

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 534.1:534-16:534-8

СТЕПАНЕНКО
Дмитрий Александрович

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
И КОЛЬЦЕВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ
И ПРИВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов
и детали машин

Минск 2018

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный
консультант

ВАСИЛЕВИЧ Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов машиностроительного профиля» Белорусского национального технического университета

Официальные
оппоненты:

РУБАНИК Василий Васильевич, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, доцент, директор ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»;

КОРЗЮК Виктор Иванович, академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математической кибернетики Белорусского государственного университета;

САКЕВИЧ Валерий Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики и технической механики УО «Витебский государственный технологический университет»

Оппонирующая
организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Защита состоится «13» апреля 2018 года в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д.02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «12» марта 2018 г.

Ученый секретарь совета по защите
диссертаций Д.02.05.03, доктор
технических наук, профессор

О. Г. Девойно

© Степаненко Д. А., 2018

© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ультразвуковые волноводы (УЗВ) широко применяются в медицине, в частности, в сердечно-сосудистой хирургии для ультразвуковой тромбэктомии (разрушения тромбов), являющейся минимально-инвазивной (малотравматичной) хирургической операцией и обеспечивающей селективность разрушения тромба и сокращение послеоперационного восстановительного периода, и для ультразвуковой терапии онкологических заболеваний, которая в сочетании с лучевой терапией позволяет повысить эффективность лечения по сравнению с независимым применением указанных терапевтических методов. Частота возникновения венозных тромбозов составляет 160 случаев на 100 000 человек населения, а потребность в УЗВ для тромбэктомии в Республике Беларусь – более 300 штук в год. УЗВ также находят широкое применение в технике, в частности, для ультразвуковой сварки, позволяющей производить холодное соединение чувствительных к перегреву электронных компонентов без предварительной подготовки поверхностей, и в ультразвуковых приводах (УЗП), имеющих по сравнению с другими типами приводов малые размеры, простую конструкцию, высокий КПД и низкое энергопотребление и используемых в хирургических роботах, медицинских диагностических и терапевтических устройствах, приводах автофокусировки объективов и часовых механизмах. Указанные преимущества, связанные с использованием УЗВ, приводят к расширению областей их применения и необходимости разработки новых и совершенствования существующих конструкций УЗВ, а также методик их расчета и проектирования. Конструктивно все УЗВ можно разделить на кольцевые и стержневые, которые в свою очередь делятся на простые, имеющие одинаковый профиль по всей длине, и составные, состоящие из нескольких последовательно соединенных участков различного профиля. Преимуществом составных УЗВ является возможность их оптимизации одновременно по нескольким эксплуатационным показателям путем варьирования профиля и конструктивных параметров участков. Кольцевые УЗВ обеспечивают возможность трансформации продольных колебаний в изгибные и всестороннего воздействия на охватываемую ими биологическую или технологическую среду. В настоящее время проектирование УЗВ производится в основном на основе экспериментальных методов, существенным недостатком которых является необходимость выполнения значительного объема опытно-конструкторских

работ по определению конструктивных параметров, обеспечивающих требуемые эксплуатационные показатели. Также применяются механико-математические методы проектирования и расчета УЗВ, которые можно разделить на аналитические и численные. Аналитические методы позволяют исследовать влияние конструктивных параметров УЗВ на их эксплуатационные показатели (проводить параметрический анализ), однако они применимы только для узкого класса профилей УЗВ, для которых дифференциальное уравнение колебаний может быть проинтегрировано в квадратурах. Численные методы применимы для УЗВ любого профиля, однако они усложняют проведение параметрического анализа УЗВ, так как требуют многократного повторения расчетов для каждого набора значений варьируемых конструктивных параметров. В связи с широким применением УЗВ в медицине и технике важной и актуальной народно-хозяйственной проблемой является разработка и внедрение новых методов и алгоритмов их расчета и проектирования, позволяющих проводить параметрический анализ и оптимизацию УЗВ с произвольным числом участков произвольного профиля. Решение этой проблемы возможно на основе развития комбинированных численно-аналитических методов и алгоритмов расчета и проектирования, сочетающих в себе достоинства известных аналитических и численных методов, что позволит упростить параметрический анализ и оптимизацию составных УЗВ, а также теоретически обосновать и внедрить новые конструкции таких волноводов и устройств на их основе для более широкого применения в хирургии и терапии, ультразвуковой сварке, УЗП и других сферах деятельности человека.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тематика диссертационной работы была включена в планы НИР Белорусского национального технического университета, утвержденные Советом университета и согласованные с Министерством образования Республики Беларусь: ГБ 06-274 «Повышение качества изделий приборостроения, медицинской техники и ювелирного производства на основе совершенствования технологий, конструкций, методов контроля и испытаний» (сроки выполнения 2006–2010 гг.), ГБ 42-11-240 «Разработка высокоэффективных технологий, создание и совершенствование конструкций, методов контроля изделий приборостроения, ювелирного производства, медицинской и бытовой техники» (сроки вы-

полнения 2011–2015 гг.). Ряд результатов, составляющих содержание данной диссертационной работы, получен в рамках выполнения совместного белорусско-литовского проекта Т11ЛИТ-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по теме «Теоретическое и экспериментальное исследование свойств эластичных биологических материалов при воздействии механических колебаний высокой частоты» (сроки выполнения 2011–2012 гг.) и отдельного проекта Министерства образования Республики Беларусь ГБ 09-46 «Разработать теоретические основы создания ультразвуковых приводов, работающих в режиме управляемого резонанса, для применения в технике и медицине» (сроки выполнения 2009–2010 гг.). Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22 апреля 2015 г., а именно направлению 4 «Медицина, фармация, медицинская техника».

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка методов расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике, обеспечивающих создание волноводов с оптимальными эксплуатационными характеристиками, и разработка и внедрение новых конструкций ультразвуковых волноводов и приводов на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести комплексный анализ существующих конструкций ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике и методов их расчета, моделирования и проектирования.

2. Разработать численно-аналитические методы и алгоритмы расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов для применения в ультразвуковой терапии и хирургии, ультразвуковой сварке и ультразвуковых приводах, а также математические модели и алгоритмы расчета параметров их взаимодействия с биологическими и технологическими средами.

3. Выполнить апробацию разработанных численно-аналитических методов и алгоритмов на конкретных примерах расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов, используемых в медицине и технике, и верифицировать результаты их применения с помощью известных методов расчета, моделирования и экспериментальных исследований.

4. Установить связи между геометрическими параметрами составных стержневых и кольцевых волноводов и их эксплуатационными характеристиками (резонансными частотами колебаний, коэффициентом усиления колебаний по амплитуде, параметрами создаваемого волноводами акустического поля) и на основе установленных связей определить значения геометрических параметров, обеспечивающие оптимальные эксплуатационные характеристики.

5. Провести комплекс экспериментальных исследований составных стержневых ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике.

6. На базе разработанных численно-аналитических методов и алгоритмов расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике теоретически обосновать и внедрить новые конструкции таких волноводов, а также приводов на их основе.

Научная новизна

В диссертации разработаны методы расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике, обеспечивающие создание волноводов с оптимальными эксплуатационными характеристиками, а также математические модели и алгоритмы расчета параметров их взаимодействия с биологическими и технологическими средами. На основе разработанных методов и алгоритмов установлены связи между оптимальными значениями геометрических параметров волноводов для ультразвуковой тромбэктомии, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой продольных колебаний, в том числе для волноводов из функционально-градиентных материалов, и влияние геометрической формы рабочих окончаний составных стержневых ультразвуковых волноводов для тромбэктомии на величину амплитуды создаваемого ими акустического давления. Для кольцевых волноводов для ультразвуковой терапии опухолей установлено, что при фиксированном значении частоты и наличии конструктивных ограничений, налагаемых на толщину волновода, возможно воздействие на опухоли только в ограниченном диапазоне изменения их диаметра, что требует применения других частот воздействия при выходе реального диаметра опухоли за пределы этого диапазона.

На основе результатов расчетов и результатов математического моделирования установлены механизмы усиления ультразвуковых коле-

баний кольцевыми концентраторами в зависимости от их конструкции, предложен новый принцип создания ультразвуковых приводов вращательного движения со статором, выполненным в виде кольцевого ультразвукового волновода, и установлены условия их работоспособности, а также предложен способ управления динамикой ультразвукового привода, в частности, числом положений устойчивого равновесия ротора, путем изменения степени геометрической асимметрии ротора.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод расчета и проектирования составных стержневых ультразвуковых волноводов, основанный на применении смешанного численно-аналитического алгоритма, включающего аналитическое определение передаточных матриц для участков волновода простой геометрической формы и численное определение передаточных матриц для участков со сложным профилем продольного сечения, что позволило установить зависимости между резонансными значениями геометрических параметров волновода при различных частотах колебаний и определить оптимальные значения геометрических параметров, обеспечивающие максимальный коэффициент усиления колебаний по амплитуде, в зависимости от частоты колебаний.

2. Результаты расчетов стержневых ультразвуковых волноводов из функционально-градиентных материалов с профилированием механических свойств (модуля упругости и/или плотности) по длине волновода, на основе которых установлено, что волноводы с геометрическим профилированием из функционально-градиентного материала обеспечивают повышение коэффициента усиления колебаний по амплитуде по сравнению с волноводами с геометрическим профилированием, выполненными из однородного материала, до z_1/z_2 раз, где z_1 и z_2 – волновое сопротивление материала для низкоамплитудной и высокоамплитудной частей волновода, и разработана новая конструкция стержневых ультразвуковых волноводов, отличающаяся совместным применением геометрического профилирования и профилирования механических свойств по длине волновода.

3. Методика расчета параметров акустических полей, создаваемых составными стержневыми ультразвуковыми волноводами в биологических средах, основанная на совместном применении метода граничных элементов и метода зеркального источника, что позволило установить влияние геометрической формы и параметров рабочих окончаний составных стержневых ультразвуковых волноводов для тромбоземии на величину амплитуды создаваемого ими акустического давления,

определяющую эффективность кавитационного разрушения материала тромба.

4. Результаты расчетов концентраторов ультразвуковых колебаний на резонансе кольцевых волноводов, позволившие установить механизмы усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде кольцевыми концентраторами в зависимости от их конструкции и разработать новые конструкции концентраторов, обеспечивающие по сравнению с традиционными стержневыми концентраторами упрощение конструкции, повышение технологичности изготовления, снижение габаритных размеров, увеличение коэффициента усиления и ширины резонанса.

5. Математическая модель взаимодействия кольцевых ультразвуковых волноводов с упругими биологическими средами, основанная на представлении взаимодействующего с волноводом биологического материала в виде винклеровской упругой среды с жесткостью, зависящей от порядка моды колебаний, что позволило установить зависимости между резонансными значениями геометрических параметров волновода при различных частотах колебаний с учетом взаимодействия с биологической средой и значения частот ультразвуковых колебаний, необходимые для обеспечения возможности воздействия на опухоли с заданным диапазоном изменения диаметра.

6. Результаты математического моделирования ультразвуковых приводов вращательного движения на основе кольцевых ультразвуковых волноводов и предложенный на их основе принцип создания ультразвуковых приводов, основанный на придании ротору привода формы, асимметричной относительно оси вращения, позволившие разработать новую конструкцию ультразвукового привода вращательного движения, содержащую статор, выполненный в виде совершающего изгибные колебания кольцевого волновода, и ротор, на который воздействуют радиационные силы со стороны акустического поля статора, и упростить конструкцию привода и управление его работой за счет возбуждения в статоре стоячих ультразвуковых волн вместо применяемых в приводах симметричной конструкции бегущих ультразвуковых волн.

7. Методики исследования динамики и условий работоспособности ультразвуковых приводов на основе кольцевых ультразвуковых волноводов, основанные на совместном применении метода граничных элементов, теории акустических радиационных сил и качественной теории нелинейных дифференциальных уравнений, что позволило установить влияние степени геометрической асимметрии ротора привода на его

динамику, в частности, на число положений устойчивого равновесия ротора, и установить условия работоспособности привода, состоящие в необходимости одновременного создания геометрической асимметрии ротора и асимметричного распределения амплитуды колебательных смещений по окружности статора.

8. Методика экспериментальных исследований составных стержневых ультразвуковых волноводов, основанная на измерении амплитуды внутренних сил с помощью датчиков на основе эффекта обратной магнитострикции, содержащих в качестве чувствительного элемента плоскую спиральную индукционную катушку, что обеспечивает пространственное разрешение измерений, и расчете амплитуды колебательных смещений на основе теоретических зависимостей между амплитудами колебательных смещений и внутренних сил и значений амплитуды колебательных смещений, измеренных прямым оптическим методом в двух сечениях волновода, что позволило исследовать пространственное распределение параметров колебаний по длине волновода.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные и практические результаты, представленные в диссертации, получены лично автором при консультировании д-ра физ.-мат. наук Василевича Ю.В. Соавторы научных публикаций, результаты которых вошли в диссертацию, принимали участие в проведении экспериментальных исследований (канд. техн. наук Минченя В.Т., Богданчук К.А., Бобровская А.И.), выборе методик и обсуждении результатов исследований (канд. техн. наук Минченя В.Т., д-р техн. наук Бубулис А.).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты работы представлены на следующих международных научно-технических конференциях: 4-я – 6-я международные конференции молодых биомедицинских инженеров и исследователей (г. Кошице, Словакия, 2010 г.; г. Прага, Чешская Республика, 2012 г.; г. Братислава, Словакия, 2014 г.), Международный конгресс по ультразвуку (г. Гданьск, Польша, 2011 г.), Международный симпозиум IEEE по ультразвуку (г. Дрезден, ФРГ, 2012 г.), Белорусско-корейский научно-технологический семинар (г. Минск, 2011 г.), 41-й Республиканский научно-методический семинар «Применение методов компьютерной механики в инженерии, науке, образовании» (г. Минск, 2010 г.), 2-я – 6-я и 8-я – 10-я МНТК «Приборостроение» (г. Минск, 2009–2013 гг., 2015–2017 гг.), 6-я и 8-я МНТК «Наука – об-

разованию, производству, экономике» (г. Минск, 2008 г., 2010 г.), МНТК «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» (г. Витебск, 2016 г.).

Результаты исследований использованы в производственном процессе Республиканского инновационного унитарного предприятия (РИУП) «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для расчета геометрических параметров составных стержневых волноводов для ультразвуковой тромбэктомии и кольцевых волноводов для ультразвуковой терапии опухолей и в производственном процессе ОАО «Планар-СО» для расчета геометрических параметров составных стержневых волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов, применяемых при сборке изделий электронной техники. Оптимизация волновода установки ЭМ-4370 позволила расширить технологические возможности установки, а именно увеличить диаметр присоединяемых выводов до 150 мкм, что примерно в 2 раза превышает паспортное значение и позволяет производить сборку высококачественной электроники. Ультразвуковые волноводы, производимые РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», разрешены Министерством здравоохранения РБ к реализации и медицинскому применению на территории Республики Беларусь и используются в Государственном учреждении (ГУ) «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», Учреждении здравоохранения (УЗ) «Минская областная клиническая больница» и ГУ «Республиканский клинический медицинский центр» Управления делами Президента РБ. Потребность учреждений здравоохранения в волноводах для ультразвуковой тромбэктомии составляет около 50 штук в год.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 48 научных работах, в том числе в одной монографии (19,45 авторских листов), 20 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (11,65 авторских листов), 4 статьях в научных журналах, одной статье в сборниках научных трудов, 17 статьях в сборниках материалов конференций и 5 патентах.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, общую характеристику работы, 6 глав, заключение, список использованных источников и приложения. Она изложена на 308 страницах, включает 115 рисунков, 12 таблиц и

библиографический список из 271 наименования, в том числе 48 публикаций соискателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена комплексному анализу существующих конструкций ультразвуковых волноводов, применяемых в технике и медицине, и методов их расчета и проектирования.

В медицине ультразвуковые волноводы применяются для сварки костей и мягких биологических тканей, замещения дефектов костной ткани путем наплавки полимерного материала, резки мягких биологических тканей и распиливания костей, а в технике – в качестве элементов ультразвуковых приводов, для ультразвуковой обработки материалов, сварки и очистки.

Особенно перспективным является применение в медицине и технике нежестких (гибких) ультразвуковых волноводов. В частности, гибкие ультразвуковые волноводы применяются в сосудистой хирургии для выполнения операций эндартерэктомии и тромбозэктомии, цель которых состоит в хирургическом восстановлении кровотока через кровеносные сосуды, утратившие проходимость в результате атеросклероза или тромбоза. Особенностью гибких волноводов по сравнению с традиционно используемыми в ультразвуковой технике и технологии является малая изгибная жесткость, достигаемая за счет большого отношения длины к диаметру и позволяющая вводить с их помощью ультразвуковые колебания в глубокие отверстия и каналы сложной геометрической формы за счет упругой деформации волновода. В медицине это особенно важно при проведении минимально-травматичных (эндоскопических) процедур. Составные стержневые волноводы, состоящие из нескольких участков с различным профилем продольного сечения, по сравнению с простыми волноводами дают возможность оптимизации волновода одновременно по нескольким эксплуатационным показателям, например, частоте и коэффициенту усиления, за счет варьирования профиля и конструктивных параметров участков. Помимо стержневых волноводов в медицине и технике находят применение кольцевые волноводы, обеспечивающие возможность трансформации продольных колебаний в изгибные и обратно и возможность всестороннего воздействия на охватываемую волноводом биологическую или технологическую среду.

Для аналитического решения задач расчета и проектирования ультразвуковых волноводов могут использоваться метод входного механического импеданса и метод прямого решения уравнения продольных колебаний (уравнения Вебстера). Уравнение Вебстера связано с уравнением Шрёдингера, для которого в квантовой механике существуют хорошо развитые численные и аналитические методы решения. Задача об определении собственных частот и форм колебаний ультразвуковых волноводов также может быть сведена к классической задаче Штурма-Лиувилля на собственные значения. Однако, несмотря на наличие ряда аналитических методов расчета и проектирования ультразвуковых волноводов, все они являются применимыми лишь для ограниченного класса профилей продольного сечения волноводов. Достоинством аналитических методов является простота их применения для параметрического анализа волноводов, то есть для исследования зависимостей между параметрами волновода. К численным методам расчета и проектирования ультразвуковых волноводов относятся метод конечных элементов (МКЭ), а также различные методы решения задачи Штурма-Лиувилля, такие как метод конечных разностей и метод стрельбы. Достоинством численных методов является их применимость для расчета и проектирования сложных ультразвуковых волноводов с произвольным профилем продольного сечения, однако они усложняют параметрический анализ волноводов. В связи с широким применением на практике составных ультразвуковых волноводов, содержащих как участки стандартных (допускающих аналитическое решение уравнения колебаний) профилей, так и участки нестандартных (требующих численного решения уравнения колебаний) профилей, в качестве перспективного направления исследований сформулирована разработка смешанных численно-аналитических методов расчета и проектирования таких волноводов, сочетающих в себе достоинства численных и аналитических методов.

Актуальными народно-хозяйственными проблемами являются развитие теории составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике, разработка методов их расчета и проектирования, позволяющих проводить параметрический анализ и оптимизацию волноводов с произвольным числом участков произвольного профиля, и научное обоснование и внедрение на базе разработанных методов новых конструкций ультразвуковых волноводов и приводов на их основе для более широкого применения в медицине и технике.

На основании анализа изложенного материала сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена разработке численно-аналитических методов и алгоритмов расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов. Объектом исследования являются составные стержневые ультразвуковые волноводы, общая схема конструкции которых приведена на рисунке 1.

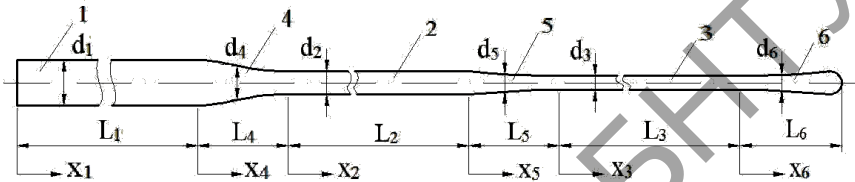


Рисунок 1. – Схема конструкции составного стержневого ультразвукового волновода

Волновод состоит из трех цилиндрических участков (ступеней) 1-3, для которых решение уравнений колебаний может быть представлено в аналитическом виде, а также переходных участков 4-5 и рабочего окончания (головки) 6, для которых требуется численное решение уравнений колебаний. Предлагаемые методы и алгоритмы расчета и проектирования являются применимыми для волноводов с любым числом ступеней, в частности, для двух- и трехступенчатых волноводов с рабочим окончанием или без него.

Рассматриваются два типа задач:

1. Задача расчета (прямая задача), в которой требуется определить резонансные частоты f колебаний волновода при заданных геометрических параметрах.

2. Задача проектирования (обратная задача), в которой необходимо определить геометрические параметры волновода, обеспечивающие резонанс его колебаний на заданной частоте f .

Поставленные задачи решаются путем прямого анализа дифференциальных уравнений колебаний, а также с помощью метода передаточных матриц, который является более универсальным и удобным с точки зрения инженерных расчетов.

В случае исследования продольных колебаний под передаточной матрицей по переменным $\xi(x)$ и $\xi'(x)$ понимают матрицу

$\mathbf{T}(x, f) = \begin{pmatrix} T_{11}(x, f) & T_{12}(x, f) \\ T_{21}(x, f) & T_{22}(x, f) \end{pmatrix}$, которая связывает линейной зависимостью величины $\xi(x)$ и $\xi'(x)$ во входном сечении волновода $x=0$ с соответствующими величинами в произвольно выбранном сечении:

$$\begin{pmatrix} \xi(x) \\ \xi'(x) \end{pmatrix} = \mathbf{T}(x, f) \begin{pmatrix} \xi(0) \\ \xi'(0) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Значения элементов передаточной матрицы зависят от профиля волновода, свойств его материала и частоты f .

Передаточная матрица удовлетворяет матричному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\mathbf{T}}{dx} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k^2 & -2d'(x)/d(x) \end{pmatrix} \mathbf{T}(x, f), \quad (2)$$

с граничным условием

$$\mathbf{T}(0, f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

где $k = 2\pi f/c$ – волновое число для продольных колебаний,

c – скорость продольной стержневой ультразвуковой волны в материале волновода.

Уравнение (2) имеет аналитическое решение вида

$$\mathbf{T}(x, f) = \exp\left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k^2 & -2d'(x)/d(x) \end{pmatrix} x\right) \text{ для некоторых стандартных}$$

профилей волноводов, в частности, для цилиндрических волноводов (ступеней составного волновода). В случае волноводов нестандартного профиля (переходных участков и рабочего окончания составного волновода) решение уравнения (2) находится численными методами.

Передаточная матрица составного стержневого волновода по любому непрерывным по координате x линейно-независимым переменным может быть определена как произведение передаточных матриц

$\mathbf{T}_i(x_i, f)$ его элементов по этим же переменным, то есть для сечения с координатой x , принадлежащего i -му элементу волновода ($i=1..N$)

$$\begin{aligned} & \mathbf{T}(x, L_1, L_2, \dots, L_{i-1}, f) = \\ & = \mathbf{T}_i(x - (L_1 + L_2 + \dots + L_{i-1}), f) \mathbf{T}_{i-1}(L_{i-1}, f) \cdot \dots \cdot \mathbf{T}_1(L_1, f), \end{aligned} \quad (3)$$

где L_i – длина i -го элемента волновода (нумерация начинается с входного элемента).

Условие резонанса продольных колебаний имеет вид

$$T_{21}^*(\mathbf{L}, f) = 0, \quad (4)$$

где $\mathbf{T}^*(\mathbf{L}, f) = \mathbf{T}(x, L_1, L_2, \dots, L_{N-1}, f)|_{x=L}$ – полная передаточная матрица волновода, связывающая параметры колебаний в сечениях $x=0$ и $x=L$ ($L = L_1 + L_2 + \dots + L_N$),

$\mathbf{L} = (L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_N)$ – вектор геометрических параметров волновода.

При решении задачи расчета вектор \mathbf{L} является заданным и из уравнения (4) определяются резонансные частоты f , а при решении задачи проектирования при заданной частоте f из уравнения (4) находятся возможные значения вектора геометрических параметров \mathbf{L} . Решениями задачи проектирования является бесконечное множество векторов \mathbf{L} , однако, если рассматривать задачу оптимального проектирования, то есть потребовать, чтобы коэффициент усиления колебаний по амплитуде $K(\mathbf{L}, f) = |\xi(L)/\xi(0)|$ принимал максимальное значение, то при рассмотрении ограниченного диапазона изменения параметров L_i задача оптимального проектирования будет иметь в качестве решений конечное множество векторов \mathbf{L} . Коэффициент усиления продольных колебаний для резонансного волновода определяется формулой

$$K(\mathbf{L}, f) = |T_{11}^*(\mathbf{L}, f)|. \quad (5)$$

Изгибные колебания стержневых волноводов описываются передаточной матрицей размером 4 x 4, а изгибные колебания кольцевых волноводов – передаточной матрицей размером 6 x 6, что соответствует порядкам дифференциальных уравнений, описывающих колебания.

Третья глава посвящена разработке математических моделей и алгоритмов расчета параметров взаимодействия составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов с биологическими и технологическими средами. В частности, для оценки эффектов, возникающих при воздействии ультразвука на биологический объект или технологические среды, важную роль играют параметры акустического поля, создаваемого ультразвуковым волноводом в биологической или технологической среде. В связи с этим разработан алгоритм расчета параметров акустических полей, создаваемых составными стержневыми и кольцевыми ультразвуковыми волноводами, основанный на использовании метода граничных элементов и метода зеркального источника. Сущность метода зеркального источника, применяемого при анализе излучения акустических волн в полупространство, ограниченное плоскостью с акустическим импедансом Z , состоит в том, что вводится фиктивный зеркальный излучатель, расположенный симметрично к реальному излучателю относительно границы полупространства. В случае $Z=0$ (акустически мягкая граница) излучатели должны создавать противофазное акустическое давление, а при $Z=\infty$ (акустически жесткая граница) – синфазное. Результирующее акустическое поле, создаваемое реальным и фиктивным излучателями в однородном бесконечном пространстве без границы раздела, будет совпадать с акустическим полем, создаваемым реальным излучателем в ограниченном плоскостью полупространстве.

В ряде практических приложений, например, в ультразвуковых приводах, акустическое поле, создаваемое ультразвуковыми волноводами, используется для создания управляемых по величине и направлению сил. На любое тело, помещенное в акустическое поле, действует переменная сила с равным нулю средним значением, связанная с воздействием акустического давления, и постоянная радиационная сила, вызванная воздействием на объект давления излучения (радиационного давления). В общем случае радиационная сила зависит от усредненных по времени значений удельных (отнесенных к единице объема) потенциальной и кинетической энергий среды $\langle E_P \rangle = \langle p^2 \rangle / 2\rho_0 c_0^2$ и $\langle E_K \rangle = \rho_0 \langle v^2 \rangle / 2$, где p – акустическое давление, v – колебательная скорость частиц среды, ρ_0 – плотность среды, c_0 – скорость звука в среде. Например, вращающий момент, действующий на ротор ультразвукового привода, может быть определен с помощью выражения

$$\mathbf{M} = h \mathbf{e}_z \int_L (\langle E_K \rangle - \langle E_P \rangle) \cdot (x n_y - y n_x) \cdot dl = M_z \mathbf{e}_z, \quad (6)$$

где h – высота ротора,

dl – элемент направляющей линии L боковой поверхности ротора,

\mathbf{e}_z – единичный вектор, направленный вдоль оси вращения,

n_x и n_y – компоненты внешней единичной нормали к боковой поверхности ротора.

Важной задачей при расчете и проектировании кольцевых ультразвуковых волноводов терапевтического назначения является описание их взаимодействия с биологической тканью, представляющей собой упругую среду. В связи с этим была разработана математическая модель взаимодействия кольцевых ультразвуковых волноводов с упругими биологическими средами, основанная на представлении биологического материала в виде винклеровской упругой среды с жесткостью, зависящей от порядка моды колебаний. Собственные частоты изгибных колебаний кольцевого волновода с учетом его взаимодействия с биологическим материалом могут быть определены из частотного уравнения

$$\det \begin{pmatrix} \rho h \omega_n^2 - \frac{K_1 n^4}{R^4} - \frac{K_2}{R^2} - k_r(\omega_n) & -\frac{K_1 n^3}{R^4} - \frac{K_2 n}{R^2} \\ -\frac{K_1 n^3}{R^4} - \frac{K_2 n}{R^2} & \rho h \omega_n^2 - \frac{K_1 n^2}{R^4} - \frac{K_2 n^2}{R^2} - k_\theta(\omega_n) \end{pmatrix} = 0, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала волновода,

R – радиус средней линии волновода,

h – толщина волновода,

$K_1 = Eh^3/12(1-\nu^2)$, $K_2 = Eh/(1-\nu^2)$,

E – модуль упругости материала волновода,

ν – коэффициент Пуассона материала волновода,

ω_n – собственная циклическая частота, соответствующая изгибной моде колебаний n -го порядка.

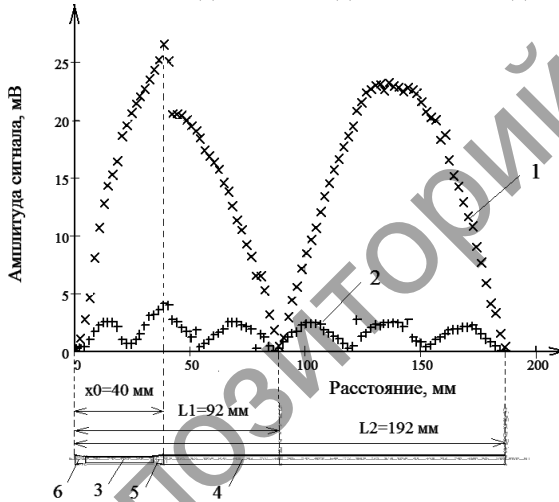
Биологический материал рассматривается как винклеровская упругая среда с тангенциальной и радиальной жесткостями k_θ и k_r . Отли-

чительной особенностью рассматриваемой модели является учет зависимости параметров винклеровской среды от порядка моды колебаний.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям составных стержневых ультразвуковых волноводов.

Разработана методика экспериментальных исследований, основанная на измерении амплитуды внутренних сил в волноводах с помощью датчиков на основе эффекта обратной магнитострикции, особенностью которых является использование чувствительного элемента в виде плоской спиральной индукционной катушки, обеспечивающее пространственное разрешение, то есть возможность локального измерения параметров колебаний в произвольном поперечном сечении волновода.

На рисунке 2 приведен пример распределения амплитуды электрического сигнала датчика по длине волновода.



1, 2 – 1-я и 3-я гармоники; 3, 4 – ступени волновода;
5 – переходный участок; 6 – рабочее окончание
Рисунок 2. – Распределение амплитуды сигнала датчика по длине волновода

Объектом измерений служил двухступенчатый составной стержневой волновод из стали 08X18H10T длиной 235 мм (показано распределение амплитуды сигнала на участке волновода длиной 192 мм, что соответствует координате узловой точки внутренних сил) с резонансной частотой продольных колебаний 25,1 кГц. Шаг перемещения волновода относительно датчика (шаг сканирования) составлял 2 мм. Выходной сигнал датчика имел негармонический характер, в связи с чем анализировался его спектр с помощью дискретного преобразования Фурье. Одновременное возбуждение в волноводе продольных колебаний, частоты которых относятся как 1:3, может быть объяснено нелинейностью функции электромеханического преобразования пьезоэлектрического преобразователя, исполь-

Шаг перемещения волновода относительно датчика (шаг сканирования) составлял 2 мм. Выходной сигнал датчика имел негармонический характер, в связи с чем анализировался его спектр с помощью дискретного преобразования Фурье. Одновременное возбуждение в волноводе продольных колебаний, частоты которых относятся как 1:3, может быть объяснено нелинейностью функции электромеханического преобразования пьезоэлектрического преобразователя, исполь-

зуемого в качестве источника колебаний. На переходном участке волновода наблюдается увеличение амплитуды сигнала, соответствующее концентрации напряжений.

Для определения коэффициента чувствительности по силе $k_F = U_0(x)/F_0(x)$, где $F_0(x)$ – амплитуда внутренней силы в волноводе, $U_0(x)$ – амплитуда электрического сигнала датчика, проводилось измерение амплитуды колебательных смещений прямым методом с помощью микроскопа в двух поперечных сечениях волновода с координатами $x=0$ и $x=L$. Коэффициент чувствительности рассчитывался по формуле

$$k_F = \frac{\int_0^L \frac{U_0(x)}{S(x)} dx}{E(|\xi_0(L)| + |\xi_0(0)|)}, \quad (8)$$

где $S(x)$ – площадь поперечного сечения волновода.

При известном значении k_F может быть определено пространственное распределение амплитуды колебательных смещений, для чего используется формула

$$\xi_0(x) = \xi_0(0) + \frac{1}{k_F E} \int_0^x \frac{U_0(x)}{S(x)} dx. \quad (9)$$

Сравнение расчетного распределения амплитуды колебательных смещений, полученного с использованием формулы (9) и приведенных на рисунке 2 данных, с собственной формой колебаний, рассчитанной с помощью метода передаточных матриц, показало достаточно точное количественное совпадение результатов: относительная погрешность определения коэффициента усиления составила 6,7 %, а координаты узловой плоскости колебательных смещений – 7,6 %.

С помощью закона Фарадея-Ленца и уравнений магнитострикционного эффекта показано, что чувствительность датчика может быть рассчитана по формуле

$$k_F = 2\pi f K N d_{33}, \quad (10)$$

где K – коэффициент усиления,

N – число витков индукционной катушки датчика,

d_{33} – магнитострикционная постоянная материала волновода.

Так как чувствительность датчика пропорциональна частоте колебаний f , то при больших частотах колебаний (20..30 кГц) датчик позволяет получать достаточно большой по амплитуде сигнал (порядка десятков мВ) даже при очень малых амплитудах колебательных смещений (порядка мкм).

Пятая глава посвящена применению разработанных численно-аналитических методов и алгоритмов для расчета и проектирования составных стержневых и кольцевых ультразвуковых волноводов, используемых в медицине, и верификации полученных результатов. В частности, разработанные численно-аналитические методы и алгоритмы применены для расчета и проектирования составных стержневых волноводов для ультразвуковой тромбозэктомии и исследования их взаимодействия с биологической средой. В качестве примера на рисунке 3 приведены рассчитанные с помощью метода передаточных матриц резонансные кривые продольных колебаний двухступенчатого составного волновода для тромбозэктомии из стали 08X18H10T для резонансных частот $f = 20..30$ кГц и мод колебаний с порядком $n = 1..3$.

Резонансные кривые при заданной частоте f представляют собой кривые, описываемые концом вектора \mathbf{L} , удовлетворяющего условию резонанса (4). Каждая точка резонансной кривой дает пару значений геометрических параметров (L_1, L_2) , при которых волновод имеет резонанс продольных колебаний на заданной частоте f .

Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью метода передаточных матриц, была рассмотрена задача расчета трехступенчатого составного волновода со сферическим рабочим окончанием. Сравнение резонансных частот продольных колебаний, рассчитанных с помощью метода передаточных матриц, с частотами, рассчитанными с помощью МКЭ и определенными экспериментальным методом, показало, что результаты, полученные с помощью различных методов, отличаются не более чем на 3,5 %.

На основе приведенных на рисунке 3 резонансных кривых и формулы (5) установлены связи между оптимальными значениями геометрических параметров, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой f продольных колебаний.

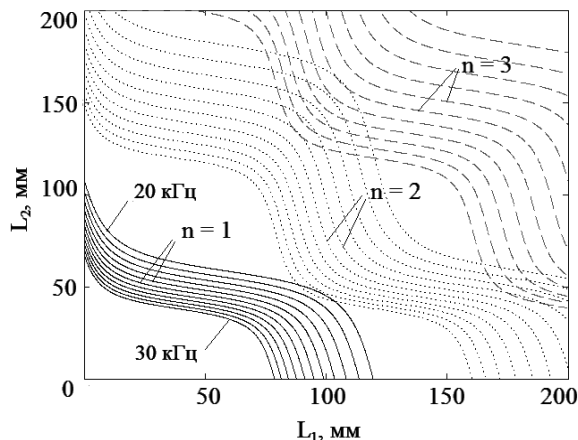


Рисунок 3. – Расчетные резонансные кривые продольных колебаний двухступенчатого составного волновода

ров, возникающих при изготовлении волновода, на его резонансную частоту описано с помощью коэффициентов влияния K_{L_1} и K_{L_2} :

$$\Delta f = K_{L_1}(f, L_1, L_2)\Delta L_1 + K_{L_2}(f, L_1, L_2)\Delta L_2, \quad (11)$$

где Δf – приращение резонансной частоты, обусловленное погрешностями длин ступеней ΔL_1 и ΔL_2 .

Установлены связи между коэффициентами влияния погрешностей геометрических параметров волновода на резонансную частоту и собственной частотой f продольных колебаний. В частности, показано, что зависимости коэффициентов влияния погрешностей от собственной частоты f описываются убывающими квадратичными функциями, причем коэффициенты влияния имеют отрицательный знак, а их модуль возрастает с увеличением частоты. Коэффициент влияния погрешности длины L_2 независимо от частоты f примерно в 4,9 раз больше коэффициента влияния погрешности длины L_1 .

Установлено влияние геометрической формы рабочих окончаний составных стержневых волноводов для тромбозектомии на величину амплитуды создаваемого ими акустического давления, определяющую эффективность разрушения материала тромба. В частности, установле-

В частности, показано, что зависимости оптимальных значений геометрических параметров от собственной частоты f описываются дробно-линейными функциями, причем для двухступенчатых волноводов оптимальные значения L_1 и L_2 различаются не более чем на 1 %.

Влияние погрешностей геометрических параметров

но, что волноводы с плоским рабочим окончанием создают поле с более высокой по сравнению с волноводами со сферическим рабочим окончанием амплитудой акустического давления и, следовательно, более эффективно разрушают материал тромба: при частоте колебаний $f = 25$ кГц и амплитуде колебательных смещений рабочего окончания $\xi = 10$ мкм максимальная амплитуда акустического давления, создаваемого волноводом с плоским рабочим окончанием, рассчитанная с помощью метода граничных элементов, составила $p_0 = 148,6$ кПа, а для волновода со сферическим рабочим окончанием – $p_0 = 82,6$ кПа.

Для кольцевых волноводов, применяемых для ультразвуковой терапии опухолей, на основе уравнения (7) получены зависимости между значениями геометрических параметров (толщины h и внутреннего радиуса r , совпадающего с радиусом опухоли), обеспечивающие резонанс при различных частотах изгибных колебаний f . Пример расчетных резонансных кривых приведен на рисунке 4.

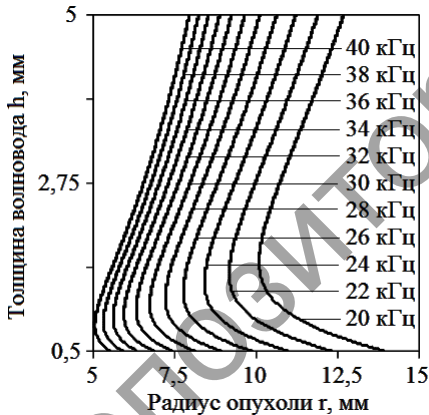


Рисунок 4. – Расчетные резонансные кривые изгибных колебаний кольцевого волновода для ультразвуковой терапии опухолей

диапазоном 0,5..5 мм обеспечивается только при использовании трех различных частот воздействия 20, 28 и 40 кГц.

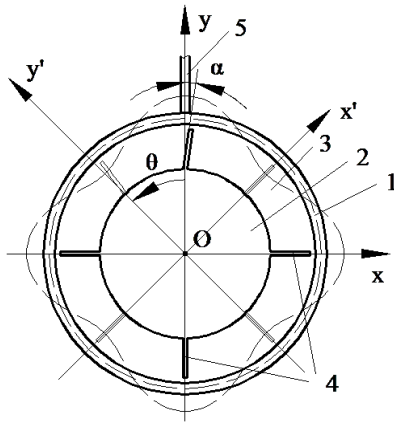
Результаты исследований внедрены в производственный процесс Республиканского инновационного унитарного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник».

На основе приведенных на рисунке 4 резонансных кривых установлено, что при фиксированном значении частоты f и наличии конструктивных ограничений, налагаемых на толщину волновода, возможно воздействие на опухоли только в ограниченном диапазоне изменения их диаметра, что требует применения других частот f воздействия при выходе реального диаметра опухоли за пределы этого диапазона. Например, возможность воздействия на опухоли с диаметром в диапазоне 10..28 мм при ограничении толщины волновода

Шестая глава посвящена применению разработанных численно-аналитических методов и алгоритмов для расчета и проектирования ультразвуковых волноводов для использования в технике и разработке приводов на их основе. В частности, разработанные методы использованы для решения задач расчета и проектирования составных стержневых волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения (сварки) проволочных выводов изделий электронной техники. Решены задачи расчета волновода установки ЭМ-4320 (производство ОАО «Планар-СО») и задача проектирования волновода для установки ЭМ-4370. Погрешность определения собственной частоты продольных колебаний волновода установки ЭМ-4320 составила 3,4 %. Для установки ЭМ-4370 был спроектирован модифицированный волновод с резонансной частотой продольных колебаний 60 кГц, применение которого позволило расширить технологические возможности установки, а именно увеличить диаметр присоединяемых выводов до 150 мкм, что примерно в 2 раза превышает паспортное значение и позволяет производить сборку высокоточной электроники.

Разработанные численно-аналитические методы и алгоритмы также применены для проектирования и расчета ультразвуковых приводов вращательного движения на основе кольцевых волноводов. На основе результатов математического моделирования дано научное обоснование нового принципа создания ультразвуковых приводов, содержащих статор, выполненный в виде совершающего изгибные колебания кольцевого волновода, и ротор, на который воздействуют радиационные силы со стороны акустического поля статора. Показано, что в случае придания ротору привода формы, асимметричной относительно оси вращения, в статоре могут возбуждаться стоячие ультразвуковые волны вместо применяемых в приводах симметричной конструкции бегущих ультразвуковых волн, что позволяет упростить конструкцию привода и управление его работой. Применение данного принципа позволило разработать оригинальную конструкцию бесконтактного ультразвукового привода, схема которой приведена на рисунке 5.

В отличие от ультразвуковых приводов контактного типа, где движение ротора связано с действием сил трения, вращение ротора в разработанном приводе связано с воздействием на ротор акустических радиационных сил.



1 – статор; 2 – тело ротора; 3 – воздушный зазор; 4 – лопасти; 5 – стержневой волновод
 Рисунок 5. – Бесконтактный ультразвуковой привод со статором в виде кольцевого волновода

рота ротора φ определялся по формуле (6). Для исследования условий работоспособности ультразвукового привода было рассмотрено 3 модели:

- 1) Модель с асимметричным ротором и аксиально-симметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.
- 2) Модель с асимметричным ротором и аксиально-асимметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.
- 3) Модель с симметричным ротором и аксиально-асимметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.

В результате расчета зависимостей $M_z(\varphi)$ для трех типов моделей привода было установлено, что функция $M_z(\varphi)$ имеет отличное от нуля среднее значение, являющееся необходимым условием работоспособности привода, только в случае модели типа 2, то есть были установлены необходимые условия работоспособности привода, состоящие в необходимости одновременного создания геометрической асим-

Асимметричность конструкции ротора может создаваться за счет наклона одной из лопастей ротора по отношению к поверхностной нормали. При этом знак угла наклона α (направление наклона) лопасти определяет направление вращения ротора, то есть направление вращения полностью определяется конструктивными параметрами привода.

Момент $M_z(\varphi)$ акустических радиационных сил, действующих на лопасти ротора привода, в зависимости от угла поворота ротора φ определялся по формуле (6). Для исследования условий работоспособности ультразвукового привода было рассмотрено 3 модели:

рота ротора φ определялся по формуле (6). Для исследования условий работоспособности ультразвукового привода было рассмотрено 3 модели:

- 1) Модель с асимметричным ротором и аксиально-симметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.
- 2) Модель с асимметричным ротором и аксиально-асимметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.
- 3) Модель с симметричным ротором и аксиально-асимметричным распределением амплитуды колебательных смещений по окружности статора.

В результате расчета зависимостей $M_z(\varphi)$ для трех типов моделей привода было установлено, что функция $M_z(\varphi)$ имеет отличное от нуля среднее значение, являющееся необходимым условием работоспособности привода, только в случае модели типа 2, то есть были установлены необходимые условия работоспособности привода, состоящие в необходимости одновременного создания геометрической асим-

метрии ротора и асимметричного распределения амплитуды колебательных смещений по окружности статора.

Динамика движения ротора исследовалась путем анализа нелинейного дифференциального уравнения

$$J_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M_z(\varphi), \quad (12)$$

где J_z – момент инерции ротора относительно J_z оси вращения.

Уравнение (12) в зависимости от начальных условий (начального положения ротора) может иметь как периодические решения, соответствующие качательным движениям ротора относительно начального положения, так и аperiodические решения, соответствующие его вращательным движениям. Пример фазовых траекторий движения ротора для случая привода с асимметричным ротором приведен на рисунке 6.

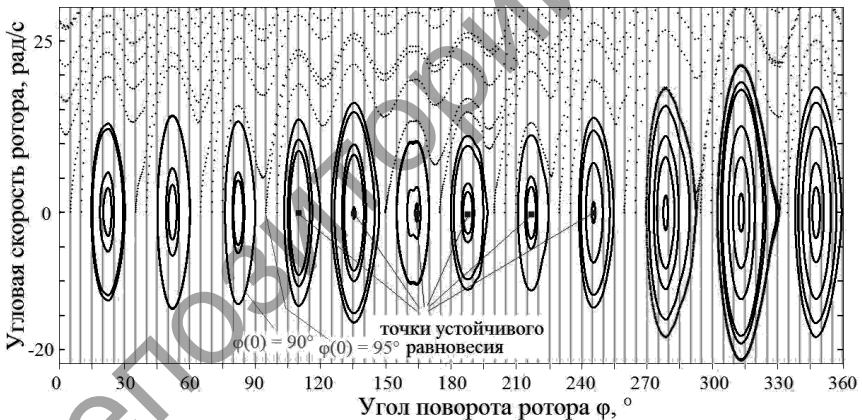


Рисунок 6. – Фазовые траектории движения ротора ультразвукового привода

Замкнутые фазовые траектории, например, траектория, соответствующая начальному положению $\varphi(0) = 90^\circ$, соответствуют качательным движениям ротора, а незамкнутые траектории, например, траектория, соответствующая начальному положению $\varphi(0) = 95^\circ$ – вращательным движениям. Замкнутые фазовые траектории окружают точки устойчивого равновесия, существование которых является негативным явлением, так как оно приводит к невозможности запуска привода из

некоторых начальных угловых положений. Существование и число точек устойчивого равновесия могут контролироваться путем изменения степени асимметрии ротора. В частности, научно обоснован способ управления числом положений устойчивого равновесия ротора, основанного на выполнении ротора состоящим из двух частей, повернутых друг относительно друга на угол $\Delta\theta = 180^\circ/n$, где n – число узловых точек колебательных смещений статора. При использовании ротора подобной конструкции путем варьирования высоты лопастей можно достичь полного устранения положений устойчивого равновесия, что позволяет добиться вращательного движения ротора при его произвольном начальном положении.

Перспективными направлениями применения разработанных численно-аналитических методов и алгоритмов являются расчет и проектирование новых типов ультразвуковых волноводов. В частности, с помощью метода передаточных матриц обоснована возможность создания новой конструкции стержневых волноводов, обеспечивающих усиление колебаний по амплитуде за счет применения функционально-градиентных материалов (ФГМ) с профилированием модуля упругости и/или плотности по длине волновода. Установлены связи между оптимальными значениями геометрических параметров волноводов из ФГМ, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой f их продольных колебаний. В частности, показано, что зависимости оптимальных значений геометрических параметров от собственной частоты f описываются дробно-линейными функциями, а при оптимальных значениях геометрических параметров коэффициент усиления геометрически профилированного волновода, выполненного из ФГМ, повышается по сравнению с коэффициентом усиления геометрически профилированного волновода, выполненного из однородного материала, до z_1/z_2 раз, где z_1 и z_2 – волновое сопротивление материала для низкоамплитудной и высокоамплитудной частей волновода.

Научно обоснована возможность применения кольцевых волноводов для усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде и установлены механизмы усиления ультразвуковых колебаний кольцевыми волноводами в зависимости от их конструкции. В частности, показано, что усиление колебаний по амплитуде может быть реализовано с помощью трех конструктивных типов кольцевых волноводов: 1) волноводы с соосными внутренним и наружным контурами, работающие в режиме вынужденных изгибных колебаний; 2) волноводы с несоосны-

ми (эксцентричными) внутренним и наружным контурами, работающие на одной из собственных частот изгибных колебаний; 3) волноводы, состоящие из нескольких последовательно соединенных сегментов из материалов с различными физико-механическими свойствами и работающие на одной из собственных частот изгибных колебаний. По сравнению с традиционно используемыми в ультразвуковой технике и технологии стержневыми концентраторами кольцевые концентраторы обладают следующими преимуществами:

- 1) Простота конструкции и технологичность изготовления.
- 2) Малые габаритные размеры и масса.
- 3) Значительный по величине коэффициент усиления (для кольцевого концентратора первого конструктивного типа из стали 45 с внутренним диаметром 10 мм и наружным диаметром 15 мм расчетное значение коэффициента усиления при частоте 21,3 кГц, являющейся резонансной частотой концентратора, составило $K = 280,7$).
- 4) Значительная ширина резонанса (для приведенного выше примера ширина резонанса на уровне коэффициента усиления $K = 10$ составила 2500 Гц при резонансной частоте 21,3 кГц).
- 5) Возможность согласования резонансной частоты концентратора с резонансной частотой ультразвукового преобразователя путем изменения статической нагрузки на связанный с концентратором рабочий инструмент.
- 6) Возможность реализации виброударных режимов взаимодействия рабочего инструмента с обрабатываемым материалом за счет наличия упругой связи между инструментом и ультразвуковым преобразователем.

Усиление колебаний кольцевыми концентраторами первого конструктивного типа объясняется следующим образом. Зависимость сосредоточенной вынуждающей нагрузки, приложенной к входному сечению концентратора, от угловой координаты описывается δ -функцией Дирака, разложение которой в ряд Фурье по угловой координате содержит бесконечное множество гармонических составляющих, что соответствует одновременному возбуждению в концентраторе ряда собственных форм $A_n \cos(n\varphi)$ изгибных колебаний различных порядков. Наибольшую по модулю амплитуду A_n будут иметь собственные формы, для которых соответствующие им собственные частоты f_n будут близки к частоте вынуждающей нагрузки f . При этом знак амплитуды будет зависеть от знака отклонения $f_n - f$. Результирующая амплитуда колебательных смещений во входном сечении концентратора опреде-

ляется путем суммирования соответствующих собственным формам амплитуд A_n , а результирующая амплитуда в выходном сечении – путем суммирования знакопеременного ряда соответствующих собственным формам амплитуд, что дает для коэффициента усиления выражение

$$K = \frac{\left| \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\pi n) \right|}{\left| \sum_{n=0}^{\infty} A_n \right|} = \frac{\left| \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n A_n \right|}{\left| \sum_{n=0}^{\infty} A_n \right|}.$$

В случае постоянства знака амплитуд A_n выполнялось бы неравенство $K < 1$, то есть концентратор не обеспечивал бы усиления. Однако, так как знак соответствующих собственным формам амплитуд изменяется в зависимости от соотношения частоты вынуждающей силы и собственных частот, то это дает коэффициент усиления, больший единицы.

Для решения задачи оптимизации геометрических параметров (внутреннего радиуса r и толщины h) концентраторов первого конструктивного типа по критерию обеспечения максимальной ширины резонанса на заданном пороговом уровне коэффициента усиления (в расчете принято $K = 10$) расчетные значения коэффициента усиления сохранялись в виде трехмерного массива, два индекса которого соответствовали геометрическим параметрам концентратора, а третий – частоте вынуждающей нагрузки f . Для графического представления такого массива использовался точечный график, координаты x и y точек которого соответствовали геометрическим параметрам концентратора, а координата z определялась по следующему правилу: в случае превышения коэффициентом усиления порогового значения координата z принималась равной частоте вынуждающей нагрузки, а в противном случае координате z присваивалось любое фиксированное значение, не принадлежащее диапазону изменения частоты вынуждающей нагрузки. В качестве примера на рисунке 7 приведено графическое изображение результатов расчета для внутреннего радиуса $r = 5..15$ мм, толщины $h = 0,5..2,5$ мм и частоты вынуждающей нагрузки $f = 20,4..40$ кГц.

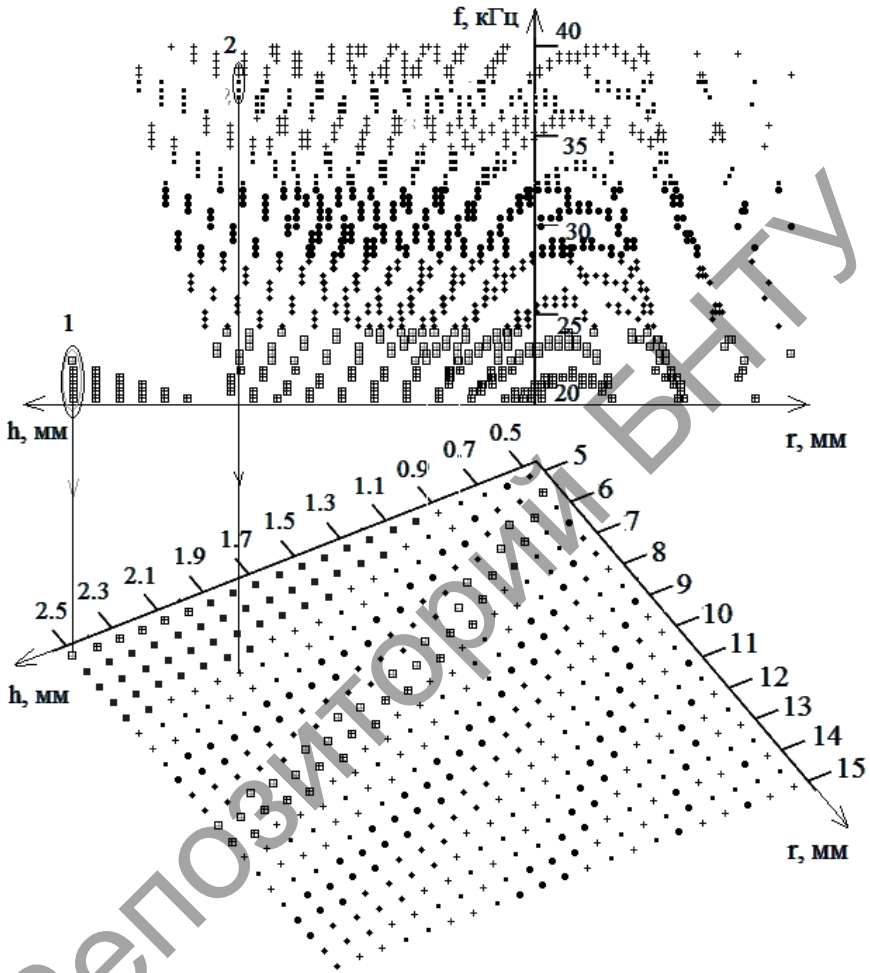


Рисунок 7. – Графическое представление зависимости ширины резонанса от геометрических параметров кольцевого концентратора

При использовании описанного способа графического представления данных для каждого значения геометрических параметров формируется кластер (линейная цепочка) точек, длина которого в направлении оси z указывает на ширину резонанса. Задача оптимизации сводится к поиску кластеров максимальной длины. На рисунке 7 кластеру № 1, состоящему из 7 точек, соответствуют геометрические параметры

$h = 2,5$ мм и $r = 5$ мм и ширина резонанса 2500 Гц. Точки графика обозначаются различными типами маркеров в зависимости от значения координаты z , что облегчает поиск соответствующих кластерам значений геометрических параметров.

Усиление колебаний концентраторами второго конструктивного типа происходит за счет изменения параметров поперечного сечения, как в случае геометрически профилированных стержневых волноводов. Для концентраторов этого типа исследовано влияние геометрических параметров (среднего значения толщины поперечного сечения $h_{\text{ср}}$ и эксцентриситета e) на коэффициент усиления колебаний по амплитуде и собственные частоты изгибных колебаний концентратора. Показано, что изменение толщины $h_{\text{ср}}$, соответствующее варьированию формы внутреннего контура концентратора, при фиксированном эксцентриситете e обеспечивает возможность регулировки собственных частот колебаний концентратора в широком диапазоне без существенного изменения величины коэффициента усиления. Например, для кольцевого волновода из стали 45 с радиусом наружного контура $R = 25$ мм, радиусом прилегающей окружности внутреннего контура $r_0 = 20$ мм и эксцентриситетом $e = 3$ мм изменение средней толщины поперечного сечения в диапазоне от 4,25 до 5,75 мм приводит к изменению собственной частоты изгибных колебаний для моды 4-го порядка в диапазоне от 21,7 до 31,2 кГц при изменении коэффициента усиления от 2,9 до 3,0. Практическое значение этого факта состоит в возможности согласования собственной частоты колебаний кольцевого концентратора с рабочей частотой ультразвуковой колебательной системы при сохранении высокого значения коэффициента усиления.

Усиление колебаний концентраторами третьего конструктивного типа происходит за счет изменения механических свойств материала, как в случае стержневых волноводов, выполненных из ФГМ, причем в обоих случаях усиление обеспечивается при введении колебаний в сегмент с более высоким модулем упругости.

Результаты исследований внедрены в производственный процесс Открытого акционерного общества «Планар-СО».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод расчета и проектирования составных стержневых ультразвуковых волноводов, основанный на применении смешанного численно-аналитического алгоритма, включающего аналитическое определение передаточных матриц для участков волновода простой геометрической формы и численное определение передаточных матриц для участков со сложным профилем продольного сечения, что позволяет проводить параметрический анализ и оптимизацию волноводов с произвольным числом участков произвольного профиля [6, 7, 30, 31].

2. На основе разработанного метода расчета и проектирования составных стержневых ультразвуковых волноводов определены зависимости между резонансными значениями геометрических параметров волноводов для ультразвуковой тромбозомии (длинами ступеней $L_{1рез}$, $L_{2рез}$, $L_{3рез}$, обеспечивающими резонанс продольных колебаний волновода на заданной частоте f) при различных значениях собственной частоты f продольных колебаний. Установлены связи между оптимальными значениями длин ступеней $L_{1опт}$, $L_{2опт}$, $L_{3опт}$, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой f продольных колебаний. Расчетные зависимости длин $L_{1опт}$, $L_{2опт}$, $L_{3опт}$ от собственной частоты f описываются дробно-линейными функциями, причем для двухступенчатых волноводов значения $L_{1опт}$ и $L_{2опт}$ при заданной частоте f различаются между собой не более чем на 1 %, то есть волноводы с равными длинами ступеней имеют близкий к максимальному коэффициенту усиления. Также установлены связи между коэффициентами влияния $K_{\Delta f, L_1}$, $K_{\Delta f, L_2}$ погрешностей длин ступеней на резонансную частоту и собственной частотой f продольных колебаний. Расчетные зависимости коэффициентов $K_{\Delta f, L_1}$, $K_{\Delta f, L_2}$ от собственной частоты f описываются убывающими квадратичными функциями, причем коэффициенты имеют отрицательный знак, а их модуль возрастает с увеличением частоты. Независимо от частоты f коэффициент $K_{\Delta f, L_2}$ примерно в 4,9 раз больше коэффициента $K_{\Delta f, L_1}$, то есть резонансная частота является более чувствительной к погрешностям длины высокоамплитудной части волновода [1-8, 14, 22, 26-31, 38, 43]. Достоверность полученных

результатов подтверждена экспериментальными исследованиями [12, 19, 25, 35, 36].

3. На основе разработанного метода расчета и проектирования составных стержневых ультразвуковых волноводов определены зависимости между резонансными значениями $L_{1рез}$, $L_{2рез}$ длин ступеней волноводов, выполненных из функционально-градиентных материалов, при различных значениях собственной частоты f продольных колебаний. Установлены связи между оптимальными значениями длин ступеней $L_{1опт}$, $L_{2опт}$, обеспечивающими максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде, и собственной частотой f продольных колебаний. Расчетные зависимости длин $L_{1опт}$, $L_{2опт}$ от собственной частоты f описываются дробно-линейными функциями, а при оптимальных значениях длин ступеней коэффициент усиления геометрически профилированного волновода из функционально-градиентного материала повышается по сравнению с коэффициентом усиления геометрически профилированного волновода, выполненного из однородного материала, до z_1/z_2 раз, где z_1 и z_2 – волновое сопротивление материала для низкоамплитудной и высокоамплитудной частей волновода [15].

4. На основе разработанной методики расчета параметров акустических полей, создаваемых составными стержневыми ультразвуковыми волноводами в биологических и технологических средах, установлено влияние геометрической формы рабочих окончаний составных стержневых ультразвуковых волноводов для тромбэктомии на величину амплитуды создаваемого ими акустического давления, определяющую эффективность кавитационного разрушения материала тромба. В частности, установлено, что волноводы с плоским рабочим окончанием создают поле с более высокой по сравнению с волноводами со сферическим рабочим окончанием амплитудой акустического давления и, следовательно, более эффективно разрушают материал тромба: при частоте колебаний $f = 25$ кГц и амплитуде колебательных смещений рабочего окончания волновода $\xi = 10$ мкм максимальная амплитуда акустического давления, создаваемого волноводом с плоским рабочим окончанием, рассчитанная с помощью метода граничных элементов, составила $p_0 = 148,6$ кПа, а для волновода со сферическим рабочим окончанием – $p_0 = 82,6$ кПа [17, 18, 34].

5. На основе результатов расчетов кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний установлены механизмы усиления ультразвуко-

вых колебаний кольцевыми концентраторами в зависимости от их конструкции. В частности, показано, что усиление колебаний по амплитуде может быть реализовано с помощью трех конструктивных типов кольцевых волноводов: 1) волноводы с соосными внутренним и наружным контурами, работающие в режиме вынужденных изгибных колебаний; 2) волноводы с несоосными (эксцентричными) внутренним и наружным контурами, работающие на одной из собственных частот изгибных колебаний; 3) волноводы, состоящие из нескольких последовательно соединенных сегментов из материалов с различными физико-механическими свойствами и работающие на одной из собственных частот изгибных колебаний. Усиление колебаний кольцевыми волноводами первого конструктивного типа происходит за счет того, что при сложении ряда собственных форм изгибных колебаний, одновременно возникающих в волноводе под действием вынуждающей силы, результирующая амплитуда колебательных смещений во входном сечении волновода определяется путем суммирования соответствующих собственным формам амплитуд, а результирующая амплитуда в выходном сечении – путем суммирования знакопеременного ряда соответствующих собственным формам амплитуд, что в случае изменения знака соответствующих собственным формам амплитуд в зависимости от соотношения частоты вынуждающей силы и собственных частот дает коэффициент усиления, больший единицы. Усиление колебаний волноводами второго типа происходит за счет изменения параметров поперечного сечения, как в случае геометрически профилированных стержневых волноводов, а усиление колебаний волноводами третьего типа – за счет изменения механических свойств материала, как в случае стержневых волноводов, выполненных из функционально-градиентного материала [16, 20, 21, 39-42].

6. На основе математической модели взаимодействия кольцевых ультразвуковых волноводов с упругими биологическими средами и полученных с ее помощью зависимостей между резонансными значениями геометрических параметров (толщины h и внутреннего радиуса r) кольцевых волноводов для ультразвуковой терапии опухолей установлено, что при фиксированном значении частоты f и наличии конструктивных ограничений, налагаемых на толщину волновода, возможно воздействие на опухоли только в ограниченном диапазоне изменения их диаметра, что требует применения других частот f воздействия при выходе реального диаметра опухоли за пределы этого диапазона. Например, возможность воздействия на опухоли с диаметром в диапазоне

10..28 мм при ограничении толщины волновода диапазоном 0,5..5 мм обеспечивается только при использовании трех различных частот воздействия 20, 28 и 40 кГц [9, 23, 24, 33].

7. На основе результатов математического моделирования предложен новый принцип создания ультразвуковых приводов вращательного движения со статором, выполненным в виде кольцевого ультразвукового волновода, и установлены условия их работоспособности. В частности, показано, что в случае придания ротору привода формы, асимметричной относительно оси вращения, в статоре могут возбуждаться стоячие ультразвуковые волны вместо применяемых в приводах симметричной конструкции бегущих ультразвуковых волн, что позволяет упростить конструкцию привода и управление его работой. Необходимыми условиями работоспособности привода являются одновременное наличие геометрической асимметрии ротора и асимметричного распределения амплитуды колебательных смещений по окружности статора [10, 11, 13, 32, 37].

8. На основе результатов математического моделирования предложен способ управления динамикой ультразвукового привода, в частности, числом положений устойчивого равновесия ротора. В частности, показано, что за счет изменения степени геометрической асимметрии ротора, например, путем его выполнения состоящим из двух частей, повернутых друг относительно друга на угол $\Delta\theta = 180^\circ/n$, где n – число узловых точек колебательных смещений статора, и варьирования высоты лопастей, можно достичь полного устранения положений устойчивого равновесия, что позволяет добиться вращательного движения ротора при его произвольном начальном положении [11, 37].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Результаты исследований используются в производственном процессе РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». В частности, разработанные методы расчета и проектирования составных стержневых волноводов использованы для определения оптимальных значений геометрических параметров волноводов для ультразвуковой тромбозектомии, обеспечивающих максимальный коэффициент усиления продольных колебаний по амплитуде при заданной собственной частоте продольных колебаний. Расчетные значения геометрических параметров волноводов используются для управления процессом их формообразования методом электролитно-плазменной обработки. Предложенные методы расчета и проектирования кольцевых ультразвуковых волноводов использованы для расчета значений геометриче-

ских параметров кольцевых волноводов, применяемых для ультразвуковой терапии опухолей, обеспечивающих требуемую собственную частоту изгибных колебаний волновода с учетом его взаимодействия с биологической тканью. Расчетные значения геометрических параметров стержневых и кольцевых волноводов использованы для разработки конструкторской документации, в соответствии с которой осуществляется их производство (КД ИШПЖ.234875.000, ТУ ВУ 100232486.013-2007, КД ИШПЖ 71.00.00.000). Производимые ультразвуковые волноводы разрешены Министерством здравоохранения РБ к реализации и медицинскому применению на территории Республики Беларусь (регистрационные удостоверения № ИМ-7.93118/1003 и № ИМ-7.114888/1003) и используются в ГУ «Республиканский научно-практический центр «Кардиология», УЗ «Минская областная клиническая больница» и ГУ «Республиканский клинический медицинский центр» Управления делами Президента РБ. Потребность учреждений здравоохранения в волноводах для ультразвуковой тромбозектомии составляет около 50 штук в год.

2. Результаты исследований используются в производственном процессе ОАО «Планар-СО». В частности, разработанные в диссертации методы и алгоритмы расчета и проектирования составных стержневых ультразвуковых волноводов используются для определения резонансных значений геометрических параметров волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов, применяемых при сборке изделий электронной техники. Результаты расчетов могут быть использованы при модификации волноводов существующих установок присоединения выводов, в частности, в случае необходимости их изготовления из новых материалов, а также при разработке волноводов для новых типов установок, отличающихся резонансными частотами и другими эксплуатационными характеристиками. Оптимизация волновода ультразвукового преобразователя установки ЭМ-4370 с использованием разработанных методов и алгоритмов позволила расширить технологические возможности установки, а именно увеличить диаметр присоединяемых выводов до 150 мкм, что примерно в 2 раза превышает паспортное значение и позволяет производить сборку сильноточной электроники.

3. Защищены патентами на изобретения способ и устройство для ультразвуковой терапии опухолей с применением кольцевых ультразвуковых волноводов [44, 45, 47], способ измерения амплитуды колебательных смещений прямым оптическим методом, предложенный в

ходе проведения экспериментальных исследований стержневых волноводов для тромбозэктомии [46], и предложенная в работе конструкция ультразвукового привода [48].

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедр «Конструирование и производство приборов» и «Сопротивление материалов машиностроительного профиля» Белорусского национального технического университета, где используются в курсах лекций «Приборы, аппараты и комплексы клинической диагностики, терапии и хирургии» для специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов (заготовок)» для специальностей 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» и 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты», «Математическое моделирование физических процессов» и «Методы и приборы технической диагностики» для специальности 1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества и диагностики объектов».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Киселев, М.Г. Ультразвук в медицине / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко. – Минск: БНТУ, 2009. – 428 с.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

2. Степаненко, Д.А. Применение компьютерных методов для проектирования элементов ультразвуковых колебательных систем / Д.А. Степаненко // Вестник БНТУ. – 2009. – № 2. – С. 52–57.

3. Минченя, В.Т. Линейные колебания двухступенчатого волновода-концентратора для ультразвукового тромболитика / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // Доклады НАН Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 6. – С. 114–119.

4. Stepanenko, D.A. Modeling of flexible waveguides for ultrasonic vibrations transmission: longitudinal and flexural vibrations of non-deformed waveguide / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Ultrasonics. – 2010. – Vol. 50. – P. 424–430.

5. Stepanenko, D.A. Computer modelling and experimental studies of wire ultrasonic waveguides for minimally-invasive surgery / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, N.T. Minchenya, T.L. Stepanenko // Lékař a Technika. – 2010. – Vol. 40, No. 2. – P. 1–5.

6. Степаненко, Д.А. Применение метода передаточных матриц для исследования гибких ультразвуковых волноводов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Вестник БНТУ. – 2011. – № 1. – С. 25–30.

7. Степаненко, Д.А. Исследование продольных колебаний гибких ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71–75.

8. Степаненко, Д.А. Оптимизация гибких волноводов для ультразвуковой тромбозектомии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2011. – № 3. – С. 92–98.

9. Study of the process of interaction between low-frequency ultrasound and biological tissue phantoms / D.A. Stepanenko, A. Bubulis, V. Jūrēns, V.T. Minchenya, A.I. Bobrovskaja, D.V. Chizh // Journal of Vibroengineering. – 2011. – Vol. 13, No. 3. – P. 586–589.

10. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа бесконтактных ультразвуковых двигателей на основе принципа конструктивной асимметрии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Доклады НАН Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 5. – С. 105–111.

11. Stepanenko, D.A. Structural control of nonlinear dynamical behaviour of non-contact standing wave ultrasonic motor / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2011. – Vol. 14, No. 4. – P. 335–347.

12. Induction sensors for measurement of vibration parameters of ultrasonic surgical waveguides / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, A.P. Avtushko, K.A. Bogdanchuk, E.V. Dlusskaya, I.V. Yanovich, T.L. Stepanenko // Lékař a Technika. – 2012. – Vol. 42, No. 2. – P. 11–14.

13. Stepanenko, D.A. Development and study of novel non-contact ultrasonic motor based on principle of structural asymmetry / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya // Ultrasonics. – 2012. – Vol. 52. – P. 866–872.

14. Low frequency and high intensity ultrasound in vascular surgery: theory, instrumentation and possibilities of clinical application / D.A. Stepanenko, A. Bubulis, I.E. Adzerikho, V.T. Minchenya, M. Valaika, V. Veikutis, A. Pranskūnas, R. Unikas, K. Morkūnaitė // Journal of Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, No. 4. – P. 1833–1851.

15. Степаненко, Д.А. Методика расчета и возможные применения функционально-градиентных ультразвуковых волноводов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 5 (22). – С. 19–23.

16. Степаненко, Д.А. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 90–94.

17. Boundary element modeling of acoustic fields generated during ultrasonic angioplasty / D.A. Stepanenko, A. Bubulis, V.T. Minchenya, V. Veikutis, I.E. Adzerikho, R. Sakalauskas // Vibroengineering Procedia. – 2013. – Vol. 1. – P. 72–76.

18. Степаненко, Д.А. Моделирование акустических полей, создаваемых при ультразвуковой ангиопластике, методом граничных элементов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 79–83.

19. Stepanenko, D.A. Experimental modal analysis of ultrasonic surgical waveguides using effect of inverse magnetostriction / D.A. Stepanenko,

V.T. Minchenya, K.A. Bogdanchuk // *Lékař a Technika*. – 2015. – Vol. 45, No. 1. – P. 10–15.

20. Степаненко, Д.А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д.А. Степаненко, И.В. Луговой, В.П. Луговой // *Наука и техника*. – 2016. – № 3. – С. 209–215.

21. Степаненко, Д.А. Теоретическое обоснование возможности усиления ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плещая, Н.В. Солодка // *Электронный журнал «Техническая акустика»*. – 2017, 2. – 13 с.

Статьи в научных журналах

22. Минченя, В.Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко // *Приборы и методы измерений*. – 2010. – № 1. – С. 6–16.

23. Минченя, В.Т. Моделирование ультразвуковых волноводов-инструментов для контроля механических свойств и терапевтического воздействия на биологические ткани / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, А.И. Бобровская // *Приборы и методы измерений*. – 2011. – № 2. – С. 77–84.

24. Stepanenko, D.A. Theoretical and experimental studies of combined therapy of tumours with application of ultrasound / D.A. Stepanenko, V.T. Minchenya, A.I. Bobrovskaya, N.I. Krutilina // *AIP Conference Proceedings*. – 2011. – Vol. 1433. – P. 597–602.

25. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // *Приборы и методы измерений*. – 2013. – № 6. – С. 72–78.

Статьи в сборниках научных трудов

26. Степаненко, Д.А. Собственные колебания ультразвуковых волноводов для минимально-инвазивной хирургии / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.В. Чигарев // *Теоретическая и прикладная механика*. – 2010. – Вып. 25. – С. 276–281.

Статьи в сборниках материалов конференций и тезисы докладов

27. Степаненко, Д.А. Применение САЕ-систем для автоматизированного проектирования ультразвуковых колебательных систем / Д.А. Степаненко // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2008 г. в 4 т. / Редкол.: Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 344.

28. Минченя, В.Т. Анализ резонансных явлений в гибких волноводных системах с применением теорий Эйлера-Бернулли и Тимошенко / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, Е.Н. Юрчик // Приборостроение-2009: материалы Второй междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. – Минск, 2009. – С. 247–248.

29. Bubulis, A. Semi-automatic modal analysis of flexible ultrasonic waveguides in ANSYS / A. Bubulis, V.T. Minchenya, D.A. Stepanenko // Приборостроение-2009: материалы Второй междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-13 ноября 2009 г. – Минск, 2009. – С. 145–146.

30. Степаненко, Д.А. Расчет сложных ультразвуковых волноводных систем с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Приборостроение-2010: материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10-12 ноября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 211–212.

31. Степаненко, Д.А. Проектирование ультразвуковых волноводов с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя // Наука – образованию, производству, экономике: Материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2010 г.: в 4 т. / Редкол.: Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 173.

32. Minchenya, V.T. Applications of actuators on the basis of steerable resonance in engineering and medicine / V.T. Minchenya, D.A. Stepanenko // Belarus-Korea Science and Technology Seminar, Minsk, June 27, 2011. – Minsk, 2011. – P. 47–50.

33. Stepanenko, D. Theoretical and experimental studies of combined therapy of tumours with application of ultrasound / D. Stepanenko, V. Minchenya, A. Bobrovskaya, N. Krutilina // International Congress on Ultrasonics ICU 2011: Book of abstracts, Gdańsk, September 5-8, 2011. – Gdańsk, 2011. – P. 317.

34. Степаненко, Д.А. Применение метода граничных элементов в акустике / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя // Приборостроение-2011: материалы Четвертой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16-18 ноября 2011 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011. – С. 411–412.

35. Индукционные датчики для измерения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.П. Автушко, К.А. Богданчук, Е.В. Длуская, И.В. Янович // Приборостроение-2012: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 375–377.

36. Калибровка индукционных датчиков для измерения параметров колебаний ультразвуковых волноводных систем / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, А.П. Автушко, К.А. Богданчук, Е.В. Длуская, И.В. Янович // Приборостроение-2012: материалы Пятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 226–228.

37. Stepanenko, D. Modelling of non-contact ultrasonic motor by means of boundary element method / D.A. Stepanenko, V.V. Minchenya, K. Zimmermann, R.M. Asimov, V.T. Minchenya // 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, October 7-10, 2012. – Dresden, 2012. – P. 2722–2725.

38. Степаненко, Д.А. Моделирование волноводных систем ультразвуковых установок присоединения выводов методами конечных элементов и передаточных матриц / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборостроение-2013: материалы Шестой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20-22 ноября 2013 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 374–376.

39. Степаненко, Д.А. Концентраторы ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с некруглым эксцентричным профилем / Д.А. Степаненко, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Приборостроение-2015: материалы Восьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25-27 ноября 2015 г.: в 2 т. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Т. 2. – Минск, 2015. – С. 142–144.

40. Степаненко Д.А. Концентраторы ультразвуковых колебаний на основе неоднородных кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко // Приборостроение-2016: материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-25 ноября 2016 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 381–383.

41. Степаненко, Д.А. Усиление ультразвуковых колебаний с помощью составных кольцевых концентраторов / Д.А. Степаненко // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы междунар. науч. конф., Витебск, 26-29 сентября 2016 г. – Витебск, 2016. – С. 140–142.

42. Степаненко, Д.А. Расчет кольцевых концентраторов ультразвуковых колебаний с помощью метода передаточных матриц / Д.А. Степаненко, А.С. Емельянова, М.А. Плескач, Н.В. Солодкая // Приборостроение-2017: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1-3 ноября 2017 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 199–200.

43. Степаненко, Д.А. Влияние погрешностей изготовления на эксплуатационные характеристики волноводов для ультразвуковой тромбэктомии / Д.А. Степаненко, К.А. Бунчук, А.С. Емельянова, М.А. Плескач, Н.В. Солодкая // Приборостроение-2017: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1-3 ноября 2017 г. / Редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 314–316.

Патенты

44. Способ комбинированной терапии саркомы у крысы: пат. 13765 Респ. Беларусь: МПК А61N 5/06, 7/00 (2009) / Д.А. Степаненко, Н.В. Пономаренко, Н.И. Крутилина, В.Т. Минченя, М.В. Дроздова; дата публ.: 30.10.2010.

45. Устройство для ультразвукового воздействия на опухоль: пат. 13801 Респ. Беларусь: МПК А61N 7/00 (2009) / Д.А. Степаненко, Н.В. Пономаренко, Н.И. Крутилина, В.Т. Минченя, М.В. Дроздова; дата публ.: 30.12.2010.

46. Способ оптической виброметрии: пат. 16329 Респ. Беларусь: МПК G01N 9/00 (2006) / В.Т. Минченя, Д.А. Степаненко; дата публ.: 30.08.2012.

47. Устройство для магнитоакустической терапии онкологического заболевания в эксперименте: пат. 17293 Респ. Беларусь: МПК А61N 2/04, 7/00 (2006) / Д.А. Степаненко, Д.В. Чиж, Н.И. Крутилина, Л.Б. Пархоменко, Д.В. Окунцев, В.Т. Минченя; дата публ.: 30.06.2013.

48. Бесконтактный ультразвуковой двигатель: пат. 17459 Респ. Беларусь: МПК H02N 2/10 (2006) / Д.А. Степаненко, Р.М. Асимов, В.Т. Минченя, В.В. Минченя, Х. Роппельт; дата публ.: 30.08.2013.

Сцепаненка Дзмітрый Аляксандравіч

**РАЗЛІК І ПРАЕКТАВАННЕ САСТАЎНЫХ СТРЫЖНЁВЫХ
І КАЛЬЦАВЫХ УЛЬТРАГУКАВЫХ ХВАЛЯВОДАЎ
І ПРЫВОДАЎ НА ІХ АСНОВЕ ДЛЯ ВЫКАРЫСТАННЯ
Ў МЕДЫЦЫНЕ І ТЭХНІЦЫ**

Ключавыя словы: ультрагук, ваганні, хвалявод, разлік, праектаванне, тэрапія, хірургія, прывод, зварка.

Мэта працы: развіццё тэорыі ультрагукавых хваляводаў для выкарыстання ў медыцыне і тэхніцы; распрацоўка метадаў іх разліку і праектавання, прымянімых для хваляводаў з адвольным лікам участкаў адвольнага профілю; абгрунтаванне і укараненне новых канструкцый ультрагукавых хваляводаў і прыводаў на іх аснове.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: матэматычнае і камп'ютэрнае мадэліраванне, вымярэнне параметраў ваганняў з дапамогай бескантактавых датчыкаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны новыя метады і алгарытмы разліку і праектавання ультрагукавых хваляводаў і разліку параметраў ствараемых імі акустычных палей; вызначаны сувязі паміж аптымальнымі геаметрычнымі параметрамі хваляводаў і ўласнымі частотамі іх ваганняў і уплыў формы рабочых канчаткаў хваляводаў на амплітуду акустычнага ціску; абгрунтавана выкарыстанне кальцавых хваляводаў для ўзмацнення ультрагукавых ваганняў па амплітудзе і вызначаны яго механізмы; абгрунтаваны новы прынцып стварэння ультрагукавых прыводаў вярчальнага руху і вызначаны умовы іх працаздольнасці; абгрунтаваны спосаб кіравання дынамікай ультрагукавога прывода шляхам змянення ступені геаметрычнай асіметрыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанню, галіна выкарыстання: вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца ў вытворчых працэсах Рэспубліканскага іннавацыйнага унітарнага прадпрыемства «Навукова-тэхналагічны парк БНТУ «Палітэхнік» і ААТ «Планар-СО» для разліку і праектавання хваляводаў для ультрагукавой тромбаэктаміі, хваляводаў для ультрагукавой тэрапіі пухлін і хваляводаў устаноў ультрагукавога і тэрмагукавога далучэння дротаў вывадаў.

Степаненко Дмитрий Александрович

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
И КОЛЬЦЕВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ
И ПРИВОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ
В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ**

Ключевые слова: ультразвук, колебания, волновод, расчет, проектирование, терапия, хирургия, привод, сварка.

Цель работы: развитие теории ультразвуковых волноводов для применения в медицине и технике; разработка методов их расчета и проектирования, применимых для волноводов с произвольным числом участков произвольного профиля; обоснование и внедрение новых конструкций ультразвуковых волноводов и приводов на их основе.

Методы исследования и использованная аппаратура: математическое и компьютерное моделирование, измерение параметров колебаний с помощью бесконтактных датчиков.

Полученные результаты и их новизна: предложены новые методы и алгоритмы расчета и проектирования ультразвуковых волноводов и расчета параметров создаваемых ими акустических полей; установлены связи между оптимальными геометрическими параметрами волноводов и собственными частотами их колебаний и влияние формы рабочих окончаний волноводов на амплитуду акустического давления; обосновано применение кольцевых волноводов для усиления ультразвуковых колебаний по амплитуде и установлены его механизмы; обоснован новый принцип создания ультразвуковых приводов вращательного движения и установлены условия их работоспособности; обоснован способ управления динамикой ультразвукового привода путем изменения степени геометрической асимметрии.

Рекомендации по использованию, область применения: результаты исследований используются в производственных процессах Республиканского инновационного унитарного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» и ОАО «Планар-СО» для расчета и проектирования волноводов для ультразвуковой тромбэктомии, волноводов для ультразвуковой терапии опухолей и волноводов установок ультразвукового и термозвукового присоединения проволочных выводов.

SUMMARY

Stepanenko Dmitry Aleksandrovich

MODELING AND DESIGN OF COMPOUND BAR AND RING ULTRASONIC WAVEGUIDES AND ACTUATORS ON THEIR BASIS FOR APPLICATION IN MEDICINE AND ENGINEERING

Keywords: ultrasound, vibration, waveguide, modeling, design, therapy, surgery, actuator, welding.

Purpose of study: development of theory of ultrasonic waveguides for application in medicine and engineering; development of methods of their modeling and design applicable for waveguides with arbitrary number of segments of arbitrary shape; prediction and introduction of new designs of ultrasonic waveguides and actuators on their basis.

Methods of study and equipment used: mathematical and computer modeling, measurement of vibration parameters by means of non-contact sensors.

Obtained results and their novelty: new methods and algorithms of design and modeling of ultrasonic waveguides and calculation of parameters of acoustic fields created by them are suggested; relations between optimal geometric parameters of waveguides and natural frequencies of their vibration and effect of shape of waveguides' working terminations on amplitude of acoustic pressure are determined; application of ring waveguides for amplification of amplitude of ultrasonic vibrations is proved and causes of amplification are determined; new principle of design of rotary ultrasonic actuators is proved and conditions of their workability are determined; method of control of ultrasonic actuator's dynamics by means of changing degree of geometric asymmetry is proved.

Recommendations on application, application field: results of study are used in industrial processes of Republican innovative unitary enterprise "Scientific and technological park of BNTU "Polytechnic" and JSC "Planar-SO" for modeling and design of waveguides for ultrasonic thrombectomy, waveguides for ultrasonic therapy of tumors and waveguides for machines of ultrasonic and thermosonic joining of wire leads.