

На правах рукописи

ПЧЕЛИНЦЕВА Ольга Николаевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДЕМПФЕРНЫХ
МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
УРОВНЯ НА КРУТИЛЬНЫХ ВОЛНАХ**

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

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

ПЕНЗА – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Пензенская государственная технологическая академия” на кафедре “Электроника и электротехника”.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Демин Станислав Борисович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Михайлов Петр Григорьевич

кандидат технических наук, профессор
Белоусов Евгений Федорович

Ведущая организация – ООО “Научно-производственное предприятие “СЕНСОР”, г. Заречный Пензенской области.

Защита диссертации состоится 29 июня 2011 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 при Пензенской государственной технологической академии по адресу: 440605, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а / 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Пензенская государственная технологическая академия”.

Автореферат размещен на сайте <http://www.pgta.ru>.

Автореферат разослан “ ____ ” мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Чулков В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Реализовать стремление повысить качество учета поступающих и отгружаемых продуктов нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности невозможно без использования современных информационных технологий и преобразовательной техники при создании систем автоматизированного учета (САУ).

Базовыми элементами таких систем являются уровнемеры, использующие различные физические эффекты, состоящие из первичного и вторичного преобразователей уровня, которые, в основном, и определяют их метрологические и эксплуатационные характеристики при количественном учете технологического продукта.

Анализ известных сегодня уровнемеров, применяемых в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, показал, что перспективными и относительно новыми приборами измерения уровня являются ультразвуковые магнитострикционные преобразователи уровня (МПУ). Их отличает сравнительно низкая себестоимость изготовления, высокая точность измерений, широкий диапазон преобразования уровня $h_x = 0 - 20,0 \text{ м}$ с разрешением не хуже $\Delta h_x = 1,0 \text{ мм}$. Простая конструкция первичного преобразователя уровня удешевляет настройки и обслуживание, обеспечивает высокую эксплуатационную надежность. В отдельных конструкторских разработках МПУ имеют высокий уровень автоматизации измерительных операций, позволяя интегрироваться в САУ с развитой инфраструктурой.

Сегодня ведущие коммерческие фирмы США, Германии, Японии, Франции интенсивно ведут разработку технологий создания магнитострикционных приборов информационной группы. Это такие крупнейшие мировые фирмы-производители, как MTS Systems Corporation Sensors Division (США), MTS Sensor Technologie GmbH & Co KG (Германия), MTS Sensors Technology Corporation Ushikubo Bldg (Япония), Balluff Inc. (США, Германия) и др. В России производством данной группы приборов занимаются производственные ЗАО ПТФ «НОВИНТЕХ» (г. Королев, Московская область), НПП «СЕНСОР» (г. Заречный, Пензенская область). Отличительной особенностью зарубежных магнитострикционных приборов является высокая стоимость и сложность конструкции при лучших технических и эксплуатационных характеристиках по сравнению с известными отечественными аналогами.

Это можно объяснить недостаточностью теоретической проработки данной группы приборов, отсутствием полных и адекватных математических моделей ультразвуковых МПУ вида «вход-выход», способных комплексно описывать физические процессы преобразования сигналов с учетом всех значимых параметров.

Значительный вклад в теорию и практику создания магнитострикционных приборов информационной группы внесли отечественные ученые и исследовате-

ли: Э.А. Артемьев, А.С. Волков, Г.В. Глебович, С.Б. Демин, В.Б. Есиков, А.И. Надеев, Б.С. Петровский, С.В. Петровых, О.Н. Петрищев, В.Н. Прошкин, Г.Д. Тимофеев, В.И. Хмелевских, В.С. Шикалов, А.П. Шпинь, В.Х. Ясовеев и др.

Работы этих авторов сводятся к рассмотрению отдельных физических процессов для конкретного вида информационных магнитострикционных приборов. Известные математические модели описываются системами дифференциальных уравнений, не учитывают факторы влияния среды, что затрудняет их использование для практических целей и проведения теоретических исследований при создании новых видов приборов.

Решение данной проблемы видится в применении математического моделирования ультразвуковых МПУ с использованием аналитических и численных методов, создании математических моделей таких приборов, адекватно отражающих физические процессы преобразования информационных сигналов и программных продуктов на их основе.

Это послужило основанием для выбора ультразвуковых МПУ в качестве объекта для математического исследования. В работе рассматривается новый вид ультразвуковых уровнемеров – бездемпферные МПУ на крутильных волнах. Исследование математической модели этого вида приборов с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента, учитывающей основные факторы влияния среды и конструктивные особенности, представляет особый интерес для дальнейшего развития теории и практики ультразвуковых магнитострикционных преобразователей информационной группы, и решает актуальную проблему.

Целью диссертационной работы является математическое моделирование процессов преобразования сигналов уровня в трактах бездемпферных магнитострикционных преобразователей уровня на крутильных волнах, применение численных методов для их оптимизации, а также разработка комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решались следующие задачи.

1. Анализ проблем и современного состояния исследований в области математического моделирования ультразвуковых МПУ.
2. Проведение математического моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах с применением аналитических и численных методов.
3. Выполнение комплексных исследований процессов преобразования уровня бездемпферных МПУ на крутильных волнах.
4. Оптимизация параметров бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием вычислительных методов и оценка их эффективности.
5. Создание комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента бездемпферных МПУ на крутильных волнах, позволяющих учитывать влияние основных факторов среды.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования являются математические модели физических процессов преобразования информационных

сигналов уровня в трактах бездемпферных МПУ на крутильных волнах. Объектом исследования являются бездемпферные МПУ на крутильных волнах.

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использовались методы аналитического и имитационного моделирования, теории математического анализа и статистики, теории твердого тела и магнитного поля, теории автоматического управления и регулирования. Численные расчеты выполнены с использованием прикладных пакетов систем компьютерной математики (СКМ) Maple v.13 и MATLAB v.6.5.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. На основании проведенных исследований выполнено математическое моделирование бездемпферных МПУ на крутильных волнах и проведены комплексные исследования процессов преобразования сигналов уровня в их трактах.

2. Создана методика моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах, позволяющая учитывать факторы влияния, их особенности и принцип работы.

3. Разработана методика оптимизации бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием вычислительных методов и алгоритмов численной оценки их эффективности.

4. Разработан комплекс программ для выполнения вычислительного эксперимента бездемпферных МПУ на крутильных волнах.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработанные вычислительные процедуры и алгоритмы программного комплекса позволяют проводить вычислительный эксперимент бездемпферных МПУ на крутильных волнах, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким физическим экспериментам.

2. Результаты математического моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах позволяют численно оценивать влияние основных дестабилизирующих факторов среды на их выходные параметры с высокой достоверностью.

3. По результатам моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием программного комплекса предложены пути повышения их эффективности и дальнейшего развития.

Результаты комплексных исследований диссертационной работы могут быть использованы при создании ультразвуковых приборов механических величин для автоматизированных технологических систем, использующих эффекты продольной магнитострикции.

Реализация и внедрение результатов. Результаты диссертационной работы использованы на ООО НПП “Агроприбор” при модернизации опытной системы водоподготовки теплоносителя в ходе выполнения инициативной НИР №10-2007 “Разработка ультразвукового магнитострикционного уровнемера для гидротехнических систем водоподготовки”. Применение бездемпферного МПУ на волнах кручения в опытной системе подготовки теплоносителя позволило повысить ее уровень автоматизации и эффективность.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Обоснование выбора объекта математического моделирования.
2. Результаты математического моделирования и комплексных исследований бездемпферных МПУ на крутильных волнах.
3. Методика оптимизации бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием вычислительных методов и алгоритмов численной оценки их эффективности.
4. Методика математического моделирования и программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента бездемпферных МПУ на крутильных волнах.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные результаты исследований докладывались на: XI Международной научно-практической конференции “Современные технологии в машиностроении” (г. Пенза, 2007); XV Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2009); Международной научно-технической конференции “Наука и образование – 2010” (г. Мурманск, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, и 2 патента на изобретение РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, выводов по работе, библиографического списка из 137 наименований и приложения. Основной текст изложен на 146 страницах, содержит 2 таблицы и 88 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы методы исследований, новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ проблем математического моделирования ультразвуковых МПУ и обоснован выбор объекта математического исследования, проанализированы эффективные численные методы и программные средства для выполнения моделирования бездемпферных МПУ на крутильных ультразвуковых волнах (УЗВ) по их математической модели, поставлена цель и задачи исследований.

В результате изучения физических процессов преобразования сигналов уровня h_x и рассматривая бездемпферный МПУ на крутильных волнах как техническую систему, реализующую метод пассивного демпфирования энергии УЗВ за счет их естественного затухания и поглощения средой звукопровода (рисунок 1), были выделены ряд взаимосвязанных во времени t последовательно протекающих физических процессов.

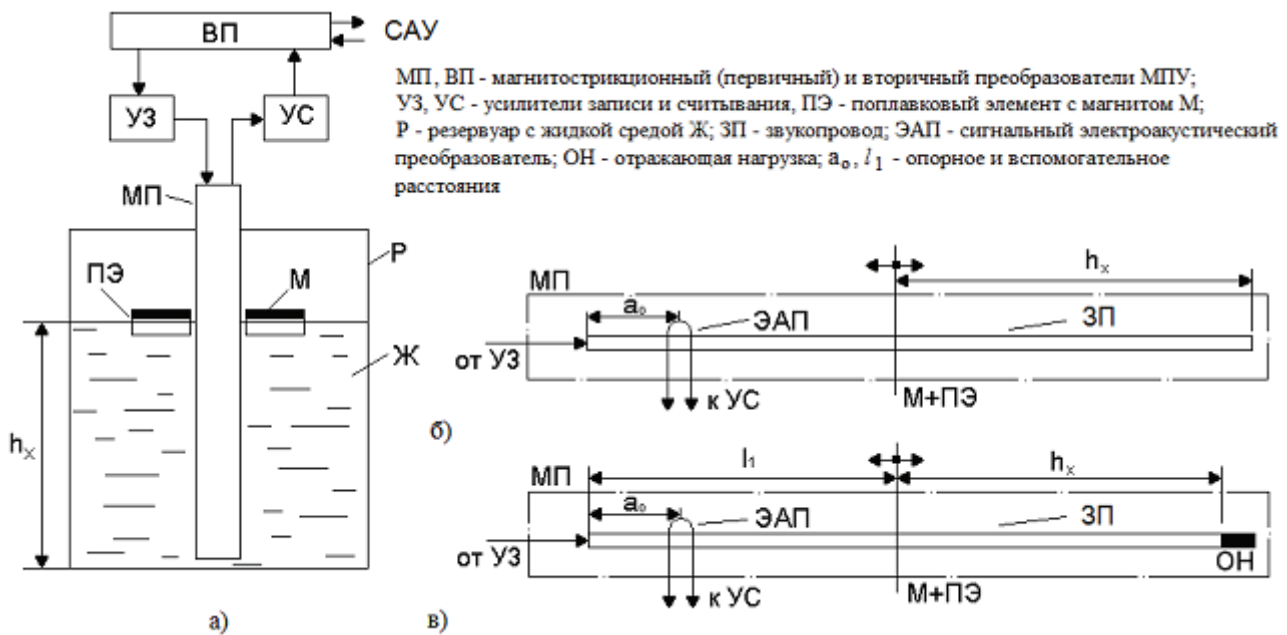


Рисунок 1 – Размещение МПУ на технологическом объекте (а) и варианты схемы его первичного МП (б, в)

Эти процессы описываются соответствующими математическими моделями $W_i, i = 1, 2 \dots 6$, являющимися предметной областью данного исследования, и в целом, составляют математическую модель бездемпферных МПУ на УЗВ кручения

$$W(t) = \frac{N_x(t)}{h_x(t)} = \prod_{i=1}^{i=6} W_i(t).$$

Математическая модель $W_1(t) = i_x(t)/h_x(t)$ позволяет описывать процессы формирования импульса тока i_x , подаваемого в звукопровод первичного МП бездемпферного МПУ. Процессы возбуждения (записи) упругих волн кручения σ_x (эффект Видемана) в среде звукопровода описывает математическая модель $W_2(t) = \sigma_x(t)/i_x(x)$. Поведение падающих волн кручения σ_{xx} при трансляции их через звукопровод в заданную точку съема измерительной информации представляет математическая модель $W_3(t) = \sigma_{xx}(t)/\sigma_x(t)$. В заданной точке съема (считывания) акустических сигналов, в результате магнитоупругого преобразования (эффект Виллари), формируются информационные время-импульсные сигналы U_x , описываемые математической моделью $W_4(t) = U_x(t)/\sigma_{xx}(t)$.

О процессах формирования время-импульсных сигналов T_x текущего уровня h_x дает представление математическая модель вида $W_5(t) = T_x(t)/U_x(t)$. Модель $W_6(t) = N_x(t)/T_x(t)$ описывает процессы дискретизации время-импульсных сигналов уровня h_x с получением цифрового кода N_x в заданном двоичном формате.

Итогом анализа проблемных вопросов математического моделирования ультразвуковых МПУ явился выбор эффективных вычислительных методов моделирования процессов преобразования уровня с использованием современных компьютерных технологий и постановка цели и задач исследований.

Во втором разделе проведено исследование физических процессов преобразования сигналов уровня в трактах бездемпферных МПУ на крутильных волнах с применением эффективных вычислительных методов по математической модели, учитывающей влияние основных факторов среды.

Исследовались процессы влияния краевого и поверхностного эффектов при возбуждении в среде прямолинейного звукопровода из магнитострикционного материала упругих УЗВ кручения, и их считывании выходным индуктивным ЭАП по математической модели.

Так, возбуждение УЗВ кручения в бездемпферных МПУ осуществляется посредством входных магнитострикционных преобразователей Видемана (МПВ), состоящих из кольцевого постоянного магнита с поплавковым элементом, и металлического звукопровода, включенного в цепь усилителя записи. Для этого в среду звукопровода подают токовые импульсы заданной формы, длительности $\tau_{и}$ и частоты $f = 1/T$, которые описываются выражением:

$$i_x(t) = \pm \left(\frac{E_{п} - U_{у3}}{r} \right) \left\{ \begin{array}{l} \tau_{и} \frac{1}{T} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \left(\frac{\pi \tau_{и} n}{T} \right) \times \\ \times \cos \left[\frac{2\pi n}{T} (t - \tau_{и}) \right] \end{array} \right\} = W_1(t) h_x(t), \quad (1)$$

где $U_{у3}$ – падение напряжения в цепи УЗ, позволяющее учитывать изменения питающего напряжения $E_{п}$ и сопротивление r звукопровода.

Вокруг звукопровода с током i_x радиуса R образуется радиальное магнитное поле $H_{x,к}$. Это поле, взаимодействуя с продольным магнитным полем $H_{о,п}$ магнита входного МПВ, образует результирующее поле, являющегося источником возбуждения в среде звукопровода бездемпферных МПУ упругих УЗВ кручения:

$$H_{x,г}(t) = \sqrt{H_{x,к}^2(t) + H_{о,п}^2 K_{кз}^2} =$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ 4i_x^2(t) \frac{(2R - 2C2/c_o)^2 r \mu \cdot e^{-2\beta_1 \frac{C2}{c_o^2}}}{c_o^2 R^4 L f} + i_o^2 W_o^2 \left[B_M \begin{pmatrix} \arctg(B1) - \\ -\arctg(B2) \end{pmatrix} \right] \right\}^{0,5}, \quad (2)$$

$$- A_M \begin{pmatrix} \arctg(B1) - \\ -\arctg(B2) \end{pmatrix} + C3 \cdot \ln(C5) + C4 \cdot \ln(C6) \cdot e^{-C7^2}$$

где $C1...C7, B1...B2$ – вычисляемые коэффициенты модели, c_o – скорость электромагнитной волны в вакууме, μ – магнитная проницаемость материала ЗП, L – его длина, β_1 – затухание УЗВ, i_o, W_o – ток и число витком эквивалентного соленоида, A_M, B_M – его поперечные размеры, $K_{кз}$ – коэффициент краевого эффекта.

Полученное выражение (2) учитывает влияния краевого, поверхностного эффектов и магнитную вязкость материала звукопровода.

В процессе моделирования подтверждено, что краевой эффект сужает зону $l_{пр.эф} = l_{пр} K_{кз}$ эффективного преобразования от ее исходного размера $l_{пр}$ с увеличением расстояния до поверхности звукопровода, и вызывает нарушение условия оптимальности возбуждения УЗВ кручения: $\tau_{п} = l_{пр.эф} / V_B = \tau_{и}, V_B, \tau_{п}$ – скорость и время преобразования УЗВ, отражаясь на ее амплитуде. Полученные данные согласуются с известными работами В.С. Шикалова и А.С. Волкова.

Численно установлено влияние поверхностного эффекта в зоне входного МПВ бездемпферных МПУ на крутильных волнах, работающих на частотах $f \geq 0,5$ МГц. Он приводит, как известно, к образованию эффективно проводящего слоя Z_3 площадью $S_{х.эф} = \pi Z_3 (2R - Z_3)$ по сечению звукопровода радиуса R из-за экранирующего воздействия. С ростом частоты $f = 0,5...2,0$ МГц значение Z_3 асимптотически убывает.

Влияния магнитной вязкости магнитострикционного материала звукопровода при значениях $R = (0,5...1,5) \cdot 10^{-3}$ м на рабочих частотах f не обнаружено в процессе моделирования.

При работе ультразвуковых МПУ их выходные параметры подвержены изменениям из-за влияния температуры T^o , механических напряжений – остаточных $\sigma_{ост}$ и нагрузочных P_x , дрейфа питающих напряжений $E_{п}$. Поэтому обозначенные дестабилизирующие факторы среды были учтены при моделировании данного вида преобразователей уровня.

Из работ В. Брауна, Ш. Кирхнера, О. Буклея, Л. Бергмана, Н.С. Акулова, А.И. Надеева известно, что температурные поля и механические напряжения изменяют электрические ($\rho_{зп}$), магнитные (χ, μ, J_s, B_s), магнитострикционные (λ, λ_s) и конструктивные (l_x, l_M, A_M) параметры элементов конструкции ультразвуковых МПУ, отражаясь на их технических и эксплуатационных характеристиках.

С ростом продольных упругих напряжений $\sigma_{п}$ звукопровода слабо изменяется его удельное электрическое сопротивление $\rho_{зп}$:

$$\rho_{зп.P} = \rho_{зп} [1 + k_P (\sigma_{п} - \sigma_{ост})], \quad (3)$$

где k_P – коэффициент пропорциональности продольного напряжения. Изменяются магнитная проницаемость μ и магнитострикция $\lambda \rightarrow \lambda_s$ материала звукопровода:

$$\mu_P = \mu(1 - k_{пр}) \text{ и } \lambda_P = \pm [\lambda(1 + k_{пр})], \quad (4)$$

где $k_{пр} = f(\sigma_{п}, \sigma_{ост})$ – расчетный коэффициент продольного напряжения.

Математическое исследование этих процессов (3), (4) показало, что с ростом остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в материале звукопровода МПУ его параметры $\chi_P, J_P, \rho_{эл.P}, \mu_P, \lambda_P$ заметно изменяются.

Заметный дрейф вышеперечисленных параметров материала звукопровода наблюдается под действием температуры в диапазоне $T^\circ \geq 100^\circ C$, вызывая изменения заданных выходных характеристик бездемпферных МПУ. Для описания теплового влияния на процессы преобразования уровня в модель МПУ введен показатель k_T температурного изменения параметра.

Основываясь на известных экспериментальных данных можно предположить, что магнитострикция λ , магнитная проницаемость μ и модуль упругости E материала звукопровода изменяются по зависимостям:

$$\lambda_T = \pm \lambda \sqrt{k_T}, \quad \mu_T = \mu \sqrt[3]{k_T}, \quad E_T = E \sqrt{k_T}. \quad (5)$$

Исследование зависимостей (5) показало, что заметные изменения модуля упругости E материала звукопровода наблюдаются при $T^\circ \geq 150^\circ C$, превышающие пределы температурного диапазона работы МПУ.

Температурная перестройка его доменной структуры вызывает изменение индукции насыщения B_s по аналогичному закону: $H_{o.T} = B_{s.T} / (\mu_o \cdot \mu_T)$, отражаясь на значениях формируемого поля входного МПВ.

По известным зависимостям под действием температуры T° изменяется удельное сопротивление $\rho_{эл}$, первоначальная длина l_x звукопровода и размер l_m постоянного магнита входного МПВ бездемпферных МПУ.

Результаты моделирования совместного влияния факторов P_x и T° на электрические, магнитные и магнитострикционные параметры бездемпферных МПУ приведены на рисунке 2.

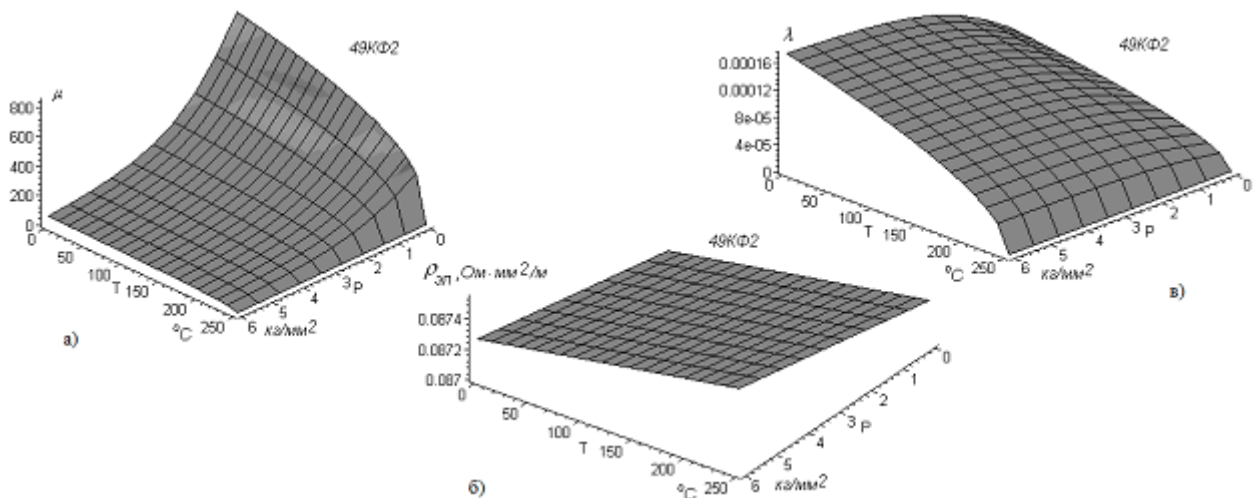


Рисунок 2 – Расчетные значения зависимостей бездемпферных МПУ:

а) $\mu_P = f(P, T)$, б) $\rho_{эл.P.T} = f(P, T)$ и в) $\lambda_{P.T} = f(P, T)$

Под действием факторов P_x и T° , изменяются значения активного сопротивления $r_{P,T}$ материала звукопровода при его длине $l_{x,P,T}$ и токе записи $i_{x,P,T}$. Это вызывает соответствующее изменение напряженности

$$H_{x,r,P,T}(t) = \sqrt{H_{x,k,P,T}^2(t) + H_{o,T}^2 K_{кз}^2}$$
 результирующего поля входного МПВ.

Под его действием в сечениях звукопровода формируются магнитострикционные напряжения разных знаков на перепады токового импульса $i_{x,P,T}$, образуя УЗВ кручения заданной формы:

$$\sigma_x(t) = \pm \sum_{i=1}^{i=4} \sigma_i(t) = \pm \sum_{i=1}^{i=4} \lambda_{P,T} E_T K'_\mu \int_{-\tau_x/2}^{+\tau_x/2} H_{x,r,P,T,i}(t) \cdot e^{-\alpha} dt = W_2(t) i_x(t), \quad (6)$$

где $\alpha = \tau_x/2 - x/V_B$, $K'_\mu = K_\mu \mu_{P,H}$, K_μ – коэффициент магнитной проницаемости материала звукопровода, x – пространственная координата, считая величину $V_B = \text{const}$ в условиях влияющих факторов.

Эта УЗВ далее распространяется по звукопроводу в сторону выходного ЭАП, испытывая затухание β_1 на искомом временном интервале $T'_x = l_{x,P,T}/V_B = W_3(t) U'_x(t)$ преобразования уровня h_x :

$$\sigma'_{xx}(t) = \sigma'_{x,o}(t - T'_x) \cdot e^{-\beta_1 l_{x,P,T}}. \quad (7)$$

Достигая выходной ЭАП, упругая УЗВ (7) изменяет магнитную проницаемость μ и магнитострикцию λ материала звукопровода бездемпферных МПУ (эффект Виллари) предположительно по зависимостям:

$$\mu_{\text{об.кр.}P,T} = \mu_{P,H} [1 - e^{\phi_1(K_T + \phi_1)}] \text{ и } \lambda_{\text{об.кр.}P,T} = \pm \lambda_{P,T} [1 - e^{\phi_1(K_T + \phi_1)}], \quad (8)$$

где $\phi_1 = k_o [\bar{\sigma}_{xx} - \sigma_{\text{ост}}]$ – показатель сдвиговой деформации, $\bar{\sigma}_{xx}$ – расчетное значение волновой деформации в условиях влияния факторов P_x, T° , K_T – эмпирический коэффициент гистерезиса магнитострикции. Это приводит к изменению магнитной индукции ЭАП по законам составляющих $B_{\text{об.}P,T} = f(\mu_o, a_o, \mu_{\text{об.кр.}P,T}, H_{o,\text{об}}, H_c, K_{кз})$, наводя на его выводах Э.Д.С. индукции:

$$e'_x(t) = W_{\text{об.эф}} \frac{d\Phi_{\text{об.}P,T}(t)}{dt} \sigma'_{xx}(t) V_B, \quad (9)$$

где $W_{\text{об.эф}}$ – эффективное число витков ЭАП, a_o – его диэлектрический зазор, μ_o – магнитная постоянная, H_c – коэрцитивная сила, $H_{o,\text{об}}$ – напряженность магнитного поля, $\Phi_{\text{об.}P,T}$ – магнитный поток ЭАП, которая далее усиливается

усилителем считывания бездемпферных МПУ в Ky – раз до требуемого значения (рисунок 3):

$$U'_{xx}(T_x) = Ky e_x(t) \cdot e^{-\beta \cdot h_x} = W_4(t) \sigma_{xx}(t). \quad (10)$$

Изменение температуры T° среды вызывает изменение коэффициента усиления $\Delta Ky = a_K Ky \sqrt{T^\circ / T_{20}^\circ}$, a_K – масштабирующий коэффициент, T_{20}° – начальная температура, и дрейф частоты $\Delta f_o = K_f f_o \sqrt{E_{II} / \Delta E_{II}}$ измерительного генератора ВП, K_f – коэффициент изменения частоты, ΔE_{II} – диапазон изменения питающего напряжения.

Это приводит к изменениям длительности временного интервала $T'_x = T_x \pm \Delta T_x$ уровня на величину ΔT_x и девиации частоты f_o , отражаясь на результирующем преобразовании уровня $N_x = T'_x \Delta f_o$ бездемпферных МПУ на крутильных волнах, описываемого моделью $W_6(t) = N_x(t) / T_x(t)$.

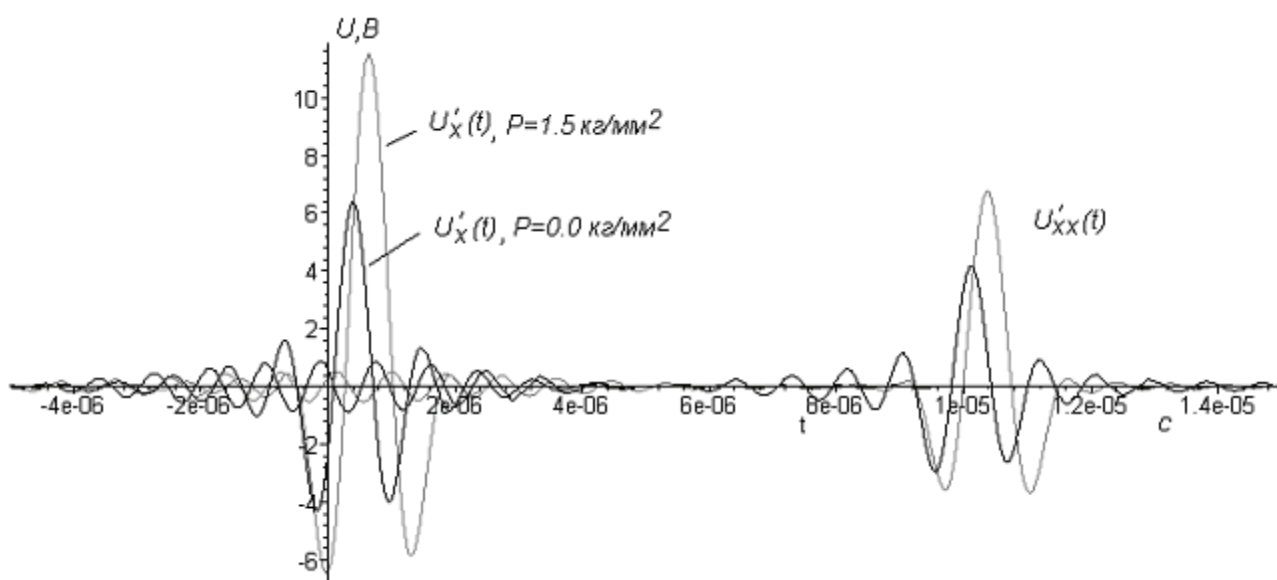


Рисунок 3 – Вычисленные значения сигналов считывания $U'_x(t)$, $U'_{xx}(t)$ напряженного звукопровода из сплава 49К2Ф при $Ky = 250$, $l_x = 0,4$ м

Таким образом, основываясь на теоретических и эмпирических результатах и используя эффективные вычислительные методы математического моделирования получены результаты расчета выходных параметров бездемпферных МПУ на крутильных волнах с погрешностью не более 10-15%. Численно установлено влияние установленных дестабилизирующих факторов при заданных ограничениях математической модели физических процессов преобразования уровня.

В третьем разделе предложена методика оптимизации и оценки эффективности бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием численных

методов, получены числовые оценки их эффективности, на основе которых предложены пути дальнейшего совершенствования данной подгруппы приборов.

Отмечается, что требования САУ к характеристикам ультразвуковых МПУ весьма разнообразны. Наиболее привлекательными по простоте реализации и себестоимости изготовления являются одноотсчетные МПУ, использующие метод прямого дискретного счета с I -образными бездемпферными акустическими трактами, которые и исследуются в работе.

Проведена численная оценка информационной (технической) эффективности данного типа ультразвуковых преобразователей уровня $\mathfrak{E}_T = \bar{U}_x(T_x)/U_x(T_x)$, где $\bar{U}_x(T_x)$ – предельно достижимая амплитуда выходного сигнала на интервале T_x преобразования уровня h_x в условиях влияния факторов среды:

$$U_x(t) = f[t; A = (E, \lambda, \beta_1, V_B); B = (\tau_{и}, H_x, B_{об}, P_x); D = (a_o, W_{об}, Ky, l_x = h_x, f_o, T^o)]. \quad (11)$$

По результатам этих исследований были предложены пути повышения эффективности преобразования уровня бездемпферных МПУ на крутильных волнах. Они не требуют дополнительных энергетических затрат для повышения показателя \mathfrak{E}_T , но нуждается, в отдельных случаях, в усложнении конструкции первичных МП.

Показано, что решение задачи параметрической оптимизации бездемпферных МПУ на крутильных волнах методом одномерной минимизации, когда топология конструкции МП, способы крепления на объекте и условия эксплуатации определены, сводится к поиску некоторой целевой функции $f(x) \rightarrow \max$, $x \in D(f) \subset \mathfrak{R}$ на множестве точек $D(f)$, в которых это значение соответствует критерию оптимальности \mathfrak{R} .

Вычисление целевой функции $f(x) = U_x(t) \rightarrow \max$ бездемпферных МПУ, за которую принята амплитуда его выходного сигнала (11) на множестве задаваемых сигналообразующих параметров $D(f) = \{h_x, \Delta R_{пэ}, \Delta R_{эап}, P_x, W_{об}, Ky, \lambda_s, E, V_B, \mu, \beta_o, \rho_{эп}, H_c, H_o\}$, здесь $\Delta R_{пэ}, \Delta R_{эап}$ – зазоры между поверхностью звукопровода и внутренними стенками ПЭ (МПВ) и выходного ЭАП, показывает, что ее экстремум достигается при минимально допустимых зазорах $\Delta R_{пэ}, \Delta R_{эап}$ ПЭ и выходного ЭАП. С их увеличением значение $f(x)$ уменьшается (рисунок 4, А).

Поперечные колебания ПЭ вызывают уменьшение значения целевой функции $f(x)$ в некотором диапазоне $U_x(T_x) = 3,5 - 1,9$ В (рисунок 4, В) с сохранением работоспособности МПУ.

С применением вычислительных методов выполнена численная оценка эффективности систем автоматизированного учета с бездемпферными МПУ на крутильных волнах.

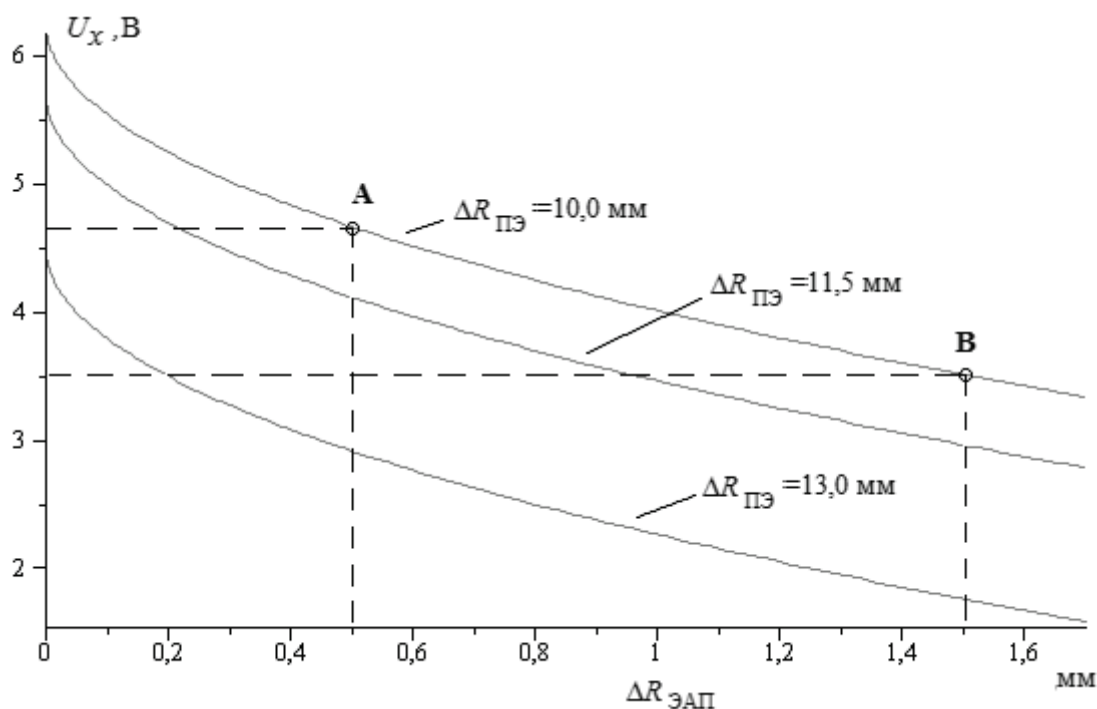


Рисунок 4 – Вид целевой функции $f(x)$ МПУ при разных значениях $\Delta R_{ПЭ}$

Сделан вывод, что повышение эффективности управления САУ с бездемпферными МПУ на крутильных волнах достигается за счет оптимизации их параметров, уменьшения постоянной времени процессов преобразования сигналов уровня и повышения разрешающей способности, подтверждая перспективность их использования в подобных системах.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований бездемпферных МПУ на крутильных волнах, разработаны методика их моделирования и комплекс программ для проведения вычислительного эксперимента, определены тенденции дальнейшего совершенствования ультразвуковых приборов данной группы.

В ходе экспериментальных исследований при создании опытного образца МПУ на волнах кручения получены количественные и качественные характеристики.

Вычислительный эксперимент, как важнейшая составляющая математического моделирования, имеет большую роль в изучении физических процессов преобразования информационных сигналов уровня в трактах ультразвуковых МПУ.

Для выполнения вычислительного эксперимента бездемпферных МПУ на крутильных волнах к программным средствам предъявляется ряд требований, например они должны содержать базы данных исходных параметров и результатов вычислений и др., которые не могут обеспечить известные средства СКМ. С этой целью разработана методика моделирования для данного вида приборов, на основе которой создан программный комплекс, ориентированный на язык математического моделирования для интеграции в СКМ с открытым исходным ко-

дом, например MATLAB. Его структурная схема приведена на рисунке 5, состоящая из ряда взаимосвязанных подсистем: интерфейса пользователя, моделирования, баз данных, визуализации и вывода результата.

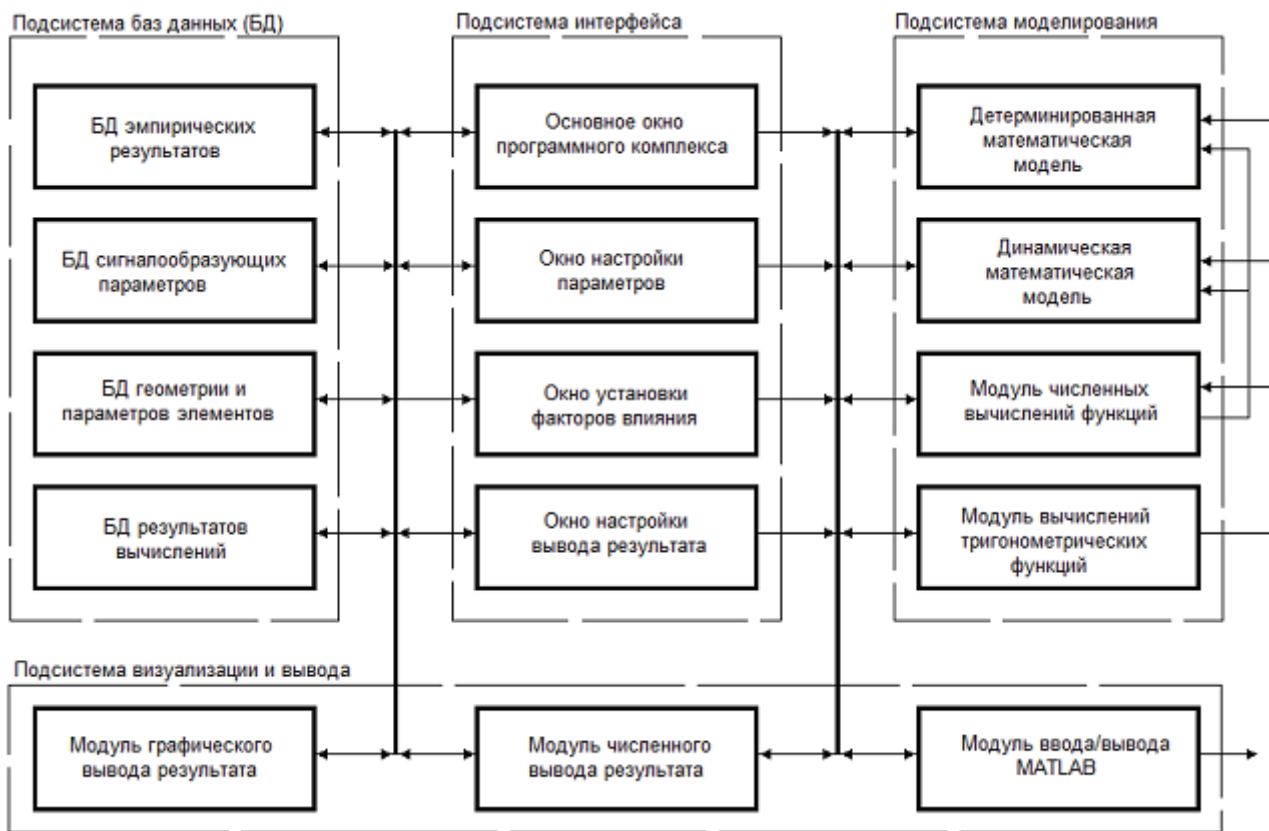


Рисунок 5 – Структура программного комплекса

Для получения решений численными методами математическая модель бездемпферных МПУ на крутильных волнах в программном комплексе представлена в виде вычислительных процедур и алгоритмов. Приведены алгоритмы численного дифференцирования и интегрирования с использованием методов Рунге-Кутты 4-го порядка и трапеций, интерполирования методом кубической сплайн-функции.

При анализе динамических процессов преобразования уровня с использованием модели бездемпферных МПУ на крутильных волнах в программном комплексе применен матричный метод решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, когда математическая модель записывается в дифференциальной форме

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2} T_{\Pi}^2 + 2 \frac{d}{dt} T_{\Pi} E = K_{\Pi} \frac{T_x}{U_x} - 1 \\ \frac{d}{dt} T_x = K_{\Pi} h_x \end{cases}, \quad (12)$$

и преобразуется в квадратную матрицу, удобную для автоматизированного вычисления

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} X6 \\ \frac{d}{dt} X7 \\ \frac{d}{dt} X8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 - \frac{B1}{B2} - \frac{B0}{B2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X6 \\ X7 \\ X8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{\Pi}^2}{B2} \end{bmatrix} \cdot h_x, \quad (13)$$

где E, K_{Π} – коэффициенты демпфирования и усиления МПУ соответственно, $X6...X8, B0...B2$ – вычисляемые коэффициенты матрицы.

Управление программным комплексом осуществляется через панель основного окна (рисунок 6), позволяя настраивать каждую из его подсистем.

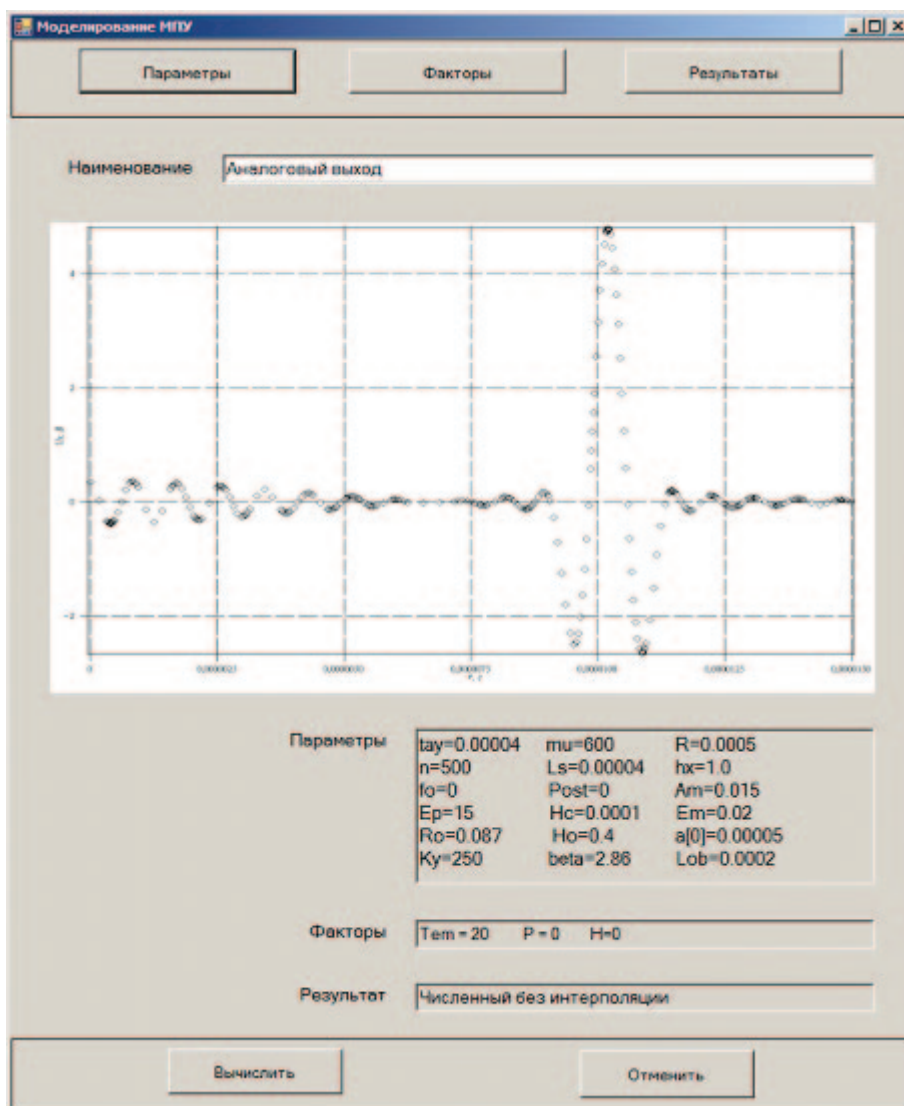


Рисунок 6 – Основное окно программного комплекса

Полученные результаты вычислительного эксперимента бездемпферных МПУ на крутильных волнах с применением разработанного программного комп-

лекса имеют высокую достоверность (погрешность $\sim 15\%$), позволяя его использовать при проектировании данного вида ультразвуковых приборов.

На основе анализа источников научно-технической и патентной информации определены основные пути и тенденции дальнейшего развития ультразвуковых МПУ на волнах кручения для задач САУ.

Сделан вывод, что разработанный программный комплекс позволяет проводить вычислительный эксперимент бездемпферных МПУ на крутильных волнах с высокой достоверностью и наглядностью результатов при минимальных временных затратах, не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам.

В приложении приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ проблем математического моделирования ультразвуковых МПУ позволил обосновать подкласс бездемпферных МПУ на крутильных волнах как актуальный математический объект для исследования.

2. Проведенная систематизация методов математического моделирования позволила выявить наиболее эффективные вычислительные методы, которые применены для моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах и создания программного комплекса.

3. Основываясь на теоретических и экспериментальных результатах с использованием аналитических и численных методов проведено математическое моделирование физических процессов преобразования сигналов уровня ультразвуковых МПУ на крутильных волнах, позволяя получать достоверные результаты (вычислительная погрешность 10-15%), не прибегая к дорогостоящим физическим экспериментам.

4. Результаты математического моделирования бездемпферных МПУ на крутильных волнах дает адекватное численное представление влияния установленных дестабилизирующих факторов среды при заданных ограничениях.

5. Предложенная методика оптимизации бездемпферных МПУ на крутильных волнах с использованием эффективных вычислительных методов позволяет устанавливать оптимальные численные значения параметров и обеспечить требуемые технические показатели ультразвуковых приборов при их реализации.

6. Разработан комплекс программных средств с использованием эффективных численных методов для проведения вычислительного эксперимента по анализу бездемпферных МПУ на крутильных волнах. Разработанные вычислительные алгоритмы программного комплекса учитывают конструктивные особенности и режимы работы бездемпферных МПУ на крутильных волнах, позволяют выполнять вычислительный эксперимент с учетом влияния основных дестабилизирующих факторов среды.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Пчелинцева, О.Н. Моделирование импульсных магнитных полей магнитострикционных приборов сейсмобезопасности и уровня [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, С.Б. Демин// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – №1 (13). – С.103-112.
2. Пчелинцева, О.Н. Математическое моделирование факторов влияния магнитострикционных преобразователей механических величин [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, С.Б. Демин// Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – №1 (21), ч. 2. – С.99-104.
3. Пчелинцева, О.Н. Математическое моделирование воздействий упругих напряжений и температуры на форму сигналов магнитострикционных преобразователей перемещений [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, С.Б. Демин// Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Том 16. – №2. – С.387-396.

Публикации в других изданиях

4. Пчелинцева, О.Н. Магнитострикционные преобразователи уровня и наклона АСУТП [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, А.А. Воронцов, С.Б. Демин, А.А. Дюдюкин//. Современные технологии в машиностроении: Сб. статей XI международной НПК, декабрь 2007. – Пенза, ПДЗ, 2007. – С.140– 143.
5. Патент RU №2310174, мПК⁷: G01F23/28, G01K23/30. Ультразвуковой уровнемер/ О.Н. Пчелинцева, С.Б. Демин, И.А. Демина; заявитель и патентообладатель Пенз. технол. академия. – Заявл. 18.05.2006; опубл. 10.11. 2007. – Бюл. №31. – 2007.
6. Патент RU №2319935, мПК⁷: G01F23/28, G01K23/30. Магнитострикционный уровнемер [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, С.Б. Демин, И.А. Демина; заявитель и патентообладатель Пенз. технол. академия. – Заявл. 13.06. 2006; опубл. 20.03. 2008. – Бюл. №8. – 2008.
7. Пчелинцева, О.Н. Исследование эффективности САУ АЗС с магнитострикционными преобразователями уровня [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, С.Б. Демин// Современные техника и технологии: сб. статей XV Международной науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, 4-8 мая 2009. – Томск, ТГУ, 2009. – С.153-155.
8. Пчелинцева, О.Н. Моделирование САУ АЗС с магнитострикционными приборами [Текст]/ О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, Э.В. Карпухин, С.Б. Демин// Наука и образование 2010: сб. статей Международной науч.-техн. конф., 5-9 апреля 2010. – Мурманск, МГТУ, 2010. – С.172-176.

Пчелинцева

Пчелинцева Ольга Николаевна

Моделирование бездемпферных
магнитострикционных преобразователей уровня
на крутильных волнах

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Редактор Л.Ю. Горюнова
Корректор А.Ю. Тощева
Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 26.05.11. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,11. Уч.-изд. л. 1,12. Заказ № 2023. Тираж 110.

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