая значимость работы**

1. Разработанные вычислительные процедуры и алгоритмы программного комплекса позволяют проводить вычислительный эксперимент накладных магнитострикционных преобразователей уровня на ультразвуковых волнах кручения, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам.

2. Использование результатов математического моделирования магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня с применением эффективных численных методов позволяет оценивать влияние факторов технологического объекта и обеспечить условия уверенного возбуждения и считывания акустических сигналов, указать пути повышения эффективности магнитострикционных преобразователей.

3. Результаты комплексных исследований накладных магнитострикционных преобразователей уровня могут быть использованы при создании ультразвуковых приборов измерения механических величин, на основе эффектов продольной магнитострикции.

#### **Внедрение результатов работы**

Основные результаты исследований внедрены на промышленном предприятии ОАО “Пензтяжпромарматура” для модернизации гальванического оборудования. Методика моделирования магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня использована в учебном процессе кафедры “Электроника и электротехника” Пензенской государственной технологической академии при реализации основных профессиональных образовательных программ.

#### **Достоверность результатов работы**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математических методов моделирования, малой вычислительной погрешностью использованных численных методов, внедрением на промышленном предприятии, апробацией на всероссийских и международных научных конференциях.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты математического моделирования магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня на ультразвуковых волнах кручения.

2. Эффективный численный метод расчета магнитных полей накладных магнитострикционных преобразователей уровня и методика получения их непрерывных характеристик.

3. Комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента над накладными магнитострикционными преобразователями уровня на ультразвуковых волнах кручения, реализующий алгоритм предложенного численного метода расчета магнитных полей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на международных и всероссийских научных конференциях.

**Публикации.** По материалам диссертации имеется 19 публикаций, в том числе пять статей в журналах, рекомендованных ВАК, получен патент на изобретение и зарегистрирована программа для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Работа состоит из введения, 4 разделов, основных результатов и выводов по работе, библиографического списка из 187 наименований и приложения. Текст изложен на 157 страницах, содержит 1 таблицу и 67 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность рассматриваемой проблемы, указана цель, представлены задачи, сформулирована научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** приведена классификация методов математического моделирования преобразователей уровня (уровнемеров) жидких сред на разных физических эффектах. Отмечено, что при работе с агрессивными средами предпочтительнее применение уровнемеров, использующих бесконтактные методы. Под агрессивной средой в данном случае понимается такая среда, которая, взаимодействуя с регистрирующим элементом уровнемера, может вызвать его разрушение или коррозию (кислоты, щелочи, растворы солей). Степень разрушения зависит от многих факторов и, прежде всего, от состава материала регистрирующего элемента уровнемера, его плотности. Применение в уровнемере регистрирующего элемента, устойчивого к воздействиям измеряемой агрессивной среды на продолжительный период времени, позволяет повысить его надежность и срок эксплуатации в целом.

На рисунке 1 приведена схема одного из вариантов накладного магнитострикционного уровнемера на УЗВ кручения, работающего через немагнитную стенку (или стенки) резервуара с агрессивной жидкой средой, представляющая собой некоторую техническую систему совместно с резервуаром.

Внутри резервуара 1 с немагнитной стенкой Н в его направляющем пазу устанавливается поплавок 4 с постоянным магнитом М, регистрирующий раздел двух сред (воздушной и химически агрессивной жидкой среды 3) на искомом уровне  $h_x$ . Вдоль немагнитной стенки Н резервуара 1 с его внешней стороны закрепляется магнитострикционный звукопровод (МЗП) 5, подключаемый к



блоку 7 кодирования и вычислений через сигнальный электроакустический преобразователь (ЭАП) 6. Магнитострикционный звукопровод 5 НМПУ может содержать или нет демпфирующие элементы, что определяется алгоритмом работы акустического тракта НМПУ.

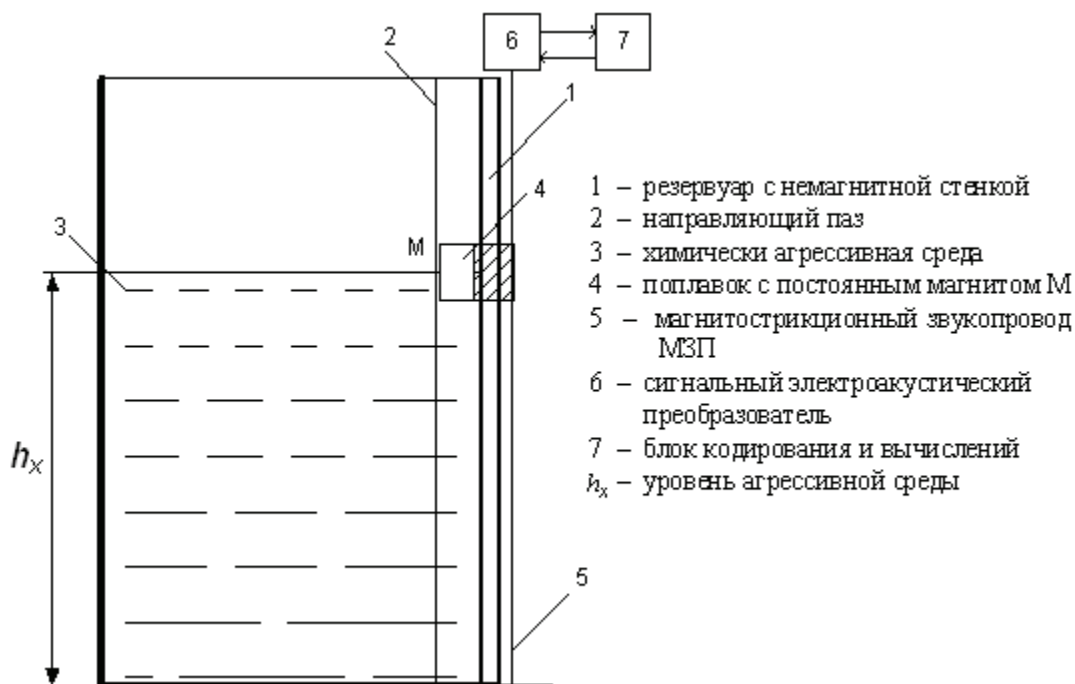


Рисунок 1 – Структурная схема НМПУ на УЗВ кручения

При подаче в МЗП 5 токовых импульсов образуется радиальное магнитное поле, которое взаимодействует с продольным магнитным полем постоянного магнита М поплавка 4, проходящее через немагнитную стенку Н резервуара 1 системы НМПУ, что приводит к возбуждению в среде МЗП 5 упругих УЗВ кручения (эффект Видемана), если энергия результирующего магнитного поля выше некоторого порогового значения. Далее УЗВ, проходя искомый отрезок по МЗП 5 с известной скоростью крутильной волны, преобразуется сигнальным ЭАП 6 в эквивалентный электрический сигнал и поступает в блок 7 кодирования и вычислений, в котором производится преобразование уровня  $h_x$  агрессивной жидкой среды 3 относительно резервуара 1 в цифровой код соответствующего формата. Акустический тракт (позиции 5,6 рисунка 1) НМПУ защищен ферромагнитным экраном от механического и электромагнитного воздействий.

Для улучшения технико-эксплуатационных характеристик и снижения себестоимости с использованием эффективных методов математического моделирования в разделе проведен анализ известных математических моделей МПУ и подобных магнитострикционных приборов, методов математического моделирования слабых магнитных полей.

Этот анализ показал, что для исследования магнитного поля постоянных магнитов из разных магнито жестких ферромагнетиков НМПУ целесообразным является применение приближенных методов расчета магнитных цепей и мето-

да эквивалентного соленоида. Получить более точный результат позволяет численное решение системы уравнений Максвелла для численного расчета слабых магнитных полей.

При моделировании кругового магнитного поля НМПУ напряженностью  $H_{x.k}$  эффективным будет использование известного выражения  $H_{x.k} = \frac{i_x}{2\pi R}$ , где  $i_x$  – амплитуда импульсов тока записи,  $R$  – радиус поперечного сечения МЗП. Результирующее поле НМПУ получается как некоторая векторная сумма магнитного поля постоянного магнита и кругового магнитного поля МЗП с током.

По результатам анализа известных математических моделей МПУ установлено, что для получения более точной математической модели НМПУ, чем существующие, при моделировании магнитных полей НМПУ необходимо учитывать влияние на процесс формирования упругих УЗВ кручения ряда дестабилизирующих факторов таких, как поверхностный и краевой эффекты, магнитная вязкость материала МЗП, “погонное” затухание и рассеяние акустической энергии УЗВ.

На основании проведенного обзора математических моделей и методов моделирования, в разделе составлены соответствующие классификационные схемы и уточнены основные задачи диссертационного исследования.

**Второй раздел** направлен на создание уточненной математической модели магнитных полей НМПУ и ее исследование методом математического моделирования на основе численных вычислений.

В разделе предложена методика моделирования магнитного поля постоянного магнита НМПУ на основе анализа его магнитной цепи, согласно которой проведен расчет значения фиктивной коэрцитивной силы постоянного магнита  $H_\phi$  по формуле

$$H_\phi = \frac{B_m}{\tilde{\mu}} + H_m, \quad (1)$$

где  $B_m, H_m$  – координаты рабочей точки на кривой размагничивания,  $\tilde{\mu}$  – коэффициент возврата, и осуществлена замена постоянного магнита фиктивной М.Д.С.  $I_\omega$ , найденной по формуле

$$I_\omega = H_\phi l_m, \quad (2)$$

где  $l_m$  – длина постоянного магнита МНПУ.

Анализ схемы замещения магнитной цепи НМПУ проведен по схеме рисунка 2, позволяющей адекватно выполнить построение модели результирующего магнитного поля ультразвуковых приборов данной группы. Здесь приняты следующие обозначения:  $I_\omega$  – фиктивное значение М.Д.С. постоянного магнита М,  $r_m$  – его магнитное сопротивление,  $r_{ka}, r_{kb}$  – магнитные сопротивления корпуса поплавка 4,  $r_{a1}, r_{a3}$  – магнитные сопротивления зазоров  $a1$  и  $a3$ ,  $r_{Ha}, r_H$  – магнитные сопротивления немагнитной стенки резервуара 1,  $r_{a24}$  – магнитное сопротивление воздушной среды (зазора  $a2, a4$ ),  $r_3, r_3$  – магнитные



сопротивления МЗП 5 и его экрана Э,  $\Phi_p$  – значение магнитного потока магнита М. Значения перечисленных величин выбирались таким образом, чтобы формируемая упругая УЗВ кручения в среде МЗП 5 обладала достаточной акустической энергией для уверенного считывания сигнальным ЭАП НМПУ (см. рисунок 1) вдоль всего диапазона преобразования уровня  $h_x$ .

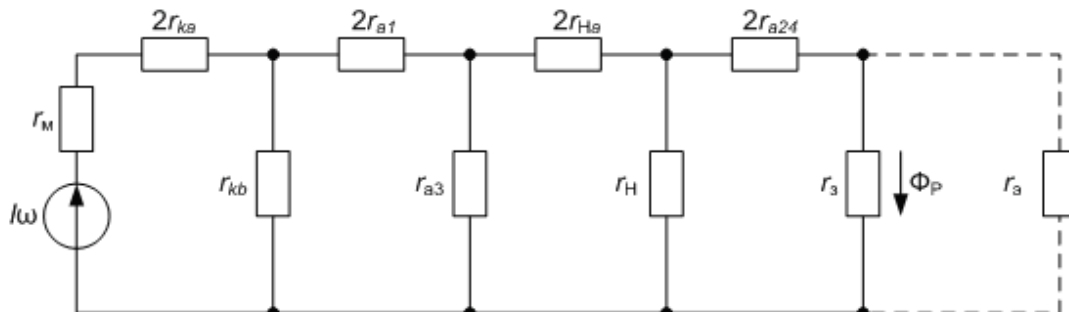


Рисунок 2 – Схема замещения магнитной цепи НМПУ

В процессе моделирования магнитной цепи НМПУ (см. рисунок 2) установлено, что значение магнитного потока  $\Phi_p$  через немагнитную стенку резервуара 1 увеличивается примерно на 0,2 мВб при увеличении ее ширины Н на 0,1 м от некоторого критического значения, при котором невозможно возбудить УЗВ кручения в среде МЗП 5. При этом эквивалентное магнитное сопротивление  $r$  магнитной цепи НМПУ составляет  $\sim 30$  А/Вб.

Установлено, что зависимость между величиной фиктивной М.Д.С.  $I\omega$  и напряженностью  $H_{o.п}$  магнитного поля постоянного магнита близка к линейной. Это означает, что при уменьшении ширины Н немагнитной стенки для сохранения требуемого значения напряженности  $H_{o.п}$  магнитного поля постоянного магнита в расчетной точке на поверхности МЗП, необходимо увеличить значение фиктивной М.Д.С.  $I\omega$ .

Для уточнения математической модели магнитного поля постоянного магнита НМПУ и учета влияния краевого эффекта был применен метод эквивалентного соленоида. Напряженность поля  $H_x$ , создаваемого соленоидом с числом витков  $W_2$ , с учетом конструктивных особенностей НМПУ определяется выражением:

$$H_x = 2W_2 \int_{a x_0 - l/2}^{b x_0 + l/2} \int H_1(t) dx dy = i_x \frac{W_2}{\pi} \left[ b \left( \arctg \left( \frac{x_0 + l/2}{b} \right) - \arctg \left( \frac{x_0 - l/2}{b} \right) \right) - a \left( \arctg \left( \frac{x_0 + l/2}{a} \right) - \arctg \left( \frac{x_0 - l/2}{a} \right) \right) + \frac{x_0 + l/2}{2} \ln \alpha_1 + \frac{x_0 - l/2}{2} \ln \alpha_2 \right], \quad (3)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $a$ ,  $b$  – параметры, зависящие от геометрических размеров элементов конструкции НМПУ,  $l$  – длина постоянного магнита,  $x_0$  – координата точки на оси МЗП.

В соответствии с (3) в зоне магнитоотрицательного преобразования  $l$  формируется продольное магнитное поле напряженностью  $H_x$ . Однако, за счет краевого эффекта, вызванного экспоненциальным законом распределения поля  $H_x$ , зона магнитоотрицательного преобразования  $l$  сужается до зоны эффективного преобразования  $l_{\text{п}} < l$ . Влияние краевого эффекта на напряженность (3) учитывалась путем введения коэффициента краевого эффекта  $K_{\text{кэ}}$ , который зависит от геометрических размеров постоянного магнита. Реальное значение напряженности  $H_{\text{о.п}}$  магнитного поля постоянного магнита НМПУ с учетом влияния краевого эффекта находится как

$$H_{\text{о.п}} = H_x K_{\text{кэ}}. \quad (4)$$

Моделирование магнитного поля магнита НМПУ с использованием выражений (3) и (4) показывает существенное влияние краевого эффекта на длину зоны эффективного магнитоотрицательного преобразования. Например, на расстоянии 0,04 м от оси магнита эта зона сужается на 50%. В тоже время, небольшое (до 0,04 м) удаление или сближение постоянного магнита М и МЗП практически не оказывает влияния на ширину зоны эффективного магнитоотрицательного преобразования. Однако удаление постоянного магнита от МЗП на значение 0,01 м снижает напряженность  $H_{\text{о.п}}$  магнитного поля на 30%.

В связи с этим для поддержания значения  $H_{\text{о.п}}$  в заданном диапазоне значений требуется выбрать постоянный магнит М с большей коэрцитивной силой  $H_c$  или компенсировать сужение ширины немагнитной стенки Н резервуара до критической уменьшением расстояния  $a$  между постоянным магнитом М и МЗП. В противном случае – увеличением ширины немагнитной стенки Н резервуара от критической, что технически сложно и экономически не выгодно.

Выполнено моделирование кругового магнитного поля МЗП НМПУ с учетом влияющих факторов – поверхностного эффекта и магнитной вязкости материала МЗП, для чего было получено следующее выражение

$$H_{\text{х.к}} = \frac{i_x}{2\pi(R+r)} e^{-\beta_1 \frac{z}{c}}, \quad (5)$$

где  $r$  – расстояние от поверхности МЗП,  $c$  – скорость электромагнитной волны (света),  $z$  – ширина эффективно проводящего слоя МЗП,  $\beta_1$  – коэффициент затухания из-за магнитной вязкости.

В процессе моделирования установлено незначительное влияние поверхностного эффекта на расчетное значение напряженности  $H_{\text{х.к}}$  кругового МЗП с током. Расчеты показывают, что напряженность  $H_{\text{х.к}}$  кругового поля при предельных значениях тока в МЗП не превышает значения в 0,01 А/м, что много меньше напряженности  $H_{\text{о.п}}$  продольного поля постоянного магнита М, равного (0,25–1,2) А/м.

Показано, что влияние магнитной вязкости при формировании кругового магнитного поля МЗП на рабочих частотах  $f > 100$  кГц проявляется в уменьшении значений  $H_{xк}$ . Обосновано предположение, что в качестве компенсационной меры от дрейфа напряженности  $H_{xк}$  кругового магнитного поля МЗП следует увеличивать амплитуду импульсов тока записи  $i_x$  или выбирать МЗП с меньшим поперечным сечением.

Моделирование результирующего магнитного поля напряженностью  $H_{xг}$  проводилось с использованием выражения  $H_{xг}^2 = H_{o.п}^2 + H_{xк}^2$ . Результаты моделирования показали, что напряженность  $H_{xг}$  результирующего магнитного поля НМПУ составляет (0,2–1,5) А/м, что вполне достаточно для возбуждения УЗВ кручения в среде МЗП при оптимальной ширине немагнитной стенки Н резервуара, имеющей разные значения в зависимости от его конструкции и геометрической формы.

Под действием результирующего магнитного поля напряженностью  $H_{xг}$ , в среде МЗП формируются упругие УЗВ кручения, которые с известной скоростью  $c_{кр}$  проходят искомое расстояние  $h_x$  по прямолинейному МЗП за время  $T_x$  и наводят на выводах ЭАП информационные сигналы в виде Э.Д.С.  $E_x(t) = W_o B_o(t) S y_x(t) c_{кр}$ , где  $W_o$  – число витков в обмотке ЭАП,  $B_o(t)$  – индукция геликоидального магнитного поля,  $y_x(t)$  – упругое напряжение в среде МЗП, которые далее усиливаются линейным усилителем в соответствующее число раз.

Компьютерное исследование этого выражения показало, что путем изменения параметров МЗП НМПУ можно получить на его аналоговом выходе устойчивый импульсный сигнал для уверенного выполнения последующего аналого-цифрового преобразования искомого уровня  $h_x$  в условиях воздействия обозначенных факторов влияния.

**Третий раздел** посвящен численным методам расчета магнитных полей НМПУ. Предложен и обоснован новый эффективный численный метод расчета слабых магнитных полей, направленный на получение более точной математической модели НМПУ.

Проведен анализ способов разностной аппроксимации уравнений Максвелла и решения эффективными численными методами полученных систем конечно-разностных уравнений магнитных полей НМПУ. Получение более точной математической модели магнитных полей НМПУ необходимо для поиска оптимальной ширины Н немагнитной стенки резервуара с агрессивной жидкой средой. Под оптимальной шириной Н немагнитной стенки резервуара системы НМПУ здесь понимается такое её значение, при которой напряженность  $H_{o.п}$  продольного магнитного поля постоянного магнита будет достаточной для возбуждения УЗВ кручения в среде МЗП, обладающих необходимой энергией для уверенного и однозначного считывания его сигнальным ЭАП.

Система уравнений Максвелла для магнитного поля постоянного магнита НМПУ введением векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$  была сведена к уравнению в частных производных следующего вида:

$$\operatorname{div}(\mu^{-1} \operatorname{grad} \bar{A}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = j_{\text{ст}},$$

где  $\nu = \mu^{-1}$  – величина обратная магнитной проницаемости среды,  $A_x, A_y$  – координатные составляющие векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$ ,  $x, y$  – координаты,  $j_{\text{ст}}$  – плотность источников магнитного поля в точке  $(x, y)$  расчетной области НМПУ.

Основная сложность, возникающая при решении этого уравнения для магнитных полей НМПУ, состоит в том, что расчетная область, в которой рассматривается распределение магнитного поля, является кусочно-неоднородной, т.е. магнитная проницаемость  $\mu$  в ней может меняться скачком. Поэтому уравнение является уравнением с переменными коэффициентами, имеющими разрыв в некоторых точках. Вследствие этого решение данного уравнения целесообразно искать с применением численных методов.

Для реализации на ЭВМ наиболее эффективным подходом является переход от рассматриваемого дифференциального уравнения к разностному, являющемуся его дискретным аналогом. При этом разностные уравнения для векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$  внутри элементов расчетной области НМПУ дополняются уравнениями другого вида на границах элементов, что приводит к дополнительным сложностям при составлении алгоритма решения из-за необходимости идентификации каждой точки расчетной области – граничная она или нет.

В диссертационной работе переход к разностным уравнениям был осуществлен с применением метода сеток и метода баланса. Выбор регулярной сетки позволяет минимизировать вычислительную погрешность и учесть заданные краевые и граничные условия. Выбор контура интегрирования по методу баланса позволяет упростить алгоритм расчета за счет устранения необходимости проводить в проведении идентификации каждого узла сетки на его “граничность”.

В результате были получены конечно-разностные уравнения для каждого узла сетки расчетной области НМПУ вида

$$A_1 k_1 + A_2 k_2 + A_3 k_3 + A_4 k_4 - A_0 (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) = -i_0, \quad (6)$$

где  $A_i$  – векторный магнитный потенциал  $i$ -го узла сетки,  $k_i$  – его коэффициент магнитной проницаемости,  $i_0$  – плотность тока в узле “0”.

Сформулированы основные свойства системы уравнений вида (6). Наиболее важными из них являются следующие: система имеет большое число неизвестных (соизмеримое с числом узлов сетки), разреженную, симметричную, плохо обусловленную матрицу коэффициентов, вид которой зависит от способа нумерации узлов сетки.

Эти свойства были учтены при выборе численного метода решения системы уравнений вида (6) для магнитных полей НМПУ. Установлено, что для систем, обладающих отмеченными свойствами, наиболее подходящими способами решения с использованием ЭВМ, являются итерационные методы, в частности метод верхней релаксации, который и был выбран для решения рассматриваемой системы конечно-разностных уравнений магнитных полей НМПУ.

Метод верхней релаксации является модификацией метода Зейделя и основан на следующей итерационной формуле:

$$u^{n+1} = u^n + \bar{\omega}(\tilde{u}^{n+1} - u^n), \quad (7)$$

где  $\tilde{u}^{n+1}$  – матрица искомых потенциалов, полученная на  $(n+1)$ -ом шаге по методу Зейделя,  $u^n$  – матрица искомых потенциалов, полученная на  $n$ -ом шаге по методу верхней релаксации (7),  $\bar{\omega}$  – коэффициент ускорения сходимости.

Оптимальное значение коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}_0$  (при котором число итераций (7) минимально) зависит от числа обусловленности  $\tilde{\chi}$  матрицы коэффициентов системы. Оно, в свою очередь, сильно зависит от многих параметров конкретной задачи, и, в общем случае, подобрать оптимальное значение коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}_0$  не представляется возможным.

При расчете магнитных полей НМПУ для сетки размером  $N \times M$  использовано выражение

$$\bar{\omega}_0 = 2 \left( 1 - \pi \sqrt{\frac{1}{M^2} + \frac{1}{N^2}} \right), \quad (8)$$

которое позволяет приближенно рассчитать оптимальное значение коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}_0$  и значительно сократить число итераций (7).

Для повышения эффективности численного расчета магнитных полей НМПУ был осуществлен выбор оптимального начального приближения на основе данных вычислительного эксперимента НМПУ (1) – (4) и применены экстраполяционные методы снижения погрешности вычислений до 1–10%.

**В четвертом разделе** проведены комплексные исследования НМПУ, представлен комплекс программ для выполнения вычислительного эксперимента по расчету слабых магнитных полей НМПУ на УЗВ кручения с использованием уточненных математических моделей, оценена их адекватность.

Из-за сложности и трудоемкости проведения физического эксперимента по регистрации слабых магнитных полей НМПУ с требуемой точностью в работе эти исследования выполнены с использованием системы компьютерного моделирования ELCUT.

Полученные в процессе моделирования магнитных полей в среде ELCUT интегральные характеристики (напряженность, индукция, потенциал и т.д.) сопоставлены с результатами моделирования уточненной математической модели НМПУ на УЗВ кручения. Расхождение данных вычислительных экспериментов системы ELCUT и моделей (1) – (5) составило менее 1%, что подтверждает их адекватность.



Однако, точно отследить влияние параметров конструкции НМПУ (ширины немагнитной стенки  $H$ , расстояния  $a$  между постоянным магнитом и МЗП, величины зазора между поплавок и направляющим пазом и др.) с использованием компьютерной системы моделирования ELCUT не представляется возможным. Здесь не предусмотрены средства получения непрерывных характеристик поля в зависимости от изменения геометрии расчетной области НМПУ.

Данная задача решена путем реализации эффективных численных методов расчета магнитных полей НМПУ в виде комплекса программ, ориентированного на интеграцию с системой MATLAB.

Разработанный программный комплекс “Накладной МПУ” (рисунок 3) позволяет проводить вычислительный эксперимент НМПУ на резервуарах с различной типовой конфигурацией.

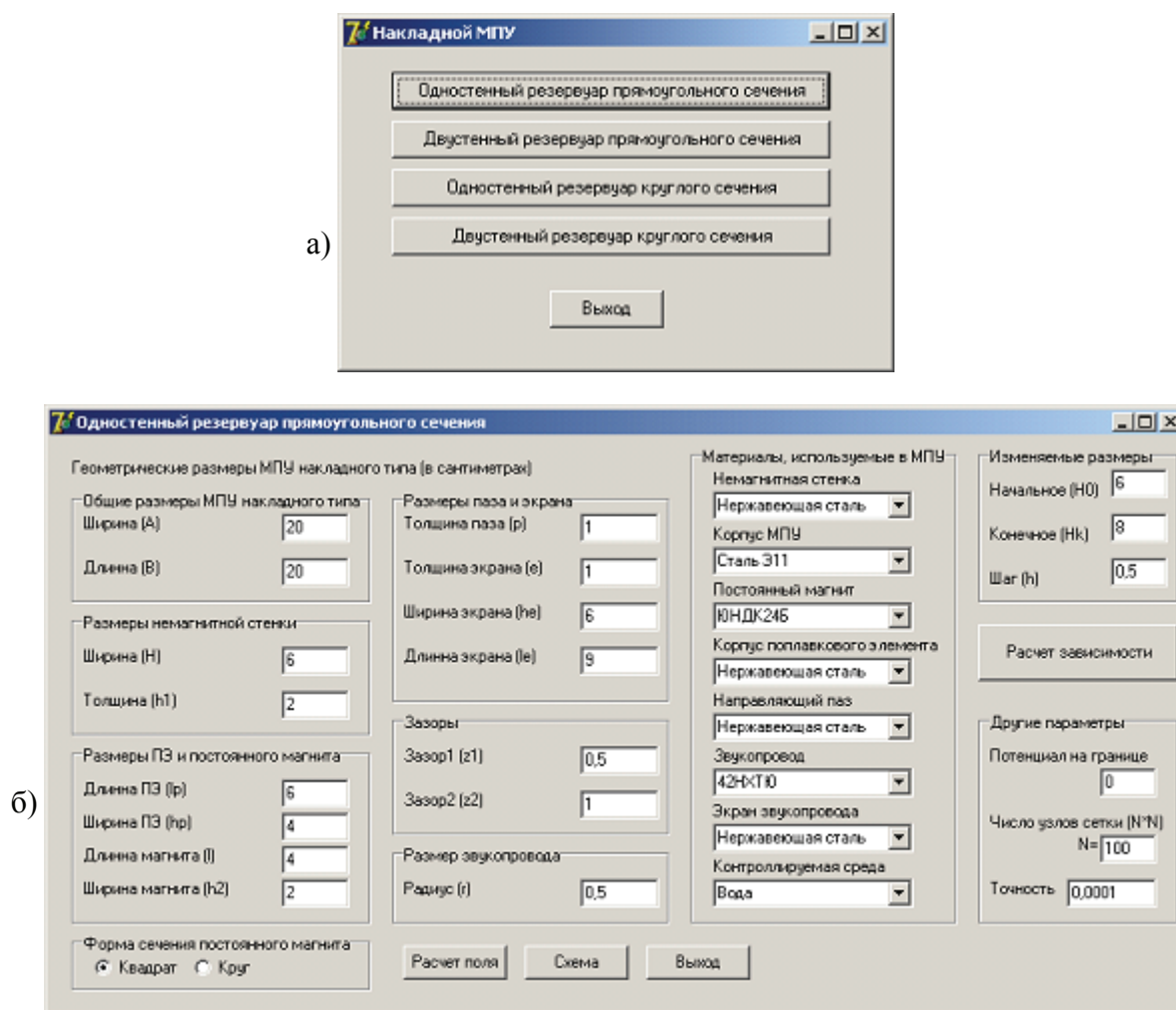


Рисунок 3 – Главное окно (а) и окно параметров НМПУ (б) программного комплекса “Накладной МПУ”

При измерении уровня агрессивных жидких сред используются одно- или двустенные резервуары прямоугольного или круглого сечений. Программный комплекс учитывает особенности данных типов резервуаров. Предусмотрена возможность моделирования магнитных полей с использованием различных материалов элементов конструкции системы НМПУ и учета ряда дестабилизирующих факторов среды (наличие магнитных свойств у рабочей и окружающей среды).



Программный комплекс “Накладной МПУ” реализует алгоритм (рисунок 4) получения непрерывной характеристики напряженности магнитного поля НМПУ постоянного магнита в зависимости от ширины  $H$  немагнитной стенки резервуара, что отличает его от других известных компьютерных программ.

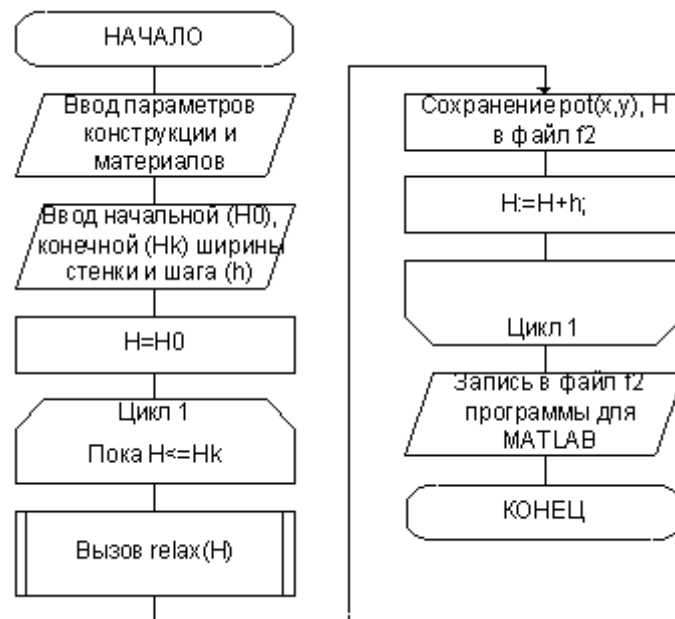


Рисунок 4 – Схема алгоритма основной процедуры программного комплекса “Накладной МПУ”

На схеме алгоритма основной процедуры разработанного комплекса программ отдельной подпрограммой обозначена процедура  $relax(H)$ , предназначенная для выполнения численного расчета магнитного поля НМПУ по методу верхней релаксации (7) с оптимальным значением коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}_0$  (8).

Результаты вычислительного эксперимента с применением комплекса программ “Накладной МПУ” для напряженности  $H_{0,п}$  магнитного поля постоянного магнита НМПУ с двустенным резервуаром прямоугольного сечения для различных материалов постоянных магнитов (например, сплавы ЮНДК24Б, АЛЬНИКО, вольфрамная сталь Е7В6 и др.) приведены на рисунке 5.

Отличие числовых данных программного комплекса “Накладной МПУ” (рисунок 5,а) с результатами моделирования в среде компьютерной системы моделирования ELCUT не превышает 3%. Это подтверждает адекватность результатов вычислительного эксперимента расчета магнитных полей НМПУ, полученных с помощью комплекса программ “Накладной МПУ”.

Анализ результатов вычислительного эксперимента (рисунок 5,б) показывает, что использование двустенного резервуара для рабочей среды в составе НМПУ значительно снижает напряженность  $H_{0,п}$  магнитного поля постоянного магнита в точке на поверхности МЗП и делает практически невозможным применение постоянных магнитов с коэрцитивной силой  $H_c < 150$  кА/м. Для обеспечения эффективной работы НМПУ с двустенным резервуаром необхо-

дим выбор постоянного магнита с магнитной энергией  $H_c > 150$  кА/м, а минимальная ширина  $H$  немагнитной стенки должна быть не менее 0,1 м.

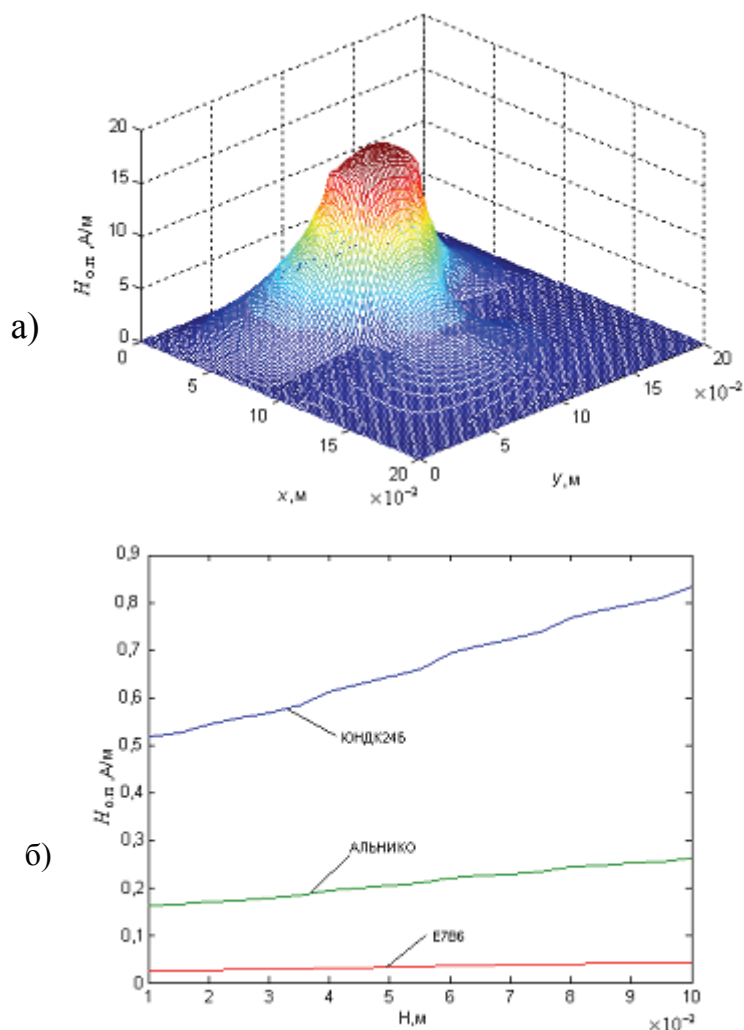


Рисунок 5 – Напряженность  $H_{0.Π}$  магнитного поля постоянного магнита НМПУ (а) и непрерывные зависимости напряженности  $H_{0.Π}$  для различных материалов постоянных магнитов от ширины  $H$  немагнитной стенки резервуара (б)

Аналогичные результаты показывает вычислительный эксперимент магнитных полей НМПУ на резервуарах круглого сечения. Так, например для одностенного резервуара круглого сечения оптимальная ширина немагнитной стенки должна составлять  $H = 0,06$  м при напряженности поля  $H_{0.Π} = 0,9$  А/м, при котором возможно возбуждение в МЗП УЗВ кручения требуемой амплитуды, а для типового двустенного резервуара –  $H = 0,15$  м соответственно. Кроме того, в системе НМПУ с двустенным резервуаром круглого сечения требуется применение постоянного магнита с коэрцитивной силой не менее  $H_c \approx 200$  кА/м.

Проведенные с помощью разработанного программного комплекса “Накладной МПУ” вычислительные эксперименты магнитных полей НМПУ позволили найти оптимальные значения ширины  $H$  немагнитной стенки типовых резервуаров, значения которых находятся в диапазоне  $H = (0,05–0,15)$  м. Дальнейшее увеличение параметра  $H$  немагнитной стенки резервуара не оказывает влияния на работу НМПУ и является нецелесообразным.

В разделе проведена оценка эффективности метода верхней релаксации со значением коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}_0$ , см. формулу (8), при фиксированном размере квадратной сетки  $M$ . В ходе вычислительного эксперимента для расчетных областей НМПУ с одинаковыми параметрами определено количество итераций, необходимых для достижения требуемой точности  $\varepsilon$  расчета при различных значениях параметра  $\bar{\omega}$ . Коэффициент  $\bar{\omega}$  принимал следующие значения: 0,5; 0,9 (метод нижней релаксации); 1 (метод Зейделя); 1,5 (метод верхней релаксации);  $\bar{\omega}_0$  (вычислено по формуле (8)). В результате была получена зависимость числа итераций  $n$  от значения коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}$ , изображенная на рисунке 6.

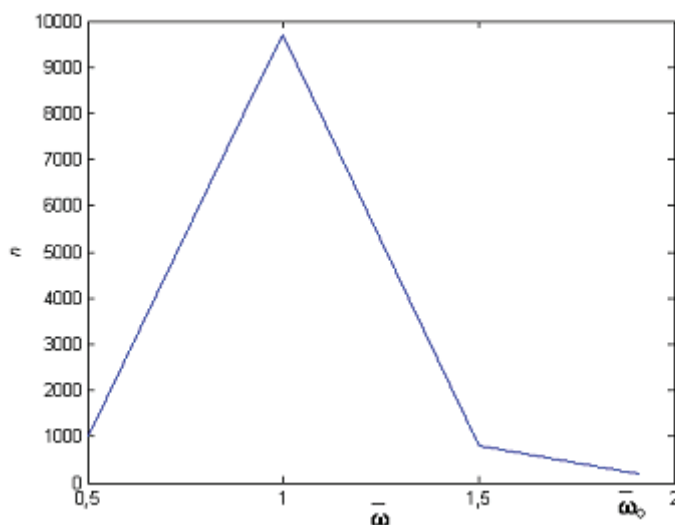


Рисунок 6 – Зависимость числа итераций  $n$  от коэффициента ускорения сходимости  $\bar{\omega}$

Как видно из рисунка 6, введение коэффициента ускорения сходимости позволяет существенно снизить число требуемых итераций по сравнению с методом Зейделя (при  $\bar{\omega}=1$ ). Наилучший результат достигается при выборе оптимального значения  $\bar{\omega}_0$ . В этом случае задача решается за минимальное число итераций (при точности расчета  $\varepsilon = 0,0001$  и  $\bar{\omega} = \bar{\omega}_0$ , число итераций составляет  $n \approx 200$ , вместо  $n \approx 10^4$  для  $\bar{\omega}=1$ ).

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что введение коэффициента  $\bar{\omega}_0$ , вычисленного по приближенной формуле (8), сокращает число требуемых итераций приблизительно в 50 раз (см. рисунок 6). Это позволяет существенно снизить требования комплекса программ “Накладной МПУ” к ресурсам ЭВМ, делая его эффективным программным продуктом, сокращает время выполнения вычислительных процедур и позволяет получать результаты с высокой точностью.

В **приложении** приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе выполненной систематизации методов математического моделирования магнитных полей магнотстрикционных преобразователей механических величин уточнена и исследована математическая модель НМПУ, позволяющая с меньшей вычислительной погрешностью проводить компьютерное моделирование.

2. Выполнено математическое моделирование физических процессов в ультразвуковых приборах нового типа – НМПУ в условиях влияющих факторов, позволяющее получить достоверные результаты (вычислительная погрешность до 1,0%) при установленных ограничениях, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким физическим экспериментам.

3. Обоснован новый эффективный численный метод расчета магнитных полей НМПУ, обладающий более высокой скоростью сходимости при требуемой точности вычислений. Предложенная методика численного расчета магнитных полей НМПУ позволяет определить оптимальное сочетание параметров конструктивных элементов, при которых достигаются требуемые технические и эксплуатационные характеристики ультразвуковых приборов данного вида.

4. Разработаны вычислительные алгоритмы и комплекс программ с использованием нового численного метода для проведения вычислительного эксперимента, обеспечивающие повышение скорости сходимости вычислительных процедур без снижения их точности и позволяющие учитывать конструктивные особенности НМПУ.

5. Полученные результаты комплексных исследований магнитных полей НМПУ позволяют указать пути совершенствования их конструктивных, технических и эксплуатационных показателей.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Карпухин, Э.В. К вопросу применения эффективных численных методов для моделирования магнотстрикционных приборов уровня [Текст] / Э.В. Карпухин, Е.С. Демин, С.Б. Демин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т.18. – №11. – С. 58-64.

2. Карпухин, Э.В. Комплекс программ для расчета магнитных полей магнотстрикционных преобразователей уровня [Текст] / Э.В. Карпухин, В.С. Дятков, С.Б. Демин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – №1(53). – С. 109-112.

3. Карпухин, Э.В. Численное моделирование магнитных полей накладных магнотстрикционных уровнемеров [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, А.А. Дюдюкин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №3. – С. 51-59.

4. Карпухин, Э.В. Численные методы расчета магнитного поля магнотстрикционного преобразователя уровня накладного типа [Текст] / Э.В. Карпухин, А.А. Воронцов, С.Б. Демин, А.А. Дюдюкин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2012. – №1(24). – С. 65-73.

5. Карпухин, Э.В. Математическое моделирование влияния внешних дестабилизирующих факторов на параметры магнотстрикционных преобразователей перемещений [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, В.С. Дятков, А.А. Дюдюкин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №3. – С. 32-35.

### **Публикации в других изданиях:**

6. Карпухин, Э.В. Комплекс программ моделирования магнитных полей МПУ накладного типа [Текст] / Э.В. Карпухин, В.С. Дятков // “XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего”: Периодическое научное издание. – Пенза: ПГТА, 2011. – С. 174-180.

7. Карпухин, Э.В. Способы повышения эффективности численного расчета магнитных полей накладных магнитоотрицательных уровней [Электронный ресурс] / Э.В. Карпухин, А.А. Дюдюкин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6 (приложение «Технические науки»). – URL:<http://online.rae.ru/1028>.

8. Карпухин, Э.В. Математическая модель возбуждающего магнитного поля магнитоотрицательного преобразователя уровня накладного типа [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин // Научная индустрия Европейского континента - 2011: Сборник трудов VII международной научно-практической конференции. Секция “Математика”. – Прага: Education and Science, 2011. – С. 31-36.

9. Карпухин, Э.В. Математическое моделирование магнитного поля постоянного магнита МПУ накладного типа [Текст] // “XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего”: Периодическое научное издание. – Пенза: ПГТА, 2011. – С. 167-174.

10. Карпухин, Э.В. Исследование влияния дестабилизирующих факторов на параметры накладных магнитоотрицательных уровней [Электронный ресурс] / Э.В. Карпухин, В.С. Дятков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6 (приложение «Технические науки»). – URL:<http://online.rae.ru/1029>.

11. Карпухин, Э.В. Математическое моделирование систем управления технологическим оборудованием [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин // Математика и проблемы математического образования: Сборник научных и научно-методических трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пенза: ПГТА, 2010. – С. 49-61.

12. Карпухин, Э.В. Моделирование магнитных полей магнитоотрицательных преобразователей перемещений [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, А.А. Воронцов, Н.А. Ермолаев // Наука и образование - 2011: Сб. статей международной НТК. – Мурманск: МГТУ, 2011. – С. 85-91.

13. Карпухин, Э.В. Моделирование магнитных полей магнитоотрицательных преобразователей уровня [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, А.А. Воронцов, К.Н. Илюхин // Математические методы в технике и технологиях: Сборник трудов XXIV международной научной конференции. – Пенза: ПГТА, 2011. – С. 32-34.

14. Карпухин, Э.В. Моделирование магнитных полей первичного преобразователя магнитоотрицательного преобразователя перемещений [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, А.А. Воронцов, Н.А. Ермолаев // Актуальные вопросы современной информатики: Сб. статей международной НПК. В 2 т. – Коломна: МГОСГИ, 2011. – Т.2. – С. 24-28.

15. Карпухин, Э.В. Моделирование САУ АЗС с магнитоотрицательными преобразователями уровня [Текст] / Э.В. Карпухин, С.Б. Демин, О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин // Наука и образование: Материалы международной НТК. – Мурманск: МГТУ, 2010. – С. 172-176.

16. Карпухин, Э.В. Синтез и анализ аналого-цифровых устройств в образовательных технологиях с помощью моделирующих программ [Текст] / Э.В. Карпухин, Г.С. Власов // Молодёжь и современные информационные технологии: Сборник статей V Всероссийской НПК. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 36-38.

17. Карпухин, Э.В. Моделирование влияния дестабилизирующих факторов на возбуждающее магнитное поле МПУ накладного типа [Текст] / Э.В. Карпухин, А.А. Дюдюкин, К.Н. Илюхин // Наука и образование-2012: Материалы международной НТК. – Мурманск: МГТУ, 2012. – С. 111-115.

18. Патент RU №2298156. МПК: G01F23/28, G01F23/30. Уровнемер-индикатор/ С.Б. Демин, И.А. Демина, А.С. Фролов, Э.В. Карпухин//. Оpubл. 27.04. 2007.– Бюл. №12.

### **Зарегистрированные программы:**

19. Программа моделирования магнитных полей накладных МПУ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012612212 / Э.В. Карпухин. Заявл. 28.03.2012.

Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 02.05.2012. Формат 60x84 <sup>1/16</sup>  
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 1,11. Заказ № . Тираж 100.

---

Пензенская государственная технологическая академия.  
440605, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1<sup>а</sup>/11.