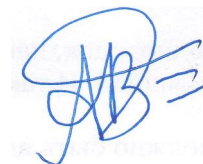


На правах рукописи



ВОРОНЦОВ Александр Анатольевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В
ДВУХКООРДИНАТНЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ
НАКЛОНОМЕРАХ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия» на кафедре «Физика».

- Научный руководитель** – доктор технических наук, доцент
Слесарев Юрий Николаевич
- Официальные оппоненты:** **Михайлов Петр Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор,
ЗАО «НИИФИ и ВТ», г. Пенза,
научный сотрудник;
Бутаев Михаил Матвеевич,
доктор технических наук, профессор,
ОАО «Научно-производственное
предприятие «Рубин», г. Пенза,
ученый секретарь научно-технического
совета
- Ведущая организация** – ОАО «Научно-исследовательский
институт физических измерений»,
г. Пенза.

Защита диссертации состоится 28 июня 2013 г., в 16 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, корпус 1, конференц-зал.

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

Автореферат разослан 28 мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие и расширение масштабов применения информационных технологий в области управления производственными процессами требует постоянного совершенствования методов проектирования и моделирования измерительных приборов и устройств. Математическое моделирование процессов и устройств позволяет на основе выявленных закономерностей проектировать эффективные преобразователи физических величин, имеющие высокие разрешающую способность, точность, быстродействие, широкий диапазон преобразования параметров физических процессов, низкую стоимость и относительную простоту конструкции.

Подобными преобразователями являются устройства для измерения углов наклона относительно вертикальной или горизонтальной плоскости (наклономеры), которые обычно входят в состав систем автоматического учета (САУ) различного функционального назначения. Из существующих типов наклономеров определенными преимуществами обладают ультразвуковые наклономеры, использующие явление магнитострикции (магнитострикционные наклономеры), где в качестве носителей информации об отклонениях объекта относительно горизонтали или вертикали выступают упругие ультразвуковые волны (УЗВ) кручения. Перспективность применения магнитострикционных наклономеров (МН) объясняется их высокими техническими и эксплуатационными показателями, простотой конструкции и относительно низкой себестоимостью. Являясь по существу аналого-цифровыми приборами, магнитострикционные наклономеры естественным образом интегрируются в САУ, где сигналы этих устройств обрабатываются уже в цифровой форме.

Разработкой и производством магнитострикционных приборов занимаются крупные зарубежные и отечественные компании, такие как ЗАО ПТФ "НОВИПТЕХ" (г. Королев, Московская область), НПП "СЕНСОР" (г. Заречный, Пензенская область), ЗАО "Росприбор" (г. Москва), MTS Systems Corporation Sensors Division (США), MTS Sensors Technology Corporation Ushikubo Bldg (Япония), MTS Sensor Technologie GmbH & Co KG (Германия) и др. Весомый вклад в развитие методов математического моделирования и проектирования магнитострикционных преобразователей внесли такие отечественные ученые, как К.П. Белов, Е.Ф. Бережной, С.Б. Демин, В.П. Еремеев, А.И. Мащенко, А.И. Надеев, О.Н. Петрищев, В.Н. Прошкин, В.С. Шикалов, 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. Однако известные результаты исследований не охватывают всего спектра задач, связанных с моделированием новых магнитострикционных преобразователей.

Этим обусловлена актуальность задач проектирования МН, в том числе задачи математического моделирования возникающих в них магнитных полей, решение которой обеспечивает повышение точности описания процессов преобразования измеряемых величин и позволяет оптимизировать конструктивные параметры МН. Разработка новых и усовершенствование существующих методов

математического моделирования МН необходимы для развития российского приборостроения и продвижения отечественной продукции на мировой рынок.

Диссертация посвящена разработке новых методов математического моделирования и всестороннему компьютерному исследованию нового вида ультразвуковых наклономеров – двухкоординатных МН (ДМН) на ультразвуковых волнах кручения, обеспечивающих одновременное определение двух углов наклона объекта относительно горизонтали или вертикали во взаимноперпендикулярных плоскостях. Применение полученных результатов позволит улучшить технические и эксплуатационные показатели ДМН, отказавшись от дорогостоящих и трудоемких физических экспериментов на этапе проектирования.

Объект исследования – двухкоординатные магнитострикционные наклономеры на ультразвуковых волнах кручения.

Предмет исследования – математические модели магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения, адекватно отражающие процессы возбуждения и считывания акустических волн с учетом влияния факторов технологического объекта.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов математического моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, разработка численного метода и комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**.

1. Разработка методов математического моделирования магнитных полей постоянных магнитов, процессов намагничивания звукопроводов и формирования сигнала воспроизведения двухкоординатных магнитострикционных наклономеров.

2. Разработка и обоснование численного метода и алгоритмов расчета параметров процесса намагничивания звукопроводов двухкоординатных магнитострикционных наклономеров.

3. Создание комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения.

4. Проведение комплексных исследований двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения с применением разработанных математических методов и комплекса программ, результаты которых позволяют оптимизировать конструктивные и эксплуатационные параметры наклономеров.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования и вычислительной математики, математического анализа и теории поля, теории магнитных цепей.

Научная новизна работы.

Новыми являются следующие научные результаты.

1. Разработаны методы математического моделирования магнитных полей, процессов намагничивания звукопроводов и формирования сигнала воспроизведе-

дения двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, учитывающие дополнительные параметры материалов, что позволяет выявить пути улучшения технических характеристик таких наклономеров.

2. Разработаны численный метод и алгоритм расчета намагниченности звукопровода, учитывающие влияние размагничивающих полей и характеристики материалов, обеспечивающие высокую производительность вычислений при заданной точности.

3. Создан комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения.

4. Проведены комплексные исследования двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения с применением разработанного комплекса программ, использование результатов которых позволяет оптимизировать конструктивные и эксплуатационные параметры таких приборов.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные вычислительные процедуры и алгоритмы программного комплекса обеспечивают проведение вычислительных экспериментов над двухкоординатными магнитострикционными наклономерами, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам.

2. Использование результатов математического моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров с применением разработанного численного метода позволяет учесть особенности и параметры элементов конструкции, выявить пути улучшения характеристик двухкоординатных магнитострикционных наклономеров.

3. Использование практических рекомендаций по выбору параметров элементов конструкции двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения позволяет сократить время и затраты на проектирование таких приборов.

Внедрение результатов работы. Основные результаты исследований внедрены в ЗАО “ЦеСИС НИКИРЭТ” для модернизации гальванического оборудования. Методика моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров использована в учебном процессе кафедры “Автоматизация и управление” Пензенской государственной технологической академии при реализации основных профессиональных образовательных программ.

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью основных допущений, использованием апробированных методов математического моделирования, малой вычислительной погрешностью применяемых численных методов, внедрением на промышленном предприятии, апробацией на международных научных конференциях.

На защиту выносятся.

1. Методы математического моделирования процессов намагничивания звукопроводов и формирования сигнала воспроизведения в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах по уточненным математическим моделям.

2. Численный метод и алгоритм расчета параметров процесса намагничивания звукопроводов двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, учитывающие влияние размагничивающих магнитных полей.

3. Комплекс программ для моделирования магнитных полей в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах на ультразвуковых волнах кручения, позволяющий произвести обоснованный выбор конструктивных параметров.

4. Результаты математического моделирования магнитных полей сплошных, кольцевых и составных постоянных магнитов в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на международных научно-технических конференциях “Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях” (Тольятти, 2013), “Современные информационные технологии” (Пенза, 2012), “Наука и образование” (Мурманск, 2010).

Публикации. По материалам диссертации имеется 15 публикаций, в том числе три статьи в журналах, рекомендованных ВАК, патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В работе [1], выполненной в соавторстве, лично автором проведено исследование магнитных полей постоянных магнитов в форме прямоугольного параллелепипеда. В работах [2, 5, 8, 9, 12] автором предложена методика исследования магнитных полей кольцевых и сплошных постоянных магнитов, а также проведено математическое моделирование магнитных полей постоянных магнитов указанных форм. В работе [3] автором разработана уточненная модель сигнала воспроизведения магнитострикционного наклономера. В работах [4, 7, 11, 13] автором проведено математическое моделирование магнитных полей ДМН по уточненной математической модели. В работе [6] автором определена зависимость напряженности магнитного поля от длины соленоида, в работе [10] – разработана методика и проведен вычислительный эксперимент по определению угла наклона плоскости ДМН.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 4 разделов, основных результатов и выводов по работе, библиографического списка из 120 наименований и приложения. Текст изложен на 160 страницах, содержит 76 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, указаны цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также перечислены основные выносимые на защиту положения.

В первом разделе приведена классификация МН на продольных и крутильных волнах. Отмечено, что по основным технико-экономическим показателям, таким как чувствительность, быстродействие, точность, надежность, стоимость, масса, габариты, наиболее перспективными для применения являются магнитострикционные наклономеры. Среди существующих МН определенными преимуществами обладают приборы с использованием ультразвуковых волн кру-

чения. Также отмечена недостаточная проработанность вопросов проектирования двухкоординатных МН с использованием эффекта продольной магнитострикции, что объясняет особый интерес к моделированию таких устройств.

Проведен анализ известных математических моделей однокоординатных МН и методов математического моделирования магнитных полей. Недостатком моделей МН является их приближенный характер, что затрудняет расчет значений магнитного поля \overline{H}_r и соответственно, параметров процесса формирования УЗВ кручения. Установлено, что для уменьшения погрешностей расчетных процедур при моделировании магнитных полей МН необходимо учитывать влияние на процесс формирования упругих УЗВ кручения ряда дестабилизирующих факторов, таких как поверхностный эффект и “размагничивающие” поля.

В заключении раздела уточнены основные задачи диссертационного исследования.

Второй раздел направлен на усовершенствование математических моделей магнитных полей постоянных магнитов (ПМ), используемых в конструкциях ДМН на УЗВ кручения, и на их исследование методом математического моделирования.

Предложена методика моделирования магнитных полей сплошных (СПМ) и кольцевых (КПМ) постоянных магнитов с использованием выведенных соотношений

$$H_Z(r) = \frac{1}{\pi} h_M \cdot M \int_0^{D_M/2} \frac{E(k_2) \rho \cdot d\rho}{[(r-\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \cdot [(r+\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

$$H_Z(r) = \frac{1}{\pi} h_M \cdot M \int_{d_M/2}^{D_M/2} \frac{E(k_2) \rho \cdot d\rho}{[(r-\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \cdot [(r+\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

для СПМ и КПМ соответственно, где $E(k_2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_2^2 (\sin \varphi)^2} d\varphi$ – полный эллиптический интеграл второго рода, $k_2^2 = \frac{4 \cdot r \cdot \rho}{(r+\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}}$; r – расстояние от центра ПМ до точки расчета напряженности магнитного поля; ρ – полярный радиус;

h_M – высота ПМ; M – намагниченность ПМ, φ – угол в полярной системе координат; D_M и d_M – внешний и внутренний диаметры ПМ соответственно.

Численные значения интеграла были получены методом Симпсона с использованием сплайновой интерполяции эллиптического интеграла второго рода по двадцати узлам.

Анализ результатов моделирования магнитных полей СПМ и КПМ показал, что максимальное значение напряженности магнитного поля H_Z у СПМ наблюдается в его центре, а у КПМ – на расстоянии $r = \frac{d_M + D_M}{4}$ вдоль оси, параллельной его основаниям (ось OZ). Это значение может достигать как нескольких А/м, так и сотен кА/м в зависимости от размеров ПМ и значения остаточной намагниченности. Необходимо отметить, что при увеличении размеров и остаточной намагниченности ПМ максимальное значение напряженности уменьшается лишь при увеличении высоты h_M КПМ. В остальных случаях его значение увеличивается.

Анализ распределения магнитного поля вблизи оснований ПМ показал также, что с увеличением расстояния от центра ПМ происходит резкое уменьшение значения напряженности магнитного поля, однако даже на расстояниях, составляющих от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров от основания ПМ, значение напряженности магнитного поля может достигать от нескольких А/м до нескольких кА/м. Это особенно необходимо учитывать в конструкциях ДМН с использованием сферического корпуса, чтобы избежать формирования УЗВ кручения в точках, не связанных с измеряемыми углами. Для этого необходимы соответствующий выбор значения остаточной намагниченности ПМ, размеров элементов конструкции ДМН, экранирование оснований ПМ и т.д.

Также в разделе приведена методика моделирования магнитных полей ПМ в форме прямоугольного параллелепипеда (ППМ). По приведенной методике были получены приближенные и точные решения задачи распределения магнитного поля в рассматриваемой плоскости и вдоль рассматриваемой прямой. На основании результатов моделирования магнитных полей установлено, что приближенный расчет магнитных полей допустим при соотношениях $\frac{a_M}{h_M} \geq 10$ и $\frac{b_M}{h_M} \geq 10$.

Так, разность значений, полученных при использовании приближенных и точных формул для ППМ в форме куба ($a_M = b_M = h_M$), превышает 50 %.

Удобными способами изменения значения напряженности в рассматриваемой точке является изменение значений высоты h_M и остаточной индукции B_r ППМ. Изменение длины a_M и ширины b_M ППМ при $a_M > 5$ мм, $b_M > 5$ мм и $h_M = 5$ мм не обеспечивает существенной вариации значения напряженности магнитного поля как внутри, так и вне ППМ. Моделирование показало, что резкое изменение напряженности магнитного поля вблизи ППМ достигается при размерах ППМ $a_M < 5$ мм, $b_M < 5$ мм и $a_M = b_M$. Максимальное значение напряженно-

сти магнитного поля H_z также как и у СПМ наблюдается в центре ППМ. При удалении от центра вне ППМ наблюдается резкое изменение напряженности магнитного поля, значение которого может составлять от нескольких А/м до нескольких кА/м на расстояниях от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров от поверхности ППМ. Это позволяет изготовить ДМН с необходимым значением тепловых зазоров и толщины корпуса, однако требует предварительных расчетов значений напряженности магнитного поля H_z вблизи оснований ППМ.

Третий раздел посвящен разработке метода моделирования процесса формирования и считывания УЗВ кручения с использованием разработанного численного метода расчета намагниченности звукопровода (ЗП).

При взаимодействии магнитных полей, созданных токовым импульсом $\bar{H}_{кр}$ и постоянным магнитом $\bar{H}_{П}$, происходит формирование результирующего магнитного поля \bar{H}_r , модуль которого определяется выражением $H_r^2 = H_{кр}^2 + H_{П}^2$, в котором модуль напряженности магнитного поля $H_{кр}$ рассчитывается по известным формулам, а напряженность $\bar{H}_{П}$ – по методике расчета магнитных полей ПМ различной формы, изложенной в разделе 2.

Фактором, ограничивающим использование известных математических моделей расчета напряженности магнитного поля $H_{кр}$, является поверхностный эффект, заключающийся в неравномерном распределении переменного тока по сечению ЗП. В этой связи было произведено исследование влияния поверхностного эффекта при протекании переменного тока по сечению ЗП.

Анализ результатов проведенного исследования позволил сделать вывод о необходимости учета поверхностного эффекта на частотах выше 10 кГц. Так, на частоте 100 кГц в ЗП радиусом $R_{ЗП}=0,5$ мм со значениями $\mu_a = 1,25 \cdot 10^{-4}$ и $\gamma = 10^7$ См/м при протекании по нему токовых импульсов амплитудой $I_m=0,1$ А, плотность тока на расстоянии 0,1 мм от поверхности ЗП уменьшается более, чем на порядок: от значения 1300 А/м² до примерно 80 А/м² и приближается к нулю на расстоянии 0,2 мм от поверхности ЗП. Это свидетельствует о необходимости расчета напряженности магнитного поля лишь в так называемом эффективно проводящем z_3 -слое, т.е. слое ЗП, в котором происходит протекание переменного тока.

Анализ результатов, полученных при моделировании влияния толщины эффективно проводящего z_3 -слоя, подтверждает достоверность данных, полученных при моделировании влияния распределения плотности переменного тока в среде ЗП.

Изменение результирующей напряженности магнитного поля H_r сопровождается изменением намагниченности материала ЗП, значение которой зависит от напряженности H_r . Для определения значения намагниченности M материала ЗП по значению результирующей напряженности магнитного поля H_r , возможно

использование известных моделей петель гистерезиса. Наиболее точно данную зависимость можно определить, используя полиномиальную аппроксимацию в виде:

$$M(H, \alpha_1) = M_s(T) \cdot \text{sign} \alpha_1 + M_s \cdot \alpha_1 \cdot f(H \cdot \text{sign} \alpha_1), \quad (3)$$

где T – текущее значение температуры, $f(H)$ – функция, описывающая предельную петлю гистерезиса и имеющая вид

$$f(H) = \begin{cases} \frac{H_C - H}{H - H_C} \cdot s_p & \text{при } H < H_C \\ 1 - \left(\frac{H_C}{H}\right)^{\frac{s_p}{1-s_p}} \cdot K_S & \text{при } H > H_C \end{cases}, \quad (4)$$

где $s_p = \frac{M_r}{M_s}$, K_S – коэффициент, меньший 1.

Коэффициент α_1 определяется выражением

$$\alpha_1^{(k+1)} = \alpha_1^{(k)} \frac{M(H^{(k)}, \alpha_1^{(k)}) + M_s \cdot \text{sign}(\alpha_1^{(k)})}{M(H^{(k)}, -\alpha_1^{(k)}) + M_s \cdot \text{sign}(\alpha_1^{(k)})}, \quad (5)$$

где k – порядковый номер цикла изменения намагниченности по петле гистерезиса.

Достоинством рассмотренной модели является возможность построения петель гистерезиса как частных, так и предельных циклов. Однако невозможность учета влияния размагничивающих полей ограничивает использование известных математических моделей петель гистерезиса. Для определения намагниченности ЗП с учетом влияния размагничивающих полей был разработан численный метод расчета, изложенный в подразделе 3.2, который позволяет учитывать протекание электрического тока в эффективно проводящем z_3 -слое.

Разработан численный метод решения нелинейной задачи определения намагниченности в звукопроводе, сформулированной в виде:

$$\begin{aligned} \bar{M}(\bar{r}, t) &= \bar{m}_{yf}(\bar{H}_\Sigma(\bar{r}, t), \text{история } \bar{H}_\Sigma), \\ \bar{H}_\Sigma(\bar{r}, t) &= \bar{H}_{\text{внеш}}(\bar{r}, t) + \bar{H}_{\text{разм}}(\bar{r}, t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{M}(\bar{r}, t)$ – вектор намагниченности в точке с радиусом-вектором \bar{r} в момент времени t ; $\bar{H}_\Sigma(\bar{r}, t)$ – вектор напряженности полного магнитного поля, включающий сумму внешнего поля $\bar{H}_{\text{внеш}}(\bar{r}, t)$, создаваемого совместным действием постоянного магнита и циркулярного магнитного поля в отсутствие магнитного звукопровода, и внутреннего поля $\bar{H}_{\text{разм}}(\bar{r}, t)$, существующего в магнитном материале; \bar{m}_{yf} – моделирующая функция, связывающая остаточную намагниченность

звукопровода с напряженностью магнитного поля; $\bar{H}_{\text{разм}}(\bar{r}, t)$ – размагничивающее поле, определяется из магнитостатических уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \bar{H}_{\text{разм}}(\bar{r}, t) &= -4 \cdot \pi \cdot \operatorname{div} \bar{M}(\bar{r}, t), \\ \bar{H}_{\text{разм}}(r \rightarrow \infty) &\rightarrow 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для вычисления намагниченности расчетная область ЗП (рисунок 1, позиция 2) разбивается на n колец шириной h и толщиной, равной толщине эффективно проводящего $z_{\text{Э}}$ -слоя, т.е. колец с внешним и внутренним диаметрами, равными $d_{\text{ЗП}}/2$ и $(d_{\text{ЗП}}/2 - z_{\text{Э}})$ соответственно, где $d_{\text{ЗП}}$ – диаметр ЗП. Каждое из колец ограничивается узловыми точками Z_i . При уточнении модели принято допущение о том, что в каждом элементе разбиения намагниченность остается постоянной величиной.

Одним из достоинств разработанного численного метода является возможность задания поля температур $T_i = T(Z_i)$.

В общем виде вычисления намагниченности заданной области ЗП осуществляются методом итераций.

Модуль суммарного магнитного поля $H_{\Sigma}(Z_i, t)$ определяется в соответствии с выражением

$$H_{\Sigma}(Z_i, t) = H_{\text{внеш}} + \sum A_{ij} \cdot M_j(t), \quad (8)$$

где A_{ij} – элемент матрицы форм-факторов, получаемой с учетом интерполяции намагниченности в элементарном магните путем интегрального решения магнитостатических уравнений Максвелла в форме скалярного потенциала; i – положение точки наблюдения (рисунок 1); j – положение границы конечного элемента с магнитным материалом.

Для расчетов модуля суммарного магнитного поля $H_{\Sigma}(Z_i, t)$ использовался метод релаксации. Данный метод решения систем алгебраических уравнений обладает большой скоростью сходимости благодаря тому, что в нем после вычисления очередной i -ой компоненты $(k+1)$ -го приближения по формуле метода Зейделя производят дополнительное смещение этой компоненты.

Значение модуля напряженности магнитного поля определялось в соответствии с выражением:

$$H^{(k)} = H^{(k-1)} + \lambda_1 \left[H^{(k-1)} + A \left(B^{(k-1)} - H^{(k-1)} \right) \right], \quad (9)$$

где λ_1 – число, называемое коэффициентом ускорения сходимости по напряженности магнитного поля, определяющее метод решения выражения (10). Так, при $\lambda_1 < 1$, формула (9) является формулой метода нижней релаксации, при $\lambda_1 = 1$ – формулой Зейделя, а при $\lambda_1 > 1$ – формулой верхней релаксации. $B^{(k-1)}$ представляет собой значение магнитной индукции, вычисленной для $(k-1)$ -го шага итерации.

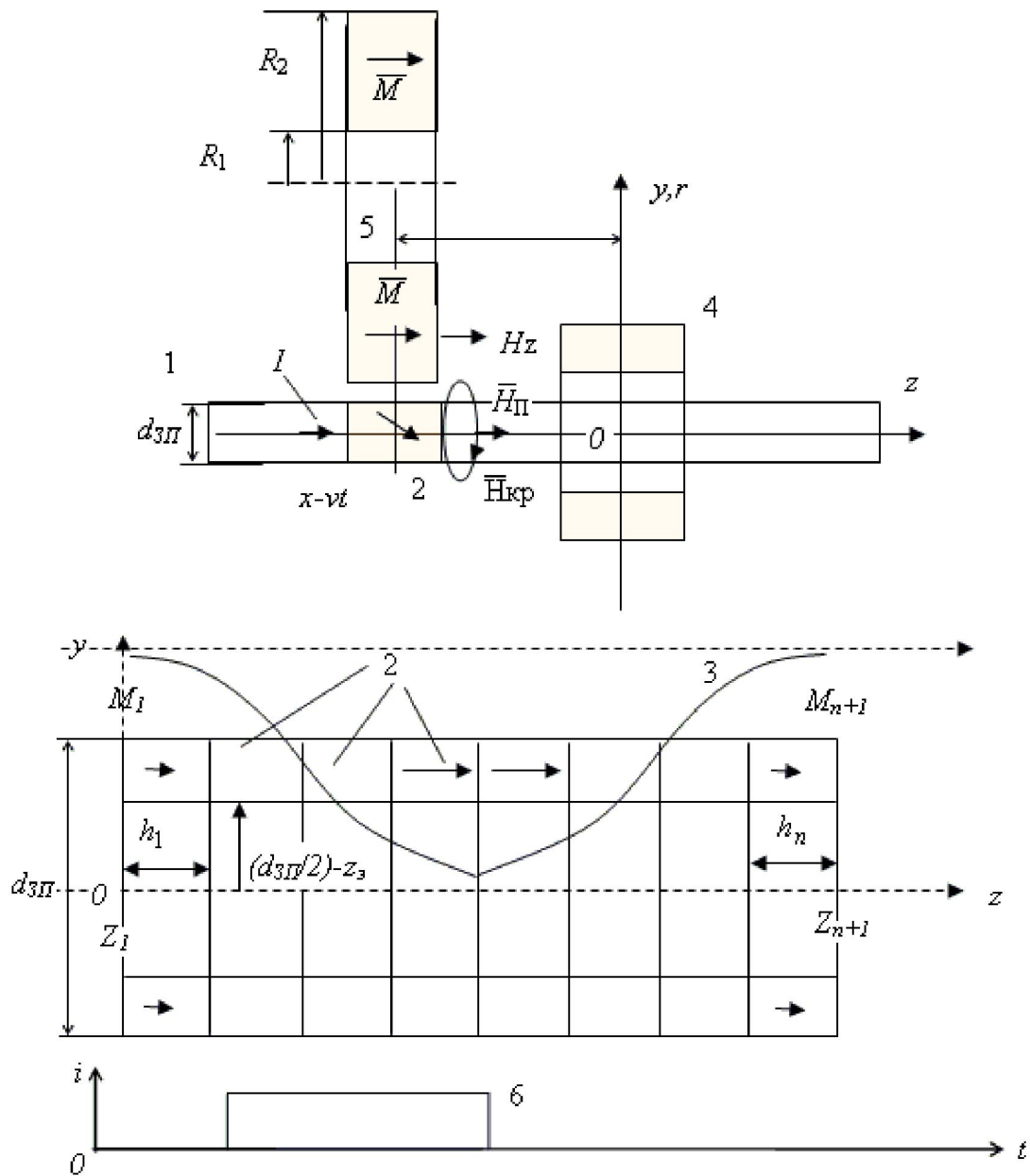


Рисунок 1 – Модель процесса намагничивания в звукопроводе: 1 – ЗП, 2 – области разбиения ЗП, 3 – распределение продольной составляющей результирующего магнитного поля, 4 – катушка воспроизведения или соленоид, 5 – ПМ, 6 – импульс тока в ЗП в зависимости от времени

Значение индукции на k -ом шаге итерации определялось по формуле

$$\bar{B}^{(k)} = (1 - \lambda'_1) \cdot \bar{B}^{(k-1)} + \lambda'_1 \cdot \bar{B}(H^{(k)}), \quad (10)$$

где $\bar{H}^{(k)}$ – значение напряженности магнитного поля на k -ом шаге итерации, определяемое согласно выражению (9), λ'_1 – коэффициент ускорения сходимости по магнитной индукции. Введение релаксации по индукции повышает устойчивость решения и составляет отличие предложенного метода от существующих.

Для определения значения модуля размагничивающего поля использовалось известное выражение:

$$H_{\text{разм}}(r) = \int_V (-\nabla M) \frac{(\bar{r} - \bar{\rho})}{|\bar{r} - \bar{\rho}|^3} dV + \int_s \bar{M} \cdot \bar{n} \frac{(\bar{r} - \bar{\rho})}{|\bar{r} - \bar{\rho}|^3} ds \quad (11)$$

где \bar{r} – радиус-вектор точки наблюдения; $\bar{\rho}$ – радиус-вектор, проведенный к магнитному материалу; \bar{n} – единичная нормаль к боковой поверхности элемента разбиения; V, s – соответственно объем и площадь поверхности ЗП; ∇M – оператор дивергенции намагниченности.

Поле от n -го элемента разбиения определялось по выражению, полученному в результате интегрирования (11):

$$H_n(r, z) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{(d_{3П}/2)-z_3}^{d_{3П}/2} \frac{M_n \cdot (z - n \cdot h) \cdot E(k_1) \rho \cdot d\rho}{[(r - \rho)^2 + (z - n \cdot h)^2] \cdot [(r + \rho)^2 + (z - n \cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\pi} \cdot \int_{(d_{3П}/2)-z_3}^{d_{3П}/2} \frac{M_n \cdot (z - (n-1) \cdot h) \cdot E(k_2) \rho \cdot d\rho}{[(r - \rho)^2 + (z - (n-1) \cdot h)^2] \cdot [(r + \rho)^2 + (z - (n-1) \cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

где $E(k_1) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_1^2 (\sin \varphi)^2} d\varphi$ и $E(k_2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_2^2 (\sin \varphi)^2} d\varphi$ – полные эллип-

тические интегралы второго рода, $k_1^2 = \frac{4 \cdot r \cdot \rho}{(r + \rho)^2 + (z - h)^2}$; $k_2^2 = \frac{4 \cdot r \cdot \rho}{(r + \rho)^2 + (z)^2}$;

r – текущий радиус; z – координата, параллельная направлению намагниченности звукопровода. Также были найдены значения элементов матрицы форм-факторов A_{ij} при $r = \frac{d_{3П}}{2}$ и $z = z_i = h \cdot i$.

Подставляя найденные с использованием предложенного численного метода значения суммарных напряженностей для кольцевых структур, в выражения (8), (3), можно получить распределение намагниченности ЗП и найти проекцию вектора намагниченности M_z на ось OZ . Полученное значение проекции имеет максимальное значение в кольцевой структуре ЗП, расположенной в принятом за точку отсчета центре ПМ. При изменении координаты z указанное значение намагниченности уменьшается.

Намагниченность ЗП после формирования УЗВ кручения изменяется со временем. Этот процесс можно представить в виде последовательностей намагниченности кольцевых структур, сменяющихся со скоростью v УЗВ кручения. Это приводит к изменению намагниченностей областей ЗП в соответствии с выражением $M_z = M(z - vt)$.

Полный поток, пересекающий обмотку соленоида, используемого для считывания сигнала, определяется формулой

$$\Phi_z(z_0) = k \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\frac{d_{3П}}{2}} \mu_0 \cdot M_z(z - vt, r) \cdot H_{cz}(z) \cdot 2\pi r \cdot dr \cdot dz, \quad (13)$$

где $d_{3П}$ – диаметр ЗП; k – обобщенный коэффициент, включающий магнито-стрикционные коэффициенты; μ_0 – магнитная постоянная, $M_z(z - vt, r)$ – значение горизонтальной составляющей вектора намагниченности M_z при изменении времени, $H_{cz}(z)$ – проекция вектора напряженности магнитного поля соленоида на ось OZ .

Сигнал воспроизведения $u(z_0)$, форма которого в относительных единицах периода УЗВ кручения приведена на рисунке 2, определяется производной от магнитного потока $\Phi_z(z_0)$ как

$$u(z_0) = \frac{d\Phi_z(z_0)}{dt}. \quad (14)$$

Из выражений (1)–(14) следует, что путем изменения параметров ЗП и ПМ можно получить на аналоговых выходах ДМН устойчивые сигналы для уверенного выполнения последующего аналого-цифрового преобразования искомым углов отклонения объекта относительно горизонтальной плоскости в условиях воздействия обозначенных факторов влияния.

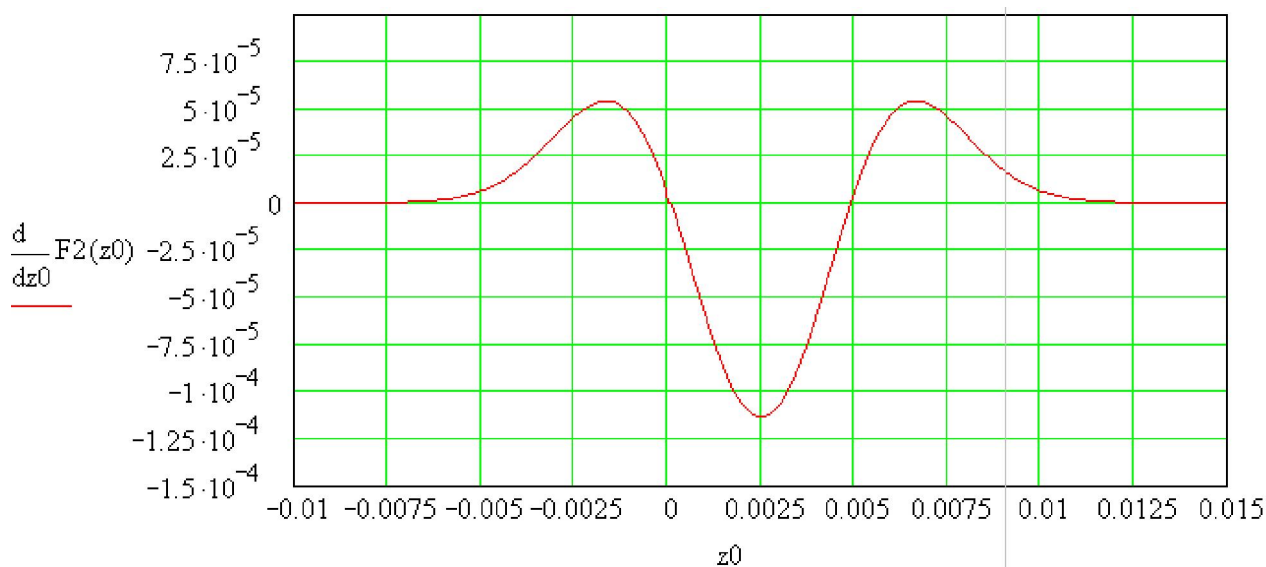


Рисунок 2 – Сигнал воспроизведения периода УЗВ кручения, в относительных единицах

В четвертом разделе описаны комплексные исследования ДМН, представлен комплекс программ для выполнения вычислительного эксперимента по расчету магнитных полей новых конструкций ДМН на УЗВ кручения с использова-

нием уточненных математических моделей, оценена их адекватность. В результате расчета магнитных полей комплекс программ позволяет определить минимальное, оптимальное и максимальное расстояния от ПМ рассматриваемых форм до ЗП, обеспечивающие уверенное возбуждение УЗВ кручения.

Ввиду сложности и трудоемкости проведения физического эксперимента по регистрации магнитных полей ДМН оценка точности расчетов по предложенным в работе методикам выполнена путем сопоставительного сравнения с результатами, полученными с использованием системы компьютерного моделирования ELCUT. Отклонение данных вычислительных экспериментов в системе ELCUT от аналогичных результатов, полученных с использованием моделей (1), (2), не превышает 3 %, что подтверждает адекватность методики.

Однако рассчитать размеры корпуса с учетом расширения жидкости, а также определить такие параметры, как глубина погружения поплавкового элемента с постоянным магнитом в рабочую жидкость, требуемый объем жидкости, толщина стенки корпуса и необходимое расстояние от ПМ до ЗП в программе ELCUT не представляется возможным. Кроме этого, решение в среде ELCUT задач, связанных с анализом намагниченности ЗП под воздействием результирующего и суммарного магнитных полей \bar{H}_r и \bar{H}_Σ также оказывается невыполнимым.

Программный комплекс “Двухкоординатный МН”, экранные формы которого приведены на рисунке 3, позволяет вычислить минимальное, оптимальное и максимальное расстояния от ПМ до ЗП, а также оценить перемещения ПМ, обусловленные конструктивными зазорами между поплавковым элементом (ПЭ) и внутренней стенкой корпуса. Кроме того, комплекс программ позволяет обосновать глубину погружения ПЭ с учетом свойств и параметров элементов конструкции, значения тепловых зазоров между ПЭ и внутренней стенкой корпуса, возможную толщину стенки корпуса и т.д.

В программном комплексе предусмотрен учет положения ПМ относительно ПЭ – внутри ПЭ или на его поверхности. Предусмотрена также возможность выбора различных материалов элементов конструкции. Кроме того, в программном комплексе имеется процедура для расчета размеров ПЭ по введенным параметрам и свойствам ПМ и рабочей жидкости.

Расчеты с помощью программного комплекса “Двухкоординатный МН” производятся в соответствии с алгоритмом, схема которого приведена на рисунке 4. Возможность учета дополнительных параметров ПЭ и ПМ отличает комплекс от других известных компьютерных программ.

Расстояния от ПМ до ЗП r_{MIN} , $r_{ОПТ}$ и r_{MAX} определяются по результирующим значениям напряженностей магнитных полей, определяемых соответственно

по формулам $H_r = H_s = H_{MAX}$, $H_r = \frac{H_C + H_s}{2} = H_{ОПТ}$ и $H_r = H_C = H_{MIN}$,

где H_C и H_s – коэрцитивная сила и напряженность насыщения ПМ.

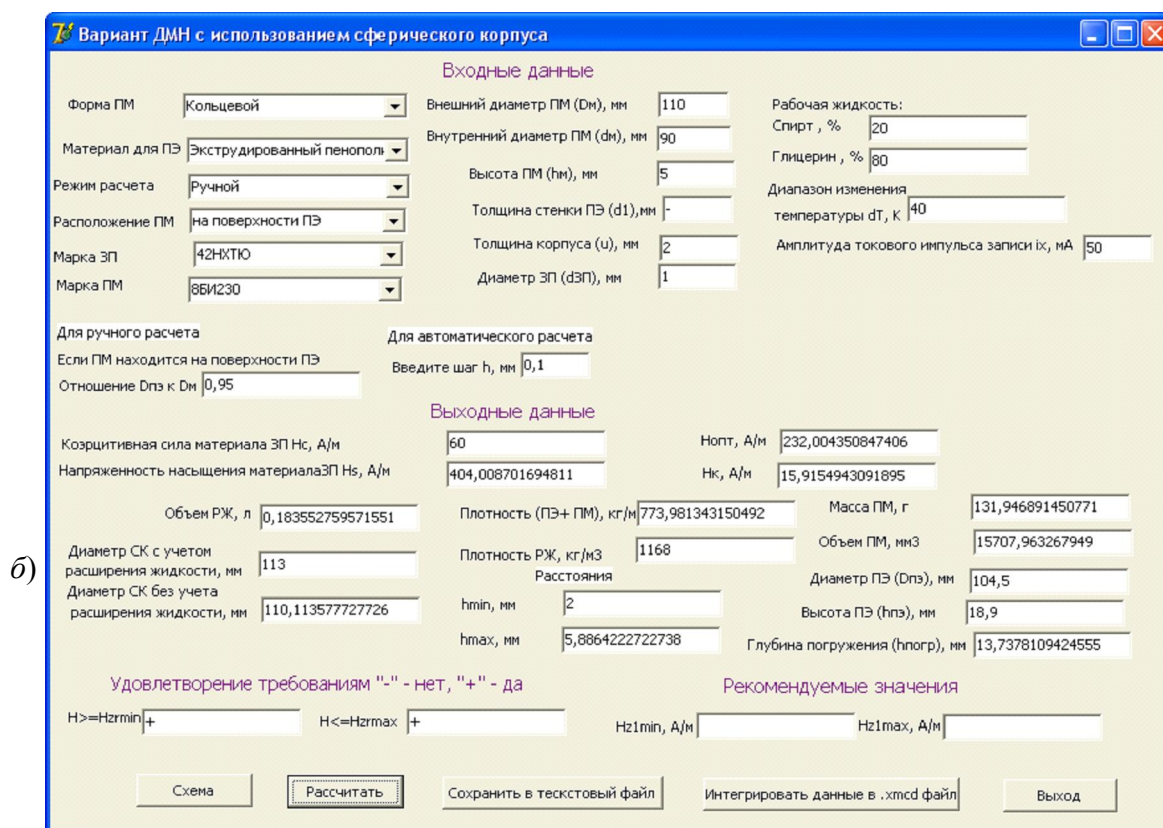
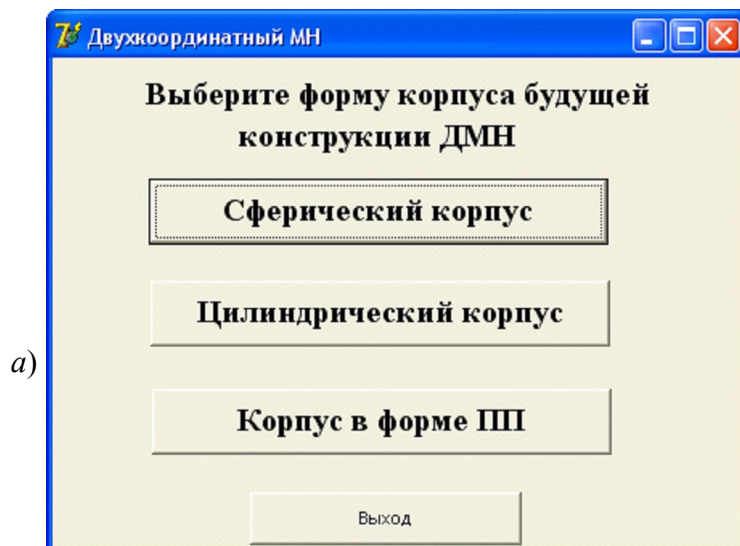


Рисунок 3 – Главное окно (a) и окно параметров ДМН (б) программного комплекса “Двухкоординатный МН”

Результаты вычислительного эксперимента с применением комплекса программ “Двухкоординатный МН” по исследованию расстояний r_{MIN} , $r_{ОПТ}$ и r_{MAX} для СПМ и КПМ марки 8БИ230 со значением остаточной индукции $B_r=0,21$ Тл, внешним диаметром $D_M=110$ мм и внутренними $d_M=0$ мм и $d_M=90$ мм ЗП диаметром $d_{ЗП}=1$ мм из сплава 42НХТЮ с протекающим по нему токовым импульсом прямоугольной формы амплитудой $I_m=50$ мА приведены на рисунке 5.

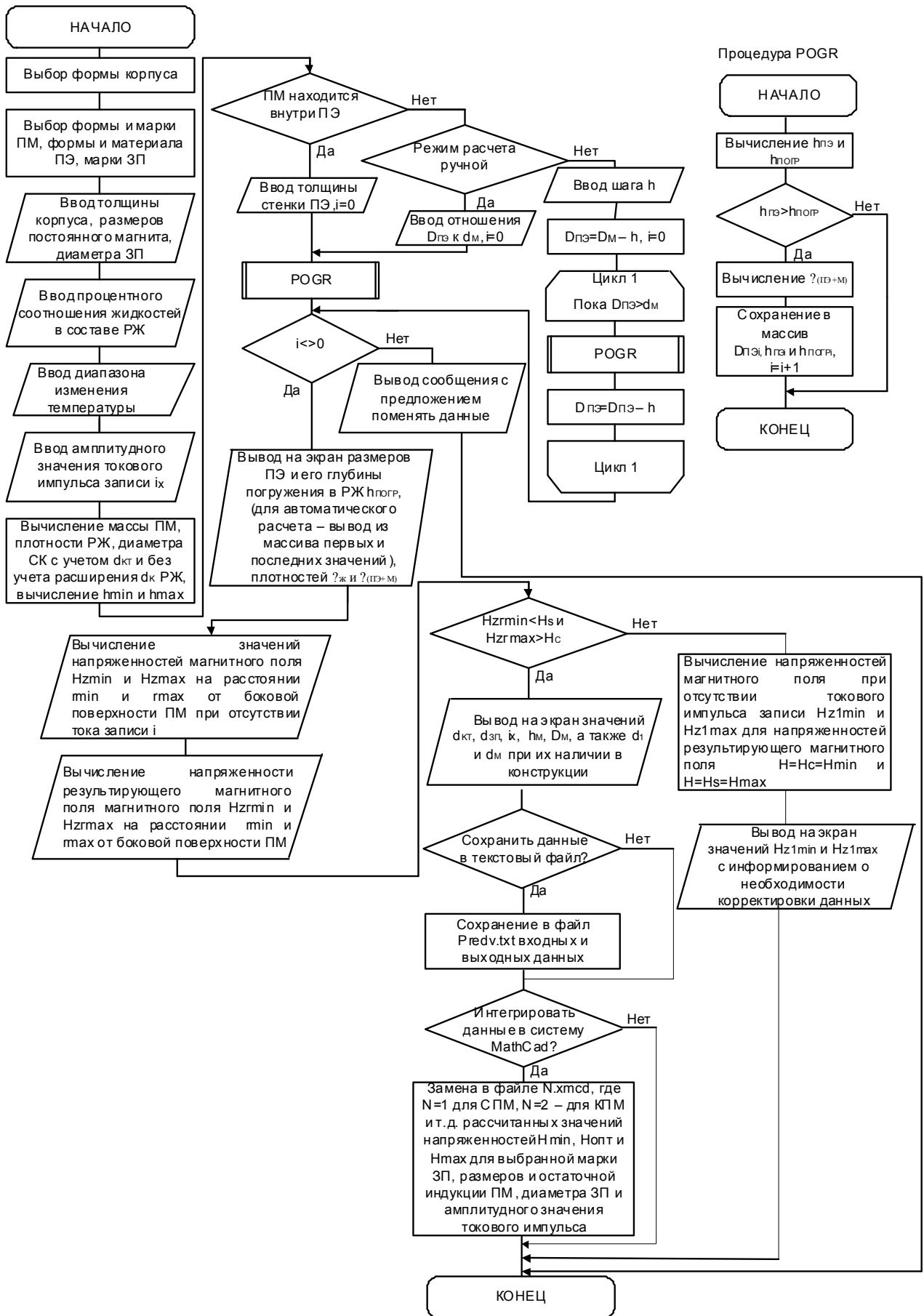


Рисунок 4 – Схема алгоритма расчета магнитного поля ДМН со сферическим корпусом

Анализ результатов вычислительного эксперимента позволил сделать вывод, что изменение высоты ПМ является эффективным способом изменения значений расстояний r_{MIN} , $r_{ОПТ}$ и r_{MAX} . Было установлено, что в ДМН с использованием СПМ и КПМ со значением внешнего диаметра $D_M > 100$ мм для уверенного возбуждения УЗВ кручения необходимо использование СПМ высотой более 0,5 мм или КПМ высотой более 1 мм. Это позволяет предусмотреть тепловой зазор $\delta = 3$ мм для учета расширения жидкости и изготовить корпус с толщиной стенки $u > 1$ мм.

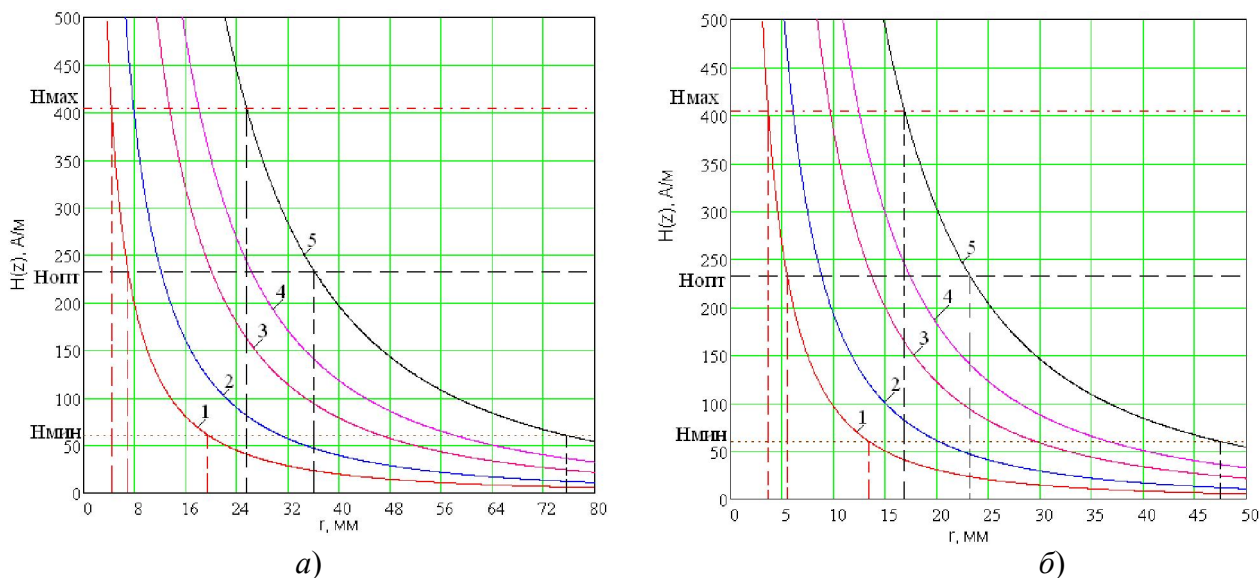


Рисунок 5 – Результаты исследования значений r_{MIN} , $r_{ОПТ}$ и r_{MAX} при изменении высоты h_M а) сплошного и б) кольцевого ПМ высотой h_M равной:

1 – $h_M = 0,5$ мм, 2 – $h_M = 1$ мм, 3 – $h_M = 2$ мм, 4 – $h_M = 3$ мм, 5 – $h_M = 5$ мм

Аналогичные результаты были получены в вычислительном эксперименте по определению оптимального расстояния $r_{ОПТ}$ при изменении остаточной индукции B_r ПМ. Так, увеличение значения остаточной индукции с $B_r = 0,21$ Тл до $B_r = 0,5$ Тл способствовало изменению расстояния $r_{ОПТ}$ более, чем в 1,5 раза у ДМН с использованием СПМ, КПМ и ППМ.

Проведенные с помощью разработанного программного комплекса “Двухкоординатный МН” вычислительные эксперименты с магнитными полями ДМН позволяют подобрать оптимальные значения параметров и свойств элементов конструкции ДМН, такие, как расстояние от ПМ до ЗП, толщина стенки корпуса, значения тепловых зазоров и т.д. Такие возможности, как одновременное решение нескольких задач расчета магнитных полей, параметров и элементов конструкции ДМН, получение результатов моделирования при различных значениях параметров и свойств элементов, позволяют рассматривать комплекс программ “Двухкоординатный МН” как эффективное программное средство проектирования магнитоstrictionных приборов и устройств.

Полученные результаты комплексных исследований магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров позволяют указать пути совершенствования их конструктивных, технических и эксплуатационных характеристик.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе выполненного анализа современного состояния исследований в области математического моделирования магнитострикционных наклономеров уточнены известные модели и разработан метод математического моделирования магнитных полей постоянных магнитов, процессов намагничивания звукопроводов и формирования сигнала воспроизведения двухкоординатных магнитострикционных наклономеров.

2. Разработаны численный метод и вычислительные алгоритмы расчета намагниченности звукопроводов двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения с использованием уточненных моделей магнитных полей постоянных магнитов. Предложенная расчетная методика позволяет оптимизировать параметры, учесть конструктивные особенности двухкоординатных магнитострикционных наклономеров и влияние размагничивающих полей без проведения дорогостоящих и трудоемких физических экспериментов.

3. Создан комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения.

4. С применением разработанных методов проведены комплексные исследования двухкоординатных магнитострикционных наклономеров на ультразвуковых волнах кручения, результаты которых позволяют оптимизировать их конструктивные и эксплуатационные параметры

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, содержащих постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпухин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 25–29.

2. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, содержащих кольцевой или сплошной постоянный магнит / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпухин // Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. С. 467–472.

3. Воронцов, А.А. Двумерная модель формирования сигнала воспроизведения магнитострикционного наклономера / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов //

Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. – С. 462–466.

Публикации в других изданиях:

4. Воронцов, А.А. Математическое моделирование и расчет проекций напряженностей магнитных полей на ось Z сплошных постоянных магнитов, используемых в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, О.А. Мешкова, Т.В. Дарченко // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: Сборник статей I Международной НТК. – Тольятти: ПВГУС, 2013. – Ч. 1. – С. 197–203.

5. Воронцов, А.А. Математическое моделирование и расчет значения проекции на ось Z вектора напряженности магнитного поля в кольцевых постоянных магнитах двухкоординатных магнитострикционных наклономеров / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Р.В. Шабнов, Д.И. Маркин // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: Сборник статей I Международной НТК. – Тольятти: ПВГУС, 2013. – Ч. 1. – С. 192–196.

6. Воронцов, А.А. Исследование и математическое моделирование зависимости напряженности магнитного поля соленоида от его длины / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Т.В. Дарченко, Р.В. Шабнов // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: Сборник статей I Международной НТК. – Тольятти: ПВГУС, 2013. – Ч. 1. – С. 187–191.

7. Воронцов, А.А. Математическое моделирование напряженности магнитного поля соленоида при изменении координаты Z в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, В.А. Володин, Т.В. Дарченко // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: Сборник статей I Международной НТК. – Тольятти: ПВГУС, 2013. – Ч. 1. – С. 182–186.

8. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей сплошных и кольцевых постоянных магнитов вблизи их оснований в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Н.А. Ермолаев, В.А. Володин // Современные информационные технологии: Сборник статей Международной НТК. – Пенза: ПГТА, 2012. – Вып. 16. – С. 53–56.

9. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей кольцевых постоянных магнитов двухкоординатных магнитострикционных наклономеров / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Н.А. Ермолаев, В.А. Володин // Современные информационные технологии: Сборник статей Международной НТК. Пенза: ПГТА, 2012. – Вып. 16. – С. 50–53.

10. Воронцов, А.А. Математическое моделирование и экспериментальная проверка формулы расчета угла наклона плоскости двухкоординатного магнитострикционного наклономера относительно горизонтальной плоскости / А.А. Во-

ронцов, Ю.Н. Слесарев, К.Н. Илюхин, Е.Г. Зюзина // Современные информационные технологии: Сборник статей Международной НТК. – Пенза: ПГТА, 2012. – Вып. 16. – С. 46–49.

11. Воронцов, А.А. Исследование зависимости напряженности магнитного поля соленоида от координаты Z / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Н.А. Ермолаев, Д.И. Маркин // Современные информационные технологии: Сборник статей Международной НТК. Пенза: ПГТА, 2012. – Вып. 16. – С. 42–45.

12. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей сплошных постоянных магнитов двухкоординатных магнитострикционных наклономеров / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев, Н.А. Ермолаев, Р.В. Шабнов // Современные информационные технологии: Сборник статей Международной НТК. Пенза: ПГТА, 2012. – Вып. 16. – С. 38–42.

13. Воронцов, А.А. Моделирование магнитной системы магнитострикционного накломера / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев // Наука и образование 2010: Сборник материалов Международной НТК. – Мурманск: МГТУ, 2010. – С. 160–163.

14. Патент № 2389975 Российская Федерация, МПК: G01C9/18. Магнитострикционный двухкоординатный наклономер / А.А. Воронцов, Е.С. Демин, С.Б. Демин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Пензенская государственная технологическая академия”. – № 2008122791/28; заявл. 05.06.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

Зарегистрированные программы:

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611477. Программа моделирования магнитных полей ДМН на УЗВ кручения. Правообладатель: ФГБОУ ВПО “Пензенская государственная технологическая академия”. Авторы: Воронцов А.А., Слесарев Ю.Н., Карпухин Э.В. Заявл. 20.02.2013 г.

ВОРОНЦОВ Александр Анатольевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ДВУХКООРДИНАТНЫХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ
НАКЛОНОМЕРАХ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Н.Н. Зосимовой

Сдано в производство 28.05.13. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,27. Уч.-изд. л. 1,29. Заказ № 2309. Тираж 100.

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