

на правах рукописи

аспирант **Тарануха Александр Адольфович**

УДК 539.3

**РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРОТЕХНИКИ**

01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре прикладной математики
Харьковского политехнического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук, докторант
Симсон Э.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Воробьев Ю.С.

- доктор технических наук, профессор
Литвинов В.Г.

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт
радиоизмерений (г. Харьков)

Защита состоится "28" 01 1994 года в 14 час.
на заседании специализированного совета Д 068.39.06 при
Харьковском политехническом институте (310002, г. Харьков, ГСП,
ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1993 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

Боровой В.В.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00802384 (P)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вибрационная техника и технологии относятся к тем важнейшим подотраслям, от степени развитости которых в значительной мере зависит уровень современной техники и технологии в целом. Не случайно эта глубоко наукоемкая область индустрии более всего распространена в промышленно развитых странах: Японии, Германии, США, Франции. Диапазон применения высокочастотных ультразвуковых (от единиц до сотен килогерц) вибрационных технологий необычайно широк: от сварки пластмасс и металлов до ультразвуковой хирургии, от вибрационной обработки сверхтвердых материалов до кавитационной очистки поверхностей деталей и сонации медицинского инструмента, а также других ультразвуковых технологий в машиностроении, металлургии, материаловедении и медицине. Не менее разнообразна гамма приборов и установок, использующих сверхвысокочастотные (от сотен килогерц до десятков мегагерц) механические колебания: диагностические сканеры и томографы, толщиномеры и дефектоскопы, устройства связи и гидролокации, генераторы, фильтры и другие элементы, используемые в бытовой, вычислительной, медицинской и военной радиоэлектронике.

Качество создаваемых высокочастотных приборов и установок в решающей степени определяется уровнем конструирования, точностью и полнотой используемых на этапе проектирования математических моделей, совершенством постановки и методов решения задачи оптимального проектирования. К особенностям возникающих при этом проблем можно отнести:

- необходимость использования связанных математических моделей, описывающих взаимодействие электрического, напряженно-деформированного и вибрационного полей в активных элементах;
- существенную трехмерность этих полей;
- наличие большого числа критериев и противоречивых требований на этапе проектирования;
- чувствительность характеристик к малым отклонениям пространственной геометрии элементов.

Все это делает невозможным использование при проектировании упрощенных математических моделей, вариантных подходов к проектированию, чисто экспериментальную доводку конструкций и определяет актуальность темы диссертационной работы.

Работа выполнялась как часть государственных научно-технических программ Министерства образования (М0901), Государственного комитета по науке и технологиям (КН 0904), а также национальной

программы "Ультразвук Украины" Министерства машиностроения, военно-промышленного комплекса и конверсии.

Целью работы является создание теории, методов и программных средств оптимального проектирования элементов высокочастотной вибрационной техники и решение на этой почве ряда практических проблем конструирования резонансных приборов и установок с экстремальными характеристиками.

Это, в свою очередь, требует решения следующих задач :

- создание уточненных трехмерных математических моделей связанных электро-механических колебаний ;
- учет различных эксплуатационных факторов;
- разработку эффективных численных методов решения спектральной проблемы;
- вывод соотношений анализа чувствительности динамических характеристик при варьировании положением узлов трехмерной конечно-элементной сетки;
- адаптацию эффективных методов нелинейного программирования к решаемым задачам оптимизации с большим числом варьируемых параметров (порядка 1000), функциональных критериев и ограничений (порядка 10);
- решение практически задач оптимального проектирования.

Научная новизна. В работе впервые рассмотрен комплекс вопросов, связанных с оптимизацией пространственной геометрии активных и пассивных элементов высокочастотной и сверхвысокочастотной резонансной вибротехники, включающий :

- создание специализированных конечных элементов для трехмерных динамических расчетов связанных электромеханических полей в пьезокерамических и кварцевых резонаторах;
- вывод и программную реализацию соотношений анализа чувствительности динамических характеристик резонансных элементов к варьированию пространственной геометрий;
- разработку высокоэффективной вычислительной технологии решения прямой и сопряженной задач и построения улучшающей вариации на базе комбинирования и модификации современных численных методов и алгоритмов;
- оптимизацию ультразвуковых систем технологического и медицинского назначения с учетом трехмерности напряженно-деформированного и вибрационного состояния и электромеханической взаимосвязанности полей в пьезокерамике;
- специальные задачи оптимизации ультразвукового сварочного оборудования с точечными и ножевыми сонотродами;
- расчет и оптимизацию пространственной геометрии и формы

электродов кварцевых СВЧ резонаторов с использованием дискретного принципа максимума.

Достоверность результатов исследований определяется полностью используемых в работе уточненных математических моделей, базирующихся на фундаментальных соотношениях механики и электродинамики; сопоставлением результатов тестовых расчетов с приведенными в литературе данными других авторов; хорошим соответствием расчетов экспериментальным данным.

Адекватность оптимизационных моделей косвенно подтверждается совпадением с аналитическими результатами при решении простейших тестовых задач и сравнением численного анализа чувствительности с конечно-разностным представлением функциональных производных.

Практическая ценность и внедрение работы. Диссертационная работа тесно связана с выполнением планов бюджетных и договорных научно-исследовательских работ кафедры "Прикладная математика" Харьковского политехнического института.

Комплекс программ и результаты расчетов и оптимизации кварцевых объемных резонаторов для различных радиоэлектронных систем переданы и используются в Научно-производственном объединении "Фонон" (г. Москва, Россия).

Большая серия расчетов и оптимальное конструирование сварочного станочного оборудования, взамен аналогичного выпускаемого фирмой "BRANSON" ; с точечными и ножевыми сонотродами выполнена по заказу НПО АЗЛК (г. Москва, Россия).

Уточненные трехмерные расчеты и оптимизация формы и конструкции ультразвуковых колебательных систем с пьезокерамическим преобразователем использованы при разработке ручного ультразвукового инструмента для прошивки и обработки сверхтвердых материалов, участвовавшего в международной промышленной ярмарке "FAMETA - 92" (Бавария) и проходящего испытания в фирме "Циннер" (Германия).

Разработанное в диссертации программное обеспечение постоянно используется в ИЦ "Эскаорт" в практике проектирования и производства медицинских ультразвуковых установок серии "VESTA" для нейрохирургии, костной и полостной хирургии, аспирации, отоларингологии, работающих во многих клинических учреждениях Украины.

Ведутся работы по оптимальному проектированию ультразвуковых стоматологических приборов по заказу Минздрава, Минмашпрома и НПО "Монолит" (г. Харьков), а также импульсных СВЧ датчиков для ультразвуковых диагностических сканеров по заказу НИИРИ (г. Харьков).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы док-

ладывались на 2-й Научно-технической конференции "Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций и машин" (Севастополь, 1991 г.), Межгосударственной научной конференции "Экстремальные задачи и их приложения" (Нижний Новгород, 1992 г.), Научных конференциях "Прочность и колебания конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках " (Севастополь , 1991, 1992 г.), 1-ом Международном симпозиуме украинских инженеров-механиков (Львов, 1993 г.), Международной научно-технической конференции Micro-CAD System'93 (Харьков, 1993 г.), Международной конференции "Оптимизация конструкций и ее приложения" (Сарагоса, 1993 г.). Е. в полном объеме р. бота докладывалась на расширенном научном семинаре кафедры "Динамика и прочность машин" ХПИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы, включающего 192 наименования, и содержит 132 страницы машинописного текста, 55 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и основные задачи исследования, дается краткая характеристика диссертационной работы. Приведенный обзор литературы отражает современное состояние вопросов расчета и проектирования элементов высокочастотной вибротехники и проблем оптимизации резонансных систем.

Интенсификация применения вибрационной техники и технологий в различных отраслях науки и производства потребовала проведения многочисленных научных исследований , связанных с ультразвуковым резанием, сваркой, пайкой, хирургией и нейрохирургией; дефектоскопией, томографией и неразрушающим контролем материалов. Значительный вклад в развитие ультразвуковой техники внесли ученые ИПП АН Украины, АКИН АН России, ВНИИМТ, ВНИИМП, МГТУ, БТИ, ЧПИ, ИМех АН Украины, МГУ, КГУ, МинГУ, БПИ, ИМаш АН России и др. Многочисленные результаты получены в трудах ученых США, Германии, Франции и Японии. Однако в теоретических исследованиях преобладают расчетные методы, базирующиеся на применении одномерных моделей, достаточно точно описывающих поведение в резонансе весьма узкого круга конструкций ультразвуковых колебательных систем (УКС). А при проектировании в основном используется традиционный перебор вариантов, сопровождающийся многочисленными расчетами или более того экспериментальным исследованием каждого

из них.

В ХПИ был впервые предложен подход к проектированию элементов УКС, основывающийся на теории оптимального проектирования элементов конструкций, работающих в резонансных режимах. Развивая работы в области оптимизации проводимые в ИМех Украины, ИПМаш АН Украины, ИМех АЧ Армении, ИПМех АН России, ИМаш АН России, ЛПИ, ТартГУ, РПИ, НГУ, ЦАГИ в ХПИ были впервые поставлены и решены задачи многокритериальной оптимизации стержневых резонансных УКС со сложной пространственной формой оси, были сделаны попытки учесть наиболее существенные эксплуатационные требования, различного рода потери энергии в системе, тепловой разогрев установки, жидкость циркулирующую в системе, наличие сменного рабочего инструмента, влияние обрабатываемой среды, конструктивные особенности компоновочной схемы и некоторые другие. При том не рассматривались взаимосвязь электрического и напряженно-деформированного полей, а так же задачи оптимизации формы элементов резонансных систем со сложной пространственной геометрией.

В данной работе впервые ставятся и решаются задачи оптимизации пространственной геометрии активных и пассивных элементов ультразвуковой и СВЧ вибротехники, с учетом взаимосвязанности трехмерных напряженно-деформированного и электрического полей, по различным критериям работы систем в резонансных режимах.

В первой главе рассмотрены теоретические и численные проблемы решения спектральных задач, анализа чувствительности и оптимизации формы элементов высокочастотной резонансной техники.

На стадии проектирования к механической части УКС предъявляется большое число зачастую весьма противоречивых эксплуатационных и конструктивных требований. Среди них можно выделить наиболее существенные, которые определяют основные характеристики системы :

- обеспечение заданной резонансной частоты в рабочем диапазоне, определяемом государственными и отраслевыми стандартами;
- отсутствие "паразитных" резонансов в пределах диапазона автоподстройки частоты, в котором вследствие плотного спектра, возможен захват форм с нежелательным типом колебаний;
- обеспечение заданной амплитуды вибраций на излучающей ультразвуком поверхности рабочего инструмента;
- максимизация коэффициента усиления (минимизация амплитуды на входе при фиксированной на выходе);
- максимизация коэффициента полезного действия (минимизация потерь энергии в системе и узлах крепления);
- максимизация или обеспечение заданного запаса электрической

прочности в рабочем режиме (минимизация разности потенциалов на электродах при фиксированной амплитуде смещений на выходе);

- максимизация или обеспечение заданного запаса механической прочности (минимизация максимальной по объему УКС интенсивности динамических напряжений);

- выполнение требований, связанных с особенностями технологического процесса (обеспечение равномерности волнового фронта на излучающей ультразвуком поверхности инструмента и заданного направления колебаний);

- выполнение требований, связанных с характеристиками генератора (обеспечение изменения рабочей частоты и питающего напряжения в диапазонах автоподстройки при переходе от холостого хода к рабочему режиму);

- снижение габаритных размеров установки с учетом конструктивных ограничений на форму УКС.

Часть этих требований может быть сформулирована в виде функциональных и геометрических ограничений, другие носят экстремальный (критериальный) характер. Вследствие этого задача оптимального проектирования УКС становится многокритериальной, а ее решение в работе сводится к отысканию Парето-оптимальных (компромиссных) проектов среди которых наилучший вариант выбирается проектировщиком.

При этом зависимость всех рассматриваемых критериев не только от конструктивных параметров, но и от резонансной формы и частоты колебаний определяет особенности оптимизации элементов высокочастотной вибротехники.

Сущность подхода к решению поставленной проблемы заключается в том, что на основании постулата Видлера (при малом трении форма вынужденных резонансных колебаний близка к резонирующей собственной форме) все критерии выражаются как функционалы от собственных частот и форм, при этом учет реального амплитудно-зависимого рассеяния энергии производится не в задаче анализа, а лишь в соответствующих функционалах. Соответственно математическая постановка задачи анализа формулируется в виде спектральной проблемы.

Наибольшая эффективность при описании поведения элементов резонансной вибротехники, работающих в области высоких частот с плотным или кратным спектром, достигается использованием объемных изопараметрических конечных элементов, позволяющих достаточно точно описывать трехмерные конструктивные и геометрические особенности, поля динамических деформаций и напряжений. В ряде задач более целесообразным с точки зрения экономии вычислительных

ресурсов, является использование специализированных конечных элементов, построенных с применением полуаналитических подходов, позволяющих выделять из плотного спектра частоты и формы колебаний, возбуждаемые переменным электрическим полем, исследовать явления "захвата" энергии в подэлектродной области и другие электро-механические особенности.

Уравнения движения ультразвуковой колебательной системы с пьезоэлектрическим преобразователем на основании вариационного принципа виртуальных работ и конечноэлементного подхода могут быть представлены в матричном виде :

$$\begin{aligned} K_{uu} \bar{u} + K_{u\varphi} \bar{\varphi} - \omega^2 M_{uu} \bar{u} &= 0 \\ K_{u\varphi}^T \bar{u} + K_{\varphi\varphi} \bar{\varphi} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где K_{uu} , M_{uu} , $K_{u\varphi}$, $K_{\varphi\varphi}$ - глобальные матрицы жесткости, масс, пьезоэлектрической и диэлектрической жесткости, получаемые ансамблированием локальных матриц с учетом граничных условий и эквипотенциальности электродов, \bar{u} - вектор узловых перемещений всей конструкции, $\bar{\varphi}$ - вектор узловых значений электрического потенциала, ω - собственная частота колебаний. Собственные частоты и формы при этом определяются из уравнения

$$K \bar{y} - \omega^2 M \bar{y} = 0 \quad (2)$$

вектор \bar{y} содержит узловые перемещения и потенциалы электрического поля, а глобальные матрицы формируются в соответствии со схемой Дженнинга, после применения обратного алгоритма Катчила-Макки, обеспечивающего минимизацию длины профиля, который определяется как число элементов в оболочке матрицы.

Высокая размерность матриц и плотность спектра в области рабочих частот УКС потребовали создания для решения спектральной проблемы (2) специального программного обеспечения, базирующегося на модификации блочного алгоритма Ланцоша. Численная устойчивость при высокой скорости сходимости достигается использованием полной переортогонализации векторов в подпространстве Крылова.

В теории оптимального проектирования важная роль отводится анализу чувствительности, основная задача которого заключается в установлении эффективных соотношений между изменениями в проектах конструкций и изменениями в их функциональных характеристиках.

Данные анализа чувствительности при этом могут быть использованы при оперативной оценке несовершенств изготовления, решении

вспомогательных задач технологической доводки, при назначении допусков и оценке изменения основных характеристик базовой системы к малым изменениям конструктивных параметров в интерактивном режиме проектирования.

При решении задач оптимизации элементов УКС и СВЧ техники наиболее целесообразным является использование в анализе чувствительности метода сопряженных переменных. Выражение для производной в случае дифференцируемости функционала по Фреше можно записать в виде

$$\frac{dJ}{d\bar{u}} = \frac{\partial J}{\partial \bar{u}} + \bar{\psi}^T (K'_u - 2\omega\omega'_u - \omega^2 M'_u) \bar{y} + \frac{\partial J}{\partial \omega} \omega'_u \quad (3)$$

где $\bar{\psi}$ - решение сопряженной проблемы

$$(K - \omega^2 M) \bar{\psi} = -\frac{\partial J}{\partial \bar{y}} \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет бесчисленное множество решений если выполняется условие

$$\bar{y}^T \frac{\partial J}{\partial \bar{y}} = 0 \quad (5)$$

при этом выражение (3) обладает фильтрующим свойством по отношению к семейству решений сопряженной задачи. Выполнение условия (5) в рассматриваемых функционалах достигается введением в формулировку условия нормировки собственной формы с неопределенным множителем Лагранжа. Решение сопряженной задачи осуществляется итерационным методом.

В работе рассматривается применение как условий оптимальности первого порядка, так и условий типа принципа максимума Понтрягина. Это позволяет использовать методы последовательных приближений и последовательной линеаризации.

Оптимизация формы элементов высокочастотной вибротехники предполагает аппроксимацию поверхности конструкций, которая исключала бы заведомо не технологичные решения и позволяла сохранить адекватность математических моделей реальному поведению систем. В работе для описания пространственной геометрии используются функции и поверхности Безье, обладающие сглаживающими свойствами, при этом в качестве варьируемых параметров выбираются координаты

наты "контрольных" узлов конечноэлементного разбиения.

Возможность решения ряда задач оптимизации элементов СВЧ техники по спектру собственных значений с варьированием толщинами специализированных пластинчатых конечных элементов определяет применимость дискретного аналога принципа максимума. В этом случае каждая следующая конфигурация отыскивается из условия максимума выпуклой аппроксимации гамильтониана, построенной на решениях исходной и сопряженной задач для предыдущего приближения.

Вторая глава посвящена развитию постановок задач оптимального проектирования ультразвуковых установок медицинского и технологического назначения. Рассмотрены вопросы анализа конструкций в рабочих режимах при различных условиях эксплуатации. При этом использовалась упруго-вязкая модель обрабатываемой среды с частично присоединяемой массой и жесткостью. Совершенствование математической модели УКС осуществлялось за счет применения трехмерных изопараметрических конечных элементов, гипотезы Давиденкова амплитудно-зависимого гистерезисного внутреннего трения, учета взаимосвязанности электрического, напряженно-деформированного и вибрационного полей в пьезоэлектрическом преобразователе.

Особенности проектирования медицинского ультразвукового инструмента связаны в первую очередь с высокой плотностью спектра в районе рабочей частоты, что определяется криволинейной формой пространственной оси концентратора, необходимой для эффективного практического использования, и наличием различного рода каналов для подачи физиологических растворов.

Стоматологический инструмент с насадкой "игла" изображен на рис.1. Задача отстройки рабочей частоты от ближайших "паразитных" резонансов является первоочередной проблемой при проектировании УКС такого типа. При этом должны быть обеспечены технологичность изготовления, отсутствие концентраторов механических напряжений и сохранена электробезопасность установки. Выполнение первых двух условий гарантирует аппроксимация геометрии инструмента с помощью функций Безье, выполнение третьего условия обеспечивается минимизацией электрического напряжения на электродах. Условия отсутствия паразитных резонансов в заданном диапазоне и равенство рабочей частоты фиксированному значению формулируются как функциональные ограничения.

Таким образом математическая постановка задачи оптимизации может быть записана в виде

$$\min U_{p,p} = \min (\Delta P_{Pac} + \Delta P_H) / I \quad (6)$$

$$\omega_p = \omega_p^*, \quad \omega^- \leq \omega^* - \Delta\omega, \quad \omega^+ \geq \omega^* + \Delta\omega.$$

$$\max \sigma_i \leq [\sigma], \quad \max E_i \leq [E]$$

где

$$\Delta P_{Pac} = \frac{\omega}{4\pi} \sum_{s=1}^{Nel} \psi_s \gamma_i^N \bar{u}_s^T K_s^e \bar{u}_s, \quad I = \omega \sum_{i=1}^{Nnd} K_{up}^T \bar{u}$$

При ее решении в качестве варьируемых параметров использовались координаты 12 контрольных узлов хвостовой части концентратора. Модель состояла из 254 двадцати-узловых объемных конечных элементов и 1728 узлов, количество степеней свободы - 5216.

Оптимальная конструкция УКС, изготовленная из титанового сплава BT-3 с использованием в пьезопреобразователе керамики ЦТССт-3, рассчитанная на работу с частотой 28.5 кГц, имеющая свободный диапазон 25.5 - 31.5 кГц изображена на рис. 2. В таблице 1 приведены результаты исследования характеристик базового и оптимального проектов.

Таблица 1.

Критерий качества	Базовый вариант	Оптимальный вариант
Нижняя паразитная частота (кГц)	26.8	25.3
Рабочая частота (кГц)	28.5	28.5
Верхняя паразитная частота (кГц)	32.7	32.8
Напряжение холостого хода (В)	10.4	10.6
Напряжение в рабочем режиме (В)	23.4	20.2
Мощность холостого хода (Вт)	3.2	4.4
Электрическое сопротивление (Ом)	33.8	25.5
$\max \sigma_i$ (МПа)	20.7	21.1

Мощность, излучаемая в нагрузку предполагалась равной номинальному значению 4 Вт. При этом удалось добиться снижения разности потенциалов на электродах в рабочем режиме на 15.8%. Напряжение на холостом ходу возросло всего на 2% в то время как потери энергии возросли на 27%. Однако увеличение частотного интервала, свободного от паразитных резонансов, в 1.5 раза и отстройка нежелательных колебаний вполне компенсируют увеличение потребляемой мощности.

Одной из наиболее важных проблем, возникающих при проектировании ультразвукового инструмента, является создание крепления, обеспечивающего виброизоляцию колебательной системы от корпуса.

Решение ее может быть осуществлено за счет минимизации амплитуд вибраций на поверхности конструкции в месте крепления и выбора самого способа соединения.

В данной работе рассматривалась постановка задачи оптимального проектирования, обеспечивающая минимум амплитуды колебаний в креплении при выполнении ограничений на рабочую резонансную частоту и интервал, свободный от паразитных резонансов:

$$\min \sum_{i=1}^{Nnd} | \bar{u}_i |$$

$$\omega_p = \omega_p^*, \quad \omega^- \leq \omega^* - \Delta\omega, \quad \omega^+ \geq \omega^* + \Delta\omega.$$

$$\max \sigma_i \leq [\sigma] , \quad \max E_i \leq [E]$$

Поставленная в работе проблема решена для нейрохирургического инструмента.

Особенности проектирования ультразвукового инструмента технологического назначения связаны с необходимостью обеспечения заданной амплитуды колебаний на рабочей поверхности, заданной мощности ультразвука, излучаемого в обрабатываемую среду, при максимальном к.п.д. и максимальных запасах электрической и механической прочности.

В работе исследованы возможности оптимального проектирования УКС, предназначенных для выполнения различных технологических процессов.

Кривые Парето компромиссных решений четырех функциональной задачи $\min U_{p.p.}, \min \{ \max_V \sigma_i \}, \min \Delta W_{pac}, \omega_p = \omega_p^*$ показывающие возможности минимизации максимальных динамических напряжений, электрического напряжения на электродах в рабочем режиме и потерь энергии на внутреннее трение при фиксированной амплитуде и частоте колебаний для различных уровней излучаемой в нагрузку мощности представлены на рис. 3, 4.

Полученное семейство оптимальных конфигураций отражает разную степень компромисса между противоречащими друг другу требованиями. Концентратор, обеспечивающий абсолютный минимум рассеиваемой энергии, в рабочем режиме даже при минимальной нагрузке требует повышенного напряжения электрического тока. В то же время концентраторы обеспечивающие минимальные напряжения на электродах не отвечают требованиям механической прочности. Концентратор соответствующий абсолютному минимуму максимальных

динамических напряжений обладает низким уровнем к.п.д. во всей полосе рабочих нагрузок. Таким образом выбор наилучшей конфигурации, соответствующей предъявляемым требованиям, осуществляется проектировщиком на неформальном уровне.

Инструмент, спроектированный на основании результатов исследований и предназначенный для обработки хрупких и сверхтвердых материалов изображен на рис 5.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и оптимизацией инструмента для ультразвуковой сварки, занимающей одно из ведущих мест среди областей применения ультразвука. На рис. 6 изображен "ножевой" сонотрод, применяющийся при ультразвуковой сварке различных деталей из пластмасс. Продольные резонансные колебания возбуждаются электромеханическим преобразователем, соединенным с сонотродом в центральной точке широкой грани. Узкая грань, контактирующая со свариваемыми деталями, излучает высокочастотные ультразвуковые волны, обеспечивающие внутренний разогрев пластмассы, ее плавление и сварку. Прочный и однородный шов можно получить только при условии равномерного распределения амплитуд колебаний по излучающей поверхности. В то же время для стандартной конструкции эта неравномерность достигает 18%. Таким образом основная специфика в проектировании таких установок заключается в том, что наряду с требованиями максимальности коэффициента усиления и к.п.д. и спектральными ограничениями, необходимо обеспечивать минимизацию отклонения максимального значения амплитуды вибраций на рабочей грани от минимального.

Использование разработанных математических моделей и методов оптимизации формы позволило решить эту проблему не прибегая к трудоемкому перебору вариантов, сопровождающемуся многочисленными расчетами или экспериментальными исследованиями каждого из них.

Математическая постановка задачи формулировалась следующим образом :

при ограничениях на частоту колебаний

$$\omega_p = \omega_p^*, \quad \omega^- \leq \omega^* - \Delta\omega, \quad \omega^* \geq \omega^* + \Delta\omega. \quad (7)$$

и равномерном распределении нормальных составляющих амплитуд колебаний на излучающей грани (при этом величина амплитуда в центре грани считается фиксированной)

$$\delta(\bar{u}) = \sum_{i=1}^M (u_i - u_c)^2 / M < \varepsilon \quad (8)$$

обеспечить минимум потерь энергии на внутреннее гистерезисное трение

$$\min \Delta W_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{Nef} \psi_s \gamma_s^N \bar{u}_s^T K_s^e \bar{u}_s \quad (9)$$

и максимум коэффициента усиления

$$\max K_u = \max |u_c| / |u_o| \quad (10)$$

Решение двух функциональной задачи в плоскости образует кривую компромисса, отражающую возможности максимизации коэффициента усиления при фиксированном уровне потерь энергии и наоборот. Исследованы возможности оптимизации при использовании материалов соответствующих разным показателям степени в гипотезе Давиденкова (рис 7). Применение материалов, подчиняющихся гипотезе амплитудно-независимого трения - е. титана и титановых сплавов более целесообразно, чем материалов с амплитудно-зависимыми гистерезисными потерями. Оптимальная конфигурация приведена на рис. 8.

Для многоточечной сварки в автомобильной промышленности применяется инструмент изображенный на рис. 9. Сварка осуществляется за счет высокочастотного разогрева деталей ультразвуком, излучаемым тремя сонотродами, выполненными из титанового сплава. Средством передачи колебаний от электро-механического преобразователя к сонотродам служит прямоугольный брус-распределитель (бустер), выполненный из термочного алюминиевого сплава. Равномерность амплитуд колебаний рабочих торцов сонотродов обеспечивается выбором одинаковых коэффициентов усиления концентраторов и продольными прорезями в бустере. Система рассчитана на работу в резонансном режиме с частотой 39 кГц. Наличие трех сонотродов с близкими парциальными частотами приводит к появлению целого ряда паразитных резонансов в области рабочей частоты, что негативным образом сказывается на устойчивости рабочего режима УКС. Так на заводе АЗЛК копирование вышедших из строя после гарантийного срока концентраторов фирмы "Branson" привело к полной потере работоспособности установки.

Таким образом отстройка системы - первоочередная задача, возникающая при проектировании ультразвукового инструмента такого типа. Диапазон частот, свободный от паразитных резонансов, определяется параметрами генератора и в данном случае составляет 37 - 41 кГц.

Математическая постановка задачи оптимизации заключается в

определении формы поверхности бустера максимизирующей функционал

$$\max: \min \{ (\omega_p - \omega^-), (\omega^+ - \omega_p) \}$$

при фиксированной рабочей частоте

$$\omega_p = \omega^* = \text{const}$$

В дифференцируемой форме критерий качества может быть записан с использованием предельного свойства степенной нормы

$$\max ((\omega_p - \omega^-)^{2M} + (\omega^+ - \omega_p)^{2M})^{1/2M} \quad (11)$$

при этом $M=6$ достаточно для практических целей.

Однако такая постановка приводит к конфигурации неприемлемой с точки зрения к.п.д. системы. Кривая компромисса, показывающая возможности отстройки от паразитных резонансов при фиксированном уровне потерь энергии изображена на рис.10. При этом наиболее равномерное распределение амплитуд обеспечивает конфигурация соответствующая минимуму потерь энергии (рис 11).

В четвертой главе решены вопросы, связанные с анализом чувствительности и оптимизацией формы кварцевых резонаторов. Благодаря сочетанию высоко-стабильных свойств кристаллической структуры с возможностью преобразования электрически колебаний в механические и наоборот, кварцевые резонаторы нашли широкое применение в различной радио-электронной, микропроцессорной и измерительной технике в качестве фильтров и стабилизаторов частоты. Проектирование пьезоэлементов таких устройств связано с выбором формы резонатора (распределения толщины, геометрии контура) и формы электрода. Основными требованиями при этом являются обеспечение заданной резонансной частоты, максимально возможной отстройки от паразитных ангармонических резонансов, минимального уровня потерь энергии в материале пьезоэлемента и креплениях, слабой температурно-частотной зависимости. Наименьшей зависимостью частоты от температуры обладают резонаторы совершающие сдвиговые колебания по толщине, при этом на температурно-частотную характеристику можно влиять в широких пределах изменяя ориентацию среза. Резонаторы АТ-среза являются наиболее широко распространенным типом резонаторов малой зависимости частоты от температуры.

Спектр сдвиговых колебаний по толщине вблизи основной гармонике имеет большое число паразитных резонансов. Особенно сильно проявляются ангармонические составляющие и изгибные, связанные со сдвиговыми по толщине.

В работе задача отстройки решена с использованием математических моделей, базирующихся на применении специализированного конечного элемента, и необходимых условий оптимальности в форме дискретного принципа максимума.

Использование линейных аппроксимаций перемещений в плоскости элемента, аппроксимаций тригонометрическими функциями перемещений по толщине и квадратичных для изгибных смещений позволяет выделять из плотного и широкого спектра частоты и формы, возбуждаемые переменным электрическим полем, учитывать связь изгибных и сдвиговых колебаний, описывать геометрию резонатора дискретным набором варьируемых параметров - толщин конечных элементов. Зависимость матриц жесткости и масс элемента от толщины в этом случае может быть выражена как

$$K_i(\bar{h}) = h_i K_i^1 + K_i^2 / h_i, \quad M_i(\bar{h}) = h_i M_i^1$$

Оптимизационная проблема состоит в определении вектора варьируемых параметров принадлежащего допустимой области и обеспечивающего максимально возможный интервал свободный от паразитных резонансов.

В резонаторах, совершающих сдвиговые колебания по толщине, наиболее близкими к рабочей частоте являются ангармонические колебания (1,1,2) и (1,2,1), а наиболее интенсивными и нежелательными ангармоники (1,1,3) и (1,3,1). Поэтому в работе рассматриваются две задачи оптимального проектирования

$$J_{j-1} = \max \{ \min (\lambda_{11j}, \lambda_{1j1}) - \lambda_{111} \}, \quad j = 2, 3.$$

Которые в дифференцируемой форме могут быть записаны на основании предельного свойства степенной нормы как

$$J_{j-1} = \max ((\lambda_{11j}^n + \lambda_{1j1}^n)^{-1/n} - \lambda_{111}) \quad (12)$$

n для практических расчетов может быть выбрано равным 10-12.

Функция Гамильтона, вследствие аддитивности функционалов по отношению к варьируемым параметрам, может быть записана как

$$H(\bar{h}) = \sum_{i=1}^{Nel} H_i(\bar{h})$$

Условия оптимальности в случае выпуклой функции Гамильтона выражаются как

$$H(\bar{h}_{opt}) = \max_{\bar{h} \in L} H(\bar{h}) = \sum_{i=1}^{Nel} \max_{h_i: \bar{h} \in h^*} H_i(h_i)$$

Использование на каждой итерации выпуклой аппроксимации функции Гамильтона позволяет решить поставленную задачу.

В работе исследуется возможность построения кривой Парето компромиссных решений, отражающей возможности минимизации частоты основной гармоник и максимизации частот нежелательных ангармоник.

Рассмотрен конкретный пример отстройки от "паразитных" резонансов плоско-выпуклого кварцевого резонатора АТ-среза (Рис 12). Рассчитанные значения частот хорошо согласуются с приведенными в литературе экспериментальными значениями (Табл 2).

Таблица 2.

Ангармоника	Эксперимент	Расчет
(1,1,1)	5.984231	6.004835
(1,1,2)	-	3.096303
(1,2,1)	-	6.107379
(1,1,3)	6.152575	6.188548
(1,3,1)	6.196537	6.211028

Оптимальные конфигурации обеспечивающие максимум функционала (12) при $j=2$ и $j=3$ изображены на рис 13 и 14. Сравнение их спектральных характеристик отражено в таблице 3.

Таблица 3.

Ангармоника	Вариант "А"	Вариант "В"
(1,1,1)	6.007234	5.914402
(1,1,2)	6.282272	6.165893
(1,2,1)	6.301345	6.190111
(1,1,3)	6.407729	6.386209
(1,3,1)	6.454170	6.417479

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен аналитический обзор литературы по вопросам численного моделирования и проектирования элементов высокочастотной вибротехники.

2. Создана серия специализированных конечных элементов ориентированных как на специальные виды колебаний (конечный элемент описывающий связанные толщинно-сдвиговые и изгибные колебания) так и на общий случай взаимодействия трехмерных электрического и напряженно-деформированного полей.

3. Разработаны высокоэффективные модификации численных методов решения задачи на собственные значения для систем с плотным и кратным спектром.

4. Выведены соотношения анализа чувствительности для динамических функционалов при варьировании границей двумерной и трехмерной области (формой элементов).

5. Разработаны эффективные методы решения сопряженной задачи с максимальной экономией вычислительных ресурсов ЭВМ.

6. Развита алгоритмы оптимального проектирования, ориентированные на высокую размерность пространства варьируемых параметров (как следствие дискретизации пространственной геометрии) и большое число функциональных ограничений (как следствие многокритериальности реальной задачи проектирования).

7. Программная реализация основных разделов работы допускает наряду с созданием специализированных систем оптимального проектирования отдельных элементов высокочастотной вибротехники, создание также универсального пакета программ оптимизации пространственной геометрии резонансных составных колебательных систем.

8. Впервые рассмотрены задачи оптимизации формы кварцевых резонаторов с внедрением некоторых результатов в НПО "Фонон".

9. Решена серия задач оптимального проектирования пространственной формы преобразователей с сонодами для точечной сварки корпусных деталей.

10. Впервые поставлена и решена задача многокритериальной оптимизации пространственной геометрии преобразователя с ножевым сонодом.

11. Решен широкий круг задач оптимизации ультразвуковых колебательных систем медицинского и технологического назначения. Результаты внедрены при создании гаммы ультразвуковых приборов и установок серии "VESTA".

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Конечноэлементный спектральный анализ и влияние геометрии на формы колебаний кварцевых резонаторов // Динамика и прочность машин. Харьков: Вища школа, 1991, Вып. 53.

2. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Анализ чувствительности динамических характеристик кварцевых резонаторов к распределению толщины и геометрии контура // Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций и машин: Материалы 2-й Научно-технической конференции. - Симферополь, 1992. - с. 85 - 86.

3. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Оптимальное проектирование концентраторов ультразвуковых колебаний при варьировании формой

конструкции // Экстремальные задачи и их приложения: Тезисы докладов Межгосударственной научной конференции. - Нижний Новгород, 1992. - с. 103.

4. Тарануха А.А. Оптимизация формы трехмерных моделей и элементов конструкций при высокочастотных колебаниях // прочность и колебания конструкций при вибрационных и сейсмических нагрузках : Материалы научной конференции. Запорожье, 1993. - с. 19.

5. Гошков В.В., Симсон Э.А., Тарануха А.А. Расчет вынужденных колебаний механических систем с кратным или плотным спектром при малом трении // Тезисы докладов 1-ого Международного симпозиума украинских инженеров-механиков. Львов, 1993. - с. 63.

6. Тарануха А.А. Оптимальное проектирование механических элементов высокочастотной вибротехники // MicroCad-System'93 : Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Харьков-Мишкольц, 1993. - с. 106 - 107.

7. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Расчет и оптимизация элементов высокочастотной вибротехники при сложном напряженном состоянии // Тезисы докладов 1-ого Международного симпозиума украинских инженеров-механиков. - Львов, 1993. - с. 122.

8. Гошков В.В. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Анализ чувствительности и оптимизация элементов конструкций с неразделенным или кратным спектром // MicroCad-System'93 : Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Харьков-Мишкольц, 1993. - с. 92 - 93.

9. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Оптимизация формы концентраторов ультразвуковых колебаний // Прикладные проблемы прочности и пластичности. - Нижний Новгород, 1993. - Вып. 51.

10. Подосинкина Е.Ю., Симсон Э.А., Тарануха А.А. Трехмерное моделирование и проектирование ультразвуковых инструментов с криволинейными рабочими наконечниками // MicroCad-System'93 : Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Харьков-Мишкольц, 1993. - с. 100 - 101.

11. Симсон Э.А., Тарануха А.А. Оптимизация формы кварцевых резонаторов // Акустический журнал. - Москва, 1993. - т.39, No 5.

12. E. Simson, A. Taranukha. Shape optimization of large ultrasonic tools // Optimization of Structural Systems and Applications: Third International Conference. - Zaragoza, 1993. - pp. 31 - 42.

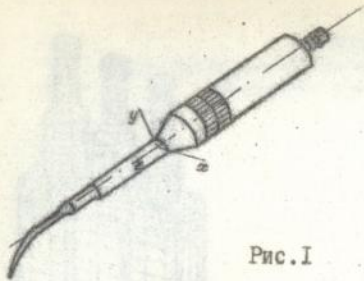


Рис. 1

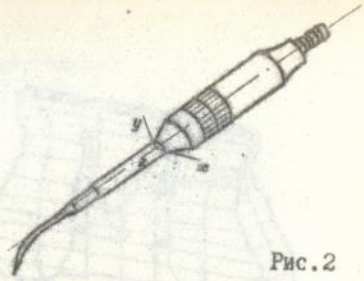


Рис. 2

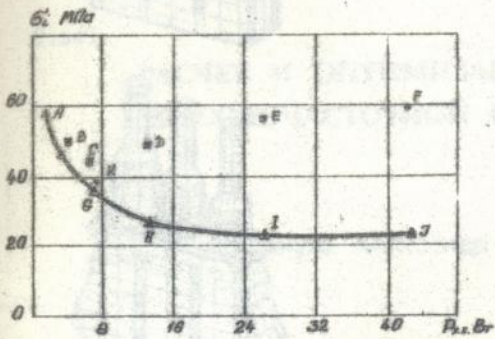


Рис. 3

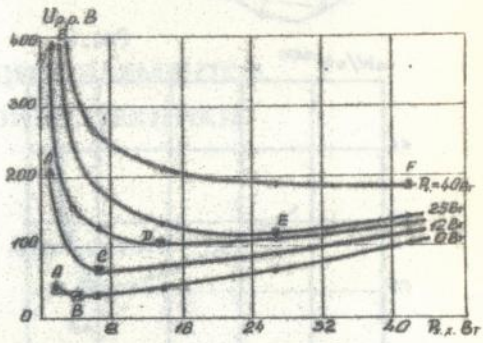


Рис. 4

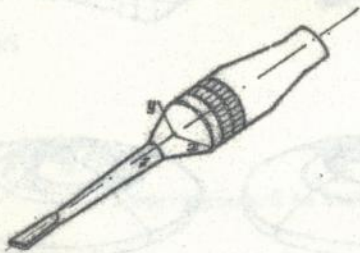


Рис. 5

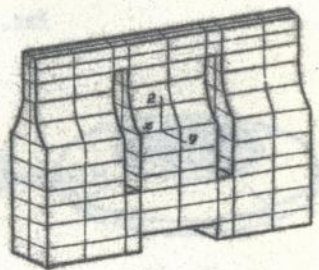


Рис. 6

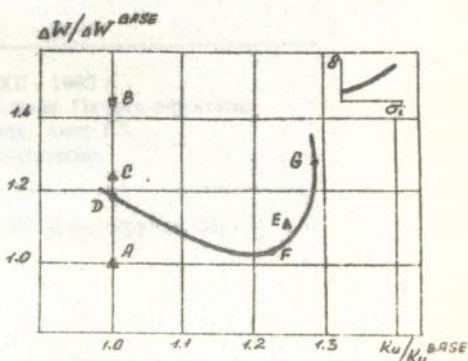
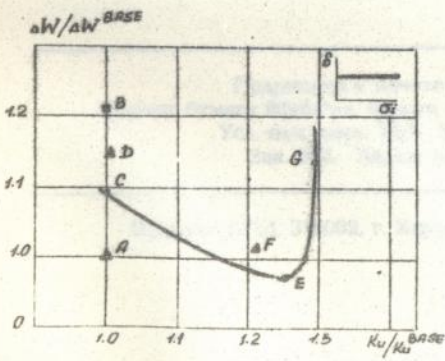


Рис. 7

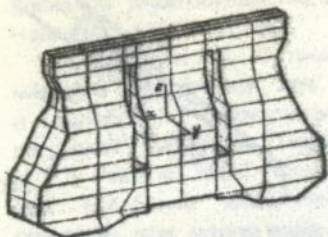


Рис. 8



Рис. 9

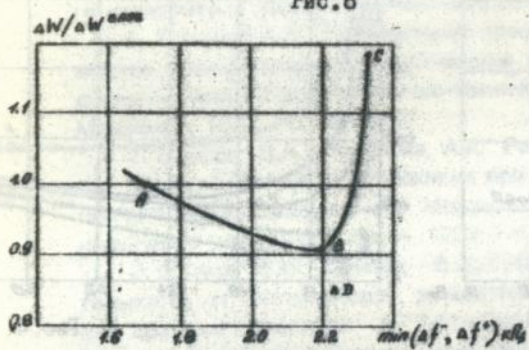


Рис. 10



Рис. 11



Рис. 12



Рис. 13



Рис. 14

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

УДК 539.3

**РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРОТЕХНИКИ**

Тарануха Александр Адольфович

Ответственный за выпуск к.т.н. Исаков С.Н.

Подписано к печати 9/ХП - 1993 г.
Формат бумаги 60x84¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.-печ. лист. 12,5. Уч.-изд. лист 1,5.
Зак. 815. Тираж 100. Бесплатно.

Издание ХПИ, 310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21.

AB 28.650

AB 28.650

Александр Андреевич

И.С. Иванов, И.Т.К. КСЧ

1917