

На правах рукописи



Салмин Сергей Анатольевич

РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЖГУТОВ И
НИТЕЙ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Уральский электрохимический комбинат» и обществе с ограниченной ответственностью «Новоуральский научно-конструкторский центр» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, Шевараков Константин Константинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Капранов Борис Иванович

доктор технических наук, профессор Степанова Людмила Николаевна

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (г. Пермь)

Защита состоится «6» декабря 2011 г. в 15.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г.Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь Совета по защите

докторских и кандидатских диссертаций

Д 212.269.09, к.т.н., доцент



Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задачи повышения эффективности и конкурентоспособности отечественной промышленности путем улучшения характеристик широкого спектра выпускаемых машин и агрегатов, работающих в условиях высоких удельных механических нагрузок, при одновременном снижении их веса, невозможно решить без применения современных композиционных материалов на основе углеродных волокон. Эти волокна, как правило, в виде высокомодульных углеродных жгутов и нитей (ВУЖиН), стали незаменимым конструкционным материалом, применяемым в специализированном машиностроении для атомной промышленности, авиастроении, а также в других высокотехнологичных отраслях. Одной из наиболее важных физико-механических характеристик ВУЖиН является удельный модуль упругости (УМУ). Этот параметр, в итоге, определяет основные характеристики конечных изделий из них. Имеющиеся методы и приборы контроля УМУ, используемые в промышленности, были разработаны более 30-40 лет назад и уже не отвечают современным требованиям.

Актуальность работы по разработке акустического метода контроля упругих характеристик ВУЖиН и устройств для его реализации определяется отсутствием современных экспресс-методов такого контроля, учитывающих специфику ВУЖиН, и современного приборного обеспечения, способного реализовать эти методы.

Исходя из существующей конъюнктуры производства и потребления ВУЖиН, востребованность акустических (ультразвуковых) методов и приборов экспресс-контроля их упругих характеристик и, в первую очередь, УМУ высока и будет возрастать по мере роста объема их выпуска, обуславливаемого ростом потребности в современных композиционных материалах на основе ВУЖиН.

Целью диссертационной работы является разработка акустического (ультразвукового) метода контроля удельного динамического модуля упругости (УДМУ) ВУЖиН различных типов и современного приборного обеспечения для его реализации.

Объектом исследования диссертационной работы являются ВУЖиН различных типов, наиболее востребованные в высокотехнологичных отраслях промышленности и, особенно, в специализированном машиностроении для атомной промышленности.

Предметом исследования диссертационной работы являются акустические методы контроля физико-механических свойств ВУЖиН и, в первую очередь, методы контроля их УДМУ.

Задачи исследования

1. Теоретически разработать макроструктурную модель ВУЖиН, описывающую распространение продольной ультразвуковой волны.
2. Установить функциональную взаимосвязь между УДМУ и параметрами распространения ультразвука в ВУЖиН.
3. Промоделировать процесс распространения продольной ультразвуковой волны в виде волнового пакета (ВП) по предложенной модели ВУЖиН. Оценить изменение регистрируемого акустического сигнала (АС) в зависимости от параметров модели.
4. Сравнить результаты вышеуказанного теоретического моделирования с результатами, полученными на реальных ВУЖиН. По результатам сравнения оценить степень адекватности предложенной модели.
5. Синтезировать метод акустического неразрушающего контроля УДМУ применительно к ВУЖиН, учитывающий их специфику.
6. Разработать на современной элементной базе устройства, реализующие синтезированный метод акустического контроля УДМУ.
7. Сопоставить значения УДМУ со значениями удельного статического модуля упругости (УСМУ) для наиболее распространенных типов ВУЖиН. Показать возможность использования УДМУ в качестве объективной характеристики упругих свойств ВУЖиН.

Методы исследования

В работе использовались методы математического моделирования, численного интегрирования, статистического анализа и оценочных расчетов.

Для измерения параметров АС применялись импульсная осциллография сигнала с пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП).

Научная новизна

1. Модель ВУЖиН, описывающая их макроструктуру как набор параллельно идущих, тонких, несвязанных, линейно упругих стержней.
2. Результаты моделирования распространения продольной ультразвуковой волны в ВУЖиН, раскрывающие специфичные для них изменения формы регистрируемого АС.
3. Метод неразрушающего акустического измерения УДМУ для ВУЖиН сочетающий когерентное накопление АС и его регистрацию по максимуму огибающей.
4. Применение, в рамках акустического метода контроля упругих характеристик материалов, статистического критерия Неймана-Пирсона для устранения «грубых промахов» в измерениях.
5. Результаты сопоставления значений УДМУ и УСМУ для наиболее востребованных типов ВУЖиН.

Практическая ценность

1. Разработан и реализован на практике новый метод неразрушающего акустического контроля УДМУ для ВУЖиН.
2. Разработаны и серийно выпускаются современные устройства, реализующие предложенный акустический метод и позволяющие проводить оперативные измерения УДМУ у различных типов ВУЖиН.
3. Разработаны и реализованы на практике схмотехнические и алгоритмические решения, позволяющие интегрировать вышеуказанные устройства в систему управления технологическим процессом получения ВУЖиН.
4. На семи предприятиях Государственной корпорации «РОСАТОМ» реализован оперативный технологический и арбитражный контроль УДМУ при помощи этих устройств. Имеются акты о внедрении.

Защищаемые положения:

1. Представление ВУЖиН стержневой моделью, описывающей их макроструктуру как набор параллельно идущих, тонких, несвязанных, линейно упругих стержней.
2. УДМУ такого стержня является линейной функцией от одного аргумента – квадрата скорости распространения продольной акустической волны (СРПУВ).
3. Импульсная характеристика предложенной модели ВУЖиН определяется только лишь функцией плотности распределения образцов и линейным размером модели.
4. Выявленные, с помощью стержневой модели, специфичные для ВУЖиН искажения АС обуславливаются дисперсией СРПУВ по их филаментам и выражаются в увеличении его длительности и уменьшении амплитуды этого сигнала до таких значений, при которых его регистрация невозможна.
5. Предложенный акустический метод контроля УДМУ, учитывающий специфику ВУЖиН и принципиально отличающийся от классической реализации подобных методов наличием когерентного накопления АС с регистрацией времени его прихода по максимуму огибающей и оценкой достоверности регистрации с помощью критерия Неймана-Пирсона, позволяет контролировать УДМУ у подавляющего большинства этих волокон с погрешностью менее 2%.
6. УДМУ незначительно отличается от УСМУ для широкого спектра типов ВУЖиН и объективно характеризует их упругие свойства.
7. Практическая реализация предложенного автором акустического метода возможна в виде законченного изделия – измерителя модуля упругости ВУЖиН – с нормированными метрологическими характеристиками.

Апробация работы:

Результаты работы докладывались на всероссийской конференции «Кикоинские чтения» в ИМФ РНЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 2006г. и на IV межотраслевой научно-технической конференции НГТИ, Новоуральск, 2005г.

На разработанный способ контроля УДМУ и устройство для его реализации получен патент РФ №2281464.

Разработанные в рамках диссертационной работы устройства, реализующие предложенный метод акустического контроля (измерители типа УИМУ-1БП), внесены в Государственный реестр средств измерения (рег. № 31242-06).

Эти измерители внесены в регламент №02648-01-0134 и используются на семи предприятиях Государственной корпорации «РОСАТОМ». Имеются акты о внедрении данных измерителей.

Личный вклад соискателя

Большая часть работ в рамках темы диссертации, таких, как разработка стержневой модели ВУЖиН, синтез акустического контроля, разработка схемотехники и программного обеспечения (ПО) устройств для реализации данного метода, выполнены соискателем лично. Помимо вышеуказанных работ, выполненных в рамках темы в открытом акционерном обществе «Уральский электрохимический комбинат» и обществе с ограниченной ответственностью «Новоуральский научно-конструкторский центр», автор лично участвовал в пилотном внедрении представленного им акустического метода и устройств на ряде предприятий Государственной корпорации «РОСАТОМ». Остальные результаты получены в соавторстве при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации 129 страниц, в том числе 23 рисунка, 9 таблиц. Список использованных источников включает 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная и практическая значимость, сформулированы цель работы и ее научная новизна, изложены основные, выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

В первом разделе проводится анализ известных методов контроля УМУ, которые возможно применить (в некоторых случаях с большими ограничениями) для решения задачи оперативного контроля УМУ различных типов ВУЖиН. Так показано, что механические методы обладают низкой оперативностью и высокой трудоемкостью. Широко известные методы акустического контроля также не могут быть применены для данных целей, так как не учитывают специфику объекта контроля и для реализации этих методов используется устаревшее приборное обеспечение с неприемлемой методологической погрешностью измерения.

Второй раздел посвящен разработке и совершенствованию акустического импульсного метода для контроля модуля упругости углеродных волокнистых материалов, таких, как ВУЖиН.

В первой части раздела показано, что значение УДМУ тонкого линейно-упругого стержня является линейной функцией одного аргумента – квадрата СРПУВ и выражается следующей формулой:

$$E_{уд} = \frac{E_d}{P_{уд}} = \frac{\rho \times V^2}{\rho \times g} = \frac{1}{g} \times V^2, \quad (1)$$

где $E_{уд}$ – УДМУ, м;

E_d – динамический модуль упругости, Па;

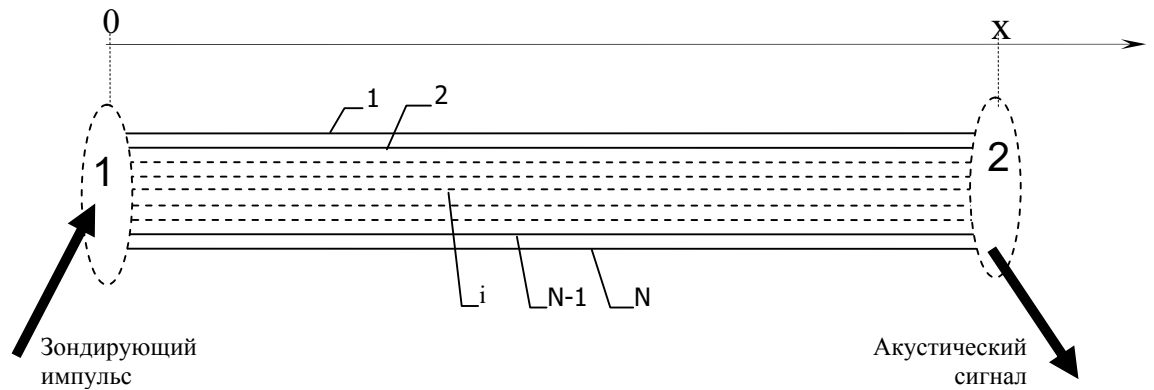
$P_{уд}$ – удельный вес, Н/м³;

V – стержневая СРПУВ, м/с;

ρ – плотность материала, кг/м³.

Причем показано, что стержневая СРПУВ для элементарного (единичного) филамента ВУЖиН (который является физической реализацией абстракции «тонкий стержень») отличается от групповой на величину порядка 10^{-5} - 10^{-6} на частоте 1 МГц. То есть, имеет место практически бездисперсионное распространение волн в филаментах. (Диаметры филаментов различных типов ВУЖиН находятся в диапазоне от 4 до 12 мкм).

Однако измерение групповой СРПУВ в целом ВУЖиН, состоящем из множества элементарных филаментов, имеет технические трудности из-за присущих им макроструктурных особенностей, суть которых раскрывает предлагаемая во второй части этого раздела стержневая модель ВУЖиН. В этой модели, с точки зрения распространения продольной ультразвуковой (акустической) волны в виде ВП, образующие ВУЖиН филаменты представлены линейно-упругими стержнями, имеющими некоторый разброс



1, 2 ... i ... N-1, N – отдельные филаменты-стержни, составляющие ВУЖиН

Рисунок 1 – модель ВУЖиН в виде набора линейно-упругих стержней

упругих характеристик (и, следовательно, СРПУВ) относительно среднего значения по всем стержням модели. Этот разброс определяется технологией производства ВУЖиН, при которой невозможно обеспечить абсолютно идентичные условия обработки для всех их филаментов на различных стадиях производства. Графическое изображение предлагаемой стержневой модели приводится на рисунке 1.

В третьей части этого раздела рассматривается движение продольной ультразвуковой волны в виде ВП конечной длительности и эволюция формы регистрируемого АС. Для нахождения выражения, описывающего изменение формы регистрируемого АС при движении ВП по предложенной стержневой модели (см. рисунок 1), вводятся следующие обозначения: $U^{BX}(t)$ – суммарный, для всех филаментов, АС в точке $x=0$ (сечение 1); $U^{BXX}(x,t)$ – суммарный, для всех филаментов, АС в произвольной точке x ; $u_i^{BX}(t)$ – ВП на единичном филаменте в точке $x=0$; $u_i^{BXX}(x,t)$ – ВП на единичном филаменте в произвольной точке x ; v_i – СРПУВ для единичного филамента; N – общее число филаментов. Тогда суммарный регистрируемый АС в произвольной точке x , например в сечении 2 (см. рисунок 1), можно записать как алгебраическую сумму отдельных ВП с каждого филамента:

$$U^{BXX}(x,t) = \sum_i u_i^{BXX}(x,t) = \sum_i u_i^{BX}(t - x/v_i). \quad (2)$$

Проведя ряд преобразований и введя $g(v)$ – функцию плотности распределения стержней по СРПУВ, получим выражение для суммарного АС в произвольной точке x :

$$U^{BXX}(x,t) = \int_0^{+\infty} U^{BX}(t - x/v)g(v)dv. \quad (3)$$

Выражение формы регистрируемого АС (3), после замены $\tau=x/v$ и с учетом, что дифференциал $d(v)$ равен $d(v)=d(x/\tau)=-x\times\tau^{-2}\times d(\tau)$, можно записать так:

$$U^{\text{ВЫХ}}(x, t) = - \int_{+\infty}^0 U^{\text{ВХ}}(t - \tau) \times x \times \tau^{-2} \times g(x/\tau) d(\tau) = \int_0^{+\infty} U^{\text{ВХ}}(t - \tau) \times x \times \tau^{-2} \times g(x/\tau) d(\tau).$$

Далее переходим к выражению $U^{\text{ВЫХ}}(x, t) = \int_0^{+\infty} U^{\text{ВХ}}(\tau) h(t - \tau) d\tau$, которое является

сверткой двух функций: функции начального воздействия – $U^{\text{ВХ}}(\tau)$ и функции

$$h(\tau, x) = x \times \tau^{-2} \times g(x/\tau), \quad (4)$$

определяющей, по своей физической сути, импульсную характеристику среды (в данном случае модели ВУЖиН).

Выражение (4) наглядно показывает, что импульсная характеристика ($h(\tau)$) предложенной модели ВУЖиН однозначно определяется функцией плотности распределения стержней – $g(v)$ и линейным размером данной модели (X). Исходя из этого выражения, функция $g(v)$ может быть выражена через $h(\tau)$ следующим соотношением:

$$g(v) = g(x/\tau) = \frac{\tau^2}{x} \times h(\tau, x). \quad (5)$$

Моделирование распространения АС от сечения 1 до сечения 2 в виде ВП конечной длительности и высокочастотным заполнением, путем численного решения интеграла в (3), показало наличие дисперсионных искажений АС, которые увеличиваются по мере увеличения следующих факторов: координаты x , определяющей положение ВП, величины дисперсии СРПУВ и частоты заполнения ВП. Эти искажения возникают по причине формирования АС из суперпозиции ВП (суммы акустических волн) с разными фазами, идущих по отдельным филаментам, и выражаются в увеличении длительности, уменьшении амплитуды и искажению его спектра.

В подтверждении вышесказанного, на рисунке 2 пунктиром показана зависимость амплитуды АС в сечении 2 в зависимости от частоты заполняющего его колебания. На рисунках 3,4 приводятся формы и спектрограммы АС в сечении 2 в зависимости от величины и характера дисперсии СРПУВ.

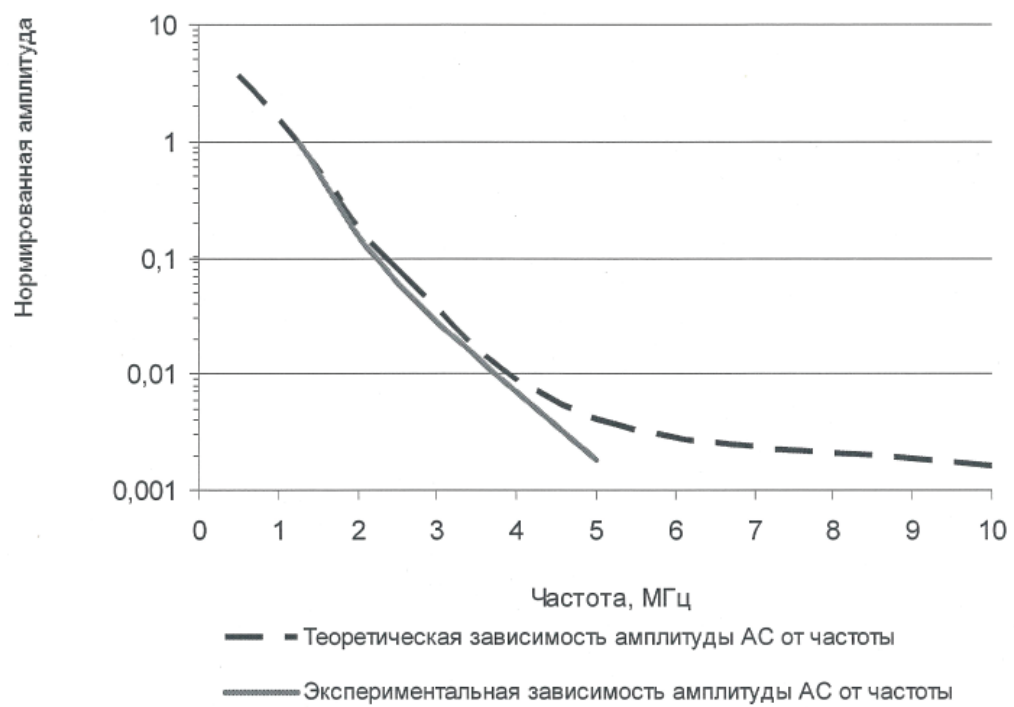


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды АС от частоты

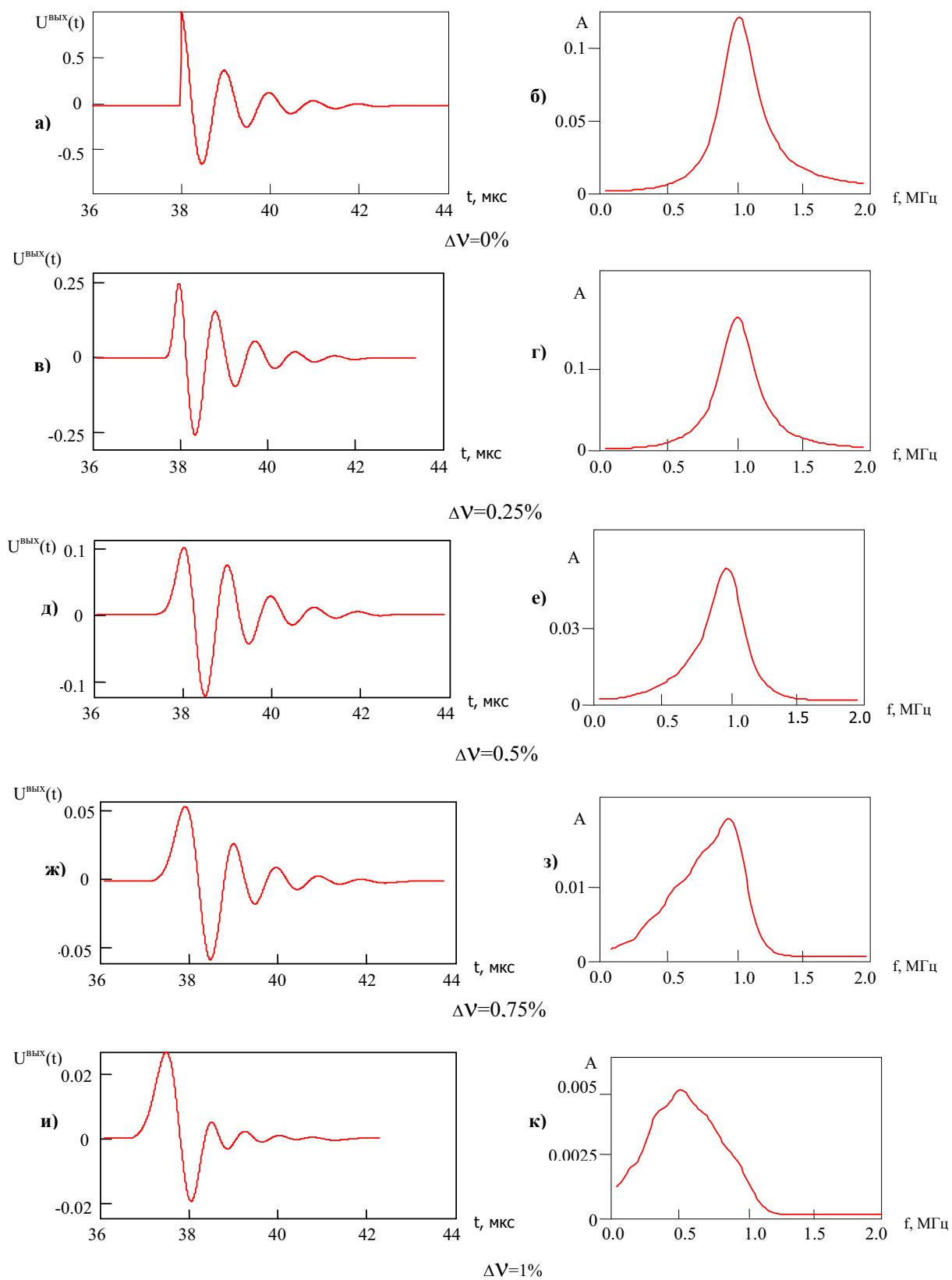


Рисунок 3 – Формы АС (а,в,д,ж,и) и его спектры (б,г,е,з,к) при нормальном распределении по СРПУВ в зависимости от величины ее вариации

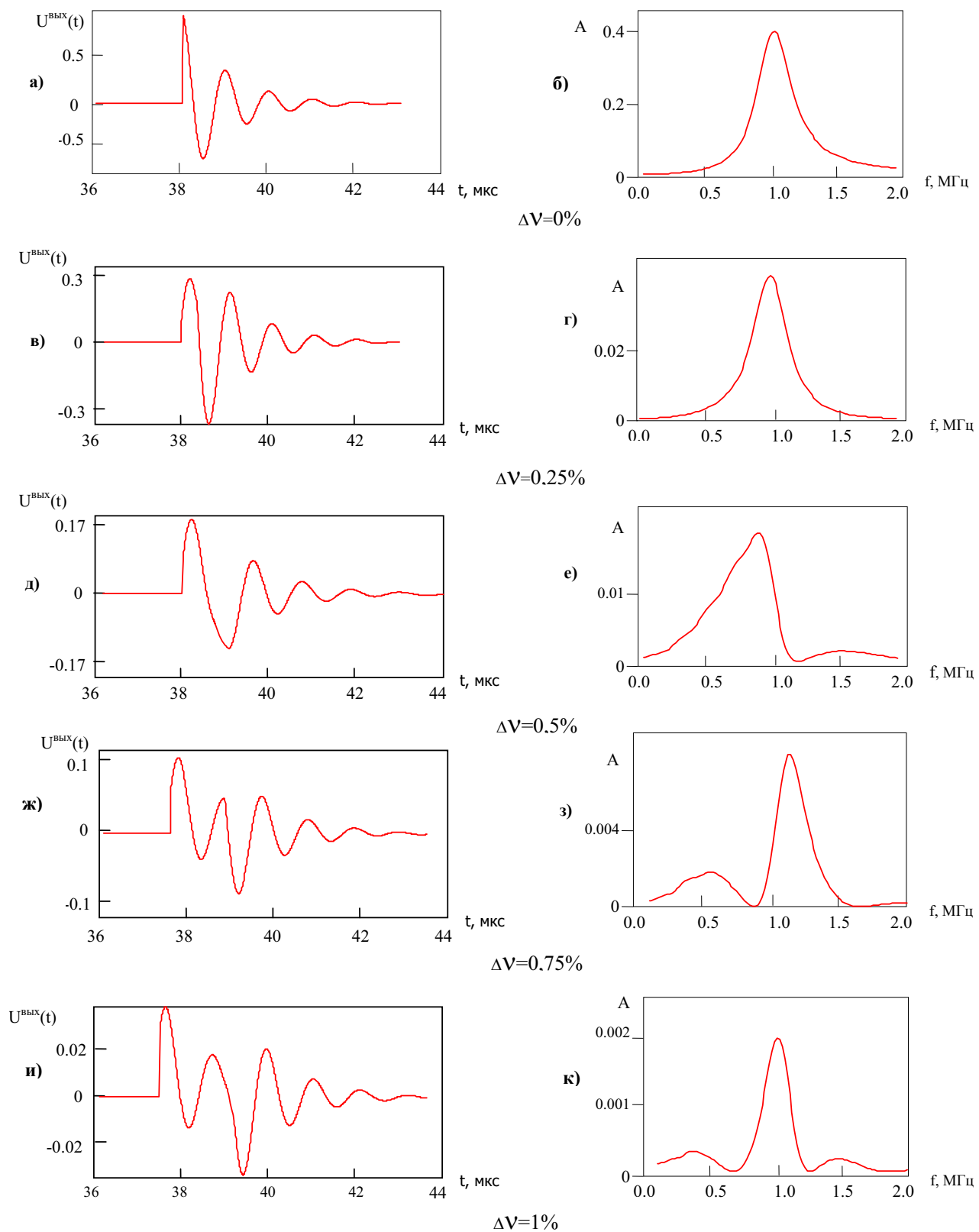


Рисунок 4 – Формы АС (а,в,д,ж,и) и его спектры (б,г,е,з,к) при равномерном распределении по СРПУВ в зависимости от величины ее вариации

В четвертой части данного раздела на основании результатов математического моделирования, полученных в предыдущей части раздела описывается синтез метода акустического контроля УДМУ применительно к ВУЖиН. Анализ характера дисперсионных искажений АС, возникающих в предложенной стержневой модели ВУЖиН, степени их влияния на точность предложенного метода и моделирование работы различных алгоритмов регистрации АС при наличии аддитивного шума позволил автору синтезировать метод акустического контроля модуля упругости ВУЖиН, учитывающий их специфику. В основе предложенного метода лежит импульсный временной метод акустического контроля СРПУВ, существенно отличающийся от своей канонической реализации наличием многократного зондирования образца с когерентным накоплением АС и регистрацией момента его прихода по максимуму огибающей. Многократное зондирование позволяет компенсировать значительное снижение амплитуды АС, а регистрация АС по максимуму его огибающей – увеличение длительности этого сигнала.

В пятой части раздела обосновывается применение статистического критерия Неймана-Пирсона для исключения грубых промахов при измерении УДМУ и рассчитываются характеристики обнаружения АС при помощи этого критерия. Технически, применение этого критерия позволяет при заданной вероятности ложных тревог (грубых промахов) – F и вероятности правильного обнаружения – D оценить требуемый уровень соотношения сигнал/шум. Так в этой части показано, что при $F=10^{-6}$ и $D=0,998$ соотношение сигнал/шум должно составлять 8,5.

В шестой части раздела описывается синтез алгоритмов и процедур, реализующих необходимую обработку АС в соответствии с предложенным методом и с учетом современной концепции цифровой обработки сигналов.

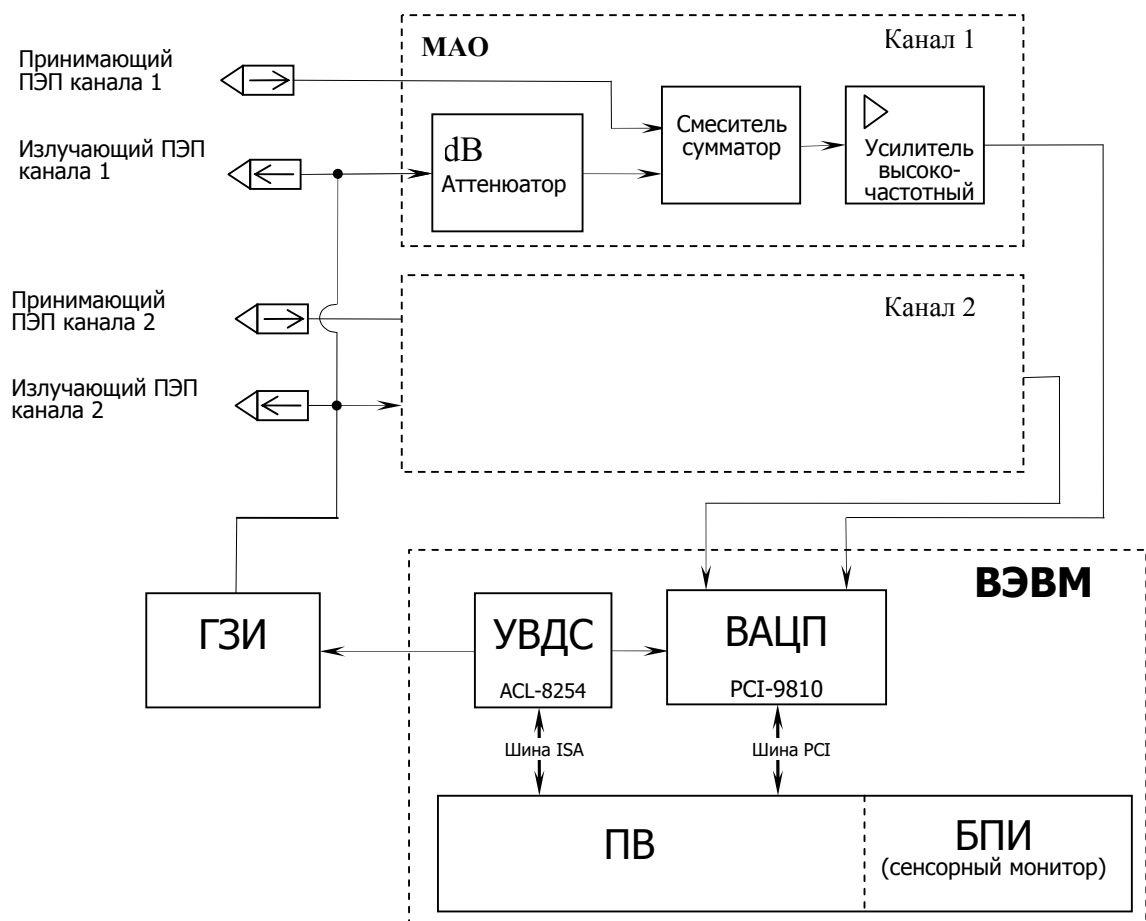
Итогом второго раздела является обоснование теоретической возможности контроля УДМУ ВУЖиН акустическим методом, учитывающим их специфику, синтез и детальная проработка общего алгоритма и отдельных процедур этого метода с учетом дискретного (цифрового) представления сигналов.

Третий раздел посвящен наиболее важным аспектам разработки устройств (типа УИМУ), реализующих предложенный акустический метод контроля УДМУ. В этом разделе описывается синтез схемотехнической, программной и конструктивной реализации вышеуказанных устройств, удовлетворяющих современным требованиям к приборам такого уровня, включая степень автоматизации и информатизации процесса контроля.

В первой части данного раздела формулируются основные требования к устройствам для реализации предложенного в предыдущем разделе метода акустического контроля.

Вторая часть раздела посвящена разработке схемотехники устройств для реализации предложенного акустического метода. Исходя из требований технического задания (ТЗ) на разработку, современных принципов построения информационно-измерительных систем и с учетом разработанных во втором разделе алгоритмов обработки АС, предлагается концепция схемотехники,

основанная на применении компактной встраиваемой ЭВМ (ВЭВМ) с процессорной архитектурой типа Intel x86 в промышленном исполнении в качестве базового элемента. Структурная схема, отражающая предложенную концепцию, приводится на рисунке 5. Согласно этой схеме, устройства УИМУ состоят из следующих основных узлов: ВЭВМ, состоящая из программируемого вычислителя (ПВ) и блока пользовательского интерфейса (БПИ) на основе сенсорного монитора. Эта ВЭВМ дополнена стандартными модулями расширения промышленного изготовления: высокоскоростным аналогово-цифровым преобразователем (ВАЦП), устройством вывода дискретных сигналов (УВДС) и специально разработанными электронными модулями: генератором зондирующего импульса (ГЗИ), модулем аналоговой обработки (МАО) и специализированными ПЭП с полуволновыми концентраторами. Согласованная работа этих модулей, в соответствии с заданным алгоритмом метода, реализуется с помощью ПО, которое выполняется в ПВ.



МАО – модуль аналоговой обработки; УВДС – устройство вывода дискретных сигналов; ВАЦП – высокоскоростной аналогово-цифровой преобразователь; ГЗИ – генератор зондирующего импульса; ПВ – программируемый вычислитель; БПИ – блок пользовательского интерфейса.

Рисунок 5 – Структурная схема устройств типа УИМУ

В третьей части раздела основное внимание уделено разработке ПЭП, специализированных для работы с ВУЖиН. Эти преобразователи представляют собой комбинацию классического прямого ПЭП промышленного изготовления и специально подобранного полуволнового концентратора.

В четвертой части раздела описана разработка кинематической схемы устройства, обеспечивающей оперативное закрепление, натяжение и прижим к ПЭП образцов ВУЖиН. Показано, что оптимальные значения растягивающего образца усилия лежат в диапазоне от 0,8 до 2,0 кгс.

В пятой части раздела описана разработка алгоритмов работы устройства в соответствии с предложенным методом акустического контроля и его схемотехнической реализацией. Работа устройства осуществляется следующим образом. Образец ВУЖиН натягивается и прижимается к приемному и излучающему ПЭП, находящихся друг от друга на фиксированном расстоянии (базе) – L. Процесс контроля, реализуемый благодаря ПО, находящемуся в памяти ВЭВМ, состоит из нескольких идентичных циклов. В ходе каждого цикла ГЗИ, по команде ПВ, формирует зондирующий импульс, который поступает через излучающий ПЭП в контролируемый образец и, одновременно, на один из входов МАО, где ослабляется в аттенуаторе и, пройдя через смеситель, поступает в общий усилительный тракт. В тот же тракт, через второй вход МАО, направляется и АС с приемного ПЭП; результирующий аналоговый сигнал преобразуется с помощью ВАЦП в последовательность дискретных цифровых отсчетов. Благодаря наличию УВДС, формирующего синхросигналы, преобразование в ВАЦП начинается синхронно с генерацией зондирующего импульса и длится, по крайней мере, дольше, чем максимально возможное время распространения АС по образцу. Далее дискретные цифровые отсчеты, полученные в ходе преобразования, поступают по цифровой шине в ПВ, где суммируются по соответствующим индексам с отсчетами, накопленными в предыдущих циклах, и результат запоминается. По накопленным отсчетам программным способом строится (вычисляется) огибающая, которая имеет два пика: первый из них соответствует зондирующему импульсу, а второй – АС, снятому с приемного ПЭП. На следующем шаге сравнивается отношение амплитуды пика АС к среднеквадратичному значению шума с пороговым значением, определяемым по критерию Неймана-Пирсона в соответствии с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложных тревог. Если это отношение больше порогового значения, ПО принимает решение о наличии АС, в противном случае – об его отсутствии. В случае наличия АС определяется временной интервал между пиками (максимумами) огибающей, обусловленными зондирующим и акустическим сигналами. Далее рассчитывается СРПУВ и, в конечном итоге, вычисляется, по формуле (1), значение УДМУ с последующей его индикацией и сохранением в базу данных устройства. В случае отсутствия АС индицируется сообщение «Ошб» (Ошибка) и в базу данных записывается значение «0».

В шестой части раздела описывается разработка модификаций вышеуказанного устройства. Для наиболее полного соответствия различным

сферам применения было разработано два варианта (типа) конструкции устройств. Первый вариант устройства – измеритель типа УИМУ-1БП, нацелен на оперативный контроль УДМУ при приемосдаточных испытаниях образцов ВУЖиН в промышленных объемах на предприятиях-изготовителях и потребителях ВУЖиН. Второй вариант – испытательная установка УИМУ-2П, предназначена для неразрушающего контроля УДМУ образцов ВУЖиН по их длине в процессе перемотки. Основное применение данного варианта устройства – детальный контроль УДМУ по длине образца в ходе научных исследований по оптимизации технологии получения ВУЖиН и конечных изделий из них.

В седьмой части раздела описываются наиболее важные аспекты разработки прикладного ПО вышеуказанных устройств. ПО устройств обеспечивает выполнение алгоритма предложенного акустического метода контроля, включая формирование синхронизирующих сигналов, цифровую обработку АС, расчет конечных результатов, их индизирование и сохранение в формате базы данных MS Access. Одна из частей ПО, отвечающая за измерительный алгоритм включая цифровую обработку сигнала, написана на языке программирования Visual C++ с использованием программной библиотеки Intel SPL, а другая часть, реализующая пользовательский интерфейс, документирование результатов измерения и их копирование, написана на Visual Basic. В качестве системного ПО на начальном этапе разработки использовалась операционная система типа Windows 98SE, а в последующем операционная система Windows XP Embedded, что положительно сказалось на надежности устройств.

В восьмой части раздела раскрыты значимые аспекты метрологического обеспечения данных устройств, наиболее важным из которых является проведение специальных испытаний с целью получения статуса измерителя на устройство УИМУ-1БП (с занесением в Государственный реестр средств измерения) и разработка специализированных стандартных образцов для проверки метрологических характеристик этих устройств. Перед проведением вышеуказанных испытаний была оценена погрешность измерения на основании результатов моделирования, приведенных в первом разделе, и результатов предварительной оценки метрологических характеристик, приведенных в четвертом разделе. Эти результаты показали возможность достижения погрешности измерения УДМУ менее 1,6 %. Однако, учитывая специфику объекта контроля и техническую возможность воспроизведения заданной погрешности измерения на нескольких устройствах, целесообразно ориентироваться на величину погрешности определения УДМУ данными устройствами на уровне 2%.

В четвертом разделе описываются наиболее значимые экспериментальные исследования физико-механических свойств (в первую очередь упругих характеристик) ВУЖиН с целью проверки адекватности предложенной стержневой модели ВУЖиН и применимости УДМУ в качестве объективной характеристики упругих свойств ВУЖиН.

В первой части раздела ставятся цели и задачи экспериментальных исследований. В ходе экспериментальных исследований предполагалось достичь трех основных целей:

- проверить состоятельность предложенной модели ВУЖиН с точки зрения распространения ультразвука в них;
- оценить количество ВУЖиН (в процентах), у которых может быть определен УДМУ предложенным методом акустического контроля;
- показать сопоставимость значений УДМУ и УСМУ для широко распространенных типов ВУЖиН и возможность использования УДМУ в качестве объективной характеристики их упругих свойств.

Во второй части раздела описываются экспериментальные работы по достижению первой цели – проверке состоятельности предложенной модели ВУЖиН. В ходе работ получена экспериментальная зависимость величины затухания АС в ВУЖиН от его частоты. График зависимости амплитуды АС, прошедшего через образец ВУЖиН, от частоты показан на рисунке 2 сплошной линией. На том же графике пунктиром показана теоретическая зависимость. Приведенные экспериментальные результаты подтверждают адекватность предложенной в первом разделе стержневой модели ВУЖиН (в виде набора линейно-упругих стержней) для описания процесса распространения продольной ультразвуковой волны и обоснованность использования предложенного метода акустического контроля УДМУ.

В третьей части раздела показаны экспериментальные работы по достижению второй из вышеуказанных целей, а именно оценке той доли ВУЖиН, к которым может быть применен синтезированный метод акустического контроля. Для этого, с помощью предложенной автором оригинальной методики обработки АС, основанной на его инверсной фильтрации с последующим восстановлением импульсной характеристики образца $h(t)$, и с учетом формулы, (5) проведена оценка параметра¹ $\Delta\nu$. Следует подчеркнуть, что $\Delta\nu$ характеризует величину дисперсии СРПУВ в образце и определяет, в конечном итоге, погрешность предложенного метода измерения УДМУ.

Эта оценка параметра $\Delta\nu$ у группы образцов позволяет сделать следующие выводы:

- для 97,6 % образцов значение $\Delta\nu$ составляет менее 0,75% и погрешность определения УДМУ будет менее 1,6 %;
- для 0,8 % образцов значение $\Delta\nu$ находится в диапазоне 0,75 до 1,0% и погрешность определения УДМУ составит менее 2,0 %;

1,6 % от общего числа образцов имеют столь значительное затухание ультразвука (обусловленное, по всей видимости, значительной дисперсией СРПУВ), что не удалось зафиксировать АС и, следовательно, невозможно измерить УДМУ (ограничение акустического метода контроля). Таким

¹ Параметр $\Delta\nu$ является коэффициентом вариации СРПУВ по филаментам ВУЖиН

образом, не менее 98,4% ВУЖиН может быть проконтролировано предложенным методом.

В четвертой части раздела раскрывается содержание и результаты исследовательских работ, направленных на достижение третьей из вышеуказанных целей, суть которой в подтверждении возможности использования УДМУ в качестве объективной характеристики упругих свойств ВУЖиН. В этой части приводятся результаты контроля УДМУ и УСМУ (акустическим и механическим методами соответственно) четырех наиболее распространенных типов ВУЖиН отечественного производства. Корреляционный анализ полученных результатов приводится в таблице 1, графики линейных зависимостей УДМУ от УСМУ показаны на рисунке 6.

Таблица 1 – результаты корреляционного анализа значений УДМУ и УСМУ для различных типов ВУЖиН

Номер графика	Тип ВУЖиН	Формула линейной зависимости	Коэффициент корреляции	Диапазон E_{uc} , км	Количество образцов, шт
1	ВМН-4М	$E_{уд}=1,034 \times E_{uc} + 327$	0,94	17000-28500	155
4	ВМН-4МТ	$E_{уд}=1,02 \times E_{uc} - 209$	0,98	13600-28000	124
3	ГЖ 23/550К	$E_{уд}=0,87 E_{uc} + 3260$	0,85	19200 -27500	126
5	Кулон-К	$E_{уд}=1,0002 \times E_{uc}$	0,89	19000-26000	279
2	Совокупная, для всех ВУЖиН	$E_{уд}=0,92 E_{uc} + 1793$	0,95	13600-28500	813 ²

Анализ результатов показывает, что эти зависимости находятся в пределах коридора в 1300 км в диапазоне значений УСМУ от 16000 до 24000 км. Наиболее вероятная причина расхождений между УДМУ и УСМУ – специфичные для каждого типа ВУЖиН дефекты структуры филаментов и количество этих дефектов, обусловливаемое исходным сырьем и технологией получения этих ВУЖиН и релаксационными процессами, которые сопутствуют возбуждаемым в образце акустическим колебаниям.

При необходимости формула пересчета между УДМУ и УСМУ может быть получена практически для любого типа ВУЖиН на основе небольшого количества экспериментальных данных. Таким образом, УДМУ является объективной характеристикой упругих свойств ВУЖиН и может применяться для оценки упругих характеристик конечных изделий из них.

² В совокупную зависимость включены прочие типы ВУЖиН, которые в данной таблице отдельно не показаны

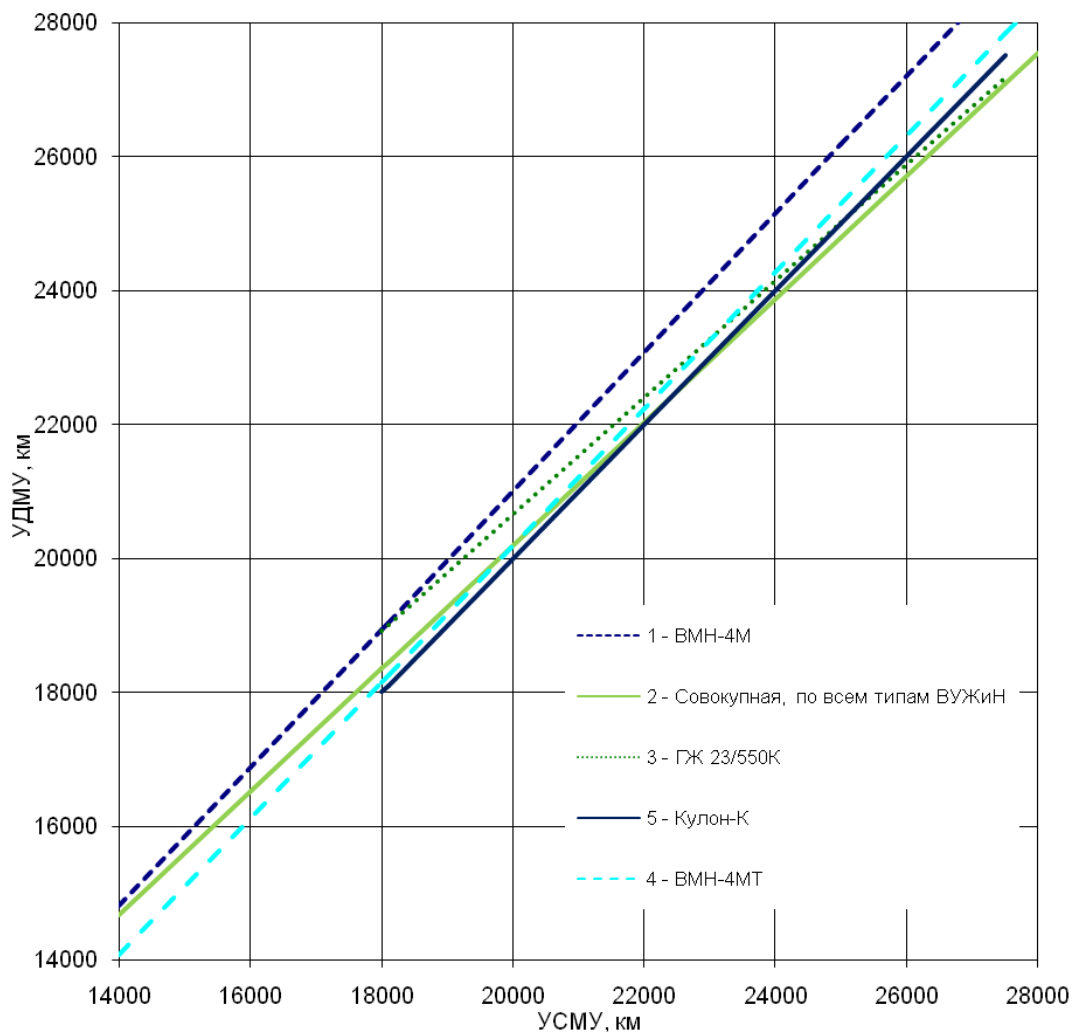


Рисунок 6 – линейные зависимости между УСМУ и УДМУ

Пятый раздел посвящен раскрытию наиболее важных аспектов апробации и внедрения акустических методов контроля модуля упругости и устройств, их реализующих, типа УИМУ-1БП, как в условиях опытной эксплуатации в ООО «ННКЦ», так и при промышленном использовании на ряде предприятий. В этом разделе раскрывается содержание работ по оценке характеристик и доводке устройств типа УИМУ-1БП в ходе их опытной эксплуатации.

В первой части данного раздела раскрываются аспекты опытной эксплуатации устройств типа УИМУ-1БП в ООО «ННКЦ». Основной целью опытной эксплуатации устройств типа УИМУ-1БП и УИМУ-2П являлась оценка соответствия их основных характеристик требованиям технического задания.

Во второй части раздела описываются значимые аспекты промышленной эксплуатации измерителей УИМУ-1БП на трех предприятиях и комплексная оценка характеристик этих устройств во время этой эксплуатации в течение одного года.

Оценка проводилась по четырем нижеприведенным критериям:

- конструкция и эргономика измерителей;
- эксплуатационная надежность измерителей;
- стабильность метрологических характеристик измерителей;
- сопоставимость результатов контроля УДМУ между предприятиями.

По всем вышеприведенным критериям получены положительные оценки, а выявленные незначительные замечания, касательно пользовательского интерфейса измерителей и работы механизмов для зажима образцов, были оперативно устранены.

В третьей части раздела проводится сравнительный анализ технико-экономических характеристик предложенного автором акустического метода контроля модуля упругости и традиционно используемого для этих целей механического метода. Результаты анализа приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – технико-экономические характеристики методов

Параметр	метод	
	акустический	механический
Время выполнения единичного измерения, мин	<3	360 ³
Погрешность измерения, %	2	3
Относительная трудоемкость, %	От 30 до 50	100
Трудоемкость технического обслуживания, ч/год	25	15

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

³ Большую часть этого времени занимает приготовление микропластика. Как правило, микропластик делается для нескольких образцов сразу, однако результат получается не ранее, чем через 6 часов

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения данной работы решена задача оперативного контроля и измерения модуля упругости ВУЖиН.

1. Для анализа процесса распространения продольной акустической (ультразвуковой) волны в ВУЖиН предложена модель, в которой составляющие их филаменты заменены набором линейно-упругих стержней. Показано, что импульсная характеристика предложенной стержневой модели ВУЖиН определяется только лишь функцией плотности распределения стержней по СРПУВ и линейным размером модели; УДМУ упругого тонкого стержня является линейной функцией от одного аргумента – квадрата СРПУВ.

2. Моделирование распространения продольных акустических волн по ВУЖиН показало наличие существенных дисперсионных искажений АС, которые выражаются в увеличении длительности и уменьшении амплитуды этого сигнала до таких значений, при которых его регистрация невозможна, что, в свою очередь, делает невозможным определение СРПУВ и, следовательно, величины УДМУ акустическим методом.

3. По результатам моделирования и анализа характера вышеуказанных дисперсионных искажений разработан акустический метод, учитывающий специфику ВУЖиН (значительные дисперсионные искажения АС) и существенно отличающийся от своих классических реализаций наличием когерентного накопления АС с регистрацией времени его прихода по максимуму огибающей и применением статистического критерия Неймана-Пирсона. В итоге, с помощью разработанного метода возможно достоверно контролировать УДМУ не менее чем у 98% ВУЖиН при погрешности контроля менее 2%.

4. Показанная сопоставимость результатов УСМУ и УДМУ позволяет воспринимать значение УДМУ, как объективную характеристику упругих свойств ВУЖиН в широком спектре их марок и типов. Получены формулы линейных зависимостей между УДМУ и УСМУ для пяти типов ВУЖиН.

5. Разработанный в рамках темы данной работы измеритель модуля упругости углеродных жгутов и нитей типа УИМУ-1БП занесен в Государственный реестр средств измерения. Вышеуказанные измерители используются на восьми предприятиях. Внедрение этих приборов в значительной степени способствовало решению трех важных производственных задач:

- организации приемосдаточных испытаний ВУЖиН на предмет величины УДМУ;
- осуществлению оперативного технологического контроля УДМУ на различных стадиях производства ВУЖиН;
- повышению качества исследовательских работ по улучшению характеристик существующих типов ВУЖиН, созданию новых типов и конечных изделий.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Патент RU 2281464 C2 G01H 5/00. Способ измерения скорости ультразвука в углеродных жгутах и нитях и устройство для его осуществления / Салмин С. А. и др. (Федеральное государственное унитарное предприятие Уральский электрохимический комбинат). - № 2004120078/28; Заявл. 01.07.2004 // Изобретения (Заявки и патенты). - 2006. - № 22.
2. Салмин, С. А. Автоматизированный комплекс для контроля модуля упругости углеродных жгутов / С. А. Салмин., К. К. Шевараков // Автоматизация и прогрессивные технологии: Труды IV межотраслевой научно-технической конференции. — Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2005. — С. 34–37.
3. Исследование взаимосвязи между статическим удельным модулем упругости на растяжение жгута ВМН—4М в микропластике и его динамическим удельным модулем упругости: отчет по НИР / УЭХК. Руководитель Сапсай К. Г., отв. исполн. Салмин С. А. Инв. 20/6446. Новоуральск, 1999 – 28л.
4. С. А. Салмин, К. К. Шевараков, С. Н. Новаков. О разработке и применении стандартных образцов при измерении параметров углеродных жгутов и нитей // Стандартные образцы. — 2007. — №4. — С. 26-29.
5. Разработка и применение акустического метода контроля модуля: отчет по НИР / ООО «ННКЦ». Руководитель Шевараков К. К., отв. исполн. Салмин С. А. Инв. НКЦ/9734. Новоуральск, 2008. — 68л.
6. С. А. Салмин, К. К. Шевараков. О соотношении между динамическим и статическим модулем упругости некоторых типов углеродных волокон. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2010. — №10. — С. 34-36.
7. С. А. Салмин, К. К. Шевараков. Разработка измерителя модуля упругости углеродных волокон, реализующего акустический метод// Приборы. —2011— №4— С. 4-10.

Подписано к печати 24.10.2011. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 1,22. Уч.-изд.л. 1,10.
Заказ 1535-11. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-38-63, www.tpu.ru